



120 ÉVES AZ ELEKTROTECHNIKAI ÉS ELEKTRONIKAI INTÉZETI TANSZÉK ELNEVEZÉSŰ JUBILEUMI KONFERENCIA KIADVÁNYA

A KONFERENCIÁN ELHANGZOTT ELŐADÁSOK KIVONATAI



Miskolc, 2024. október 17.

ISBN 978-963-358-356-2



MISKOLCI
EGYETEM
UNIVERSITY OF MISKOLC



GÉPÉSZMÉRNÖKI
ÉS INFORMATIKAI KAR



FIZIKAI ÉS
ELEKTROTECHNIKAI
INTÉZET

Jubileumi Konferencia - 120 éves az Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék

2024. október 17.

Kiadta:

Miskolci Egyetem Gépészmérnöki és Informatikai Kar

Fizikai és Elektrotechnikai Intézet

Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék

Szerkesztette:

Dr. Molnár Judit

egyetemi docens

Miskolci Egyetem

Szervező- és Tudományos Bizottság tagjai:

Dr. habil. Bodnár István, Dr. Molnár Judit,

Dr. Kozsely Gábor, Dr. Szaszák Norbert Tibor

ISBN 978-963-358-356-2

Miskolc, 2024.

A kiadványban megjelenő publikációk lektoráltak!

A kiadványban megjelenő tartalomért és a forrásmegjelölésért a kiadó felelősséget nem vállal!

A teljes felelősség a szerző(ke)t terheli!

Fizikai és Elektrotechnikai Intézet - Miskolci Egyetem

Jubileumi Konferencia - 120 éves az Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék

2024. október 17.

ELŐSZÓ

Leírások szerint a Miskolci Egyetem Fizikai és Elektrotechnikai Intézet Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszékének jogelődje 1904. szeptember 1-jén alakult és kezdte meg működését Fizika-Elektrotechnika Tanszék néven Selmecebányán. A Tanszék 1919-ben Trianon miatt Sopronba költözött, később pedig az 1949-ben Miskolcon Alapított Nehézipari Műszaki Egyetemen találta meg végleges helyét, ahol ennek szellemében mai napig töretlenül képezi a hallgatókat az elektrotechnika, elektronika és kapcsolódó tudás-területek ismeretére ezzel hozzájárulva újabb mérnöknemzedékek kineveléséhez. A Miskolci Egyetem Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék 120 éves fennállásának méltó megünneplésére 2024. október 17-én Jubileumi Konferencia került megrendezésre.

A Jubileumi Konferencia méltó lezárásaként Nosztalgiavillamosozásra és Villamos Szakestre került sor (a Miskolc Városi Közlekedési Zrt. jóvoltából) az 1962-es gyártmányú, FVV 1100 típusú, 100-as pályaszámú „Bengáli, alias Ampervadász Tigris” nevet viselő nosztalgia villamossal. Az első kört az 1-es jelzésű villamosvonalon a Vasgyár érintésével (Tiszai Pályaudvar – Újgyőri Főtér – Vasgyár – Újgyőri Főtér – Felső-Majláth – Tiszai Pályaudvar) tettük meg. Ezt követően bejártuk a 2-es jelzésű és az egykori 3-as jelzésű villamosvonalat is. A villamoson a jó hangulatról a Selmeci nóták gondoskodtak.

A rendezvényen számos előadó, résztvevő és kiállító vett részt. A konferencián elhangzott előadásokból készült jelen konferenciakiadvány.

Kelt: Miskolc, 2024. december 13.

Szervező- és Tudományos Bizottság

Jubileumi Konferencia - 120 éves az Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék

2024. október 17.

KIEMELET TÁMOGATÓNK

Cég neve: MVM Cégcsoport



Cég székhelye: 1031 Budapest, Szentendrei út
207-209.;

Cég honlapja: <https://mvm.karrierportal.hu/> ; <https://mvm.hu/>

Cég bemutatása: Az MVM Csoport meghatározó szereplője a magyar energiarendszernek, sikeres és versenyképes tevékenységével fontos szerepet vállal az ország energiastratégiai céljainak megvalósításában. Az MVM Csoport egyre bővülő portfóliója lefedi a teljes magyar energetikai szektort. Kiegészítő szolgáltatásaival (pl. informatika, pénzügyi és biztonsági szolgáltatások) felkészült az egyre összetettebb fogyasztói igények teljes körű, egy kézből történő kiszolgálására.

TARTALOMJEGYZÉK

Bodnár István

120 ÉVES AZ ELEKTROTECHNIKAI ÉS ELEKTRONIKAI INTÉZETI TANSZÉK 3

Bolló Betti, Sarka Ferenc, Voith Katalin

VASÚTI FÉKTUSKÓK HŐVEZETÉSI TULAJDONSÁGÁNAK JAVÍTÁSA MAKRO-SZERKEZETI VÁLTOZTATÁSSAL, EGYSZERŰSÍTETT VÉGESELEM MODELL SEGÍTSÉGÉVEL 11

Boros Rafael Ruben, Bodnár István

DINAMIKUS ENERGIAMENEDZSMENT NAPELEMES SZÜNETMENTES TÁPEGYSÉGEKHEZ 17

Fekete Tamás

VILLAMOS ANALÓGIA HASZNÁLATA A HIDRAULIKUS HAJTÁSOKNÁL 33

Forgács Zsófia

FORGÓ ALKATRÉSZEK FORGÁSTENGYELMENTI ELMOZDULÁSÁNAK MÉRÉSE LINE SCAN KAMERÁVAL 37

Jobbágy Marcell, Bodnár István, Bartók Roland

A MESTERSÉGES INTELLIGENCIA A TÖMEGKÖZLEKEDÉSBEN 49

Kovács Attila, Molnár Judit

INTEGRÁLT HARMONIKUS SZŰRŐK HATÉKONYSÁGÁNAK VIZSGÁLATA 60

Kozsely Gábor

A VILLAMOS SZIMULÁCIÓ ÉS MODELLEZÉS TANTÁRGY HELYE A VILLAMOSMÉRNÖKI MSC KÉPZÉSBEN 76

Kozsely Gábor

A VILLAMOS ÉS MECHANIKAI RENDSZEREK KÖZÖTTI ANALÓGIA OKTATÁSÁNAK MÓDSZERTANA 82

Marscsa Dániel

NAGYSEBESSÉGŰ ÁLLANDÓ MÁGNESES GÉPEK SAJÁTOSSÁGAI ÉS SZIMULÁCIÓJA 89

Matusz-Kalász Dávid, Bodnár István

A NAPELEM MODULOK ELEKTROLUMINESZCENCIA VIZSGÁLATÁNAK GYAKORLATI ASPEKTUSAI 99

Matusz-Kalász Dávid, Jobbágy Marcell

AZ ELSŐ NAPELEM ELEKTROLUMINESZCENCIA KÉPEK AZ EEIT LABORATÓRIUMÁBAN 107

Molnár Judit, Kovács Attila

EGY HÁZTARTÁSI MÉRETŰ KISERŐMŰ MEGTÉRÜLÉSI IDEJÉNEK VIZSGÁLATA
KÜLÖNBÖZŐ ELSZÁMOLÁSI FORMÁK ESETÉN 113

Móré Ádám, Bódi Bence László

PID SZABÁLYOZÓ MODELLEZÉSE PLC KIMENETI ÉS BEMENETI OLDALAIN:
KÁRTYACSERE HATÁSÁNAK VIZSGÁLATA..... 122

Móré Ádám, Mágori Zsombor

ÉRINTKEZÉSMENTES FORDULATSZÁMMÉRÉS ÖSSZEHASONLÍTÁSA HALL- ÉS
INDUKCIÓS-SZENZOROKKAL..... 130

Móré Ádám, Sirokai György Koppány

IPARI AUTOMATIZÁLÁS ÚJ SZINTJE: SIEMENS S7-300 ÉS S7-1500 PLC-K KÖZÖTTI
MIGRÁCIÓ LEHETŐSÉGEI ÉS KIHÍVÁSAI 138

Palla Gyula

A MESTERSÉGES INTELLIGENCIA SZEREPE AZ ÉPÜLETAUTOMATIKÁBAN 142

Szaszák Norbert, Juhász Kristóf Gábor

TERMOSZIFON-PROTOTÍPUS ÖSSZEÁLLÍTÁSA HŐTECHNIKAI
VIZSGÁLATOKHOZ 149

Tóth Dániel, Fekete Tamás

SZERSZÁMGÉPEK REZGÉSEINEK VIZSGÁLATA..... 157

Tóth Dániel, Fekete Tamás

CSAPÁGYREZGÉSEK VIZSGÁLATA 161

120 ÉVES AZ ELEKTROTECHNIKAI ÉS ELEKTRONIKAI INTÉZETI TANSZÉK

THE DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING IS
120 YEARS OLD

BODNÁR István

Ph.D., egyetemi docens, istvan.bodnar@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet,
Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék, 3515 Miskolc-Egyetemváros

Kivonat: *A tanulmány a Selmechányán alapított Fizika-Elektrotechnika tanszék rövid történetét mutatja az elmúlt 120 évben bekövetkezett fontosabb változások bemutatásán keresztül. A Fizika Tanszék és az Elektrotechnika Tanszék története során, hogy együtt, hol különállóan működött. A történelem folyamán 2 alkalommal költözni kényszerült. A Fizika Tanszék Sopronban, az Elektrotechnika Tanszék pedig Miskolcon találta meg végleges helyét.*

Kulcsszavak: *fizika, elektrotechnika, Selmechánya, Sopron, Miskolc*

Abstract: *This paper presents a brief history of the Department of Physics and Electrotechnics, founded in Selmechánya, through the presentation of the most important changes that have occurred in the last 120 years. During the history of the Department of Physics and the Department of Electrical Engineering, how did it work together or separately. During its history, it was forced to move twice. The Department of Physics found its final location in Sopron and the Department of Electrical Engineering in Miskolc.*

Keywords: *physic, electrotechnics, Selmechánya, Sopron, Miskolc*

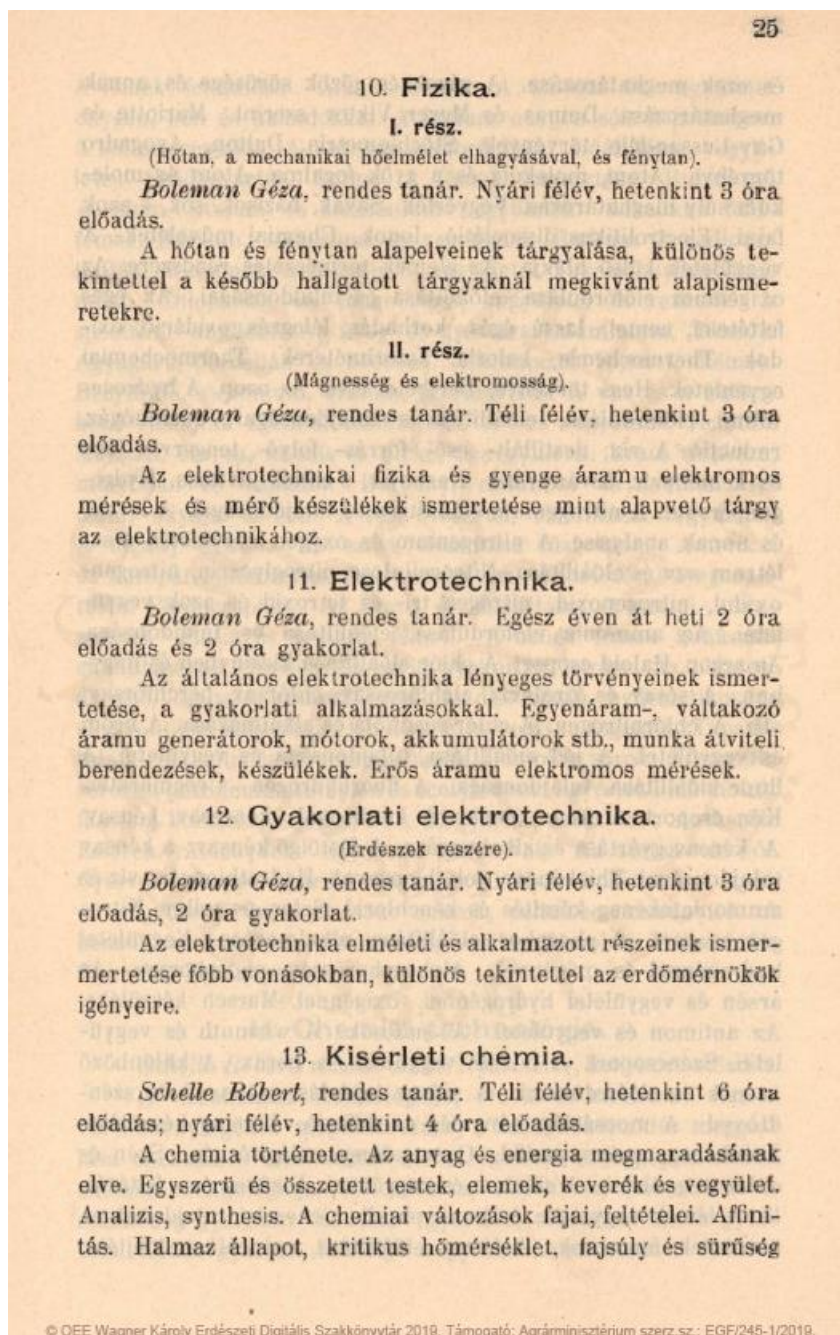
1. BEVEZETÉS

A leírások szerint a Miskolci Egyetem Fizikai és Elektrotechnikai Intézet Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszékének jogelődje 1904. szeptember 1-jén alakult és kezdte meg működését Fizika-Elektrotechnika Tanszék néven Selmechányán. A Tanszék 1919-ben Trianon miatt Sopronba költözött, később pedig az 1949-ben Miskolcon alapított Nehézipari Műszaki Egyetemen találta meg végleges helyét [1]. A Miskolci Egyetem ennek szellemében mai napig töretlenül képezi a hallgatókat a fizika, az elektrotechnika és elektronika, valamint a kapcsolódó tudásterületek ismeretére ezzel hozzájárulva újabb mérnökmenedékek kineveléséhez.

2. FIZIKA-ELEKTROTECHNIKA TANSZÉK - SELMECHÁNYA

A Magyar Királyi Bányászati és Erdészeti Főiskola 1904-ben jelentős átszervezésen esett át, amely eredményeként 1904. szeptember 1-jén létrehozták a Fizika-Elektrotechnika Tanszékét. A tanszék első vezetőjének Boleman Gézát nevezték ki szeptember 4-én. A Selmechányai Hírmondó XIV. évfolyamának 39. számában 1904. szeptember 25-én jelent meg, hogy Dr. Boleman Géza adjunktus urat a Magyar Királyi Pénzügyminiszter ideiglenes minőségében a VIII. osztályába sorozott főiskolai rendkívüli tanárrá nevezte ki [2]. Akkoriban egy személyben ő maga jelentette az egész tanszékét. Munkáját később Fazék Gyula tanársegéd és Haidegger Ernő adjunktus segítette.

A Magyar Királyi Bányászati és Erdészeti Főiskola minden évben elkészítette és kiadta a tanév programját tartalmazó füzetet. A füzetben a főiskola személyzete, oktatói, az oktatott tantárgyak programjai és az órarendek kerültek bemutatásra. Az 1907/1908-as tanévnek programja 116 oldalból állt. Az *1. ábra* a Boleman Géza által oktatott tantárgyak tematikáit szemlélteti.



1. ábra: *Boleman Géza által oktatott tantárgyak tematikái az 1907/1908-as tanévben [3].*

Az akadémia selmecebányai létezésének is a vesztes világháború, illetve az annak következményeként megkötött trianoni békeszerződés vetett véget. A főiskola 1918 végén megkezdte elköltözését Selmecebányáról. Miközben laboratóriumainak, oktatási eszköztárának egy része ott maradt, az értékes könyvtárat és a gyűjtemények nagy részét sikerült átmenekíteni. A diákság többsége 1918. december közepén elhagyta Selmecebányát és hazautazott, míg a tanárok a székhelykérdés megoldásáig hivatali helyükön maradtak. Az új helyszín kérdése több hónapos bizonytalanság és huzavona után (eleinte Budapest, Gödöllő és Miskolc is felmerült helyszíneként) végül Sopron javára dőlt el. A Sopronba került főiskola áldatlan körülmények között, szükségépületekben, fűtetlen laktanyákban kezdte meg működését 1919. áprilisában [4].

3. FIZIKA-ELEKTROTECHNIKA TANSZÉK - SOPRON

1919-ben, miután Selmecebánya a megalakuló Csehszlovákiához került, a főiskola Sopronba települt át. 1934-1949 között az erdőmérnök képzés a József Nádor Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Bánya-, Kohó- és Erdőmérnöki Karán folyt. Az önálló Erdőmérnöki Főiskola 1952-ben jött létre. Az Erdőmérnöki Főiskolán belül 1957-ben elindult a faipari mérnökök képzése, majd az önálló Faipari Mérnöki Kar létrehozásával 1962-ben megalakult az Erdészeti és Faipari Egyetem. A Bányamérnöki Kart és a Kohómérnöki Kart 1949-ben átköltöztették Miskolcra, ahol a Nehézipari Műszaki Egyetem Karai lettek [4].

Boleman Géza 1904 és 1947 között vezette a Fizika-Elektrotechnikai Tanszékét. 1947-ben a tanszék különvált, így önállóan folytatta tevékenységét a Fizika Tanszék és az Elektrotechnika Tanszék. A különválás azonban nem tartott sokáig, ugyanis 1959-ben az Elektrotechnika Tanszék véglegesen Miskolcra költözött. Emiatt Sopronban a Fizika Tanszék újra visszakapta a Fizika-Elektrotechnika Tanszék nevet. A Fizika-Elektrotechnika Tanszék 1999-ben Fizika Intézet, majd 2006-ban Fizika és Elektrotechnika Intézet lett [1, 4].

Az 1959-ben újrászervezett Fizika-Elektrotechnika Tanszék vezetője Barta Ernő volt, aki 1963. januárjában bekövetkezett haláláig vezette azt. A Faipari Mérnöki Kar megalakulásakor a tanszék erre Karra integrálódott be. Barta Ernőt Béldi Ferenc követte, aki 1986-ig volt a Tanszék vezetője. 1986-1991 között Molnár Sándor, Bálint József és Szabó József Tanár Urak váltották egymást a vezetésben. 1991-ben Papp György lett a vezető. Papp György 1991 és 2013 között vezette az Intézetet, majd átadta a feladatot Divós Ferencnek, akit 2016-ban Joóbné Preklet Edina váltott, aki 2021-ig vezette azt [5].

A Soproni Egyetem 2021-ben átalakult és a Faipari Mérnöki Kar Faipari Mérnöki és Kreatívipari Kar néven folytatta tovább. Ennek következtében a Fizikai és Elektrotechnikai Intézet nevében megszűnt, pontosabban beépült az Alaptudományi Intézetbe. Az 1. táblázat tartalmazza a Tanszék/Intézet vezetők nevét időrendi sorrendben.

1. táblázat: A Soproni Tanszék/Intézet vezetői időrendi sorrendben.

Boleman Géza 1904-1947	Simonyi Károly 1947-1952
Vörös Imre 1952-1959	Barta Ernő 1959-1963
Béldi Ferenc 1963-1986	Molnár Sándor, Bálint József és Szabó József 1986-1991 között felváltva
Papp György 1991-2013	Divós Ferenc 2013-2016
Joóbné Preklet Edina 2016-2021	Németh László 2021-

4. FIZIKA TANSZÉK, ELEKTROTECHNIKA TANSZÉK - MISKOLC

A Nehézipari Műszaki Egyetemen 1949-ben alapították meg a Fizika Tanszékét. A Tanszék a Földes Ferenc Gimnáziumban kezdte meg működését a frissen alapított Gépészmérnöki Kar öt alapító Tanszékének egyikeként. Az első miskolci tanóra 1949. szeptember 18-án volt, mégpedig fizika előadás.

A miskolci Elektrotechnika Tanszékét 1950-ben alapították. Az Egyetemváros megépültéig a Fizika Tanszékkel együtt a Földes Ferenc Gimnáziumban kapott helyet. A soproni Elektrotechnika Tanszék 1959-ben Miskolcra költözött, így a selmecebányai hagyatékok a soproni hagyatékokkal kiegészülve Miskolcra került (tankönyvek, műszerek, eszközök és oktatók), ezzel hivatalosan is a Selmecebányai alapítású Tanszék jogutódjává vált [5].

Az Elektrotechnika Tanszék az 1970-es és az 1980-as években bővítette oktatásának palettáját az elektronika irányába, ezért a Tanszék neve Elektrotechnika-Elektronika Tanszék névre változott. A Tanszék ezt követő évtizedeiben több alaklammal változott a szervezeti felépítés. 1989-ben csatlakozott az Informatikai Intézethez. Az Intézet négy Tanszékkal működött egészen 1998-ig, amikor az Elektrotechnikai-Elektronikai Tanszék, valamint az Automatizálási Tanszék létrehozta a Villamosmérnöki Intézetet. 2006-ben az intézet megszűnt és a Tanszék újra önállóan működött egészen 2013-ig, amikor ismételtén visszaállították a Villamosmérnöki Intézetet. 2016-ban újabb szervezeti átalakulás következett, amely eredményeként jött létre az Elektrotechnikai és Elektronikai Intézet. 2019-ben a 70. miskolci tanév alkalmával a selmecbányai hagyományokhoz visszatekintve alapították meg a Fizikai és Elektrotechnikai Intézetet, amelyen belül működik tovább a Fizikai Intézeti Tanszék, valamint az Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék. A Tanszékek korábbi vezetőinek neveit a 2. és a 3. táblázat sorolja fel [6].

2. táblázat: *A Fizika Tanszék vezetői időrendi sorrendben.*

Doktorics István 1949-1950	Kónya Albert 1950-1952
Nagy Elemér 1952-1956	Demjén József 1956-1958
Somogyi Antal 1958-1961	Szabó János 1961-1964, 1967-1979 és 1980-1981
Cornides István 1964-1966	Fáy Gyula 1966-1967
Szótér László 1979-1980 és 1981-1993	Ág Árpád 1993-1996
Demendy Zoltán 1996-2004	Paripás Béla 2004-2019
Kovács Endre 2019-	-

3. táblázat: *Az Elektrotechnikai és Elektronikai Tanszék vezetői időrendi sorrendben.*

Fischer György 1950	Csáki Frigyes 1951
Uray Vilmos 1951-1976	Szabó Szilárd 1976
Szarka Tivadar 1976-1979 és 1995-1999	Szentirmai László 1979-1995
Kovács Ernő 1999-2014	Blága Csaba 2014-2019
Tóth Lajos 2019	Siménfalvi Zoltán 2019
Bodnár István 2019-	-

5. KÉPGALÉRIA

5.1. Időkapszula elhelyezése

A Tanszék alapításának 120. évfordulója után 1 nappal, 2024. szeptember 2-án időkapszulát helyeztünk el a Miskolci Egyetem A3 épület B szárnyának II. emeletén található V. laboratórium egykori kapcsoló- és elosztószekrényének padlójában. Az időkapszula feltárásának időpontját egy tábla őrzi, amely időpontot a Tanszék alapításának 150. évfordulójára időzítettük.

Az időkapszula felnyitását 2054. szeptember 1-én, 15:00-kor az egykori és akkori tanszéki

dolgozók jelenlétében, ünnepélyes keretek között tegyék meg!

Az idő kapszulában a kor szellemének megfelelően hagyunk a jövő nemzedékére napilapokat, fényképeket és személyes tárgyakat. Bízunk abban, hogy az idő kapszula a következő 30 évet épségben kibírja és a 120 éves Jubileumi Ünnepségen résztvevők minél nagyobb létszámában lesznek jelen a 150 éves évforduló alkalmával tartandó ünnepségen és az idő kapszula feltárásán.

A 2. és a 3. ábra az idő kapszula elhelyezése során készült. A 2. ábra az elhelyezés előtti percekben készült Tanszéki csoportkép, a 3. ábra pedig az idő kapszula elhelyezését mutatja.



2. ábra: Az idő kapszula elhelyezése előtt készült Tanszéki csoportkép.



3. ábra: Az idő kapszula „bebetonozásának” egy pillanatképe.

5.2. 120 éves jubileumi konferencia

A Tanszék alapításának 120. évfordulója alkalmával Jubileumi Konferenciát és Villamosmérnöki Szakmai Napot tartottunk, amelyet kiállítás színesített. [A programfüzet itt érhető el.](#)

Egyetemi képgaléria (Végh Csaba fotói):

[120 éves a Miskolci Egyetem Fizikai és Elektrotechnikai Intézete | Flickr](#)

Sajtómegjelenések:

<https://minap.hu/cikk/szazhusz-eves-lett-miskolci-egyetem-elektrotechnikai-intezete>

<https://www.uni-miskolc.hu/hirek/120-eve-az-elektrotechnika-es-az-elektronika-szolgalataban/>

<https://www.boon.hu/helyi-kozelet/2024/10/elektrotechnikai-es-elektronikai-intezeti-tanszek>

<https://www.youtube.com/watch?v=rTYRHLHXHGc>

5.3. A Bengáli, alias Ampervadász Tigris villamoson tartott Villamos Szakest

Az ünnepség méltó lezárásaként Nostalgia villamosozásra és Villamos Szakestre került sor a Miskolc Városi Közlekedési Zrt. jóvoltából. Az 1962-es gyártmányú, FVV 1100 típusú, 100-as pályaszámú „Bengáli, alias Ampervadász Tigris” nevet viselő nosztalgia villamossal. Az első utunkat a 2-es jelzésű villamosvonalon kezdtük meg, majd pedig áttértünk az egykori 0-s jelzésű és a jelenlegi 1-es jelzésű vonalra (Tiszai Pályaudvar – Újgyőri Főtér – Vasgyár – Újgyőri Főtér – Felső-Majláth). Ezt követően bejártuk az egykori 3-as jelzésű villamosvonalat is (Felső-Majláth – Vasgyár – Újgyőri Főtér – Felső-Majláth); utunkat az 1-es jelzésű fővonalon folytattuk a Tiszai Pályaudvar irányába, végül pedig a 2-es jelzésű vonalon zártuk; a Vasgyárban egy kisebb szünetet tartottunk mielőtt visszatértünk a Tiszai Pályaudvarra. Az Egyetemváros és a Tiszai Pályaudvar között az IKARUS 280-as autóbusz segített eljutásunk.

Egyetemi képgaléria (Végh Csaba fotói):

[A Jubileumi Konferencia zárásaként Nostalgia villamosozással és Villamos Szakesttel ünnepeltek a résztvevők | Flickr](#)

Sajtómegjelenések:

<https://www.boon.hu/helyi-kozelet/2024/10/bengali-villamos-szakest>

https://www.youtube.com/watch?v=z5qUx_F0oNo

<https://www.youtube.com/watch?v=9MhlRMmiGNI>

A 4. és az 5. ábra két csoportképet szemléltet. Az MVK Zrt. egy kedves meglepetéssel készült az Ünnepi Megemlékezésre. Az egyik Skoda villamos 120-as viszonylatszámmal és speciális felirattal: a selmecebányai történelmi Tanszék nevével gurult be a Tiszai Pályaudvarra. A 4. ábra a 120 éves a Fizika-Elektrotechnika Tanszék ünnepi feliratot megörökítő 120-as viszonylatjelzésű villamos előtt, az 5. ábra pedig a Bengáli, Alias Ampervadász Tigris nosztalgia villamos előtt készült.



4. ábra: Csoportkép az ünnepi 120-as viszonylatjelzésű villamos előtt.



5. ábra: Csoportkép a Bengáli, Alias Ampervadász Tigris villamos előtt.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

A Selmecbányán 1904-ben alapított Fizika-Elektrotechnika Tanszék történelme legalább annyira viharos, mint maga a világtörténelem. Az I. világháború okozta sebek következtében a Tanszék 1919-ben Sopronba költözött. Ott 1947-ben különvált Fizika Tanszékre és Elektrotechnika tanszékre. A Fizika Tanszék Sopronban maradt, azonban az Elektrotechnika Tanszék 1959-ben Miskolcra költözött az 1949-ben alapított Nehézipari Műszaki Egyetemre. Mindezek alapján elmondható, hogy a selmecbányai Fizika-Elektrotechnika Tanszék jogutódja Sopronban a Fizika Tanszék, Miskolcon pedig az Elektrotechnika Tanszék. Az ezt követő időszakban mind Sopronban, mind pedig Miskolcon számos változás történt, amiknek következtében a Tanszékek időközönként nem csak vezetőt, hanem nevet is váltottak. Mindannyian bízunk abban, hogy a Tanszékek a soproni és miskolci hagyományokkal kiegészült selmecbányai hagyományokkal tovább élnek, és töretlenül tovább folytatják a több, mint egy évszáda megkezdett, társadalomfejlesztő-formáló munkáját!

7. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] ÉRSEK, D.: *Az Elektrotechnika Tanszék története*. Miskolci Egyeteme, 1974. p. 10. <https://docplayer.hu/amp/16539281-Ersek-denes-az-elektrotechnikai-tanszek-tortenete.html> Megtekintés dátuma: 2024. november 4.
- [2] Selmecbányai Hírmondó, 1904. szeptember 25. XIV. évfolyam, 39. szám.
- [3] OEE Wagner Károly Erdészeti Digitális Szakkönyvtár.
- [4] <https://emk.uni-sopron.hu/karunk-tortenete> Megtekintés dátuma: 2024. november 4.
- [5] <http://fizika.skk.uni-sopron.hu/az-intezet-rovid-tortenete> Megtekintés dátuma: 2024. november 4.
- [6] <https://geik.uni-miskolc.hu/intezetek/FEI/bemutatkozas> Megtekintés dátuma: 2024. november 4.

VASÚTI FÉKTUSKÓK HŐVEZETÉSI TULAJDONSÁGÁNAK JAVÍTÁSA MAKRO-SZERKEZETI VÁLTOZTATÁSSAL, EGYSZERŰSÍTETT VÉGES- ELEM MODELL SEGÍTSÉGÉVEL

IMPROVING THE HEAT CONDUCTION PROPERTIES OF RAILWAY BRAKE BLOCKS BY MACRO-STRUCTURAL CHANGES, USING A SIMPLIFIED FI- NITE ELEMENT MODEL

BOLLÓ BETTI¹, SARKA FERENC², VOITH KATALIN³

¹ PhD, egyetemi docens, beti.bollo@uni-miskolc.hu

Miskolci Egyetem, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet, Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Intézeti Tanszék, 3515-HU, Miskolc, Miskolci Egyetem

² PhD, egyetemi docens, ferenc.sarka@uni-miskolc.hu

Miskolci Egyetem, Gép- és Terméktervezési Intézet, 3515-HU, Miskolc, Miskolci Egyetem

³ PhD, tudományos főmunkatárs, katalin.voith@uni-miskolc.hu

Miskolci Egyetem, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet, Vegyipari Gépészeti Intézeti Tanszék, 3515-HU, Miskolc, Miskolci Egyetem

Kivonat: *A vasúti közlekedés egyre nagyobb szerepet kap az Európai Unióban, mind az áruszállítás, mind a személyszállítás kapcsán, ezzel is tovább fokozva Európa azon törekvését, hogy csökkentse a CO₂ kibocsátás mértékét. A megnövekedett vasúti szállítás, a vasúti féktuskók meghibásodási gyakoriságában is növekedést eredményez. A meghibásodások jelentős része, a féktuskók magas működési hőmérsékletéből származik. A cikkben bemutatott szimulációs sorozat arra tesz kísérletet, hogy egy egyszerűsített fékmodell segítségével, makroszerkezeti változtatások révén, jobb hővezetési tulajdonsággal rendelkező féktuskó kialakításra tegyen javaslatot.*

Kulcsszavak: *vasúti fék, egyszerűsített VEM modell, hővezetés.*

Abstract: *Rail transport is playing an increasingly important role in the European Union, both in terms of goods transport and passenger transport, thereby further increasing Europe's efforts to reduce CO₂ emissions. The increased railway transport also results in an increased number in the failure of railway brake blocks. A significant part of the failures comes from the high operating temperature of the brake blocks. The simulation series presented in the article is an attempt to propose a brake block design with better heat conduction properties by means of a simplified brake model and through macro structural changes.*

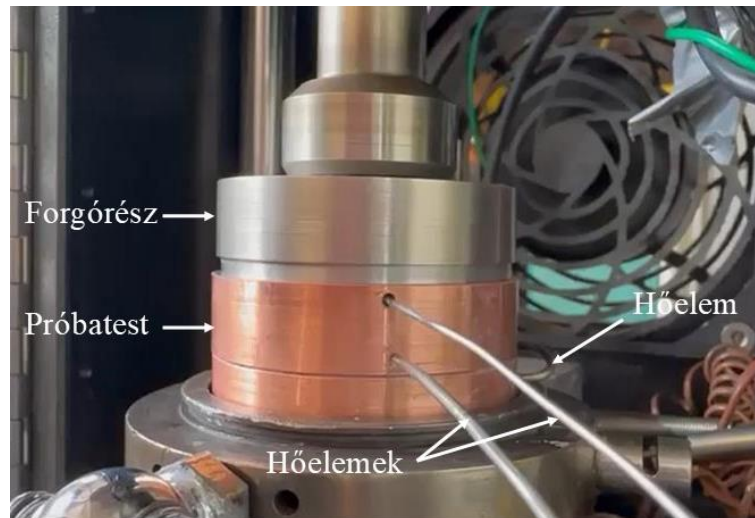
Keywords: *railway brake, simplified FEM model, heat conduction.*

1. BEVEZETÉS

A fékrendszer az egyik legfontosabb biztonsági berendezése minden járműnek [1]. Működésük és hatékonyságuk a vasúti forgalomban talán még fontosabb, mint a közúti forgalomban, mivel a vasúti közlekedés hatalmas tömegek együttes mozgásával jár, amelyek mozgási energiájuknál fogva baleset esetén nagy károkat okozhatnak mind emberi életben, mind anyagilag [2, 3]. Fékezés során a féktuskóban a kerékkel történő súrlódás során nagyon rövid időn belül rendkívül magas hő keletkezik. A súrlódási felületen megjelenő túlmelegedés során repedések keletkezhetnek, ami a berendezés tönkremeneteléhez vezet. Ezért a felületről minél hamarabb el kell vezetni a keletkező hőt.

Az Európai Unió által támogatott projektünk célja, hogy a jelenlegi, hagyományosan öntöttvasból gyártott vasúti féktuskóhoz képest jobbat gyártsunk 3D technikával, fémponyomatással. Ezért a valódi vasúti féktuskóból készült próbatesteken fizikai paramétereket határozunk meg mérésekkel, majd numerikus modellezéssel reprodukáljuk azokat. A mé-

réseket a projektben résztvevő Falex NV belgiumi partner végzi a Multispecimen teszt berendezésen (1. ábra). A mérés során a próbatestet befogták és tetejére egy tárcsát helyeztek, amit különböző fordulatszámmal forgattak és kb. 4,5 kg tömeg súlyának megfelelő erővel szorították az álló próbatesthez. A mérések során vizsgálták a súrlódási tényezőt, a mintadarab hőmérsékletét 3 helyen (a próbatest tetején, a próbatest alján és a próbatest alatti befogón), valamint a forgás sebességét.



1. ábra: A kísérleti berendezés réz próbatesttel

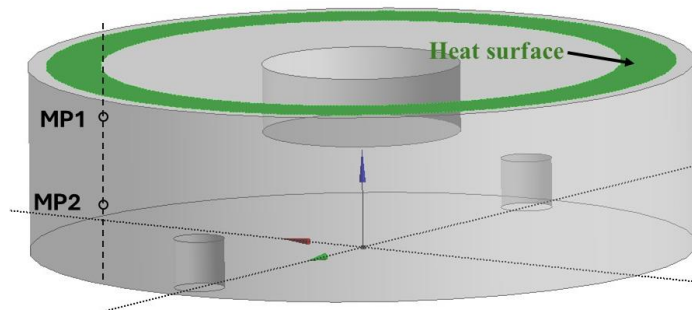
A mérés során kapott adatokat felhasználtuk a numerikus modellezéshez. A szakirodalomban számos kutató vizsgálta a féktárcsában keletkező hő terjedését különböző mechanikai szimulációval [4, 5], valamint a jobb hőelvezetés érdekében külső levegőáramot is alkalmaztak a féktárcsa numerikus modellezéséhez [2, 6]. Az ANSYS szoftvercsomag mechanikai (FEA) és áramlási (Fluent) szoftverével egy öntöttvasból készült próbatesten numerikus számításokat végeztünk [7]. A modellezés során egyszerűsített geometriát alkalmaztunk és számos lehetőséget megvizsgáltunk, míg végül megtaláltuk azokat a feltételeket, amelyek jó közelítést mutattak a kísérlet és a szimuláció közötti hőeloszlás tekintetében.

Jelen cikkben fémporból (17-4PH) additív technikával nyomtatott tesztadarabot modelleztünk. A 17-4PH anyagból készült próbatestbe különböző alakú réz betéteket helyeztünk (99,99% tisztaságú), hogy minél jobb legyen a súrlódás során keletkező hő elvezetése.

2. GEOMETRIAI MODELLEK KIALAKÍTÁSA

Az eredeti, öntöttvasból készült henger kialakítású próbatest átmérője 53,8 mm, magassága 15 mm. A célunk a próbatestben keletkező hőmérséklet-eloszlás meghatározása, ezért a forgórészt nem modelleztük, hanem a mérés során a súrlódásból keletkező hőt adtuk meg a próbatest felületén bemeneti peremfeltételként [7]. A 2. ábra látható az álló- és forgórész érintkezési felülete (zöld szín), ami egy 4,4 mm széles körgyűrű, és erre a felületre írjuk elő a hőmérsékletet peremfeltételként. A mérési elrendezésnek megfelelően két pontban vizsgáljuk a hőmérséklet értéket, a próbatest felső része alatt (MP1) és alsórésze felett (MP2).

A kezdeti próbatest alapanyaga öntöttvas (EN-GJL-100), ez a leggyakrabban használt féktuskó anyag. Az új anyagból készült próbatesteket fémporból additív technikával nyomtattuk a Miskolci Egyetem Anyag és Vegyészmérnöki Karán lévő Creator 3D nyomtatóval. A rendelkezésünkre álló fémnyomtató olyan fémporok esetén képes megfelelő eredményt produkálni, melyeknél a szén, mint ötvöző tömegszázaléka 0,6 m/m% alatti. Ezért a 17-4PH rozsdamentes acél anyagot választottuk, amely a szimulációhoz használt ANSYS szoftverben is megtalálható.



2. ábra: A kezdeti kísérletnél használt próbatest (CAD modell)

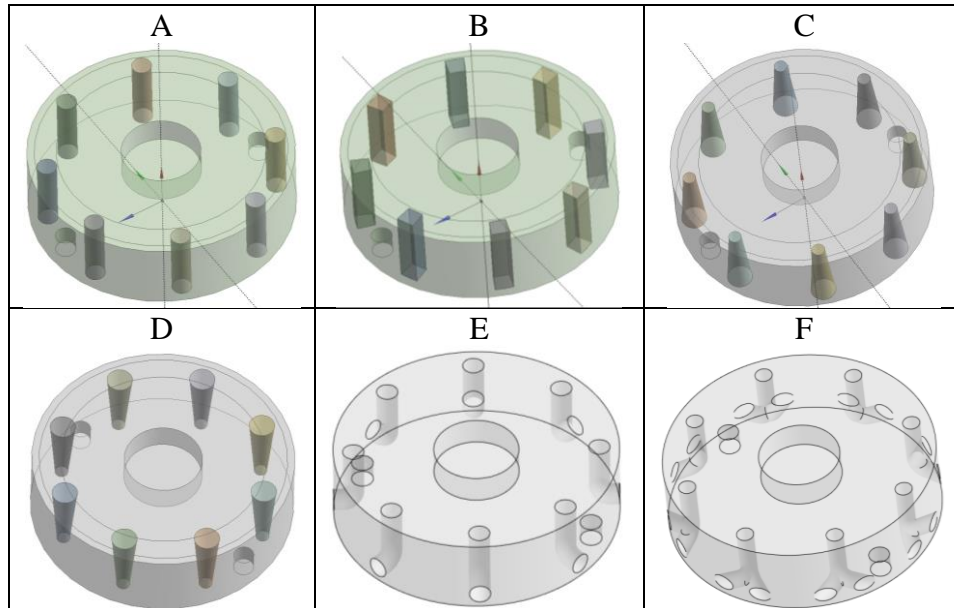
A célunk, hogy a kialakított próbatest felületéről, ahol a súrlódási hő keletkezik, minél hamarabb elvezessük a hőt, hogy az anyag szerkezete ne károsodjon. Az eredeti henger alakú próbatesten olyan geometria változtatásokat hoztunk létre, melyekről azt feltételeztük, hogy javítja a próbatest hővezetési tulajdonságát. A makroszerkezeti változásokat egy jobb hővezetési képességű anyagminőség hozzáadásával kívántuk létrehozni, amihez a réz választottuk. Ennek oka kettős. Egyrészt a réz az egyik legjobb hővezető képességű anyag, másrészt olvadáspontja lehetővé teszi, hogy az egyetemi laboratóriumban ömledék formába hozzuk és a próbatestben kialakított üreges részekbe beleönthessük. A makroszerkezeti változások geometriája esetén bármilyen geometria elképzelhető, ugyanis a próbatesteket additív technológiával hozzuk létre.

A hőtechnikai számítások elkezdéséhez CAD modelleket hoztunk létre, amelyek az eredeti próbatesthez képest valamilyen méretű és alakú rézből készült „betétekkel” lettek ellátva. A 3. ábra mutatja az elgondolt makroszerkezeti változtatásokat. A kialakítások mozgató elve az volt, hogy a súrlódó felületen keletkező hőt a próbatest alá, vagy a palástjára vezessük el. Ezek a megoldások egy valódi féktuskó geometriája esetén is megvalósíthatóak. A réz betétek méreténél arra törekedtünk, hogy a hozzáadott réz térfogata minden verziónál azonos legyen ($\sim 180 \times 8 \text{ mm}^3$). A létrehozott réz betét verziók a következők:

- A. 8db 4 mm átmérőjű henger,
- B. 8db körgyűrű cikk alapú hasáb,
- C. 8db csonkakúp (lefelé növekvő átmérő),
- D. 8db csonkakúp (lefelé csökkenő átmérő),
- E. 8db 90 fokban megtört „henger” egy kivezetéssel a palástra,
- F. 8db 90 fokban megtört „henger” két kivezetéssel a palástra.

3. VÉGESELEMES VIZSGÁLATOK

Miután a CAD modellek rendelkezésre álltak, a modellek átkerültek ANSYS végeselemes programba. Minden próbatest verzió felső felületén létrehoztunk egy 4,4 mm széles körgyűrű alakú felületrészt. Ezen felületen a mérési eredmények alapján a hőmérsékletet 25°C -ról 63°C -ra növeltük 20 s alatt. A környezeti hőmérsékletet 25°C -ra állítottuk be. A próbatest alján fix megfogást alkalmaztunk. A próbatesteken a végeselem hálót úgy alakítottuk ki, hogy a cél-lák torzultsági paramétere (skewness factor) ne haladja meg a 0,92 értéket. A számítások közben figyeltük az ún. thermal error értékét is, és arra törekedtünk, hogy 0,2-nél nagyobb értéket ne kapjunk. Ha a számítás során meghaladta ezt az értéket, akkor sűrűbb hálókialakítást alkalmaztunk a geometrián.



3. ábra: A szimuláció sorozathoz tervezett próbatetek

A futási eredményekben azt kerestük, hogy a felső (MP1) és az alsó mérési pont (MP2) milyen hőmérsékletű, mekkora a hőmérséklet különbség a két pont között. Minél kisebb, annál jobb a test hővezetési képessége. Ezenkívül megvizsgáltuk azt is, hogy a 17-4PH anyagból készült eredeti geometriához képest hány százalékkal csökkent a hőmérsékletkülönbség. Az 1. táblázatban összefoglaltuk az eredeti geometrián és a különböző geometriai kialakításokon kapott eredményeket 17-4PH anyag esetén.

1. táblázat: A szimulációból kapott hőmérséklet értékek

Verzió	MP1 [°C]	MP2 [°C]	MP1-MP2	[%]
Eredeti	52.29	32.20	20.09	
A.	54.77	39.91	14.86	26.0
B.	54.72	39.99	14.73	26.7
C.	54.02	38.51	15.51	22.8
D.	55.31	40.60	14.71	26.8
E.	54.62	39.65	14.97	25.5
F.	54.34	39.17	15.17	24.5

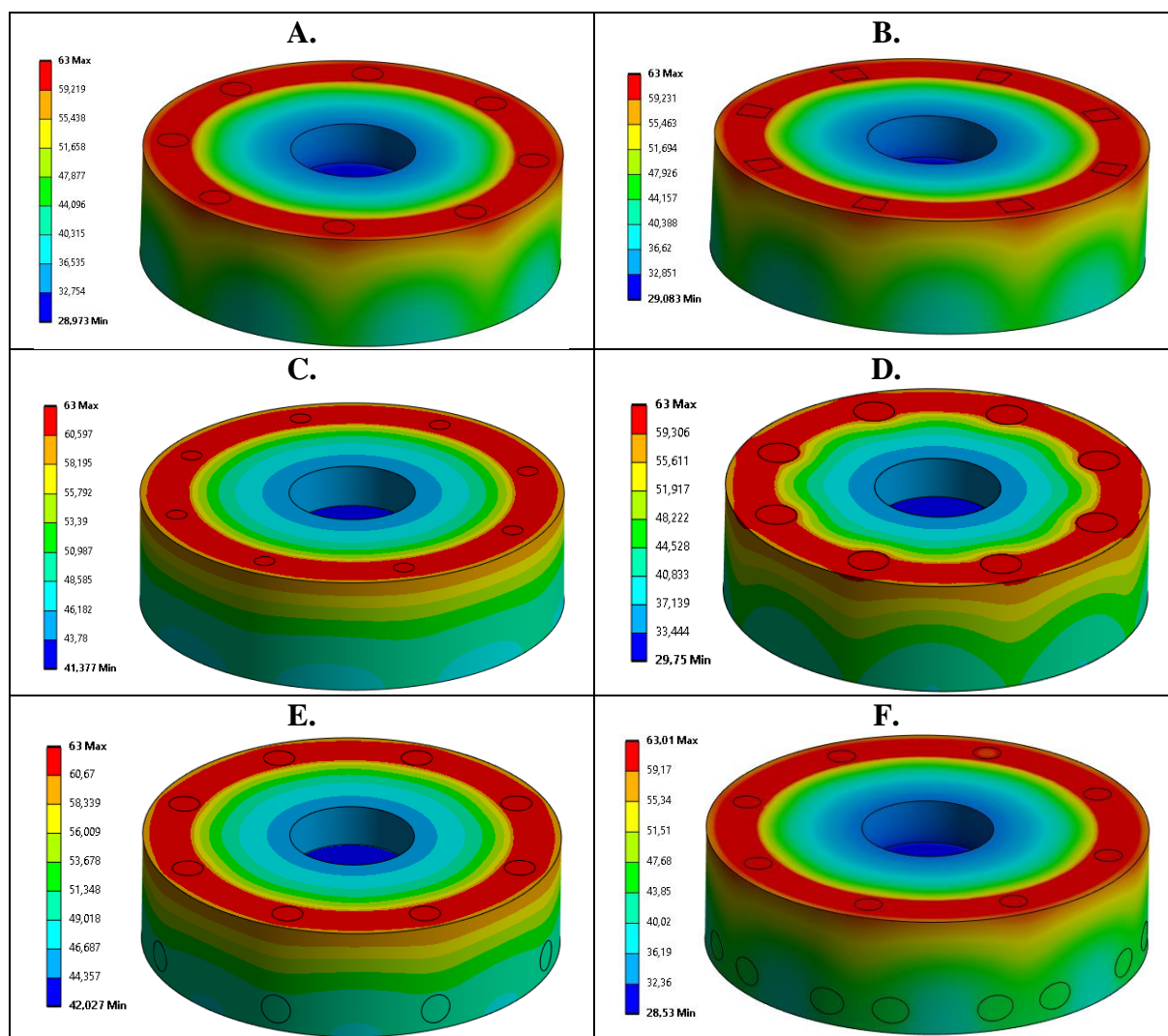
A táblázatból látható, hogy az **D.** és **B.** verzió vezette el a hőt a legjobban a próbatest felső felületéről. Az eredeti kialakításhoz képest a hőmérsékletkülönbség 26,8%-kal, illetve a B. esetben 26,7%-kal csökkent. Az E. és F. verzióknál az oldalára vezettük ki a hőt, ezért érdemes ebben a két esetben a próbatest oldalán és felső részén kiszámolni az átlaghőmérsékletet és a két felület hőmérsékletkülönbségét. A 2. táblázatban a próbatest felső részén és az oldalán kapott átlagos hőmérsékletértékek találhatóak. Az adatokból jól látható, hogy az E. verzió 69,4%-kal gyorsabban elvezeti a hőt a felső részről. Az F. esetben azért lett rosszabb az érték, mert az egyes betétek térfogata ugyanakkora (180mm^3), azaz amikor az oldalára két kivezetéssel történik a hőelvezetés, akkor kisebb lett az átmérő.

A B. esetben (körcikk alapú hasáb) az oldalán keletkező hő is nagyobb lett, azaz az eredetihez képest 61,7%-kal csökkent a két felület közötti hőmérséklet.

2. táblázat: A próbatetest felsőrészén és oldalán az átlagos hőmérséklet

Verzió	Teteje [°C]	Oldala [°C]	Teteje-Oldala	[%]
Eredeti	50.87	40.82	10.05	
A.	57.09	48.56	8.53	15.1
B.	52.47	48.62	3.85	61.7
C.	51.881	46.781	5.10	49.3
D.	53.427	48.717	4.71	53.1
E.	51.64	48.56	3.08	69.4
F.	53.41	47.89	5.52	45.0

A 4. ábra mutatja a próbatestek felületén a hőmérséklet-eloszlást a különféle geometriai kialakításokon. (A hőmérséklet skálája nem azonos az egyes verziók esetében!) A próbatetest felső felületén a körgyűrűn azonos 63°C hőmérséklet látszódik. A D. verzió esetén, amikor lefelé csökkenő csökekúpokat helyeztünk el a próbatestbe, nem fért bele a fűtött körgyűrűbe, ezért ennél a verziónál a próbatest belseje felé a réz gyorsabban elvezeti a hőt. Valószínűleg ebből következik, hogy az eredeti geometriához képest ez lett az egyik legjobb változat.



4. ábra: Hőmérséklet-eloszlás a próbatetest felületén különböző geometriai kialakításnál [°C]

A D. verzióból kiindulva lehet, hogy érdemes a betéteket nem a körgyűrű középre helyezni,

hanem eltolni a betéteket a próbatest közepe felé. Ezért következő lépésként azokat az eseteket fogjuk megvizsgálni, hogy mi történik, ha eltoljuk a betéteket, illetve megváltoztatjuk a próbatestbe helyezett betétek számát. Kiindulásként 8 darabot helyeztünk el, aminek a számát lehet növelni, illetve csökkenteni, vagy megmarad a 8 darab és a térfogatát növeljük meg. Azaz meg kell találni az optimális elrendezést, miközben figyelembe kell venni azt is, hogy ne legyen túl sok réz a kialakított próbatestben, valamint gyárthatóság szempontjából is minél egyszerűbb legyen.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Kutatásunk eredményeként egyértelműen megállapítható, hogy van értelme jó hővezető képességű anyagokat adni a meglévő próbatesthez. Már kis térfogat hozzáadása esetén is szignifikáns javulás érhető el a hővezető képesség változásában. A próbatest térfogata réz nélkül 31536 mm^3 , a betétek pedig 1440 mm^3 , ez 4,5%. A kapott eredményeket kielemezve tovább folytatjuk a kutatásunkat és megkeressük az optimális geometriai elrendezést. Ha megtaláljuk a legmegfelelőbb kialakítást, akkor 3D nyomtatás segítségével elkészítjük a 17-4PH fémorból a geometriát és a betétek helyét feltöltjük rézzel. Ezután ellenőrizni fogjuk a számításainkat a mérés során kapott értékekkel.

5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 958174.

A 2019-2.1.7-ERA-NET-2022-00042 számú projekt a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, az ERA-NET Cofund és EJP Cofund programok közös nemzetközi pályázati felhívásaiban sikeresen szereplő magyar szervezetek támogatására pályázati program finanszírozásában valósul meg.



6. FELHASZNÁLT IRODALOM

- LIMPERT, R.: *Brake design and safety*. SAE International, 1999. ISBN 1560919159
- BELHOCINE, A., ABDULLAH, O.I.: *Finite element analysis (FEA) of frictional contact phenomenon on vehicle braking system*. Mechanics Based Design of Structures and Machines 50(9), pp. 2961–2996, 2020.
- ZENG, C., HUANG, J., WANG, H., XIE, J., HUANG, S.: *Rail break prediction and cause analysis using imbalanced in-service train data*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement 71, pp. 1-14, 2022.
- BELHOCINE A.: *Numerical investigation of a three-dimensional disc-pad model with and without thermal effects*, Thermal science 19(6), pp.2195–2204, 2015.
- HAN, J., NING, K., HAN, M., ZHANG, N., DU, J., LANG, Z., JIA, C.: *The Effect of Rotation Speed on the Temperature and Stress Field of Iron-based Friction Pairs*. In: Journal of Physics: Conference Series, (ICMSE2020), Guiyang, Guizhou, China, 1637(1), pp.012039, 2020.
- LIU, N., HONG, C., SU, X., JIN, X., JIANG, C., SHI, Y., WANG, B.: *Numerical and Experimental Analysis of the Aerodynamic Torque for Axle-Mounted Train Brake Discs*. Fluid Dynamics & Materials Processing 20(8), pp.1867-1882, 2024.
- BOLLÓ, B., SARKA, F., VOITH, K.: *Egy egyszerűsített fékmodell termikus elemzése*. GÉP 75(1), pp. 19-22, 2024.

DINAMIKUS ENERGIAMENEDZSMENT NAPELEMES SZÜNETMENTES TÁPEGYSÉGEKHEZ

DYNAMIC ENERGY MANAGEMENT FOR SOLAR UNINTERRUPTIBLE POWER SUPPLIES

BOROS Rafael Ruben¹, BODNÁR István²

¹egyetemi tanársegéd, ruben.boros@uni-miskolc.hu

¹Miskolci Egyetem, Fizikai és Elektrotechnikai Intézeti Tanszék, 3515 Miskolc-Egyetemváros

²egyetemi docens, istvan.bodnar@uni-miskolc.hu

¹Miskolci Egyetem, Fizikai és Elektrotechnikai Intézeti Tanszék, 3515 Miskolc-Egyetemváros

Kivonat: Az energiamenedzsment a szünetmentes tápegységek (UPS) terén egyre fontosabb szerepet kap, különösen a megújuló energiaforrások integrálásával. Az ilyen rendszerek célja a folyamatos és megbízható energiaellátás biztosítása még hálózati kimaradások esetén is, miközben gazdaságos és környezetbarát megoldásokat nyújtanak. A jelen tanulmányban bemutatott dinamikus energiamenedzsment algoritmus lehetővé teszi az akkumulátorból és hálózatról felvett teljesítmény arányának optimalizálását az egységköltségek, az aktuális fogyasztás és a napelem termelésének függvényében. Az algoritmus képes dinamikusan alkalmazkodni a változó terhelésekhez és energiaforrásokhoz. A rendszerben az optimalizált gazdasági modellt figyelembevéve egy algoritmus szabályozza az egyenáramú szaggató és az egyenirányító működését úgy, hogy a költségek minimalizálását érje el. Az eredmények rámutatnak, hogy a dinamikus energiamenedzsment nemcsak a rendszer stabilitását és megbízhatóságát javítja, hanem jelentős költségmegtakarítást is eredményez a hosszú távú üzemeltetés során, ezzel hozzájárulva a fenntartható energiaellátáshoz.

Kulcsszavak: szünetmentes tápegység, energiamenedzsment, optimalizálás, genetikus algoritmus, napelem

Abstract: Energy management systems are becoming increasingly important in the field of uninterruptible power supplies (UPS), especially with the integration of renewable energy sources. Such systems are designed to ensure a continuous and reliable power supply even in the event of power outages, while providing economical and environmentally friendly solutions. The dynamic power management algorithm presented in this paper allows the optimization of the power ratio between battery and grid depending on the unit cost, the current consumption and the solar panel production. The algorithm can dynamically adapt to changing loads and energy sources. In the system, an algorithm controls the operation of the DC/DC converter and the rectifier to minimize the costs, taking into account the optimized economic model. The results show that dynamic energy management not only improves the stability and reliability of the system, but also results in significant cost savings during long-term operation, thus contributing to a sustainable energy supply.

Keywords: uninterruptible power supply, energy management, optimization, genetic algorithm, solar panel

1. BEVEZETÉS

A modern szünetmentes tápegységek (UPS) és napelemes rendszerek rohamos fejlődése a folyamatos energiaellátás és a megújuló energiaforrások növekvő igényeivel párhuzamosan jelentős változásokat hozott az energiaszektorban. Az éghajlatváltozás és az energiatudatosság növekvő figyelembevétele miatt az energiaellátás biztonsága és fenntarthatósága prioritássá vált, különösen az olyan kulcsfontosságú területeken, mint az egészségügy, az adatközpontok és az ipari termelés. Az intelligens UPS rendszerek lehetőséget biztosítanak arra, hogy a hagyományos szünetmentes áramforrások ne csak vészhelyzetekben, de az energiamenedzsment optimalizálásában is szerepet vállaljanak.

A szünetmentes tápegységek biztosítják az áramellátás folytonosságát, amikor hálózati áramkimaradás következik be, így számos kritikus berendezést, fogyasztót védenek a leállástól. Nasiri szerint az UPS rendszerek különösen hasznosak orvosi létesítmények, adatközpontok, ipari feldolgozórendszerek és kommunikációs rendszerek esetében, mivel ezeken a helyeken az

energiaellátás megszakadása jelentős kockázatot jelent [1].

Aamir és munkatársai áttekintő kutatásukban átfogóan elemzik a UPS rendszerek topológiáit, különböző áramkör-konfigurációkat és a leggyakoribb vezérlési technikákat. Az elemzés kitér a rendszer teljesítményére, méretére, költségeire és hatékonyságára, valamint az új generációs UPS rendszerekre, amelyek a smart grid és microgrid alkalmazásokhoz igazodnak. A tanulmány kiemeli a hibrid energiaforrással működő UPS rendszerek fejlődését, és részletezi azokat a szempontokat, amelyeket a felhasználóknak figyelembe kell venniük a megfelelő UPS rendszer kiválasztásakor. A tanulmányuk három topológiát ismertet: az offline, a vonal-interaktív és az online rendszereket. Kiemeli az egyes rendszerek problémáit is, amelyek az áramszünetkor jönnek létre. Ezekre példa a harmonikus torzítás, tranziensek, frekvencia változások stb. A hibrid UPS rendszerek egy közösített egyenfeszültségű hálózatot használnak, amelyre több energiátároló és elektronikus átalakító is csatlakoznak, ezek lehetnek: akkumulátorok, szuperkondenzátorok, hálózati egyenirányítók, napelemtől táplált DC/DC konverterek stb. A közösített egyenfeszültségű kör látja el az invertert, amely megtáplálja a kritikus fogyasztót. A kutatásuk az 5 kVA feletti fogyasztókhoz online UPS rendszereket javasol [2].

Az akkumulátor kiválasztása az UPS rendszerek működési környezetében is jelentős szerepet játszik. Ahol a megbízhatóság a legfontosabb, az akkumulátortechnológia kiválasztásánál Ciancetta és munkatársai szerint [3] olyan tényezőket kell figyelembe venni, mint a hőmérsékleti stabilitás, a ciklus élettartama és a karbantartási követelmények. Ezekben a kritikus alkalmazásokban a lítium-ion akkumulátorok használata magasabb költségük ellenére indokolt lehet a jobb teljesítményük és az idő múlásával alacsonyabb teljes költségük miatt.

Ezzel szemben az alacsonyabb terhelési áramok általában növelik az akkumulátor élettartamát azáltal, hogy minimalizálják a termikus feszültséget és hatékonyabb lítium-ion interkalációs és deinterkalációs folyamatokat tesznek lehetővé [4], [5], [6]. Mindez hangsúlyozza a mérítési mélység (DoD) és a terhelési áram optimalizálásának fontosságát a Li-ion akkumulátorok működési hatékonyságának és élettartamának növelése érdekében, amelyek a degradációs mechanizmusokat befolyásolják. A gyakorlati alkalmazásokban a DoD és a terhelési áram közötti egyensúlyt gyakran kifinomult BMS-ek kezelik, amelyek szabályozzák a töltési és kisütési folyamatokat. Ezen rendszerek célja a mélykisülések és a túlzott terhelési áramok megakadályozása, ezáltal meghosszabbítva az akkumulátor élettartamát. Például a BMS olyan stratégiákat alkalmazhat, mint a teljesítménycsökkentés, amely magában foglalja a maximális terhelési áram korlátozását a termikus feszültség csökkentése és az akkumulátor élettartamának növelése érdekében [7], [8].

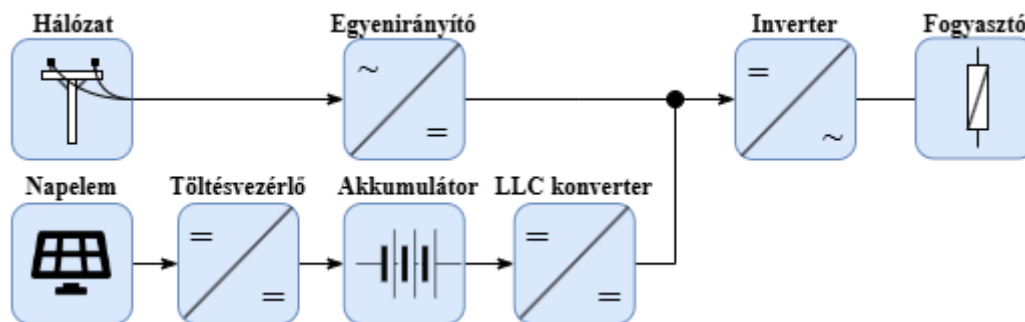
A centralizált UPS rendszerek nagyobb hatékonyságot érhetnek el decentralizált társaikhoz képest azáltal, hogy az energiagazdálkodást egyetlen egységbe integrálják, ezek a rendszerek optimalizálhatják az energiafelhasználást és csökkenthetik az energiaelosztással kapcsolatos veszteségeket, az energiamedzsmen révén. A központosított rendszerek például fejlett akkumulátorkezelési technológiákat használhatnak, amelyek felügyelik és optimalizálják az akkumulátorok állapotát, így meghosszabbítják az akkumulátorok élettartamát és javítják a rendszer általános hatékonyságát, ezt állítják Choi és szerzőtársai, valamint Kanareykin is [9], [10]. Arra az eredményre jutottak továbbá, hogy az optimalizált akkumulátorkezelés különösen fontos a nagyméretű alkalmazásokban, ahol az energiaköltségek jelentősek lehetnek.

A jelen tanulmány egy olyan új dinamikus energiamedzsmen tet mutat be, amely bypassmentes, napelemes, online, hibrid szünetmentes rendszerhez alkalmazható. A dinamikus energiamedzsmen tet figyelembe veszi az aktuális fogyasztást, napelemek termelését, hálózati energia díját, az egyes rendszerelemek hatásfokát, egységköltségét. A bemutatott gazdasági modell alapján dönti el a centralizált processzor, hogy milyen arányban vételezzen villamos energiát a szünetmentes rendszer az akkumulátorból és a hálózathoz egyszerre. A dinamikus energiamedzsmen tetnek köszönhetően a fogyasztók ellátása folyamatos és megbízható még hálózati kimaradások esetén is, miközben gazdaságos és környezetbarát megoldásokat valósít meg. Azért

volt szükség új, dinamikus energiamenedzsment kidolgozására, mert a jelen meglévő rendszerek lassú, durva szabályozást valósítanak meg. A kidolgozott energiamenedzsment rendszer alkalmazása olyan esetekben célszerű, ahol idősoros (negyedórás) mérés szerint van elszámolva a villamos energia díja. A jövőben várhatóan az idősoros elszámolás perc, vagy akár kisebb időintervallum alapján fog történni. Emiatt is fontos a dinamikus energiamenedzsment rendszerek fejlesztése napjainkban.

2. ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK

A kutatás az 1. ábrán látható online szünetmentes rendszer esetén ismerteti a dinamikus energiamenedzsment, optimalizálás módszertanát és annak eredményeit. A rendszerben egy hálózati egyenirányító és egy LLC rezonáns konverter egyszerre táplálja meg az egyenfeszültségű, közbenső egyenáramú kört. Az LLC konverter egy olyan DC/DC feszültségnövelő konverter, amely kitűnő hatásfokkal valósítja meg a feszültségnövelést a lágy kapcsolások révén. A két konverter egyidejű szabályozásával beállítható az akkumulátorból és napelemből, valamint a hálózatról felvett villamos energia aránya. A tanulmányban ez az arány zöldáram-arány néven található meg. A közbenső egyenáramú kör táplálja meg az invertert, amely ellátja a fogyasztókat. A közbenső körre csatlakoztatható olyan inverter is, amely motoros hajtásokhoz készült, frekvenciaváltó szerepet tölt be. Az akkumulátort kizárólag a napelem tölti a vizsgált elrendezésben, amelynek köszönhetően költséghatékonyabb a rendszer. Az LLC konverter nem képes kétirányú energiaáramlásra, ellenben galvanikus leválasztást valósít meg a hálózat és az akkumulátor között, amely ebben az esetben elengedhetetlen.



1. ábra: A javasolt hibrid szünetmentes rendszer

Az új dinamikus energiamenedzsment olyan stratégiát alkalmaz, amely hálózati áramkimaradás esetén csak az akkumulátor és a napelem segítségével látja el a fogyasztókat. Amennyiben a hálózati villamos energia rendelkezésre áll, úgy optimalizációs üzemmódrá vált, és a szabályozó áramkörnek meghatározza a zöldáram-arány alapjelét. A szabályozó rendszerrel ez a tanulmány nem foglalkozik. A szabályozó rendszert implementálni lehet hagyományos PID szabályozóval, vagy akár intelligens módon is.

A továbbiakban bemutatásra kerül a kidolgozott módszertan, gazdasági modell, amelyek segítségével csökkenthető a felhasznált villamos energia egységköltsége dinamikusan változó terhelések, hálózati energiaárak, napelem energiatermelések mellett. A gazdasági modell az 1. táblázat szerinti, időben állandó bemeneti paramétereket veszi figyelembe, amelyek ismerete szükséges az optimalizálás megvalósításához. A tanulmány a hálózati egyenirányító költségeit nem tárgyalja, mivel a teljes életciklusára vonatkoztatott egységköltsége elhanyagolható mértékben okoz a felhasznált villamos energia egységköltségében változást.

1. táblázat: Állandó bemeneti paraméterek az optimalizáláshoz

Megnevezés	Paraméter	Dimenzió
A fogyasztók maximális teljesítménye	P_N	kW
Akkumulátorcsomag kezdeti kapacitása	C_{bat}	Ah
Akkumulátorcsomag nominális feszültsége	U_{batnom}	V
Akkumulátorcsomag bekerülési költsége	K_{bebat}	Ft
Akkumulátorra vonatkozó Peukert-exponens	k	-
LLC konverter bekerülési költsége	K_{beLLC}	Ft
Napelemes rendszer bekerülési költsége	K_{bePV}	Ft
Napelemes rendszer kezdeti névleges teljesítménye	P_{PVk}	kWp
Napelem degradációs rátája	d	-
Napelem éves energiatermelése 1 kWp teljesítmény esetén	$E_{1év}$	kWh

2.1. Az akkumulátor életciklusa

A modell paraméterezéséhez először az akkumulátorcsomag életciklusát kell analizálni, vagy a gyártói adatok alapján regresszióval közelíteni. A merítési mélység (DoD: Depth of Discharge) százalékos érték függvényében különböző terhelések esetén felírható az akkumulátor ciklusszáma (élettartama). A ciklusszám a kezdeti kapacitás 80%-ra való csökkenését jelenti, ez a DoD és a terhelés (C) függvénye. A C érték az akkumulátor kisütési áramának és a névleges kapacitásának az aránya. A függvények n darab polinommal közelíthetők, n darab terhelési görbe esetén, amelyet az 1. egyenlet ír le. A képletben az a és b együtthatókat jelöl.

$$Ciklus_n(C_n, DoD) = a_n \cdot DoD^{-b_n}. \quad (1.)$$

2.2. Az akkumulátor teljes életciklusára vonatkoztatott egységköltség

Amennyiben ismertek az egyes terhelőáramhoz tartozó ciklusszámok, úgy meghatározható a ciklusonkénti kapacitáscsökkenés. A képlet megadja egy tetszőleges ciklusgörbére, hogy egy merítési ciklus mennyi kapacitáscsökkenést okoz az akkumulátorban (2. egyenlet).

$$C_{\Delta bat} = \frac{20}{cycle_x} [\%] \quad (2.)$$

Az akkumulátor tényleges kapacitása függ a terhelés nagyságától. A Peukert-egyenlet alapján meghatározható, hogy adott áramerősség mellett mennyi tényleges energia vehető ki az akkumulátorból. A kisütési idő felírható a 3. képlet segítségével. A t_{dis} a kisütési időt, a C_{bat} az akkumulátor kapacitását, az I_{bat} a merítő áramot, míg k a Peukert-exponenszt jelenti. A k értéke ólom-savas akkumulátorok esetén mintegy 1,15, LiFePO₄ akkumulátorok esetén pedig közel 1.

$$t_{dis} = \frac{C_{bat}}{I_{bat}^k} [h] \quad (3.)$$

A valós kapacitás (C_{real}) a kisütési idő és a merítő áram szorzata:

$$C_{real} = t_{dis} \cdot I_{bat} = \frac{C_{bat}}{I_{bat}^k} \cdot I_{bat} [Ah]. \quad (4.)$$

A valós kapacitás és az akkumulátorcsomag nominális feszültségéből (U_{batnom}) meghatározható az akkumulátorból kinyerhető energia kWh-ban megadva, az 5. képlet segítségével.

$$E_{real} = \frac{U_{batnom} \cdot C_{real}}{1000} [kWh] \quad (5.)$$

Továbbá szükséges meghatározni még az egy ciklushoz tartozó kapacitást is ($C_{real/kWh}$), a 6. képlet alapján.

$$C_{\frac{real}{kWh}} = \frac{E_{real} \cdot DoD}{100} [kWh] \quad (6.)$$

A valós ciklusonkénti kapacitáscsökkenés a korábban meghatározott ciklusonkénti kapacitáscsökkenés és az egy ciklushoz tartozó kapacitás hányadosa, azaz

$$C_{\Delta real} = \frac{C_{\Delta bat}}{C_{\frac{real}{kWh}}} \left[\frac{\%}{kWh} \right]. \quad (7.)$$

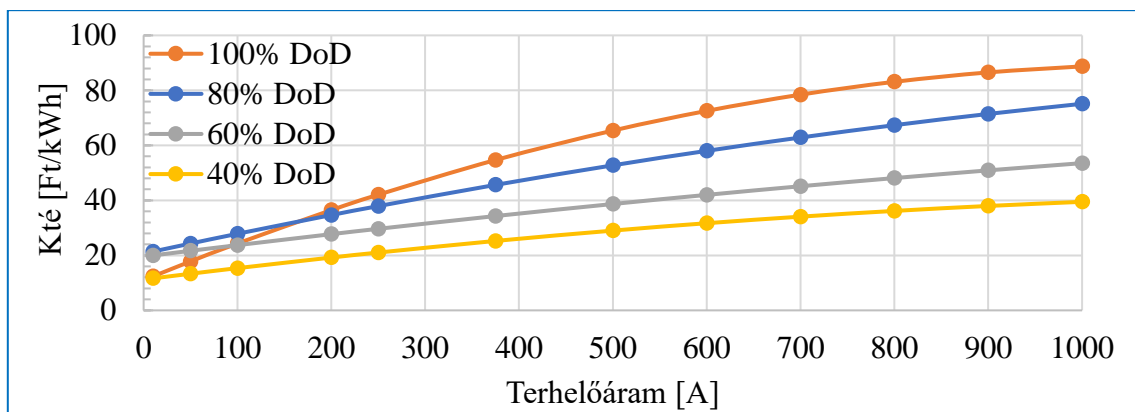
A teljes életciklusra (80% kapacitáscsökkenésre) vonatkoztatott egységköltség ($K_{té}$), amely megadja, 1 kWh energia díját, a lenti egyenlettel határozható meg

$$K_{té} = \frac{C_{\Delta real}}{20} \cdot K_{bebat} \left[\frac{Ft}{kWh} \right]. \quad (8.)$$

Az előző 2-8. egyenleteket összevonva felírható a 9. egyenlet.

$$K_{té} = \frac{\frac{10^5}{Cycléx}}{U_{batnom} \cdot \frac{C_{bat}}{I_{bat}} \cdot I_{bat} \cdot DoD} \cdot K_{bebat} \left[\frac{Ft}{kWh} \right] \quad (9.)$$

Különböző DoD és terhelőáram esetén kiszámított egységköltségekből grafikusan adatpontok jeleníthetők meg és a pontokra polinom illeszthető. Ennek segítségével olyan folytonos függvényt kapunk, amely segítségével tetszőleges terhelőáramra meghatározható, hogy bizonyos merítési mélység esetén mennyi lesz az egységköltség. A pontokra illesztett polinomok a lentebbi ábrákon láthatók. Valamint a másodfokú polinomokból kiszámított egységköltség is megfigyelhető a 2. ábrán.



2. ábra: Ismert teljes életciklusra vonatkoztatott költségekre illesztett közelítő egyenlet

A terhelőáram és a DoD függvényében egy olyan kétváltozós közelítőfüggvény állítható elő,

amely tetszőleges áramerősségre és tetszőleges merítési mélységre meghatározza az akkumulátor egységköltségét. Ennek az alakja negyedfokú polinom esetén a következő egyenlet szerint alakul, ahol c_0 -tól c_{14} -ig az együtthatók:

$$K_{reg}(I_{bat}, DoD) = c_0 + c_1 \cdot I_{bat} + c_2 \cdot DoD + c_3 \cdot I_{bat}^2 + c_4 \cdot DoD^2 + c_5 \cdot I_{bat} \cdot DoD + c_6 \cdot I_{bat}^3 + c_7 \cdot DoD^3 + c_8 \cdot I_{bat}^2 \cdot DoD + c_9 \cdot I_{bat} \cdot DoD^2 + c_{10} \cdot I_{bat}^4 + c_{11} \cdot DoD^4 + c_{12} \cdot I_{bat}^3 \cdot DoD + c_{13} \cdot I_{bat} \cdot DoD^3 + c_{14} \cdot I_{bat}^2 \cdot DoD^2 \left[\frac{Ft}{kWh} \right] \quad (10.)$$

2.3. Az akkumulátor teljes életciklusára vonatkoztatott egységköltség a hatásfokokat figyelembevéve

Amennyiben ismertek a K_{reg} paraméterei, meghatározható a különböző terhelések (P_{tot}) és zöldáram arányok (G_{PV0}) esetén az egységköltség, miközben a hálózati villamos energia díja K_{grid} is változik. Olyan esetben, ha az akkumulátorra kötött napelem nem termel (P_{V0}), az egységköltség az alábbi, amely csak az akkumulátorra vonatkozik:

$$K_{PV0} = \frac{G_{PV0}}{100} \cdot K_{regrealPV0}(I_{batrealPV0}, DoD) + \left(1 - \frac{G_{PV0}}{100} \cdot K_{grid} \right). \quad (11.)$$

A $K_{regrealPV0}$ regressziót a már kiszámított $c_0 \dots c_{14}$ együtthatókkal kell elvégezni. Az $I_{batrealPV0}$ a valós felvett áramot jelöli. Mivel az LLC konverter hatásfoka nem ideális, így az akkumulátorból az adott zöldáram-arány eléréséhez több áram szükséges, mint ideális esetben. $I_{batrealPV0}$ az alábbi egyenlet szerint adható meg, ahol U_{bat} az akkumulátor pillanatnyi feszültségét jelenti:

$$I_{batrealPV0} = \frac{P_{tot} \cdot 1000}{U_{bat}} \cdot \frac{G_{PV0}}{\eta_{LLC}}. \quad (12.)$$

Az LLC konverter hatásfoka a terhelés arányában felírható közelítő polinommal, amely konvertertől függően más-más alakú. A következő egyenletben egy hatásfokot leíró példa egyenlet látható, ahol f és g az együtthatók:

$$\eta_{LLC} = f \cdot \left(1 - e^{-g \cdot \frac{P_{tot}}{P_N} \cdot 100} \right). \quad (13.)$$

2.4. A teljes rendszer életciklusára vonatkoztatott egységköltség, ha $P_{PV} = 0$

Eddig a K_{PV0} egységköltség csak az akkumulátorra vonatkozott, ahol az akkumulátor töltése költségmentesnek volt feltételezve. Azonban az akkumulátort a napelem tölti, amelynek az egységköltségét szintén meg kell határozni. Mindemellett a közbenső egyenáramú körre az LLC konverter táplál, amelynek egyaránt van egységköltsége, továbbá a hatásfoka sem ideális. A napelem egységköltségének meghatározásához ismerni kell a földrajzi elhelyezkedéshez tartozó éves energiatermelést, 1 kWp teljesítményű napelem esetén. Hazánkban ez általában $E_{1év} = 1100-1300$ kWh között változik, amennyiben ideális a tájolás és a dőlésszög, továbbá a napelem nem szennyeződött és sérült. A napelem élettartamát 25 évre adják meg. Eközben a napelem hatásfoka csökken, az úgynevezett degradációs ráta (d) alapján. Átlagosan ez az érték évente mintegy 0,5%. A 25 év alatt leadott villamos energia mennyiségét ($E_{25év}$) a következőkben ismertetett módon lehet meghatározni [11], [12]

$$E_{25év} = \sum_{év=0}^{24} E_{1év} \cdot P_{PVK} \cdot (1 - d)^{év}. \quad (14.)$$

Belátható, hogy 25 év elteltével a napelem már csak a névleges teljesítményének a 87,5%-át képes leadni, amennyiben $d = 0,5\%$. A napelemes rendszer egységkötsége tehát a következőképpen számolható, ahol $\eta_{\text{töltés}}$ az akkumulátor töltésének a hatásfoka, amely magában foglalja az MPPT szabályozó (töltésvezérlő) hatásfokát is:

$$K_{PV} = \frac{K_{bePV}}{E_{25\text{év}} \cdot \eta_{\text{töltés}}}. \quad (15.)$$

Az LLC konverter egységkötségét egyszerűsítve az alábbi módon lehet meghatározni. A beruházási költség és az életciklusa során leadott villamos energia mennyiség hányadosa megadja az egységkötséget, ahol az összes leadott energia az élettartam (T_{LLC}) évben megadva és a névleges teljesítmény (P_{LLC}) szorzata:

$$K_{LLC} = \frac{K_{beLLC}}{365 \cdot 24 \cdot T_{LLC} \cdot P_{LLC}}. \quad (16.)$$

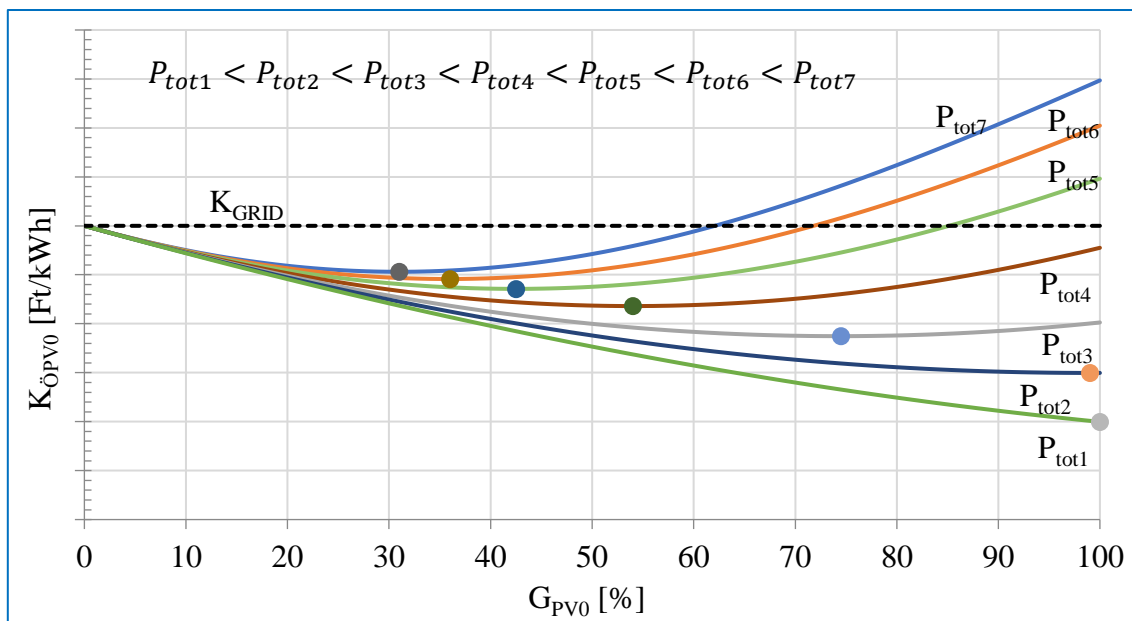
A napelem és az LLC konverter egységkötségének ismeretében kiszámítható az összegyűjtött egységkötségek abban esetben, amikor éppen a napelem teljesítménye zérus. Így az egyenlet megadja, hogy a korábban már napelemekkel feltöltött akkumulátorból, LLC konverteren keresztül kinyert villamos energia díja milyen összeget képvisel. A $K_{\text{öPV0}}$ egységkötségek egyenlete függ a merítési mélységtől, az akkumulátor terhelőáramától, azaz az összterhelés nagyságától.

$$K_{\text{öPV0}} = \frac{G_{PV0}}{100} \cdot (K_{PV} + K_{LLC} + K_{\text{regrealPV0}}) + \left(1 - \frac{G_{PV0}}{100}\right) \cdot K_{\text{grid}} \quad (17.)$$

2.5. Optimális zöldáram-arány megkeresésének módszere genetikus algoritmussal

Belátható, hogy a $K_{\text{öPV0}}$ egységkötségek nagymértékben változik a G_{PV0} zöldáram-arány függvényében. Mindeközben a $K_{\text{regrealPV0}}$ értéke a terhelés nagyságától és a zöldáram-arányától függ szignifikánsan. Az optimális zöldáram-arány megkeresése kulcsfontosságú, hiszen így csökkenthető a felhasznált villamos energia egységkötsége. Az egyes hálózati energiaköltségekhez tartozó egységkötségek minimumok genetikus algoritmussal meghatározhatóak. Különböző terhelések esetén létrejövő egységkötségekre példát mutat a következő 3. ábra, miközben a zöldáram aránya 0 és 100% között változik. Az egyes görbék minimuma is látható az ábrán, miközben K_{grid} , DoD értéke konstans és a napelem teljesítménye zérus. A szaggatott vonal az aktuális hálózati költséget jelenti.

A legkisebb költséghez tartozó zöldáram-arányokat a terhelés függvényében meg kell keresni, majd ezek közelíthetőek polinommal. Ez alapján tetszőleges terhelés esetén az optimális zöldáram aránya kiszámítható. Az illesztett polinomok R^2 determinációs együtthatója bizonyos esetekben közel 1 értékű, azonban különböző hálózati díjaknál és DoD értékek esetén az R^2 értéke széles skálán változik. A grafikus megjelenítés alapján a polinom hullámzó viselkedést mutat, ami miatt a kiválasztott optimális G_{OPTPV0} zöldáram-arányok eltérnek az ideálistól. Ezen túlmenően, a számított értékek töréspontjainál jelentős közelítési hibák tapasztalhatók. Ezért szükségessé vált egy olyan optimalizálási megközelítés alkalmazása, amely képes a különböző hálózati díjak és DoD értékek esetén fellépő változékonyságot kezelni. Mivel a hagyományos algoritmusok ezekben az esetekben gyakran nem találják meg a globális optimumot, és a közelítési hibák jelentős torzításokat eredményeznek, egy hatékonyabb, rugalmasabb módszerre van szükség.



3. ábra: Egységköltség a zöldáram függvényében, különböző terhelések esetén, amennyiben a napelem éppen nem termel

A genetikus algoritmusra azért esett választás, mert hatékonyan tud megoldani olyan optimalizálási problémákat, amelyek esetében a keresési tér nagy, komplex, és sok lokális optimumot tartalmaz. Hagyományos algoritmusok, mint például a gradiens alapú módszerek, hajlamosak beragadni a lokális optimumokba, míg a genetikus algoritmus a populációalapú megközelítésével és a véletlen elemek alkalmazásával képes feltérképezni a keresési tér nagyobb részét, ezáltal megtalálni a globális optimumot.

A genetikus algoritmus egy metaheurisztikus algoritmus, ami azt jelenti, hogy nem igényli a probléma pontos matematikai leírását, hanem általános megoldási stratégiát kínál. Ez a rugalmasság különösen fontos a nem lineáris, diszkrét és többdimenziós problémák esetén. Továbbá, a genetikus algoritmus párhuzamosan dolgozik több megoldáson (populáción), ami lehetőséget ad a gyorsabb konvergálásra az optimális megoldás felé.

Azért is gyorsabb a genetikus algoritmus alkalmazása, mert nem követeli meg az összes lehetséges megoldás vizsgálatát, hanem véletlenszerűen hoz létre egyedi megoldásokat (egyedeket), és ezeket generációkon keresztül fejleszti. Ennélfogva nem szükséges minden lehetőséget végig számolni, hanem a genetikus algoritmus a szelekció, keresztezés és mutáció révén gyorsan konvergál az optimális megoldás felé.

2.6. A teljes rendszer életciklusára vonatkoztatott egységköltség, ha $P_{PV} > 0$

Eddig az egységköltségek számításánál azt feltételeztük, hogy a napelem éppen nem termel villamos energiát ($P_{PV} = 0$). A napelem aktuális termelését figyelembe véve az optimális zöldáram-arány a 18. egyenlet szerint alakul, implicit módon kifejezve:

$$G_{PV} = \begin{cases} \frac{100 \cdot (P_{PV} + P_{batPV0})}{P_{tot}}, & \text{ha } G_{PV} \leq 100 \\ 100, & \text{ha } G_{PV} > 100 \end{cases} \quad (18.)$$

A G_{PV} optimális zöldáram-arány már a napelem aktuális termelését is figyelembe veszi. Az arány függ a korábban genetikus algoritmus által meghatározott G_{PV0} optimalizált értéktől. P_{batPV0} az akkumulátor teljesítménye napelem termelése nélkül ($P_{PV} = 0$).

$$P_{batPV0} = P_{tot} - P_{gridPV0} \quad (19.)$$

A $P_{gridPV0}$ a hálózati teljesítményt jelenti, amennyiben nem termel a napelem ($P_{PV} = 0$). Ekkor felírható a hálózat teljesítménye napelem pillanatnyi termelése nélkül:

$$P_{gridPV0} = P_{tot} - \left(\frac{G_{PV0}}{100} \cdot P_{tot} \right). \quad (20.)$$

Tehát az akkumulátor teljesítménye napelem nélkül az optimalizált zöldáram-arány alapján az alábbi:

$$P_{batPV0} = P_{tot} \cdot \frac{G_{PV0}}{100}. \quad (21.)$$

Amennyiben a napelem is termel villamos energiát $P_{PV} > 0$, úgy a K_{reg} regresszióval kiszámított költséget az I_{realPV} áramra kell elvégezni, I_{real} helyett, ahol I_{realPV} áram az akkumulátorból felvett tényleges áram, amikor a napelem is termel.

$$I_{realPV} = \begin{cases} \frac{100 \cdot I_{kivánt}}{\eta_{LLC}}, & \text{ha } I_{realPV} \geq 0 \\ I_{kivánt}, & \text{ha } I_{realPV} < 0 \end{cases} \quad (22.)$$

Az LLC konverter hatásfoka a már ismert közelítő polinom alapján a 23. egyenlet szerint alakul, ahol a hatványkitevőben a névleges teljesítményhez képest viszonyított terhelés és az optimális zöldáram-arány szorzata szerepel.

$$\eta_{LLC} = f \cdot \left(1 - e^{-g \cdot \left(\frac{P_{tot}}{P_N} \cdot G_{PV} \right)} \right) \quad (23.)$$

Az optimalizálás által kívánt akkumulátor áram tehát:

$$I_{kivánt} = \frac{P_{batPV}}{U_{bat}}. \quad (24.)$$

Az akkumulátor által leadott teljesítmény a teljes terhelés és a hálózatról felvett teljesítmény, valamint a napelem aktuális termelésének a különbsége.

$$P_{batPV} = P_{tot} - P_{GRID} - P_{PV} \quad (25.)$$

A hálózatról felvett teljesítmény nagysága ebben az esetben:

$$P_{GRID} = \begin{cases} 0, & \text{ha } P_{PV} \geq P_{GRIDPV0} \\ P_{tot} - P_{PV} - P_{batPV0}, & \text{ha } P_{PV} < P_{GRIDPV0} \end{cases} \quad (26.)$$

A teljes egységköltség, amennyiben a napelem is termel ($P_{PV} > 0$) a következő egyenlet formájába önthető, amennyiben I_{realPV} értéke nagyobb egyenlő, mint nulla.

$$K_{\text{ÖPV}} = \frac{G_{PV}}{100} \cdot \left(K_{PV} \frac{Ft}{kWh} + K_{LLC} \frac{Ft}{kWh} + K \frac{Ft}{kWh} \text{regrealPV} \right) + \left(\frac{100 - G_{PV}}{100} \cdot K_{grid} \right) \quad (27.)$$

Ha nincs terhelés bekapcsolva, akkor az összegységköltség zérus.

$$K_{\text{ÖPV}} = 0, \text{ ha } P_{\text{tot}} = 0 \quad (28.)$$

Egy napon belül többször előfordulhat olyan eset, amikor a hálózati energia díja negatív. Ekkor az energiaszolgáltató fizet a fogyasztóknak azért, hogy villamos energiát vételezzenek a hálózatról. Ilyen esetben nem célszerű akkumulátorból kinyerni villamos energiát, tehát az alábbi feltételnek igaznak kell lennie.

$$G_{\text{PV}} = \begin{cases} 0, & \text{ha } K_{\text{GRID}} \leq 0 \\ \frac{100 \cdot (P_{\text{PV}} + P_{\text{batPV0}})}{P_{\text{tot}}}, & \text{ha } K_{\text{GRID}} > 0 \end{cases} \quad (29.)$$

3. EREDMÉNYEK

A következőkben bemutatásra kerül az optimalizálás validálása, valamint az ezekből generált kimutatások, eredmények, amelyek igazolják, hogy a zöldáram-arány változtatásával nagymértékben csökkenthető a felhasznált energia egységköltsége.

3.1. Genetikus algoritmus implementálása

A genetikus algoritmussal való optimalizálás Matlab-ban került implementálásra. A kidolgozott gazdasági modellben a fitnessfüggvényt a 17. egyenlet reprezentálja, amely a genetikus algoritmushoz elengedhetetlen célfüggvény. Olyan szoftver valósult meg, amely estén egyszerre három paraméter változik, ezek a következők: hálózati energia díja (K_{GRID}), optimális zöldáram-arány, amikor a napelem termelése zérus (G_{PV0}) és az aktuális teljes fogyasztás (P_{tot}). A gazdasági modellben látott egyenleteket is tartalmazza a szoftver, így kiszámolja például az akkumulátor aktuális áramát is a határfokokat figyelembevéve. Kezdetben a szoftver kiszámolja az akkumulátor paramétereit alapján, hogy adott merítési mélység és terhelőáram esetén mennyi az akkumulátor egységköltsége. Ezt használja fel a genetikus algoritmus. Az akkumulátor egységköltségét regresszióval lehet közelíteni, amelynek együtthatóit is a szoftver számolja ki.

A genetikus algoritmus nem egyszer fut le a programkódban. Az aktuális fogyasztás (0-tól P_{N} -ig) és a hálózati egységköltség (0-tól 200 Ft/kWh-ig) iterálásával kiszámítja az adott paraméterekhez tartozó optimális zöldáram-arányt, amelyet egy mátrixban is tárol. Ezzel párhuzamosan egy másik mátrixban tárolja az adott zöldáram-arányhoz tartozó minimalizált összegköltséget is. Az elvégzett optimalizálás eredményeit Excel-fájlban tárolja. Belátható, hogy az iterálás során nem érdemes túl alacsony lépésközt beállítani az aktuális fogyasztás és hálózati egységköltségre, mert nagymértékben növeli a program futásidőjét. A szoftver további része a mátrixokból interpolációt valósít meg és grafikus kimutatásokat készít.

3.2. Kimutatások példarendszerrel

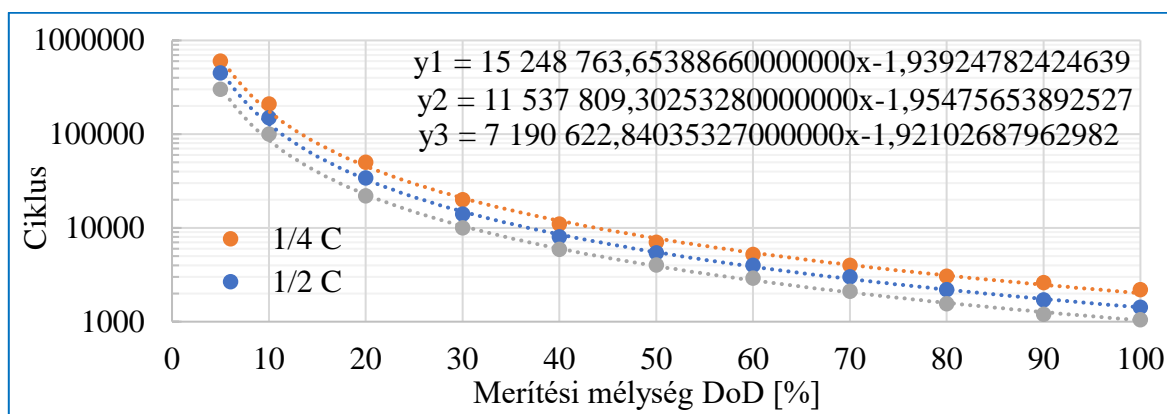
Az alábbi alfejezet egy példarendszerre történő optimalizálást, kimutatást ismertet. A statikus rendszer paramétereit az 2. táblázat tartalmazza. Az értékek próbálják a valóságot tükrözni, amelyek piackutatás és katalógusok elemzése alapján kerültek deklarálásra a táblázatban.

2. táblázat: A példarendszer statikus bemeneti paramétereit

Paraméter	Érték	Dimenzió
P_{N}	48	kW
C_{bat}	1000	Ah
U_{batnom}	48	V

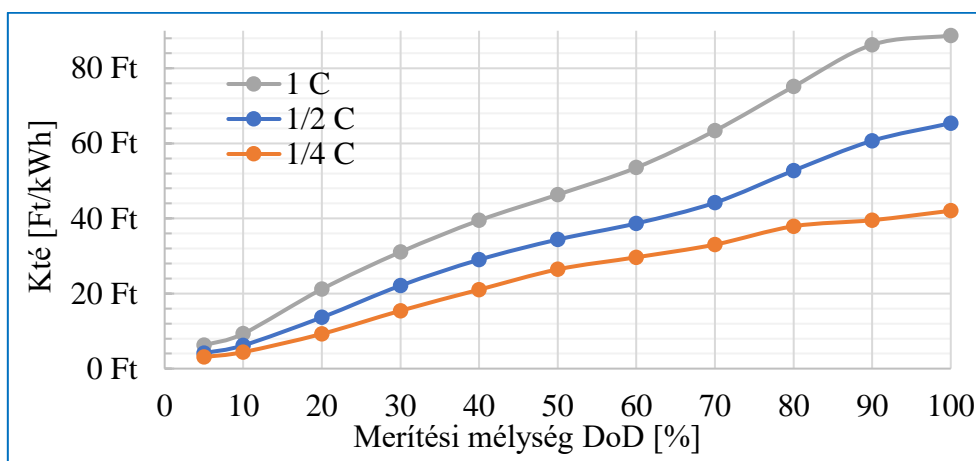
K_{bebat}	4.320.000	Ft
k	1,005	-
K_{beLLC}	2.000.000	Ft
K_{bePV}	7.200.000	Ft
P_{PVk}	48	kWp
d	0,005	-
$E_{1év}$	1100	kWh
η_{MPPT}	90	%

A $LiFePO_4$ akkumulátor élettartama a merítési mélység és terhelés függvényében ismert, a 4. ábra mutatja. Az ismert adatpontokra illesztett polinomok is megfigyelhetőek az ábrán.



4. ábra: Akkumulátor élettartama a merítési mélység és a terhelés függvényében

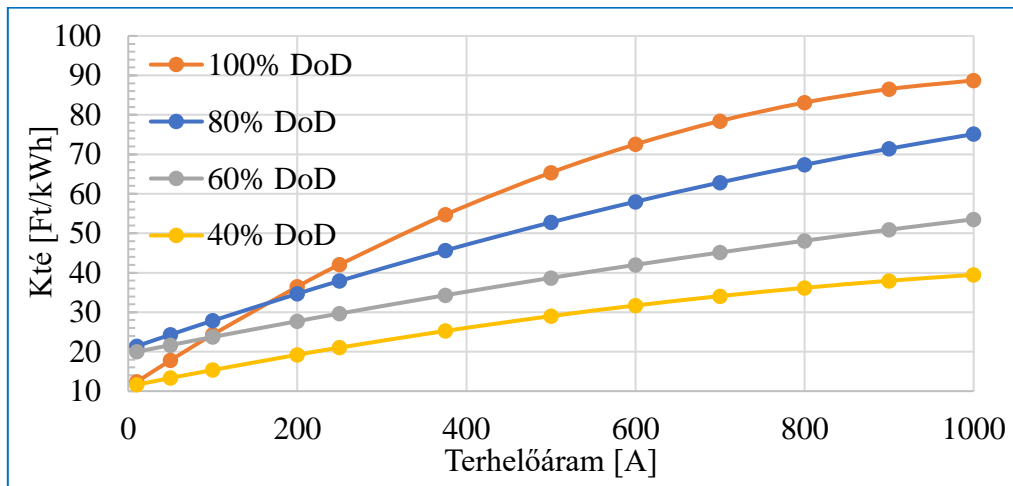
Ezek után kiszámítható az akkumulátor egységköltsége a merítési mélység, terhelés ismeretében, amelyet az 5. ábra szemléltet.



5. ábra: Az akkumulátor egységköltsége a merítési mélység, terhelés függvényében

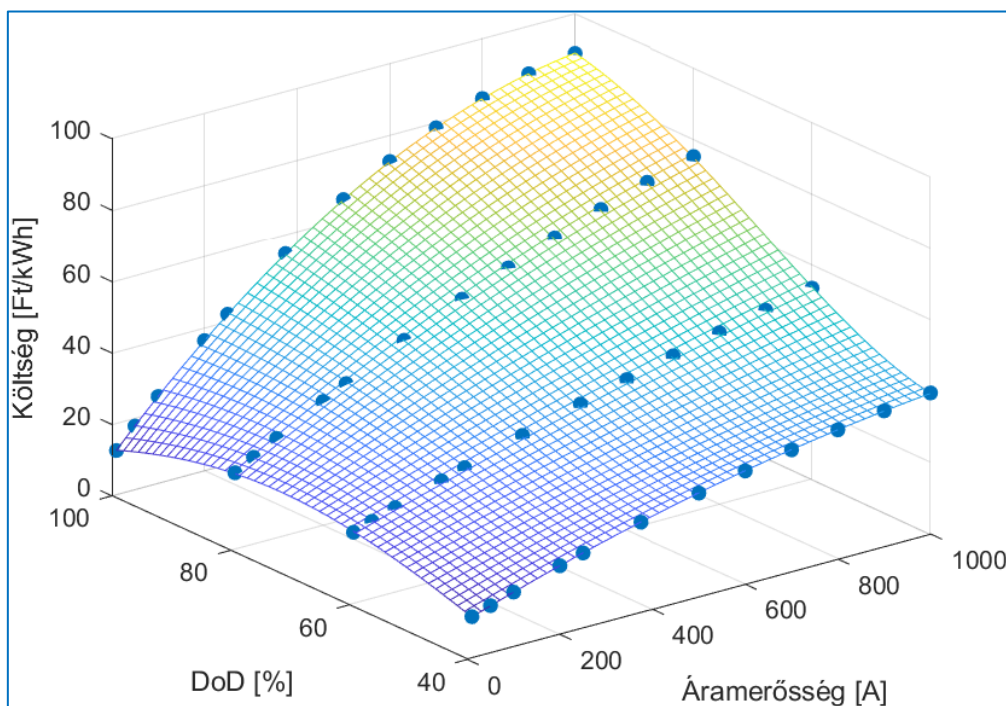
Az ismert teljes életciklusra vonatkoztatott egységköltségeket csak három terhelés esetén lehet meghatározni, mivel az akkumulátor élettartama három görbével van jellemezve. Ezen görbék ismerete hosszú mérések eredménye, ezért nem célszerű sok görbe felvétele, a gyártók sem szolgáltatnak nagymennyiségű adatot. Az ismert egységköltség adataiból regresszióval meghatározható az egységköltség tetszőleges terhelőáramra, különböző merítési mélységek

esetén (6. ábra).



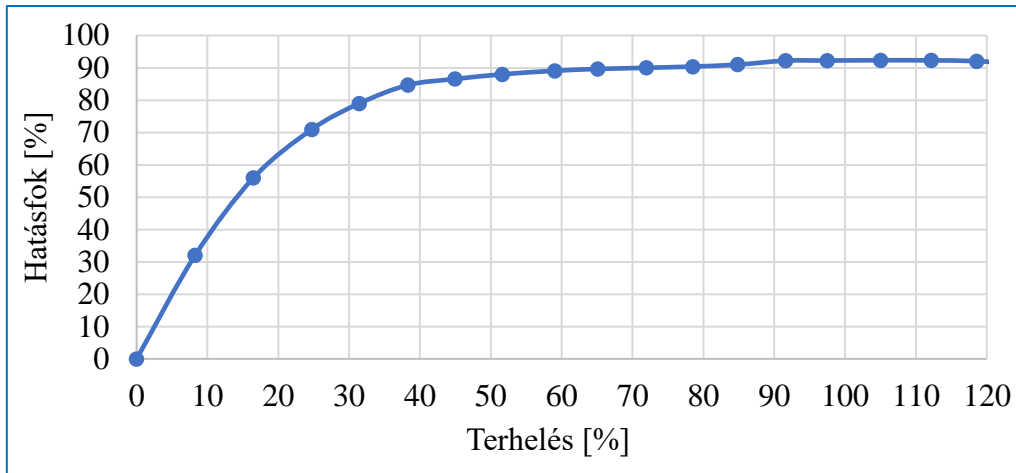
6. ábra: Egységköltségek a terhelőáram és merítési mélységek függvényében

Ezen görbékre már ráilleszthető a kétváltozós közelítőfüggvény, amely alapján tetszőlegesen meghatározható az akkumulátor teljes élettartamára vonatkoztatott egységköltség, a merítési mélység és áramerősség függvényében. A kapott eredményt a 7. ábra mutatja.



7. ábra: Az akkumulátor teljes élettartamára vonatkoztatott egységköltség a DoD és áramerősség függvényében

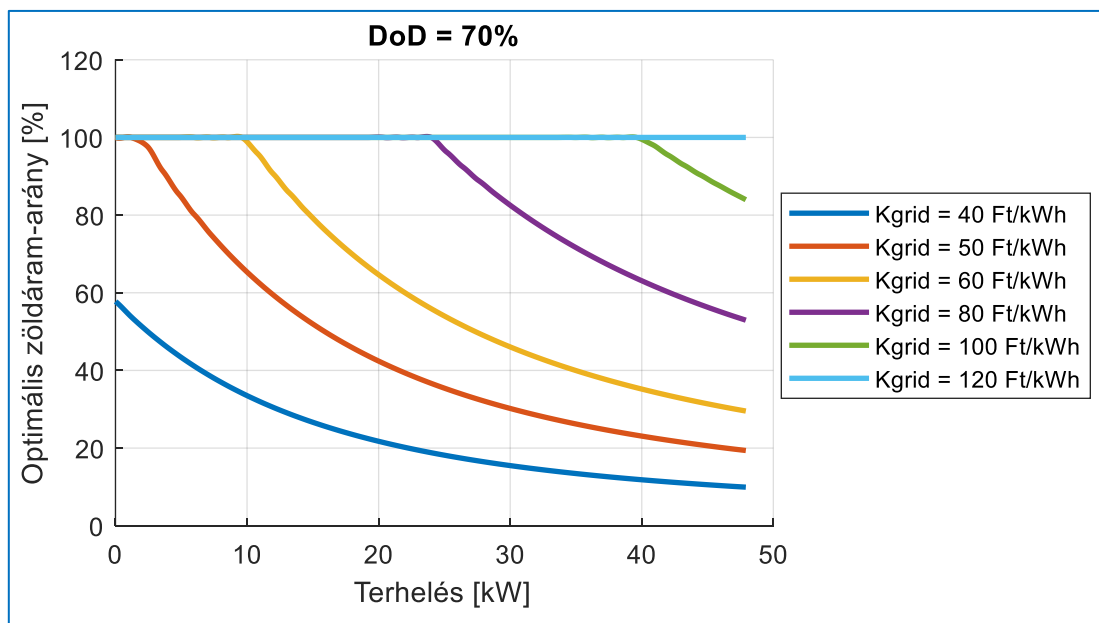
Az LLC konverter hatásfokát a terhelés függvényében ismerni szükséges. Az ismert hatásfokgörbét a 8. ábra szemlélteti. A görbe közelíthető a korábban bemutatott polinommal (23. egyenlet alapján), amelynek jelen esetben az együtthatói $f = 92,2935$, $g = 0,0581$.



8. ábra: Az LLC konverter hatásfoka a terhelés függvényében - példa

Ezek után a genetikus algoritmus futtatása már lehetséges. Ismert az összes paraméter, ahol a dinamikus P_{tot} és K_{GRID} változók mellett a statikus f , g együtthatók, akkumulátor nominális feszültség (U_{bat}), napelem egységköltség (K_{PV}), LLC konverter egységköltség (K_{LLC}), DoD (merítési mélység), a rendszer névleges terhelési teljesítmény (P_N) szintén meghatározott. Meg kell jegyeznünk, hogy a merítési mélységet fixálni kell az optimalizáláskor.

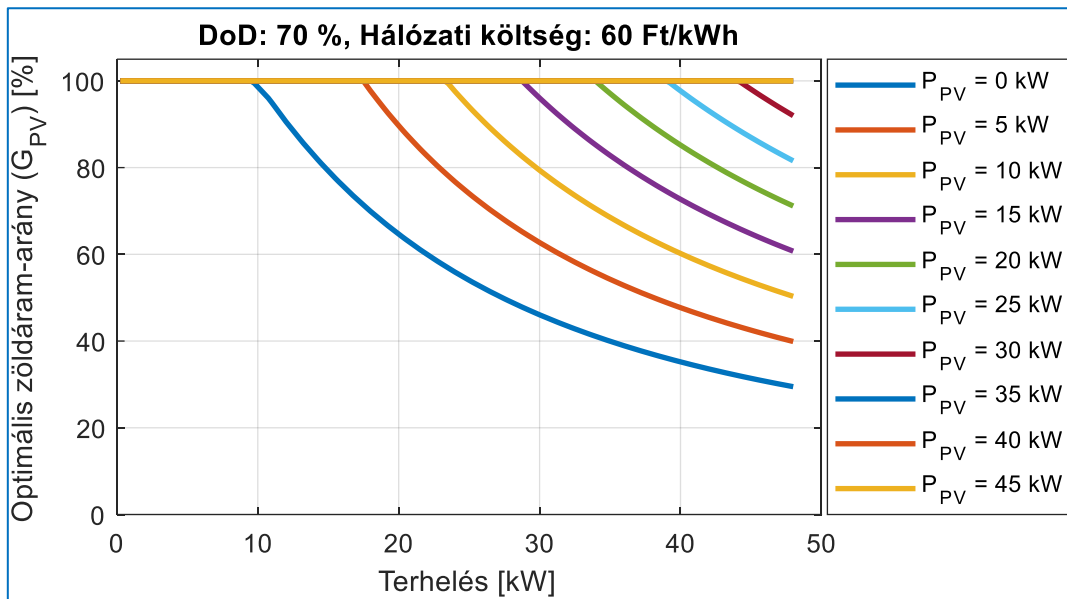
A genetikus algoritmus kezdetben 70%-os merítési mélység esetén futott le, ahol a hálózati energiadíj egységköltség és a terhelés változott. A kapott eredmények (9. ábra) az optimális zöldáram-arányok (G_{PV0}), amikor a napelem éppen nem termel villamos energiát.



9. ábra: Optimális zöldáram-arányok különböző hálózati energiadíjak és terhelések esetén, amennyiben a napelem éppen nem termel és DoD = 70%

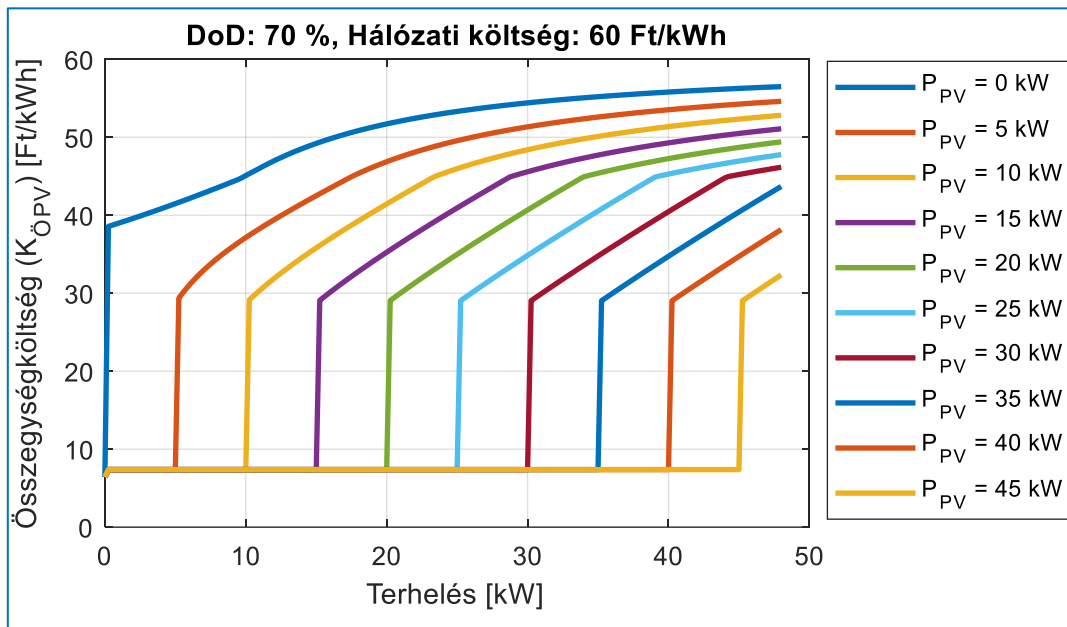
Az optimális zöldáram-arány (G_{PV}) a terhelés függvényében megfigyelhető a 10. ábrán, ahol különböző aktuális napelemes termelések is megjelennek, miközben a DoD értéke 70%, a hálózati költség pedig 60 Ft/kWh. Egyébként a 70%-os merítési mélység megválasztása már

drasztikusnak minősül ebben a rendszerben, hiszen a szünetmentes rendszerben az akkumulátorokban elegendő energiának kell rendelkezésre állnia ahhoz, hogy hálózat kimaradásakor ellássa a fogyasztókat.



10. ábra: Optimalis zöldáram-arány a terhelés függvényében, különböző napelem termelések esetén, amikor DoD = 70%

Az összegységköltségek ekkor a 11. ábrán láthatóak szerint alakulnak.



11. ábra: Optimalis zöldáram-arány a terhelés függvényében, különböző napelem termelések esetén

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Összességében elmondható, hogy a dinamikus energiamenedzsment rendszer képes csökkenteni a felhasznált villamos energia egyégeköltségét azáltal, hogy egyszerre a hálózatról és a

napelemes-akkumulátoros tárolóból vételez villamos energiát, illetve ennek arányát szabályozza. Ez a megközelítés nem csupán költséghatékonyságot biztosít, hanem a fenntarthatóságot is támogatja, hiszen a zöld energia arányának növelésével csökkenti a szén-dioxid-kibocsátást és hozzájárul az energiarendszer környezeti terhelésének mérsékléséhez. Az ilyen rendszerek kiemelten fontos szerepet játszanak a jövő energiaellátásában, ahol a fenntarthatóság, a megbízhatóság és a rugalmasság kulcsfontosságú szempontok.

A téma további kutatást igényel, hiszen olyan további kimutatások szükségesek, amelyek a teljes életciklus során megtakarított összeg mennyiségét is meghatározza. Továbbá a LiFePO₄ akkumulátortekológián kívül mást is érdemes vizsgálni. Mindemellett az egyenirányítót és LLC konvertert szabályozó rendszer konkretizálására is szükség van. Kutatások azt mutatják, hogy a neurális hálóval alkalmazott szabályozás tűnik a legmegbízhatóbbnak és dinamikusnak. Olyan algoritmus készült már, amely identifikálja a fizikai rendszert, tárolja a rendszert leíró paramétereket és ezek alapján betanítható a neurális háló. Így tehát a közbenső egyenáramú kör feszültsége konstans és a létrejött zöldáram-aránya dinamikusan követi az energiamedzsment rendszer szerint előírt alapjelet.

5. FELHASZNÁLT IRODALOM

- A. NASIRI, "Uninterruptible Power Supplies," *Power Electronics Handbook: Devices, Circuits, and Applications*, Third Edition, pp. 627–641, Jan. 2010, doi: 10.1016/B978-0-12-382036-5.00024-0.
- M. AAMIR, K. Ahmed KALWAR, and S. MEKHILEF, "Review: Uninterruptible Power Supply (UPS) system," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 58, pp. 1395–1410, May 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.12.335.
- F. CIANCETTA, E. FIORUCCI, A. FIORAVANTI, S. MARI, A. PRUDENZI, and A. SILVESTRI, "System for repetitive battery charge and discharge tests for battery life analysis," *Renewable Energy and Power Quality Journal*, vol. 20, pp. 90–94, Sep. 2022, doi: 10.24084/repqj20.227.
- M. K. TRAN, C. CUNANAN, S. PANCHAL, R. FRASER, and M. FOWLER, "Investigation of Individual Cells Replacement Concept in Lithium-Ion Battery Packs with Analysis on Economic Feasibility and Pack Design Requirements," *Processes 2021*, Vol. 9, Page 2263, vol. 9, no. 12, p. 2263, Dec. 2021, doi: 10.3390/PR9122263.
- C. LIN, A. TANG, N. WU, and J. XING, "Electrochemical and Mechanical Failure of Graphite-Based Anode Materials in Li-Ion Batteries for Electric Vehicles," *J Chem*, vol. 2016, no. 1, p. 2940437, Jan. 2016, doi: 10.1155/2016/2940437.
- M. ELMAHALLAWY, T. ELFOULY, A. ALOUANI, and A. M. MASSOUD, "A Comprehensive Review of Lithium-Ion Batteries Modeling, and State of Health and Remaining Useful Lifetime Prediction," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 119040–119070, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3221137.
- Y. Sun, S. Saxena, and M. Pecht, "Derating Guidelines for Lithium-Ion Batteries," *Energies 2018*, Vol. 11, Page 3295, no. 12, p. 3295, Nov. 2018, doi: 10.3390/EN11123295.
- J. KARUNARATHNA, U. MADAWALA, C. BAGULEY, F. BLAABJERG, and M. SANDELIC, "Battery Reliability of Fast Electric Vehicle Charging Systems," *2021 IEEE Southern Power Electronics Conference, SPEC 2021*, 2021, doi: 10.1109/SPEC52827.2021.9709461.
- H. S. CHOI, J. W. CHOI, and T. K. WHANGBO, "Design and Development of a Battery State of Health Estimation Model for Efficient Battery Monitoring Systems," *Sensors 2022*, Vol. 22, Page 4444, no. 12, p. 4444, Jun. 2022, doi: 10.3390/S22124444.

- A. KANAREYKIN, “A variant of the uninterruptible power supply circuit with double conversion,” *E3S Web of Conferences*, vol. 376, p. 01086, Mar. 2023, doi: 10.1051/E3SCONF/202337601086.
- J. SOMOGYINÉ MOLNÁR and D. SZALÁNCZI, “Napelemes rendszerek megtérülési idejének vizsgálata,” in *Elektrotechnikai és Elektronikai Szeminárium 2022*, Miskolc, 2022, pp. 119–135.
- J. SOMOGYINÉ MOLNÁR, “Szigetüzemű háztartási méretű kiserőmű (HMKE) megtérülési idejének elemzése,” *Jelenkori Társadalmi és Gazdasági Folyamatok 2023*, 18: Klsz. pp. 445-465., doi: 10.14232/jtgf.2023.kulonszam.445-465

VILLAMOS ANALÓGIA HASZNÁLATA A HIDRAULIKUS HAJTÁSOK- NÁL

USE OF ELECTRICAL ANALOGY FOR HYDRAULIC DRIVES

FEKETE Tamás

Ph.D., egyetemi tanársegéd, tamas.fekete@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Szerszámgépészeti és Mechatronikai Intézet,
Szerszámgépek Intézeti Tanszéke

Kivonat: A hidraulikában is megtalálhatóak a különböző típusú ellenállások épp úgy, mint az elektrotechnika váltakozó áramú áramkörökben. A váltakozó áramú hidraulikus áramkör működési elvének részletes leírásakor a villamos analógia alapján, a súrlódási nyomásváltozást: ohmos-, a tehetetlenségi nyomásváltozást: induktív-, még a folyadékoszlop összenyomhatóságából keletkező nyomásváltozást: kapacitív hidraulikus nyomásváltozásnak nevezük. A villamos analógia elméleti alapjainak áttekintést szeretné a dolgozat bemutatni.

Kulcsszavak: váltakozó áramú hidraulikus hajtás, villamos analógia

Abstract: Several types of resistors can also be found in hydraulics, just like in alternating current circuits in electrical engineering. When describing the operating principle of the alternating current hydraulic circuit in detail, based on the electrical analogy, the frictional pressure change is called: ohmic, the inertial pressure change is called: inductive, and the pressure change resulting from the compressibility of the liquid column is called: capacitive hydraulic pressure change. The thesis aims to present an overview of the theoretical basis of the electrical analogy.

Keywords: alternating current hydraulic drive, electrical analogy

1. BEVEZETÉS

Georg Simon Ohm német fizikus 1826-ban felismerte, hogy az elektromos ellenállás, a feszültség és az áramerősség egymással összefüggésben van. Ezt az összefüggést, amely érvényes bármely vezetőszakaszra és fogyasztóra is, Ohm törvényének nevezzük, melynek átrendezett formája:

$$U = RI . \quad (1.1)$$

A hidraulikában a súrlódásból származó nyomásesés jelenségét súrlódási nyomásesésnek nevezzük. A nyomásesés nem függ az áramlás irányától. Amennyiben az áramlás lamináris az alábbi összefüggés adódik a folyadékáram és annak nyomása között:

$$\Delta p_R = R_H Q \quad (1.2)$$

ahol

- Δp_r a súrlódásból származó nyomásesés,
- R_H a hidraulikus ellenállás és
- Q a folyadékáram.

A folyadékáram és a nyomás között az R_H súrlódási ellenállás teremti meg a függvénykapcsolatot.

Ezt az összefüggést szokás hidraulikus Ohm törvénynek is nevezni, ugyanis alakja a villamos Ohm-törvénnyel megegyezik.

2. A VÁLTAKOZÓ ÁRAMÚ HIDRAULIKUS HAJTÁSOK RÖVID BEMUTATÁSA

A váltakozó áramú hidraulikus hajtások a villamos analógia alapján két csoportba sorolhatók:

a szinkron hajtások és
az aszinkron hajtások 0000.

A szinkron hajtásokra igaz, hogy a hidrogenerátor bemenő tengelyének fordulatszáma megegyezik a hidromotor kimenő tengelyének a fordulatszámával, tehát az alábbi összefüggések érvényesülnek:

$$n_{generátor} = n_{motor} \quad (1.3)$$

és

$$M_{generátor} = M_{motor} \quad (1.4)$$

Az aszinkron váltakozó áramú hajtásokra a következő egyenlőtlenség teljesül:

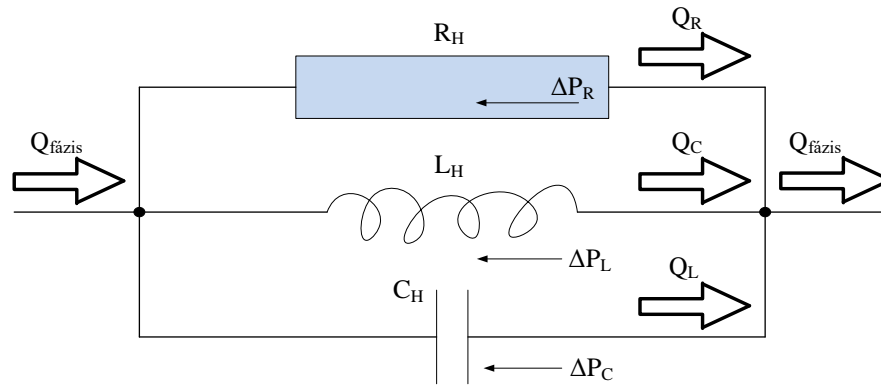
$$n_m \leq n_g \quad (1.5)$$

Ebből adódik, hogy a hajtás nyomatékváltóként is alkalmazható, ugyanis, ha a bemeneti fordulatszám (n_g), és a kimeneti fordulatszám (n_m) nem egyezik meg, akkor a $P = M \omega$ összefüggés alapján a bemeneti (M_g) és kimeneti nyomaték (M_m) eltérő értékű lesz.

3. A VÁLTAKOZÓ ÁRAMÚ HIDRAULIKUS HAJTÁSOK ELLENÁLLÁS TÍPUSAI

A hidraulikában is megtalálhatóak a különböző típusú ellenállások épp úgy, mint az elektrotechnika váltakozó áramú áramköreiben. A váltakozó áramú hidraulikus áramkör működési elvének részletes leírásakor a villamos analógia alapján, a súrlódási nyomásváltozást: ohmos-, a tehetetlenségi nyomásváltozást: induktív-, még a folyadékoszlop összenyomhatóságából keletkező nyomásváltozást: kapacitív hidraulikus nyomásváltozásnak nevezzük 0.

Legáltalánosabb esetben a fázisvezetékekben keletkező ellenállások az 1. ábra alapján szemléltetett módon helyettesíthetők.



1. ábra: A fázisvezetékben fellépő ellenállások.

3.1. Az Ohmos hidraulikus ellenállás

Az elektrotechnikában tiszta ohmos ellenállásnak azt a passzív áramköri elemet hívjuk (nem generátor és nem is áramforrás), amely mind egyen-, mind váltakozó áram esetén is ugyanakora ellenállást mutat. Az áramerősség értékét oly módon befolyásolja, hogy akadályozza áramlását, amelynek egy részét hővé alakítja. Ilyen ellenállás lehet maga a vezeték az áramkörben, vagy akár egy fogyasztó (pl. izzó). A hidraulikus rendszerekben ezzel szemben a felhasznált, különbözőféle hidraulikus fojtások (keresztmetszeti szűkület, bővület vagy akár egy csőív), a csővezeték fala és a hidraulikus közeg között, illetve a közeg belső súrlódásából adódó hidraulikus veszteségeket soroljuk ide. Ezek az ellenállások okoznak hőveszteséget és mint veszteség jelenik meg a rendszer működése szempontjából. A váltakozó áramú rendszerek energiaátviteli szempontból történő szabályozását a frekvencia ill. az amplitúdó változtatásával tehetjük meg. A fojtások, mint a teljesítményszabályozás eszközei nem játszanak szerepet. Így a váltakozó áramú hidraulikus rendszereknél az ohmos ellenállások fő típusai közül meghatározó a csővezeték és a hidraulikus közeg, illetve a folyadékrezecskék egymásközi súrlódásából keletkező, nyomásesésből és a csővezetéken keresztül folyó folyadékáram hányadosából adódik:

$$R_L = \frac{\Delta p}{Q} \text{ és} \quad (1.6)$$

$$R_T = \frac{\Delta p}{Q^2}, \quad (1.7)$$

ahol

- R_L , lamináris áramlás esetén az ellenállás,
- R_T , turbulens áramlás esetén az ellenállás.

3.2. Az induktív hidraulikus ellenállás

Az elektrotechnikában induktív ellenállásnak nevezzük az áramkörben lévő tekercsnek, a váltakozó árammal szembeni ellenállását 000. A hidraulikában az energiaközvetítő szerepet betöltő vezetékben lévő folyadékoszlopok tömegének gyorsításához energiára van szükség. Ez az energia nem a hasznos munkavégzésre irányuló energia részét képezi, hanem abból kerül

levonásra. A hidraulikus tömeg ezt mozgási energia formájában tárolja, majd, amikor az energiatovábbító közeg lelassul, akkor a mozgási energia, nyomási energiává alakul át. A hidraulikus induktív ellenállást az alábbi összefüggéssel lehet meghatározni:

$$L_h = \frac{\Delta p}{\frac{dQ}{dt}} \quad (1.8)$$

3.3. A kapacitív hidraulikus ellenállás

Az elektrotechnikában, hogy ha egy egyenáramú körfolyam kondenzátort tartalmaz, akkor, miután a kondenzátor feltöltődött, utána nem folyik tovább rajta keresztül áram, így az áramkör megszakad. Amennyiben váltakozó áramú rendszer kondenzátort tartalmaz, nem valósul meg az áramkör megszakadása, ugyanis a periódusidő első negyedrésztében a kondenzátor feltöltődik, a második negyedben kisül, a harmadik negyedben újra feltöltődik, de ellentétes polaritással, majd az utolsó negyedben ismét kisül. A hidraulikában az energiaközvetítést szolgáló hidraulikus folyadék, a hidraulikus körfolyamban, a hidraulikus energia egy részét tárolja összenyomhatósága miatt, majd a terhelés megszűnésével egyidejűleg visszaszolgáltatja a rendszer számára, ezért nem tekinthető tisztán veszteségnek. Ennek ellenére ez az energialengés is levonásra kerül a hasznos munkavégzésből, látens veszteségként jelentkezik. A hidraulikus kapacitív ellenállást az alábbi összefüggéssel lehet meghatározni:

$$C_h = \frac{\Delta V}{\Delta p} \quad (1.9)$$

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Az előzőekben bemutatásra került összefüggések segítségével belátható, hogy a villamos ohm törvény és a „hidraulikus ohm törvény” segítségével a váltakozó áramú hajtások elméleti összefüggései kisebb módosítások mellett alkalmazhatóak. A sorosan és párhuzamosan kapcsolt hidraulikus ellenállások (lamináris és turbulens áramlások esetében) eredőjének meghatározása egy későbbi dolgozat kapcsán fogom részletesen megtárgyalni.

4. FELHASZNÁLT IRODALOM

- LUKÁCS, J.: *Váltakozó áramú hidraulikus hajtások elméleti és konstrukciós kérdései*. Kandidátusi értekezés. Miskolc, 1976.
- KRÖELL DULAY I., LUKÁCS J.: *Fundamentals of Hydraulic Power Transmission (Studies in Industrial Engineering)*. North-Holland (August 1, 1988), ISBN-10: 0444989730. Miskolc
- CONSTANTINESCU, G.: *Theory of wave Transmission*. England, 1922
- CONSTANTINESCU G.: *Sonics*. Trans. Soc. of Engineers, London, 1959.
- HAMBLEY A.: *Electrical Engineering: Principles & Applications, Global Edition*. Pearson Education Limited. ISBN 9781292223124, 2018.
- NCCER: *Electrical Trainee Guide, Level 1*. Pearson, 2017.
- PRASAD R.: *Analog and digital electronic circuits*. Paperback by Prasad, R., ISBN 3030651312, ISBN-13 9783030651312, Free P&P in the UK, Sringer, 2020.

FORGÓ ALKATRÉSZEK FORGÁSTENGYELMENTI ELMOZDULÁSÁ- NAK MÉRÉSE LINE SCAN KAMERÁVAL

THE MEASUREMENT OF AXIAL DISPLACEMENT OF ROTATING COMPO- NENTS USING A LINE SCAN CAMERA

FORGÁCS Zsófia¹

¹egyetemi tanársegéd, zsofia.forgacs@uni-miskolc.hu

¹Miskolci Egyetem, Automatizálási és Infokommunikációs Intézet, 3515 Miskolc-Egyetemváros

Kivonat: A cikk egy új módszert mutat be a forgó alkatrészek forgástengelymenti elmozdulásának mérésére line scan kamerák alkalmazásával. Egy autóiipari vállalattal történő együttműködés során fejlesztett megközelítés lehetővé teszi az indítómotorok érintésmentes vizsgálatát, a fordulatszám és a fogaskerék visszacsapódásának szét-szerelés nélküli mérését. A módszer line scan kamerákat és statisztikai képfeldolgozási technikákat alkalmaz a rögzített képek elemzésére és a pixeleloszlások varianciaprofiljainak vizsgálatával határozza meg az alkatrészek elmozdulását. Ez a megoldás pontos mérést biztosít, miközben minimalizálja a költséges berendezések szükségességét, így reagálva a gépi látás technológia növekvő jelentőségére az ipar számos területén.

Kulcsszavak: line scan kamera, statisztikai képfeldolgozás, tengelymenti elmozdulás, gépi látás.

Abstract: This paper presents a novel method for measuring the axial displacement of rotating components using line scan cameras. Developed in partnership with an automotive company, this approach enables non-contact, non-invasive inspection of starter motors, allowing for the measurement of rotational speed and gear backlash without the need for disassembly. The method leverages line scan cameras and statistical image processing techniques to analyse recorded images, examining the variance profiles of pixel arrays to determine component displacement. This solution ensures precise measurement while minimizing the requirement for costly equipment, addressing the growing significance of machine vision technology across diverse industrial domains.

Keywords: line scan camera, statistical image processing, axial displacement, machine vision.

1. BEVEZETÉS

Az intelligens gyártási folyamatok megjelenésével egyre növekszik az igény a gyártási folyamatok professzionális vizsgálatára és a minőségi adatok iránt, ezért válik egyre fontosabbá a gépi látás szerepe az ipar számos területén. A gépi látáson alapuló alkalmazások köre jelentősen megnőtt az elmúlt években, amire egy példa a 2D képfeldolgozástól a háromdimenziós rendszerekre történő fejlődés. Az optikai rendszerek nemcsak a legkisebb hibákat észlelik, hanem értékes adatokat szolgáltatnak, amelyek a gyártási folyamat optimalizálására használhatók fel [1].

A cikkben ismertetett elmozdulás mérési eljárás kidolgozásának igénye korábban egy autóiipari vállalat és a Miskolci Egyetem együttműködésében fogalmazódott meg. A kitűzött cél az volt, hogy a cég által fejlesztett indítómotorok tesztelésekor, annak fordulatszáma és a motor fogaskerékének tengelymenti visszacsapódása érintésmentesen legyen mérhető, a termék megbontása és megjelölése nélkül.

Számos érintésmentes elmozdulás mérési technika létezik, amelyek közül a legelterjedtebbek a lézeres háromszögelés, a kapacitív, az induktív, az optikai, az ultrahangos és a magnetostríciós módszerek. A lézeres háromszögelés magas pontosságot biztosít [2], míg a kapacitív és induktív szenzorok [3] különösen alkalmasak rövidtávú mérésekre vezető vagy fém anyagokon [4]. Az interferometria kivételes pontosságot ér el [5], ám bonyolult és költséges eljárás. Az ultrahangos szenzorok nagyobb távolságok mérésére alkalmasak, de kevésbé pontosak. A magnetostríciós szenzorok hosszú távú, pontos elmozdulás követésre ideálisak. Ezen

technikák többsége nem igényli a rendszer szétszerelését vagy speciális jelöléseket, kivéve az olyan speciális eseteket, mint az interferometria vagy a magnetostrikció, ahol ilyen követelmények előfordulhatnak.

A mérési módszer tervezése során egy gépi látáson alapuló rendszer kidolgozása mellett döntöttem, ahol a kamera kiválasztására nagy hangsúlyt kell fektetni. A kihívást a tesztelendő termék nagysebességű mozgása jelentette, hiszen a vizsgált indítómotor fogaskerekének sebessége több ezer fordulat/perc fordulatszámot ér el működés közben. A képelemzéshez korábban egy nagysebességű kamerával, 15000 fps mellett rögzítettünk felvételeket [6]. A kamera tiszta, könnyen feldolgozható képet nyújtott a motor működése során, így alkalmas volt a mérési feladatra, de a magas költségei (30 000 USD, kb. 10 500 000 HUF) miatt egy alternatív mérési módszer kifejlesztésére törekedtünk. A kutatómunka során használt line scan kamera jelenlegi nettó listaára 929 EUR (kb. 370 000 HUF), amely csaknem harmincszoros költségcsökkentést jelent az alkalmazott kamera árában.

A line scan kamerák gyakori felhasználása a mozgó alkatrészek és termékek vizsgálata, például szállítószalag felé [7] vagy forgó hengeres test elé, a forgástengelyre merőlegesen helyezve. A hagyományos alkalmazásoknál, ha a képrögzítés túl alacsony frekvencián történik, akkor a kép összezsúszik, ha pedig túl magasra van állítva, akkor szétesik. A fordulatszám mérési eljárás kidolgozásakor ezt a jelenséget használtam ki. A mérési folyamat első lépése azon pontok kiválasztása a felvételen, ahol a számítások elvégezhetők. Ezt a feladatot statisztikai eszközökkel valósítottam meg. Az elmozdulás mérés a vizsgált objektum képpontméretének ismeretében már elvégezhető. A kihívást ennél a mérési eljárásnál is a mérési pontok kiválasztása jelentette, melyet szintén statisztikai eszközökkel és a képpontsorok varianciagörbéinek előfeldolgozásával végeztem el.

2. MÓDSZERTAN

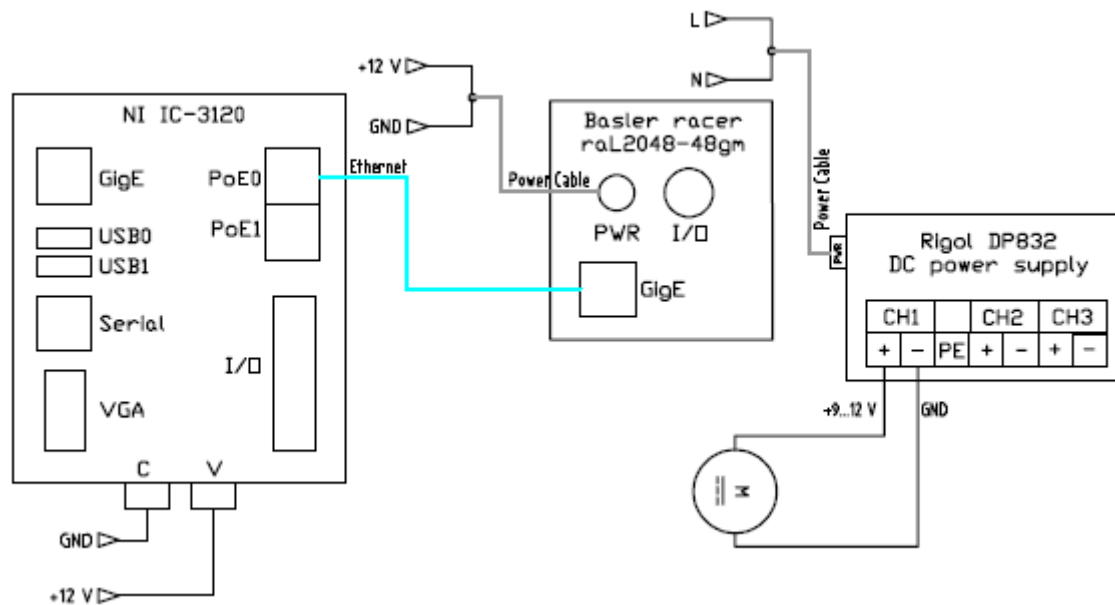
A mérési eljárás első lépése a line scan kamerával a rögzített képek azon pontjainak azonosítása, ahol a számításokat végre lehet hajtani. Ezt a feladatot alapvető statisztikai eszközök alkalmazásával oldottam meg. A rögzített képek vizsgálata adatmátrixok statisztikai elemzéseként is értelmezhető, amely különböző statisztikai technikák alkalmazását jelenti a mátrixba rendezett adatok elemzésére. A mátrixban lévő adatok elemzésére szolgáló általános technikák közé tartozik a leíró statisztika, amelyek az adatok összegzéséhez szükséges mértékek kiszámítását foglalják magukban [8]. Ezek a technikák az adatkészlet fő jellemzőit foglalják össze, mint a központi tendenciák mértékeit (átlag, medián) és a változékonyság mértékeit (terjedelem, szórási). Az inferenciális statisztika következtetéseket von le a populációról a minta adatai alapján [9]. Ezen technikák közé tartozik a t-próba, ANOVA (ANalysis Of VAriance – varianciaanalízis), khi-négyzet próba és regresszióanalízis. A korrelációs elemzés két változó közötti kapcsolatot vizsgál egy mátrixban, hogy megállapítsa, pozitív vagy negatív korreláció áll-e fenn közöttük [10]. A regresszióanalízis segít megérteni a függő változó és egy vagy több független változó közötti kapcsolatot a mátrixban [11], becslési és következtetési célból. A hipotézisvizsgálat során a kapcsolatok vagy különbségek statisztikai szignifikanciájának értékelése történik annak meghatározása érdekében, hogy ezek a véletlennek köszönhetőek-e, vagy valóban szignifikánsak [12]. Ez a módszer a null- és alternatív hipotézisek megfogalmazásával, a megfelelő próbastatisztika kiválasztásával és a p-érték meghatározásával történik, hogy döntést hozzon a hipotézis állításáról. A klaszterelemzés hasonló adatpontokat csoportosít jellemzőik alapján, segítve a minták vagy klaszterek azonosítását az adatokban [13].

A statisztikai képfeldolgozás a képfeldolgozás egy olyan tématerülete, amely statisztikai technikák és módszerek alkalmazását javasolja a képek elemzésére és manipulálására [14]. Statisztikai modellek és algoritmusok használatát foglalja magában, hogy értelmezhető információkat nyerjenek ki a képekből, javítsák a képminőséget, és következtetéseket vonjanak le a kép

tartalmáról [15]. A statisztikai képfeldolgozási technikák közé tartozik a képsimítás, éldetektálás, szegmentálás, objektumfelismerés és osztályozás.

A gyakori statisztikai képfeldolgozási technikák közé tartozik a kép simítása, amely célja a képminőség javítása a zaj csökkentése vagy az irreleváns részletek eltávolítása által. Olyan módszerekkel, mint az átlagolás vagy a Gauss-szűrés [16], a kép pixelértékeit statisztikai mérések alapján módosítják, hogy egységesebb megjelenést hozzanak létre. Az éldetektálás célja az élek és határok azonosítása a képen, amely hasznos lehet az objektumfelismeréshez és képszegmentáláshoz. Statisztikai megközelítésekkel, mint például a Sobel-operátor [17] vagy a Canny éldetektálás [18] alkalmazásával, az intenzitásgradiens elemzésére kerül sor a képen [19], lehetővé téve az élek jelentős változásainak felismerését a pixelértékekben. A képszegmentálás célja a kép jelentős régiókra vagy objektumokra való felosztása [20] a szín, textúra vagy intenzitás hasonlóságai alapján. Statisztikai technikák, mint a klaszterezés vagy küszöbölés felhasználásával a kép pixelértékeit vizsgálják és különálló régiókra vagy entitásokra kategorizálják. Az objektumfelismerés célja objektumok azonosítása és osztályozása [21] a képen statisztikai minták és jellemzők alapján. A sablonillesztés vagy gépi tanulási algoritmusok használhatók specifikus objektumok vagy minták azonosítására, amely az objektumfelismerés és -osztályozás feladatainak automatizálását teszi lehetővé. A kép osztályozása a képek különböző osztályokba vagy kategóriákba sorolását jelenti a különböző jellemzők statisztikai elemzése alapján. Ezeket a technikákat a mintafelismerésben is használják, ahol statisztikai modelleket képeznek a mintázatok vagy objektumok felismerésére és osztályozására a képeken.

Az elmozdulás mérés során egy egyenáramú motor tengelyére szerelt 3D nyomtatott fogaskereket vizsgáltam. A motort egy előre meghatározott távolságra, a forgástengellyel párhuzamosan mozdítottam el. A központi vezérlőegység a National Instruments IC-3120 ipari vezérlőegysége volt. A képrögzítő eszköz egy Basler racer raL2048-48gm monokróm line scan kamera volt, amely Gigabit Etherneten keresztül csatlakozott a központi egységhez. A DC motor tápellátását egy Rigol DP832 DC tápegység biztosította, 9-12 V feszültségen működve. Ennek az irányítórendszernek a váza látható az 1. ábrán.



1. ábra: Irányítórendszer elmozdulás méréshez

A forgó alkatrész tengelymenti, fizikai pozíciójának meghatározása elvégezhető, ha ismert az objektum pixelméret (OPS), ami a látómező (FOV_x) és szenzorfelbontás (Res_x) forgástengely irányú méreteinek hányadosát jelenti esetben. Az alkatrész tengelymenti pozíciója egy d_0 kezdőponthoz képest az 1. összefüggéssel meghatározható:

$$d_m = |x_0 - x_m| \cdot OPS = |x_0 - x_m| \cdot \frac{FOV_x}{Res_x} [mm], \quad (1.)$$

ahol:

d_m [mm] az elmozdulás mértéke a d_0 (0 mm) referenciaponthoz képest;

x_0 a referenciapont képpontban kifejezve;

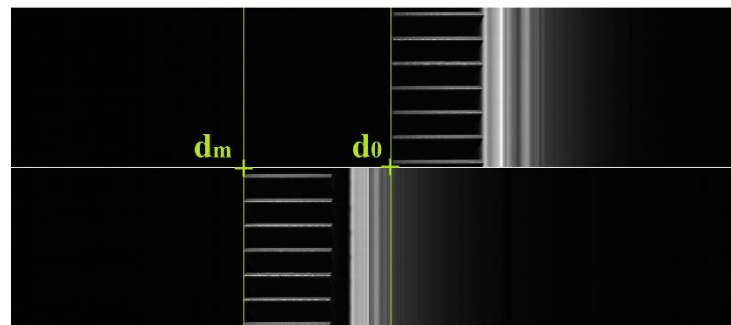
x_m az alkatrész elmozdulás utáni helyzete képpontban kifejezve;

OPS [mm] az objektum pixelméret;

FOV_x [mm] a látómező X dimenziója;

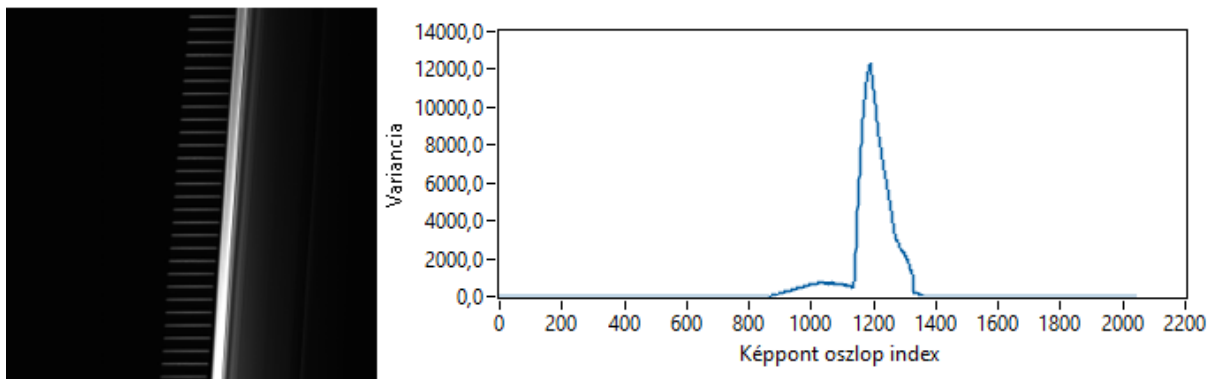
Res_x a kamera felbontás X dimenziója képpontban kifejezve.

Az összefüggésben lévő x_0 annak a referenciapontnak az x koordinátáját jelöli, amelyhez képest a mérést végezzük, x_m pedig az elmozdult alkatrész kijelölt mérési pontjának x koordinátáját. A 2. ábrán két különböző pozícióban készült felvétel látható.



2. ábra: Részletek pozíciómeghatározásra készült felvételekből

A fenti felvételek a forgó alkatrészek állandósult helyzetében készültek. Amennyiben az alkatrész elmozdulása detektálható a rögzített képen, mint a 3. ábrán, a fordulatszám mérésnél használt kiválasztó algoritmus nem alkalmas a feladatra.

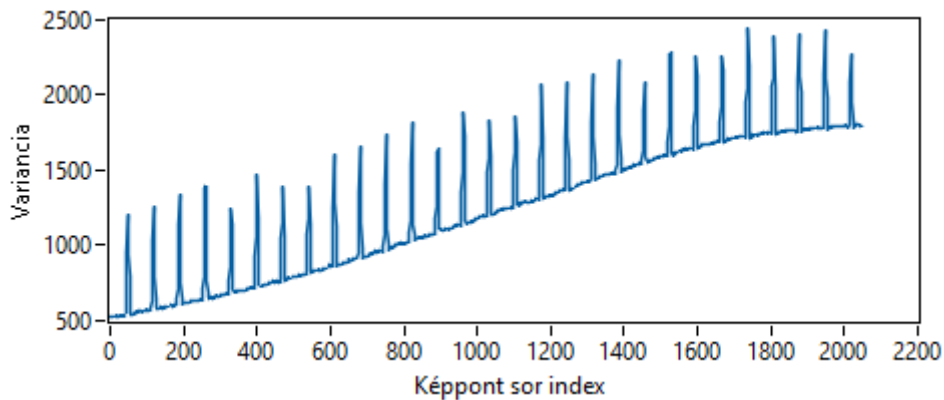


3. ábra: Pillanatfelvétel és varianciaértékek az alkatrész elmozdulása közben

3. A VARIANCIAGÖRBE ELŐFELDOLGOZÁSA

Az alkatrész elmozdulása a kép alsó képpontsoraiban detektálható, a képpont oszlopokra kiszámolt varianciagörbéből azonban ez a mérési pont nem határozható meg. A legelső képsorok kiválasztásához, ahol detektálható az alkatrész, megvizsgáltam a képsorok varianciáját. A

3. ábrán látható felvétel képpont soraira számolt varianciagörbe látható a 4. ábrán.

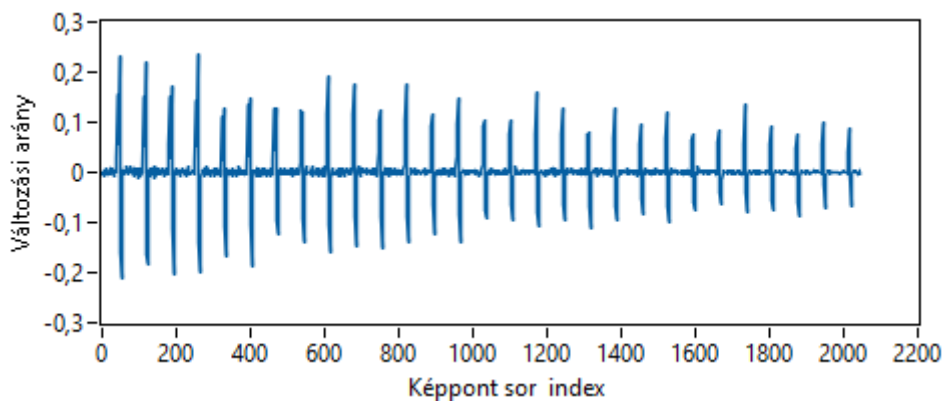


4. ábra: Varianciaértékek a felvétel pixelsorain

Ha a későbbi képpont-oszlop vizsgálatokhoz szűkítjük a mérési tartományt a képpont sorokban mért varianciaértékek alapján megtalált utolsó jellemző pozíciójára (a fenti ábra alapján a jobb szélső görbecsúcs x koordinátájának keresése a cél), a varianciavizsgálat alkalmas lesz az elmozdulás mértékének kiszámításához. A görbe jellege miatt viszont az utolsó alkatrészellemző nem választható ki egyszerű küszöbérték vizsgálattal. Az alkatrész jellemzőit reprezentáló kiugró értékek detektálásához ezért megvizsgáltam a varianciaértékek változási arányát a képpontsor minden pontjában, amely egy diszkrét (előrettekintő) derivált és az aktuálisan beolvasott érték hányadosaként értelmezhető a 2. összefüggés szerint.

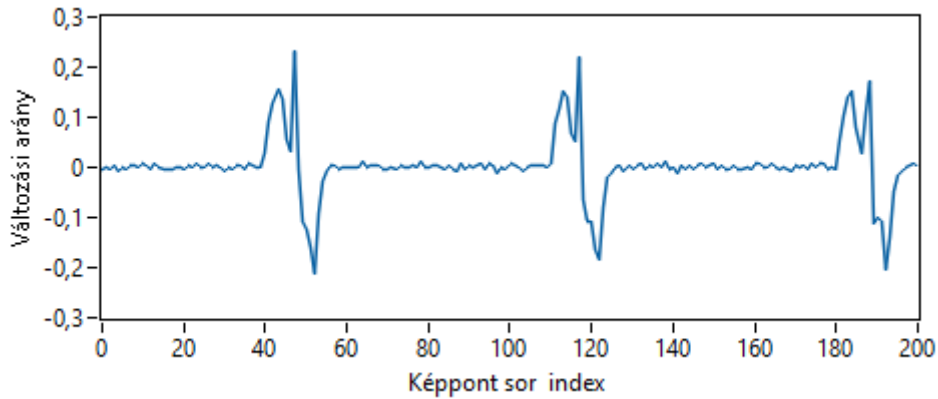
$$v_i = \frac{\Delta \text{Var}(y_i)}{\text{Var}(y_i)} = \frac{\text{Var}(y_{i+1}) - \text{Var}(y_i)}{\text{Var}(y_i)}, \quad (2.)$$

Az összefüggés alkalmazásának eredménye látható az 5. ábrán:



5. ábra: Változási arányértékek a felvétel képpont sorain

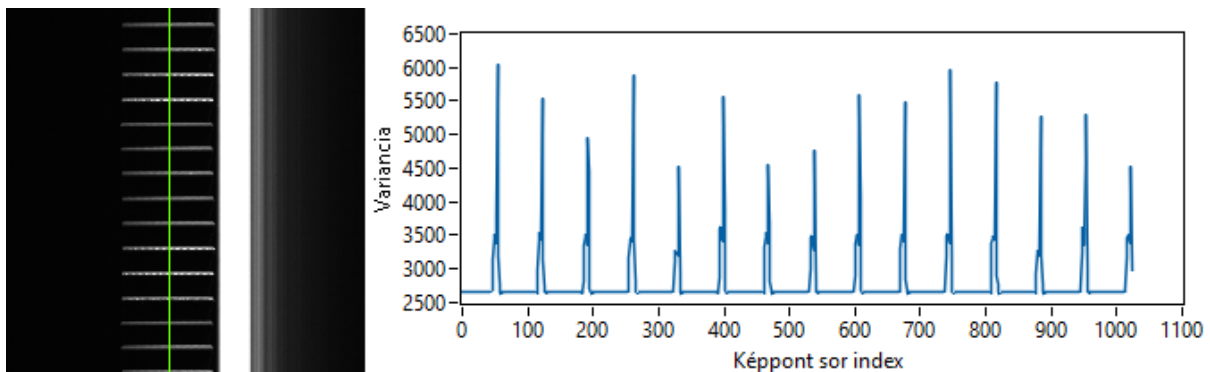
A változási aránygörbe már könnyebben feldolgozható, azonban küszöbölésre még nem alkalmas közvetlenül a görbecsúcsok változásának jellege miatt, amely a 6. ábrán, a fenti grafikon adataira való ráközelítéssel megfigyelhető.



6. ábra: Változási aránygörbe az első 200 sor varianciaértékére

Ha a fenti görbén például egy $K=0,05$ értékű küszöböt alkalmaznánk a jellemzők megszámlálásához és azok pozícióinak megtalálásához, helytelen eredményt kapnánk, hiszen némelyik görbecsúcsot kétszer adnánk hozzá az eredményhez.

Egy további felmerülő problémát jelenthet a jellemzők számolásának algoritmusában, ha a képen a legelső jellemző nem teljes egészében jelenik meg a felvételen, ilyenkor ugyanis előfordulhat, hogy az utolsó jellemző és a felvétel legelső y koordinátája (H) közötti különbség 1. Ilyen esetben csak egy képpontsor kerül kiválasztásra a vizsgálathoz, amelyen viszont az oszlop irányú varianciaszámítás nem értelmezhető. Erre az esetre mutat példát a 7. ábrán lévő felvételrészlet és annak képpont soraira kiszámolt varianciagörbe.



7. ábra: Nem teljes jellemző hatása a képpont sor varianciagörbéjére

Ennek a problémának egy lehetséges megoldása az alsó képpont sorok kiválasztásának bővítése egy feltételvizsgálattal, ami szerint a kiválasztott sorok számának legalább a görbecsúcsok közötti távolsággal kell egyenlőnek lennie. Amennyiben sikerül meghatározni ezt az értéket a variancia változási aránygörbén, akkor a 6. ábrával szemléltetett küszöbölési probléma is megoldódik.

A feladat értelmezhető az aránygörbe periodicitásának vizsgálataként, amelynek eredményeként meghatározható az adatsor periódusa. A frekvenciatartalom elemzésére alkalmazható lenne a diszkrét Fourier-transzformáció (DFT), melynek kifejtése a 3. egyenlet szerint történik.

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}kn}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N - 1, \quad (3.)$$

ahol:

X_k a k. frekvenciakomponens;

x_n az n. minta az adatsorban;

N az adatsor hossza;

k a k. frekvenciaindex, ami a Fourier-transzformáció során a k. frekvenciát jelenti.

Bár a DFT átfogó megoldást nyújt a diszkrét adatsorok periodicitásának elemzéséhez és számos platform függvénykönyvtárai támogatják, azonban egy olyan algoritmus fejlesztése a cél, amely egyszerű műveletekkel, alacsonyszintű eszközökön is implementálható. A j képzetes egység kezelése olyan kihívást jelentene, amely miatt egy alternatív megoldás kidolgozását tűztünk ki célul. Ezért, a vizsgálatot az autokorrelációs függvény segítségével folytattam a 4. egyenlet alapján, a változási aránygörbe pontjaira egy H képpont magas képen.

$$R_k = \frac{1}{H} \sum_{i=k+1}^H (v_i - \bar{v})(v_{i-k} - \bar{v}), \quad k \in \{0, 1, 2, \dots, H\}, \quad (4.)$$

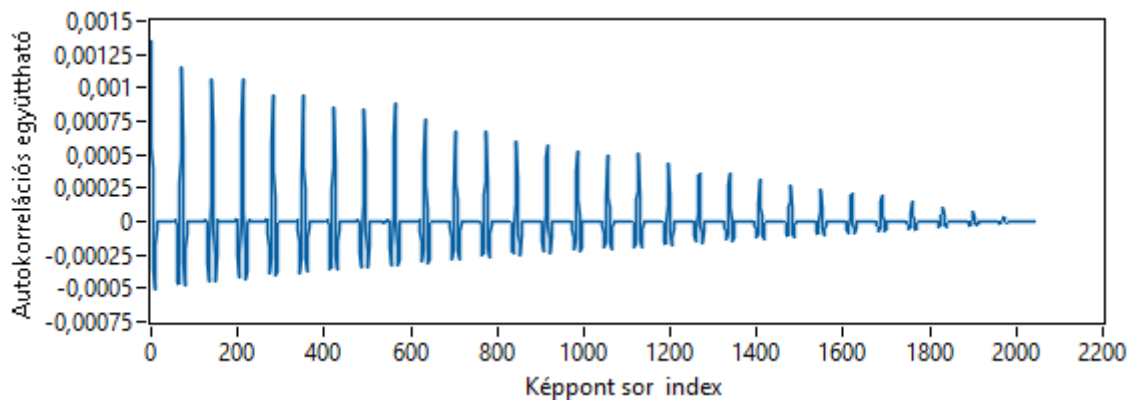
ahol:

H a kép magassága képpontokban kifejezve;

v_i a varianciaértékek változási aránya a képpontsor i. pontjában;

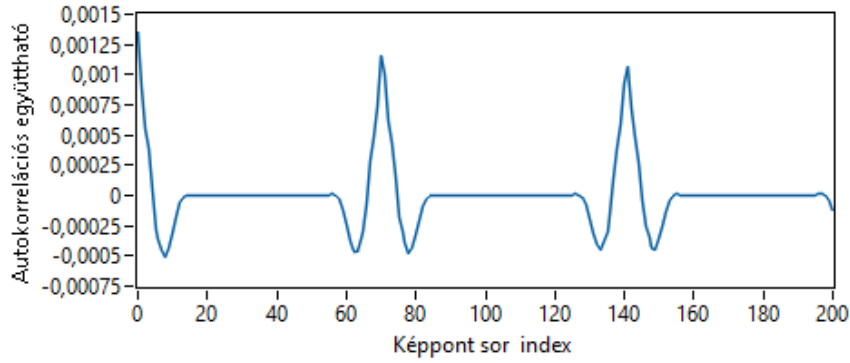
\bar{v} a varianciaértékek átlaga.

A kifejtést az 5. ábrán bemutatott változási aránygörbén alkalmaztam, melynek eredménye a 8. ábrán látható.



8. ábra: Korrelációs együtthatók a változási aránygörbén

Az eredményül kapott görbék a periódus meghatározására küszöböléssel is alkalmasak, nem tartalmaznak a változási görbén tapasztalt zavaró jelváltozásokat, amint az a 9. ábrán is megfigyelhető.



9. ábra: A küszöbölésre alkalmas korrelációs együtthatók görbéje

4. A MÉRÉSI PONT KIVÁLASZTÁSA

A periódust a görbecsúcsok x koordinátái közötti különbséggel határoztam meg. Ennek első lépése a görbecsúcsok pozíciójának megkeresése, hasonló módon, mint ahogyan a fordulatszám mérésnél számoltam a felvételen látható jellemzőket a generált vonalprofil alapján. A görbecsúcsok kereséséhez használt mennyiségek:

H : a kép magassága képpontokban kifejezve,

R_k : autokorrelációs együtthatók a változási aránygörbe pontjaira,

$k \in \{0, 1, 2, \dots, H\}$: iterációs változó,

T_R : a vizsgálat küszöbértéke,

n_g : a detektált görbecsúcsok száma,

$X = \{x_1, x_2, \dots, x_{n_g}\}$: a detektált görbecsúcsok x koordinátái,

f_k : a jellemződetektáláshoz tartozó feltételvizsgálat eredménye.

A felsorolt be- és kimeneti paraméterek kezdeti értékei:

$$n_g = 0$$

$$X = \emptyset$$

$$f_{k-2} = f_{k-1} = \text{HAMIS}$$

Az x koordináták meghatározását szolgálják az 5-8. összefüggések.

1. Küszöbérték számítás:

$$T_R = 0,2 \cdot \max(R_k), \quad (5.)$$

2. Feltételvizsgálat:

$$f_k = \begin{cases} \text{IGAZ}, & \text{ha } (R_k \geq R_{k-1}) \text{ és } (R_k \geq T_R) \text{ és } (f_{k-1} = \text{HAMIS}) \\ \text{HAMIS}, & \text{ha } (R_k < R_{k-1}) \text{ és } (R_k < T_R) \text{ és } (f_{k-1} = \text{IGAZ}), \\ f_{k-1} & \text{egyébként} \end{cases} \quad (6.)$$

3. Görbecsúcsok számolása:

$$n_g = n_g + \begin{cases} 1, & \text{ha } f_k = \text{IGAZ} \text{ és } f_{k-1} = \text{HAMIS} \\ 0 & \text{egyébként} \end{cases}, \quad (7.)$$

4. X koordináták gyűjtése:

$$X = X \cup \{k \mid f_k = \text{IGAZ}\}, \quad (8.)$$

A küszöbérték számításnál alkalmazott 0,2 értékű szorzót tapasztalati úton határoztam meg.

A periódusszámítás nem érzékeny erre a küszöbértékre, ugyanis a meghatározásához nem a képen látható összes görbecsúcs azonosítása a követelmény, hanem a közöttük lévő átlagos távolságvérték kiszámítása. Ugyanakkor, minél pontosabban határozom meg a görbecsúcsok számát, annál pontosabb lesz a periódusszámítás és ennél fogva az elmozdulás mérésre kiválasztott képmetszet minimális sormagassága.

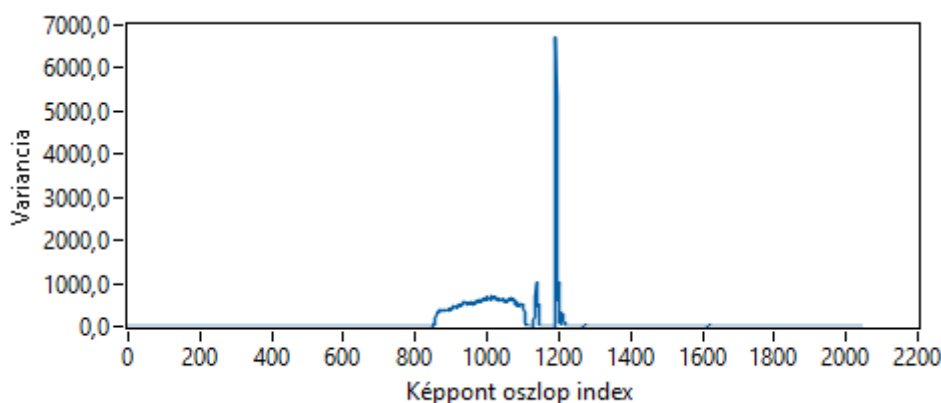
A görbecsúcsok x koordinátáinak ismeretében kiszámítható az átlagos periódushossz, ha $X = [x_1, x_2, \dots, x_{n_g}]$ a görbecsúcsok x koordinátáit tartalmazó vektor és $i \in \{0, 1, 2, \dots, n_g\}$ iterációs változó. A periódushosszként értelmezhető H_m , amely a korrelációs együtthatókat reprezentáló görbe csúcsai közötti átlagos távolság, a 9. összefüggés szerint fejthető ki:

$$H_m = \frac{1}{n_g - 1} \sum_{i=0}^{n_g - 2} (x_{i+1} - x_i), \quad (9.)$$

A H_m lesz tehát annak a képmetszetnek a magassága, amelyen belül a varianciaszámításon alapuló mérési pont kiválasztó algoritmust futtatom. A képmetszet kifejezése a 10. összefüggés szerint történik, ha a teljes beolvasott képet a $W \times H$ méretű P adatmátrixként értelmezzük.

$$P' = P[0 : W, (H - [H_m]) : H], \quad (10.)$$

A P' képmetszet képpont oszlopaira kiszámított varianciagörbét mutatja a 10. ábra az előző példát folytatva.

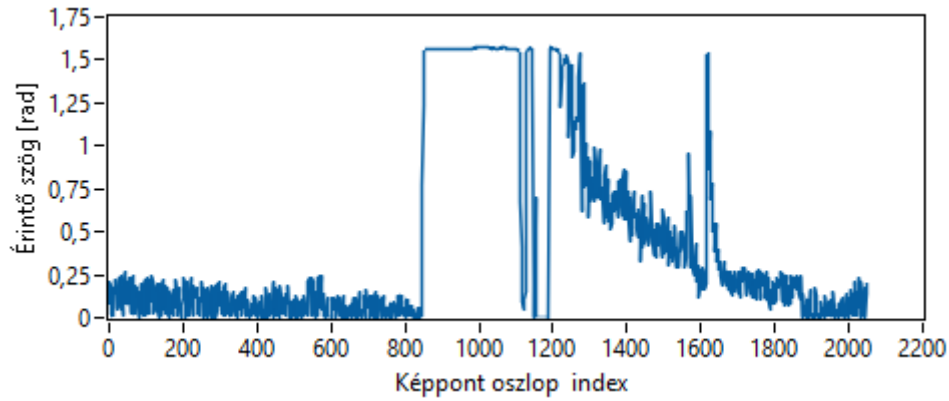


10. ábra: Varianciagörbe a képmetszeten

A varianciagörbe egyszerű küszöböléséhez a kiugró, túszerű görbeszakasz hatását kompenzálni szükséges. Ennek egy módja a görbe érintő szögének kiszámítása minden pontban. Ha a képmetszet képpont oszlopaira varianciája $Var(x'_i)$, akkor az érintő szög értéke a 11. egyenlettel adható meg.

$$\theta_i = \tan^{-1}(Var(x'_i)), i \in [0, [H_m]], \quad (11.)$$

amelynek eredménye a fenti példára a 11. ábrán látható.



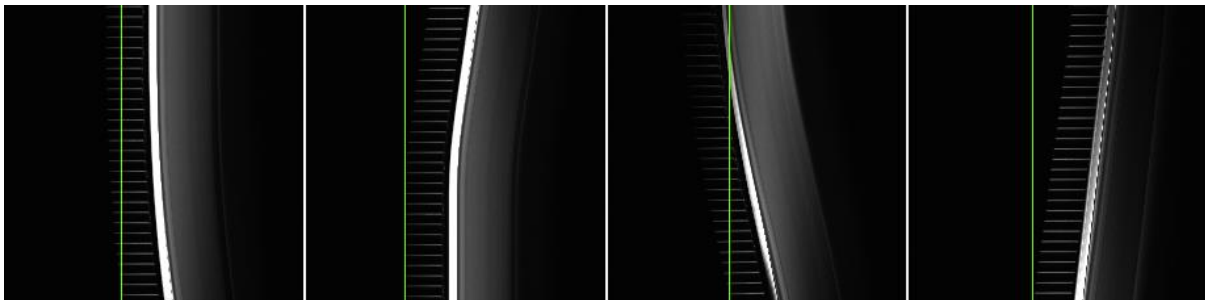
11. ábra: A varianciagörbe érintő szögei

Az érintőszögek görbéjén már egyszerűen megtalálható a forgó alkatrész, melynek kezdő x koordinátájának meghatározásához a 12. egyenlet alkalmazható.

$$x_m = \min_{i \in [0, [H_m]]} \{i \mid \theta_i > T_\theta\} = \min_{i \in [0, [H_m]]} \left\{ i \mid \theta_i > \frac{1}{2} \max_{i \in [0, [H_m]]} \theta_i \right\}, \quad (12.)$$

4. EREDMÉNYEK

Az x koordináta kiválasztó algoritmusának működését ellenőriztem a tesztfelvételeken. A tesztelési eredmények megerősítették, hogy az algoritmus megbízhatóan megtalálta a megfelelő mérési pontokat minden vizsgált esetben. Az algoritmus minden tesztelésben hatékonyan elemelte a varianciagörbét. A 12. ábrán néhány példa látható az algoritmus kimeneteiből, kiemelve a különböző tesztfelvételeken azonosított mérési pontokat.



12. ábra: Az elmozdulás mérési pont kiválasztásának tesztelése

Az eredmények azt mutatják, hogy az algoritmus sikeresen azonosította a forgó alkatrész kezdeti X-koordinátáját minden esetben és hatékonyan képes meghatározni a forgó alkatrészek tengelymenti elmozdulását line scan kamera segítségével.

A javasolt módszerrel tehát meghatározható az az x_m képpont a képen, amely az alkatrész vizsgált pontját reprezentálja az elmozdulást követően. A meghatározott x_0 referencia képpont ismeretében megállapítható az alkatrész képpontokban kifejezett elmozdulása. Az x_m és x_0 képpont indexek különbségéből pedig, az objektum pixelméret ismeretében kiszámolható a valódi elmozdulás (mm egységben) az 1. összefüggés alapján.

5. ÖSSZEGZÉS

A cikk egy line scan kamerával megvalósított módszert mutat be a forgó alkatrészek tengelymenti elmozdulásának mérésére, amely megbízható és költséghatékony alternatívát kínál a nagysebességű kamerát alkalmazó gépi látás rendszerekkel szemben. A kutatómunka az indítómotorok érintésmentes vizsgálatának szükségességére reagál, lehetővé téve a fordulatszám és a motor fogaskerék visszacsapódásának mérését a termék szétszerelése nélkül.

A javasolt módszer a rögzített képek statisztikai elemzésén alapul, különös tekintettel a pixeleloszlások varianciaprofiljaira. Az algoritmus a mérési pontokat a pixeloszlopok varianciaértékeinek kiszámításával és a funkciódetektálás pontosságát javító tangens szögértékek meghatározásával azonosítja. Az algoritmus különféle tesztkörnyezetekben konzisztensen azonosította a megfelelő mérési pontokat, igazolva hatékonyságát a forgó alkatrészek tengelymenti elmozdulásának meghatározásában.

A javasolt megközelítés előnyt kínál a számítási erőforrás-igény szempontjából is. Az algoritmus egyszerű műveleteket alkalmaz, ami lehetővé teszi az alacsony szintű eszközökön történő megvalósítást. A statisztikai képfeldolgozási technikák alkalmazásával pontos méréseket biztosít a költségek minimalizálása mellett.

6. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutató munka az Európai Unió és a magyar állam támogatásával, az Európai Regionális Fejlesztési Alap társfinanszírozásával, a GINOP-2.3.4-15-2016-00004 projekt keretében valósult meg, a felsőoktatás és az ipar együttműködésének elősegítése céljából.

7. FELHASZNÁLT IRODALOM

- V. ALONSO, A. DACAL-NIETO, L. BARRETO, A. AMARAL, E. RIVERO, “*Industry 4.0 implications in machine vision metrology: an overview*,” *Procedia Manuf*, vol. 41, pp. 359–366, 2019, doi: 10.1016/j.promfg.2019.09.020.
- J. LI, W. TAO, H. ZHAO, “*A Laser Triangulation Displacement Sensor Based on a Cylindrical Annular Reflector*,” *Photonics*, vol. 10, no. 10, p. 1139, Oct. 2023, doi: 10.3390/photonics10101139.
- X. LU et al., “*Research on the Time Drift Stability of Differential Inductive Displacement Sensors with Frequency Output*,” *Sensors*, vol. 22, no. 16, p. 6234, Aug. 2022, doi: 10.3390/s22166234.
- X. LIU, H. ZHANG, K. PENG, Q. TANG, Z. CHEN, “*A High Precision Capacitive Linear Displacement Sensor with Time-Grating that Provides Absolute Positioning Capability Based on a Vernier-Type Structure*,” *Applied Sciences*, vol. 8, no. 12, p. 2419, Nov. 2018, doi: 10.3390/app8122419.
- P. YANG, B. XIE, X. KE, “*Scheme of shot-noise-limited displacement and absolute distance measurement simultaneously using laser and white light interferometry*,” *Journal of Optics*, vol. 51, no. 3, pp. 557–564, Sep. 2022, doi: 10.1007/s12596-021-00817-5.
- TROHÁK A., FORGÁCS ZS.: *Indítómotorok gépi látás alapú tesztelési lehetőségeinek vizsgálata*, ENELKO 2018 XIX. Nemzetközi Energetika-Elektrotechnika Konferencia SzámOkt 2018 XXVIII. Nemzetközi Számítástechnika és Oktatás Konferencia, Kolozsvár, Románia, pp. 337-340., 2018
- Z. M. MOSA, E. AKIN, “*Design and sorting of an object identification on machine vision by using line scan camera*,” *Technium: Romanian Journal of Applied Sciences and Technology*, vol. 3, no. 3, pp. 100–112, Apr. 2021, doi: 10.47577/technium.v3i3.3181.

- Z. ALI, SB. BHASKAR, “Basic statistical tools in research and data analysis,” *Indian J Anaesth*, vol. 60, no. 9, p. 662, 2016, doi: 10.4103/0019-5049.190623.
- S. H. SIMPSON, “Creating a Data Analysis Plan: What to Consider When Choosing Statistics for a Study,” *Can J Hosp Pharm*, vol. 68, no. 4, Aug. 2015, doi: 10.4212/cjhp.v68i4.1471.
- J. JOSSE, S. HOLMES, “Measuring multivariate association and beyond,” *Stat Surv*, vol. 10, no. none, Jan. 2016, doi: 10.1214/16-SS116.
- V. BEWICK, L. CHEEK, J. BALL, “Statistics review 7: Correlation and regression,” *Crit Care*, vol. 7, no. 6, p. 451, 2003, doi: 10.1186/cc2401.
- J. J. SHAUGHNESSY, E. B. ZECHMEISTER, J. S. ZECHMEISTER, *Research Methods in Psychology*. University of Minnesota Libraries Publishing, 2016. doi: 10.24926/8668.2201.
- J. M. PRATS-MONTALBÁN, A. DE JUAN, A. FERRER, “Multivariate image analysis: A review with applications,” *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, vol. 107, no. 1, pp. 1–23, May 2011, doi: 10.1016/j.chemolab.2011.03.002.
- M. DE SANTO, C. LIGUORI, A. PAOLILLO, A. PIETROSANTO, “Standard uncertainty evaluation in image-based measurements,” *Measurement*, vol. 36, no. 3–4, pp. 347–358, Oct. 2004, doi: 10.1016/j.measurement.2004.09.011.
- P. FIEGUTH, *Statistical Image Processing and Multidimensional Modeling*. New York, NY: Springer New York, 2011. doi: 10.1007/978-1-4419-7294-1.
- B. GARG AND G. K. SHARMA, “A quality-aware Energy-scalable Gaussian Smoothing Filter for image processing applications,” *Microprocess Microsyst*, vol. 45, pp. 1–9, Aug. 2016, doi: 10.1016/j.micpro.2016.02.012.
- P. GAO, Y. SONG, M. SONG, P. QIAN, Y. SU, “Extract nanoporous gold ligaments from SEM images by combining fully convolutional network and Sobel operator edge detection algorithm,” *Scr Mater*, vol. 213, p. 114627, May 2022, doi: 10.1016/j.scriptamat.2022.114627.
- Y. YANG, X. ZHAO, M. HUANG, X. WANG, Q. ZHU, “Multispectral image based germination detection of potato by using supervised multiple threshold segmentation model and Canny edge detector,” *Comput Electron Agric*, vol. 182, p. 106041, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.compag.2021.106041.
- CZAP L., *Képfeldolgozás*. Miskolci Egyetem, 2007.
- L. JI, Y. DU, Y. DANG, W. GAO, H. ZHANG, “A survey of methods for addressing the challenges of referring image segmentation,” *Neurocomputing*, vol. 583, p. 127599, May 2024, doi: 10.1016/j.neucom.2024.127599.
- J. WANG, F. HU, G. ABBAS, M. ALBEKAIRI, N. RASHID, “Enhancing image categorization with the quantized object recognition model in surveillance systems,” *Expert Syst Appl*, vol. 238, p. 122240, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.eswa.2023.122240.

A MESTERSÉGES INTELLIGENCIA A TÖMEGKÖZLEKEDÉSBEN

THE USAGE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN PUBLIC TRANSPORT

JOBBÁGY Marcell¹, BODNÁR István², BARTÓK Roland³

¹tanszéki mérnök, marcell.jobbagy@uni-miskolc.hu

¹Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet,
Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti tanszék;

H-3515 Magyarország, Miskolc- Egyetemváros, Tel: +36 46 565-111;12-33

²Ph.D., egyetemi docens, istvan.bodnar@uni-miskolc.hu

²Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet,
Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti tanszék;

H-3515 Magyarország, Miskolc- Egyetemváros, Tel: +36 46 565-111;12-19

³Ph.D., egyetemi adjunktus, roland.bartok@uni-miskolc.hu

³Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Automatizálási és Infokommunikációs Intézet,
H-3515 Magyarország, Miskolc- Egyetemváros, Tel: +36 46 565-111;19-32

Kivonat: A mesterséges intelligencia az élet minden területén megtalálható már, legyen szó az iparról vagy akár a magánéletről. Ennek az eszköznek a segítségével könnyebbé válnak a folyamatok megtervezése, valamint azok optimalizálása. A tömegközlekedésben azonban nagyon csekély mértékben található meg, ezért szeretném megragadni a lehetőséget, hogy innovációt vezethessünk be a rendszerbe. A városi tömegközlekedés mind költségek terén, mind környezetszennyezésben magas értékeket produkál. Ennek az oka egyszerű, és magától értetődő: sok embert egyszerre és biztonságosan csak nehéz kocsiszekrényrel és ebből kifolyólag nagy teljesítményű motorokkal lehet szállítani. A városi tömegközlekedést több járműtípussal is le lehet bonyolítani: helyi forgalomban az autóbusz, a villamos, a trolis, ritkább esetekben a metró, a HÉV és a vízi közlekedés is besegít. Leggyakrabban az első kettővel van lebonyolítva a belvárosi közlekedés. A villamosok környezeti hatását a gyártásuk és a működésükhöz szükséges villamos energia előállítására szolgáló erőmű határozza meg, míg buszoknál ez egy komplex kérdés. Ebben a cikkben ezt a kérdést, valamint a hozzátartozó optimalizálási módszert szeretném ismertetni.

Kulcsszavak: mesterséges intelligencia, tömegközlekedés, fuzzy logika

Abstract: Artificial intelligence can be found in many aspects of our modern lives, be it in the industry or at our households. With the use of AI, processes become easy to plan or optimize. However, it is seldom found in public transport, and thus I would like to grab the opportunity to show a possible integration option for innovation. The sector has huge costs and also produce great amounts of pollution as well. The reason is fairly simple, and frankly, obvious: the transport of many people, safely, and comfortably, can only be achieved with big and heavy frames, which in return require bigger power plants. There are many different types of vehicles that work in the sector: in local transports buses, trams, trolleys, and in big cities metros, railways of local interest, and even boats can be found in service. But the most common ones are the first two on the list. The tram's environmental impact depends on the electrical network and the source of power, and in the case of buses, it is a very complex question. In this article I want to discuss this question and work out a possible optimisation method.

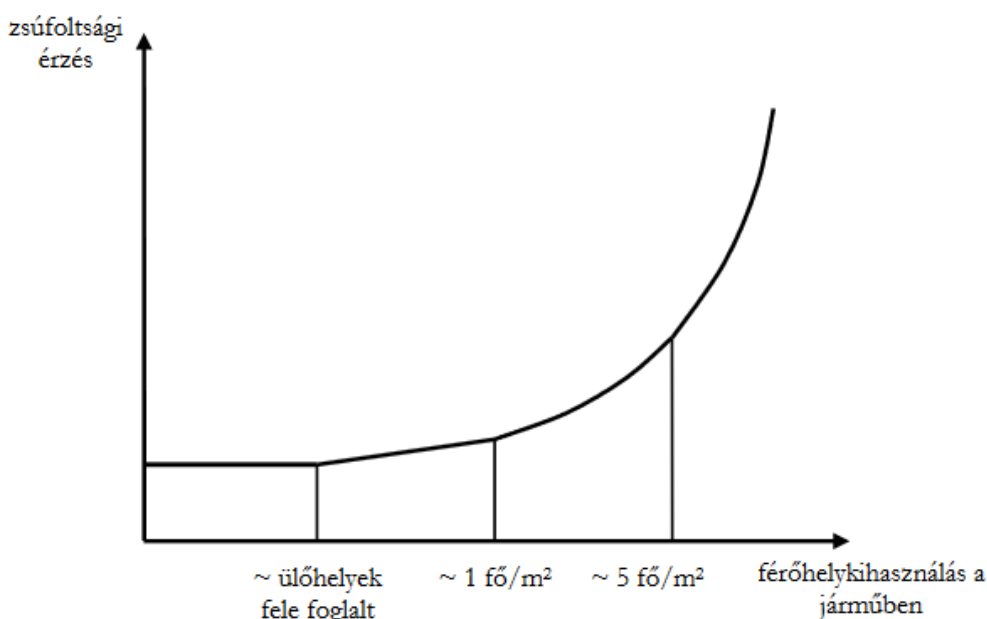
Keywords: artificial intelligence, public transport, fuzzy logic

1. BEVEZETÉS

A belvárosi és a helyközi járatok terén domináns szerepet játszanak az autóbuszok. Bár tény, hogy a villamosközlekedés 440 millió utast mozgatott meg, ezzel szemben csak belvárosi közlekedést tekintve az autóbuszközlekedés 981 millió utast szállított le 2023-ban Magyarországon [1]. Ezt a nagy mennyiségű utast jelentős többségében hagyományos és csuklós buszok folytatták le, melyeknek a fajlagos komfort kapacitásuk 75, valamint 110 fő, a körülbelül 153 fős kapacitású villamosokhoz képest [2][3]. Ezekből az adatokból jól látható, hogy a buszok túlnyomó többségében befolyásolják a belvárosi tömegközlekedést, és ezzel együtt a belvárosi környezetszennyezés jelentős részét is.

Az utasok azonban azt látják és érzik, hogy kevés a járat, és amelyekre felférnek, azok is túlszűfoltak. Ennek az oka elsődlegesen a nem elegendően sűrű járatindítás, de olyanra is volt precedens, hogy egy zsűfolt vonalra alacsony férőhelyes jármű volt kiküldve. Az első okra a magyarázat egyértelmű: a tömegközlekedés költséges vállalkozás, ezért nem meglepő, hogy valahol a kiadásokat csökkenteni, amelynek egyik módszere az üzemanyag, a javítási és a kopási költségek csökkentése. A zsűfoltaságérzet az 1. ábrán látható módon alakul a tömegközlekedési járművekben. A pillanatnyi zsűfoltaságot a statikus férőhelykihasználási mutatóval jellemezhetünk (1. képlet), amelyet úgy kapunk meg, hogy a jelenlegi utasszámot (U) elosztjuk a jármű teljes férőhelyével (F_h) [4].

$$f_h = \frac{U}{F_h} \quad (1)$$



1. ábra: Zsűfoltaság alakulása a férőhelykihasználás függvényében [4]

A zsűfoltasági mutatót aktív utasszámlálással könnyedén meghatározhatjuk, valamint adatbázisban későbbi statisztikáknak eltárolhatjuk. További fontos adat, hogy az adott jármű mekkora befogadóképességgel rendelkezik. A miskolci tömegközlekedést lebonyolító MVK Zrt. járműparkját a következő számok jellemzik: Összesen 150 db szóló/csuklós autóbusz, amelyből 40 db CNG szóló, 35 db CNG csuklós, 10 db elektromos szóló, 45 db saját dízel csuklós, 7 db saját dízel szóló, 7 db bérelt dízel szóló, 6 db bérelt dízel csuklós. A CNG szólók 86 főt, a CNG csuklósok 156 főt, az elektromosok 83 főt, a dízel csuklósok súlyozott átlagban 140 főt, a dízel szólók pedig súlyozott átlagban 93 főt tudnak szállítani [5][6].

A következő tényező az üzemanyag. Globális statisztika szerint a forgalomban résztvevő autóbuszok 71,5%-a dízel, vagy biodízel üzemanyagot használ, amelyből 50% adalékmentes dízel. A maradék 28,5%-ból 10,5% CNG üzemű, és 9,3% tisztán elektromos [2]. Az MVK Zrt. járműparkjára a százalékos megosztás a következő képpen alakul: 43,3% dízel, 50% CNG, 6,6% Elektromos. Jelenleg (2024 harmadik negyedév) a CNG kilogrammonkénti ára 890 Ft, a dízel literenkénti ára 641 Ft, az elektromos áram ára pedig csúcsidőszakban 218 Ft, völgyidőszakban 205 Ft kilowattóránként [7][8][9].

2. MESTERSÉGES INTELLIGENCIA

A mesterséges intelligencia egy olyan informatikai kutatásterület, amely olyan szoftverek és módszerek kifejlesztésével és kutatásával foglalkozik, melyeknek a segítségével az ezzel felruházott gépek képessé válnak a környezetük érzékelésére és lehetővé teszi azok számára a tanulást és a döntéshozást egy adott cél elérése érdekében. Négy alapvető megközelítést különböztet meg a szakirodalom.

Az első, hogy ember szerűen tud-e cselekedni, erre való a Turing teszt. Eszerint a felfogás szerint a következő négy dolgot kell elvégeznie: képes értelmezni az emberi nyelvet, képes eltárolni az ismereteit, képes magától válaszolni kérdésekre, végül pedig képes tanulni. Eredetileg Alan Turing 1950-ben elhanyagolta a fizikai megjelenítést, később azonban a kutatók kiegészítették azzal, létrehozva így a teljes Turing tesztet, mely az előző négy képességen felül hozzáteszi a gépi látást, valamint a valóságbeli tárgyak mozgását is.

A második, hogy ember szerűen tud-e gondolkodni. Hogy tudjuk egyáltalán megérteni azt, hogy egy ember hogyan gondolkodik? Három módszer létezik erre: az önelemzés, a pszichológiai kísérletezés és az agyi képzés. Miután valamelyik módszerrel meghatároztuk, hogyan gondolkodik az ember, az elméletet alkalmazhatjuk a program megírására. Ezzel a témakörrel a kognitológia foglalkozik részletesen.

A harmadik, hogy képes racionálisan, azaz értelem számára felfogható módon dönteni. Ez azt jelenti, hogy logikusan tud gondolkodni és döntéseket hozni a cél érdekében. Ilyen például a következő példa: ha Socrates ember, és minden ember halandó, akkor képes arra azt a következtetést levonni, hogy Socrates halandó. A valóságban azonban biztos pont nincs, így valószínűség-elmélettel kell kiegészíteni ezt.

A negyedik, és egyben utolsó megközelítés, az ésszerű ügynök módszer. Az ügynök, régiesen intéző, az intézkedés, cselekvés szóból származik. Minden program valamit csinál, de a számítógépes ügynököknek önállóan kell működniük, észlelniük kell a környezetüket, alkalmazkodniuk kell ahhoz, és célokat kell üldözniük. Amennyiben jobban megvizsgáljuk ezt a megközelítést, fellelhető benne az első és a harmadik is. Minden Turing teszt feltétel teljesülése egyben lehetővé teszi azt is, hogy ésszerű ügynök legyen a rendszerünk. Az, hogy döntéseket tud hozni ismételten kulcs-fontosságú, hiszen csak akkor tud alkalmazkodni, ha választ a lehetőségei közül. Mégis miben különbözik az ügynök módszer a korábban kiemelt kettőnél? Az első, és legfontosabb különbség, hogy általánosabb a logikus gondolkodásnál. A második, hogy a tudomány fejlődésének szempontjából sokkal jobban kezelhetőbb. Ezutóbbiból következik, hogy a tudományos értelemben a mesterséges intelligencia olyan ügynökök építésére és kutatására összpontosít, amelyek képesek a helyes dolgot tenni. Ezt hívjuk az alapmodellnek, amelyet elismernek, de hiányosságai is vannak.

Egy ügynök a valóságban tehát bármi olyan lehet, ami a környezetét szenzorokon keresztül érzékeli, majd valamilyen döntés után beavatkozik abba aktuátorok segítségével. Az ember ügynök, hiszen a szemén, illetve a fülén keresztül érzékeli a környezetet, és a kezével, a lábával vagy akár a hangjával bele tud avatkozni abba. A robotokra is fel lehet húzni ezt az analógiát: infravörös kamerákkal, mikrofonokkal észlel, majd motorok illetve hangszórók segítségével reagál. Ezen logika mentén egy szoftverből is lehet ügynököt csinálni: a környezete fájlokat, hálózati csomagokat vagy emberi adatokat (billentyűzetten, érintőképernyőn vagy mikrofonon keresztül) biztosít, amelyekre a szoftver fájlok írásával, hálózati csomagok küldésével vagy adatmegjelenítéssel válaszol [10].

3. DÖNTÉSHOZATAL

Az ügynököknek szükségük van egy belső döntési szabályrendszerre, amely alapján meghatározza, hogy az egyes ingerekre hogyan válaszol. Ezeket a logikákat formális nyelvekkel írhatjuk le. Többféle logikát alkalmaznak, melyek közül a leggyakrabban alkalmazottakat az alábbi táblázatba foglaltam össze.

1. Táblázat: logika-fajták ismertetése [10]

Logikák	Létfilozófia	Ismeretelmélet
Kijelentés alapú	tények	Igaz/Hamis/ Ismeretlen
Elsőrendű	tények, tárgyak, kapcsolatok	Igaz/Hamis/ Ismeretlen
Időbeli	tények, tárgyak, kapcsolatok, idő	Igaz/Hamis/ Ismeretlen
Valószínűség alapú	tények	Hihetőség [0;1]
Fuzzy	tények, igazságtartalommal	Belső értéktartomány [0;1]

A program megírásában Fuzzy logikát használtam, amely során a vizsgált környezetet tartományokra bontjuk. Az egyes bemeneti paramétereknél meghatározzuk, hogy az egyes tartományokba milyen mértékben lehetnek tagok. Ezeket a tagsági függvények írják le. A döntéshez szükséges adatok a következők voltak: a buszok típusai, és a hozzájuk tartozó befogadóképesség, alapterület, üzemanyagtípus és fogyasztás; az üzemanyagok egységnyi ára, valamint a vizsgált nap fel és leszálló utasai indulási idő és megálló szerint.

Fuzzy esetében a stabilitás érdekében a szabályokat minden esetre fel kell írni, azaz az univerzum minden lehetséges állapotkombinációjára kell egy szabály. Ez rengeteg kódolást igényelne, erre fejlesztették ki a FIVE-ot, azaz a Fuzzy Interpolation on Vague Environment-et, magyarul a homályos környezetbeli fuzzy interpolációt. Ebben a rendszerben a szabályok közötti hiányosságokat az interpoláció fog hidat alkotni, amely a matematikai interpolációnak megfelelően átmeneti értékeket ad meg. Jobban megéri a FIVE használata a mi esetünkben a hagyományos fuzzyhoz képest, mert hiányos a környezetünk, valamint egyszerűsíti a helyzetet, hogy kevés szabályt kell felírni [11].

Hagyományos programozási nyelvekkel hosszadalmas lenne a kapcsolati rendszer felépítése, ezért kitalálták a Fuzzy Behavior Description Language-t, vagy a Fuzzy Viselkedést Leíró Nyelvet. Ennek a segítségével komplex viselkedéseket leírhatunk egyszerű emberi megfogalmazásokkal. A mi esetünkben ilyen lenne az, hogy magas a megfelelése a busznak, amennyiben alacsony az üzemanyagköltsége és alacsony a zsúfoltságérzet. A fuzzy rendszerekhez képest az FBDL hatékonyabban írja le a viselkedéseket, valamint lehetővé teszi a szabályok finomhangolását is [12].

A neurális hálók és a tanuló algoritmusok alkalmazása is lehetőség egy ilyen feladat megoldásához, azonban a meglévő adatokon felül is még nagyobb adathalmazra lenne szükség. Az FBDL és a FIVE továbbá sokkal jobban befolyásolható, a szabályokat explicit módon mi adjuk meg, nem kell annyi idő a betanításhoz és a validáláshoz, valamint gyorsabban implementálhatók.

Feldolgozás során először az egyes indulási időpontokhoz hozzárendeli az adott körjáráshoz tartozó egyszerre a járművön tartózkodó utasok számát, majd az egyes buszokhoz tartozó egységnyi fogyasztáshoz tartozó forintmennyiséget. Ezek után megvizsgáljuk, hogy az adott busztípus képes-e befogadni a maximális utasszámot, és ha igen, akkor kiszámoljuk a zsúfoltsági mutatót is. A végső döntésben ezt a mutatót és az úti költséget veszi figyelembe a kód.

4. EREDMÉNYEK

A programnak külső állományból adható meg az összes bemeneti paraméte. Külön „.json” állományban van az üzemanyagár és a buszoknak az adatai, valamint „.csv” kiterjesztésű fájlban található meg az utazási adattömb. A Buszok állományban tároljuk a buszcsoport megnevezését, az üzemanyag típusát, a teljes befogadóképességet főben, az üzemanyagfogyasztást és a busz alapterületét négyzetméterben. Az üzemanyagfogyasztás a megfelelő mértékegységgel szerepel, tehát a dízeleknél liter/100km, a CNG buszoknál kg/100km, az elektromosnál pedig kWh/100km. Nem szükséges a közös alapra hozatal, mert a program az üzemanyag egységnyi árával fogja beszorozni, és Ft/100km-rel veszi figyelembe. Ezt a 2. táblázat szemlélteti.

2. Táblázat: a buszok adatai

	Busz 1	Busz 2	Busz 3	Busz 4	Busz 5
Név	Dízel Szóló	Dízel Csuklós	CNG Szóló	CNG Csuklós	Elektromos Szóló
Üzemanyag	Diesel	Diesel	CNG	CNG	Áram
Férőhely	93	140	86	156	83
Fogyasztás	34	58	48	61	89
Alapterület	24	40	24	40	25

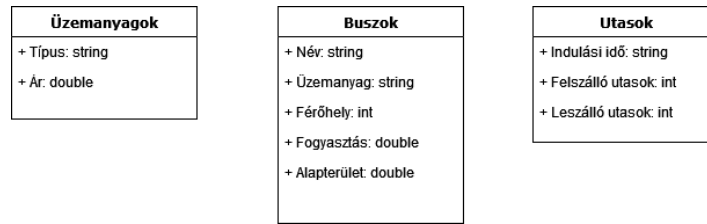
Az Üzemanyagok szintén egy ilyen jellegű állományban található meg. Ebben az üzemanyagtípus és az adott üzemanyag mértékegység helyes egységára. Dízel esetén ez Ft/l, CNG esetén Ft/kg, elektromos esetben pedig Ft/kWh. Ez a 3. táblázatban látható.

3. Táblázat: az Üzemanyagok állomány felépítése

	Üzemanyag 1	Üzemanyag 2	Üzemanyag 3
Üzemanyag	Diesel	CNG	Áram
Egységár	641	890	210

Az Utasok állományban található meg az utolsó bevitt adathalmaz, amely az adott időponthoz tartozó megállókra bontott fel és leszálló utasok számát tartalmazza.

A 2. ábrán láthatjuk összefoglalva ezeket az adathalmazokat egymás mellett.



2. ábra: az állományok és a bennük található adatok típusa

Az univerzumok alatt itt a szabályok be-és kimeneti adatait tartalmazzák. A programban a következő három univerzumot hoztam létre. Az első az üzemanyagköltség, „fuel_cost”, amely a korábban említett Ft/100km mértékegységben működik. 5 tartományra van bontva, amelyek függenek a maximális egységnyi költségtől. A magas, „high”, képviseli a legköltséghatékonyabbat, az alacsony, „low” pedig a legrosszabbat. A második a zsúfoltságérzet, „packedness”, amely az első fejezetben látható 1. ábrát hivatott lekövetni, és ebből is következik, hogy a mértékegysége fő/m². Az üres, „none” érték a legjobb a zsúfoltságérzet szempontjából, szorosan követve az elfogadható, 0,5 fő/m²-rel. Legrosszabb értékkel a tűrhetetlen 5 fő/m² rendelkezik. Az utolsó az illeszkedés, „suitability”, amely a kiszámolt értékek és szabályok alapján kategorizálja a kiválasztott busz illeszkedését. Ezeket a 3. ábrán figyelhetjük meg, FBDL-ben.

```

universe "fuel_cost"
  "high" 0 1
  "mediumhigh" {fuel_cost_max/8.0} 0.667
  "medium" {fuel_cost_max*0.45} 0.45
  "mediumlow" {fuel_cost_max*0.667} 0.125
  "low" {fuel_cost_max} 0
end

universe "packedness" universe "suitability"
  "none" 0 1           "terrible" 0 0
  "okay" 0.5 1         "poor" 0.25 0.25
  "medium" 1 0.5      "average" 0.50 0.5
  "very" 3 0.2        "good" 0.75 0.75
  "unbearable" 5 0    "great" 1 1
end
    
```

3. ábra: az univerzum leírása FBDL-ben

```
rulebase "suitability"
rule
  "terrible" when "fuel_efficiency" is "low" and "packedness" is "very"
end
rule
  "terrible" when "fuel_efficiency" is "mediumlow" and "packedness" is "very"
end
rule
  "terrible" when "fuel_efficiency" is "mediumhigh" and "packedness" is "very"
end
rule
  "terrible" when "fuel_efficiency" is "medium" and "packedness" is "very"
end
rule
  "terrible" when "fuel_efficiency" is "mediumlow" and "packedness" is "none"
end
rule
  "terrible" when "fuel_efficiency" is "low" and "packedness" is "none"
end
rule
  "poor" when "fuel_efficiency" is "low" and "packedness" is "okay"
end
rule
  "poor" when "fuel_efficiency" is "mediumlow" and "packedness" is "medium"
end
rule
  "average" when "fuel_efficiency" is "mediumhigh" and "packedness" is "medium"
end
rule
  "average" when "fuel_efficiency" is "medium" and "packedness" is "medium"
end
rule
  "good" when "fuel_efficiency" is "mediumhigh" and "packedness" is "okay"
end
rule
  "great" when "fuel_efficiency" is "high" and "packedness" is "okay"
end
end
```

4. ábra: a szabálykörnyezet FBDL-ben.

A 4. ábrán látható szabályrendszer alapján dönt a FIVE arról, hogy melyik busz mennyire passzol a feladat ellátására. Azokban az esetekben, amelyekben a zsúfoltsági érték túl nagy, a legkisebb illeszkedési értéket rendel hozzá. Azokban az esetekben, amikor üresen menne a busz, de magas az üzemanyagköltsége, szintén alacsony értéket kell visszaadni.

A program a beadott Utasok állományt úgy dolgozza fel, hogy az indulási időpontként iterálva egy folyamatos számlálást végez a fel és leszálló utasokkal, triviálisan a felszállókat hozzáadja, a leszállókat kivonja. Ennek a folyamatos számlálásnak keresi a lokális maximumát is, azaz mennyi volt az a legtöbb fő, amely egyszerre tartózkodott a járaton. Amikor a döntéshozáshoz kerül a program, minden időpontnál megvizsgálja, hogy elfér-e a járművön a maximumkeresés eredménye. Amennyiben ez nem teljesül, automatikusan 0 értéket térít vissza az illeszkedésre, így az a busz garantáltan nem kerül kiválasztásra.

A cikk írásakor (2024 harmadik negyedév) aktuális árakkal lefuttatva 4. táblázat második oszlopában látható eredményeket kaptam. Domináns módon jelennek meg a dízel autóbuszok, csúcsforgalmi időszakban csuklósokkal. Láthatunk elektromos szóló autóbuszokat is elvétele a listán.

4. táblázat: 14-es útvonalon a 2024-es és a 2017-es árakkal kapott eredmények

Indulási idő-pont	Kiválasztott jármű 2024-es árakkal	Kiválasztott jármű 2017-es árakkal
7:00	Dízel Csuklós	CNG Csuklós
7:30	Elektromos Szóló	CNG Csuklós
8:00	Dízel szóló	Dízel Szóló
8:30	Dízel Szóló	Dízel Szóló
9:00	Dízel Szóló	Dízel Szóló
9:30	Dízel Csuklós	CNG Csuklós
10:00	Elektromos Szóló	CNG Csuklós
10:30	Dízel Csuklós	CNG Csuklós
11:00	Dízel Szóló	Dízel Szóló
11:30	Dízel Csuklós	CNG Csuklós
12:00	Dízel Szóló	Dízel Szóló
12:30	Elektromos Szóló	CNG Csuklós
13:00	Elektromos Szóló	CNG Csuklós
13:30	Dízel Csuklós	CNG Csuklós
14:00	Dízel Szóló	Dízel Szóló
14:30	Dízel Csuklós	CNG Csuklós
15:00	Elektromos Szóló	CNG Csuklós
15:30	Dízel Csuklós	CNG Csuklós
16:00	Dízel Csuklós	CNG Csuklós
16:30	Dízel Csuklós	CNG Csuklós
17:00	Dízel Szóló	Dízel Szóló
17:30	Dízel Szóló	Dízel Szóló
18:00	Dízel Szóló	Dízel Szóló
18:30	Dízel Szóló	Dízel Szóló
19:00	Dízel Szóló	Dízel Szóló
19:30	Dízel Csuklós	CNG Csuklós
20:00	Dízel Szóló	Dízel Szóló
20:30	Dízel Csuklós	CNG Csuklós
21:00	Elektromos Szóló	Dízel Szóló
21:30	Dízel Szóló	Dízel Szóló

Amennyiben az üzemanyagárakat a 2017-es értékekre csökkentjük le, a 4. táblázat harmadik oszlopát kaptam. Ekkor a CNG ára 369 Ft/kg, a dízelé 400 Ft/l volt, valamint a vállalat nem rendelkezett elektromos járművekkel, így azokat kiiktattam. Látható, hogy az eredmény egyértelmű elhatárolást tesz: amennyiben kevés az utas a dízel szóló hatékonyabbnak bizonyult, sok utas esetén a CNG csuklós győzedelmeskedett.

A cikk írásakor (2024 harmadik negyedév) aktuális árak mellett egy másik útvonal adatait véve, a 12-es buszjáratét, az értékek az 5. táblázat második oszlopa szerint változnak meg. Látható, hogy a 4. táblázathoz képest a program által meghatározott járművek ugyanazon elvet követik: csúcsforgalmi időszakban csuklós járművek, egyéb időszakokban szóló autóbuszok járnak, és továbbra is domináns a dízel üzemanyag. A 4. táblázathoz hasonlóan, ha lecsökkentjük a 2017-es árakra az üzemanyagot, megkapjuk az 5. táblázat harmadik oszlopát. Itt is kimondhatjuk azt, hogy kevés utas esetén a dízel szóló, sok utas esetén a CNG csuklós autóbuszok a hatékonyabbak.

5. táblázat: 12-es útvonalon a 2024-es és a 2017-es árakkal kapott eredmények

Indulási időpont	Kiválasztott jármű 2024-es árakkal	Kiválasztott jármű 2017-es árakkal
7:00	Dízel Csuklós	CNG Csuklós
7:15	Dízel Csuklós	CNG Csuklós
7:30	Dízel Csuklós	CNG Csuklós
7:45	Dízel Csuklós	CNG Csuklós
8:00	Elektromos Szóló	Dízel Szóló
8:30	Elektromos Szóló	Dízel Szóló
9:00	Dízel Szóló	Dízel Szóló
9:20	Dízel Szóló	Dízel Szóló
10:00	Dízel Csuklós	CNG Csuklós
10:20	Dízel Csuklós	CNG Csuklós
11:00	Dízel Csuklós	CNG Csuklós
11:20	Dízel Csuklós	CNG Csuklós
12:00	Dízel Szóló	Dízel Szóló
13:00	Dízel Csuklós	CNG Csuklós
14:00	Dízel Csuklós	CNG Csuklós
15:00	Elektromos Szóló	Dízel Szóló
16:00	Dízel Csuklós	CNG Csuklós
17:00	Dízel Szóló	Dízel Szóló
18:00	Dízel Szóló	Dízel Szóló
19:00	Elektromos Szóló	Dízel Szóló
20:00	Dízel Szóló	Dízel Szóló
21:00	Elektromos Szóló	Dízel Szóló

A racionalitást a következő képpen ellenőriztük. Mindegyik csoportból választottunk 1 véletlen indulási időpontot, és végig számoltuk mi is azt, hogy melyik buszt küldenénk ki ugyanazon feltételek mentén. A 4. táblázatból a 2024-es csoportból a délelőtt 9:00-t, a 2017-es csoportból a délután 15:00-t, az 5. táblázatból a 2024-es csoportból a reggel 7:00-t, és végül a 2017-es csoportból az este 19:00-t véletlenszám generátor segítségével választottuk ki. A számolás menete így zajlott: az Utasokból meghatároztuk az egy szakaszon legtöbben együtt utazók számát, ez a harmadik csoportban 57 lett. Ezután kiszámoltuk a buszok egységnyi üzemanyagköltségét Ft/100 km-ben, amely a harmadik csoportban a dízel szóló esetén 22100, dízel csuklós esetén 37700, CNG szóló esetén 42770, CNG csuklós esetén 54290 és elektromos szóló esetén 16400 jött ki. Következő lépés a zsúfoltság kiszámolása volt (fő/m²), amelyet úgy kapunk meg, hogy a kiszámolt utasmaximumot elosztottuk a buszok alapterületével, amely a harmadik csoportban a dízel és CNG szólóra 2,375, a dízel és CNG csuklósra 1,425, az elektromos szólóra 2,28 jött ki. A CNG járművek túl drágák, ezért elvetettük őket. A két dízel között az árkülönbség nem jelent kategóriaugrást, ezért a zsúfoltságot előterbe helyezve a dízel csuklóst választjuk ki. Az elektromos szóló és a dízel csuklós között kategória különbség van a költségek és a zsúfoltság között, és a zsúfoltságot figyelembe véve dízel csuklóst választottunk véglegesen. Ezt minden csoportra végig számolva és összevetve az MI értékeivel a 4. táblázatot kapjuk.

6. Táblázat: racionalitás-vizsgálat

	Manuális	Program
2024; R14; 9:00	dízel szóló	dízel szóló
2017; R14; 15:00	CNG csuklós	CNG csuklós
2024; R12; 7:00	dízel csuklós	dízel csuklós
2017; R12; 19:00	dízel szóló	dízel szóló

5. ÖSSZEFOGLALÁS

A program sikeresen lefutott több különböző paraméter mellett is. A vizsgált útvonalakon a cikk írásakor (2024 harmadik negyedév) aktuális árak mellett elnyomó többségben dízel autóbuszokat hozott ki eredményként, csúcsidőben csuklóst, egyéb esetekben szólót, de előfordult elektromos szóló is. Amennyiben az üzemanyagárak megváltoztak, az eredmények a várakozásnak megfelelően követték azt le, például a CNG és a dízel árának közelítésével változatosabb lett a választék. A program racionálisan hozta meg a döntéseket.

A mesterséges intelligencia segítségével egyszerűen és akár dinamikusán is lekövetjük a változásokat és az igényeket, így a programnak van létjogosultsága. Fejlesztési lehetőségek és egyéb kutatási lehetőségek nyitottak, például az üzemanyagárak jövőbeli becslésével, új útvonalak bevonásával, vagy a jelenleg is vizsgált útvonalak többszörös újramérésével.

6. HIVATKOZÁSOK

- [1] KSH, „Urban passenger traffic in Hungary and Budapest by mode of transport,” 26 FEBRUÁR 2024.. [ONLINE]. Available: https://www.ksh.hu/stadat_files/sza/en/sza0021.html. [Hozzáférés dátuma: 13. március 2024.].
- [2] SAEIDIZAND,P. „Global Bus Survey,” MÁJUS 2019.. [ONLINE]. Available: https://cms.uitp.org/wp/wp-content/uploads/2020/07/Statistics-Brief_Global-bus-survey-003.pdf. [Hozzáférés dátuma: 13. március 2024.].
- [3] KSH, „Number and capacity of carriages in local fixed track transport,” 30. június 2023.. [Online]. Available: https://www.ksh.hu/stadat_files/sza/en/sza0029.html. [Hozzáférés dátuma: 13. március 2024.].
- [4] Dr. FÜLÖP; G., Dr. HORVÁTH; B., Dr. PRILESZKY; I., SZABÓ, L, „Közforgalmú Közlekedés I,” 2006.. [Online]. Available: http://rs1.sze.hu/~farkasi/Kozforgalmu_kozlekedes_I.pdf. [Hozzáférés dátuma: 15. március 2024.].
- [5] MVK ZRT., „Járműállomány” , [Online]. Available: <https://mvkzrt.hu/jarmuallomany>. [Hozzáférés dátuma: 15. március 2024.].
- [6] HAJTÓ, B, „Átmenetileg bérelt autóbuszok,” 1. FEBRUÁR 2023.. [Online]. Available: http://hbweb.hu/jarmu/mvk_man-berelt_cim.htm. [Hozzáférés dátuma: 15. március 2024.].
- [7] MVK ZRT., „Módosul a CNG üzemanyag ára,” 14. december 2023.. [Online]. Available: <https://mvkzrt.hu/aktualis/modosul-cng-uzemanyag-ara-5>. [Hozzáférés dátuma: 15. március 2024.].
- [8] MVM ZRT., „Egyetemes szolgáltatói egységárak nem lakossági ügyfeleknek 2023. május 1-jétől,” 1. május 2023.. [Online]. Available: <https://www.mvmnext.hu/aram/servlet/download?type=file&id=15883>. [Hozzáférés dátuma: 15. március 2024.].

- [9] ARGROINFORM, „*Gázolaj hazai piaci átlagárának alakulása,*” 15. március 2024.. [Online]. Available: <https://www.agroinform.hu/gazolaj-arak>. [Hozzáférés dátuma: 15. március 2024.].
- [10] RUSSELL, S.J., NORVIG, P. „*Artificial Intelligence: A Modern Approach*”, Hoboken: Pearson, 2021.
- [11] KOVÁCS, Sz., JOHANYÁK, Cs. Zs., „*Vague Environment-based Two-Step Fuzzy Rule Interpolation Method*”, 25. január 2007.. [Online]. Available: https://conf.uni-obuda.hu/sami2007/20_Johanyak.pdf. [Hozzáférés dátuma: 15. március 2024.].
- [12] KOVÁCS, Sz., PILLER, I., „*Fuzzy Behavior Description Language: a Declaritive Language for Interpolative Behavior Modeling*”, Acta Polytechnica Hungarica, 2019.

INTEGRÁLT HARMONIKUS SZŰRŐK HATÉKONYSÁGÁNAK VIZSGÁLATA

INVESTIGATION OF THE EFFECTIVENESS OF INTEGRATED HARMONIC FILTERS

KOVÁCS Attila¹, MOLNÁR Judit²

¹PhD hallgató, attila.kovacs@zf.com

Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet,
Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék;
H-3515 Magyarország, Miskolc- Egyetemváros, Tel: +36 30 768-4499

²PhD, egyetemi docens, judit.molnar@uni-miskolc.hu

Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet,
Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék;
H-3515 Magyarország, Miskolc- Egyetemváros, Tel/Fax: +36 46 565-111

Kivonat: Az automatizált, robotizált gyártásban használt villamosenergia elosztó, vezérlő, szabályozó és adattároló egységeket meg kell védeni a káros elektromos hálózati felharmonikus injektálásokról és azok következményeitől. Ebben a tanulmányban ipari csarnokvilágítóba, tesztágyakba és ipari robotokba épített passzív és aktív harmonikus szűrők hatékonyságát vizsgáltuk (a lámpa esetén egy, berendezéseknél két esetben, kis és nagy terhelési viszonyok mellett). A hálózatelemzés alapján megállapításra került, hogy a LED lámpába integrált passzív szűrő hatástalan, a próbapadra beépített aktív harmonikus szűrője nagy terhelésnél megfelelően működött, de kis terhelésnél nem volt hatékony, míg az ipari robot harmonikus torzításának nagysága meghaladta a megengedett szintet (kis terhelésnél a határérték háromszorosa, nagy terhelésnél a határérték hétszerese). Ezért a jelenlegi szűrőket azok gyártóival történt egyeztetéseket követően le kell cserélni, majd megfelelő hatékonyságúakat kell beépíteni, ezt követően a lámpa és a berendezések újraprojektálása szükséges.

Kulcsszavak: villamos tranziensek, harmonikus torzítás, villamos hálózati zavarok, feszültség letörések, Teljes Harmonikus Torzítás (THD), beépített aktív/passzív harmonikus szűrők

Abstract: Electricity distribution, control, regulation and data storage units used in automated, robotic production must be protected from harmful electrical network harmonic injections and their consequences. In this study the efficiency of passive and active harmonic filters built into industrial hall lights, test benches and industrial robots were investigated (in case of lamp in one, while at equipment in two cases, at low and high load conditions). Based on the network analysis, it was determined that the passive filter integrated into the LED lamp was ineffective, the active harmonic filter built into the test bench worked properly at high load, but was ineffective at low load, while the magnitude of the industrial robot's harmonic distortion exceeded the permissible level (three times the limit value at low load, seven times the limit at high load). Therefore, the current filters must be replaced after consultation with their manufacturers, and then installed with suitable ones, after that the lamp and equipment need to be revalidated.

Keywords: electrical transients; harmonic distortion; electrical power disturbances; voltage sags; Total Harmonic Distortion (THD); built-in active/passive harmonic filter

1. BEVEZETÉS

Napjainkban nem csak az ipari létesítményekben, hanem már a háztartásokban is egyre inkább elvárás a megszakításmentes villamosenergia ellátás biztosítása. Ezen kívül a villamosenergia minősége egyaránt kiemelt jelentőségű a termelő gépek, berendezések folyamatos rendelkezésre állásához. Az úgynevezett nem lineáris működésű elektronikus berendezések áramfelvétele a hálózatról nem lineáris, így szinuszhullám torzító hatásuk van. Az eltorzult jelalakok hibákat eredményezhetnek, felharmonikusok jelennek meg, például a tápfeszültség hullámalak

torzulása és magas frekvenciákon rezonancia kialakulása is lehetővé válik a hálózaton. Azokban a gyárakban, ahol a legújabb gyártósorokat üzemeltetik, számos helyen használják az elektronikus hajtás szabályozásokat, LED csarnok világításokat, programozható logikai vezérlőket (Programmable Logic Controller - PLC) és mikrokontrolleres vezérlőket, robot és kobot cellákat, valamint számítástechnikai és informatikai eszközöket. Az áram és feszültség szinuszhullám torzulások miatt az érzékeny elektronikai eszközök, a PLC és a CNC (Computer Numerical Control) vezérlések is tönkre mehetnek, informatikai eszközök esetében pedig adatvesztések történhetnek. További probléma lehet a védelmi és vezérlőrendszerek hibás megszólalása, a villanymotorok túlmelegedése, energia fogyasztásuk megnövekedése. A transzformátorokban normál körülmények között tiszta szinuszhullám van, mind áram, mind feszültség tekintetében, melyek a harmonikusokat tartalmazó rendszerekben torzulást szenvednek [1]. Ha az elosztóhálózatot "szennyezik" a felharmonikusok, az energiaszolgáltatás minőségi paraméterei is jelentősen romlanak [2]. Több tudományos cikk is foglalkozik nem lineáris terhelések szinuszhullámok torzító hatásának vizsgálatával a hálózaton, valós mérési körülmények között [3, 4]. A prevenció egyik lehetősége harmonikus szűrők alkalmazása, vagy központilag, közvetlenül a berendezésekbe beépítve, vagy az adott villamos hálózat betáplálási pontjára csatlakoztatva. Az aktív harmonikus szűrők használatával a fogyasztói áram szinuszt a lehető legtökéletesebbé teszik azáltal, hogy a fogyasztó által felvett, harmonikusokkal szennyezett áramba "valós időben" egy ellenkező előjelű harmonikus áramot injektálnak, így a hálózatra egy tiszta (50 Hz-es) szinuszos jelhullámformát adnak, amely nem torzítja a hálózati feszültséget. A mai aktív harmonikus szűrők ezt 300-500 μ s válaszidővel képesek követni, ami az 50 Hz-es hálózati frekvenciához, azaz a 20 ms-os hálózati T periódus időhöz hasonlítható. A kompenzálás az 50. harmonikusig történik, de a gyakorlatban a 25. harmonikus feletti áramokkal ritkán találkozunk. Meg kell jegyezni, hogy az elektromos autók töltőinek egyre nagyobb száma és az informatikai berendezések egyre nagyobb adatsebessége miatti érzékenységek okán már foglalkozni kell a szuprharmonikus injektálással is (2 kHz-150 kHz), ami a 3000. harmonikus rendig terjed. Egyik villamosenergia minőség-javító technika az APLC (aktív hálózati kondicionálás) [5, 6], amely egy olyan aktív szűrőtípus, amely kompenzálja a villamosenergia-rendszer hullámformájának torzulását.

2. A KUTATÁS CÉLJA

A 2023 és 2024 években hálózat analízishez kapcsolódó méréseket végeztünk egy ipari létesítményben. A mérések célja az volt, hogy megvizsgálásra kerüljön a csarnokvilágító lámpatestekbe és termelésben használt berendezésekbe beépített felharmonikus szűrők hatékonysága. Az elemzések során a gyártók által beépített passzív és aktív harmonikus szűrők hatékonysága a vizsgált eszközök terhelt és terheletlen állapotában is elemzésre került. Ezáltal információ kapható arról, hogy ezek a berendezések és lámpatestek milyen mértékben tekinthetők a harmonikus zavarok potenciális forrásainak és a villamos energia minőségére milyen hatást gyakorolhatnak. A mérési eredmények a szűrők validálásán kívül, összehasonlító elemzésekben is felhasználhatóak lesznek a jövőbeli kutatásaink során. Így például felmérhető, hogy a szuperpozíció elve alkalmazható-e a csoportosított berendezések áramfelharmonikusaira, hogy a harmonikusok alapharmonikusra vonatkoztatott amplitúdójának nagysága lineárisan nő-e, vagy esetleg csökken-e a berendezések számával. Egyforma típusú gépek esetében meg lehet vizsgálni, hogy összeadódnak-e az azonos áram harmonikus rendek amplitúdói és ezek az amplitúdók arányosan nőnek-e a gépek terhelésével.

3. HÁLÓZAT ANALÍZIS

A mérésekhez a HT gyártó PQA824 típusú, HT Italia SRL Faenza (RA) - ITALY [7] hálózat analizátorát használtuk. A műszer főbb jellemzői: regisztrálás MIN/MAX/AVG, feszültség anomáliák észlelése, felharmonikus analízis, patch elemzés, villogás analízis, nagysebességű feszültség tranziensek rögzítése 5,5 μ s-tól, bekapcsolási áramok rögzítése. A műszer paraméterezése a magyarországi forgalmazó által készített használati útmutató alapján, míg a rögzített adatok kiolvasása a HT Italia Topview 2.2.2.3 verziójú szoftverével történt [8]. A mérési eredmények Gyors Fourier Transzformáció (Fast Fourier Transform - FFT) használatával kerültek kiértékelésre, az analizátorból kiolvasott transzformált adatok segítségével. A méréseket három különböző fogyasztónál végeztük el: egy LED-lámpa, egy próbapad és egy ipari robot esetében. A mért adatok kiértékeléséhez elengedhetetlen a vonatkozó szabványok ismerete. Az IEEE 519-2022 szabvány ajánlás (még nem magyar szabvány) a berendezések telepítéséhez ajánl maximálisan megengedett harmonikus torzítási értékeket. Az IEEE 519-2022 szabvány alkotói az áramfelharmonikusok esetében úgy döntöttek, hogy az áramfelharmonikusok nagyságát a feszültségforrás teljesítményétől függően korlátozzák. Hiszen egy nagy villamos teljesítményű hálózat sokkal nagyobb mértékben tudja elnyomni az áramfelharmonikusok hatását, mint egy kisebb teljesítményű hálózat anélkül, hogy az befolyásolná a feszültsége minőségét. Az IEEE 519 szabvány harmonikus rendként adja meg a lehetséges torzítás nagyságát. A teljes áramigény torzítást (Total Current Demand Distortion - TDD), nem pedig a teljes harmonikus torzítás (Total Harmonic Distortion - THD) határértékeit határozza meg. A vonatkozó határértékek az 1. táblázatban láthatóak.

1. táblázat: IEEE 519-2022 szabvány szerint lehetséges áramtorzítási határértékek 120V-tól 69kV-ig.

I _{sc} /I _L	Egyedi harmonikus rend (páratlan felharmonikusok) ^{1,2} Maximális harmonikus áramtorzítás az I _L százalékában					Teljes áramigény szerinti torzítás (%)
	2 ≤ h < 11	11 ≤ h < 17	17 ≤ h < 23	23 ≤ h < 35	35 ≤ h < 50	
<20 ³	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20-50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50-100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100-1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
>1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

¹ A páros harmonikusok a fenti páratlan harmonikus határértékek 25%-ára korlátozódnak.

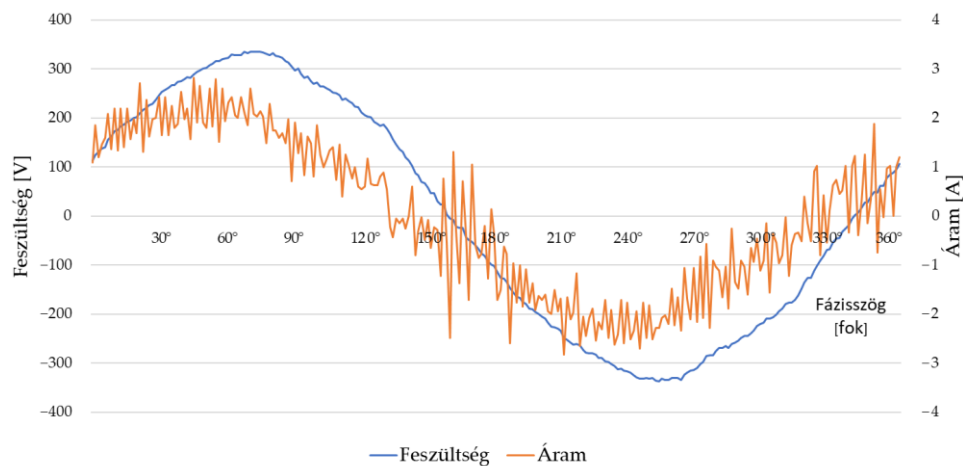
² Az áramtorzítások, amelyek egyenáram-eltolást eredményeznek, például a félhullámú konverterek nem megengedettek.

³ Minden áramtermelő berendezés az áramtorzítás ezen értékére korlátozódik, függetlenül a tényleges I_{sc}/I_L értéktől.

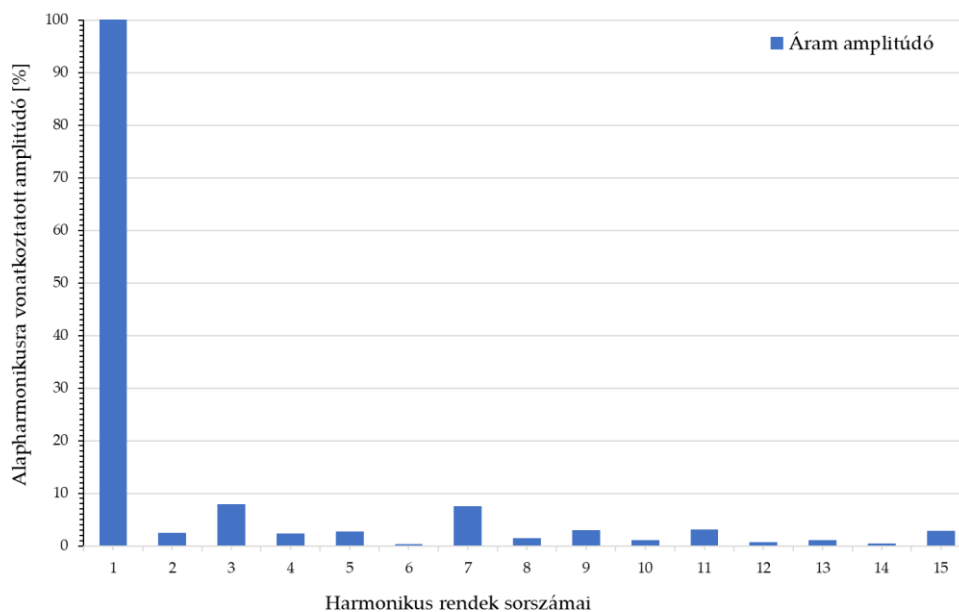
3.1. LED-lámpa beépített passzív harmonikus szűrőjének validálása

A LED-es világítást napjainkban szinte minden ipari létesítményben, csarnokban és irodában, de a munkaterek megvilágítása esetében is alkalmazzák. Ezek a fogyasztók kapacitív jellegüknel fogva is komoly hatással lehetnek a villamos energia minőségére [9]. A kutatás egyik célja a lámpatestekbe épített passzív harmonikus szűrő hatékonyságának vizsgálata volt, a mérési adatgyűjtés hálózat analizátorral történt, a vizsgált lámpatest egy 2000/840/W/F típusú, 230 VAC tápfeszültségű és 140 W villamos teljesítményű csarnok világító LED-es lámpatest volt.

Ezek a lámpatestek a forgalmazó szerint beépített passzív harmonikus szűrővel rendelkeznek. A mért feszültség és az áram hullámformája egy periódusra vonatkozóan az 1. ábrán látható. Az áramhullám olyan mértékben torzult, hogy a szinuszos hullámformát nem lehet felismerni. Többszörös nullpontátmenet is látható. Az áram teljes harmonikus torzítása (THD) 15,20% volt. A teljes áramigény szerinti harmonikus torzítást (TDD) is meghatározásra került. Ez $16 \text{ A}/1 \text{ A} = 16$. Az 1. táblázat szerint a megengedett torzítás csak 5% lehet, tehát a különbség 10,20%, ami több mint háromszorosa a megengedett értéknek.

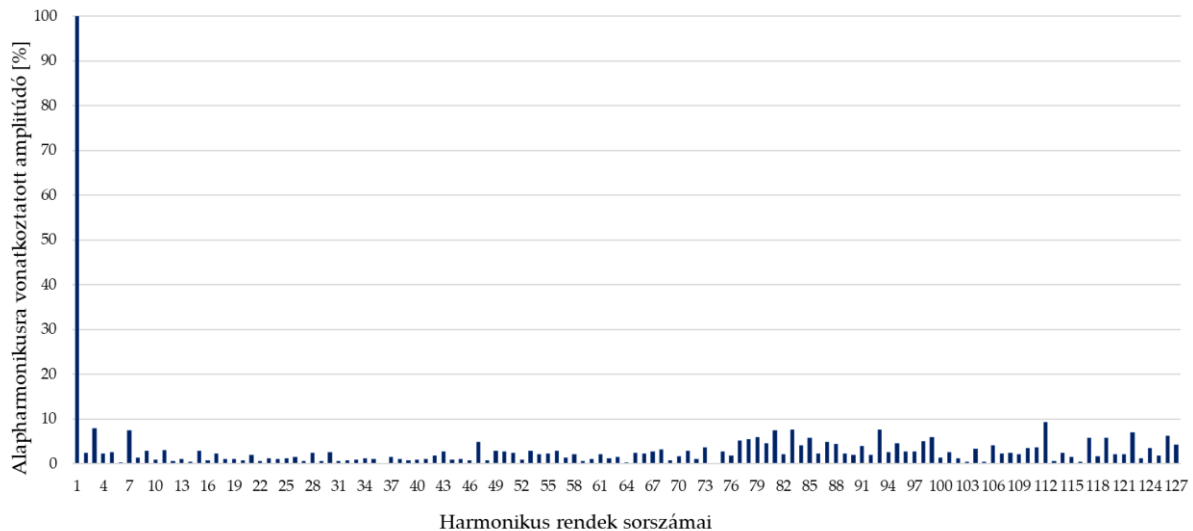


1. ábra. A LED-lámpa torzított áram- és feszültséghullámformája.



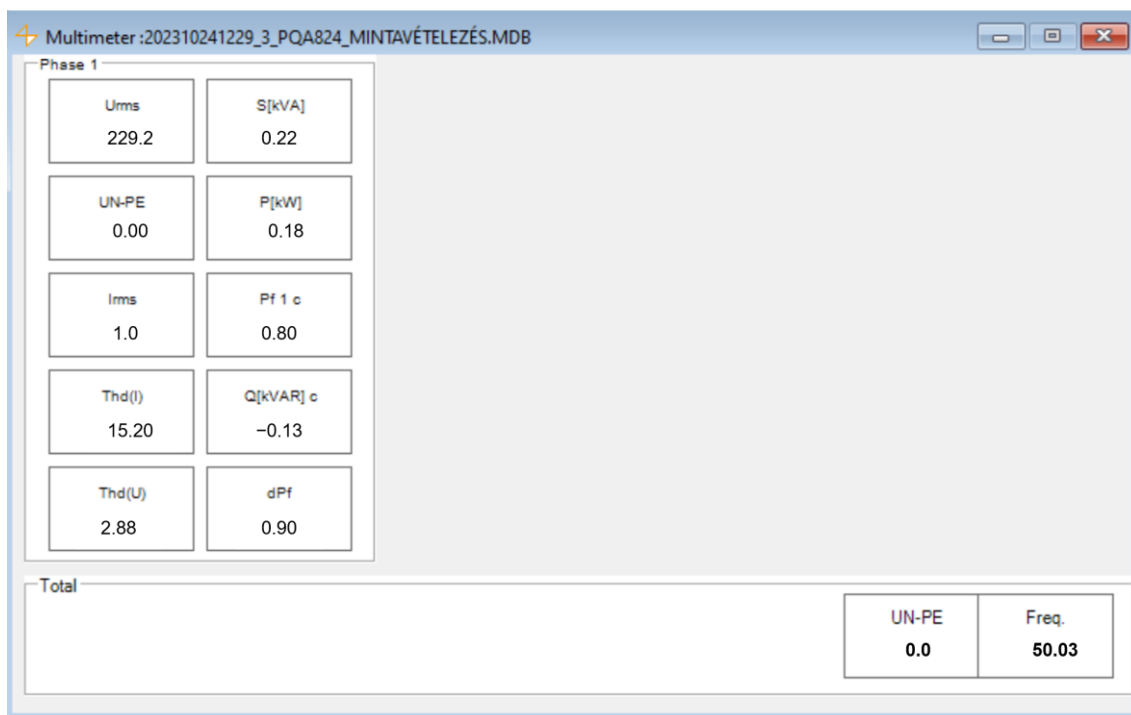
2. ábra. A LED-lámpa harmonikus áramerősségű összetevői a torzított áramhullámformában.

A 2. ábra az aktuális spektrumot mutatja. A 1. táblázat szerint a szabványban ajánlott maximálisan lehetséges érték harmonikus rendenként a 11. harmonikusig 4%, de ezek az áramamplitúdó értékek 7,82% és 7,45%-ra adódtak a 3. és 7. harmonikusok esetében. Mivel az áram hullámformája ebben az esetben is arra utal, hogy magasabb frekvenciákon is lehetnek harmonikus emissziók, az áram spektruma a szupraharmonikus tartományban (2 kHz-150 kHz) is megvizsgálásra került, ami a 3. ábrán látható. A 79. rendtől (3,95 kHz) a 127. rendig (6,35 kHz) megközelíti, sőt szinte minden egyes rendnél jelentősen meg is meghaladja IEEE 519-2022 szabvány által az 50. harmonikusig vizsgált, az 1. táblázat szerinti alapharmonikusra viszonyított amplitúdónak a megengedett határértékét. Ez azért fontos, mert a szabvány csak 50. rendig (2,5 kHz) adja meg az ajánlott maximális amplitúdókat, a szupraharmonikus tartományt már nem vizsgálja. A gyakorlatban a berendezések harmonikus injektációját viszont még kisebb frekvenciáig, csak 750 Hz-ig, a 15. harmonikusig vizsgálják, de mint látható, ezt a magasabb rendek esetében is el kellene végezni. A fent leírt mérést egy és két LED-lámpával is elvégeztük, de nem volt jelentős különbség a jel alakjában és a torzítás mértékében. A mérési eredményekből arra lehet következtetni, hogy beépített passzív harmonikus szűrő vagy nincs benne, vagy hatástalan.



3. ábra. A LED-lámpa szupraharmonikus áramerősségű komponensei a torzított áramhullámformában.

A TopView szoftver 2.2.2.3 verziója által előállított táblázat, amely az analizátor feszültség-, áram- és THD-mérési eredményeit jeleníti meg, a 4. ábrán látható.



4. ábra. A LED-lámpa mért feszültsége, árama, THD-je és teljesítménytényezője a TopView segítségével.

3.2. Tesztpad beépített aktív harmonikus szűrőjének validálása

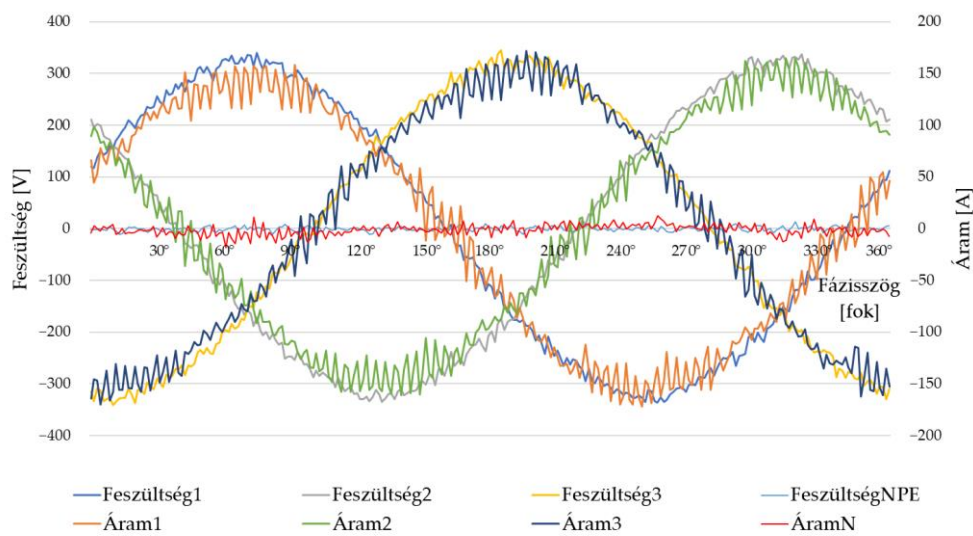
A következőkben egy modern gyárban végzett mérési eredmények kerülnek bemutatásra. Egy nagy teljesítményű frekvenciaváltóval felszerelt próbapadba szerelt aktív harmonikus szűrő hatékonysága lett megvizsgálva teljes terhelésnél és a tipikusabb alacsony terhelésű vagy üresjáratú állapotban történő használat során.

3.2.1. Tesztpad teljes terhelésen üzemelve

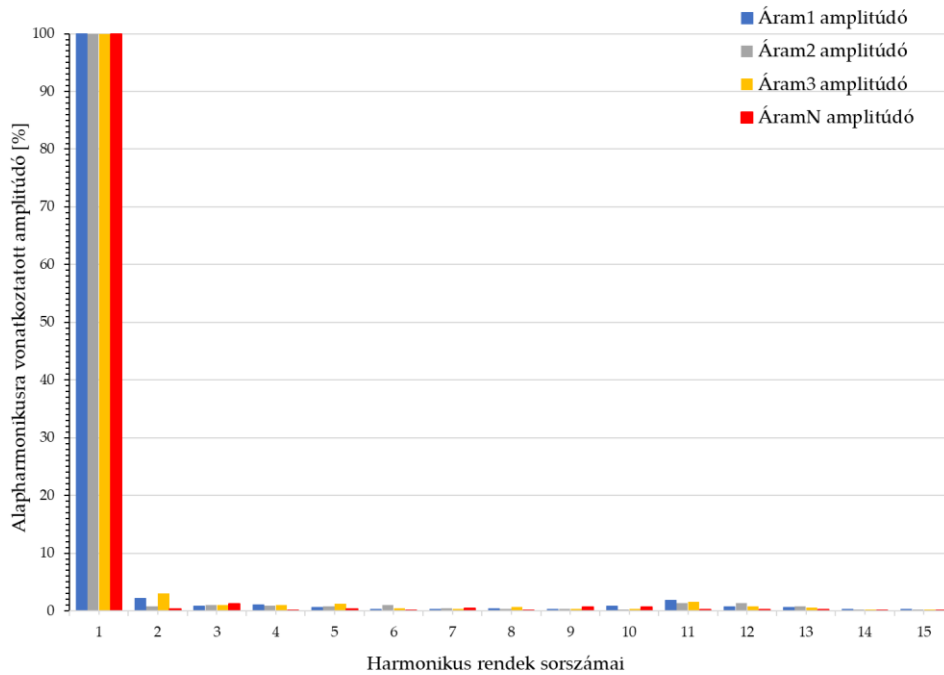
Az 5. ábrán látható mérési eredmények alapján elmondható, hogy az egyes fázisok áramainak nagysága és az áramok teljes harmonikus torzítása közel azonos volt, ezért itt csak a 3. fázis áramát elemeztük. A nullavezető áramának maximális értéke 5,15 A volt, ami elhanyagolható a 108,2 A maximális fázisáramokhoz képest. A hálózatelemzést a gép terhelt állapotában, normál termelési körülmények között végeztük. A fázisáramok fázisonként 103,3 A és 108,2 A között változtak, így szimmetrikusnak tekinthetők. Az áramok hullámformái is erősen torzulnak, azok THD értéke a 3. fázisáram esetében 4,35% volt. Amint azt már említettük, a THD javasolt maximális megengedett értékét az IEEE 519-2022 szabványban meghatározottak szerint a TDD adja meg. Ez az arány most $630 \text{ A}/108,2 \text{ A} = 5,82$, és az 1. táblázat szerint a megengedett torzítás csak 5% lehet. A 3. fázis árama esetében ez az érték 4,35%, ami megfelel a szabvány követelményeinek, tehát a beépített aktív harmonikus szűrő megfelelően működik.

Vegyük figyelembe, hogy a nullavezető árama 5,15 A, aminek ideális esetben nullának kellene lennie. A nullavezető áramát a nem tökéletesen szimmetrikus terhelés okozza, ami ebben az esetben csak enyhén volt aszimmetrikus, tehát elhanyagolható. Viszont a nullavezető nagy árama esetén, amikor annak nagysága megközelíti, vagy egyes esetekben akár meg is haladhatja a fázisvezető áramának nagyságát, a transzformátorban és a vezetékben túlterhelést és túlmelegedést okozhat, ami meghibásodáshoz vezethet [10]. A villamosenergia elosztó hálózatok az esetek többségében TN (Three-phase Neutral system) háromfázisú nullázott rendszerűek, eb-

ben a rendszerben a transzformátor szekunder tekercsei csillagba vannak kapcsolva és a tekercsek csillagpontját leföldelik, majd erre a pontra kötik a nullvezetőt. A fázisfeszültségekben megtalálható az összes harmonikus, emiatt a fázis és a vonali áramokban is megjelennek a harmonikusok. A nullvezető áramát a fázisáramok összege adja. Ezen áram effektív értéke a zérus sorrendű áramok négyzetösszegeinek négyzetgyöke lesz. Ez az áram a nullvezetőben többlet terhelést okoz a szimmetrikusan kapcsolt, nem lineáris terhelések esetén, melynek nagysága elérheti a fázisvezető áramának a 2-3 szorosát is. Ha a hálózattervezések során nem számolunk ezzel az árammal és nem vesszük figyelembe a nullvezető felharmonikusok miatti áramát - ami az egyes vezeték szakaszokon a feszültségesés miatt potenciál eltolódásokat okoz, az elektronikus berendezések működésében komoly zavarokat okozhat.

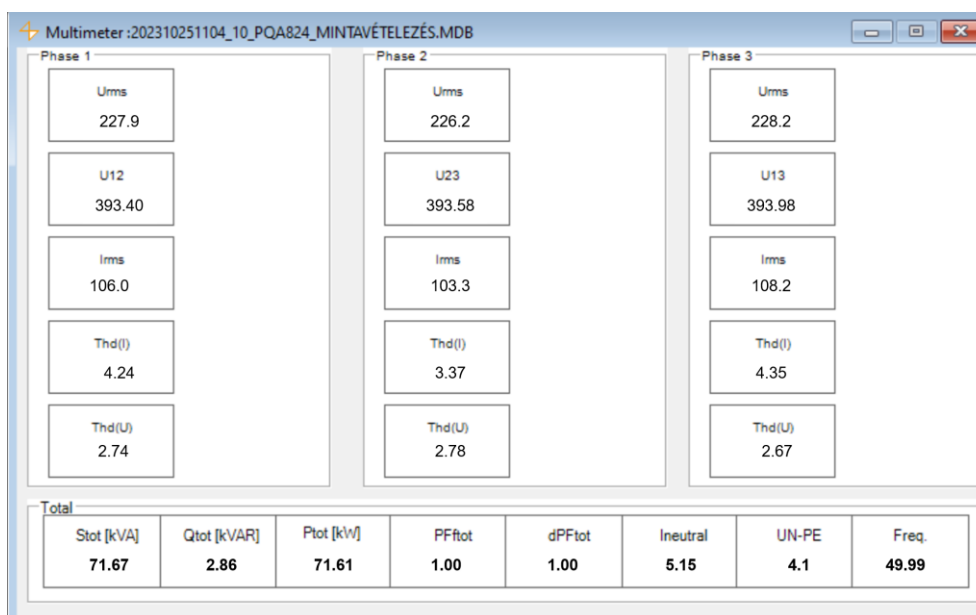


5. ábra: A próbapadon nagy terhelésnél mért torzított áram- és feszültség hullámformák.



6. ábra: A próbapadon teljes terhelésnél mért torzított áramhullámformák harmonikus áram-amplitúdó összetevői

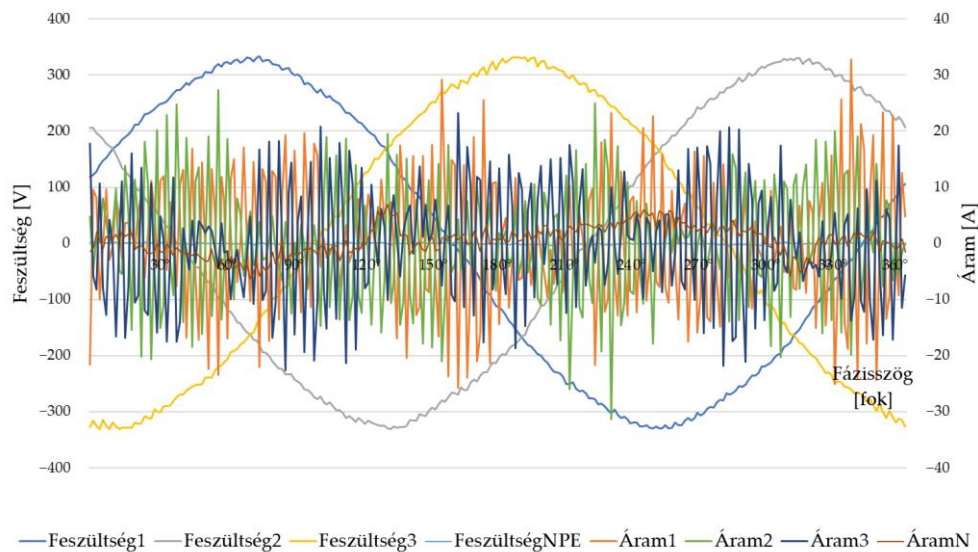
A 6. ábra az áramok spektrumát mutatja fázisonként. Mint az előző spektrum esetén, itt is a vízszintes tengelyen a sorszámok a felharmonikus rendeket, az alapharmonikusra vonatkoztatva ábrázoltuk. A mérési adatok alapján elmondható, hogy a harmonikus torzítás nagysága a harmonikus rendek esetében nem haladja meg a szabvány által megengedett szintet, az aktív szűrő nagy terhelésnél nagyon jól működik. A TopView szoftver által biztosított táblázatot, amely az analizátor feszültség-, áram-, THD- és reaktív teljesítmény mérési eredményeit mutatja, a 7. ábrán láthatjuk.



7. ábra: Próbapad teljes terhelésénél a TopView kiértékelő szoftver által szolgáltatott feszültség, áram, THD és teljesítményező értékek.

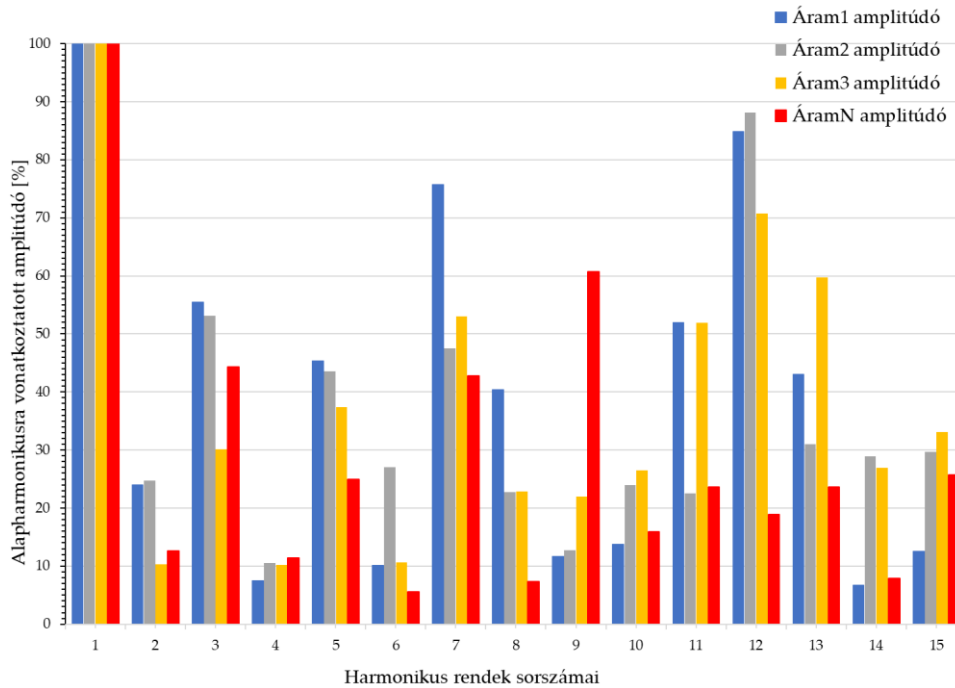
3.2.2. Tesztpad kis terhelésen üzemelve

A 8. ábra mutatja a feszültség- és áramhullámformákat a kis terhelési állapot esetében végzett mérésekhez kapcsolódóan. A feszültség szinusz szinte torzításmentes, de az áram szinusz nem ismerhető fel, az áram THD értéke 104,54% volt. Mint már említettük, a szabvány az áram teljes harmonikus torzításának ajánlott maximális értékét a teljes áramigény harmonikus torzításának (TDD) értékével adja meg, amely a közös elektromos hálózati csatlakozási pont (PCC) rövidzárlati áramának és az adott készülék terhelési áramának arányától függ. Ez az arány most $630 \text{ A}/10,4 \text{ A} = 60,57$, ami 50 és 100 között van, így a megengedett torzítás csak 12% lenne. Ettől a határértéktől való eltérés 92,54%.



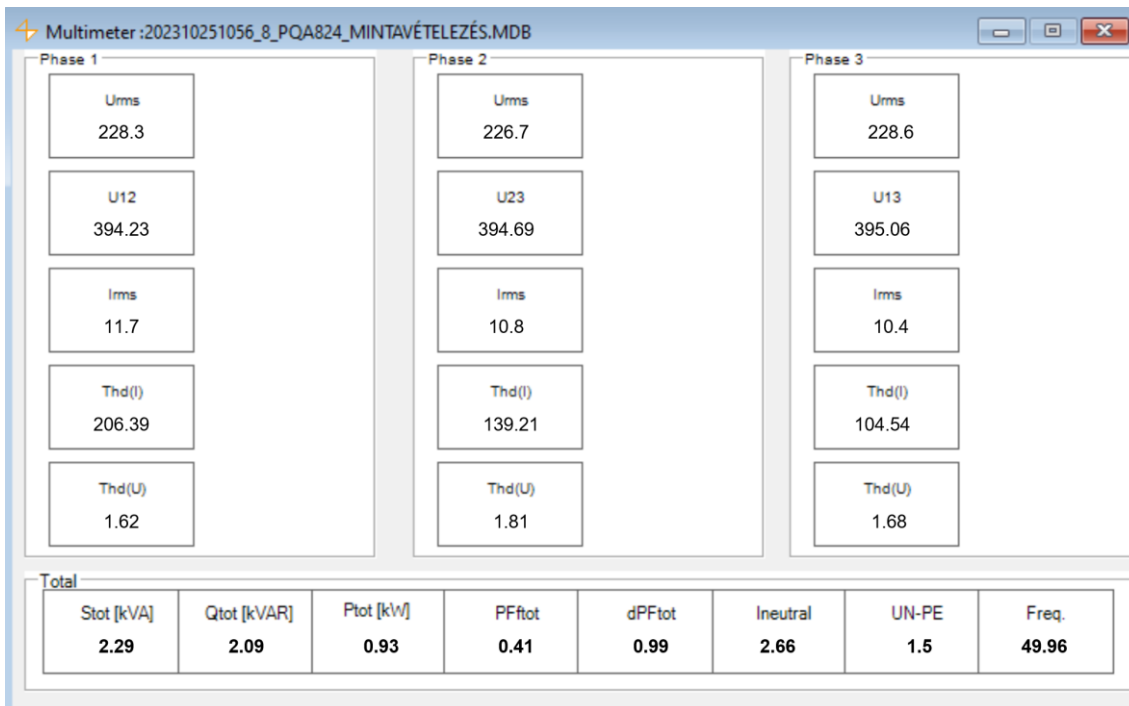
8. ábra: A próbapadon kis terhelésnél mért torzított áram- és feszültség-hullámformák.

A 9. ábra az áram spektrumát ábrázolja. Látható, hogy a 15. felharmonikusig nincs olyan felharmonikus rend, amelynek az alapharmonikushoz viszonyított értéke nem haladná meg a szabványban leírt maximálisan lehetséges 4%-os értéket. Az áram amplitúdó értékei 10% és 88% között változnak. A fentiek alapján megállapítható, hogy a beépített aktív szűrő kis vagy terheletlen állapotban nem hatékony és komoly jelalak-torzulásokat eredményez a hálózatban. Célszerű a szűrés hatékonyságát minél előbb növelni, mert ez komoly problémákat okozhat más berendezések különböző adatrögzítőiben és vezérlő egységeiben is.



9. ábra: A próbapad kis terhelésén mért torzított áramhullámformák harmonikus áramamplitúdó összetevői.

A TopView szoftver által biztosított táblázat, amely az analízátor feszültség-, áram-, THD- és reaktív teljesítménymérési eredményeit mutatja a 10. ábrán látható.



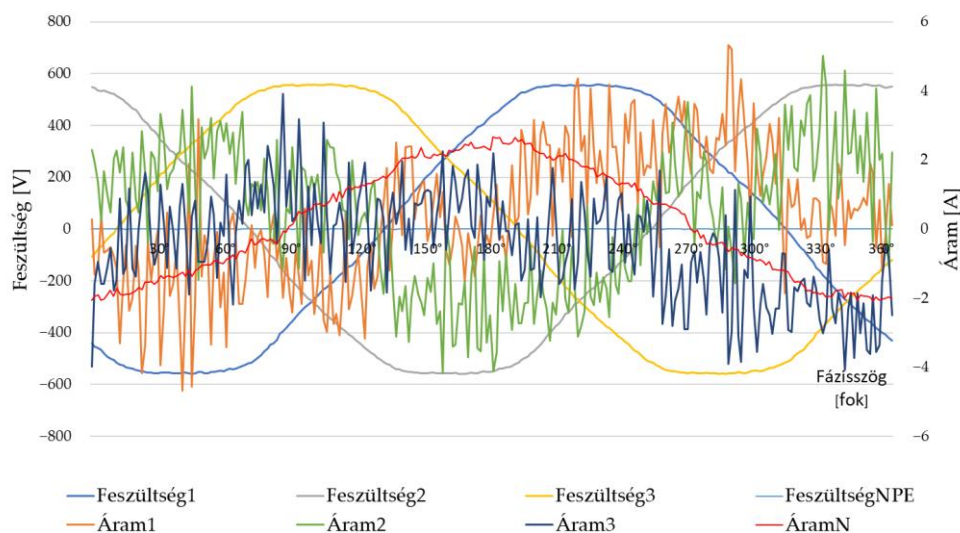
10. ábra: A próbapad kis terhelése esetén a TopView kiértékelő szoftver által szolgáltatott feszültség, áram, THD és teljesítményező értékek.

3.3. Ipari robot beépített aktív harmonikus szűrőjének validálása

Jelenleg szinte nincs olyan ipari létesítmény, ahol ne használnának robotokat, robotcellákat és kobotokat különböző gyártási eljárásokhoz. Sokféle alkalmazásuk során igen jelentős áramfogyasztóknak számítanak különösen, ha figyelembe vesszük a közvetlenül hozzájuk kapcsolódó egyéb automatizált berendezéseket, például a robotcellákat vagy a megmunkálóközpontokat. Mivel elmondható, hogy az ilyen eszközök nagymértékben automatizáltak, vezérlő és szabályozó elektronikájuk rendkívül érzékeny lehet az elektromos hálózat zavaraira és az esetleges feszültség letörésekre. Ebben a fejezetben egy ilyen ipari robot harmonikus injektálásának nagyságát és a beépített aktív harmonikus szűrő hatékonyságát vizsgáljuk a robot kis és teljes terhelésű állapotában.

3.3.1. Ipari robot kis terhelésen üzemelve

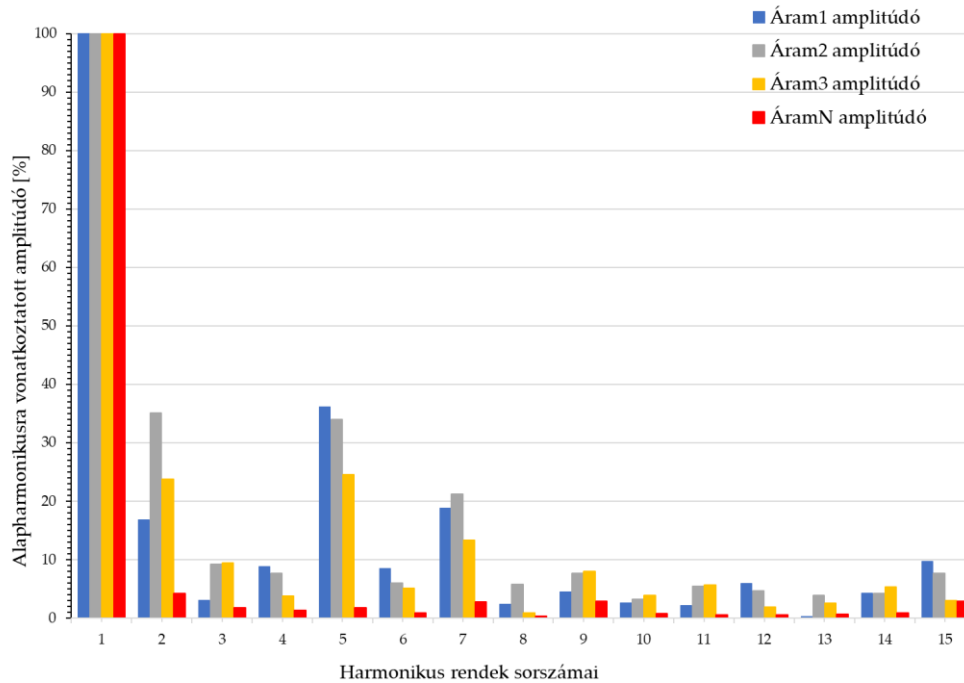
A 11. ábra a mért feszültség-áram hullámformákat mutatja. Mivel az egyes fázisok áramainak nagysága és ezeknek az áramoknak a teljes harmonikus torzítása közel azonos volt, ezért csak a 2. fázisáramot elemeztük. A feszültségcsinusz szinte torzításmentes, de az áramcsinusz nem ismerhető fel. A mért áram fázisonként 1,6 A és 2 A között változik, tehát szimmetrikusnak tekinthető. A 11. ábrán látható, hogy az áramok szinuszos hullámformái nagyon torzultak, a 2. fázisáram esetében THD érték 59,42% volt. Az IEEE 519-2022 szabvány szerinti THD javasolt maximális megengedett értékét a TDD adja meg, amely az I_{SC} közös csatlakozási pont (PCC) zárlati áramának és a készülék I_L terhelési áramának arányától függ, ahogyan azt korábban is bemutattuk. Ez az arány most $630 \text{ A} / 2 \text{ A} = 315$, ezért a 1. táblázat szerinti megengedett torzítás csak 15% lehetne, tehát a különbség több mint háromszoros, azaz 44,42%.



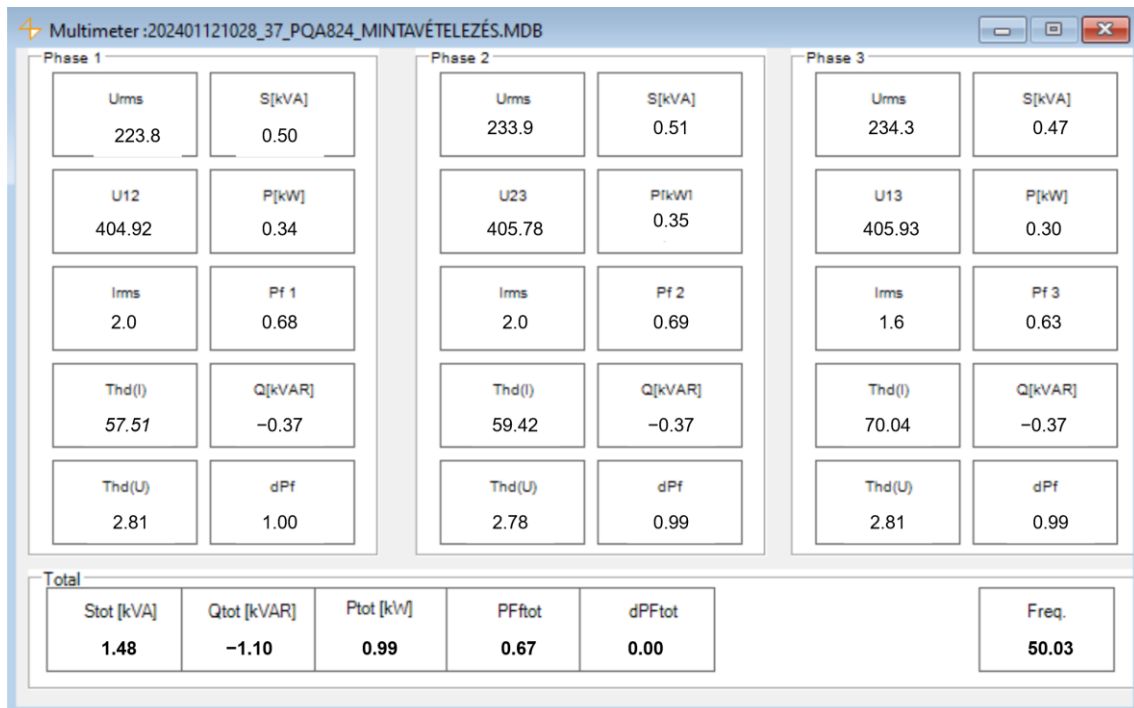
11. ábra: Ipari robot kis terhelésnél mért torzított áram- és feszültség hullámformák.

A 12. ábra a mérés frekvenciaspektrumát mutatja, azaz a felharmonikusok amplitúdóinak nagyságát az alapharmonikuséhoz viszonyítva. A mérésekből megállapítható, hogy a 1. táblázat szerint ajánlott 12% helyett a 11. harmonikusig a 2. áram esetében a teljes harmonikus áramtorzulás (THD) 33,96%, 21,16% és 7,63% volt az 5., 7. és 9. harmonikusok esetében. Az ajánlott 4,5% helyett a 11. harmonikustól a 17. harmonikusig 5,42%, 5,9%, a 15. harmonikusnál

pedig 7,68% volt. Az ezektől magasabb harmonikus rendek esetében ezek nagysága már elhanyagolható volt, ezért nem szerepelnek az elemzésben. A hálózatanalizátor által szolgáltatott mért adatok (feszültség, áram, THD és reaktív teljesítmény) a 13. ábrán láthatóak.



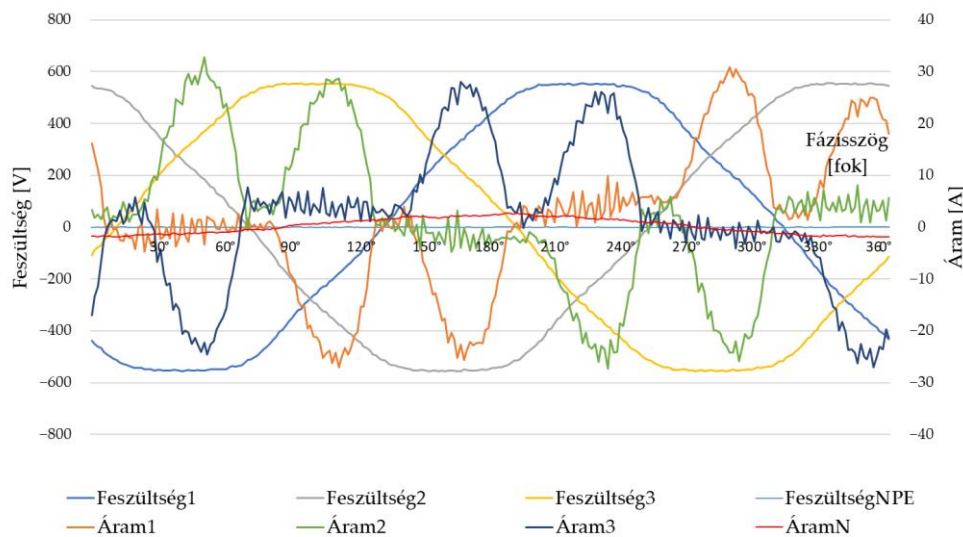
12. ábra: Ipari robot kis terhelésén mért torzított áramhullámformák harmonikus áramamplitúdó összetevői.



13. ábra: Az ipari robot kis terhelése esetén a TopView kiértékelő szoftver által szolgáltatott feszültség, áram, THD és teljesítménytényező értékek.

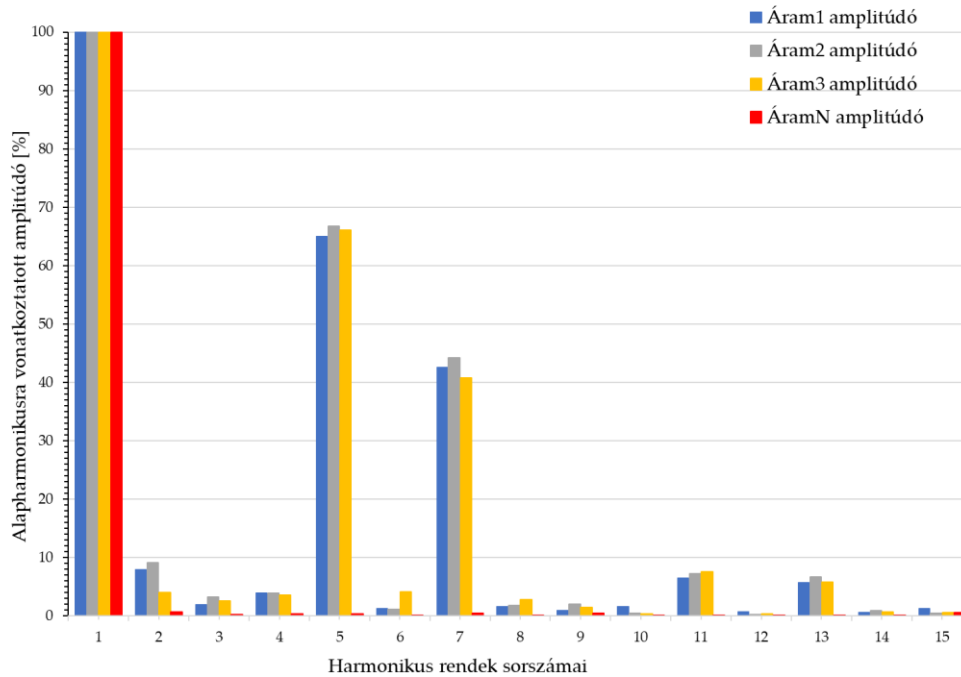
3.3.2. Ipari robot teljes terhelésen üzemelve

A kutatás során a méréseket teljes kiterhelés mellett is elvégeztük. Hiszen minél több robot-tengely működik egyszerre, annál nagyobb az azokat működtető meghajtókártyák egyidejű villamosenergia fogyasztása. Ez jelenti tehát a legjobb lehetőséget a villamos jelek legnagyobb torzításának és a hálózatba injektált felharmonikusoknak analizálására. A mért feszültség- és áramhullámformákat a 14. ábra szemlélteti. Megállapítható, hogy a feszültség szinuszhulláma enyhén, míg az áram szinuszhulláma már jelentősen torzított, az áram szinuszhullámainak alakja mutatja a nemlineáris áramfelvételt hálózathoz. Az áram iránya egy perióduson belül nem egyszer, hanem négyszer is változik, ha megnézzük az egy perióduson belüli jelentős számú nullaátmenetek számát, akkor egyértelmű, hogy ezt nemcsak a robot, hanem a robotcellák be rendezései esetében is figyelembe kell venni a kapcsolóüzemű tápegységek tervezésekor, azok hibás működésének megakadályozása miatt.



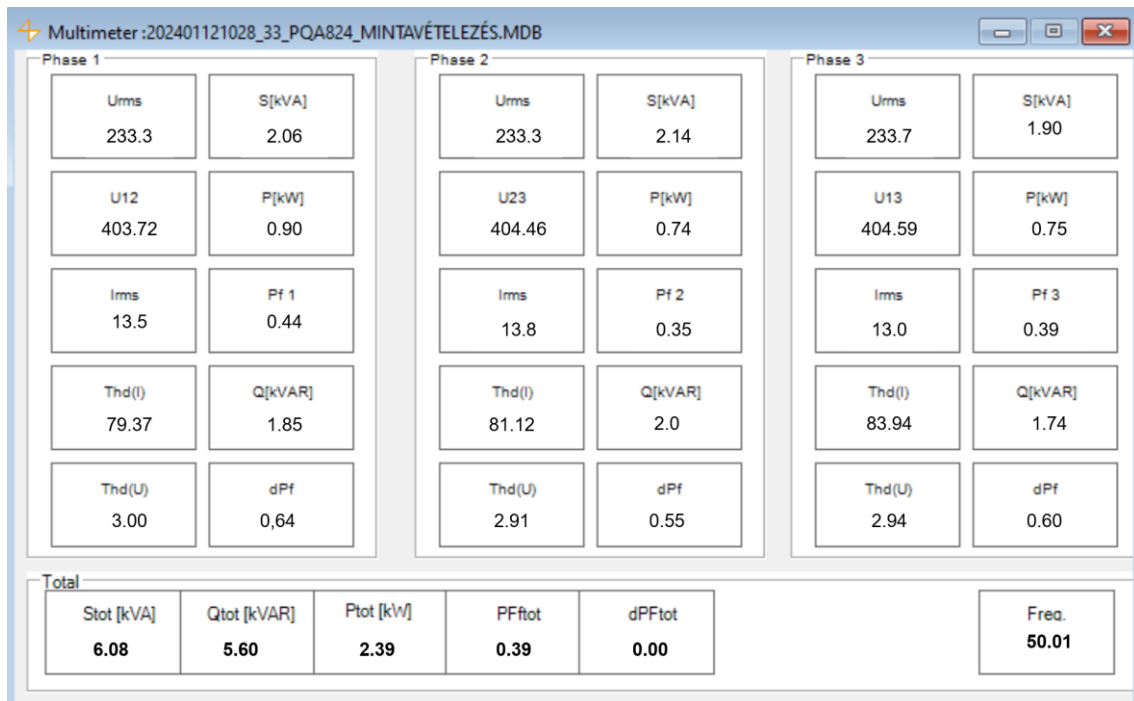
14. ábra: Ipari robot kiterhelt állapotában mért torzított áram- és feszültség hullámformák.

A 15. ábra az aktuális spektrumot mutatja. A robotcella közös villamos csatlakozási pontján (PCC) mért teljes áram harmonikus torzítása a 3. fázisáram esetében 83,94% volt. Ebben az esetben is az áram teljes harmonikus torzításának megengedett maximális értékét a TDD adja meg. A közös elektromos hálózati csatlakozási pont (PCC) rövidzárlati árama I_{sc} 800 A, a robotcella terhelési árama I_L pedig 8,3 A. Az arány $800 \text{ A} / 8,3 \text{ A} = 96,37$. Az IEEE 519-2022 szabvány által ajánlott maximálisan megengedett teljes áramigény harmonikus torzítás (TDD) 12%. Ezért a THD = 83,94% a megengedett érték hétszerese. A 96,37-as arányszám alapján a megengedett teljes harmonikus áramtorzítás a 2-11. harmonikusok esetében 10%, míg a 11-17. harmonikusok esetében 4,5% lehetne. Ezeket a határértékeket minden páratlan felharmonikus többszörösen túllépi. Az 5. harmonikus (250 Hz) értéke 66,06%, a 7. harmonikusé (350 Hz) 40,74%, a 11. harmonikusé (550 Hz) pedig 7,61%.



15. ábra: Ipari robot teljes terhelésén mért torzított áramhullámformák harmonikus áramamplitúdó összetevői.

A TopView szoftver által biztosított, az analízator mérési eredményeit megjelenítő táblázat a 16. ábrán látható.



16. ábra: Ipari robot kiterhelt állapotában a TopView kiértékelő szoftver által szolgáltatott feszültség, áram, THD és teljesítménytényező értékek.

4. KÖVETKEZTETÉSEK

A méréseket három különböző eszközön végeztük el: egy LED-lámpán, egy próbapadon és egy ipari roboton. A megfelelő validáláshoz az utóbbi két esetben kicsi és teljes terhelési állapotban egyaránt vizsgálatra került a harmonikus injektációjuk nagysága. A mért teljes harmonikus áramtorzítás (THD) értékek az IEEE 519-2022 szabvány ajánlásával került összevetésre. A mérési eredmények alapján az alábbi következtetéseket vonhatjuk le. Egyetlen LED-lámpa esetében az áram teljes harmonikus torzítása 15,20% volt, míg a megengedett torzítás csak 5%, tehát a különbség több mint háromszoros (hasonló eredményeket kaptunk két lámpatest esetében is). A próbapad esetében kis terhelésnél a THD értéke 139,21% volt, ami több mint tizenegyszerese a megengedett 12%-os értéknek. Amikor azonban a próbapad teljes terhelésen üzemelt, a harmonikus torzítása fázisonként 4,24%, 3,37% és 4,35% THD volt, ami még az IEEE 512-2022 szabvány szerinti legszigorúbb követelményeknek (5%) is megfelel. Egy kiterhelt ipari robot esetében a THD érték 90% volt, ami több mint tízszerese a megengedett 8%-nak. Összességében megállapítható, hogy a LED-lámpa beépített passzív szűrő, míg a tesztpad és a robot mérésekor az aktív harmonikus szűrők hatékonysága nem minden alkalommal volt megfelelő. Az aktív szűrők méretezésénél ezekben az esetekben a tervezők nem vették figyelembe a gépek változó kiterhelését, ami a sorozatgyártásban is jelentős lehet a termelési átmenetek és a géphibák miatt. A megoldás egy olyan aktív harmonikus szűrő beépítése lenne, amely egyformán jól teljesít mind az alacsony mind a magas áramfelvételű esetekben. A mérési eredmények alapján megállapítható, hogy a vizsgált ipari robot beépített aktív harmonikus szűrője mind kis, mind teljes terhelésnél teljesen hatástalan volt. A szűrők hatékonysága a tesztpad esetében is vizsgálatra került és az eredmény megegyezik a robotéval, a szűrő kis terhelő áramok esetében teljesen hatástalan volt.

Mint látható, a megengedett harmonikus torzítás [12] az elektromos csatlakozási pont rövidzárlati áramának PCC értékétől függ, de ez géptelepítési helyenként eltérő. Ezért az ipari létesítményekben, ahol a hálózatokban kisebb rövidzárlati áramok vannak, ugyanaz a felharmonikus injektáció sokkal nagyobb hatással lesz a villamos energia minőségére. A jövőben megvizsgálásra kerül az áramfelharmonikusok felhasználásának lehetőségei a prediktív karbantartás, a gépi tanulás és az anomáliák észlelése terén.

5. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] AKTIF: *Problems Caused By Harmonics In Electrical Plants*. 2021. <https://aktif.net/en/problems-caused-by-harmonics-in-electrical-plants/> (2024.02.09.)
- [2] PENG, F.Z.: *Harmonic sources and filtering approaches*. IEEE Ind. Appl. Mag. 7, 18–25. 2001.
- [3] CARAMIA, P., CARPINELLI, G., ROSSI, F., VERDE, P.: Probabilistic iterative harmonic analysis of power systems. IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib. 141, 329–338. 1994.
- [4] MEDINA, A., SEGUNDO, J., RIBEIRO, P., XU, W., LIAN, K.L., CHANG, G.W., WATSON, N.R.: *Harmonic analysis in frequency and time domain*. IEEE Trans. Power Deliv. 28, 1813–1821. 2013.
- [5] GRADY, W.M., SAMOTYI, M.J., NOYOLA, A.H.: *Minimizing network harmonic voltage distortion with an active power line conditioner*. IEEE Trans. Power Deliv. 6, 1690–1697. 1991.
- [6] KETABI, A., FARSHADNIA, M., MALEKPOUR, M., FEUILLET, R.: *A new control strategy for active power line conditioner (APLC) using adaptive notch filter*. Int. J. Electr. Power Energy Syst. 47, 31–40. 2013.

- [7] HT ITALIA. elérhető online: <https://www.ht-instruments.com/en/> (2024. augusztus 2.)
- [8] HT ITALIA: TOPVIEW. elérhető online: <https://ht-instruments.de/produkt/topview/> (2024. augusztus 2.).
- [9] KARIM, F.A., RAMDHANI, M., KURNIAWAN, E.: *Low pass filter installation for reducing harmonic current emissions from LED lamps based on EMC standard*. In Proceedings of the International Conference on Control, Electronics, Renewable Energy and Communications, Bandung, Indonesia, 13–15. pp. 132–135. 2016.
- [10] CALVAS, L.: *Electrical disturbances in LV*. 1st ed.; Cahier Technique No. 141; Schneider Electric: Claix, France, 2000. Available online: https://www.tekdok.dk/files/cahiers_techniques/Electrical_disturbances_in_LV.pdf (2024. augusztus 2.)
- [11] LAKERVI, E., HOLMES, E.J.: *Electricity Distribution Network Design*. 2nd ed.; Peter Peregrinus LTD, Institution of Engineering and Technology: London, UK. 2003.
- [12] WU, J.-C., JOU, H.-L., HSAIO, H.-H., XIAO, S.-T.: *A new hybrid power conditioner for suppressing harmonics and neutral-line current in three-phase four-wire distribution power systems*. IEEE Trans. Power Deliv. 29, 1525–1532. 2014.

A VILLAMOS SZIMULÁCIÓ ÉS MODELLEZÉS TANTÁRGY HELYE A VILLAMOSMÉRNÖKI MSC KÉPZÉSBEN

THE ELECTRICAL SIMULATION AND MODELLING SUBJECT IN MSC PROGRAM OF ELECTRICAL ENGINEERING

KOZSELY Gábor

Ph.D, egyetemi adjunktus, gabor.kozsely2@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem neve, Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék,
3515 Miskolc-Egyetemváros, Egyetem út 1.

Kivonat: A cikk röviden bemutatja, a villamos modellezés és szimuláció szerepét a műszaki tudományban. Továbbá az ezen a néven futó tantárgy helyét és szerepét a Miskolci Egyetem villamos mérnök mesterképzésében. Ismerteti a képzésen belüli tantárgyi kapcsolatokat, a szükséges priori ismeretanyagot.

Kulcsszavak: Modellezés és szimuláció, modellalkotás, mikroszkopikus és mikroszkopikus modellezés

Abstract: This paper briefly describes the role of electrical modelling and simulation in engineering. It also discusses the place and role of this subject in the Master's programme in Electrical Engineering at the University of Miskolc. It describes the links between the subjects within the course and the required prior knowledge.

Keywords: Modelling and simulation, modelling, microscopic and microscopic modelling

1. A MODELLEZÉS ÉS SZIMULÁCIÓ HELYE A MŰSZAKI TUDOMÁNYBAN

Egyszerűen fogalmazva, a modellezés a modell elkészítésének folyamata, a szimuláció pedig a modell használatának folyamata.

Az oktatásban és a kutatásban nagyon sok jó tapasztalat gyűlt össze a kísérletezés, a személyes élmény megszerzésének hasznosságáról. Azonban számos olyan kutatási terület van, ahol ez nem lehetséges, a kísérlet nem végezhető el. Erre ad néhány példát az alábbi felsorolás:

- túl veszélyes: Nem célszerű atombombával, erősen mérgező anyagokkal kísérletezni Amerikának ezután közel egy évtizedébe került, hogy a kísérleti atomrobbantásait a föld alá költöztesse. Kérdés, ha akkoriban létezett volna már olyan tudásbázis, technológia, mint amivel kísérleti atomrobbantás lehetséges kimenetelét kiszámolták, felrobbantják-e a bombákat. Az USA 1992 óta számítógéppel szimulálja a kifejlesztett atombombák várható hatását.
- túl drága: a kísérlet eszköz és humán erőforrás költségei jelentősen meghaladják, egyrészt az eredményből adódó hasznot, másrészt a szimuláció költségei, beleértve a jogtisztaszoftverét is.
- túl gyors: A robbanások, gyors láncreakciók szabad szemmel gyakorlatilag megfigyelhetetlenek.
- túl lassú: a genetikai folyamatok vizsgálata több generációt ölel fel.
- túl kicsi: Az atomok, molekulák szabad szemmel nem vizsgálhatók, illetve a hagyományos fény, illetve elektronmikroszkóppal sem (TEM, SEM).
- túl nagy: Csillagászati problémák vizsgálata.
- túl bonyolult: Az emberi viselkedés vizsgálata, sok feltételt kell kézben tartani.
- nehezen (vagy egyáltalán nem) állíthatók be a feltételei: Nem mindig tudunk nagyon magas, illetve nagyon alacsony hőmérsékletet, vagy nagyon nagy vákuumot stb. előállítani.
- a környezeti határok elnyomják a „tisztá” feltételeket: A kémiai reakciók vizsgálatánál nagyon gyakran okoz hibajelenséget az, hogy a vizsgálni kívánt anyagaink nem eléggé tiszták, sok bennük a szennyeződés.

- nincs hozzá eszköz: Az intézetben nem lehet mindenféle olyan eszközt tárolni, amelyre csak nagyon ritkán lenne szükség, így ezeket valami mással kell helyettesíteni.
- etikai akadályai vannak: Általában nem megengedettek az emberek végzett kísérletek, pedig például egy-egy gyógyszert így lehetne a leghatékonyabban és leggyorsabban kipróbálni.

1.1. Modellalkotás

A modellalkotás a tudományos gondolkodásmód alapját jelenti, amely minden tudományterületen jelentős szerepe játszik. Segítségével magyarázatot lehet kapni arra, ami a múltban történt, vagy most történik, illetve történni fog, azaz megkísérli megjósolni a jövőt. A közgazdászok például szeretnék megérteni és előre látni a gazdasági fellendülések és hanyatlások ingadozásait, a beruházások hatásait stb. A politológusok a modelljük alapján arra keresik a választ, hogy adott politika vagy politikai párt népszerűsége hogyan fog alakulni a jövőben. A meteorológusok a hosszútávú éghajlatváltozásokat tanulmányozzák. Több tudományágat érintő probléma a világ nyersanyag- és energiahordozó-készleteinek felmérése, kiváltásukra irányuló alternatívák kutatása, újrahasznosítás kérdése. A mérnöki munka pedig a legkülönbözőbb problémákat veti fel, még az adott tudományterületen belül is. [1, 2, 3]

A rendszer és a modellezés fogalma szorosan összefügg. Első közelítésben a rendszer egy fizikai objektum valamilyen modellje, amelynek segítségével modellezhetjük, matematikailag leírhatjuk annak működését. A szakirodalmak a rendszer fogalmát az alábbi tulajdonságok megléte alapján definiálják: [4; 5; 6]

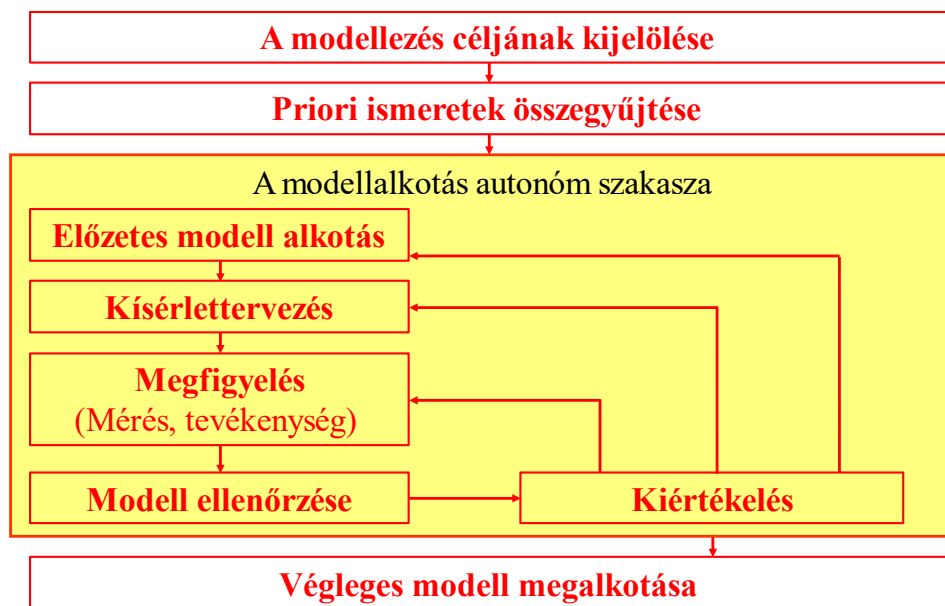
- Az anyagi világ vizsgálatunk tárgyát képező része, amely egymással valamilyen kölcsönhatásban lévő elemek összessége.
- A rendszer állapota, illetve a benne lejátszódó folyamat, illetve folyamatok a be- és a kimenő, valamint a belső jellemzőkkel írható le.
- A környezet kölcsönhatásban lehet a rendszerrel és ez meghatározza a rendszer működésének peremfeltételeit.

Az egyes problémák még ha azonos típusúak is, bizonyos tényezőkben például a kezdeti feltételekben különböznek egymástól, és ez a tény jelentősen befolyásolja a megoldást. Az elméleti szakemberek az új probléma kezelésére egy egyszerű módszert dolgoztak ki. Ahelyett, hogy megoldanánk a kérdéses feladatot, megoldásként valamely más feladat ismert megoldását vesszük alapul kis változtatásokkal. Ezt az eljárást modellalkotásnak nevezzük. Sikere attól függ, hogy hogy megfelelő modellt választottunk-e. Jó példa erre az egyszerű lineáris harmonikus oszcillátor, azaz egy részecske, amelyre olyan visszahúzó erő hat, amely arányos a részecske egyensúlyi helyzetéből való kitérésével, az ilyen rendszer egzakt megoldását ismerjük. Ezt a rendszert a fizikusok meglehetősen nagy sikerrel használják modellként olyan különböző jelenségek magyarázatára, mint a kristály fajhője, a fény diszperziója közegben, vagy az elektromágneses sugárzás emissziója. [1; 7]

A modell megalkotásához vagy kiválasztásához mindenekelőtt meg kell érteniük a vizsgált rendszer fizikáját. Érdekes általában a lehető legegyszerűbb fizikai modelltől kiindulni. Ilyenkor a geometriát a lehető legkényelmesebbre választjuk, kihasználjuk a szimmetriákat, a kevésbé jelentős tényezőket elhanyagoljuk, és a lassan változó tényezőket állandónak tekintjük. Ezeknek az egyszerűsítéseknek az ellenmondásmentességét gyakran ellenőrizni, ja a legegyszerűbb modellt már megoldottuk. A nehézséget az fogja jelenteni, ha az eredeti probléma analitikus nem oldható meg. [1; 7]

Ha a probléma kezelésére az általunk megfelelőnek ítélt modellt választottuk, akkor ezután a megoldáshoz szükséges matematikai apparátust is kell kidolgozni, fel kell állítani azokat az egyenleteket, amelyek a kísérletileg megfigyelhető mennyiségeket tartalmazzák. Ezekben az

egyenletekben általában van néhány olyan paraméter, amelyeknek az értékei kísérletekből származnak. Az illeszthető paraméterek miatt a modell pontosságát nem bizonyítja az, ha a modell által jóslt eredmények megegyeznek a kísérletekkel. Ez azt is jelenti, hogy a teljesen eltérő modellek, amelyek mindegyike a saját paramétereit tartalmazza, a fizikai rendszernek azonosan elfogadható leírását adják. Ekkor részletesebben meg kell vizsgálni a rendszert, hogy olyan sajátosságokat találjunk (hőmérséklet-, és/vagy nyomásfüggés, esetlegesen a különböző terek és/vagy hőmérséklet gradiens összetett hatása), amelyek a különböző modellek esetében különböző eredményeket jósolnak. Ekkor viszont már nem a megfigyelt eredményeket próbáljuk megmagyarázni, hanem újabb kísérleteket tervezünk, illetve további mérési módszerekkel vizsgáljuk az adott fizikai rendszert. A modellezés folyamatát mutatja be az 1. ábra [1; 7]



1. ábra: A modellkészítés folyamata [8]

1.2. Makroszkopikus és mikroszkopikus modellezés

A tudományos gondolkodásmódban két alapvető megközelítést alkalmaznak és ezek különböző modelltípusokra vezetnek. Az egyik megközelítés, amelyet makroszkopikus vagy fenomenologikus, a másik megközelítés a mikroszkopikusnak nevezünk.

A makroszkopikus vagy fenomenologikus közelítés olyan jelenségek leírására használatosak, amelyek karakterisztikus méretei nagyok. Ekkor az atomok, vagy részecskék közötti kölcsönhatások részleteit elhanyagoljuk. Ebben a megközelítésben bizonyos átlagolási eljárásokat alkalmazunk azért, hogy a kölcsönhatásokat figyelembe vegyünk. Például a töltött részecskék mechanikai mozgásegyenleteinek átlaga az elektrodinamikához vezet. [1]

A mikroszkopikus megközelítés mechanikai és statisztikus megfontolásokat foglal magába. A mechanika lehet klasszikus, ha testek lassú mozgását vizsgáljuk, lehet továbbá relativisztikus, ha a testek a fénysebességhez közeli sebességgel mozognak, vagy lehet a kvantummechanika, ha a rendszer mérete atomi vagy szubatomi. Mindezekben az esetekben a mechanika fő célja az, hogy a fizikai rendszerek energiáját és egyéb fizikai jellemzőit különböző időpontokban meghatározzuk. Az ilyen problémák megoldásaiból nyert eredményekből azután a statisztikus fizika alkalmazásával megkaphatjuk a rendszerek viselkedését különböző hőmérsékleten. [1]

A műszaki rendszerekre ható tényezők elvben „végtelen” nagy száma és a rendszeren belüli

összetett kölcsönhatások miatt többnyire „zárt rendszerek” vizsgálatára szorítkozunk. Az úgynevezett zárt rendszer határainak kijelölése komoly tárgyi tudást és igen nagy szakmai tapasztalatot feltételez.

2. VILLAMOS MODELLEZÉS ÉS SZIMULÁCIÓ TÁRGY A MESTERKÉPZÉSBEN

A tantárgy mottójául Galileo Galilei (1542–1608) *Il Saggiatore* című munkájából vett idézetet is választhatnám: „A filozófia nagykönyve, az univerzum, szüntelenül nyitva áll tekintetünk előtt, de nem érthetjük meg, hacsak előbb meg nem tanuljuk a nyelvet, amelyben íródott. Ez a matematika nyelve és írásjelei a háromszögek, körök és más geometriai alakzatok, amelyek nélkül emberileg képtelenség egyetlen szót is felfognunk belőle; e nélkül, akár, ha sötét útvesztőben kóborolnánk.” Ezt röviden úgy is szokták idézni, hogy „A természet nagy könyve a matematika nyelvén íródott.”

A tárgy tematikus leírásában a következő szerepel: Villamos gépek és készülékek áramkörü modelljei. Az áramkörök átmeneti jelenségeinek matematikai leírása differenciálegyenletek segítségével. Tranziens folyamatok számolása a Laplace-transzformáció alkalmazásával. Áramkör szimulációs programok használata az időbeni folyamatok tanulmányozására: PSpice, PSCAD. A villamos forgógépek kinematikája és dinamikája. A kinematikai és dinamikai egyenletek matematikai leírása differenciálegyenletek segítségével. Számítógépes szimulációs programcsomag használata általános differenciál egyenletrendszerek megoldására. A villamos hajtások szabályozástechnikai tömbvázlata. Simulink programcsomag alkalmazása villamos gépek és készülékek dinamikai modelljének elkészítésére. Esettanulmányok: behúzó tekercs, indító motor, gépkocsi generátor.

A tantárgy jellegéből adódóan erősen épít a BSc képzés természettudományi alapozó tantárgyaira (Algebra, Analízis, Numerikus módszerek, Fizika) Továbbá jelentős szerepet kapnak a Villamosságtan III. (GEVEE503B) tárgyban megszerzett ismeretek, különösen az operátoros impedanciák fogalma, a Laplace transzformáció alkalmazása nem energiamentes kezdőállapot esetén, valamint a bekapcsolás jelenség, a kikapcsolás jelenség és az átkapcsolási jelenség. A villamosmérnöki mesterképzésen szereplő tárgyak közül az Elektrodinamika (GEFIT007M), Differenciálegyenletek (GEMAN500M) és a Jelek és rendszerek elmélete (GEVAU220-M) tárgyakhoz kapcsolódik erősen. A teljesség igénye nélkül néhány fontosabb téma, amelyre a tárgy építkezik: A Maxwell egyenletek integrális és differenciális alakja Tranziens jelenségek RL és RC körökben. Általános huroktörvény. Homogén lineáris differenciálegyenletrendszerek, sajátértékek és sajátvektorok. Linearizálás, stabilitás. Folytonos és diszkrét idejű rendszerek analízise az idő, a frekvencia és a komplex frekvenciatartományban, rezgésmérés, rezgésjelek elemzése.

Az Elektrodinamika tárgy ugyanúgy az őszi szemeszterben van, mint a Villamos Modellezés és Szimuláció tantárgy, az utóbbi kettő pedig a tavaszi szemeszterben kerül meghirdetésre. Azok a mesterképzéses villamosmérnök hallgatók, akik a tavaszi félévben kezdik meg a tanulmányaikat logikailag helyes sorrendben tanulják a tárgyakat, azaz elméletileg rendelkeznek a szükséges „előzetes” ismeretekkel. A villamosmérnök mesterképzésre a nappali tagozaton ez a jellemző, a levelező tagozaton viszont körülbelül ugyanannyi a tavaszi és őszi félévben kezdő hallgató van. A levelező tagozatos hallgatók esetében szintén hátrányt jelenthet, hogy kontakt órák konzultáció formájában valósul meg, 4 alkalommal, alkalmanként 5 órába tömbösítve. Ezeket a körülményeket is figyelembe kell venni a tantárgy eredményes oktatásának érdekében. Szükség esetén az előzetes ismereteket felelevenítve, szükség esetén röviden, a lényegét elmondva (újra)tanítva. Ezeket a körülményeket is figyelembe véve lett kialakítva a Villamos modellezés és szimuláció tárgy tematikája. A tantárgy heti ütemtervét a nappali tagozatos hallgatók részére az 1. táblázatban mutatom be.

1. táblázat: A tantárgy heti ütemterve nappali tagozat hallgatók részére

Hét	Előadás	Gyakorlat
1.	Tantárgy feltételrendszerének ismertetése. Szakirodalom bemutatás	Bevezetés a tantárgy alapjaiba.
2.	Rendszer- és paraméter-identifikáció	A modellezés matematikai alapjainak áttekintése. Differenciálegyenletek analitikus megoldása.
3.	Villamos és mechanikai paraméterek analógiája.	Differenciálegyenletek analitikus és numerikus megoldása.
4.	Rezgő áramkör matematikai modellezése és tárgyalása Laplace-transzformációval.	Numerikus módszerek alkalmazása a differenciálegyenletek számítógépes megoldására.
5.	Soros RLC áramkör tárgyalása a matematikai modell alapján és tömbvázlata. Időállandók.	Műveleti erősítős modellek. harmonikus rezgés differenciál egyenletének műveleti erősítős megvalósítása.
6.	LC áramkör és külső gerjesztésű egyenáramú motor analógiája.	Külső gerjesztésű egyenáramú motor matematikai modellje és tömbvázlata. Időállandók.
7.	1. zárthelyi dolgozat	Az 1. zárthelyi dolgozat feladatainak megbeszélése.
8.	Terhelő gépek nyomatékának matematikai modellezése.	Az egyéni feladathoz szükséges mérések elvégzése.
9.	Soft computing módszerek: fuzzy-logika	Neurális hálózatok, neuro-fuzzy
10.	Villamosan forgó mágneses mező matematikai leírása	Végeselem modellezés alkalmazása a mágneses tér szimulációjához.
11.	Aszinkron motor villamos modellje.	Aszinkron gép nyomatéka vektoriálisan. Tömbvázlat
12.	Szinkrongép matematikai modellje. Tömbvázlat	Szinkrongép matematikai modellje. Tömbvázlat
13.	2. zárthelyi	A 2. zárthelyi dolgozat feladatainak megbeszélése.
14.	1. és 2. pótzárthelyi	Egyéni beadandó feladat értékelése.

3. ÖSSZEFOGLALÁS

A Villamos modellezés és szimuláció tárgyat folyamatosan fejleszttem. A fejlesztésnek tulajdonképpen egy háromoldalú elvárásnak kell megfelelnie. Egyrészt tükröznie kell a tudományterület jelenlegi állását, másrészt gyakorlatiasnak kell lennie, felhasználva a témában született szakdolgozatok, diplomamunkák, esetlegesen doktori disszertációk eredményeit és tapasztalatait. Nem utolsósorban, figyelemmel kell lenni a hallgatók igényeire, a tantárggyal szemben támasztott elvárásaikra. Véleményem szerint ez utóbbi a legnehezebb feladat.

4. FELHASZNÁLT IRODALOM

GITTERMAN, M., HALPERN, V.: Fizikai problémák kvalitatív elemzése. Műszaki könyvkiadó, Budapest 1985

- RACZYNSKI, S.: Models for Research and Understanding Exploring Dynamic Systems, Unconventional Approaches, and Applications. Springer 2022
- SEROVAJSKY, S.: Mathematical Modelling. Taylor & Francis Group, LLC 2022
- KUCZMANN M.: Jelek és rendszerek. Universitas Győr Kht. Győr 2005
- FODOR GY.: Jelek és rendszerek. Műegyetemi Kiadó, Budapest 2006
- POKORÁDI L.: Rendszerek és folyamatok modellezése. Campus Kiadó, Debrecen 2008
- FÉNYES I. (SZERK): Modern fizikai kisenciklopédia. Gondolat könyvkiadó, Budapest 1971
- HUBA A, LIPOVSZKI GY.: Méréselmélet 2014.
<https://mogi.bme.hu/TAMOP/mereselmélet/ch05.html>

A VILLAMOS ÉS MECHANIKAI RENDSZEREK KÖZÖTTI ANALÓGIA OKTATÁSÁNAK MÓDSZERTANA

METHODOLOGY FOR TEACHING THE ANALOGY BETWEEN ELECTRICAL AND MECHANICAL SYSTEMS

KOZSELY Gábor

Ph.D, egyetemi adjunktus, gabor.kozsely2@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem neve, Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék,
3515 Miskolc-Egyetemváros, Egyetem út 1.

Kivonat: Az analógiáknak nagy szerepe van a tudományos gondolkodásmódban. A villamos és mechanikai rendszerek közötti analógiák jól ismertek. A cikk röviden azt ismerteti, hogy ezt az analógiát, hogyan lehet megismertetni villamos LC kör és mechanikai rúgó-tömeg rendszer segítségével. Mindkét rendszer a harmonikus rezgőmozgás differenciálegyenletével írható le, és a benne szereplő paraméterek között analógia tapasztalható. Továbbá a villamos és a mechanikai rendszerek alapvető összefüggései közötti hasonlóság bemutatásán túl, a törvényszerűségek közötti analógiákat is ismerteti a cikk.

Kulcsszavak: villamos és mechanikai analógiák, LC-kör, rúgó-tömeg rendszer

Abstract: Analogies have a major role in the scientific methods. The analogies between electrical and mechanical systems are well known. This paper briefly describes how this analogy can be illustrated using an electric LC circle and a mechanical spring-mass system. Both systems can be described by the differential equation of harmonic oscillatory motion, and an analogy is observed between the parameters involved. Furthermore, in addition to describing the similarity between the fundamental relations between electrical and mechanical systems, the paper also presents the analogies between the laws.

Keywords: electrical and mechanical analogies, modelling, LC-circuit, spring-mass system

1. AZ ANALÓGIÁK SZEREPE A MŰSZAKI TUDOMÁNYBAN

Az eredeti görög αναλογος kifejezés számok közötti viszonyt, összemérhetőséget, arányt jelentett. Eukleidész ötödik könyve a viszonyok hasonlóságaként értelmezi. Az emberi gondolkodás alapvetően analógiákra épít. Minden, az egyén számára új jelenséget már ismert kognitív struktúrákkal való analógia alapján ragad meg. Két rendszer analóg, ha megfelelő részeik világosan megfogalmazható kapcsolataikban megegyeznek. Az analógiák előfordulnak a mindennapi gondolkodásban, a gondolkodás és a magyarázat eszközei, segítik a problémamegoldást, az új helyzet megértését a tanulásban és a tudományos felfedezésekben. [1; 2; 3]

Ez az a gondolkodásforma, amely a legjobban áthatja a megismerés más területeit, segíti a megértést, a fogalomelsajátítást és a problémamegoldást. A tudományban analógiát használunk akkor, amikor új hipotéziseket alkotunk, és amikor új tudományos közléseket vitatunk meg. Az analógiáknak nagy szerepe volt több fizikai jellegű felismerés létrejöttében. [1; 2]

A modellek is az analógia egy fajtájának tekinthetők. A tudományos modell szimulálja a vizsgált rendszer viselkedését. A modell és a modellezett rendszer működésbeli azonossága egyszerűsítéseken, hasonlóságokon alapszik, és a modellezett bonyolult rendszer magyarázatára, valamint működésének kiszámítására, viselkedésének leírására, a folyamatok előrejelzésére használjuk. A tudományos elméletek lényegüket illetően mindig ilyen modellek. [3; 4; 5, 6]

Például az elektromos és a hőtani jelenségek megértése a XIX század elején kezdődött el. Mindkét esetben valamilyen áramló fluidumot képzeltek el hozzá. Ennek az elképzelésnek a maradványa az, hogy mind a töltés, mind pedig a hő jelölésére azonos, a Q betűt használjuk napjainkban is. [2]

A természettudományok legtipikusabb összefüggései valamely mennyiséget egy másik mennyiség differenciálhányadosával kapcsolnak össze, a független változó többnyire az idő. Az elektromos és a mechanikai jelenségek hasonló tulajdonságokat mutatnak. Nemcsak a tömeges és rugók alkotnak lineáris rendszereket, amelyeket lineáris differenciálegyenletekkel lehet leírni, hanem a lineáris áramköröknek nevezett elektromos rendszerek is, amelyek teljesen analógok a mechanikai rendszerekkel. [7]

A szakirodalomban az analógia igazolását RLC körrel, illetve az ennek mechanikai megfelelőjeként rugót, illetve hozzácsatolt lengéscsillapítót csatolnak a tömeghez. Ezek a modellek a csillapított rezgőmozgás egyenletét kapjuk meg. Az analógia bevezetésénél nyugodtan el lehet hagyni a disszipativitást jelentő ohmos ellenállást, illetve lengéscsillapítót. Ekkor a villamos áramköri modellben egy feltöltött kondenzátor szerepel, amelynek kisülése tekercsen keresztül történik. Az L induktivitású, tekercsből és a C kapacitású kondenzátorból összeállított kör a K kapcsolóval zárható.

Kirchhoff-féle huroktörvény alapján: $u_C(t) + u_L(t) = 0$ (1.a)

A kondenzátor feszültsége: $u_C(t) = \frac{1}{C} \cdot q(t)$ (1.b)

Az induktivitás feszültsége: $u_L(t) = L \cdot \frac{di(t)}{dt} = L \cdot \frac{d^2q(t)}{dt^2}$ (1.c)

A kondenzátor és az induktivitás feszültségére adódó kifejezéseket beírva a huroktörvénybe, átrendezve az egyenletet, megkapjuk az (1.d) egyenletet:

$$\frac{1}{C} \cdot q(t) + L \cdot \frac{d^2q(t)}{dt^2} = 0 \rightarrow \frac{d^2q(t)}{dt^2} + \frac{1}{L \cdot C} \cdot q(t) = 0 \quad (1.d)$$

Az LC villamos analógiájának a modellje tehát a csavarrugókkal összekötött test mozgása, amely egyébként a nem egyenletesen gyorsuló egyenes vonalú mozgások egyik klasszikus példája is. Alapállapotában a csavarrugó állandósult állapotban lévőnek tekinthető. Ha azonban összenyomjuk vagy megnyújtjuk, olyan erő keletkezik, amely a rugót az eredeti helyzetébe igyekszik visszatéríteni. A rugónak az egyensúlyi állapottól való kis eltérése esetén a Hooke-törvénynek megfelelően a testre f_r rugalmas erő fog hatni, amely az egyensúlyi állapot felé irányul és arányos az x eltéréssel. Ez a rugalmas erő x eltéréssel ellentétes irányú, (2.a) egyenlet:

$$f_r(t) = -D \cdot x(t) \quad (2.a)$$

A kvantitatív összefüggések megállapításához Newton II. törvényét kell felírni, figyelembe véve, hogy a gyorsulás az elmozdulás idő szerinti második deriváltja, (2.b) egyenlet:

$$f_r(t) = m \cdot a(t) = m \cdot \frac{d^2x(t)}{dt^2} \quad (2.b)$$

A (2.b) egyenletet beírva a (2.a) egyenletbe, és átrendezve a kapott egyenletet:

$$m \cdot \frac{d^2x(t)}{dt^2} = -D \cdot x(t) \rightarrow \frac{d^2x(t)}{dt^2} + \frac{D}{m} \cdot x(t) = 0 \quad (2.c)$$

Az (1.d) és (2.c) egyenlet is úgynevezett közönséges, másodrendű, állandó együtthatójú, lineáris homogén differenciálegyenlet, amelyet röviden a csillapítatlan harmonikus rezgőmozgás egyenletének neveznek. Továbbá a töltés és kitérés előtt lévő szorzó tényező a rezgő rendszer rezonancia (saját) frekvenciájának négyzetét adja meg; (3.a) és (3b) egyenlet:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \quad (3.a)$$

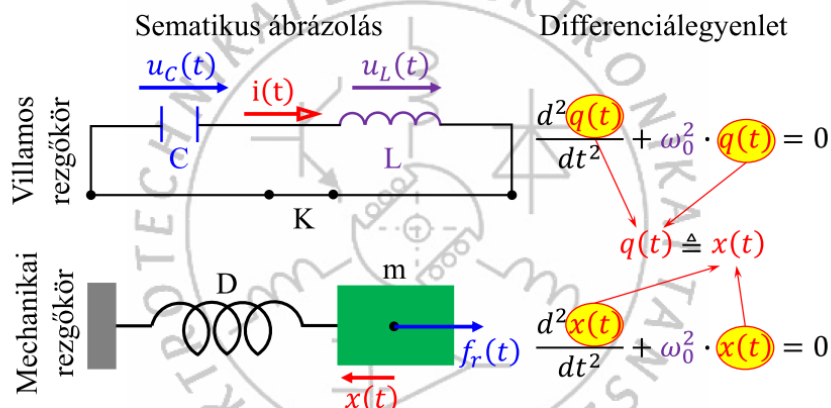
$$\omega_0 = \sqrt{\frac{D}{m}} \quad (3.b)$$



VILLAMOS MODELLEZÉS ÉS SZIMULÁCIÓ
GEVEE225-M



Villamos és mechanikai és rezgőrendszer analógiája



A villamos rendszerben $q(t)$ elektromos töltésének a lineáris mechanika rendszerben a $x(t)$ kitérés felel meg.

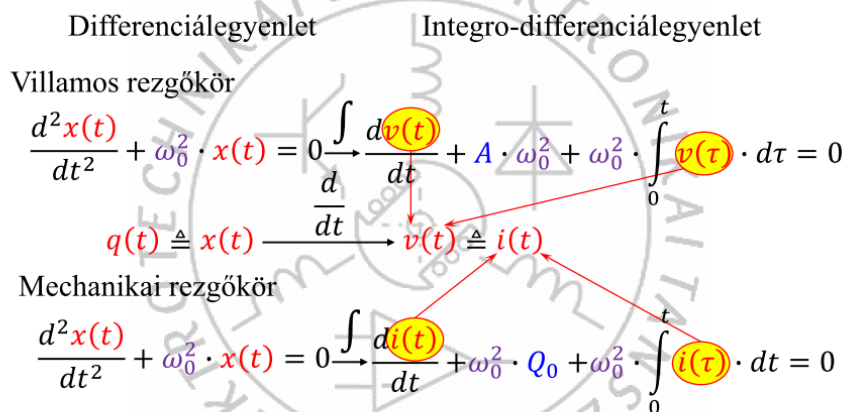
1. ábra: A elektromos töltés és a kitérés analógiájának levezetése [saját előadás anyagból]



VILLAMOS MODELLEZÉS ÉS SZIMULÁCIÓ
GEVEE225-M



Villamos és mechanikai és rezgőrendszer analógiája



A villamos rendszerben $i(t)$ elektromos áramnak a lineáris mechanika rendszerben a $v(t)$ sebesség felel meg.

2. ábra: Az elektromos áram és a sebesség analógiájának levezetése [saját előadás anyagból]

Jól látható, hogy a (1.d) és (2.c) egyenleteknek azonos alakja van és ez alapján a villamos és mechanikai rendszer közötti analógia bevezethető. Ennek a levezetését mutatja be az 1. és 2. ábra. Az előbbi az elektromos töltés és kitérés közötti analógiát mutatja be a differenciálegyenlet segítségével, az utóbbi pedig az integro-differenciálegyenlet felhasználásával az

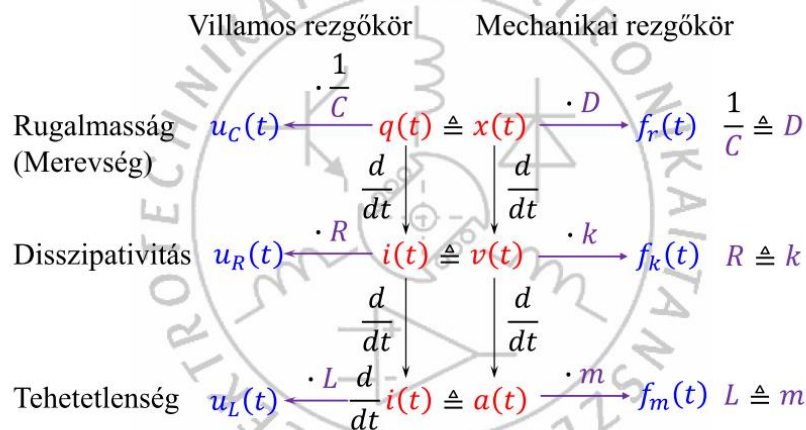
elektromos áram és sebesség közötti analógiát. Ezek a fizikai mennyiségek a villamos, illetve mechanikai rendszerek kimenő jelei, vagy más néven okozatváltozói. Az analógia tovább gondolását a 3. ábra mutatja be. Az okozatváltozók (kimenő jel) deriválásából, megkapjuk az disszipatív elemekre vonatkozó összefüggéseket is. Továbbá a villamos okozatváltozókat (kimenő jeleket) megszorozzuk egy olyan fizika paraméterrel, hogy az okváltozó (bemenő jel) villamos feszültség legyen, azaz a töltést a kapacitás reciprokával, az áramot az ellenállással és az áram idő szerinti első deriváltját pedig az induktivitással kell megszorozni. A mechanikai rendszernél pedig az okozatváltozókat olyan fizikai paraméterekkel szorozzuk meg, hogy az okváltozó erő legyen, azaz az kitérést a rugóállandóval, a sebességet a csillapítási tényezővel, és a gyorsulást a tömeggel kell megszorozni. Mivel a villamos rendszer okváltozója a feszültség, a mechanikai rendszeré pedig az erő, ezért ezt feszültség-erő analógiának is nevezik. [7]. Ezáltal a megfelelő rendszerelem analógiája is könnyen felfedezhető: kondenzátor mechanikai analógiája a rúgó, és a rendszer rugalmasságát reprezentálják, az ohmikus ellenállásnak a mechanikai lengéscsillapító, amelyek a rendszer disszipatív elemei, és a tekercsnek mechanikai analógiája pedig a (tehetetlen) tömeg, ezek adják rendszer tehetetlenségét.



VILLAMOS MODELLEZÉS ÉS SZIMULÁCIÓ
GEVEE225-M



Villamos és mechanikai rezgőrendszer analógiája



3. ábra: Az analógia teljes rendszere [saját előadás anyagból]

A rugalmasság (merevség) egyik tulajdonsága, hogy statikus módon képes energiát tárolni. A konzervatív rendszerelemek energiátárolása két, jellegükben különböző módon történik. Statikus módon, a villamos rendszerek elnevezését általánosítva kapacitív elemekkel és dinamikus módon, amelyeket – ugyancsak a villamos rendszer-elemek elnevezését használva – általánosított induktív elemeknek nevezzük. [8]

A tehetetlenség a villamos rendszerben az induktivitás és a mechanikai rendszerben pedig a tömeg reprezentálja. A rendszerelem azon tulajdonságát fejezi ki, hogy ellenállást képeznek a változással szemben. A villamos áramkörben tekercsben bekapcsoláskor az áram „nehezen” indul meg, a feszültség kikapcsolásakor pedig „nehezen” szűnik meg.

Az energiátároló rendszerelemek ideális objektumok, amelyek veszteség nélkül tárolják és adják vissza a tárolt energiát. Ez valós rendszerek modellezése esetén természetesen nem ad megfelelő leírást, mert bármelyik valós rendszer működése energiavesztéssel jár. A villamos rendszerben az ellenállás, és a mechanikai rendszerben a csillapítás reprezentál a disszipatív

elemet. Ezek az ideális (súrlódásmentes) rendszerben nincsenek jelen, A disszipativitás tehát energiát nem termel csak fogyaszt és végül felemészti a rendszer teljes energiáját, például a villamos ellenálláson az energia hővé alakul.

Mivel a rendszer nem tartalmaz disszipatív tagot ezért az analógia a rugalmas és a tehetetlen tag energiájára is kiterjeszhető. Ezt mutatja be a 4. ábra.



VILLAMOS MODELLEZÉS ÉS SZIMULÁCIÓ
GEVEE225-M



Villamos és mechanikai és rezgőrendszer energiáinak analógiája

	Villamos rezgőkör	Mechanikai rezgőkör
Rugalmasság: (Merevség)	Villamos tér energiája	Rugalmas potenciális energia
$\frac{1}{C} \triangleq D$	$E_{vill} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{C} \cdot q^2(t)$	$E_{rug} = \frac{1}{2} \cdot D \cdot x^2(t)$
$q(t) \triangleq x(t)$	Potenciális energia	
Tehetlenség:	Mágneses tér energiája	Mozgási energiája
$L \triangleq m$	$E_{magn} = \frac{1}{2} \cdot L \cdot i^2(t)$	$E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2(t)$
$\frac{d}{dt} i(t) \triangleq a(t)$	Kinetikus energia	

4. ábra: Az energiák analógiája [saját előadás anyagból]

A rugalmas tag, amely statikus módon tárolja az energiát, ezért ez a rendszerben a potenciális energiának felel meg. A tehetlenség, amely dinamikus módon tárolja az energiát, ezért a rendszerben a kinetikus energiának felel meg. A 4. ábrában az is jól látható, ha az energia egyenletekbe a megfelelő fizikai paraméterek és az okváltozók analógiáját helyettesítjük be, akkor szépen kiadódik, hogy a villamos tér energiájának az analógiája a rugalmas energia, és a mágneses tér energiájának az analógiája a mozgási energia. Az előbbiek a rendszer potenciális energiái, az utóbbiak pedig a rendszer kinetikus energiái.

2. ÖSSZEFOGLALÁS

Az egyik rendszerben tett megállapításaink a másik rendszerre vonatkozóan, a megfelelő analógiát figyelembevéve igaz lesz. Egy bonyolult, nagyszámú kapcsolási elemet tartalmazó mechanikai rendszert utánozva nagyszámú ellenállást, tekercset és kondenzátort kapcsolunk össze. A feladat matematikai leírás ugyanolyan, azonban a villamos áramkört könnyebb elkészíteni és ennek a rendszernek a paramétereit változtatni. Az analógiák összefoglalását a 1. táblázat mutatja be.

A módszert használják például gépkocsi tervezésnél, menet közbeni rezgések vizsgálatánál, amikor az adott problémát villamos áramkörrel modellezzük, esetlegesen fizikailag is megépítik. A tekercset induktivitásával vesszük figyelembe a kerekek tehetlenségét és kondenzátor kapacitásának reciprokértéke a rugók rugóállandóinak felel meg, amíg az ellenállások a lengéscsillapítót reprezentálják. Az út egyenlenségeinek a feszültséggenerátorból származó jel hivatott modellezni. Méréssel vagy szimulációval meghatározva például az adott kondenzátoron lévő töltés mennyiségét, megállapítható, hogy a megfelelő felfüggesztésben lévő csavarrugó, vagy

laprugó mennyire felel meg a feltételezett útviszonyoknak. A módosításokat könnyen el lehet végezni, azaz első közelítésben nem kell ténylegesen megépíteni a gépjárművet és abban cserélgetni az alkatrészeket. Természetesen, a gépjármű minden egyes jellemzője nem határozható meg ezzel a módszerrel, de akkor is jelentősen leegyszerűsíti az adott probléma vizsgálatát.

1. táblázat: Az analógiák összefoglalása

Rendszer elem jellege	Fizikai jellemző	Villamos rendszer	Mechanikai rendszer	Az analógiák jelölése
Rugalmasság (Merevség)	Fizikai paraméter	Kapacitás reciproka	Rúgóállandó	$\frac{1}{C} \triangleq D$
	Ok változó (bemenő jel)	Kondenzátor feszültsége	Rúgóerő	$u_c(t) \triangleq f_r(t)$
	Okozat változó (kimenő jel)	Kondenzátor töltése	Kitérés	$q(t) \triangleq x(t)$
	Potenciális energia	Villamos tér energia	Rugalmas energia	$\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{C} \cdot q^2(t) \triangleq \frac{1}{2} \cdot D \cdot x^2(t)$
Disszipativitás	Fizikai paraméter	Ellenállás	Csillapítás	$R \triangleq k$
	Ok változó (bemenő jel)	Ellenállás feszültsége	Csillapítóerő	$u_R(t) \triangleq f_k(t)$
	Okozat változó (kimenő jel)	Villamos áram	Tömeg sebessége	$i(t) \triangleq v(t)$
Tehetlenség	Fizikai paraméter	Induktivitás	Tömeg	$L \triangleq m$
	Ok változó (bemenő jel)	Induktivitás feszültsége	Tömegre ható erő	$u_L(t) \triangleq f_m(t)$
	Okozat változó (kimenő jel)	Induktivitás fluxusa []	Gyorsulás	$\frac{d}{dt} i(t) \triangleq a(t)$
	Kinetikus energia	Mágneses tér energiája	Mozgási energia	$\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot L \cdot i^2(t) \triangleq \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2(t)$

Az analógia kiterjeszhető olyan problémákra is, amelyekhez parciális differenciálegyenletet kell megoldani például villamos távvezeték analógiája a tengelyirányú erővel terhelt, keresztmetszetéhez képest hosszú rúd.

4. FELHASZNÁLT IRODALOM

EUKLIDÉSZ: Elemek. Gondolat könyvkiadó, Budapest 1983.

NAGY L: Az analógiás gondolkodás fejlesztése. Műszaki Könyvkiadó, Budapest 2006.

RADNÓTI K.: Analógiák a fizikában és szerepük a fizika oktatásában. Fizikai szemle 59: 4 pp. 131-137. 2010

GITTERMAN, M., HALPERN, V.: Fizikai problémák kvalitatív elemzése. Műszaki könyvkiadó, Budapest 1985

RACZYNSKI, S.: Models for Research and Understanding Exploring Dynamic Systems, Unconventional Approaches, and Applications. Springer 2022

SEROVAJSKY, S.: Mathematical Modelling. Taylor & Francis Group, LLC 2022

FODOR GY.: A Laplace-transzformáció műszaki alkalmazásai. Műszaki könyvkiadó, Budapest 1966

KORONDI P. ÉS TSAI: Rendszertechnika BME MOGI 2014

<https://www.mogi.bme.hu/TAMOP/rendszertechnika/math-ch07.html>

NAGYSEBESSÉGŰ ÁLLANDÓ MÁGNESES GÉPEK SAJÁTOSSÁGAI ÉS SZIMULÁCIÓJA

CHARACTERISTICS AND SIMULATION OF HIGH-SPEED PERMANENT MAGNET MACHINES

MARCSA Dániel¹

¹Ph.D., szimulációs mérnök, daniel.marcsa@econengineering.com

¹eCon Engineering Kft., 1116, Budapest, Kondorosi út 3.

Kivonat: A cikkben röviden bemutatom a nagysebességű villamos gépek fajtáit azok főbb előnyeivel és hátrányaival. Ezt követően a nagysebességű állandó mágneses kefe nélküli villamos gépekkel foglalkozom, ahol ismertetem a legjellemzőbb álló- és forgórész kialakításokat és összefoglalom azon jellemzőket, amikre nagy figyelmet kell fordítani egy ilyen gép tervezésénél. Az elektromágneses jelenségek mellett a termikus és mechanikai jellemzőkre is röviden kitérek. Ezzel együtt egy példa szimulációjának segítségével illusztrálom az egyes részekben fellépő elektromágneses, termikus és mechanikus jelenségeket, külön kitérve a felharmonikusok okozta többletvesztésekre.

Kulcsszavak: nagysebességű állandó mágneses gép, elektromágneses veszteségek, numerikus szimuláció

Abstract: In this article, I will briefly describe the types of high-speed electrical machines with their main advantages and disadvantages. I will then deal with high-speed brushless permanent magnet electric machines, where I will describe the most typical stator and rotor constructions and summarise the characteristics that need to be taken into account when designing such a machine. In addition to the electromagnetic phenomena, the thermal and mechanical characteristics will be briefly discussed. Through the simulation of an example, I will illustrate the electromagnetic, thermal and mechanical phenomena occurring in each part, with highlighted the excess loss due to harmonics.

Keywords: high-speed permanent magnet machine, electromagnetic losses, numerical simulation.

1. NAGYSEBESSÉGŰ VILLAMOS GÉPEK

A nagysebességű mechanikai forgógépeket már régóta fejlesztenek és használnak. Ezek a gépek napjainkra már kiforrott és megbízható technológiának számítanak. Ilyen gépeket használnak turbófeltöltőkben, mechanikus turbókompresszorokban, repülőgép és helikopter hajtóművekben, versenymotorokban. A nagysebességű gépek területén is követve a fejlesztési trendeket, előtérbe kerültek a nagysebességű villamos forgógépek. Ennek következtében az utóbbi két évtizedben széleskörű kutatások folytak ipari és háztartási alkalmazásokhoz, mint kompresszor, vákuumszivattyú, turbógenerátor, szerszámgépek vagy lendkerekes energiatárolás. Az alacsonyabb sebességű gépekkel összehasonlítva ezeknek a gépeknek nagyobb a teljesítménysűrűsége, kisebb a mérete és súlya. További előnyt jelenthet, hogy közvetlenül csatlakoztathatók a nagysebességű terheléshez, így nincs szükség váltóműre, ezzel javítva a rendszer határfokát, megbízhatóságát és nem utolsósorban csökkenti rezgést és zajt. A teljesítményelektronika fejlődésének köszönhetően a működési sebességhez szükséges táplálási frekvencia sem jelent már problémát.

A nagysebességű villamos forgógépek szakirodalmában többféle definícióval találkozhatunk azzal kapcsolatban, mi számít nagysebességűnek. A legelterjedtebben használt definíció szerint a 10 000 fordulat/percet vagy az 50 m/s kerületi sebességet meghaladó gépek tekinthetők nagysebességűnek [1-3]. Fontos megjegyezni, hogy léteznek úgynevezett ultra-nagysebességű gépek is, amely gépeknél a fordulatszám alsó határát többségében a 250 000 fordulat/percnel definiálják [4].

A szerkezeti felépítés tekintetében mind az egyenáramú és mind a váltakozóáramú gépek

képesek a nagysebességű működésre. A gyakorlatban a legelterjedtebb nagysebességű géptípusok az aszinkron gép, a kapcsolt reluktancia gép és az állandó mágneses szinkron gép. Az 1. táblázat ennek a három géptípusnak a főbb előnyeit és hátrányait összegzi.

1. táblázat: Főbb jellemzői a nagysebességű villamos gépeknek.

	Előny	Hátrány
Aszinkron gép	Könnyű indítás	Nagy forgórész veszteség
	Olcsó	Teljesítménytényező alacsony
	Forgórész jól ellenáll a magas hőmérsékletnek	Lemezelt forgórész esetében a rövidrezáró gyűrű sérülékeny
Kapcsolt reluktancia gép	Egyszerű forgórész kialakítás	Hatásfok alacsony
	Alacsony forgórészvesztés	Zajos működés
	Rövid tekercsfej	Nagy légsúrlódás
Állandó mágneses szinkron gép	Jó hatásfok	Forgórész mechanikai szilárdsága alacsony
	Nagy teljesítménysűrűség	Állandó mágnes könnyen lemágneseződik
	Teljesítménytényezője jó	Költséges

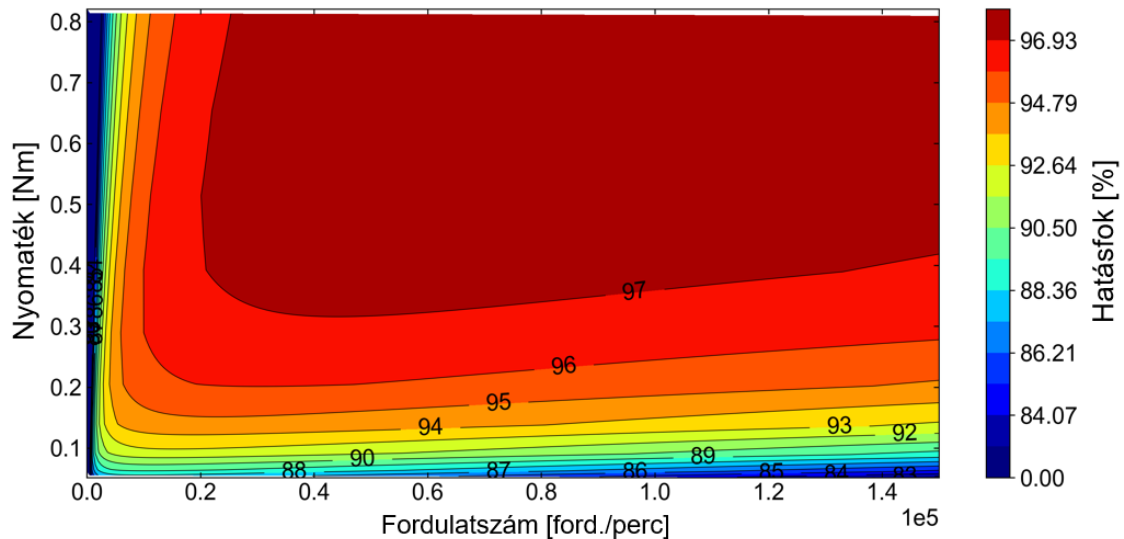
Az aszinkron gépet a robusztus forgórésznek köszönhetően széles körben alkalmazzák a nagysebességű gépek között. A nagysebességű változatnál a hagyományosnak tekinthető lemezelt forgórész kialakításnál a tömör forgórészt és annak variánsait elterjedtebben alkalmazzák. A tömör forgórész mechanikailag a legrobusztusabb, amivel a 400 m/s kerületi sebesség is meghaladható. Azonban a jelentős örvényáramok miatt a hatásfoka alacsony, ami az egyik fő hátránya. A hatásfok javítható a tömör forgórészbe mart hornyokkal, de így a légsúrlódás ami jelentősen nő. Ennél jobb megoldás a tömör forgórészre egy réz réteg kialakítása. Ezzel a változattal sikerült a legnagyobb kerületi sebességet is elérni. Valamint létezik a kalickás tömör forgórész, aminél kisebb a mechanikai szilárdság, de jobb a hatásfok, mint a rézzel bevont forgórész esetében [2], [5].

A kapcsolt reluktancia gép ritkán alkalmazott típus az aszinkron géphez és az állandó mágneses szinkron géphez képest. De az alacsony előállítási költsége miatt előszeretettel alkalmazzák kisteljesítményű gépként tömegtermékekben, mint porszívó, légfűvő vagy ventilátor [2], [6].

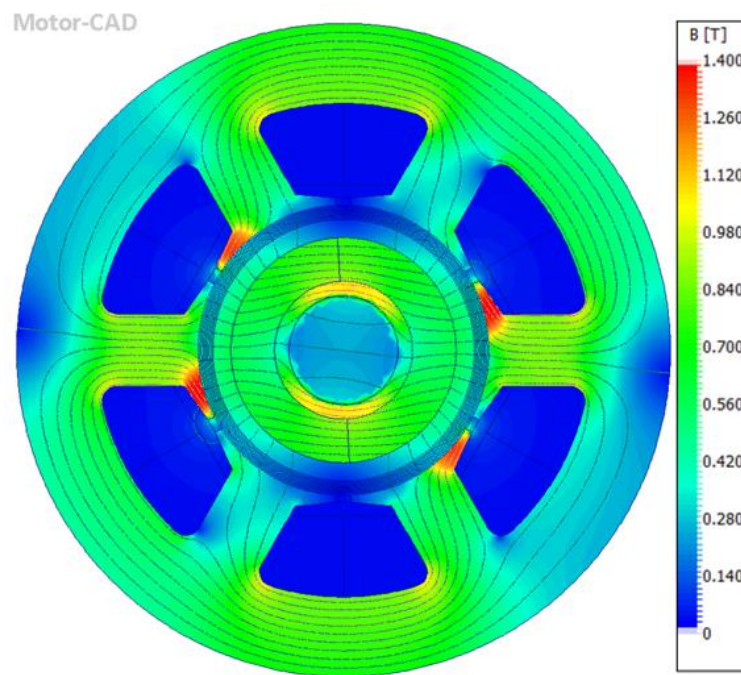
Az aszinkron gépnél is szélesebb körben alkalmazzák az állandó mágneses szinkron gépeket a nagysebességű gépek között. Ennél a géptípusnál, az aszinkron géppel szemben kisebb a forgórészvesztés, tehát a jobb hatásfok és nagyobb teljesítménysűrűség. Sőt elvárás is, hogy a gépnek a hatásfoka és a teljesítménytényezője közel egy legyen a teljes sebesség és terhelési tartományában. Az 1. ábrán egy nagyfordulatszámú állandó mágneses gép hatásfokmezője látható, ahol jó közelítéssel a gép teljes működési tartományán a hatásfok 95 % fölötti. További előnyei a nagyfordulatszámú állandó mágneses gépeknek a változatos álló- és forgórész kialakítás, valamint a jó szabályozási tulajdonságuk [1-3].

2. NAGYSEBESSÉGŰ ÁLLANDÓ MÁGNESES VILLAMOS GÉPEK

A nagysebességű állandó mágneses gépek esetében nem csak három, hanem egyfázisú gépek is léteznek. Az egyfázisú gépeket a reluktancia géphez hasonlóan olyan helyeken alkalmazzák, ahol egyszerű és olcsó kialakításra van szükség, mint kézszáritókban vagy porszívóban. A



1. ábra: A vizsgált nagysebességű állandó mágneses motor hatásfokmezője.



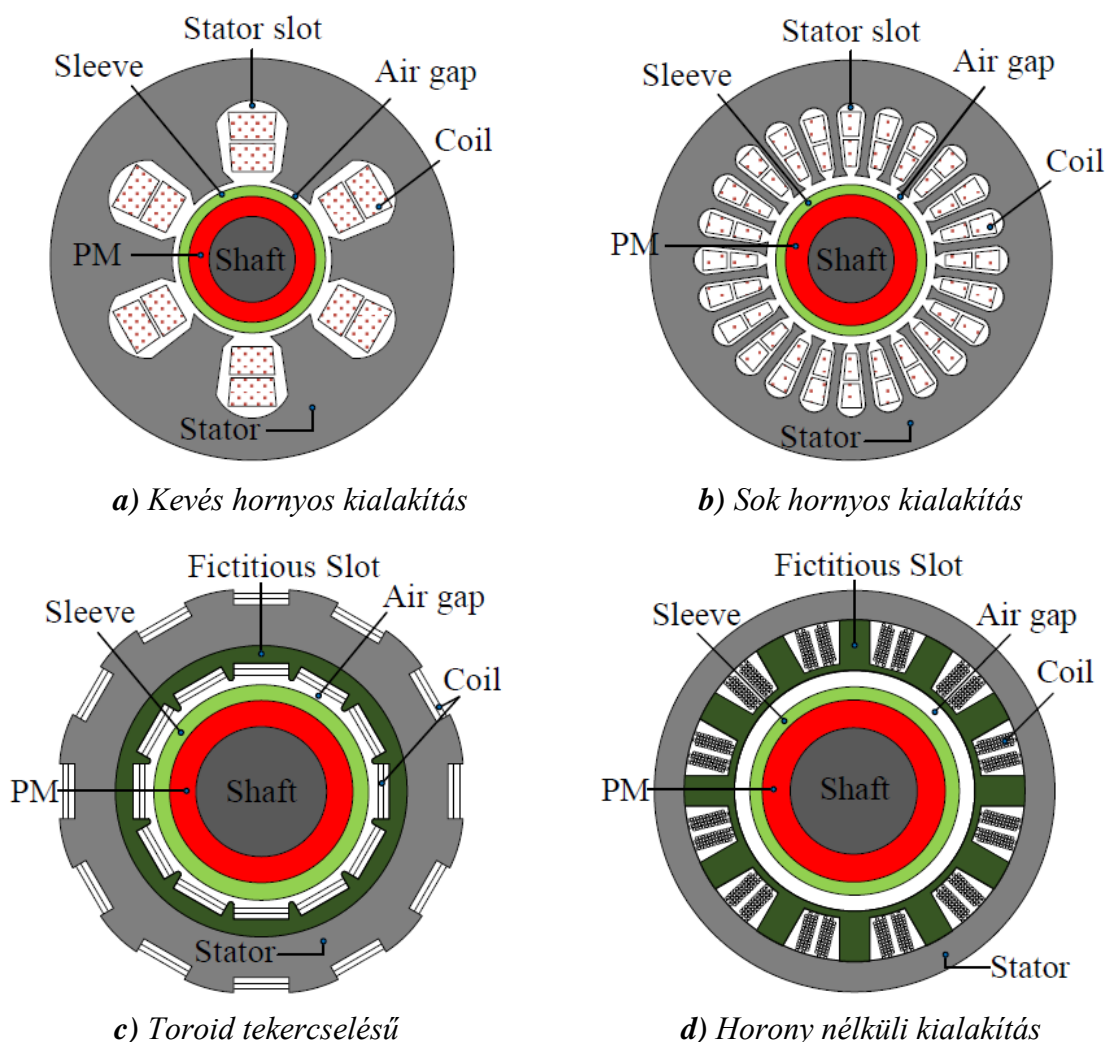
2. ábra: A mágneses fluxussűrűség eloszlása a szimulált gépben.

továbbiakban a háromfázisú kivittel foglalkozom a cikkben. Azt fontos megjegyezni, hogy a nagysebességű gépeknél szinte kizárólag a 2 vagy 4 pólusú kivitel alkalmazták. Ennek okai a gerjesztési frekvencia alacsony értéken tartása és a légrésmező eloszlása minél szinuszosabb legyen. A demonstrációs célokra használt nagysebességű gép a 2. ábrán látható. A szimulációhoz az Ansys Motor-CAD szoftvert [7] használtam, mivel így lehetőségem volt az elektromágneses, a termikus és a mechanikai jelenségeket egyben kezelni. A vizsgált gép egy háromfázisú, kétpólusú gép, 120 000 ford./perc névleges fordulatszámmal, a forgórészen szénszálal bandázssal.

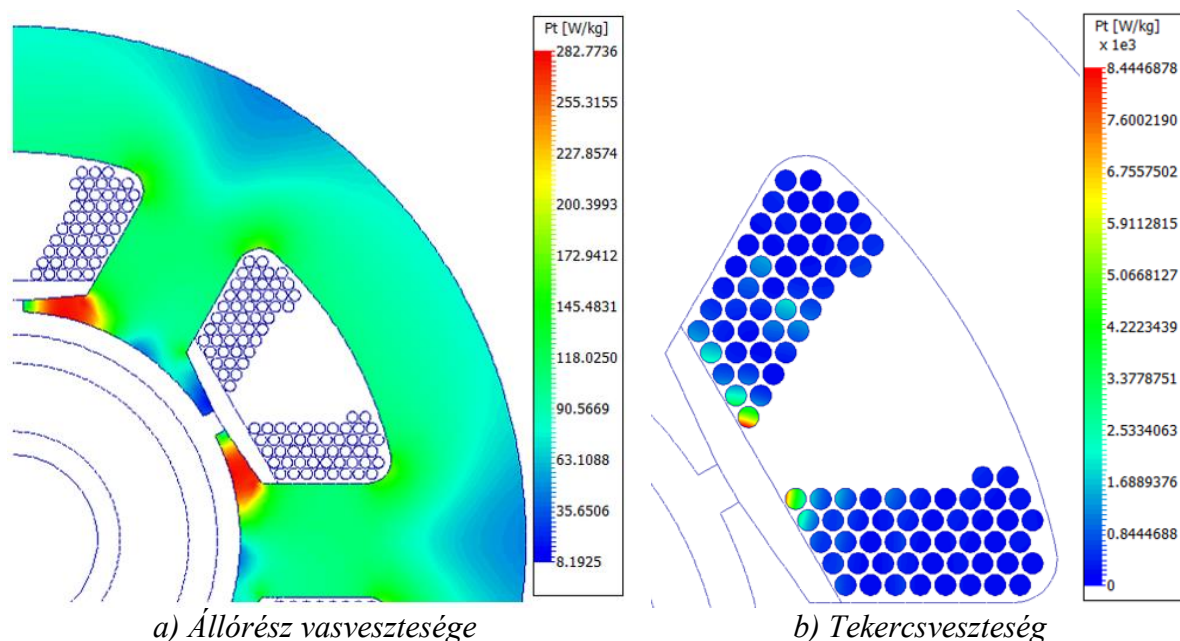
2.1. Állórész

A legelterjedtebben alkalmazott állórész kialakítások az 3. ábrán láthatóak. A hornyolt vas-magos változattal (3. ábra a és b) lehet a nagyobb légrésfluxust és teljesítménysűrűséget elérni. Azonban a hornyok okozta reluktanciaváltozás a légrésmezőben harmonikusokat hoz létre. Emiatt a kevés horonnyal ellátott változatot kis méretű és kis teljesítményű alkalmazásokban használják. A sok horonnyal csökkenthető a nyomatóklüktetés és a légrésmező harmonikustartalma. Ezzel szemben a horonyméltüli változatok (3. ábra c és d) esetében nincs reluktanciaváltozás, vagyis a hornyok okozta veszteség itt nincs. De a nagyobb légrés következtében a légrésmező és a nyomatók is kisebb, mint a hornyolt változatnál.

Az állórész esetében fontos szem elötte tartani a gerjesztés frekvenciáját. A példának használt motor esetében az alapharmonikus frekvenciája 2 000 Hz. Amíg a hálózati frekvenciáról üzemeltetett gépeknél 1 - 1,5 W/kg a veszteség 1 T indukcióra vonatkoztatva, addig a példa esetében közel 100 W/kg. A veszteségek további csökkentése miatt jellemző a nagyfordulatszámú gépek túlméretezése, aminek hatására csökken az indukció, vagyis a



3. ábra: A legelterjedtebb állórész kialakítások (Air gap – légrés, Coil – tekercs, Fictitious slot – fiktív horony, PM – állandó mágnes, Sleeve – rögzítőgyűrű vagy bandázs, Stator – állórész, Stator slot – állórész horony) [1].



4. ábra: Elektromágneses veszteségek az állórészben.

vesztés. Az alapharmonikuson felül a hornyok és a frekvenciaváltós táplálás okozta felharmonikusok vesztesége sem elhanyagolható. Az állórészben keletkező veszteségeket a 4. ábra mutatja. Az állórész veszteségéhez tartozó színskálán jól látható, hogy vannak helyek ahol a vasmagban a veszteség a 250 W/kg-ot is meghaladja. A gerjesztésben megjelenő nagyfrekvenciás (~40 - 50 kHz) felharmonikusok és a légrésmezőben kialakuló harmonikusok okozta áramkiszorítás is nagy többletvesztést (>8 000 W/kg) okoz, ahogy a menetekben kialakuló veszteség is szemlélteti a 4. ábrán.

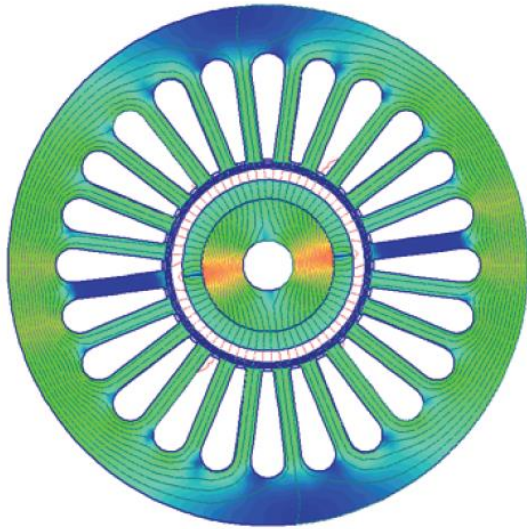
Az állórészen keletkező veszteségek csökkentése szempontjából, a horonynyílás mérete és a fogfej alakja is befolyással bír, mivel ezzel csökkenthető a légrésmező harmonikustartalma. A 4. ábrán jól látható, milyen kicsi a horonynyílás, ami mágneses szempontból előnyös, de a gyártás szempontjából nem. Egy másik veszteségcsökkentési lehetőség a vasmag kialakítása az acéllemezek helyett SMC (Sheet Molding Compound) kompozit alkalmazásával, ami leegyszerűsítve vaspapor nanorészecskék szigetelő bevonattal.

2.2. Forgórész

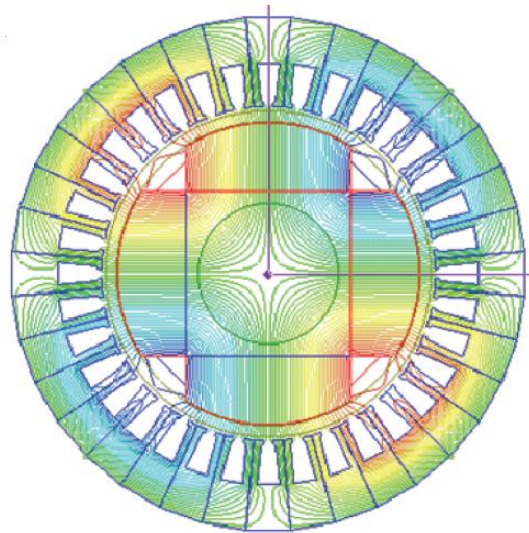
A forgórész esetében már kevésbé változatos a kialakítás. A legjellemzőbb elrendezéseket az 5. ábra mutatja. A gyűrűmágneses kialakítás esetében van a legkisebb szórt fluxus és ezt alkalmazzák a leggyakrabban, valamint ezzel a kialakítással lehet elérni a legnagyobb kerületi sebességet. A lelapolt ívmágneses forgórésszel lehet a legnagyobb légrésfluxust elérni, viszont itt a legnagyobb a beépített állandó mágnes térfogata. Ez a két típus csak valamilyen rögzítőgyűrűvel (bandázssal) együtt tud nagy fordulatszámmal üzemelni. A forgórészbe sülyesztett mágnes esetében nincs szükség bandázásra, viszont a mágnesek közötti összekötőt érdemes körültekintően tervezni. Elektromágneses szempontból az a jó, ha a mágnesek közötti acél összekötő minél keskenyebb, hogy üzem közben telítődjön, ezzel megakadályozva a szórt fluxusok záródását a pólusok között. Viszont mechanikai szempontból az összekötő nem lehet túl keskeny, hogy bírja a mechanikai igénybevételt. A gyakorlatban az acélba sülyesztett mágneses forgórésszel készült gépeket 100 m/s alatti kerületi sebességeknél használják, vagy speciális nagy mechanikai szilárdságú acélból készül a forgórész [2].

Az ideális rögzítőgyűrű anyaga nem ferromágneses, a nagy mechanikai feszültségeket is

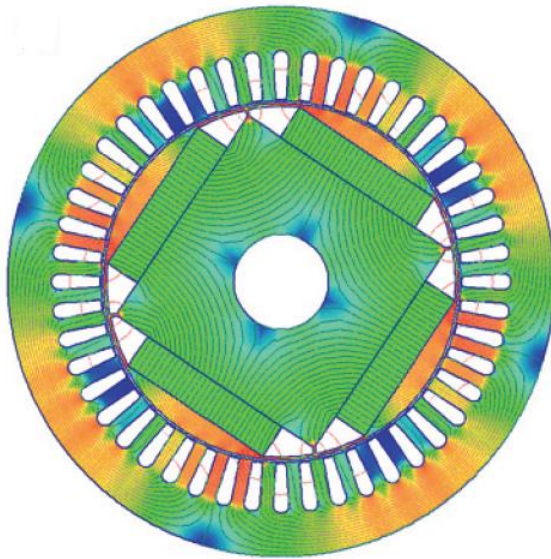
elviseli, nagy a fajlagos ellenállása és a sűrűsége és jó hővezető. A 2. táblázatban néhány, a rögzítőgyűrűhöz használt anyag mechanikai tulajdonságait láthatjuk. Mindegyik esetében találunk olyan tulajdonságot ami nem felel meg az ideálistól elvártaknak. Emiatt legtöbbször az alkalmazás szabja meg, milyen anyagból készüljön a bandázs. Fém bandázzsal a



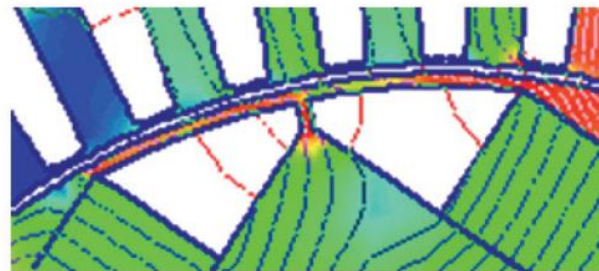
a) Gyűrűmágneses



b) Lelapolt ívmágneses



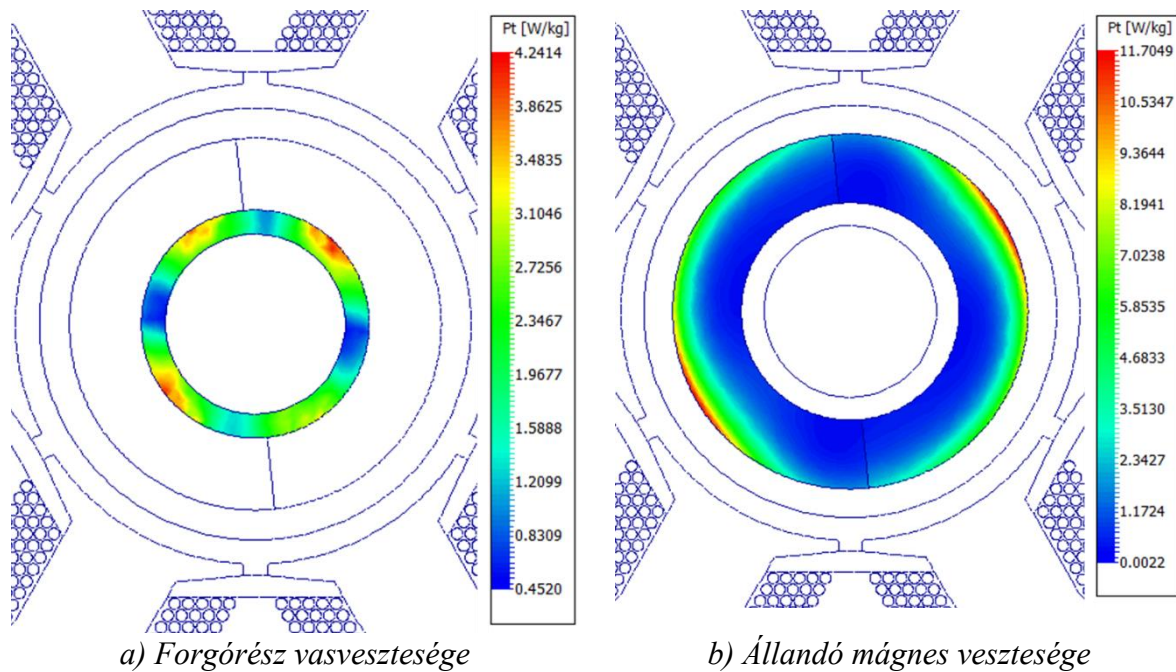
c) Forgórészbe süllyesztett mágnessel szerelt



5. ábra: A legelterjedtebb forgórész kialakítások [3].

2. táblázat: Különböző rögzítőgyűrűk anyagának mechanikai tulajdonságai [1].

	Kevlár	Szénszál	Üvegszál	Inconel 718
Sűrűség [g/cm ³]	1,14	1,76	2,54	8,2
Szakító szilárdság [MPa]	2920	3750	3447	1030
Hővezetés [W/(m·°C)]	0,04	5,0	1,0	11,4
Fajlagos ellenállás [Ω·m]	Szigetelő	1,5·10 ⁻⁵	4·10 ¹²	1,25·10 ⁻⁷



6. ábra: Elektromágneses veszteségek a forgórészben.

megengedett maximális hőmérséklet $290\text{ }^{\circ}\text{C}$, míg a szálerősített (szén- vagy üvegszál) műanyagok esetében $180\text{ }^{\circ}\text{C}$. A kerületi sebesség szempontjából fémeket 240 m/s -ig, amíg a szálerősített műanyagokat 320 m/s -ig lehet alkalmazni. Az állórésztekercs és az állandó mágnes között a jó csatoláshoz a mechanikailag megengedett legkisebb légrést célszerű alkalmazni. Viszont a kis légrésnél a fogak okozta harmonikusok jelentős veszteségek okoznak a rögzítőgyűrűben, ha az elektromosan vezető. A táblázatban található anyagok mellett még használnak titánium ötvözetet és rozsdamentes acélt.

A szinkron gépek esetében az alapharmonikus nem okoz a forgórész vasmagjában veszteséget. A forgórész vasvesztését a hornyok okozta reluktanciaváltozás miatt kialakuló fluxusváltozás okozza elsősorban. A felületre szerelt mágnessel készült forgórész esetében ez a veszteség elhanyagolható a nagy effektív légrés (légrés és a mágnes vastagsága) miatt. A forgórész vasmagjában kialakuló veszteséget a 6a ábra mutatja. A tömegre vetített veszteség 2 - 3 nagyságrenddel kisebb, mint az állórészben.

Az állandó mágnesek fajlagos ellenállása csak 2 - 3 nagyságrenddel nagyobb mint a réz vezetőé. Ezért az állórész okozta magasabb harmonikusok miatt kialakuló veszteség nem elhanyagolható a nagysebességű gépek esetén. A 6b ábra mutatja az állandó mágnesben létrejövő veszteséget.

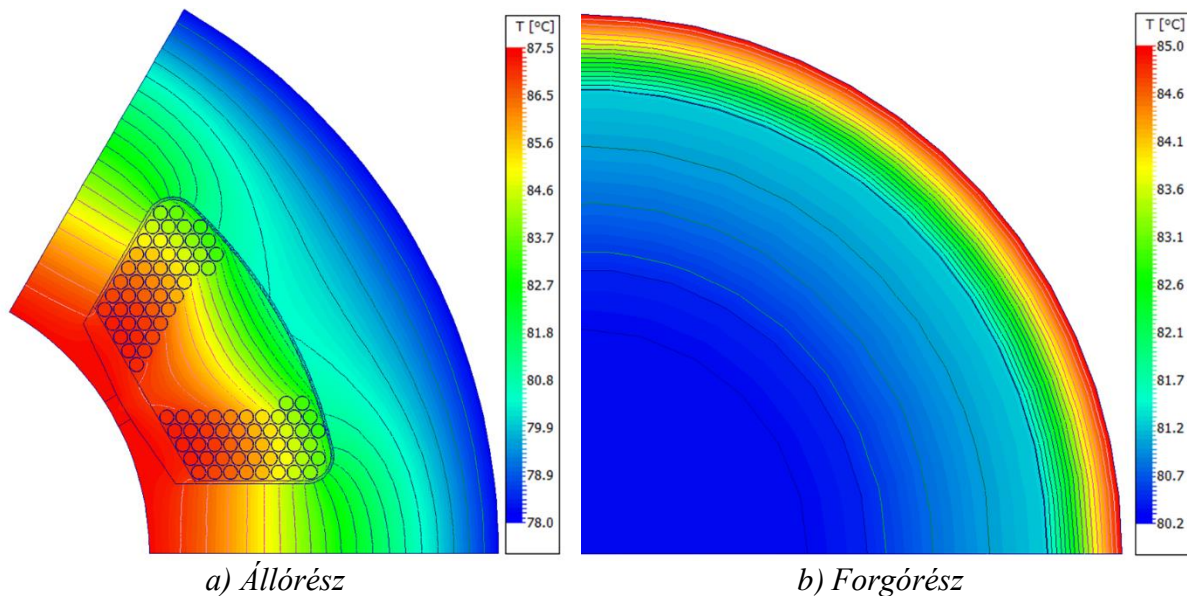
A rögzítőgyűrűnél a gerjesztés és a hornyok okozta fogpulzáció miatt alakulhat ki jelentős veszteség. A fogpulzáció függ a reluktancia változásának sebességétől, ami a nagysebességű gépek esetében elég jelentős is tud lenni a fogfej és a horonynyílás kialakításának függvényében. Ez azt jelenti, hogy amíg $10\ 000$ fordulat mellett 14 W veszteség keletkezik a bandázásban, addig $100\ 000$ fordulat mellett a veszteség értéke már $1\ 000\text{ W}$ fölötti. A vizsgált példa esetében üvegszál bandázst használtam, ami villamosan szigetelőnek tekinthető, így abban nem alakul ki számottevő veszteség.

A kvantitatív összehasonlításhoz a 3. táblázat összefoglalja az elektromágneses veszteségek értékét három esetre. Az első eset, amikor csak a 107 A -es $2\ 000\text{ Hz}$ -es alapharmonikusot használtam gerjesztésnek. A „valós áram”, amikor az alapharmonikusok mellett a felharmonikusok is megjelennek a gerjesztésben. Az utolsó eset pedig amikor a két legnagyobb felharmonikus, a 19. ($6,08\text{ A}$, 38 kHz) és a 21. ($4,9\text{ A}$, 42 kHz) harmonikus hatását vizsgálom. Az eredmények

jól mutatják, hogy a forgórészen az alapharmonikus mellett nincs jelentős veszteség. Ehhez képest a tényleges áram használata mellett a mágnesben közel húszszorosára nőtt a veszteség. Érdekes a két legnagyobb harmonikus hatását is vizsgálni, ami közelítőleg az állórész vasmagjában a veszteség 35%-át adja. Ezen felül pedig a forgórészben is jelentős veszteségeket okoznak, annak ellenére, hogy a harmonikusok amplitúdója nem jelentős az alapharmonikushoz képest.

3. táblázat: A három vizsgált esetben kialakuló veszteségek. Az értékek W-ban értendők.

	Állórész		Forgórész	
	Vasmag	Tekercs	Vasmag	Mágnes
Alapharmonikus	243,5	306,5	0,043	6,255
Valós áram	534,0	235,6	13,05	120,5
19. és 21. harmonikus	194,1	0,509	1,729	19,61



7. ábra: A vizsgált gépben kialakuló hőmérsékleteloszlás.

2.3. Melegedés és hűtés

A nagysebességű villamos gépeknél is alkalmazzák a legegyszerűbb hűtési módokat, mint a hűtőbordás természetes vagy ventilátoros hűtést ugyanúgy mint a hatékonyabb és korszerűbb hűtőköpenyes vagy közvetlen olajhűtésű megoldásokat. A választott hűtési mód függ az alkalmazni kívánt gerjesztés áramsűrűségétől, valamint a gépben kialakuló veszteségek helyétől és nagyságától. Amíg természetes hűtéssel 4,5 - 6 A/mm² áramsűrűség használható, addig ez hűtőköpeny esetében 12 - 15 A/mm², vagy a közvetlen olajpermettel hűtött esetben 23 - 28 A/mm² is lehet [8].

A vizsgált példa esetében hűtőköpenyes hűtést alkalmaztam. A körkörös hűtőköpenyben etilén-glikol és víz keveréke van, aminek 4 perc/l az áramlási sebessége. Ezzel a hűtéssel elért hőmérsékleteloszlás látható a 7. ábrán az álló- és a forgórész keresztmetszetében névleges terhelés és fordulatszám mellett. Elektromágneses szempontból előnyös az üvegszálás bandázs alkalmazása, de termikus szempontból már kevésbé, mivel mint hőszigetelés viselkedik. Ezért a bandázs anyagának megválasztásában az is szerepet játszik, hogy mekkora veszteség, vagyis

hőmérséklet alakul ki a forgórészben.

A szabványban is definiált szigetelési osztályok közül az F osztályú szigetelés esetén $220\text{ }^{\circ}\text{C}$, esetleg $240\text{ }^{\circ}\text{C}$ lehet az állórész tekercselés hőmérséklete. De vannak olyan alkalmazások, ahol valamilyen okból (például környezeti hőmérséklet) ennél nagyobb hőmérsékletet kell elviselnie a szigetelésnek károsodás nélkül. Ilyen esetekben ad megoldást DuPont™ által gyártott Kapton® HN általános felhasználású szigetelő ami $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ig, vagy a nikkelbevonatú réz vezető kerámia szigeteléssel ami $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ig alkalmazható.

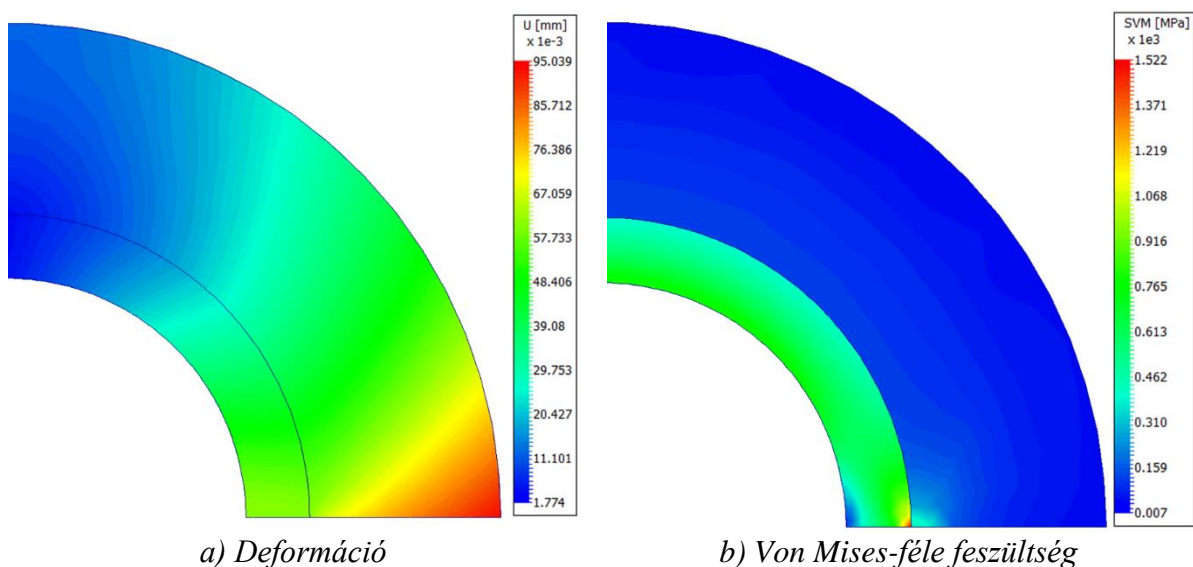
2.4. Mechanikai követelmények

A forgórész átmérőjét a tervezett névleges fordulatszámon fellépő szakítófeszültség korlátozza. A forgórész tengelyirányú hosszát a merevsége és az első kritikus fordulatszám korlátozza. Mivel a forgó tömegre ható centrifugális erő arányos a lineáris sebesség négyzetével és fordítottan arányos a forgási sugárral, a rotornak kis átmérőjűnek kell lennie, és nagyon nagy mechanikai szilárdsággal és hosszú kifáradási élettartammal kell rendelkeznie [3] [9]. Ezért például az alumínium egy kerürendő anyag.

A 8. ábra mutatja a mechanikai szimuláció eredményét a forgórész keresztmetszetében. A deformáció (8a ábra) maximuma közel $0,1\text{ mm}$, ami 36 mm -es átmérő esetében nagy. Az egyenértékű (von Mises-féle) feszültség (8b ábra) eredménye ezt jól alátámasztja, mert az acél folyáshatára 370 MPa , amíg a számított átlagos feszültség a forgórész vasmagjában 569 MPa . Tehát mechanikai szempontból ez a gép nem képes a névleges fordulatszámán ($120\text{ 000 ford./perc}$) sem üzemelni.

A tényleges nagysebességű gép tervezésénél nagyon fontos a rotordinamika. Ez ideális esetben egy 3D-s szimuláció amit egy nagyon részletes, a forgórészhez kapcsolódó minden részt tartalmazó modellen kell elvégezni. A tervezés mellett a gyártásra is nagy hangsúlyt kell fektetni, mert a nagyon kis statikus vagy dinamikus kiegyensúlyozatlanság is jelentős rezgést tud okozni [9].

A tőkeköltség és az üzemeltetési költség közvetlen kapcsolatban vannak egymással. Ezért a mágneses csapágy alkalmazása összességében olcsóbb lehet, mert a tőkeköltsége magas, de az üzemeltetési költsége alacsonyabb, mivel a súrlódási veszteség és az energiafogyasztás csökken, és nincs karbantartás [3]. Valamint a mágneses csapággal bizonyos mértékig lehetőség van a kiegyensúlyozatlanság kompenzálására is.



8. ábra: A mechanikai szimuláció eredménye.

3. ÖSSZEFOGLALÁS

A nagysebességű állandó mágneses szinkron gépek egyre szélesebb körű alkalmazása miatt komoly igény van a hatékony tervezés iránt. Ezen gépek tervezésénél szembe kell néznie a nagy veszteségek, a magas hőmérséklet és a bonyolultabb mechanikai jelenségek problémáival, amelyeket az elektromágneses, a termikus és a mechanikai területek kölcsönhatásának szoros figyelembevételével lehet elérni.

A cikk röviden bemutatja a nagysebességű villamos gépek főbb típusait és sajátosságait. Ezt követően a nagysebességű állandó mágneses szinkron gépek főbb álló- és forgórész kialakításainak bemutatása található. Az egyes kialakításoknál röviden vázolom a fő tulajdonságokat, kritikus jellemzőket. A kijelentések szemléltetéséhez egy nagysebességű motor szimulációjának eredményeit használom. A gép felépítését és elektromágneses veszteségeit követően a hűtéssel, melegedéssel és a mechanikai követelményekkel foglalkozom röviden. A mechanikai résznél bemutatott eredmények, hogy a forgórész mechanikailag nem alkalmas a névleges fordulatszámra, jól alátámasztja a csatolt fizikai vizsgálat jelentőségét, vagyis az elektromágneses és termikus szempontból alkalmasnak tűnő gép ténylegesen nem üzemképes.

4. FELHASZNÁLT IRODALOM

- SHEN, Q., ZHOU, Z., LI, S., LIAO, X., WANG, T., HE, X., ZHANG, J.: *Design and Analysis of the High-Speed Permanent Magnet Motors: A Review on the State of the Art*. Machines Vol. 10 No. 7. pp. 1-25. 2022.
- GERADA, D., MEBARKI, A., BROWN, N.L., GERADA, C., CAVAGNINO, A., BOGLIETTI, A.: *High Speed Electrical Machines – Technologies, Trends and Development*. IEEE Transactions on Industrial Electronics Vol. 61 No. 6. pp. 2946-2959. 2014.
- GIERAS, J.F.: *Permanent Magnet Motor Technology – Design and Application*. CRC Press, Boca Raton, FL, 2010.
- ZWYSSIG, C., KOLAR, J.W., ROUND, S.D.: *Megaspeed Drive Systems: Pushing Beyond 1 Million r/min*. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics Vol. 14 No. 5. pp. 564-574. 2009.
- HUPPUNEN, J.: *High-Speed Solid-Rotor Induction Machine – Electromagnetic Calculation and Design*, Acta Universitatis Lappeenrantaensis, Lappeenranta, 2004.
- KIM, J., KRISHNA, R.: *High Efficiency Single-Pulse Controlled Switched Reluctance Motor Drive for High Speed (48k RPM) Application: Analysis, Design, and Experimental Verification*. IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Edmonton, Canada, pp. 1-8, 2008.
- Ansys Motor-CAD - <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-motor-cad> (Utolsó megtekintés: 2024. november 3.)
- KONOVALOV, D., TOLSTOREBROV, I., EIKEVIK T.M., KOBALAVA, H., RADCHENKO, M., HAFNER, A., RADCHENKO, A.: *Recent Development in Cooling Systems and Cooling Management for Electric Motors*. Energies Vol. 16 No. 19. pp. 1-31. 2023.
- TONG, W.: *Mechanical Design of Electric Motors*, CRC Press, Boca Raton, FL, 2014.

A NAPELEM MODULOK ELEKTROLUMINESZCENCIA VIZSGÁLATÁ- NAK GYAKORLATI ASPEKTUSAI

PRACTICAL ASPECTS OF ELECTROLUMINESCENCE TESTING OF SOLAR CELL MODULES

MATUSZ-KALÁSZ Dávid¹, BODNÁR István²

¹PhD, egyetemi adjunktus, matusz-kalasz.david@uni-miskolc.hu

¹Miskolci Egyetem, Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék, 3515 Miskolc-Egyetemváros

²PhD, egyetemi docens, bodnar.istvan@uni-miskolc.hu

²Miskolci Egyetem, Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék, 3515 Miskolc-Egyetemváros

Kivonat: A cikk célja a napelem modulok elektrolumineszcencia (EL) vizsgálatának gyakorlati szempontjainak bemutatása, különös tekintettel a laboratóriumi és helyszíni (kültéri) tesztesetek közötti eltérésekre. A vizsgálatok során nyitó- és záróirányú tesztek kerültek összehasonlításra, amelyek rávilágítanak a két módszer alkalmazhatóságára és korlátjaira. A tanulmány hangsúlyozza, hogy a panelek a gyártás, szállítás és telepítés során különféle károkat szenvedhetnek el, amelyek elektrolumineszcencia képeken is kimutathatók, lehetővé téve a teljesítményromlás időbeli követését. E vizsgálati eredmények kiemelt jelentőséggel bírhatnak a garanciális vitákban, perdöntő bizonyítékként szolgálva megrendelő, telepítő és gyártó-szállító cégek közötti konfliktusokban.

Kulcsszavak: napelem, állapotfelmérés, elektrolumineszcens

Abstract: The aim of this paper is to present the practical aspects of electroluminescence (EL) testing of photovoltaic (PV) modules, with a specific focus on the differences between laboratory and on-site (outdoor) testing methods. Comparative analysis of forward and reverse bias tests highlights the applicability and limitations of each approach. The study emphasizes that PV panels may incur various damages during manufacturing, transportation, and installation, which become visible on electroluminescence images, enabling performance degradation to be tracked over time. These findings can serve as crucial evidence in warranty disputes, providing conclusive proof for conflicts among clients, installers, and manufacturers-suppliers.

Keywords: solar cell, condition assessment, electroluminescence

1. BEVEZETÉS

Az utóbbi évtizedre jellemző energetikai trendekre válaszul a napelem panelek gyártására egyre inkább lett jellemző a tömeggyártás jelleg, ezáltal a minőségük csekély mértékű romlása, ami kérdéssé teszi a sokat hangoztatott több évtizedes időtartamra szóló teljesítménygaranciákat. Azon túl, hogy a mai darabok már nem minden esetben készülnek olyan körültekintéssel, mint a 30-40 évvel ezelőtti prototípusok és minta-erőművek, a szállítás és telepítés során is további károsodásokat szenvedhetnek el, amelyek elektrolumineszcencia (EL) képeken is kimutathatók, lehetővé téve a teljesítményromlás időbeli követését.

Leggyakrabban az elektrolumineszcencia vizsgálatra laboratóriumi módszerként tekintenek (Si szenzor). Ez abból ered, hogy a tudományos kísérletek zöme egyetemi és fejlesztő laboratóriumi környezetben zajlik, valamint a napelemes vállalatok a gyártási folyamat minőségbiztosítása céljából is hasonló, az 1. (a) ábrán látható berendezés típusokat használnak.

A laboratóriumi vizsgálatához szükséges felszerelés:

Kamera: A felvételek elkészítéséhez, amely érzékeli a közel infravörös tartományt.

Tápegység/Vezérlőegység: Áramforrás, amely képes a modulra kapcsolt áram és feszültség figyelésére és beállítására.

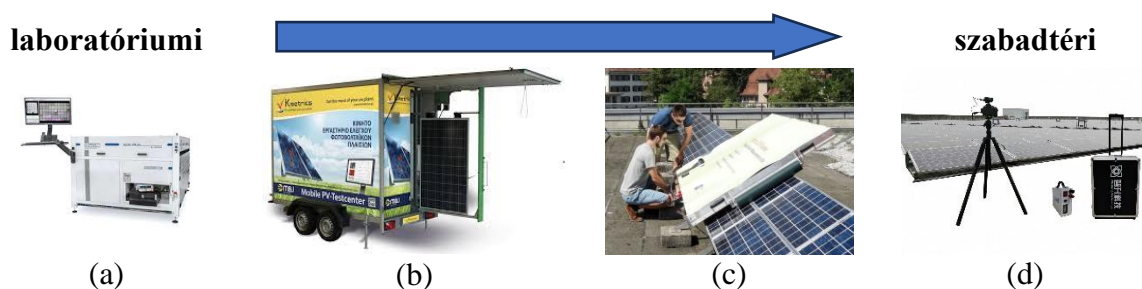
Tesztkörnyezet: Az EL-tesztet legjobb sötét szobában vagy kamrában elvégezni.

A vizsgálati folyamat helyszínen is elvégezhető, akár már leszerelés nélkül is (InGaAs, vagy

Ge szenzor). Manapság már bevett szokás, hogy az 1. (b) ábrának megfelelően az állapotfelmérést végző csapat egy olyan járművel vonul fel a napelemes erőmű területére, hogy annak rakterében vagy zárt terű utánfutóban van elhelyezve az elektrolumineszcencia felszerelés, így a bevizsgálendő napelem paneleket nem szükséges nagy távolságra szállítani, ezáltal csökkentve a további sérülések kockázatát, ellenben leszerelés szükséges [1, 2, 3].

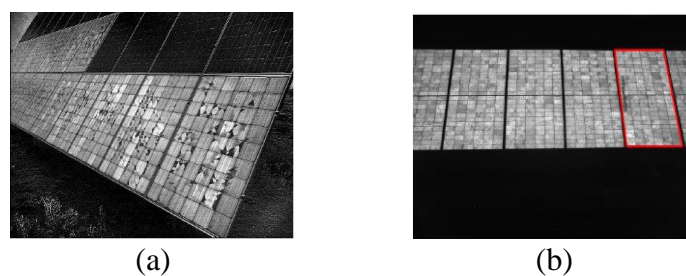
Az 1. (c) ábra már egy teljesen más felállást mutat, ahol már nem feltétel a napelem panelek tartószerkezetéről történő eltávolítása, ezzel jelentős időráfordítás megspórolható. A tesztkörnyezetként szolgáló sötét kamra panelről-panelre gördíthető, annak mélysége attól függ, hogy a kamera egy felvételt készít az egész panelről, vagy pásztázó módon több képet egy-egy panelről. Utóbbi esetben jóval kisebb térfogatú kamra is elegendő.

Az 1. (d) ábra az abszolút gyakorlati alkalmazást mutatja, a 2. ábra pedig a teszteredményeit mutatja annak a vizsgálatnak, ahol nincs szükség lesötétített tesztkörnyezetre. Az eljárás kivitelezésével szemben támasztott követelményeket az International Standard IEC/TS 60904-13 Ed.1.0 nevű szabvány részletezi. A módszertana szerint akár nappal is elvégezhető, de érdemes lehet inkább éjszaka kivitelezni a környezeti fényinterferencia csökkentése érdekében. A látható fénytartomány ezért nem, vagy csak elhanyagolható mértékben befolyásolja a mérést, mivel az ekkor használatos elektrolumineszcencia kamerák érzékelője InGaAs (indium-gallium-arzenid) anyagú. Az InGaAs félvezető szenzor csak a 800 – 1800 nm hullámhossz tartományba eső fotonokat érzékeli, így a látható fénytartomány nem, ellenben a légkörből származó közel infravörös sugárzás befolyásolhatja a mérést [4, 5, 6].



1. ábra: Az elektrolumineszcencia vizsgálat különböző módszertant igénylő megoldásai.

Az 1. ábra és az ahhoz fűzött leírás alapján talán az a következtetés is levonható, hogy egy tudományos-laboratóriumi vizsgálat sokkal időigényesebb folyamat a szállítás és mérőegységbe való ki- és bepakolás miatt. Ellenben egy leszerelés nem igénylő szabadtéri vizsgálat során az egy panelre jutó időráfordítás jelentősen lecsökkenhet. Az elektrolumineszcencia vizsgálat a napelem panelek nyitó és záróirányú előfeszítésében egyaránt elvégezhető. A két módszer között jelentős eltérések fedezhetők fel. A nyitóirányú vizsgálat elterjedtebb, ennek megfelelően az állapotfelmérések során is ez a bevett gyakorlat.

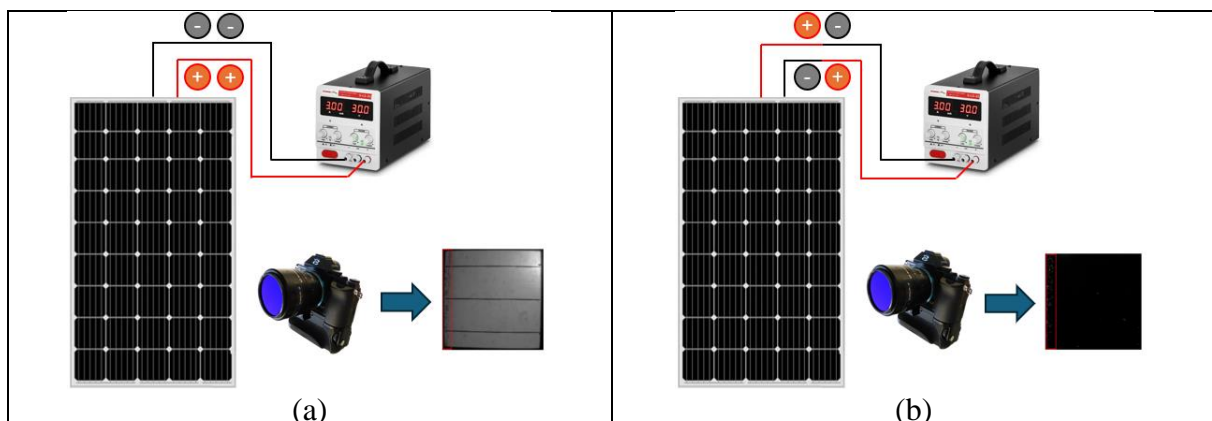


2. ábra: Helyszínen, nyílt környezetben végzett elektrolumineszcencia vizsgálat eredményei.

2. A NYITÓ- ÉS ZÁRÓIRÁNYÚ ELEKTROLUMINESZCENCIA VIZSGÁLAT ÖSSZE-HASONLÍTÁSA

A nyitóirányú vizsgálat során a napelem cellákon átfolyó áram iránya megegyezik a normál működés során tapasztalható áramiránnyal. Ez hasonló ahhoz, ahogy a cellák áramot termelnek a normál működés során, amikor a napfény elektromos árammá alakul. Ekkor a panel pozitív csatlakozóját kötjük a tápegység pozitív kimenetére, a negatív csatlakozót a negatív kimenetre. A nyitóirányú teszt során a paraméterek beállításakor arra kell törekedni, hogy a teljesítmény és panel feszültségének értéke munkaponti vagy ahhoz közeli értéket vegyen fel, az áram a rövidzárási érték 70-100%-a. Amikor az áram átfolyik a napelemeken, fotonokat bocsátanak ki az infravörös tartományban (elektrolumineszcencia), ha a cellák megfelelően működnek. A nyitóirányú teszt eredményén a világos területek hibamentes cellákat, a sötét területek pedig hibákat jeleznek. A nyitóirányú teszt valós működési feltételeket szimulál, a mikrorepedések jobban láthatók, mint záróirányú teszt esetén. Továbbá a törött cellák, letört és inaktívvá vált cellarészek, valamint az elektróda, hot-spot és anyagminőségbeli hibák is jól megfigyelhetők a teszt végeredményében. A gyártói minőségbiztosítás és az állapotfelmérések során egyaránt alkalmazható, sőt javasolt, mivel kis valószínűséggel okoz kárt a panelben. A valós működési feltételeket tükrözi, megkönnyítve a teszteredmények és a tényleges teljesítmény közötti összefüggést. Azonban, ha a napelem rövidzárlatos vagy súlyosan megsérül, előfordulhat, hogy a nyitóirányú előfeszítés nem fedi fel az összes belső hibát, mivel az áram megkerülheti a sérült területeket [7].

A záróirányú vizsgálat során az áram a napelemek normál működésével ellentétes irányú. Ekkor a panel pozitív csatlakozóját kötjük a tápegység negatív kimenetére, a negatív csatlakozót a pozitív kimenetre. A záróirányú miatt a paraméterek beállítása jelentősen eltér a panelek normál üzemi értékeitől. A vizsgálati feszültség megválasztása a panel karakterisztikájától függ, jellemzően a munkaponti érték többszöröse is lehet. Ezt a módszertant jellemzően csak a tudományos kutatások során javasolt alkalmazni, mert nagy valószínűséggel okoz kárt a panelben. Nagy körültekintéssel kell eljárni a panelra kapcsolt feszültség növelésekor mert az átfolyó áram hirtelen megemelkedhet és akár teljesen tönkre is teheti a panelt. A záróirányú teszt kevésbé érzékeny a mikrorepedésekre, ellenben jobb a sönthibák és réteghibák felderítésében. Olyan stresszhelyzeteket szimulál, amelyek a mindennapi normál működés (energiatermelés) közben általában nem fordulnak elő. Előnye, hogy feltár olyan hibákat melyeket a nyitóirányú tesztelés nem, vagy csak alig. Így a világos foltok a sönthibákat jelzik, a sötét területek szintén hibákat mutatnak. Az 1. táblázat szolgál a két eljárás közti különbségek összehasonlításának áttekintésére [7].



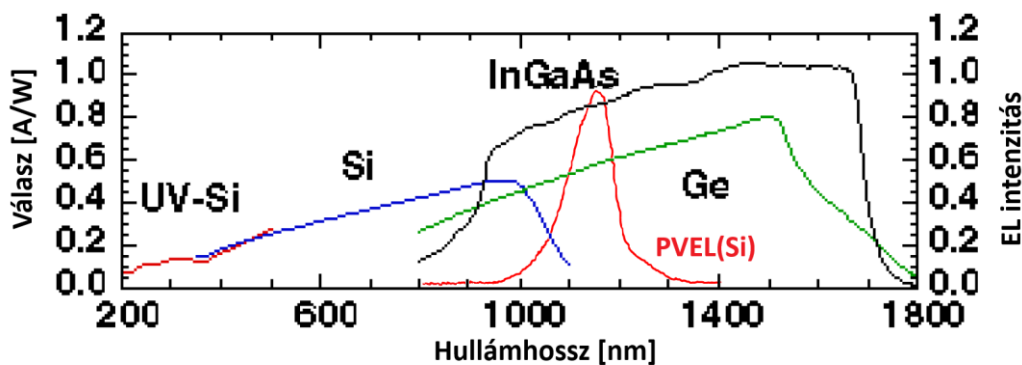
2. ábra: A nyitó és záróirányú tesztelés elvi vázolata.

1. táblázat: A nyitó- és záróirányú elektrolumineszcencia teszt összehasonlítása.

Jellemző	Nyitóirányú EL teszt	Záróirányú EL teszt
Áram irány	Ugyanaz, mint a normál működés esetén (nyitóirányú áram)	Ellentétes, mint a normál működés esetén (záróirányú áram)
Teszt körülmény	Valós működési feltételeket szimulál	Olyan stresszhelyzeteket szimulál, amelyek működés közben általában nem fordulnak elő
Mikrorepedések láthatósága	A mikrorepedések és részleges cellahibák kimutatására alkalmas	Kevésbé érzékeny a mikrorepedésekre, de jól megjeleníti a réteg- és sönthibákat
Sönthibák láthatósága	A sönthibák gyengébb láthatósága	A söntölt cellák és a finom hibák jól láthatósága
Általános felhasználás	Ipari minőségellenőrzés, a gyártástámogatásra jellemző	Gyakoribb a kutatásban és a hiba-elemzésben, a fejlett diagnosztikában használatos
Károsodás esélye	Alacsony, mivel a tipikus működést utánozza	Magasabb, mivel a túlzott fordított feszültség károsíthatja a cellákat
Kép értelmezése	A világos területek hibamentes cellákat, a sötét területek pedig hibákat jeleznek	A világos foltok a sönthibákat jelzik, a sötét területek szintén hibákat mutatnak

3. A KAMERÁVAL SZEMBEN TÁMASZTOTT ELVÁRÁSOK

A napelemek elektrolumineszcencia (EL) tesztelésére szolgáló kamera kiválasztásakor számos tényezőt fontos figyelembe venni, melyek jellemzően a napelem cellák által kibocsátott fény jellemzői és a tesztkörnyezetben meglévő elektromágnesen sugárzás befolyásol. Ezen tényezők közé tartozik az infravörös (IR) fényre való érzékenység, a szenzor felbontás, a hűtési képesség és a tesztelési környezettel való kompatibilitás (pl. beltéri vagy kültéri használat). Mivel az EL képalkotás a napelemek gyenge infravörös sugárzásának rögzítésén alapul, a kamerának érzékenynek kell lennie a közeli infravörös (NIR) hullámhosszokra [1, 3, 4].



3. ábra: A különböző anyagú kamera szenzorok foton elnyelő tulajdonsága és a szilícium alapú cellák foton emissziója.

Amint az áram átfolyik a panelen, a modulon belüli cellák halvány infravörös közeli fényt

bocsátanak ki, ha megfelelően működnek. A 3. ábrán látható, hogy a különböző anyagú szenzorok milyen hullámhossz tartományban érzékelik az elektromágneses sugárzás fotonjait.

A 3. ábra alapján jól látható, hogy az általános, mindennapi használatra szánt szilícium (Si) alapú szenzort alkalmazó kamerák kifejezetten érzékenyek a látható fény tartományára (390 - 750 nm), ennek okán kell a tesztet gyenge fényviszonyok között vagy sötét környezetben elvégezni, mivel a szórt fény csökkentheti a képminőséget és a pontosságot. Továbbá a germánium (Ge) és indium-gallium-arszenid (InGaAs) szenzorokhoz képest kisebb az egyezés a panelek által kibocsátott fény (PVEL(Si)) hullámhosszának tekintetében. A panel hőmérsékletét érdemes mérni és szűk határok között tartani, a hőmérsékleti zajok elkerülés érdekében, amelyek megzavarhatják a vizsgálati eredményeket [2, 3, 5, 7].

Az elektrolumineszcencia kamerával szemben támasztott általános elvárások:

Hullámhossz-érzékenység: A kamera szenzorának (InGaAs) érzékenynek kell lennie a 900-1700 nm-es tartományra, hogy rögzítse az EL-teszt során kibocsátott infravörös fényt.

Felbontás: A nagy felbontású kamerák lehetővé teszik az apró hibák, például mikrorepedések és sötét részletes észlelését. Általában a 640×512 pixeles vagy nagyobb felbontást részesítjük előnyben.

Hűtés: A termoelektromos (TE) vagy Stirling hűtőrendszerek meglehetősen fontos a hőmérsékleti zajok csökkentésében és a képtisztaság javításában, különösen gyenge fényviszonyok mellett.

Képfriasság: A nagyobb képkockasebesség (pl. 100-300 Hz) gyorsabb képkalkotást tesz lehetővé, ami előnyös lehet ipari környezetben, ahol sok modult gyorsan kell tesztelni.

4. A BYPASS DIÓDA SZEREPE

A bypass diódák jelentősen befolyásolhatják az elektrolumineszcencia (EL) tesztelés sikerét és pontosságát, különösen a hibák észlelésében és értelmezésében. A bypass diódákat általában a napelemekbe integrálják, hogy megvédjék a cellákat a túlmelegedéstől és a károsodástól részleges árnyékolás vagy cella meghibásodás esetén. Ezek a diódák lehetővé teszik, hogy az áram megkerülje a sérült vagy árnyékolt cellákat, ami befolyásolhatja az EL-teszt eredményeit.

Ha a bypass dióda aktív, az nyitóirányban előfeszített tesztelés során az áram megkerüli a diódával védett cellákat. Ennek eredményeként ezek a cellák nem bocsátanak ki elektrolumineszcencia fényt, ami megnehezítheti a hibák észlelését az áthidalt régióban. Az adott szakasz cellái inaktívak maradnak a teszt alatt, és az ezekben a cellákban lévő hibák, például mikrorepedések vagy elektróda hibák nem lesznek láthatók az EL-képen, ami hiányos vagy pontatlan eredményekhez vezet. Leggyakrabban a teljes panel sötét marad az EL képen, mert a diódák ellehetetlenítik a vizsgálat elvégzését. A pontos EL-teszt biztosítása érdekében a bypass diódákat át kell hidalni vagy ideiglenesen ki kell iktatni a tesztelés során, lehetővé téve az áram áthaladását az összes cellán.

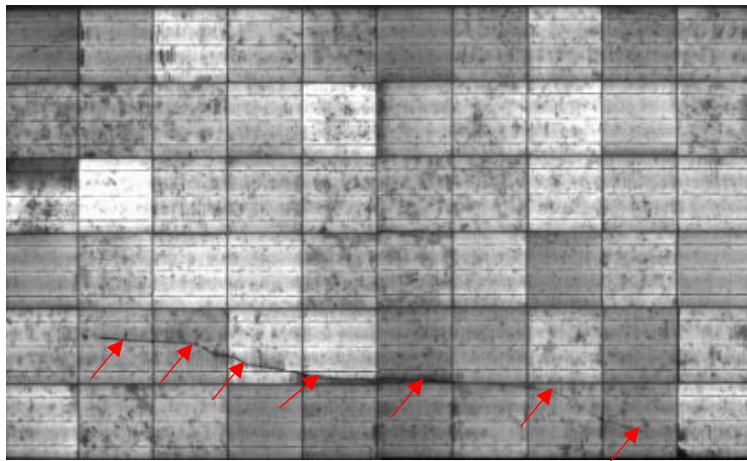
A záróirányú előfeszítés EL-tesztjében a bypass diódák a nyitóirányú teszthez hasonlóan megakadályozhatják a fordított feszültség megfelelő alkalmazását az általuk védett cellákon, ami korlátozhatja a hibák észlelésének képességét. Általános tapasztalat, hogy a záróirányú teszt teljesen hatástalan lehet, ha a bypass diódák megakadályozzák, hogy az áram eljusson a panel fényérzékeny szilícium részeihez. Ellenben, egyes esetekben a bypass dióda elengedhetetlen annak biztosítására, hogy a tesztelési folyamat ne okozzon túlzott igénybevételt a sérült cellákban. Például nagyon sérült cellák tesztelésekor a dióda megkerülése túlzott áramáthaladást okozhat, és tovább ronthatja a cellákat.

5. GARANCIÁLIS HIBÁK FELDERÍTÉSE

Az utóbbi években gyakran látnak napvilágot olyan beszámolók melyek a 30-40 évvel ezelőtt épített napelemes erőművek állapotfelméréséből származó adatokat közlik, rendszerint jó hírekről beszámolva. Miszerint ezek az erőművek évtizedek óta tartják az elvárható teljesítményromlási feltételeket. Azonban hozzá kell tenni, hogy ezek a projektek akkoriban presztízsberuházások voltak, nagy körültekintéssel, hozzáértő emberek méretezték, tervezték és építették meg. Ellenben a mai gyakorlat nem minden esetben egyezik a korábbival, mivel ma már nagyléptékben épülnek napelemparkok lehetőleg minél olcsóbb alapanyagokból és nem feltétlenül hozzáértő kezek alatt.

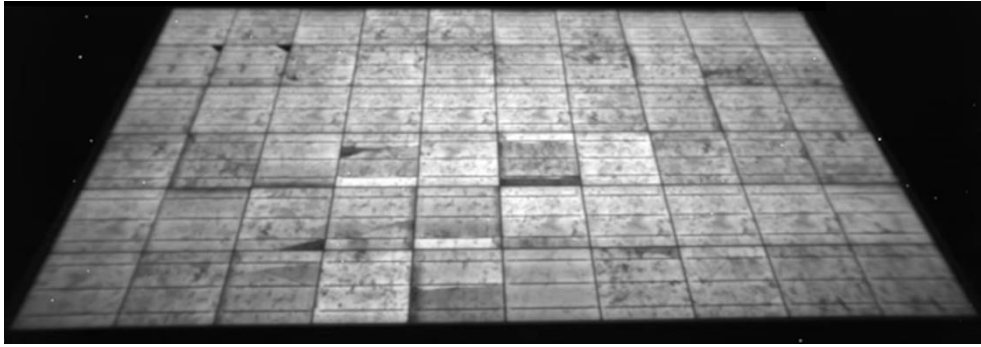
Az utóbbi években megszorodtak a garanciális viták a megrendelők, telepítőcégek és gyártócégek között. Azonban a sorból nem szabadna kifelejteni a szállítványozó cégeket sem. A gyártócégeket terhelik a gyártási hibák elhallgatása, a szállítócégeket a nem megfelelő szállítási körülményekkel előidézett károsodások és a telepítőket az építés során okozott sérülések és szakszerűtlen kivitelezés és tervezés. Ezalatt a megrendelők felelőssége abban rejlik, milyen körültekintéssel választanak maguknak üzleti partnereket.

A 4. ábrán látható panel összességében jó állapotú is lehetne, de egy nagy, az alsó két cellasoron átívelő repedés látható a piros nyilakkal jelölve. Ez a repedés valójában egy hátoldali karcolás eredménye, ami többféle módon és időpontban is keletkezhetett, akár a gyárban, akár szállításkor, vagy akár telepítéskor egyaránt. Az ilyen és ehhez hasonló hibák jól alátámasztják azt a ténymegállapítást, hogy célszerű lehetne a napelem panelek mindenkori állapotának nyomon követése legalább szűrőpróbaszerűen a gyártól az erőben történő telepítésig.

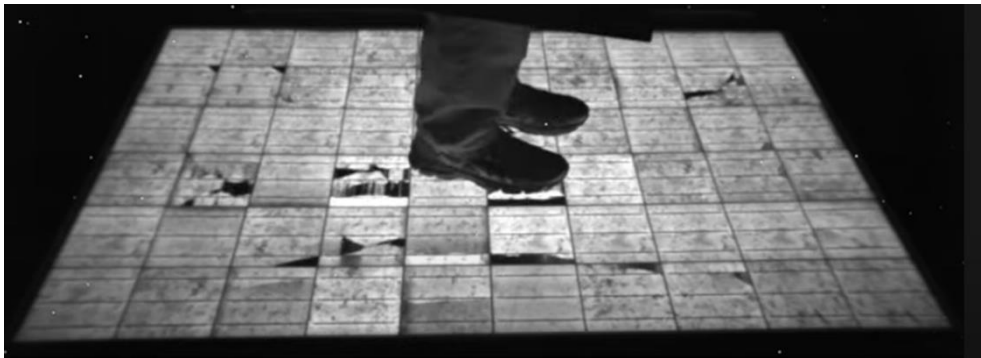


4. ábra: Egy hátoldalán sérült erőművi napelem panel elektrolumineszcencia képe.

Az 5. és 6. ábrán látható felvételeket az NREL (National Renewable Energy Laboratory, USA) készítette [8]. Az 5. ábra abban az esetben mutatja a napelem panel állapotát, mikor az nem kap terhelést, nyugalomban felfekszik egy felületre és csak az önsúlyát tartja. Már így is fedezhetőek fel benne törések, inaktív cellarészek. Amikor egy ember súlya még ránehezedik a panel felületére, azon olyan feszültségeket ébreszt, hogy a már meglévő sérülések állapota tovább romlik, míg a fennáll az erőhatás. Ezt az állapotot a 6. ábra szemlélteti. Előfordulhat, hogy a sérülések állapota nem tér vissza a kiinduló állapotba, hanem fennmarad a nagyobb mértékű károsodottság. Amennyiben az ilyen és ehhez hasonló erőhatások gyakran előidéződnek és hosszabb távon fennállnak, akkor súlyos károk keletkezhetnek a szilícium félvezető anyag szerkezetében. A károsodás nem visszafordítható, idővel tovább romlik a napelem panel állapota, ami a villamos paraméterek és teljesítmény csökkenéséhez vezet.



5. ábra: A napelem panel EL képe terhelés előtt [8].



6. ábra: A napelem panel EL képe, mikor rálép egy felnőtt ember [8].

6. ÖSSZEFOGLALÁS

Az elektrolumineszcencia (EL) teszt elvégzése egy napelem modulon elengedhetetlen annak minőségének értékeléséhez, és olyan hibák észleléséhez, mint a mikrorepedések, törött cellák vagy rossz csatlakozások, amelyek befolyásolhatják a teljesítményt. Ez a noninvaszív teszt vizuálisan ábrázolja a modul belső szerkezetét, és felfedi az emberi szem számára rejtett problémákat. Az EL-tesztelés nem károsítja a modult (legalább is nyitóirányban csekély eséllyel), és megfelelő felszereléssel akár leszerelés nélkül is biztosítja az ellenőrzést.

Nagyon részletes képet biztosít a panel állapotáról, azonban a felvétel alapján nehéz a villamos paraméterek értékeire becslést adni, habár léteznek már erre is összefüggések. Ugyanakkor a gyártói oldalról nézve a minőségbiztosítási folyamatban nélkülözhetetlen. Ellenben, tudományos kutatólaboratóriumokban a záróirányú tesztekkel a normál esetektől eltérő stresszkörülmenyek előidézését is lehetővé téve, jobban lehet megérteni a hibák kialakulását és azok a napelem panelek működésére gyakorolt hatását.

Üzemeltetői/tulajdonosi szempontból is perdöntő lehet garanciális viták esetén. Ma már elég nagy ismeretanyag gyűlt össze annak köszönhetően, hogy világszerte kutatott tématerület. Jól elkülöníthetők, gyártási hibákból és egyéb okokból kifolyólag szerzett sérülések. Széles körben ismertek ajánlások a szállításra és tárolásra vonatkozóan, továbbá a telepítéshez kapcsolódóan egyaránt. Ellenben számos kivitelező vagy nem tud ezekről az ajánlásokról, vagy veszi azokat figyelembe. Mit sem bizonyítanak azok az akár elektrolumineszcencia vizsgálattal is kimutatható negatív tapasztalatok, melyek perdöntő bizonyítékként szolgálhatnak garanciális hibaesetekben.

7. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

„A KULTURÁLIS ÉS INNOVÁCIÓS MINISZTERIUM ÚNKP-23-4 KÓDSZÁMÚ ÚJ NEMZETI KIVÁLÓSÁG PROGRAMJÁNAK A NEMZETI KUTATÁSI, FEJLESZTÉSI ÉS INNOVÁCIÓS ALAPBÓL FINANSZÍROZOTT SZAKMAI TÁMOGATÁSÁVAL KÉSZÜLT.”



8. FELHASZNÁLT IRODALOM

- DHIMISH, M., TYRRELL, A.M.: *Optical Filter Design for Daylight Outdoor Electroluminescence Imaging of PV Modules*, Photonics 11. 63. 2024.
- SOVETKIN, E., PIETERS, B.E., GERBER, A., STOICESCU, L., KOELBLIN, P.: *Fast Cell Detection and Distortion Correction for Outdoor Electroluminescence Images*, 2023 IEEE 50th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), San Juan, PR, USA, pp. 1-6. 2023.
- ISHIKAWA, Y.: *Outdoor evaluation of photovoltaic modules using electroluminescence method*, JSAP Review 2022. 2022.
- V.E., PURANIK, R., KUMAR, R.: *GUPTA Progress in module level quantitative electroluminescence imaging of crystalline silicon PV module: A review*, Solar Energy 264. 111994. 2023.
- REDONDO-PLAZA A., ZORITA-LAMADRID Á.L., ALONSO-GÓMEZ V., HERNÁNDEZ-CALLEJO L.: *Inspection techniques in photovoltaic power plants: A review of electroluminescence and photoluminescence imaging*, Renewable Energies 2. no. 2. 2024.
- Guada, M., Moretón, Á., Rodríguez-Conde, S., Sánchez, L.A., Martínez, M., Miguel González, Á., Jiménez, J., Pérez, L., Parra, V., Martínez O.: *Daylight luminescence system for silicon solar panels based on a bias switching method*, Energy Science and Engineering 8. No. 11. pp. 3839-3853. 2020.
- Kunz, O., Schlipf, J., Fladung, A., Khoo, Y.S., Bedrich, K., Trupke, T., Hameiri, Z.: *Outdoor luminescence imaging of field-deployed PV modules*, Progress in Energy 4. No. 4. 042014. 2022.
- YouTube, NREL Learning, <https://www.youtube.com/watch?v=-qdyxIybmoc>

AZ ELSŐ NAPELEM ELEKTROLUMINESZCENCIA KÉPEK AZ EEIT LABORATÓRIUMÁBAN

THE FIRST SOLAR ELECTROLUMINESCENCE PICTURES IN THE DOEE LABORATORY

MATUSZ-KALÁSZ Dávid¹, JOBBÁGY Marcell²

¹PhD, egyetemi adjunktus, david.matusz-kalasz@uni-miskolc.hu

¹Miskolci Egyetem, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet, Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék, 3515 Miskolc-Egyetemváros

²tanszéki mérnök, marcell.jobbagy@uni-miskolc.hu

²Miskolci Egyetem, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet, Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék, 3515 Miskolc-Egyetemváros

Kivonat: *A nemzetközi tudományos irodalmat átvizsgálva vetődött fel annak a lehetősége, hogy egy hétköznapi, általános használatra szánt digitális kamera átalakításával érzékelhetővé válik a közel infravörös tartomány (NIR). Ez által elektrolumineszcens képek készíthetők napelemekről, mivel a napelemekre kapcsolt feszültség hatására azok 800 nm hullámhosszúságú fotonokat bocsátanak ki. Az átalakítás, ami az infratükör eltávolítását jelentette, sikeres volt, így elkezdődhetett az Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék (EEIT) Napelemes Laboratóriumában megtalálható napelem cellák vizsgálata.*

Kulcsszavak: *napelem, digitális fényképezőgép, elektrolumineszcens*

Abstract: *After reviewing the international scientific literature, the possibility was raised that the near-infrared range (NIR) can be detected by converting a consumer grade digital camera intended for general use. In this way, electroluminescent images can be taken of solar cells, since they emit photons with a wavelength of 800 nm as a result of the voltage connected to the solar cells. The transformation, which meant the removal of the infrared mirror, was successful, so the examination of the solar cells found in the Solar Laboratory of the Department of Electrical Engineering and Electronics (DoEE) could begin.*

Keywords: *solar cell, digital camera, electroluminescence*

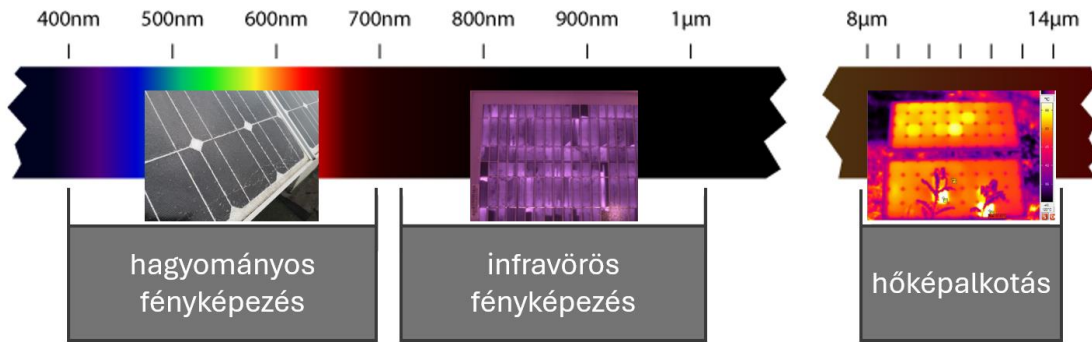
1. BEVEZETÉS

A degradáció egy alkatrész vagy egy rendszer paramétereinek a fokozatos romlása, amely befolyásolja és folyamatosan rontja a működési értékeit. Mivel természetes és gyakorlatilag elkerülhetetlen folyamatról van szó az elsődlegesen elérendő cél, hogy a termék a lehető legtovább az elfogadhatóság határain belül működjön. A fotovoltaikus paneleknek és rendszereknek a degradáció ellenére is képeseknek kell lenniük hosszú távon ellátni az elsődleges funkciójukat, ami az energiatermelés, még akkor is, ha a működésük az idő előrehaladtával már nem optimális. A gyártók szerint a napelempaneleknek 25 év elteltével is meg kell őrizniük a teljesítményük 80%-át.

Az elmúlt évek során a napelemes rendszerek állapotfelmérésére számos módszer terjedt el, melyeket in-situ és ex-situ csoportra oszthatunk. Az in-situ, azaz helyben történő, megbontás és beavatkozás nélküli állapotfelmérések előnye, hogy a rendszer működését minimális mértékben befolyásolják. Ilyen módszernek tekinthető a termográfiai hibakeresés. Az ex-situ állapotfelmérés során, a rendszer megbontásával a rendszerelemeket további vizsgálatoknak lehet alávetni, amelyek laboratóriumi körülmények között pontos és részletes képet adnak a meghibásodások okáról és mértékéről [1, 2, 3].

Az elektrolumineszcencia teszt az egyik legjobb ex-situ vizsgálati módszer, amely teljes képet ad a napelemek fizikai állapotáról. Az elektrolumineszcencia optikai és elektromos jelenség, ahol egy anyag fényt bocsát ki elektromos áram vagy elektromos mező hatására. Amikor a

fotovoltaikus cellára feszültséget kapcsolunk, fotonokat emittál. Ahol alacsony az emisszió, vagy egyáltalán nem detektálható foton, ott hibára gyanakodhatunk. Az emittált fotonok hullámhossza (~800 nm) az infravörös közeli tartományba esik (NIR – Near Infra Red), ezért az emberi szem és a hétköznapi használatra szánt digitális kamerák nem képesek érzékelni. Ahogy az 1. ábra mutatja az infravörös fotózás érdekében módosítani kell a kamera felépítésén, mivel a legtöbb digitális kamera szenzora 1000 nm hullámhosszig képes fotonokat érzékelni.

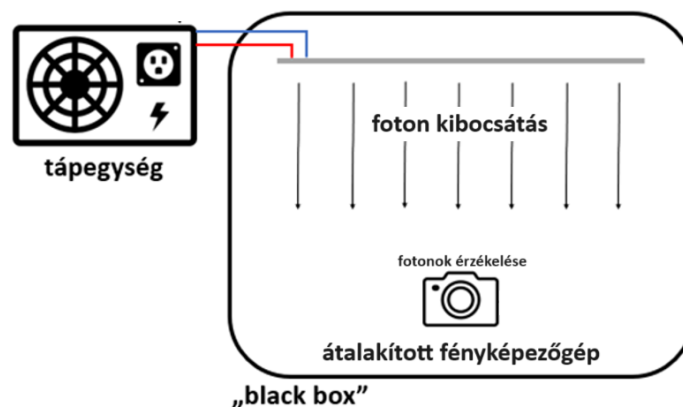


1. ábra: A hagyományos fényképezéshez, az infravörös fényképezéshez és a hőképképzéshez tartozó foton hullámhossz tartományok.

2. SZOLÁR ELEKTROLUMINESZCENCIA VIZSGÁLAT

Az elektrolumineszcencia (EL) vizsgálatok során átfogó és rendkívül szemléletes képet kaphatunk akár egy teljes napelemmodul állapotáról. A vizsgálat végeredménye valóban egy digitális fénykép, amely könnyen feldolgozható akár manuálisan, akár szoftver segítségével. A felvétel elkészítéséhez a fényérzékeny szilícium rétegnek fényt kell kibocsátania annak abszorbeálása helyett. Ez úgy lehetséges, hogy a vizsgálat során a modulra feszültséget kell kapcsolni, amely hatására áram indul meg, ekkor a modul fogyasztóként működik a generátoros üzem helyett [4, 5].

A 2. ábra alapján egy burkolat által létrehozott „sötét doboz” (black box) felső vagy egyik oldalsó része nyitott vagy nyitható, ahová a vizsgálandó panel felerősíthető. Előnyös, ha a rögzítésre szolgáló szorító mechanizmus nem igényel szerszámot, valamint zárása és oldása is gyors és egyszerű.



2. ábra: A elektrolumineszcencia tesztberendezés elvi felépítése. [3]

A mérőrendszerben egy tápegység szolgáltatja a szükséges feszültséget és áramot, ami a

szilícium cellákat átjárva a fotonok emisszióját okozza. A manapság egyre népszerűbb LED fényforrások látható fényt bocsátanak ki fogyasztóként, azonban a napelemek szilícium cellái az emberi szemmel nem érzékelhető infravörös közeli sugárzást (NIR) bocsátanak ki. A napelemcellák hibáinak feltárásához olyan kamera szükséges, amely érzékeli ezt a sugárzást és láthatóvá teszi. A felvételeken már jól elkülöníthetővé válnak többek között a fényes és működő, valamint a működésképtelen és sötét felületű cella részek, cellahibák [1, 2, 3].

Csak speciális, a célra tervezett és kialakított fényképezőgép típusok használhatók, ugyanakkor, egy hétköznapi életben használatos kamera (2. ábra) is átalakítható a feladat elvégzéséhez az infratükör eltávolításával [4, 5]. A fejlesztési folyamat első lépésében egy vázszerkezet által egyben tartott sötét doboz épült meg, valamint átalításra került egy digitális fényképezőgép.

3. DIGITÁLIS FÉNYKÉPEZŐGÉP ÁTALAKÍTÁS

A digitális fényképezőgépekben használt CCD, illetve CMOS szenzorok képesek érzékelni az 1000 nm hullámhosszt is, tehát igen érzékenyek a közeli infravörös tartományra. Ez a tulajdonságuk megnehezítené a hétköznapi életben megkívánt fotózást, ezért a szenzor elé minden esetben beépítenek egy infratükört, ami az infravörös fény jelentős részét kirekeszti. Az infratükör egyszerű, de kockázatos eltávolításával fényképezőgép számára érzékelhetővé válik az közel infravörös (NIR) tartomány [6].

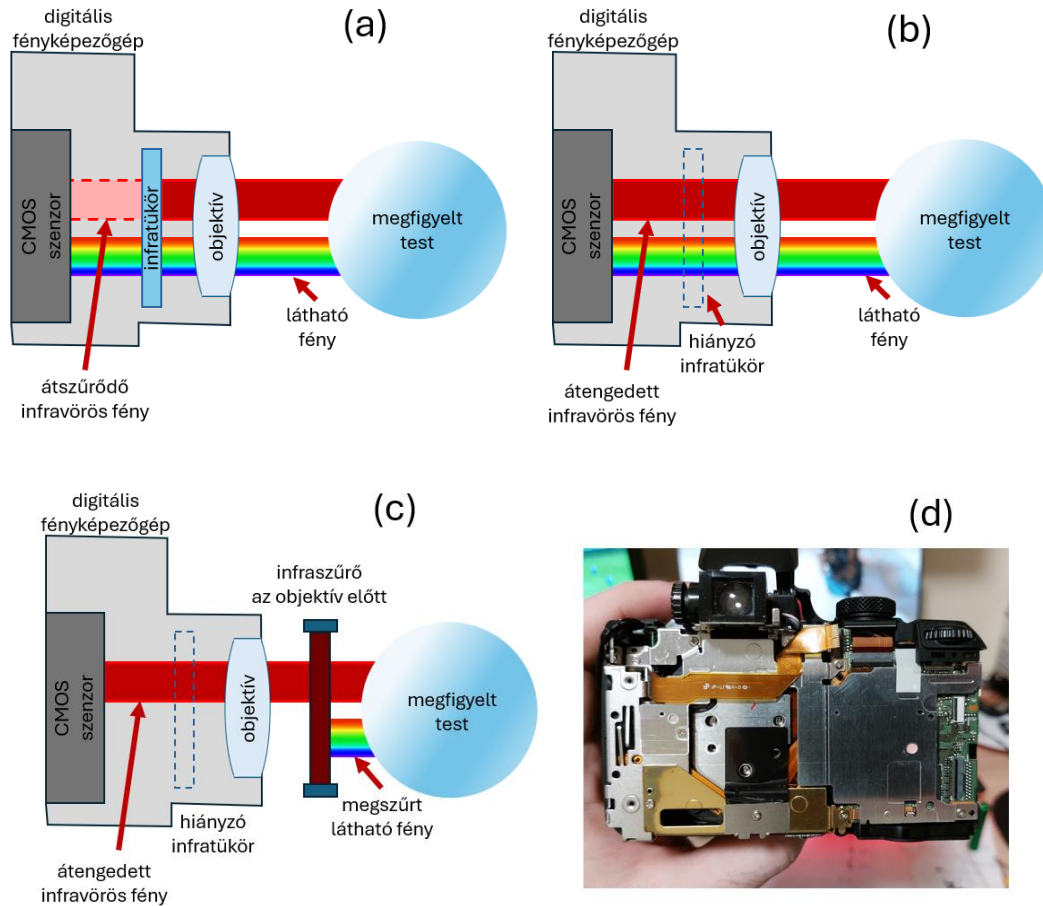
Az átalakításra szánt digitális fényképezőgép legfontosabb műszaki jellemzői:

Név: Nikon Coolpix B700
Szenzor felbontás 21,14 megapixel
Effektív felbontás 20,3 megapixel
Szenzor típus BSI-CMOS
Érzékenységi ISO 100-3200
Szenzor méret 1/2,3" (1/..)
Felbontások 5184 × 2920, 5184 × 3456, 5184 × 3888
Rekesz nyitott: f/3,3 – f/6,5

Ahogy a 3. (a) ábra mutatja, a fényképezőgépbe helyezett infratükör miatt az objektíven áthaladó fény infravörös összetevőjének csak elenyésző része éri el a szenzort. Az infratükörön a látható fény tartomány egyszerűen áthalad, ami megközelítőleg 400 – 700 nm hullámhosszú fényt jelent. Így a fényképezőgépek olyan képet készítenek, melyek a valóságban az emberi szem által látott képet színhűen visszaadják [6].

Ellenben a napelem panelek által kibocsátott fotonok hullámhossza ~800 nm körül van. Ez az érték már a közel infravörös (NIR) tartományba esik. Ezek a fotonok csak abban az esetben érhetik el a szenzort, ha az infratükör eltávolításra kerül a 3 (b) ábrának megfelelően. A besötétített kamrára azért van szükség, mert az a látható fényt és egyéb az infravörös tartományba eső fotonokat kizárja a megfigyelt területről.

A vizsgálat eredményét a 3. (c) ábrának megfelelően úgy lehet tovább javítani, ha olyan szűrőlencsét alkalmazunk, amely nem engedi, hogy a szenzor érzékelhesse a látható fény tartományát. A 3. (d) ábra egy pillanatképet mutat az átalakítási műveletből. Az érzékelő és az infratükör a gép belsejében van, így a szétszerelés és összeállítás hosszadalmas folyamat, amely során apránként lehetséges a készülék bontása.



3. ábra: (a) A digitális fényképezőgép normál működése;
 (b) A fényképezőgép fényérzékelése az infratükör nélkül.
 (c) Az infratükör nélküli fényképezőgép fényérzékelése az objektív elé helyezett infraszűrővel.
 (d) Az átalakítási folyamat egy pillanatképe.

4. A NAPELEMES LABORÁTÚRIUMBAN ELKÉSZÍTETT ELSŐ SZOLÁR ELEKTRUMINESZCENCIA KÉPEK

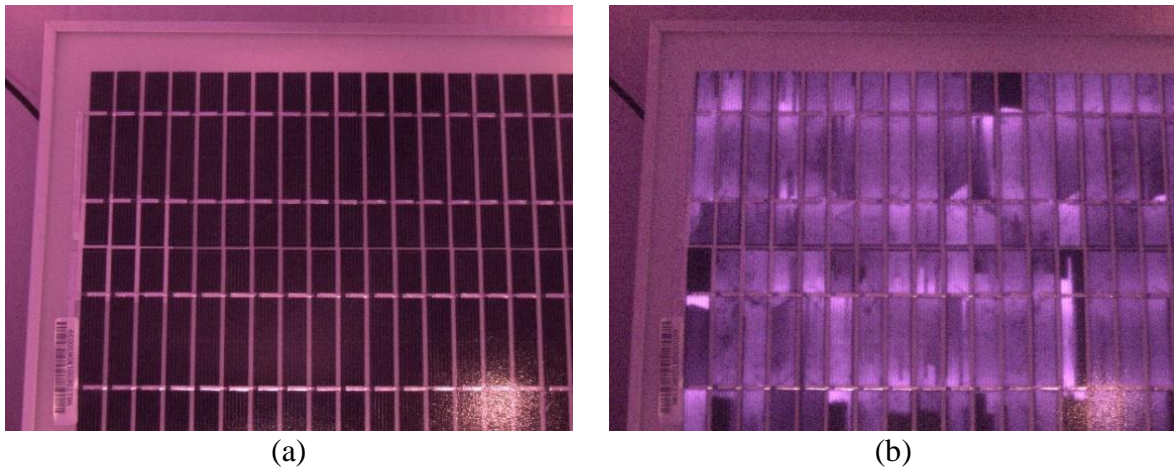
A módválasztó tárcsával az „M” jelű manuális mód kiválasztása után a menüben a „Picture Control” menüpontban kiválasztásra került a „Monokróm” beállítás, ami lehetővé teszi a fekete-fehér vagy szépiá képek készítését. Ezen belül a kontraszt a minimális értékre lett beállítva.

Az elkészített elektrolumineszcencia képeket a fényképezőgép a Nikon saját NRW, valamint JPG fájlkiterjesztésben menti. Az eddigi tapasztalatok azt mutatják, hogy a fényképezőgép által automatikusan létrehozott JPG fájl típus sokat ront a minőségen. Ellenben az NRW fájlok kezeléséhez speciális szoftver szükséges. Minden esetben az aktuális beállítás által megengedett leghosszabb expozíciós idő és a lehető legkisebb F-érték mellett szükséges a képeket elkészíteni.

A 4. ábra egy 5 Wp polikristályos napelem panelt mutat. A 4. (a) ábrán a próbateszt előtti állapotban a panelre még nincs feszültség kapcsolva, a kép jobb alsó sarkában a tükröződést a még nem tökéletes besötétítés okozza. Ekkor a sötét kamra szerepét egy kartondoboz töltötte be, a digitális fényképezőgép pedig a kamrán kívül helyezkedett el, így a résen beszűrődött némi fény.

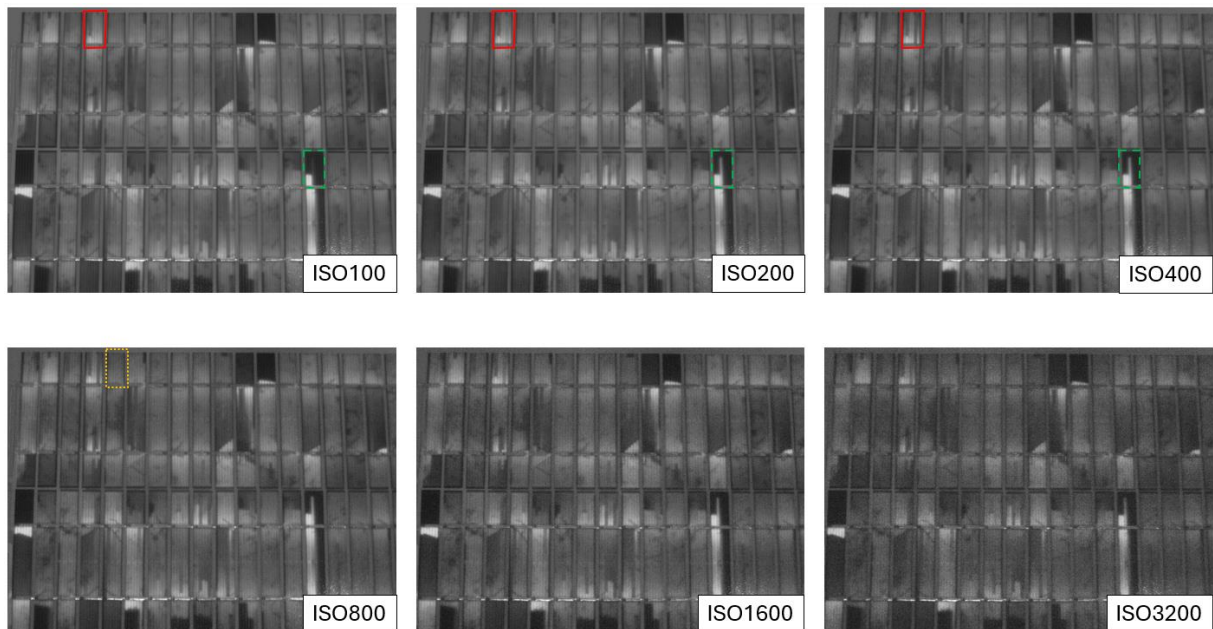
A 4. (b) ábrán a napelem panelre rá lett kapcsolva az üresjárású feszültség és a meginduló

rövidzárási áram beindítja a foton emissziót. A képen azonnal megfigyelhetők és egymástól jó megkülönböztethetők a sötét, károsodott részek, és a világos, működőképes cellaelemek. Többek között megfigyelhetők repedések, elektródahibák és teljesen inaktív cella-elemek.



4. ábra: (a) A próbateszt megkezdése előtt készített nyers kép;
(b) Az első kép a feszültség alá helyezett napelem panelről.

Az 5. ábra szemlélteti az ISO érzékenység megválasztásának az elkészült kép minőségére gyakorolt hatását. A piros téglalappal jelült képrészleten ISO100 érzékenységnél nem látszik egy elektródahiba, azonban ISO400 érzékenységnél megjelenik, valamint a zöld szaggatott vonalú téglalappal jelölt képrészleten is megfigyelhető javulás. A legjobb minőséget ISO800 érzékenység beállításánál sikerült elérni, e feletti érték inkább rontott a minőségen.



5. ábra: Az ISO érzékenység megválasztásának hatása.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

Az előzetesen kitűzött célt sikerült megvalósítani, elkészültek az első szolár elektrolumineszcencia képek az Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék Napelemes Laboratóriumában. A próbateszt elvégzéséhez kiválasztott, már évek óta oktatási és kutatási használatban lévő napelem panel számos az elektrolumineszcencia vizsgálat során kimutatható hibatípust fel tud mutatni. Ez a siker ösztönzőleg hat a kutatás folytatására és a tesztberendezés végső finomhangolására.

A Tanszék egy olyan, a Miskolci Egyetemen egyedülállónak számító berendezéssel gazdagodott, amire később mérföldkőként lehet majd visszatekinteni a tanszék történelmében. A fejlesztés nagyon hasznos szolgáltatásokat fog tenni a jövőben mind az oktatás és kutatás, mind a beiskolázási és egyéb rendezvények szempontjából.

6. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

„A KULTURÁLIS ÉS INNOVÁCIÓS MINISZTERIUM ÚNKP-23-4 KÓDSZÁMÚ ÚJ NEMZETI KIVÁLÓSÁG PROGRAMJÁNAK A NEMZETI KUTATÁSI, FEJLESZTÉSI ÉS INNOVÁCIÓS ALAPBÓL FINANSZÍROZOTT SZAKMAI TÁMOGATÁSÁVAL KÉSZÜLT.”



7. FELHASZNÁLT IRODALOM

- RAJPUT, A.S., RODRÍGUEZ-GALLEGOS, C.D., HO, J.W., NALLURI, S., RAJ, S., ABERLE, A.G., SINGH, J.P.: *Fast extraction of front ribbon resistance of silicon photovoltaic modules using electroluminescence imaging*, Solar Energy 194. pp. 688-695. 2019.
- DRABCZYK, K., KULESZA-MATLAK, G., DRYGAŁA, A., SZINDLER M., LIPÍŃSKI, M.: *Electroluminescence imaging for determining the influence of metallization parameters for solar cell metal contacts*, Solar Energy 126. pp. 14-21. 2016.
- WANG, H., ZHAO, N., BI, Z., GAO, S., DAI, Q., YANG, T., WANG, J., JIA, Z., PENG, Z., HUANG, J., WAN, Y., GUO, X.: *Clear representation of surface pathway reactions at ag nanowire cathodes in all-solid Li-O₂ batteries*, ACS Applied Materials & Interfaces 13. no.33. pp. 39157-39164. 2021.
- FONTANI, D., SANSONI, P., FRANCINI, F., MESSERI, M., PIERUCCI, G., DELUCIA, M., JAFRANCESCO, D.: *Electroluminescence test to investigate the humidity effect on solar cells operation*, Energies 11. no. 10. 2659. 2018.
- KHAN, F., REZGUI, B.D., KIM, J.H.: *Reliability study of c-Si PV module mounted on a concrete slab by thermal cycling using electroluminescence scanning: application in future solar roadways*, Materials 13. 470. 2020.
- FRAZÃO, M., SILVA, J.A., LOBATO, K., SERRA, J.M.: *Electroluminescence of silicon solar cells using a consumer grade digital camera*, Measurement 99. pp. 7-12. 2017.

EGY HÁZTARTÁSI MÉRETŰ KISERŐMŰ MEGTÉRÜLÉSI IDEJÉNEK VIZSGÁLATA KÜLÖNBÖZŐ ELSZÁMOLÁSI FORMÁK ESETÉN

ANALYSIS OF PAYBACK PERIOD OF A HOUSEHOLD-SIZED SMALL POWER PLANT IN CASE OF DIFFERENT SETTLEMENT METHODS

MOLNÁR Judit¹, KOVÁCS Attila²

¹PhD, egyetemi docens, judit.molnar@uni-miskolc.hu

¹Miskolci Egyetem, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet, Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék, 3515
Miskolc-Egyetemváros

²PhD hallgató, attila.kovacs@zf.com

²Miskolci Egyetem, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet, Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék, 3515
Miskolc-Egyetemváros

Kivonat: A cikkben egy 5,1 kWp teljesítményű, tetőre szerelt, hálózatra visszatápláló háztartási méretű kiserőmű villamosenergia-termelési, valamint a háztartás fogyasztási adatainak felhasználásával megvizsgáltuk hogyan alakul a megtérülési idő a különböző elszámolás módok esetén. Az éves és havi szaldó, valamint a bruttó elszámolási formát egyaránt tanulmányoztuk. Éves szaldóval 13,5, míg havi esetén 21,4 év lett a megtérülési idő. Bruttó elszámolási forma esetében a megtérülési idő a kiserőmű 30 éves becsült élettartamán túlmutat (32,3 év), azaz nem térül meg a beruházás.

Kulcsszavak: kiserőmű, megtérülési idő, jövedelem, elszámolás forma

Abstract: In the paper it was investigated that how the payback period develops in the case of different settlement methods using electricity production data of a 5.1 kWp roof-mounted, grid-connected household-sized small power plant and the consumption data of the household. Both the annual and monthly balance as well as the gross settlement methods were studied. The payback period was 13.5 years with the annual balance, while 21.4 years with the monthly one. In case of the gross settlement method, the payback period exceeds the 30-year estimated lifetime of the small power plant (32.3 years), i.e. the investment is not repaid.

Keywords: small power plant, payback period, income, settlement method

1. BEVEZETÉS

Közimert, hogy a közüzemi hálózatra visszatápláló háztartási méretű kiserőműből (HMKE) származó, azonnal el nem fogyasztott villamos energia betáplálásra kerül a közcélú hálózatba, amennyiben a tulajdonos nem rendelkezik akkumulátor teleppel és nem tárolja azt el. A háztartás a hálózatról vételezett és oda visszatáplált villamosenergia-mennyiségének egyetemes szolgáltatóval történő elszámolása különbözőféleképpen történhet, ezért egy napelemes rendszer megtérülési ideje az elszámolási formától nagyban fog függeni. A 427/2023. (IX. 13.) Korm. rendelet szerint a kiserőmű üzembe helyezésének időpontját követő 10. év végéig éves szaldó elszámolás alkalmazható, azaz csak a már működő lakossági napelemes rendszereknél érhető el, valamint azoknál a kiserőműveknél, melyek tulajdonosai 2023.09.07. éjfélig jelezték fejlesztési igényüket a szolgáltatónál (a kivitelezés határideje 2026.01.01.).

A fogyasztók jellemzően nem akkor használják fel a megtermelt villamos energiát, amikor az éppen termelődött, hanem a nap más időszakában. Amennyiben az energiaigény magasabb a saját termelésnél, a háztartás egy „advesz” mérőórán keresztül a hálózatról vételez többlet-energiát. Ha pedig nincs szükség a megtermelt energiára, a többletet a hálózatra táplálja vissza. A kiserőmű-tulajdonosok az éves szaldó elszámolás során évente számolnak el a szolgáltatóval, aki mérleget von az egy év alatt visszatáplált és a hálózatról vételezett energia mennyisége alapján [1]. Az éves elszámolás azért előnyös, mert a napelemes rendszer az év során nem

egyenletesen termel, hiszen télen kevesebb a naps órák száma, de a nyári, el nem fogyasztott, betermelt energiamennyiség kompenzálta a téli kiesést. Egy hálózatra visszatápláló napelemes rendszernél természetesen ez az éves szaldó elszámolás a legkedvezőbb, hiszen a nyári túltermelés és a téli alultermelés ki tud egyenlítődni. Havi szaldó elszámolás esetében az elszámolás havonta és nem évente történik kWh-ban, így ez a kiegyenlítő hatás már nem tud érvényesülni.

A 2023.09.07-e után a szolgáltatóhoz beérkező igények esetén viszont kizárólag bruttó elszámolás alkalmazható. Ekkor a hálózathoz vételezett villamos energia teljes mértékben kiszámlázásra kerül a fogyasztónak hasonlóan a HMKE nélküli villamos energia fogyasztás elszámolásához [2]. Az ELMŰ Hálózati Kft. területén a kedvezményes árszabás havi 210 kWh fogyasztásig 36,208, míg efelett a lakossági piaci ár 70,104 Ft/kWh [3]. A megtermelt, de azonnal el nem használt villamosenergia-mennyiség betáplálásra kerül a hálózatba így értékesíthető a szolgáltatónak, aki a visszatáplált energiáért azonban jelenleg mindössze 5,11 Ft/kWh árat fizet. Azaz a bruttó elszámolás, a havi szaldóval ellentétben nem kWh-ban fog történni, hanem forintban, azaz fokozottan számít a vételezett és az értékesített villamos energiaár közötti különbség. Ezért érdemes megvizsgálni, hogy a bevezetett bruttó elszámolás hogyan hat majd egy kiserőmű megtérülési idejére. A következőkben egy konkrét kiserőmű adatait felhasználva kiszámítjuk, hogy éves és havi szaldó, valamint bruttó elszámolás esetén hogyan alakul a megtérülési idő.

2. A VIZSGÁLT KISERŐMŰ

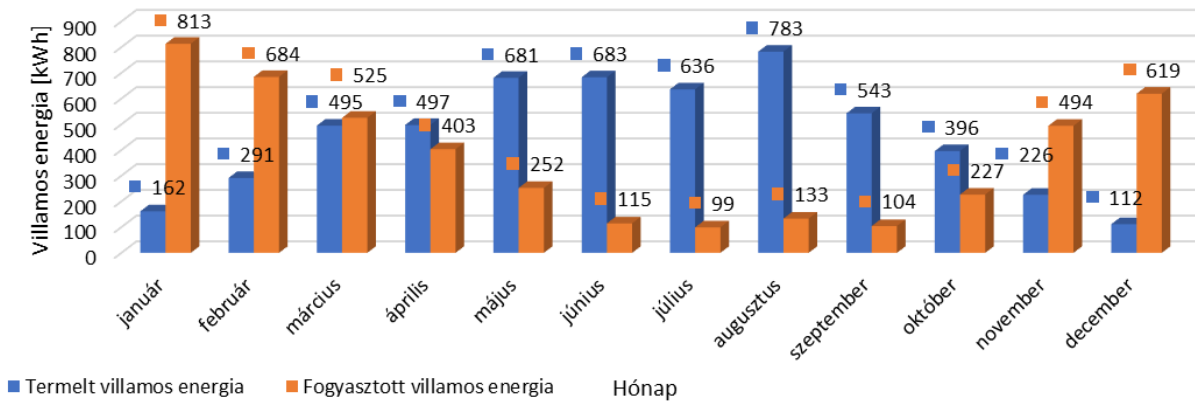
A közcélú hálózatra visszatápláló HMKE egy észak-magyarországi családi ház tetőszerkezetére 2019. szeptemberében lett telepítve, így jelenleg még éves szaldó elszámolás hatálya alá esik. A tető dőlésszöge $39,52^\circ$ és tájolása teljesen déli, azaz ideális eset áll fenn, így hatásfok csökkenéssel és árnyékhatással nem szükséges számolni. A kiserőmű teljesítménye 5,1 kWp. Mivel Észak-Magyarországon egy HMKE éves átlagos villamosenergia-termelése 1.050 kWh/kWp [4] körülire tehető, az éves villamosenergia-termelése előzetesen 5.355 kWh-ra becsülhető.

Az online Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) kalkulátor [5] alapján ezt a becslést célszerű leellenőrizni. Háromféle, az EU által összeállított Európára vonatkozó adatbázis érhető el: SARAH2, SARAH és ERA5. Miután megadtuk a szükséges paramétereket, mint a telepítési cím, a napelemes rendszer specifikációi (panel típusa, telepítési mód, tető dőlésszöge, tájolása, a HMKE beépített teljesítménye, rendszervesztesség) megkapjuk az adott földrajzi helyen mért napsugárzási érték, hőmérséklet és szélesség adatok felhasználásával kalkulált értéket. Jelen esetben 5.608 kWh-t kaptunk, amely csupán 4,7%-kal (253 kWh-val) több, mint az előzetes becslésünk.

A kiserőmű beruházási költsége 3.327.074 Ft volt. Ekkora összegből jelenleg is telepíthető egy ilyen rendszer, így későbbi számításaink során ezt fogjuk figyelembe venni.

3. A KISERŐMŰ ÁLTAL TERMELT VILLAMOSENERGIA-MENNYISÉG

2020 és 2022 között a HMKE által termelt és a háztartás által fogyasztott villamosenergia-mennyiségek havi bontásban rendelkezésre álltak. A három év adatsorából képzett átlagos termelt és fogyasztott villamosenergia-mennyiségek havi eloszlását az 1. ábra mutatja. Láthatjuk, hogy a kiserőmű április-október közötti hónapokban nettó termelő volt, azaz több energiát termelt, mint amennyit a háztartás fogyasztott. Éves szinten összesítve az átlagos fogyasztott villamosenergia-mennyiség 4.469 kWh, míg a termelt 5.504 kWh volt, azaz az évi túltermelés 1.035 kWh volt. Megállapítható, hogy a valóságban a PVGIS három adatbázis adataiból képzett átlagos értékéhez képest 1,85%-kal kevesebbet, míg az előzetes becsléshez képest 2,78%-kal többet termelt a HMKE.



1. ábra: Átlagos termelt és fogyasztott villamosenergia-mennyiségek havi eloszlása 2020-2022 között

Az idő múlásával fellépő veszteségek miatt a termelt villamosenergia-mennyiség évről-évre várhatóan kevesebb lesz, melynek oka például a napelem modulok éves teljesítményromlása, vagy a panelek felületén lévő esetleges szennyeződések (por, hó, madárürülék stb.) lehet [6]. A Franciaország legrégebbi fotovoltaiikus rendszerén végzett legújabb tesztek kimutatták, hogy a napelemmodulok 31 év működés után átlagosan a kezdeti teljesítményük 79,5%-át adják le. Egy korábbi, 11 évvel ezelőtti vizsgálat során ez az érték még 91,7% volt. Tehát a teljesítménycsökkenés 31 év alatt átlagosan 20,5%, azaz évente 0,66% volt. Az Egyesült Államok Energiaügyi Minisztériumának Nemzeti Megújuló Energia Laboratóriuma által végzett vizsgálat évi 0,75%-os medián romlást mutatott ki. Egy másik kutatás szerint Európában működő lakossági kiserőművek esetén, az alkalmazott adatfeldolgozási módszerektől függően a degradáció évi 0,36-0,67% közötti medián értéket képvisel [7].

4. A MEGTÉRÜLÉSI IDŐ

Egy beruházás megtérülési ideje (Payback Period, PB) általános esetben az alábbi formulával számítható [8]

$$PB = \frac{\text{Kezdő befektetés}}{\text{Várható éves jövedelem}} \quad (1.)$$

Egy kiserőmű esetén a kezdő befektetés természetesen a beruházási költség lesz, míg a várható jövedelem a megtakarított villamosenergia-mennyiség és a villamos energia átlagának szorzata lesz, vagyis az az összeg, amit a háztartásnak nem kellett kifizetni a szolgáltató felé. Az 1. táblázatban láthatjuk az átlagos havi fogyasztott és termelt villamosenergia-mennyiségeket, valamint, hogy havonta mekkora lett volna a villamos energia költsége, ha a háztartás nem rendelkezik kiserőművel. Számításaink során a korábban ismertetett árszabást alkalmaztuk: havi 210 kWh fogyasztásig 36,208 Ft/kWh, felette 70,104 Ft/kWh, míg a betáplált és a szolgáltatónak értékesített tarifa 5,11 Ft/kWh. Láthatjuk, hogy a háztartás éves villamos energia költsége 241.063 Ft lett volna, ha nem telepítenek kiserőművet, így a vizsgált HMKE esetében a fenti megtérülési idő:

$$PB = \frac{3\,327\,074}{241\,063} = 13,8 \text{ év.} \quad (2.)$$

Az (1). egyenletet azonban kiserőműre történő beruházás esetén korrigálni szükséges, hiszen a különböző elszámolás módoknál a várható éves jövedelem más és más értéket fog képviselni.

1. táblázat: Fogyasztott és termelt villamosenergia-mennyiségek, valamint a villamos energián megtakarított összeg

2020-2022 közötti adatok átlagai				Villamos energia ára HMKE nélkül (Ft)
Hónap	Havi fogyasztás (kWh)	Havi termelés (kWh)	Különbözet (kWh)	
1	813	162	-651	49 876
2	684	291	-393	40 856
3	525	495	-30	29 710
4	403	497	94	21 134
5	252	681	428	10 571
6	115	683	568	4 152
7	99	636	537	3 597
8	133	783	649	4 828
9	104	543	438	3 778
10	227	396	169	8 772
11	494	226	-268	27 513
12	619	112	-507	36 276
Σ	4 469	5 504	1 035	241 063

A 2. táblázat tartalmazza a havi és éves szaldó elszámolás esetén felmerülő villamos energia költségeket, valamint jövedelmeket. Láthatjuk, hogy havi szaldó esetén a háztartás éves szinten 100.215 Ft villamos energiadíjat fizetne a szolgáltatónak, míg a betáplált és értékesített energia utáni jövedelme csupán 14.712 Ft, így a fizetendő díj a kettő különbsége, azaz 85.503 Ft. Ezáltal a megtérülési idő havi szaldó elszámolás esetén:

$$PB^{\text{havi szaldó}} = \frac{3\,327\,074}{241\,063 - 85\,503} = 21,4 \text{ év.} \quad (3.)$$

Nyilvánvalóan, a villamos energián elvileg megtakarítható évi 241.063 Ft-os összegből le kell vonni a fizetendő éves energiadíjat, így a jövedelem csökkenésével a megtérülési idő nőni fog az (2). egyenletben szereplő, 13,8 éves értékhez képest, 21,4 évre.

Ha az éves szaldó elszámolást vizsgáljuk, akkor sokkal egyszerűbb a számítás. Mivel éves szinten több villamos energiát termelt a kiserőmű, mint a háztartás fogyasztása, a jövedelem növekedni fog a hálózatba betáplált és értékesített többlet energia díjával. Jelen esetben 5.275 Ft-tal, így a megtérülési idő:

$$PB^{\text{éves szaldó}} = \frac{3\,327\,074}{241\,063 + 5\,275} = 13,5 \text{ év.} \quad (4.)$$

2. táblázat: Adott hónapban vásárolt és értékesített villamos energia ára havi és éves szaldó elszámolás esetén

Hó- nap	Havi szaldó elszámolás							Éves szaldó: értékesít- ett éves villamos energia ára (Ft)
	Vásárolt villa- mose-ner- gia-meny- nyiség (kWh)	Kedvezmé- nyes ársza- bású villa- mose-ner- gia-meny- nyiség (kWh)	Lakossági piaci áras villa- mose-ner- gia-meny- nyiség (kWh)	Értékesített villamose- nergia- mennyiség (kWh)	Vásárolt villamos energia ára (Ft)	Érté- kesít- ett villamos energia ára (Ft)	Fizetett éves vil- lamos energia ára (Ft)	
1	651	210	441	0	38 543	-	85 503	5 275
2	393	210	183	0	20 433	-		
3	30	30	0	0	1 098	-		
4	0	0	0	94	-	481		
5	0	0	0	428	-	2 185		
6	0	0	0	568	-	2 899		
7	0	0	0	537	-	2 737		
8	0	0	0	649	-	3 312		
9	0	0	0	438	-	2 236		
10	0	0	0	169	-	864		
11	268	210	58	0	11 693	-		
12	507	210	297	0	28 448	-		
Σ	1 850	870	980	2 885	100 215	14 712	-	-

Tehát éves szaldó esetén az eredeti 13,8 év lecsökkent 13,5 évre. Most vizsgáljuk meg hogyan alakul a megtérülési idő bruttó elszámolás esetén. A 3. táblázatban láthatjuk az adott hónapban vásárolt és értékesített villamos energia költségeket. Ahogyan korábban írtuk, a hálózatból vételezett villamos energia minden hónapban teljes mértékben kiszámlázásra kerül a fogyasztónak és a megtermelt, de azonnal el nem használt villamosenergia-mennyiség betáplálásra kerül a hálózatba, értékesítve azt a szolgáltatónak 5,11 Ft/kWh tarifával. Közismert, hogy az egyes felhasználási szokások alapján a felhasználási arány, azaz a termelt és azonnal elfogyasztott villamosenergia-mennyiségek aránya az alábbiak szerint alakulhat [9]:

- rossz ~25%,
- átlagos ~33%,
- jó: ~50%,
- jó szokások esetén, telepített akkumulátorral: ~80%.

Bruttó elszámolás esetén a napelemekből származó villamos energia felhasználási arányát 40%-nak feltételeztük, amely a 3. táblázatban látható vásárolt és értékesített villamos energia árát befolyásolta.

3. táblázat: Adott hónapban vásárolt és értékesített villamos energia ára bruttó elszámolás esetén

Hónap	Havi fogyasztás (kWh)	Havi termelés (kWh)	Vásárolt villamos energia ára (Ft)	Értékesített villamos energia ára (Ft)	Fizetett éves villamos energiaár (Ft)
1	813	162	45 343	495	138 016
2	684	291	32 687	891	
3	525	495	15 829	1 515	
4	403	497	7 389	1 522	
5	252	681	-	2 185	
6	115	683	-	2 899	
7	99	636	-	2 737	
8	133	783	-	3 312	
9	104	543	-	2 236	
10	227	396	2 472	1 212	
11	494	226	21 185	691	
12	619	112	33 145	342	
Σ	4 469	5 504	158 050	20 034	-

Bruttó elszámolás esetén tehát éves szinten 158.050 Ft-ra becsültük a szolgáltatónak fizetett villamos energiadíjat, melyet a betáplált mennyiség utáni bevétel 20.034 Ft-tal csökkenteni fog, így a kettő különbségével kell korrigálni a megtérülési időt leíró formulában szereplő éves jövedelmet, azaz:

$$PB^{bruttó} = \frac{3\,327\,074}{241\,063 - 138\,016} = 32,3 \text{ év.} \quad (5.)$$

Láthatjuk, hogy a korábbi 13,8 évről a megtérülési idő 32,3 évre nőtt. Tehát, ha 40%-os felhasználási arányt feltételezünk, akkor a kiserőmű 30 éves élettartamán túlmutat a megtérülése, így a beruházás nem javasolt. Azonban gondos odafigyeléssel, az arány növelésével és okos rendszer kiépítésével a megtérülési idő nyilvánvalóan csökkenthető. Összegezve a 4. táblázat tartalmazza a megtérülési időket.

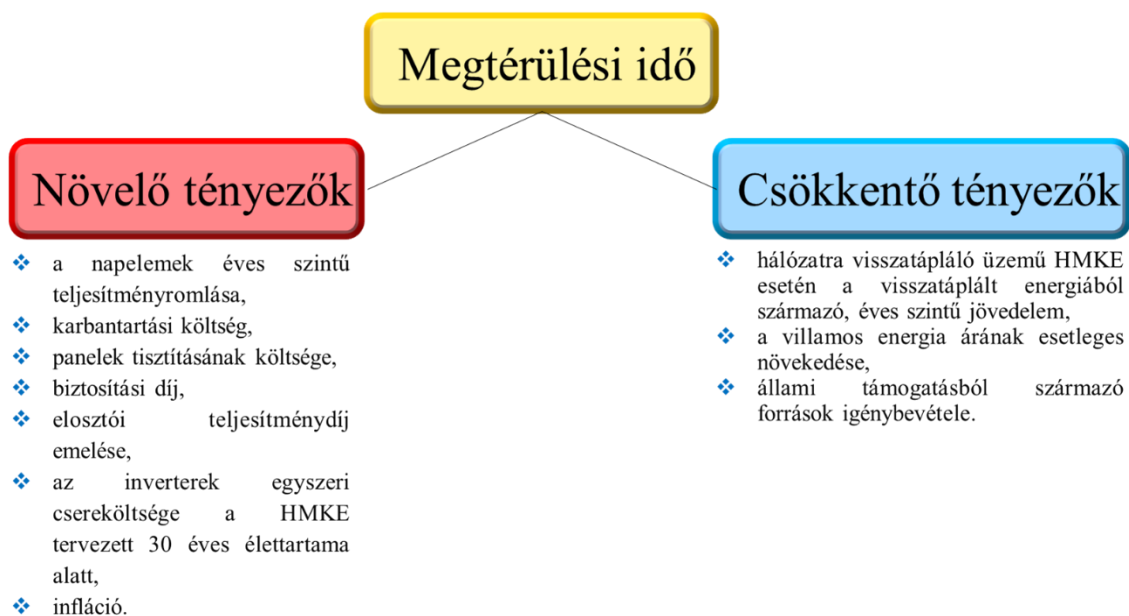
4. táblázat: Megtérülési idők a különböző elszámolási módok esetén

Elszámolási mód	Megtérülési idő (év)
Klasszikus közgazdaságtani formula alkalmazásával	13,8
Éves szaldó elszámolás	13,5
Havi szaldó elszámolás	21,4
Bruttó elszámolás	32,3

Láthatjuk, hogy az éves szaldó elszámolás kivezetésével, bruttó elszámolás esetén jelentősen romlik a megtérülési idő. Megoldást jelenthetne a megtermelt, de azonnal fel nem használt villamos energia eltárolása akkumulátor telepbe, azonban ez jelentős költséggel bír, így a beruházási költség akár kétszeresére is emelkedhet, amely rontani fogja a megtérülési időt.

5. A MEGTÉRÜLÉSI IDŐT BEFOLYÁSOLÓ TÉNYEZŐK

A megtérülési időt számos egyéb tényező is befolyásolhatja, melyet a 2. ábra foglal össze. Az éves jövedelem csökkenése miatt növelni fogja a megtérülési időt a napelemek teljesítményromlása miatt bekövetkező évről-évre kisebb volumenű villamosenergia-termelés, a HMKE karbantartási és tisztítási költsége, biztosítási díja, valamint az elosztói teljesítménydíj esetleges emelése. Utóbbi díj mértéke a 7/2016. (X.13.), 10/2016. (XI. 14.) és 15/2016. (XII. 20.) MEKH rendeletek értelmében jelenleg 0 Ft/kW, de a jövőben ezt bármikor megemelhetik. Azonban fontos megemlíteni, hogy az elosztói teljesítménydíj csak 4 kW-nál nagyobb, 2017.03.31. után engedélyezett HMKE esetén a 4 kW feletti részre fizetendő. Mivel az inverterek élettartamát 10-15 évre becsülik a gyártók, a kiserőmű 30 éves élettartama alatt egyszer mindenképpen cserélni szükséges, így egy egyszeri beruházási költség fog megjelenni a 15. év környékén, amely szintén növeli a megtérülési időt. Az infláció pedig a jövedelem reálértékét fogja csökkenteni, így a megtérülési időre kedvezőtlenül fog hatni. Elméletileg bekövetkezhet a villamos energia tarifájának csökkentése, amely a megtérülésre kedvezően hatna, de véleményünk szerint ennek nincs nagy valószínűsége.



2. ábra: A megtérülési időt befolyásoló tényezők

A megtérülési időt csökkentő tényezők közé sorolhatjuk a hálózatra visszatápláló üzemű HMKE esetén a visszatáplált energiából származó, éves szintű jövedelmet, amely magánszemély esetében legfeljebb évi 12.000 kWh-ig adómentes [10]. Amennyiben a villamos energia árának esetleges növekedése következik be, a villamos energián megtakarított összeg növekedésével a megtérülési idő csökkeni fog. Ugyanez következik be, ha a beruházási költséget részben állami támogatásból származó forrásokból fedezzük.

Érdeemes azt is megvizsgálni, hogy ha a beruházási költséget inkább bankbetétbe fektetjük be, mekkora összeget kapunk 30 év után, hiszen ennyinek feltételeztük a kiserőmű élettartamát. Erre a jövőérték (Future Value, FV) számítás szolgál, melyet a (6.) egyenlet ír le [8]:

$$FV = C_0 \cdot (1 + r)^n, \quad (6.)$$

ahol:

C_0 a beruházási költség jelenértéke (Ft);

r az éves kamatláb (%);

n a periódusok száma, azaz a befektetés időtartama (év).

Mivel hosszú távú lesz a befektetés 5%-os elvárt hozam biztosan elérhető, de akár 8%-os kamatlábat is feltételezhetünk a 30 éves futamidő alatt. Így a teljes beruházási költség befektetése esetén elérhető összegek:

$$FV^{30 \text{ év}} = 3\,327\,074 \cdot (1 + 0,05)^{30} = 14\,379\,422 \text{ Ft (479\,314 Ft/év)}, \quad (7.)$$

$$FV^{30 \text{ év}} = 3\,327\,074 \cdot (1 + 0,08)^{30} = 33\,479\,204 \text{ Ft (1\,115\,973 Ft/év)}. \quad (8.)$$

A befektetések éves átlagát összevetve a villamos energián elvileg megtakarítható évi 241.063 Ft-os összeggel, könnyen belátható, hogy pénzügyileg jobban megéri a bankbetét. Azonban egy kiserőmű telepítése nem feltétlenül csak a megtérülésről szól, hiszen a jövőben egyrészt a megújuló energiaforrásból előállított önálló villamosenergia-termelés, azaz az önelátás nagyon fontos tényező lesz nemcsak hazánkban, hanem az egész világban, másrészt az „Irány az 55%!” elnevezésű intézkedéscsomag azt javasolja, hogy 2030-ra az EU-ban legalább 55%-kal csökkenjen a nettó üvegházhatásúgáz-kibocsátás (fosszilis tüzelőanyagok használatának csökkentésével) és 2050-re klímasemleges legyen. Mindez csak a megújuló energiaforrások minél nagyobb arányú hasznosításával lehetséges.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

A cikkben egy 5,1 kWp teljesítményű, tetőre szerelt, hálózatra visszatápláló háztartási méretű kiserőmű villamosenergia-termelési adatait vizsgáltuk. Előzetes becslést követően, valamint online kalkulátort alkalmazva, az értékeket összevetettük a tényleges termelési adatokkal. Előzetesen az éves villamosenergia-termelést 5.355 kWh-ra becsültük, a PVGIS kalkulátor pedig 5.608 kWh-t prognosztizált (három adatbázis adataiból képzett átlag). A három év termelési adataiból képzett átlag pedig 5.504 kWh volt. Megállapítható, hogy a valóságban a PVGIS értékéhez képest 1,85%-kal kevesebbet, míg az előzetes becsléshez képest 2,78%-kal többet termelt a HMKE. Éves szinten 1.035 kWh-val több villamos energiát termelt a kiserőmű, mint amennyit a háztartás fogyasztott (az átlagos fogyasztott villamosenergia-mennyiség 4.469 kWh volt).

Bemutattuk, hogy a kiserőmű megtérülési ideje széles határok között mozog az alkalmazott elszámolási formától függően. A klasszikus beruházás-gazdaságossági megtérülési idő alapján 13,8 év alatt térülne meg a beruházás. Azonban ez a formula csak a HMKE révén megtakarított éves villamos energia költségét és az erőmű beruházási költségét veszi figyelembe, a visszatáplált villamos energia árát nem. Ezért ezt a formulát korrigálni kellett, hiszen a különböző elszámolási módoknál a formula nevezőjét képező várható éves jövedelem más és más értéket képvisel. Éves szaldó elszámolással 13,5 évre, míg havi esetén 21,4 évre adódott a megtérülési idő. Bruttó elszámolási forma esetében a 32,3 éves megtérülési idő több, mint a kiserőmű 30 évre becsült várható élettartama, így ekkor nem térül meg a beruházás.

Meg kell jegyezni, hogy az Európában alkalmazott bruttó elszámolás ugyan a legrosszabb megtérülési időt eredményezte, mégis indokolt lehet egy HMKE telepítése a fosszilis energiaforrások csökkenése, az emelkedő energiaárak, az energiafüggetlenség és környezettudasság megvalósítása miatt. Az Európai Parlament és a Tanács 2024/1275 hatályos irányelve az épületek energiahatékonyságáról kimondja, hogy a tagállamoknak biztosítaniuk kell, hogy a teljes lakóépület-állományuk kWh/m²/év-ben kifejezett átlagos primerenergia-

felhasználása 2020-hoz képest 2030-ra legalább 16%-kal, míg 2035-re legalább 20-22%-kal csökkenjen. Ennek elérése érdekében a 10. cikk alapján 2029. december 31-ig kötelező lesz a megfelelő napenergiát hasznosító berendezések telepítése valamennyi új lakóépületre és épületekkel fizikailag szomszédos új fedett parkolóra (amennyiben az műszakilag megfelelő, valamint gazdaságilag és funkcionálisan megvalósítható) [11]. Tehát a napelemek lakóépületekre történő telepítése a jövőben elkerülhetetlen lesz, elszámolási formától és megtérüléstől függetlenül.

Megjegyezzük, hogy az irányelv 2026. december 31. határidővel vonatkozik valamennyi új középületre és a 250 m²-nél nagyobb hasznos alapterületű nem lakáscélú épületre (így ezeket az épületeket már korábban el kell látni napenergiát hasznosító berendezésekkel), illetve hasznos alapterülettől függően fokozatosan, de legkésőbb 2030. december 31-ig valamennyi meglévő középületre. Az irányelv finanszírozási források biztosítására is kötelezi a tagállamokat, akik létrehoznak egy keretet a napenergia épületekben történő hasznosításának támogatása céljából, kombinálva azt épülettechnikai rendszerekkel vagy hatékony távfűtési rendszerekkel [11].

7. FELHASZNÁLT IRODALOM

- MVM: *Háztartási méretű kiserőművel termelt villamos energia átvételi feltételei 2024. január 1-jét követően.* <https://www.mvmnext.hu/aram/pages/aloldal.jsp?id=12796459> (megtekintés dátuma: 2024. szeptember 07.)
- MVM: *HMKE bruttó elszámolása.* <https://www.mvmnext.hu/aram/pages/aloldal.jsp?id=12796456> (megtekintés dátuma: 2024. szeptember 07.)
- MVM: *Villamos energia díjak az egyetemes szolgáltatásban lakossági ügyfeleknek 2022. augusztus 1-jétől.* <https://ee.mvm.hu/elmu/file/downloadfile?id=daf8fc17-f774-420d-92cc-c3a82863d3b7> (megtekintés dátuma: 2024. szeptember 07.)
- VÉGHÉLY, T.: *Napelemek és napelemrendszerek szerelése.* CSER Kiadó, Budapest, 2013.
- PVGIS: *Photovoltaic Geographical Information System (European Commission: Photovoltaic Geographical Information System).* https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en (megtekintés dátuma: 2024. szeptember 07.)
- MÉSZÁROS, L., SCHOTTNER, K.: *Megújuló energiatermelő rendszerek, Napelemes erőművek.* Magyar Mérnöki Kamara Elektrotechnikai Tagozat, 2015.
- PV Magazine: *Solar modules deployed in France in 1992 still provide 79.5% of original output power.* 2024.06.07. <https://www.pv-magazine.com/2024/06/07/solar-modules-deployed-in-france-in-1992-still-provide-75-9-of-original-output-power/> (megtekintés dátuma: 2024. szeptember 07.)
- ILLÉS, I.: *Vállalkozások pénzügyi alapjai.* SALDO, 2009. ISBN 978 963 638 221 6.
- NVSolar Energia Kft.: *Éves szaldó, havi szaldó, bruttó elszámolás.* <https://nvsolar.hu/hirek/napelem-elszamolasi-modok/> (megtekintés dátuma: 2024. szeptember 07.)
- NAV: *Adómentessé vált a háztartási kiserőművet üzemeltetők bevétele.* 2021.07.14. https://nav.gov.hu/ado/szja/Adomentesse_valt_a_ha20210714 (megtekintés dátuma: 2024. szeptember 07.)
- EU: *Az Európai Parlament és a Tanács 2024/1275 irányelve az épületek energiahatékonyságáról.* 2024.04.24. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TXT/?uri=CELEX%3A32024L1275&qid=1725714628837> (megtekintés dátuma: 2024. szeptember 07.)

PID SZABÁLYOZÓ MODELLEZÉSE PLC KIMENETI ÉS BEMENETI OLDALAIN: KÁRTYACSERE HATÁSÁNAK VIZSGÁLATA

MODELING A PID CONTROLLER ON PLC OUTPUT AND INPUT SIDES: ANALYZING THE IMPACT OF CARD REPLACEMENT

MÓRÉ Ádám¹, BÓDI Bence László²

¹Egyetemi tanársegéd, adam.more@uni-miskolc.hu

¹Miskolci Egyetem, Automatizálási és Infokommunikációs Intézet, 3515 Miskolc, Egyetemváros

²Okl. Mechatronikai mérnök, bence.bodi20@gmail.com

²Miskolci Egyetem, Automatizálási és Infokommunikációs Intézet, 3515 Miskolc, Egyetemváros

Kivonat: A tanulmány célja a Programozható Logikai Vezérlő (PLC) modellezése a Scilab Xcos környezetében, egy PI szabályzó alkalmazásával, amely egy RC kör kondenzátorának feszültségét szabályozza. A kutatás során a megalkotott modell segítségével megfigyelhetők a szabályozási folyamat eltérései az analóg ki- és bemeneti modulok változásai esetén. Az eredmények fontos betekintést nyújtanak a hardveres frissítések és programmigrációk során felmerülő potenciális problémákba, különösen az analóg modulok cseréje, vagy korszerűsítése esetén. Az így kidolgozott megközelítés hozzájárulhat a folyamatirányítási rendszerek zavartalan átállásához és a szabályozási teljesítmény optimalizálásához.

Kulcsszavak: PID szabályozás, Zárt hurkú szabályozás, Programozható Logikai Vezérlő, Analóg kártya, Scilab Xcos Modellezés

Abstract: The study aims to model a Programmable Logic Controller (PLC) in the Scilab Xcos environment using a PI controller to regulate the voltage of a capacitor in an RC circuit. Through the developed model, deviations in the control process are observed in the case of changes to the analog input and output modules. The results provide valuable insights into potential issues arising during hardware upgrades and program migrations, especially when replacing or upgrading analog modules. This approach contributes to the seamless transition of process control systems and the optimization of control performance.

Keywords: PID Control, Closed-Loop Control, Programmable Logic Controller (PLC), Analog Card, Scilab Xcos Modeling

1. BEVEZETÉS

Manapság az iparban számos helyen használják a PLC és a DCS (Distributed Control System)-alapú folyamatirányítást. Ezek a vezérlők már a 70-es évek óta megjelentek és a mai napig alkalmazzák őket, sőt egy intenzív fejlődés is jellemző rájuk. Ezek a vezérlők idővel elromolhatnak, vagy megszűnhet gyártói támogatásuk [1]. Ezért cserélni kell őket. Mivel nem csak digitális, hanem analóg jeleket is képesek kezelni, ezért a csere során számos problémával kell számolni. Az analóg kártyák esetébe az ADC felbontása, feldolgozási ideje és hibája eltérő [2], [3]. Ezért azok az algoritmusok, amelyek az analóg kártya értékeivel dolgoznak számos esetben különböző működésűek lesznek a csere után. A korábbi tanulmányokban már vizsgálva lettek ezeknek a hatásai [4]. A vizsgálat folytatása céljából egy modell lett létre hozva Scilab fejlesztőkörnyezetben. A modell segítségével le lehet modellezni az analóg kártya csere után bekövetkező változásait. A cikk kizárólag zárt hurkú szabályozással foglalkozik, amely jelen esetben egy PI szabályozó.

A kutatásban egy kondenzátor feszültsége lesz értékkövető szabályozással szabályozva. Tehát változó értékű jellel lesz végre hajtva. Ez a jel a négyszög jel lesz. A négyszög jel alkalmas az analitikus mérésekhez és a felfutó éle megegyezik az egység ugrás függvénnyel.

2. KUTATÁSHOZ FELHASZNÁLT MÓDSZEREK ÉS ANYAGOK

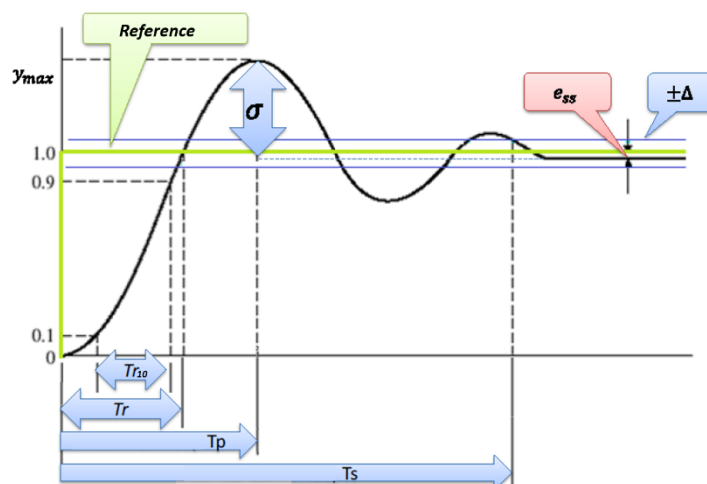
A Szimulációt a Scilab Xcos nevű szoftverrel végeztük el. Scilab Xcos a Scilab nevű nyílt forráskódú, MATLAB-hoz hasonló számítástechnikai és numerikus számítási szoftver vizuális szimulációs modulja. Kifejezetten dinamikus rendszerek modellezésére és szimulációjára fejlesztették ki. Az Xcos lehetővé teszi a felhasználók számára, hogy blokkvázlat-alapú környezetben hozzanak létre és szimuláljanak összetett dinamikus rendszereket.

A Ziegler–Nichols-módszer egy klasszikus, gyakran alkalmazott hangolási eljárás, amelyet a PID szabályozók paramétereinek (arányos – P, integráló – I, deriváló – D) meghatározására fejlesztettek ki. Ez a módszer kétféle hangolási megközelítést kínál, amelyeket laboratóriumi környezetben vagy gyakorlati alkalmazások során lehet használni. Hangoláshoz felhasznált számítást a 1. táblázat mutatja be.

1. táblázat: Zeigler-Nichols hangolás[5]

Szabályozás típusa	K_p	T_i	T_d
P	$0.5 \cdot K_u$		
PI	$0.45 \cdot K_u$	$0.8 \cdot P_u$	
PID	$0.6 \cdot K_u$	$0.5 \cdot P_u$	$0.125 \cdot P_u$

Az eredmények feldolgozására többféle analitikus módszert használt a kutatás. Az analitikus módszerek a különbségek meghatározására lettek felhasználva. Egy PI vagy PID szabályozónak minőségi jellemzői vannak. Ezeket a jellemzőket (1. ábra) kitudjuk mérni egyszerű mérésekkel.



1. ábra: Analitikai vizsgálat

Mérésekkel az alábbi paraméterek állapíthatóak meg:

- Állandósult hiba
- Első Max idő
- Beállási idő
- Felfutási idő

Azonban felhasználtunk olyan matematikai műveleteket is, amik az eltéréseket számszerűsítik ilyen lesz a függvény minimum, maximum, különbsége és átlagértéke. Továbbá hiba jel alapján két fontos vizsgálatot is elvégeztünk [6]:

IQE négyzetes hibaérték alapján:

$$IQE = \int_0^{\infty} e^2(t) dt \quad (1)$$

IAE abszolút hibaérték alapján:

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (2)$$

3. PLC DISZKRÉT SZABÁLYOZÁSÁNAK MODELLEZÉSE

A modell egy diszkrét szabályozást fog megvalósítani. Ebben a fejezetben a szabályozáshoz szükséges képletek lesznek bemutatva, amik szükségesek a modell megalkotásához. A szabályozáshoz szükség van egy referencia jelre és egy szabályzóra. A hibajel a referencia jel és a mért jel közti különbség [7].

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (3)$$

A szabályzó a hibajel felhasználásával állítja elő a szakasz bemeneti jelét, amellyel a hiba csökkentésére törekszik. Ezen alapul az egyik első és legismertebb szabályzó a PID szabályzó, amely három tagból áll, Proporcionális (arányos), Integráló és Deriváló. A szabályzót leíró matematikai egyenlet a következő [7], [8]:

$$u(t) = K_P * e(t) + K_I * \int_0^t e(\xi) d\xi + K_D * \frac{de(t)}{dt} \quad (4)$$

Ahol K_P , K_I és K_D az alaptagok körerősítése. A PID szabályzó átviteli függvénye[9]:

$$W_{PID}(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D * s \quad (5)$$

A PID kontroller tagjait akár ki is lehet hagyni, nem kötelező az összes tagot felhasználni egy rendszernél, ezzel is spórolva a számítási kapacitással. A gyakorlatban használható variánsok a P, PI, PD és PID szabályzók [7], [8], [9]. A PID szabályzót vagy annak variánsait előszeretettel használják az iparban, mivel nem szükséges hozzá nagy számítási kapacitás, nem kell numerikus módszereket alkalmazni. Ebben a feladatban a PI variáns lesz használva, mivel ez megfelelő a szabályozandó szakasz szabályozásához.

A szimulációhoz szükség lesz a PI szabályzó diszkrét formájára, mivel a digitális eszközök is diszkrét időben működnek. Ezt a diszkrét Laplace transzformációval, azaz a transzformáció segítségével tudjuk megoldani. Viszont, mivel nekünk rendelkezésre áll egy átviteli függvény, ezért nem szükséges a z transzformációt elvégezni, hanem elég az átviteli függvényt átvezetni az s tartományból a z tartományba. A diszkrétizációhoz háromfajta transzformációs módszer áll rendelkezésünkre. A transzformáció felhasználja a rendszer mintavételi idejét (T_{mv}). Az előre transzformáció képlete [10]:

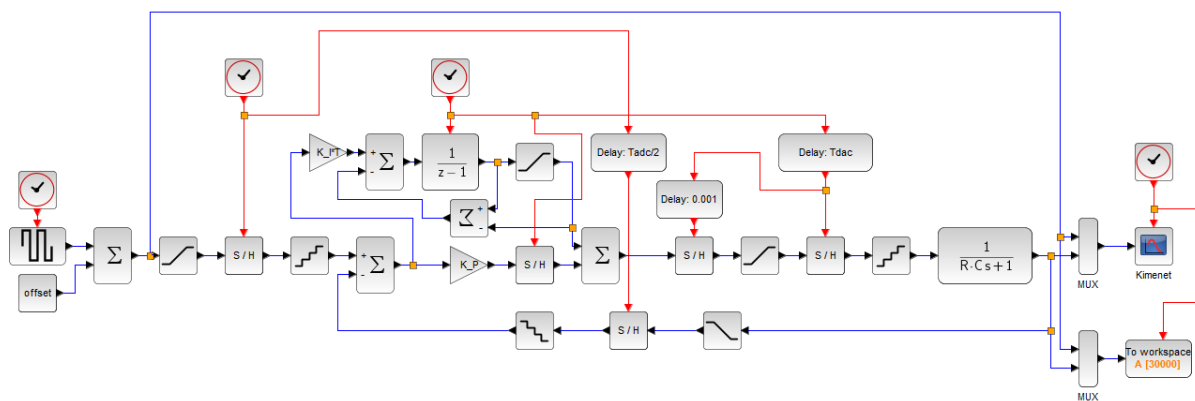
$$u[k+1] \approx u[k] + e[k]T \quad (6)$$

$$s = \frac{1}{T} (z - 1) \quad (7)$$

A szimulációhoz az előre transzformációs alak lesz használva. A számítógépes rendszerek ciklus idejét nagyban befolyásolja, hogy kell-e numerikus módszereket használni az $e[k+1]$ kereséséhez, ezért célszerű olyan módszert választani, ami egyszerűen számolható. Az előre transzformáló alak alapján a diszkrét PI szabályzó a következő [10] :

$$W_{PI}(z) = K_P + K_I \frac{T}{z-1} \quad (8)$$

A szimuláció a Scilab Xcosban lesz elkészítve. A modell magába foglalja a referencia jelet, a diszkrét idejű PI szabályzót, a szabályozott szakaszt és egy megjelenítő egységet. Továbbá a referencia jelnél és a visszacsatolt jelnél modellezve lesznek az analóg bemenetek, és a szabályzó kimeneténél modellezve lesz az analóg kimenet. A modell úgy fog működni, hogy a két analóg digitális átalakító felváltva méri a bemeneti jeleket, és a mérésekkel párhuzamosan a diszkrét idejű szabályzó feldolgozza az aktuális hiba jelet, majd a feldolgozás után azt az analóg digitális átalakító átalakítja. Az integrátor taghoz lett készítve egy szaturációs megoldás, ami meggátolja, hogy az integráló tag értéke túlzottan nagy értéket vegyen fel [11]. A modellt a 2. ábra szemlélteti.



2. ábra: A teljes szimuláció blokkvázlata

4. SZIMULÁCIÓ

A különböző PLC konfigurációk szabályozásának szimulálása a megalkotott modell alapján történik. Az első része egy referencia konfiguráció összeállítása, majd a szabályzó behangolása. Utána a különböző konfigurációs változásokkal szimulációk végrehajtása. Három paraméter fog változni a konfiguráció változás esetén, a rendszer ciklusideje, az analóg be- és kimenet felbontása, mintavételezési ideje.

A szimulációk WAGO márkájú PLC komponensek adataival lesznek elvégezve. A CPU egy PFC 200-as CPU lesz, a program lefutásának a ciklusideje 50 ms lesz. Tehát a rendszer teljes ciklusideje a ki- és bemeneti modulok cseréjével fog változni. Egy modulon több bemenet és/vagy kimenet található. A dokumentációban általában az egész modulra értendő átalakítási időt adják meg, így mivel nekünk csak 1 csatornára van szükségünk, ezért a modul átalakítási idejét osztani kell a csatorna számmal, hogy megkapjuk 1 csatorna ciklus idejét. A bemeneti modulokat és adatait a 2. táblázat mutatja [4].

2. táblázat: A bemeneti modulok paraméterei [12]

Bemeneti modul	Felbontás	Mintavételezési idő	Csatornák száma	Egy csatorna mintavételezési ideje
750-459	12 bit	10 ms	4 db	2,5 ms
750-478	16 bit	80 ms	2 db	40 ms

Mint látható, a bemeneti moduloknál a felbontás növelése négyzetesen növeli a ciklusidőt. Ellentétben a kimeneti moduloknál, a ciklusidőt inkább más tényezők befolyásolják, mint a felbontás. A kimeneti modulokat és adatait a 3. táblázat mutatja [4].

3. táblázat: A kimeneti modulok paraméterei [12]

Kimeneti modul	Felbontás	Konverziós idő	Csatornák száma	Egy csatorna konverziós ideje
750-550	12 bit	2 ms	2 db	1 ms
750-560	10 bit	10 ms	2 db	5 ms
750-562	16 bit	5 ms	2 db	2,5 ms

Majd egy táblázatba felírjuk a lehetséges kombinációkat, és kiválasztunk egy referencia konfigurációt. Továbbá, a konfiguráció hivatkozásoknál a modul cikkszám utolsó három számjegye lesz megjelölve. A választott referencia konfiguráció 459-550, mivel a 12 bites átalakítók teljesen megfelelők a folyamathoz. A 4. táblázat a szimulálandó konfigurációkat mutatja.

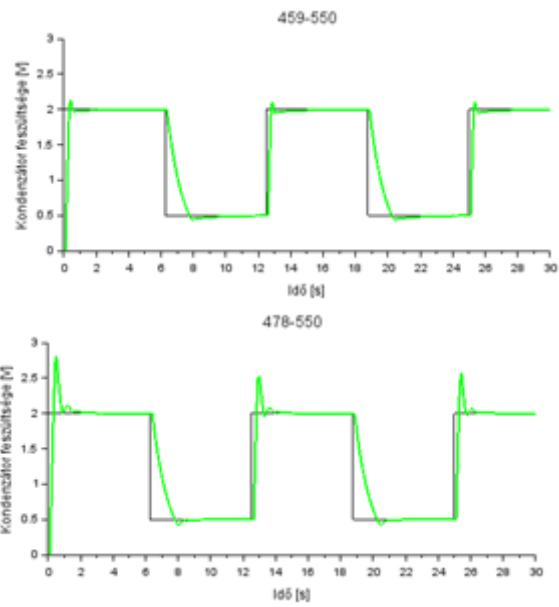
4. táblázat: A szimulációhoz összegyűjtött konfigurációk[12]

Bemeneti modul	Kimeneti modul	ADC felbontás	DAC felbontás	ADC idő	DAC idő
750-459	750-550	12 bit	12 bit	5,0 ms	1 ms
750-459	750-560	12 bit	10 bit	5,0 ms	5 ms
750-459	750-562	12 bit	16 bit	5,0 ms	2,5 ms
750-478	750-550	16 bit	12 bit	80 ms	1 ms
750-478	750-560	16 bit	10 bit	80 ms	5 ms
750-478	750-562	16 bit	16 bit	80 ms	2,5 ms

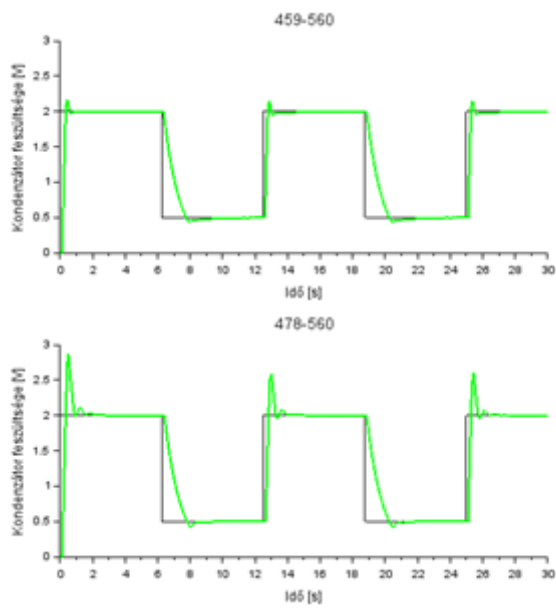
Majd a konfigurációk felírása után a paraméterekhez is értékeket kell rendelni. Az ellenállás legyen 100 k Ω ellenállású, és a kondenzátor legyen 10 μ F kapacitású. A be- és kimeneti modulok minimum feszültsége 0 V, a maximum feszültsége 10 V.

A K_p és K_i paraméterek értékei egy gyakorlati módszerrel, az úgynevezett Ziegler-Nichols módszerrel lettek meghatározva. A Ziegler-Nichols módszer feltétele, hogy a rendszert a stabilitás határán lehessen működtetni.

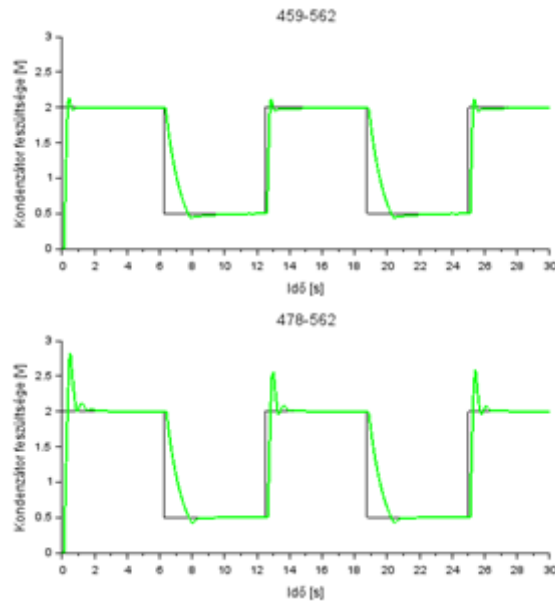
A PI szabályzó beállítása után a szimulációk következnek. A referencia jel egy négyszögjel, amely 0,5-2 V között fog váltakozni, 80 mHz frekvenciával. A 2. ábra a szabályozott szakasz kimeneteit mutatja minden konfiguráció esetében.



3. ábra: Szimulációs eredmények bemenet változtatásával



4. ábra: Szimulációs eredmények bemenet és kimenet változtatásával



5. ábra: Szimulációs eredmények bemenet változtatásával

Látható, hogy mivel ritkábban vesz mintát a rendszerből, így ugyanazon erősítési paraméterekkel lassabban, több oszcilláció után éri el a referencia értéket a 478-as bemeneti modul konfiguráció, mint a 459-es konfiguráció. Továbbá, az is megfigyelhető, hogy a mintavételezési idő növekedés a túllövések mértékét is növeli. Ezeket a megfigyeléseket a 5. táblázatban szereplő szabályozási jellemzők is visszaadják.

5. táblázat: A szimulációk szabályozási jellemzői

Kártyák	Konstans hiba	Első maximum	Beállási idő	Felfutási idő	Túllövés 10%	Túllövés	Négyzetes hibaérték	Abszolút hibaérték
459_550	0,0034	0,128	0,453	0,401	0,178	0,339	3,304	3,285
459_560	0,0021	0,167	0,492	0,405	0,178	0,340	3,358	3,266
459_562	0,0027	0,142	0,468	0,403	0,178	0,339	3,325	3,276
478_550	0,0001	0,806	1,265	0,501	0,178	0,324	3,763	3,768
478_560	0,0003	0,874	1,293	0,505	0,178	0,328	3,862	3,841
478_562	-0,0001	0,830	1,278	0,502	0,178	0,325	3,799	3,794

5. ÖSSZEFOGLALÁS

A cikk átfogó képet ad a programozható logikai vezérlők (PLC-k) iparban betöltött szerepéről, hangsúlyozva, hogy ezek az eszközök már az 1970-es évektől kezdve az ipari automatizálás szerves részét képezik. Idővel azonban a PLC-k előregedése és cseréje elkerülhetetlenné válik,

ami számos karbantartási és implementációs kihívást eredményezhet. Az egyik ilyen kihívás a PID szabályozók újrachangolása, vagy adaptálása az új rendszerek követelményeihez. A cikkben bemutatott kutatás egy szimulációs modell kidolgozására összpontosít, amely a PLC-k bemeneti és kimeneti kártyáinak modellezésével vizsgálja a rendszerek viselkedését.

A szimulációs modell paraméterezéséhez Wago bemeneti és kimeneti modulokat alkalmaztak, lehetővé téve a rendszer komponenseinek részletes vizsgálatát. A kutatás rávilágít arra, hogy minden egyes paraméterváltoztatás befolyásolja a rendszer működését, különös tekintettel a zárt-hurkos szabályozás teljesítményére. A tanulmány kiemeli, hogy korábbi kutatások már bizonyították: a PID szabályozók paraméterei nem egyszerűen adoptálhatók egyik rendszerből a másikba, mivel a szabályozási teljesítmény jelentősen eltérhet az eredetitől.

A cikk célja annak vizsgálata, hogy a szimulációs modell alkalmas-e ezen eredmények megerősítésére. A mérések és az analitikus értékelések alapján egyértelmű következtetés vonható le: a zárt-hurkos szabályozások paraméterei nem adoptálhatók át változtatások nélkül, mivel ezek módosítják a szabályozó viselkedését és működését. Ez a kutatás fontos betekintést nyújt az ipari automatizálási rendszerek tervezésébe és karbantartásába, különös tekintettel a PID szabályozók adaptációs nehézségeire.

6. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] Y. JINZUN, “Characteristics and Development Trend of PLC,” *Modern Electronics Technique*, 2007.
- [2] “Analog to Digital Conversion,” *Delta-Sigma Modulators*, pp. 12–40, Sep. 2003, doi: 10.1142/9781848161214_0002.
- [3] J. JUN, “Sort of Means for Dealing with Input Analog Signals in PLC,” *Instrument Technique and Sensor*, 2006.
- [4] Á. MÓRÉ, “PID algoritmus algoritmizálása irányítórendszerekben,” *Multidiszciplináris Tudományok*, vol. 12, no. 1, pp. 46–57, May 2022, doi: 10.35925/J.MULTI.2022.1.4.
- [5] K. J. ÁSTRÖM and T. HÄGGLUND, “Revisiting the Ziegler–Nichols step response method for PID control,” *J Process Control*, vol. 14, no. 6, pp. 635–650, Sep. 2004, doi: 10.1016/J.PROCONT.2004.01.002.
- [6] S. B. JOSEPH, E. GBENGA DADA, A. ABIDEMI, D. Opeoluwa Oyewola, and M. KHAMMAS, “Metaheuristic algorithms for PID controller parameters tuning: review, approaches and open problems,” *Heliyon*, vol. 8, p. e09399, 2022, doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e09399.
- [7] M. A. HAIDEKKER, “The PID Controller,” *Linear Feedback Controls*, pp. 193–208, Jan. 2013, doi: 10.1016/B978-0-12-405875-0.00013-9.
- [8] A. GAMBIER, “Digital PID controller design based on parametric optimization,” *Proceedings of the IEEE International Conference on Control Applications*, pp. 792–797, 2008, doi: 10.1109/CCA.2008.4629671.
- [9] S. BALAMURUGAN and A. UMARANI, “Study of Discrete PID Controller for DC Motor Speed Control Using MATLAB,” *2020 International Conference on Computing and Information Technology, ICCIT 2020*, Sep. 2020, doi: 10.1109/ICCIT-144147971.2020.9213780.
- [10] “Scilab Control Engineering Basics – Scilab.ninja.” Accessed: Nov. 27, 2024. [Online]. Available: <https://scilabdotninja.wordpress.com/scilab-control-engineering-basics/>
- [11] “PID Anti-Windup Schemes | Scilab.” Accessed: Nov. 27, 2024. [Online]. Available: <https://www.scilab.org/pid-anti-windup-schemes>
- [12] “WAGO Hungary | Főoldal.” Accessed: Nov. 27, 2024. [Online]. Available: <https://www.wago.com/hu/>

ÉRINTKEZÉSMENTES FORDULATSZÁMMÉRÉS ÖSSZEHASONLÍTÁSA HALL- ÉS INDUKCIÓS-SZENZOROKKAL

COMPARISON OF CONTACTLESS SPEED MEASUREMENT USING HALL AND INDUCTIVE SENSORS

MÓRÉ Ádám¹, MÁGORI Zsombor²

¹ Egyetemi tanársegéd, adam.more@uni-miskolc.hu

¹ Miskolci Egyetem, Automatizálási és Infokommunikációs Intézet, 3515 Miskolc, Egyetemváros

² BSc hallgató, magorizsombor8@gmail.com

² Miskolci Egyetem, Automatizálási és Infokommunikációs Intézet, 3515 Miskolc, Egyetemváros

Kivonat: A cikk az érintkezésmentes fordulatszám-mérés jelentőségét vizsgálja, összehasonlítva a Hall- és indukciós-szenzorok alkalmazhatóságát kefések, egyfázisú és háromfázisú BLDC motorokon. Az indukciós-szenzor pontosabb és megbízhatóbb eredményeket nyújtott, különösen nehezen hozzáférhető motorok esetén. A Hall-szenzor hatékonysága a motor konstrukciójától függött, egyes esetekben pontatlanságot mutatott. Az eredmények rámutatnak, hogy a megfelelő mérési technológia kiválasztása a motor típusától és az alkalmazási környezettől függ.

Kulcsszavak: Érintkezésmentes fordulatszám-mérés, Hall-szenzor, Indukciós szenzor, Villanymotor, BLDC motor

Abstract: This paper examines the importance of contactless speed measurement by comparing the applicability of Hall and Inductive sensors on brushed, single-phase, and three-phase BLDC motors. The Inductive sensor provided more reliable and accurate results, especially for hard-to-access motors. The Hall sensor's efficiency depended on motor design, showing inaccuracies in some cases. The findings highlight the importance of selecting the appropriate measurement technology based on motor type and application environment.

Keywords: Contactless speed measurement, Hall sensor, Inductive sensor, Electric motor, BLDC motor

1. BEVEZETÉS

A villanymotorok széles körben alkalmazott eszközök a háztartásoktól kezdve az ipari környezetekig. Az egyre fejlettebb motorvezérlési technológiák igénylik a pontos fordulatszám-mérési megoldásokat, különösen az egyenáramú motorok, például a kefések és kefe nélküli (BLDC) motorok esetében. Kutatásunk célja a különböző fordulatszám-mérési technológiák, különösen a Hall- és indukciós-szenzorok, valamint a szimulációs modellek eredményeinek összehasonlítása, hogy az ipari alkalmazások számára optimális megoldást találjunk [1], [2], [3].

Az érintkezésmentes fordulatszám-mérés ma különös jelentőséggel bír. Az ilyen típusú mérés lehetővé teszi, hogy a szenzorok a forgó alkatrészekhez való közvetlen hozzáférés nélkül is pontos adatokat szolgáltatassanak. Ez kulcsfontosságú az olyan ipari környezetekben, ahol a motorok nehezen hozzáférhető helyeken működnek, vagy ahol a közvetlen érintkezés károsíthatja a szenzort vagy a mért eszközt. A technológia előnye továbbá, hogy csökkenti a karbantartási igényt és növeli a megbízhatóságot, hiszen az érintkezésmentes mérés kevésbé hajlamos a mechanikai kopásra [4], [5].

Kutatásunkban különös figyelmet fordítottunk a kefések motorokra, egyfázisú és háromfázisú BLDC motorokra, amelyek mérési nehézségeik és eltérő konstrukcióik miatt kiváló alanyai az összehasonlító elemzéseknek. A cikk célja, hogy megállapítsa, melyik szenzortípus — a Hall- vagy az indukciós-szenzor — teljesít jobban az egyes motorok fordulatszámának mérésében, figyelembe véve az alkalmazási környezeteket és a szenzorok műszaki paramétereit. Az összehasonlítás eredményei segíthetnek az ipari szereplőknek a legmegfelelőbb mérési technológia kiválasztásában, hozzájárulva a hatékonyabb és fenntarthatóbb működéshez [6], [7].

2. FORDULATSZÁM MÉRÉS FONTOSSÁGA ÉS A KÍRÉLET CÉLJA.

A fordulatszám ismerete létfontosságú. A gépeknek a tervezett határaikon belül szükséges működniük. A fordulatszám ismeretével elkerülhetők a mechanikai meghibásodások, a túlzott kopás, valamint szabályozhatóvá válik a hatásfok is. A fordulatszám visszajelzést nyújt, és diagnosztikai célt is szolgálhat [3], [8].

Például egy gép adott jelre a maximális fordulatszámával üzemel. Ha a tapasztalatok szerint a maximális fordulatszám fenntartásához megnövekszik az energiafogyasztás, akkor következtetni lehet arra, hogy a gép javításra vagy karbantartásra szorul.

Az érintésmentes fordulatszám-mérés külső szenzorokkal valósítható meg. A kísérlethez két szenzortípust használtak: Hall- és indukciós-szenzorokat. A motorok működési elveinek és a szenzorok mérési fizikai alapelveinek bemutatása után az összehasonlító mérés részleteit is ismertették [9].

A kísérlet érdekessége, hogy a szenzorok nem hagyományos szervomotorokat mértek, hanem elektromos vízpumpákat. Az elektromos vízpumpák különböző kivitelei vizsgálhatók voltak, így mérhetővé vált egy keféssé, egy egyfázisú, valamint két háromfázisú kefenélküli motor.

3. MÉRÉS RÉSZLETEI ÉS EREDMÉNYEI

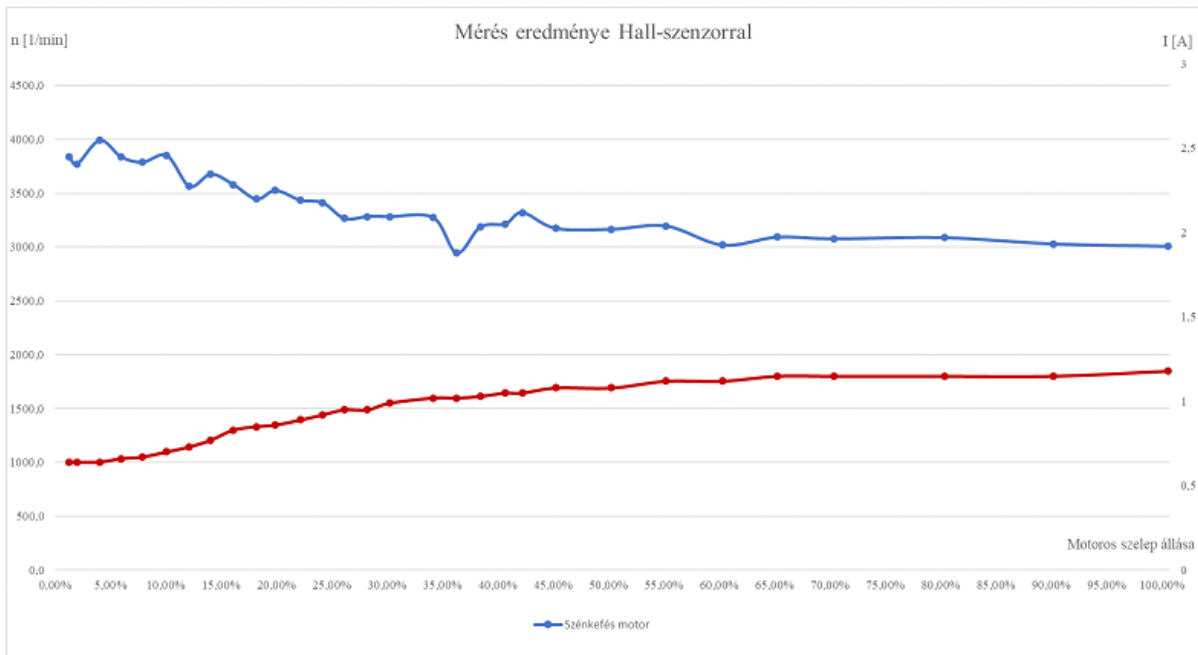
A mérés során az elektromos vízpumpákat egy motorosan állítható szelep szabályozta. Ahogy a szelep záródott, a pumpa differenciális nyomása megnövekedett, miközben az áramlás csökkent. Az áramlás csökkenése arányos volt a szállított tömeg mennyiségének csökkenésével. Amint a szállított tömeg csökkent, a motor fordulatszáma megnövekedett, míg az áramfelvétele csökkent. Ez a fordított arányosság az áramerősség és a fordulatszám között a külső gerjesztésű egyenáramú gépek jellemző tulajdonsága. Az ilyen konstrukciók esetében a motor arra törekszik, hogy állandó teljesítményt adjon le.

A mérés érvényességének és értékelésének alapját ez a fizikai jelenség adta. Ha a szenzor képes volt pontosan mérni a motor fordulatszámának növekedését és az ezzel járó áramcsökkenést, akkor a mérés hitelesnek tekinthető, tehát a szenzor megbízható eredményeket szolgáltatott.

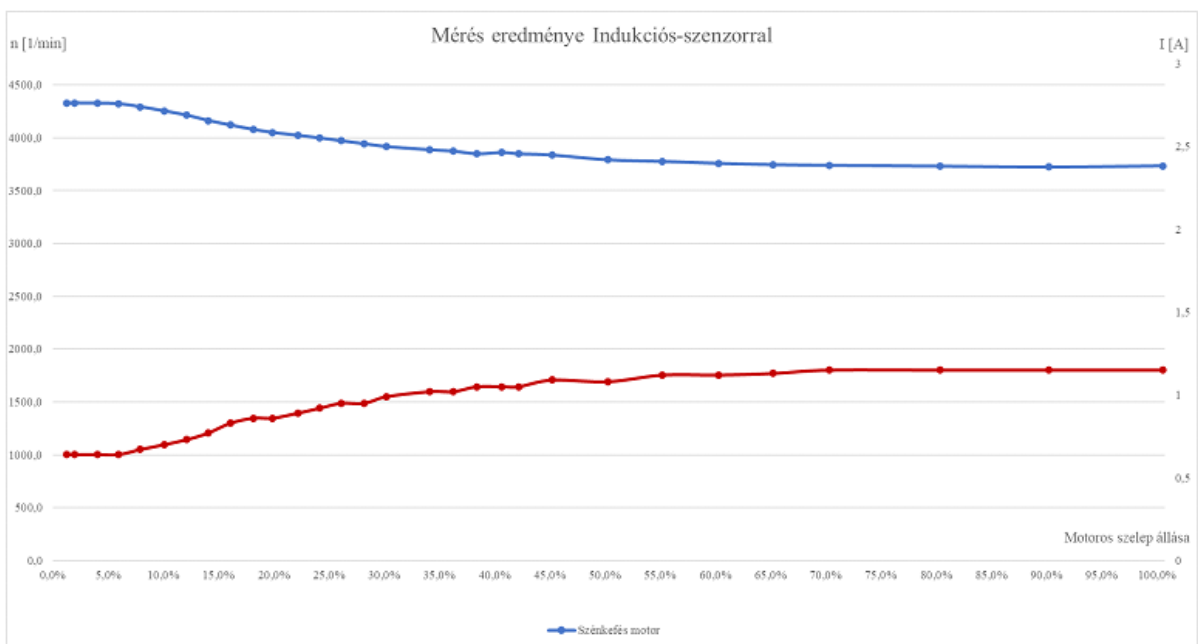
A szenzorok működési elvéből adódóan a Hall-szenzor a forgórész jeleit, míg az indukciós-szenzor az állórész jeleit használja a fordulatszám meghatározásához.

3.1. Kefés motor eredményei a szenzorokkal

A keféssé motor esetében mindkét mérés érvényesnek tekinthető, mivel a fordított arányosság fennállt, ami igazolta a fizikai jelenség alapját. A méréseket *1. és 2. ábra* mutatja be. Ugyanakkor különbség volt megfigyelhető az eredményekben: az indukciós-szenzor mérési adatai meggyőzőbbek voltak, pontosabb karakterisztikát mutatva. Ennek oka az, hogy az indukciós-szenzor az állórész jeleiből következtetett a fordulatszámra, amely a keféssé motorok esetében stabilabb mérést tett lehetővé. A Hall-szenzor eredményei is értékelhetők voltak, de ezeknél a motoroknál a szenzor ajánlott mérési távolságán kívül eső elhelyezkedés némileg rontotta a pontosságot. Ez a különbség rámutat az indukciós-szenzor előnyeire a keféssé motorok mérésében [10].



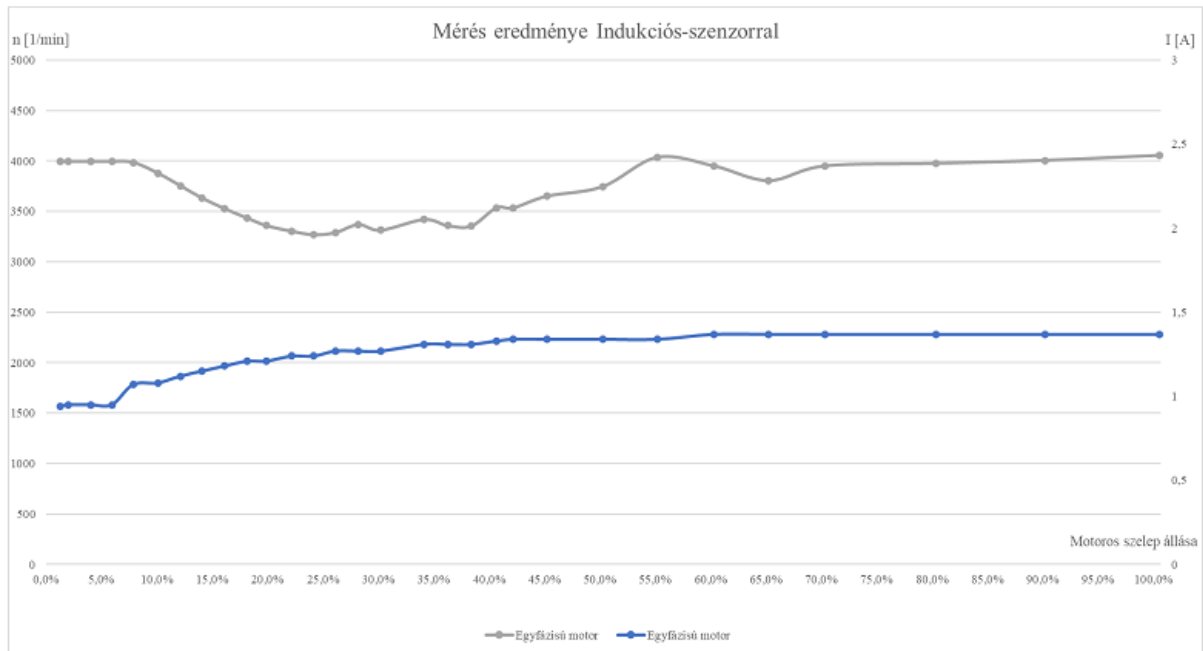
5. ábra: Kefés motor mérési eredménye Hall szenzorról



6. ábra: Kefés motor mérési eredménye indukciós szerzorról

3.2. Egyfázisú BLDC motor eredményei a szenzorokkal

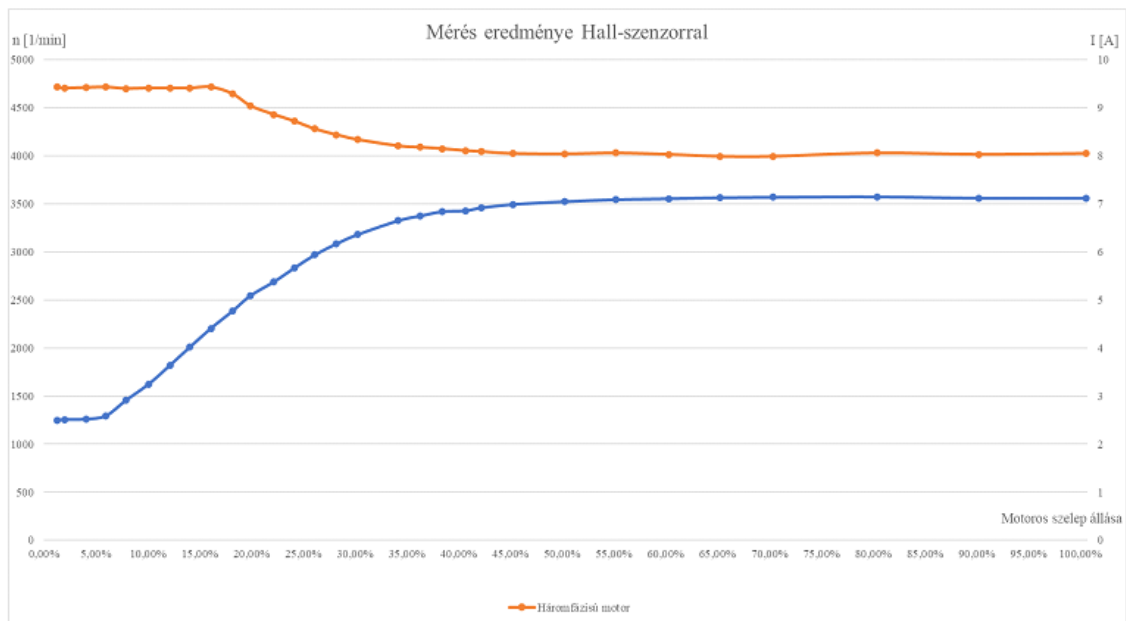
Az egyfázisú BLDC motor mérése kizárólag az indukciós-szenzorról volt kivitelezhető. Ez a motor konstrukciójának köszönhető, mivel a tekercselése lehetetlenné tette a Hall-szenzor számára a forgórész jeleinek detektálását. Az indukciós-szenzor ugyan nem tökéletes pontossággal, de képes volt mérni az állórész impulzusjeleit, ami végül egy sikeres karakterisztika-vizsgálathoz vezetett. Az eredményt a 3. ábra szemlélteti.



7. ábra: Egyfázisú BLDC motor mérési eredménye indukciós szenzorral

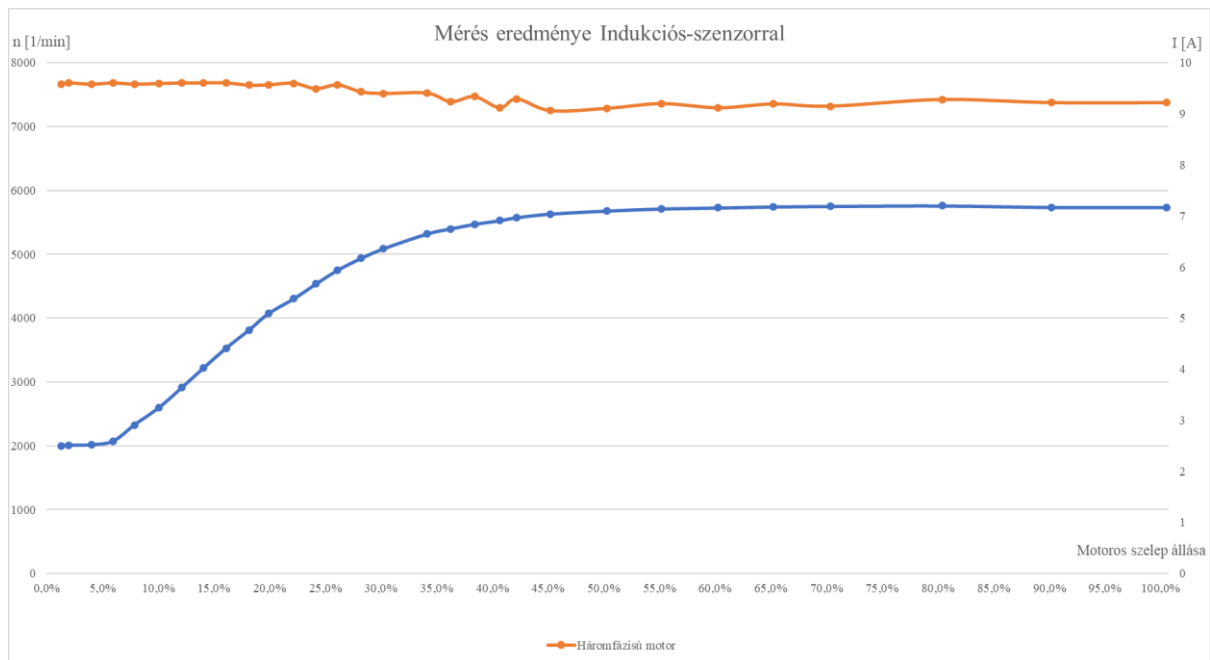
3.3.Háromfázisú BLDC motor eredménye

A Hall-szenzorról végzett mérési eredmények azt mutatták, hogy a motor külső gerjesztésének függvénye sikeresen megvalósult. A mérés során a forgórész jelei mérhetőek voltak, mivel azok nem voltak elzárva, mint az egyfázisú motor esetében. Ugyanakkor a mérési távolság, amely körülbelül 7 mm volt, jelentősen meghaladta a szenzor ajánlott 2 mm-es működési tartományát. Ez a nagyobb távolság csökkentette a Hall-szenzor pontosságát és érzékenységét, ami a mérési eredmények pontosságában is megmutatkozott. A fent említett eredményeket a 4. ábra szemlélteti.



8. ábra: Háromfázisú BLDC motor mérési eredménye Hall szenzorral

Ezzel szemben az indukciós-szenzor esetében a mért fordulatszám értékei majdnem kétszer magasabbak voltak a Hall-szenzor eredményeihez képest, ez az 5. ábrán látható. Ez a különbség a mérési távolság különbségének köszönhető: az indukciós-szenzor esetében a távolság mindössze 0,5 mm volt, amely jól illeszkedik a szenzor 2 mm-es ajánlott mérési tartományába. Ennek eredményeként az indukciós-szenzor pontosabb és megbízhatóbb adatokat tudott szolgáltatni. A kisebb távolság nemcsak a mérési pontosságot növelte, hanem a szenzor érzékenységének optimális kihasználását is lehetővé tette. Ez a tapasztalat jól rávilágít a mérési távolság fontosságára az érintkezésmentes fordulatszám-mérésben, különösen a különböző szenzortípusok alkalmazása során.



9. ábra: Háromfázisú BLDC motor mérési eredménye indukciós szenzorról

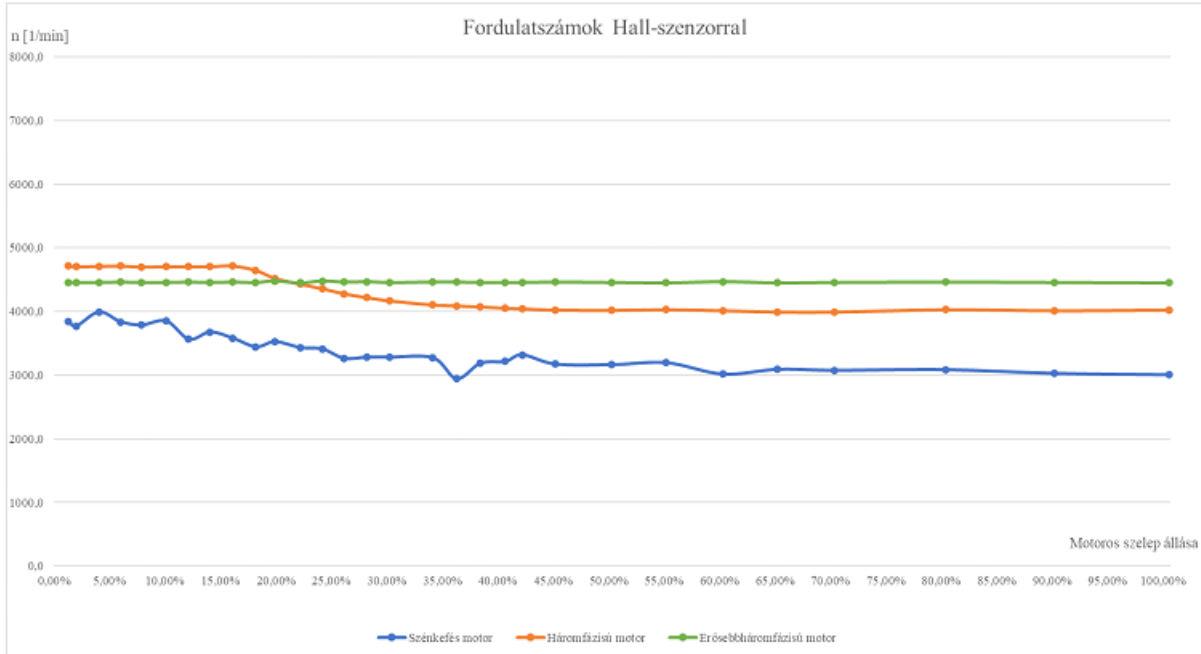
3.4 Mérések összegzése

A 6. és 7. ábrák alapján megállapítható, hogy mindkét szenzor által mért karakterisztikák hasonlítanak a külső gerjesztésű gépek karakterisztikájához. Ezért a következtetés az, hogy a mért eredmények értelmezhetők és hitelesek. A kísérlet során világossá vált, hogy a villanymotorok fordulatszám-mérése különböző fizikai jelenségeken alapulhat: a forgó mágneses mező (Hall-szenzor esetében BLDC motorral), a forgó elektromágneses mező (Hall- és indukciós-szenzor esetében keféss motorral), valamint az állórész elektromágnesei (indukciós-szenzor esetében BLDC motorokkal) egyaránt lehetővé teszik a mérést.

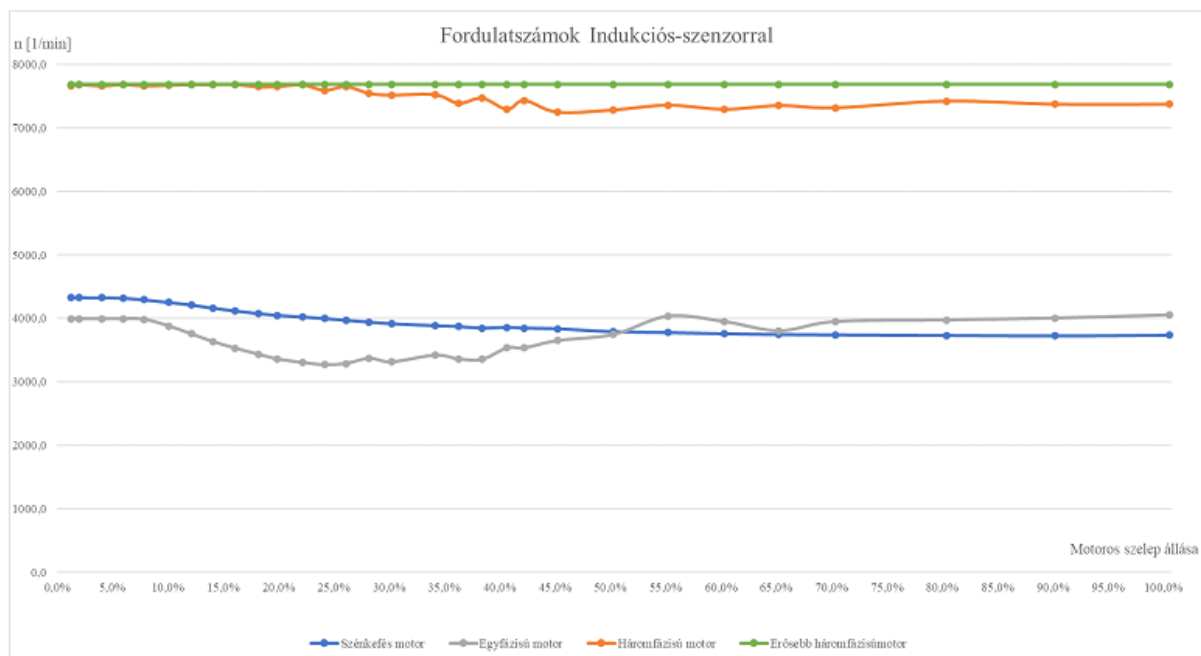
Az összehasonlítás során az indukciós-szenzor következetesen jobban teljesített, különösen azokon a motorokon, ahol az állórész jelei egyértelműbbek és könnyebben hozzáférhetőek voltak. Ez azonban nem azt jelenti, hogy a Hall-szenzor hibás lenne. A Hall-szenzorról mért eredmények pontosságát nagyban befolyásolta, hogy a motorok felépítése miatt a szenzor jellemzően a gyártó által ajánlott mérési távolságon kívül működött. Emellett a Hall-szenzor alkalmazását korlátozta, hogy bizonyos motoroknál, például az egyfázisú BLDC motor esetében, a forgórész jelei nem voltak detektálhatók a tekercselés elrendezése miatt.

Fontos megjegyezni, hogy a Hall-szenzor hatékonyabban használható lenne olyan motorok esetében, ahol a forgórész könnyebben hozzáférhető, például, ha az állórészen kívül helyezkedik el (keféss motorok). Az ilyen konstrukcióknál a Hall-szenzor eredményei versenyképesek

lehetnek. Az indukciós-szenzor azonban a különböző motorok szélesebb körében mutatott nagyobb megbízhatóságot és pontosságot, különösen az állórész jeleinek mérésekor. Ez a kísérlet rávilágít arra, hogy a szenzortípus kiválasztása mindig a motor típusának és a mérési környezet követelményeinek figyelembevételével kell, hogy történjen. További összehasonlítási eredményeket az 1. táblázat mutat be.



10. ábra: Fordulatszám mérés Hall szenzorral



11. ábra: Fordulatszám mérés indukciós szenzorral

1. táblázat: A szenzorok kiválasztásának további szempontjai

Szempontok	Hall-szenzor	Indukciós szenzor
Felépítés egyszerűsége	Bonyolultabb	Egyszerűbb
Tápfeszültség szüksége	Szükséges	Nincs rá szükség
Lassú mozgás érzékelése	Képes rá	Nem képes rá
Forgó és állórész mérése	Nem képes rá	Képes rá
Vízállóság	Nem biztos	Legtöbbször igen

4. KONKLÚZIÓ

A cikk az érintkezésmentes fordulatszám-mérés jelentőségét és különböző szenzortechnológiák alkalmazhatóságát vizsgálja a villanymotorok különböző típusainál. A kutatás során két fő szenzortechnológiát, a Hall- és az indukciós-szenzorokat hasonlították össze. A mérések három motorfajtán — keféss motoron, egyfázisú BLDC motoron és háromfázisú BLDC motoron — történtek, kiemelve az egyes technológiák erősségeit és korlátait.

A vizsgálatok megmutatták, hogy az indukciós-szenzor általában pontosabb méréseket biztosít, különösen a nehezen hozzáférhető motoroknál és a nagyobb távolságú mérések esetén. A Hall-szenzor bizonyos motoroknál — például a keféss motoroknál — megfelelő alternatívát nyújtott, de az egyfázisú BLDC motor méréseiben nem tudott megbízható adatokat szolgáltatni. A háromfázisú BLDC motor esetében az indukciós-szenzor kimagaslóan teljesített, köszönhetően a mérési távolság és a motor felépítésének optimális illeszkedésének.

A kutatás eredményei alapján megállapítható, hogy az érintkezésmentes fordulatszám-mérés kulcsszerepet játszik az ipari alkalmazásokban, különösen az energiahatékonyság, a karbantartás-optimalizálás és a diagnosztika szempontjából. Az indukciós-szenzor általánosságban jobb teljesítményt nyújtott, azonban a Hall-szenzor is megfelelő lehet, ha a motor felépítése és a mérési környezet ezt támogatja.

Az eredmények azt sugallják, hogy az optimális mérési technológia kiválasztása a konkrét alkalmazási környezet és a motor típusának alapos ismeretét igényli. A kutatás jelentős hozzájárulást nyújt a megfelelő mérési megoldások ipari kiválasztásához, elősegítve a hatékonyabb és fenntarthatóbb gépi működést.

5. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] W. CHENG WANG, “A Motor Speed Measurement System Based on Hall Sensor,” *Communications in Computer and Information Science*, vol. 134, no. PART 1, pp. 440–445, 2011, doi: 10.1007/978-3-642-18129-0_69.
- [2] B. S. NAUDURI and G. SHAGA, “A novel approach of using a planar inductive position sensor for the Permanent magnet synchronous motor control application,” *2018 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS)*, vol. 2018-January, pp. 1–5, Apr. 2018, doi: 10.1109/SAS.2018.8336708.
- [3] A. AJBL, M. PASTRE, and M. KAYAL, “A Fully Integrated Hall Sensor Microsystem for Contactless Current Measurement,” *IEEE Sens J*, vol. 13, no. 6, pp. 2271–2278, 2013, doi: 10.1109/JSEN.2013.2251971.
- [4] C. S. JOICE, S. R. PARANJOTHI, and V. J. S. KUMAR, “Digital Control Strategy for Four Quadrant Operation of Three Phase BLDC Motor With Load Variations,” *IEEE Trans Indusra Inform*, vol. 9, no. 2, pp. 974–982, May 2013, doi: 10.1109/TII.2012.2221721.

- [5] C. S. JOICE, S. R. PARANJOTHI, and V. J. S. KUMAR, “Digital Control Strategy for Four Quadrant Operation of Three Phase BLDC Motor With Load Variations,” *IEEE Trans Industr Inform*, vol. 9, no. 2, pp. 974–982, May 2013, doi: 10.1109/TII.2012.2221721.
- [6] M. MATSUSHITA, H. KAMEYAMA, Y. IKEBOH, and S. MORIMOTO, “Stabilization control of sensorless sinusoidal wave drive for control of power factor of PM motor,” *Proceedings - The 12th International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS 2009*, 2009, doi: 10.1109/ICEMS.2009.5382768.
- [7] C. T. CHI and S. A. YIN, “Speed measurement of a general DC brushed motor based on sensorless method,” *10th International Power and Energy Conference, IPEC 2012*, pp. 332–337, 2012, doi: 10.1109/ASSCC.2012.6523288.
- [8] “Single Phase vs Three Phase Power: Explained and Compared.” Accessed: Dec. 04, 2024. [Online]. Available: <https://www.vertiv.com/en-emea/about/news-and-insights/articles/educational-articles/three-phase-power-what-it-is-and-the-benefits-it-brings/>
- [9] C. XIA, Z. LI, and T. SHI, “A Control Strategy for Four-Switch Three-Phase Brushless DC Motor Using Single Current Sensor,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 6, pp. 2058–2066, 2009, doi: 10.1109/TIE.2009.2014307.
- [10] “Olcsó Elektronikai alkatrész *Hall szenzor* 49E (IT12402) vásárlás, termékinformáció -- ITMedia.sk webshop.” Accessed: Dec. 04, 2024. [Online]. Available: https://itmedia.sk/olcso/IT12402/Szersz%C3%A1mok,%20alkatr%C3%A9szek/Elektronikai%20Alkatr%C3%A9szek/Elektronikai_alkatr%C3%A9sz_*Hall_szenzor*_49E

IPARI AUTOMATIZÁLÁS ÚJ SZINTJE: SIEMENS S7-300 ÉS S7-1500 PLC-K KÖZÖTTI MIGRÁCIÓ LEHETŐSÉGEI ÉS KIHÍVÁSAI

A NEW LEVEL OF INDUSTRIAL AUTOMATION: OPPORTUNITIES AND CHALLENGES IN MIGRATING BETWEEN SIEMENS S7-300 AND S7-1500 PLCS

MÓRÉ Ádám¹, SIROKAI György Koppány²

¹ Egyetemi tanársegéd, adam.more@uni-miskolc.hu

¹ Miskolci Egyetem, Automatizálási és Infokommunikációs Intézet, 3515 Miskolc, Egyetemváros

² BSc hallgató, leftmelxsthere@gmail.com

² Miskolci Egyetem, Automatizálási és Infokommunikációs Intézet, 3515 Miskolc, Egyetemváros

Kivonat: A cikk a Siemens S7-300 és S7-1500 programozható logikai vezérlők közötti migráció folyamatát vizsgálja, kiemelve a technológiai fejlődés által kínált előnyöket és a gyakorlati megvalósítás során felmerülő kihívásokat. Bemutatja a két PLC-rendszer közötti főbb technikai eltéréseket, a migráció lépéseit és az optimalizált átálláshoz szükséges stratégiákat. A szerzők hangsúlyozzák, hogy a részletes tervezés, az alapos tesztelés és a felhasználók képzése elengedhetetlen a sikeres implementációhoz. A kutatás eredményei hozzájárulnak a modern ipari automatizálási rendszerek fejlesztéséhez és hosszú távú fenntarthatóságához.

Kulcsszavak: Program migráció, PLC, S7-300, S7-1500, Programozható Logikai vezérlő

Abstract: This paper examines the migration process between Siemens S7-300 and S7-1500 programmable logic controllers, highlighting the advantages offered by technological advancements and the challenges encountered during practical implementation. It presents the key technical differences between the two PLC systems, outlines the migration steps, and discusses strategies required for an optimized transition. The authors emphasize that detailed planning, thorough testing, and user training are essential for successful implementation. The findings contribute to the development and long-term sustainability of modern industrial automation systems.

Keywords: Program migration, PLC, S7-300, S7-1500, Programmable Logic Controller

1. BEVEZETÉS

A programozható logikai vezérlők (PLC-k) az ipari automatizálás alapvető elemei, amelyek a modern gyártási rendszerek gerincét képezik. A technológia fejlődése és a régebbi rendszerek elavulása miatt elengedhetetlen a PLC-k rendszeres frissítése vagy cseréje. Ez a migráció nem csupán a hardverek cseréjét, hanem a meglévő programok és beállítások átvitelét is magában foglalja az új rendszerre. A cikk célja, hogy bemutassa a Siemens S7-300 és S7-1500 PLC-k közötti átállás folyamatát, előnyeit, hátrányait és a migráció során szerzett tapasztalatokat. A migráció jól megtervezett kivitelezése biztosítja a zökkenőmentes működést és az üzleti folyamatok folyamatosságát [1].

2. A PLC-K FEJLŐDÉSE ÉS JELENTŐSÉGE

A PLC-k története az 1960-as években kezdődött, amikor a relé alapú vezérlőrendszerek helyett megjelentek az elektronikus logikát alkalmazó első programozható vezérlők [1], [2]. Az American Modicon által fejlesztett Modicon 084 volt az első PLC, amely forradalmasította az ipari vezérlést. Az 1970-es és 1980-as években a PLC-k funkcionalitása jelentősen bővült, megjelentek a programozási nyelvek, mint például a Ladder Diagram és a Strukturált Szöveg. A digitális korszak beköszöntével a 1990-es években a PLC-k hálózati kommunikációval bővültek, és integrálódtak az ipari automatizálási rendszerekbe. Napjainkban a PLC-k már valós idejű

adatfeldolgozásra, IoT integrációra és komplex automatizálási folyamatok irányítására is képesek, így a modern ipar elengedhetetlen eszközeivé váltak. A PLC technológiai története alapján belátható, hogy már több évtizede az ipar szerves része. Ezért fontos a migráció témakörével foglalkozni [3], [4].

3. AZ S7-300 ÉS S7-1500 PLC-K ÖSSZEHASONLÍTÁSA

A Siemens S7-300 és S7-1500 programozható logikai vezérlők az ipari automatizálás két generációját képviselik, amelyek közötti különbségek nemcsak technológiai, hanem gyakorlati szempontból is jelentősek. Az S7-300-as széria évtizedek óta szolgálja a kisebb és közepes méretű ipari alkalmazásokat megbízható és költséghatékony módon. Moduláris felépítése lehetővé teszi a CPU, I/O modulok és kommunikációs modulok rugalmas bővítését, azonban ennek határai szűkebbek, mint az újabb rendszereknél. Az S7-300 rendszer diagnosztikai funkciói alapvetőek, de nem nyújtanak részletes hibakeresési lehetőségeket. Az adatfeldolgozási sebessége is lassabb, ami komplexebb automatizálási feladatoknál korlátot jelenthet [5], [6].

Az S7-1500 széria számos jelentős előrelépést hozott az S7-300-hoz képest. Ezek közé tartozik a nagyobb számítási teljesítmény, gyorsabb válaszidő és fejlettebb diagnosztikai eszközök, amelyek részletes hibainformációkat szolgáltatnak, megkönnyítve ezzel a problémák azonosítását és javítását. Az S7-1500 PROFINET és egyéb modern kommunikációs protokollokat támogat, így képes könnyedén integrálódni komplex ipari hálózatokba. Beépített kijelzője valós idejű állapotinformációkat nyújt, amelyekhez az S7-300 esetében külső eszközökre van szükség.

Mindkét rendszer támogatja a standard, kompakt és hibamentes (fail-safe) CPU-kat, amelyek a különböző ipari igényeket célozzák meg. Az S7-1500 azonban előnyben részesíti a jövőorientált megoldásokat, mint például a fejlettebb mozgásvezérlést, amely a gyártási folyamatok optimalizálására és a modern gyártósorok működtetésére alkalmas. Az S7-300-ról az S7-1500-ra történő átállás jelentős beruházást igényelhet, ugyanakkor hosszú távon kifizetődő, mivel növeli a rendszer teljesítményét, megbízhatóságát és rugalmasságát [5], [6], [7].

3. A MIGRÁCIÓ FOLYAMATA

Az S7-300-ról S7-1500-ra történő migráció egy összetett és részletes tervezést igénylő folyamat, amely a hardver és a szoftver szintjén is kihívásokat jelent. A folyamat első lépése az érintett PLC-rendszerek és modulok azonosítása. Az S7-300 és S7-1500 közötti architektúrális különbségek, például a memóriastruktúrák eltérő felépítése, alapvetően meghatározzák a migráció stratégiáját. A folyamat főbb lépései a következő fejezetekben lesznek ismertetve.

3.1 Hardver konfiguráció elemzése

A migráció során először a meglévő hardverelemek és azok konfigurációinak részletes áttekintése szükséges. Az S7-300-ban használt CPU és modulok I/O-címeit dokumentálni kell, hogy ezek az információk az új rendszerben is pontosan beállíthatók legyenek.

3.2 Programok archiválása és exportálása

Az S7-300 programjainak biztonsági mentése kulcsfontosságú. Ez a SIMATIC Managerben történő archiválással valósítható meg, ahol a projekt teljes tartalmát tömörített fájlba mentik. Ezt követően a projekt áttelepíthető a TIA Portálba, amely az S7-1500 programozási környezetét biztosítja.

Hardverkonfiguráció migrációja, -az új rendszerbe történő átvitel során a CPU modellek és az I/O modulok manuális hozzáadása szükséges, mivel az automatikus importálás kompatibilitási problémákhoz vezethet. Az S7-1500 hardverkatalógusában kiválasztott CPU-modellt hozzá kell rendelni a rendszerhez [8].

3.3 Programok tesztelése és optimalizálása

Az áttelepített programok szimulációs környezetben történő tesztelése elengedhetetlen. Az eltérések és hibák azonosításához és javításához a TIA Portál diagnosztikai eszközei nyújtanak támogatást. A migráció során a kompatibilitási problémák, például a régi programlogika új környezetben való futtatása, gyakran okozhatnak kihívásokat.

3.3 Fallback stratégiák alkalmazása

A migráció során felmerülő kockázatok kezelésére különböző stratégiák alkalmazhatók. A forró migráció például minimális állásidőt biztosít, mivel a régi és az új rendszer párhuzamosan működik. Ezzel szemben a hideg migráció költséghatékonyabb, de hosszabb állásidőt igényel.

3.4 Felhasználók képzése és rendszerindítás

Az új rendszer hatékony kezeléséhez elengedhetetlen a technikusok képzése. A programok sikeres letöltése és a rendszer beüzemelése után a "Go online" funkció segítségével ellenőrizhetők a valós idejű működési paraméterek.

3.5 Gyakori kihívások és megoldások

Adatvesztés elkerülése: A migráció előtt készített biztonsági mentések minimalizálják az adatvesztés kockázatát.

Hibaüzenetek kezelése: A TIA Portál által jelzett figyelmeztetések és hibák, például hiányzó funkciók, a programblokkok frissítésével vagy a rendszer újbóli fordításával orvosolhatók.

Kommunikációs problémák kiküszöbölése: Az új kommunikációs protokollok konfigurálása biztosítja a rendszer zökkenőmentes működését.

Az S7-300 és S7-1500 közötti migráció tehát nemcsak technikai, hanem stratégiai kihívásokat is jelent. A sikeres átállás érdekében elengedhetetlen a részletes tervezés, az alapos tesztelés és a megfelelő technikai támogatás. Az új rendszer által nyújtott előnyök azonban hosszú távon jelentős mértékben ellensúlyozzák az átállás költségeit és ráfordításait.

4. KONKLÚZIÓ

A Siemens S7-300 és S7-1500 közötti migráció során számos kihívás merült fel, amelyek közé tartozott a különböző architektúrák és memóriastruktúrák közötti eltérések kezelése. Az egyik legfontosabb tanulság az volt, hogy az alapos előkészítés jelentősen csökkenti a hibák előfordulását. Például a hardver és szoftver kompatibilitásának ellenőrzése már a migráció előtt minimalizálhatja az adatvesztést és a kommunikációs problémákat. A felhasználók képzése szintén elengedhetetlen, hogy a technikusok hatékonyan tudják kezelni az új rendszert. Az átállási folyamat során használt eszközök és technológiák, mint például a TIA Portál, nagyban megkönnyítik az új rendszer implementálását.

A PLC-k migrációja elengedhetetlen az ipari automatizálás fejlődésének fenntartásához. Az S7-300-ról S7-1500-ra történő átállás nem csupán a rendszer hosszú távú fenntarthatóságát és megbízhatóságát biztosítja, hanem a modern technológiákhoz való hozzáférést is. Az olyan új

megoldások, mint a valós idejű diagnosztika, a fejlettebb kommunikáció és a nagyobb feldolgozási teljesítmény, jelentősen növelik az üzemek hatékonyságát. A cikk bemutatta, hogy a migráció sikeressége nagymértékben múlik a tervezésen, a technikai megvalósításon és a felhasználók képzésén. Az ipar jövője az intelligens rendszerek irányába mutat, ahol a PLC-k kulcsszerepet játszanak majd.

5. KÖSZÖNET NYILVÁNÍTÁS

Hálás köszönetünket fejezzük ki az Ipartechnológiai Kft.-nek, hogy lehetőséget biztosított számunkra a PLC-migrációs projektben való részvételre. A közös munka nemcsak szakmai fejlődésünket segítette elő, hanem értékes tapasztalatokat is nyújtott a korszerű ipari automatizálási technológiák területén.

6. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] M. LEE, J. W. KIM, Y. MO, and A. D. WALKER, “A review of professional learning community (PLC) instruments,” *Journal of Educational Administration*, vol. 60, no. 3, pp. 262–287, May 2022, doi: 10.1108/JEA-03-2021-0060.
- [2] T. OVATMAN, A. ARAL, D. POLAT, and A. O. A “AN overview of model checking practices on verification of PLC software,” *Softw Syst Model*, vol. 15, no. 4, pp. 937–960, Oct. 2016, doi: 10.1007/S10270-014-0448-7.
- [3] E. R. ALPHONSUS and M. O. ABDULLAH, “A review on the applications of programmable logic controllers (PLCs),” *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, vol. 60, pp. 1185–1205, Jul. 2016, doi: 10.1016/J.RSER.2016.01.025.
- [4] “The Difference Between PLC Migration and Upgrading: Finding the Right Choice for You — PLC and SCADA Programming | Automation Specialists.” Accessed: Dec. 01, 2024. [Online]. Available: <https://www.outlierautomation.com/blog/2020/11/24/difference-between-plc-migration-and-upgrading>
- [5] Y. JUAN, “The Application of Siemens S7-300 in the Automatic Warehouse,” *Science and Technology Information*, Accessed: Dec. 01, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/>
- [6] H. KLEINES, “Synchronous Motion with S7-1500 PLCs in Neutron Instruments,” pp. 1716–1719, doi: 10.18429/JACOW-ICALEPCS2017-THPHA143.
- [7] “Migration Guide: SIMATIC S7-300/400 to SIMATIC S7-1500 - ID: 109478811 - Industry Support Siemens.” Accessed: Dec. 01, 2024. [Online]. Available: <https://support.industry.siemens.com/cs/document/109478811/migration-guide-simatic-s7-300-400-to-simatic-s7-1500?dti=0&lc=en-AO>
- [8] “Programming with STEP 7 | Enhanced Reader.” Accessed: Dec. 03, 2024. [Online]. Available: moz-extension://cd104806-9b08-4b02-be47-1ae5907395ee/enhanced-reader.html?openApp&pdf=https%3A%2F%2Fcache.industry.siemens.com%2Fd1%2Ffiles%2F825%2F109751825%2Fatt_933142%2Fv1%2FSTEP_7_-_Programming_with_STEP_7.pdf

A MESTERSÉGES INTELLIGENCIA SZEREPE AZ ÉPÜLETAUTOMATIKÁBAN

THE ROLE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN BUILDING AUTOMATION

PALLA GYULA

tanszéki mérnök, e-mail: gyula.palla@uni-miskolc.hu

Miskolci Egyetem, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet, Elektrotechnikai és Elektronikai Tanszék

3515 Miskolc, Miskolc-Egyetemváros

Absztrakt: Az épületautomatizálás célja, hogy a modern épületek működését hatékonyabbá, energiatakarékosabbá tegye. A mesterséges intelligencia (MI) fejlődése új lehetőségeket nyitott meg ezen a területen, lehetővé téve a rendszerek dinamikus, valós idejű optimalizálását és az adatok alapján történő intelligens döntéshozatalt. Az MI különféle gépi tanulási algoritmusok révén képes előre jelezni a környezeti változásokat, optimalizálni az energiafelhasználást, és növelni az épület komfortját. Jelen tanulmány célja, hogy bemutassa a mesterséges intelligencia szerepét az épületautomatizálásban, áttekintve a jelenlegi megoldásokat, esettanulmányokat mutasson és jövőbeli fejlesztési lehetőségeket. A cikk kitér az MI által nyújtott hatékonyságnövelésre, költségcsökkentésre, valamint a fenntartható és intelligens épületek megteremtésének lehetőségére. A Miskolci Egyetem, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet, Elektrotechnikai és Elektronikai Tanszékén a napelemek hatékonyságának vizsgálatával és a PCM (Phase Change Material) felhasználásának kutatásával vizsgáljuk ezt a területet. A fő kérdéskör, amelyek kutatásaim során szeretnék foglalkozni, hogy az időjárás változásaiból és a felhasználók szubjektív komfortérzetéből adódó bizonytalanságot, hogyan lehet kiküszöbölni a mesterséges intelligencia (legfőképpen öntanuló algoritmusok) segítségével.

Kulcsszavak: Épületautomatizálás, Mesterséges Intelligencia, Épületenergetika

Abstract: The aim of building automation is to make the operation of modern buildings more efficient and energy-saving. The development of artificial intelligence (AI) has opened up new possibilities in this field, enabling dynamic, real-time optimization of systems and intelligent decision-making based on data. Through various machine learning algorithms, AI can predict environmental changes, optimize energy consumption, and increase building comfort. The purpose of this study is to demonstrate the role of artificial intelligence in building automation, reviewing current solutions, case studies, and future development opportunities. The article addresses the efficiency improvements, cost reductions, and the potential for creating sustainable and smart buildings provided by AI. At the University of Miskolc, Institute of Physics and Electrical Engineering, Department of Electrical Engineering and Electronics and Department of Physics, we are investigating the efficiency of solar panels and researching the use of Phase Change Material (PCM) in this field. The main research question I aim to address is how to eliminate the uncertainties arising from weather changes and the subjective comfort perception of users with the help of artificial intelligence, particularly self-learning algorithms.

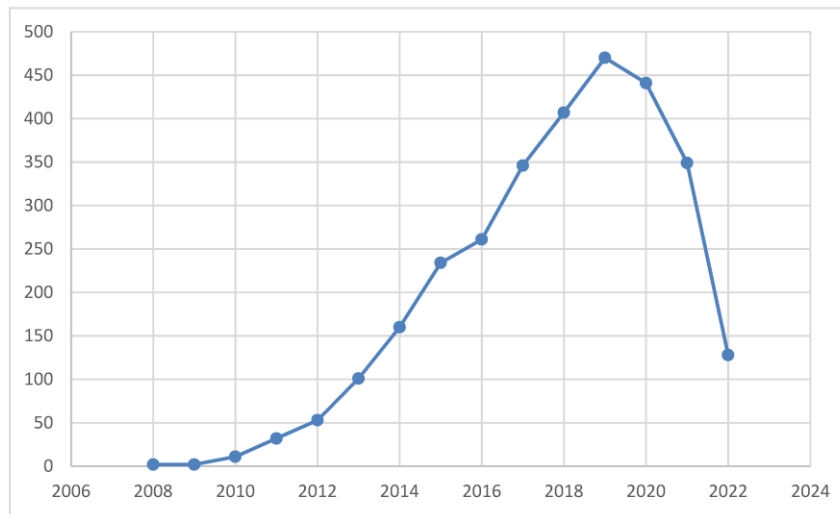
Keywords: Building Automation, Artificial Intelligence, Building Energy Management

1. BEVEZETÉS

A fenntarthatóság és az energiahatékonyság egyre nagyobb hangsúlyt kap a modern épülettervezésben és üzemeltetésben. Az épületek energiafogyasztása globálisan az egyik legjelentősebb környezeti kihívást jelenti, mivel a világ teljes energiafelhasználásának mintegy 30%-a az épületek működtetéséhez kapcsolódik [1]. Ezzel párhuzamosan a mesterséges intelligencia (MI) gyors fejlődése új lehetőségeket nyit meg az épületenergetikai rendszerek hatékonyabb irányítása és optimalizálása terén. Az MI képessége, hogy nagy mennyiségű adatot gyorsan és pontosan elemezzon, előre jelezze az energiaigényt, és automatikusan alkalmazkodik a változó körülményekhez, jelentős előnyökkel járhat mind az energiahatékonyság, mind a költséghatékonyság szempontjából. A témához erősen kapcsolódnak a gazdaságossági megfontolások is,

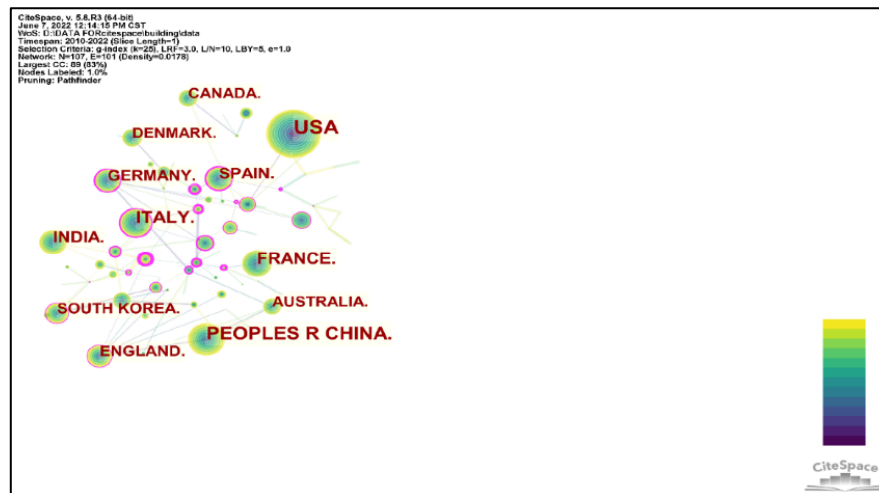
amiket befolyásolnak a külső, sokszor előre nehezen megjósolható gazdasági változások és a változó jogi környezet.

A kutatások jelenlegi állását [2] két ábrával szeretném szemléltetni, amelyet egy a témával foglalkozó korábbi publikációból vettem ki.



12. ábra Az intelligens épületekre vonatkozó éves publikációs adatbázis statisztikái 2022-ig (A Bibliometric Review on Artificial Intelligence for Smart Buildings/Figure 2. Jiaxi Luo <https://doi.org/10.3390/su141610230>)

Az első ábra 2022-ig az ezzel foglalkozó publikációk megjelenését ábrázolja globális szinten. Látható, hogy a téma iránti érdeklődés 2019 után gyors csökkenésnek indult. Viszont azt is látni kell, hogy a Mesterséges Intelligencia 2022-es berobbanása a hétköznapi életbe teljesen új lehetőségeket nyitott meg a területen.



13. ábra A nemzetközi együttműködési hálózat tudástérképe 2022-ig (A Bibliometric Review on Artificial Intelligence for Smart Buildings/Figure 3. Jiaxi Luo <https://doi.org/10.3390/su141610230>)

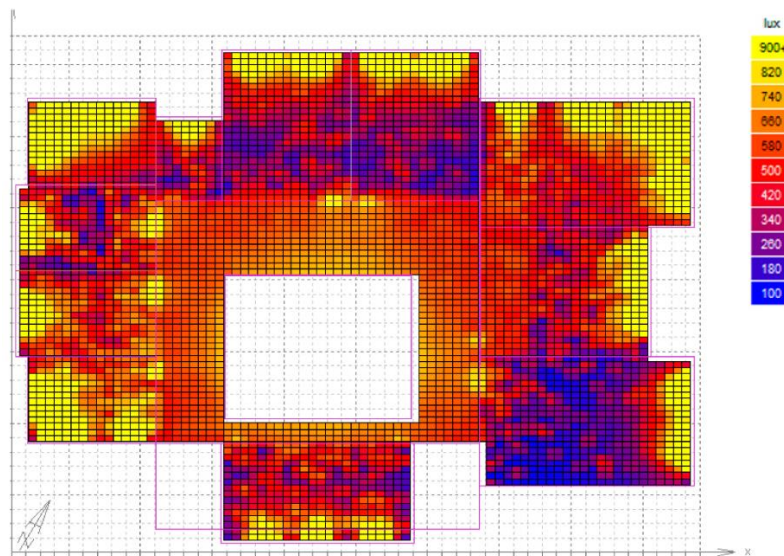
Ha a kutatások területekre bontott eloszlását vizsgáljuk, közép-európai országban kevés publikáció készül, ami a tématerülettel foglalkozik. Az energia termelésére és tárolására használt

lehetőségek területenként óriási különbségeket mutatnak és ugyanazon technológiák nem biztos, hogy mindenütt egyforma arányban alkalmazhatóak.

2. AZ ÉPÜLETAUTOMATIZÁLÁS JELENLEGI HELYZETE

A hagyományos épületautomatikai rendszerek célja, hogy kényelmet, biztonságot és energiahatékonyságot biztosítsanak az épületekben, főként előre meghatározott beállítások alapján. Az ilyen rendszerek magukban foglalják a fűtés, szellőztetés és légkondicionálás (HVAC) rendszereit, a világításvezérlést, valamint a biztonsági és beléptető rendszereket. Ezek a megoldások alapvetően időzítőkre, szenzorokra és kézi beállításokra támaszkodnak, ami limitált reakcióképességet jelent a valós idejű környezeti változásokra. A hagyományos rendszerek tipikusan különállóan működnek, és kevésbé képesek integrálni az adatokat vagy önállóan optimalizálni a teljesítményüket, ami korlátozza az energiahatékonyság maximális elérését.

A 3. ábrát egy esettanulmányból [3] vettem ki. Egy többemeletes épület két emeletének nappali besugárzása látható rajta [Luxor]-ban mérve.



3.ábra. Az esettanulmány tipikus emeleteinek (első és második emelet) nappali besugárzás elemzése (Optimizing Existing Multistory Building Designs towards Net-Zero Energy Mohammad Y. AbuGrain andHalil Z. Alibaba <https://doi.org/10.3390/su9030399>)

Látható, hogy még nem túl nagy felbontást használva is óriási mennyiségű adat keletkezik. Ha figyelembe vesszük, hogy ezek az értékek minden egyes vizsgált ponton időben dinamikusan változnak és a döntéshozatal gyors szabályozást igényel, látszik, hogy az adatfeldolgozás már egy paraméter (például az épület besugárzása) vizsgálatával is bonyolulttá válik. Valós épületautomatikai rendszerekben számos egyéb paraméter nehezen jósolható változását kell még figyelembe venni, nem is beszélve az épületben tartózkodók sokszor az adatelemzés szempontjából kiszámíthatatlan viselkedéséről és a szubjektív komfortérzetükről.

2.1. Az épületautomatizálás jelenlegi helyzete: Kihívások

A hagyományos épületautomatikai rendszerek nehezen skálázhatóak és optimalizálhatók manuálisan. Ennek leggyakoribb okait a következő felsorolásban szedtem össze:

Komplexitás vagy összetettség: Nagyobb épületek esetében a rendszerek, például a HVAC és a világításvezérlés, bonyolult hálózatokban működnek, amelyek több száz, akár több ezer szenzort, eszközt és alrendszert foglalnak magukban. Ezek manuális kezelése időigényes, és sok emberi beavatkozást igényel, ami korlátozza a skálázhatóságot.

Adatmennyiség: Az épületautomatizálás során rengeteg adat keletkezik a különféle szenzorokból, amelyek a hőmérsékletet, a fényviszonyokat, a páratartalmat, a mozgást és egyéb környezeti tényezőket vizsgálják. Manuálisan nehéz ezeket az adatokat hatékonyan feldolgozni, elemezni, és ennek alapján gyors döntéseket hozni.

Egyedi igények: Az épületek felhasználási módja gyakran változik, például egy irodaépületben a különböző szobák eltérő komfortbeállításokat igényelhetnek. Ezek a változások nehezen kezelhetők, különösen, ha valós időben kellene reagálni a felhasználói igényekre és az energiafogyasztás optimalizálására.

Valós idejű reakciók hiánya: A hagyományos rendszerek nem képesek valós idejű adatfeldolgozásra és gyors döntéshozatalra. Ez azt jelenti, hogy az épület rendszerei nem képesek azonnal reagálni a környezeti változásokra, ami energiapazarláshoz vezet.

Optimalizációs korlátok: A manuális beavatkozások jellemzően fix, előre meghatározott paraméterekkel dolgoznak, ami megakadályozza a rendszerek folyamatos finomhangolását az adott körülményekhez.

3. A MESTERSÉGES INTELLIGENCIA MEGJELENÉSE AZ ÉPÜLETAUTOMATIZÁLÁSBAN

A mesterséges intelligencia (MI) jelentős szerepet játszhat a komplex épületautomatizálási rendszerek vezérlésében és az adatok elemzésben.

Prediktív modellezés és előrejelzés: Az MI képes az épület különböző rendszereinek (például HVAC, világítás) működési adatait és a környezeti tényezőket elemezni, hogy előre jelezze a jövőbeli igényeket. Például előre tudja jelezni, mikor kell a fűtést vagy a légkondicionálást növelni vagy csökkenteni a belső hőmérséklet optimális fenntartása érdekében. Ezáltal a rendszerek már előre alkalmazkodnak a várható változásokhoz, csökkentve a felesleges energiafelhasználást és növelve a komfortérzetet.

Valós idejű adatfeldolgozás és automatizált döntéshozatal: Az MI valós időben képes nagy mennyiségű adatot elemezni a különböző szenzorokból, mint például a hőmérséklet, páratartalom, fényintenzitás vagy mozgásérzékelők által szolgáltatott adatok. Az algoritmusok folyamatosan figyelik az épület környezetét, és azonnali döntéseket hoznak a rendszerek működésének optimalizálása érdekében. Például, ha egy terem üres, az MI automatikusan lekapcsolhatja a világítást.

Automatikus tanulás és optimalizáció: Az MI algoritmusok képesek folyamatosan tanulni a rendszerek működési mintáiból és javítani a teljesítményt az idő előrehaladtával. A gépi tanulás (Machine Learning) segítségével az MI felismeri az épület rendszereinek működési anomáliáit, és folyamatosan optimalizálja az energiafelhasználást és a kényelmi beállításokat. Így az MI nem csupán egy előre beprogramozott logika szerint működik, hanem az épület egyedi használati mintáihoz igazodik.

Rendszerek közötti integráció: Az MI képes több különböző épületautomatizálási rendszer adatainak integrálására és összehangolására. Például a HVAC rendszer adatait kombinálhatja a világítási rendszerrel, hogy az épület napfényesebb részein automatikusan csökkentse a mesterséges világítást, ezzel energiát spórolva. Ugyanígy a biztonsági rendszerek és az energiafelhasználás is összhangban működhetnek. A kamerák felvételeinek elemzése hosszú távon mérheti az épület egyes részeinek kihasználtságának időbeli megoszlását. Az épületautomatika vagyoni védelmi részét nem vizsgálom.

Anomáliák felismerése és karbantartási előrejelzések: Az MI képes felismerni a rendszerek rendellenes működését, és előre jelezni a karbantartási igényeket. Ezzel a prediktív karbantartási módszerrel csökkenthető a váratlan meghibásodások kockázata, valamint optimalizálható a karbantartási folyamat, ami hosszú távon költségmegtakarítást eredményez.

Energiamenedzsment és fenntarthatóság: Az MI segíthet az épület energiafelhasználásának optimalizálásában, különös tekintettel az időszakos energiaigényekre, a megújuló energiaforrások integrálására és az energiafogyasztás csökkentésére. Segítségével az épület rendszerei dinamikusan alkalmazkodnak a külső és belső környezeti változásokhoz, ami jelentősen hozzájárulhat a fenntarthatósági célok eléréséhez.

4. A FELADATHOZ HASZNÁLHATÓ MESTERSÉGES INTELLIGENCIA TÍPUSAI

Az épületautomatizálásban számos algoritmus és gépi tanulási módszer alkalmazható a rendszerek intelligens vezérlésére, az adatok elemzésére, és a hatékonyság növelésére. Ezek közül néhány módszert szedtem össze:

4.1. Prediktív modellezés

Regressziószámítás: Ez egy egyszerű, de hatékony statisztikai módszer, amelyet az energiafelhasználás vagy más paraméterek előrejelzésére használnak. A múltbéli adatok alapján előre jelzi a rendszerek jövőbeli viselkedését, például mikor érdemes csökkenteni a fűtési vagy hűtési teljesítményt a hatékonyság érdekében.

Idősoros Analízis: Az idősoros adatokon alapuló modellezés a különböző épületrendszerek – például hőmérséklet vagy energiafogyasztás – dinamikus előrejelzésében segít. Ezzel optimalizálhatók a rendszerek működési paraméterei valós időben.

4.2. Neurális hálózatok

Mesterséges neurális hálózatok (Artificial Neural Networks): Az ANN-ek kiválóan alkalmasak komplex rendszerek mintázatainak felismerésére és tanulására. Az épületautomatizálásban használják például a fűtés, szellőztetés és légkondicionálás (HVAC) rendszerek energiafelhasználásának optimalizálására. Az ANN-ek képesek tanulni az archivált adatokból és automatikusan javítani a rendszerek teljesítményét.

Mély tanulás: Ez a gépi tanulási technika több rétegű neurális hálózatokat alkalmaz, amelyek több rétegből állnak. A mély tanulás különösen hasznos lehet olyan komplex feladatoknál, mint az épületrendszerek közötti összetett kapcsolatok és a környezeti tényezők közötti mintázatok felismerése, például a fényviszonyok és az energiafogyasztás közötti összefüggések elemzése.

4.3. Gépi tanulási algoritmusok

Klaszterezés (Clustering): A klaszterezési algoritmusok az épületben zajló tevékenységek és használati minták alapján azonosítják a rendszerek különböző működési állapotait. Ez segíthet például azonosítani, hogy egy épület mely részeiben érdemes hűtést vagy fűtést csökkenteni a használati minták alapján.

4.4. Fuzzy logika

Fuzzy vezérlés: Ez a módszer akkor hasznos, amikor az épületautomatizálási rendszerek bonyolult környezetben működnek, ahol a döntések nem mindig bináris kimenetelűek. A fuzzy logika lehetővé teszi a rendszerek számára, hogy nem pontos vagy bizonytalan adatok alapján

is optimális döntéseket hozzanak, például a komfortszint finomhangolásához a belső hőmérséklet és a páratartalom alapján.

4.5. Genetikus algoritmusok

Ezek a természetes szelekción alapuló optimalizáló algoritmusok, amelyek különösen hasznosak komplex, több paramétert tartalmazó rendszerek optimalizálására. Az épületautomatizálásban a genetikus algoritmusok segítségével optimalizálhatók az energiafogyasztás és a komfortszint közötti kompromisszumok.

5. ESETTANULMÁNYOK

Egy konkrét példa az MI épületautomatizálási alkalmazására a Grid Edge Flex2X projekt, amelyet kereskedelmi épületek energiafelhasználásának optimalizálására fejlesztettek ki. Ebben a rendszerben az MI algoritmusok a meglévő épületenergetikai rendszerek adatait kombinálják külső forrásokkal, például az időjárás adatokkal, és valós időben optimalizálják az épület energiafelhasználását. A rendszer képes előre jelezni az energiaigényt akár 24 órával korábban, és alkalmazkodik a változó környezeti feltételekhez. A Grid Edge szoftvere az épület energiafelhasználását rugalmasabbá teszi, lehetővé téve, hogy az épület tulajdonosai részt vegyenek az energiapiacban, és minimalizálják a saját költségeiket [4].

Egy másik példa a Bosch Energy and Building Solutions által fejlesztett digitális épületek MI alapú rendszere, amely valós idejű adatokat gyűjt az épület különböző rendszereiről, mint például a HVAC és világításvezérlés. Az MI algoritmusok folyamatosan elemzik az adatokat, felismerik a mintákat és anomáliákat, majd optimalizálják a rendszer működését. Ezzel a módszerrel az épület energiahatékonyága jelentősen növelhető [5].

6. ÖSSZEFOGLALÁS

Zárógondolatként megállapítható, hogy a mesterséges intelligencia (MI) alapvetően formálhatja az épített környezet hatékonyságát és fenntarthatóságát a jövőben. Az MI segítségével az épületek sokkal dinamikusabb és adaptívabb rendszerekké válhatnak, amelyek valós időben reagálnak a környezeti változásokra, előre jelezve a felhasználói igényeket és az időjárás változásait optimalizálva az energiafelhasználást. Ez nemcsak az épületek energiahatékonyágát növeli, hanem csökkenti a karbonlábnyomot, és hozzájárul a fenntarthatóbb városok kialakításához.

Az intelligens épületek, melyekben az MI előrejelző modellekkel, neurális hálózatokkal és Deep Learning technikákkal dolgozik, képesek lesznek folyamatosan optimalizálni az energiafelhasználást, fenntartani a komfortérzetet, és megújuló energiaforrásokat hatékonyabban integrálni a működésükbe. Ezzel a technológiával a globális energiafogyasztás csökkentése és a környezeti fenntarthatóság előmozdítása érhető el [4].

7. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] Energy Efficiency in Buildings: Performance Gaps and Sustainable Materials
Henry Odiri Igugu, Jacques Laubscher, António Benjamim Mapossa, Patricia Abimbola Popoola, Modupeola Dada
<https://doi.org/10.3390/encyclopedia4040092>
- [2] A Bibliometric Review on Artificial Intelligence for Smart Buildings
Jiaxi Luo
<https://doi.org/10.3390/su141610230>

- [3] Optimizing Existing Multistory Building Designs towards Net-Zero Energy
by Mohammad Y. AbuGrain and Halil Z. Alibaba
<https://doi.org/10.3390/su9030399>
- [4] Case Study: Artificial Intelligence for Building Energy Management Systems
<https://www.iea.org/articles/case-study-artificial-intelligence-for-building-energy-management-systems>
- [5] Artificial Intelligence in Building Management
<https://www.boschbuildingsolutions.com/xc/en/news-and-stories/smart-buildings/artificial-intelligence-in-building-management/>

TERMOSZIFON-PROTOTÍPUS ÖSSZEÁLLÍTÁSA HŐTECHNIKAI VIZSGÁLATOKHOZ

DESIGN OF A HEAT PIPE PROTOTYPE FOR THERMAL INVESTIGATION

Szaszák Norbert¹, Juhász Kristóf Gábor²

¹Ph.D., egyetemi docens, norbert.szaszak@uni-miskolc.hu

¹Miskolci Egyetem, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet, Áramlás- és Hőtechnikai Intézeti Tanszék, 3515 Miskolc-Egyetemváros

² hallgató, juhaszkristof@gmail.com

²Miskolci Egyetem, juhasz.kristof.gabor@student.uni-miskolc.hu

Kivonat: Jelen dolgozat bemutatja egy olyan, laboratóriumi vizsgálatok céljára szolgáló termoszfion (hőcső) és a hozzá kapcsolódó mérőrendszer elkészítését és összeállítását, amely segítségével hőtechnikai vizsgálatok végezhetőek. A vizsgálatok elvégzésével megismerhető a hőcső működése, elsősorban a hőszállítási jellemzők függése különböző paraméter-beállításoktól. A dolgozatban elsőként a vonatkozó szakirodalom áttekintése, majd a szakirodalomban fellelt példák alapján a mérési feladatoknak megfelelő termoszfion összeállítása kerül bemutatásra. A későbbi vizsgálatok fő célja a termoszfionra jellemző látszólagos hővezetési tényező meghatározása különböző paraméterbeállítások mellett.

Kulcsszavak: Termoszfion, Hővezetési tényező, Hőteljesítmény, Hőátviteli ellenállás

Abstract: This paper presents a thermosyphon (heat pipe) and the corresponding measurement equipment designed for thermal experiments. The laboratory investigations provide information about the operation parameters of the heat pipe, primarily the dependence of the heat-transfer properties on the parameter-settings. Firstly, the related literature is presented, following the design of a heat pipe dedicated for laboratory measurements is provided. The main goal of the research is the determination of the dependence of the thermal conductivity characteristic of the thermosyphon on the different parameter settings.

Keywords: Thermosyphon, Heat pipe, Thermal conductivity, Thermal performance, Heat transfer resistance

1. BEVEZETÉS

A hőcső egy passzív hőátadó eszköz, amely a hőt folyamatosan és relatíve nagy távolságra képes szállítani a munkafolyadék párolgásának és kondenzálásának segítségével, annak látens hőjének felhasználásával. Az ilyen berendezés három fő részből áll: az elpárologtatóból, a középső adiabatikus régióból és a kondenzátor részből. Szerkezete nem tartalmaz mozgó alkatrészt (csupán mozgó folyadékot és annak gőzét), így a hőátadás jellemzően a gőz áramlásának segítségével és fázisváltozással megy végbe.

A hőcsövek egyik fő előnye más hagyományos eszközökkel szemben, hogy állandósult állapotban kifejezetten nagy értékű effektív hőszállító képességgel rendelkeznek. A fázisváltásnak köszönhetően rendkívül magas, akár MW/(mK) nagyságrendű effektív hővezetési értékek érhetők el a hőcsövekkel. Így tehát a hőcsöveket arra használják, hogy nagy teljesítménnyel hőt továbbítsanak adott távolságokon, elhanyagolhatóan kicsi értékű hőmérsékletkülönbség mellett. [1]

A termoszfionok főbb alkalmazásai lehetnek: gázturbina lapáthűtése, termikus stabilitás biztosítása, levegő-levegő vagy gáz-gáz hőcserélőként, jegesedés megelőzése bóján, melegvíz hasznosítás és hulladékhő hasznosítása ipari területeken. [2]

Az e cikkben leírtak célja bemutatni a hőcsövek, – fő kókuszban a termoszfionok – mechanizmusának és különféle mérnöki alkalmazásának ismertetését és a vonatkozó szakirodalom áttekintését. Ezek mellett bemutatásra kerül egy termoszfion-prototípus készítése és a vizsgálatokhoz összeállított mérőrendszer.

2. A HŐCSÖVEK LEHETSÉGES ALKALMAZÁSAI

Az utóbbi időkben a hőcsövek kimagasló érdeklődést váltottak ki a kutatók körében, és kiemelkedően fontos technológiának bizonyultak olyan nagyobb előnyeik miatt, mint a kiváló hőátadási teljesítmény, a gyors hőreakció, a pontos izotermikus szabályozás és a kompakt méret. [1]

A hőcsöveket széles körben alkalmazzák elektronikus eszközök hűtésére, atomreaktorok kommunikációs állomásainál és hőenergia tárolásánál, koncentrátoros naperóműveknél, műholdak hűtőrendszereiben, fűtési, szellőztetési feladatok ellátására, talajhőszivattyúk esetében stb. A hőcsöveket a napenergiával kapcsolatban is felhasználják az ipari és háztartási hőenergiaigények kielégítésére. A vákuumcsöves napkollektorok bizonyos típusai például több hőcső együttesével működnek. A hőcső-technológia továbbá koncentrált fotovoltaiikus rendszerekben is megtalálható. Hőcsöves termoelektromos generátort is alkalmaztak már az alacsony hőfokú ipari hulladékhő elektromos árammá alakítására [1, 3].

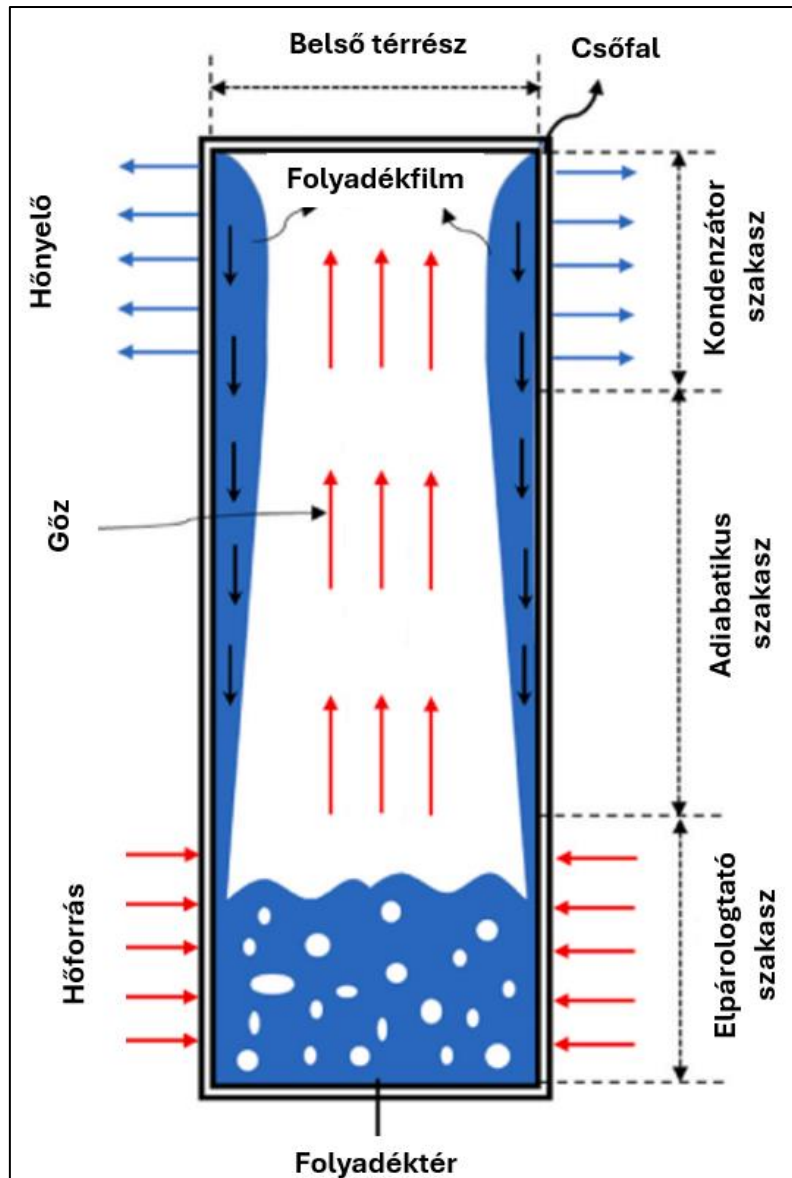
A hőcsöveket széles körben használják katonai radarrendszerekben az adó- és vevőmodulok megfelelő hűtésére, a haditengerészeti antennákban a hőterhelés csökkentésére, a tengeralattjárókban pedig a szükséges hőszabályozás biztosítására. A kapszulázott hőcsöveket széles körben használják a vadászgépekben, továbbá ezek mellett a hurkos hőcsöveket részesítették előnyben a műholdak hőszabályozására. Hőcsövek használatával hulladékhővisszanyerő rendszerek üzemeltethetők, vagy akár felhasználhatók akkumulátorok teljesítményének és élettartamának növelésére is, ami napjainkban nagy figyelmet kap [4, 5].

Ipari alkalmazásokban előnyben részesítik az egyenáramú kétfázisú termoszfionokat, mivel nagy hőmennyiséget képesek szállítani nagyon kis hőmérséklet-különbségek mellett és nincsenek olyan korlátozások, mint pl. a kanóc-kiszáradás jelensége.

A hőcső hőátadási sebességét a munkaközegek szüntelen párologása és kondenzációja befolyásolja, ami magasabb hőátadási sebességtartományt eredményez 2,5 és 100 kW/(m²K) között. Tehát a hőcsövek hatékony és ígéretes jelöltként bizonyultak számtalan mérnöki alkalmazásban, ezért teljesítőképességük vizsgálata lényeges.

3. A HŐCSÖVEK MŰKÖDÉSE

A hőcső a hőátadásra olyan munkafolyadékot használ, amely folyamatos endoterm (forrás) és exoterm (kondenzáció) ciklusban váltja a fázisait, így a hőcső kiváló hőátadási teljesítményt nyújt [6]. Az elpárologtató által a hűtendő közegből elvont hő a párologtató falán keresztül történő hővezetés, majd pedig hőátadás révén a munkaközegbe kerül, és a hőcsőben található ún. kanóc felületén elpárolog, ami növeli a helyi gőznyomást az elpárologtató belsejében, és lehetővé teszi a gőz kondenzátor felé történő gyors áramlását. A gőz ezután a hőjét a kondenzátor felületén leadja, eközben lecsapódik (kondenzál), és így felszabadul az általa szállított látens hő. Mindezek mellett a kanóc nélküli hőcsövek, az úgynevezett termoszfionok (thermosyphon) könnyen és alacsony költséggel gyárthatók, könnyűek, tartósak és megbízhatók. Ezek esetében a berendezés alsó részén található az elpárologtató, középen az adiabatikus (hőszigetelt) csőszakasz, amely a hőforrás és a hőnyelő közötti fizikai távolságot hidalja át, felül pedig a kondenzátor rész található, ahonnan a kondenzátum a gravitációs erő hatására vissza-kerül az elpárologtatóba [1]. Éppen ezért fontos az ilyen működési elvű termoszfionok megfelelő orientáltsága. A termoszfion működését az 1. ábra szemlélteti.



14. ábra. A termoszifon működési elvének vázlatja [8]

4. TERMOSZIFON-PROTOTÍPUS KÉSZÍTÉSE ÉS ELŐKÉSZÍTÉSE HŐTECHNIKAI VIZSGÁLATOKHOZ

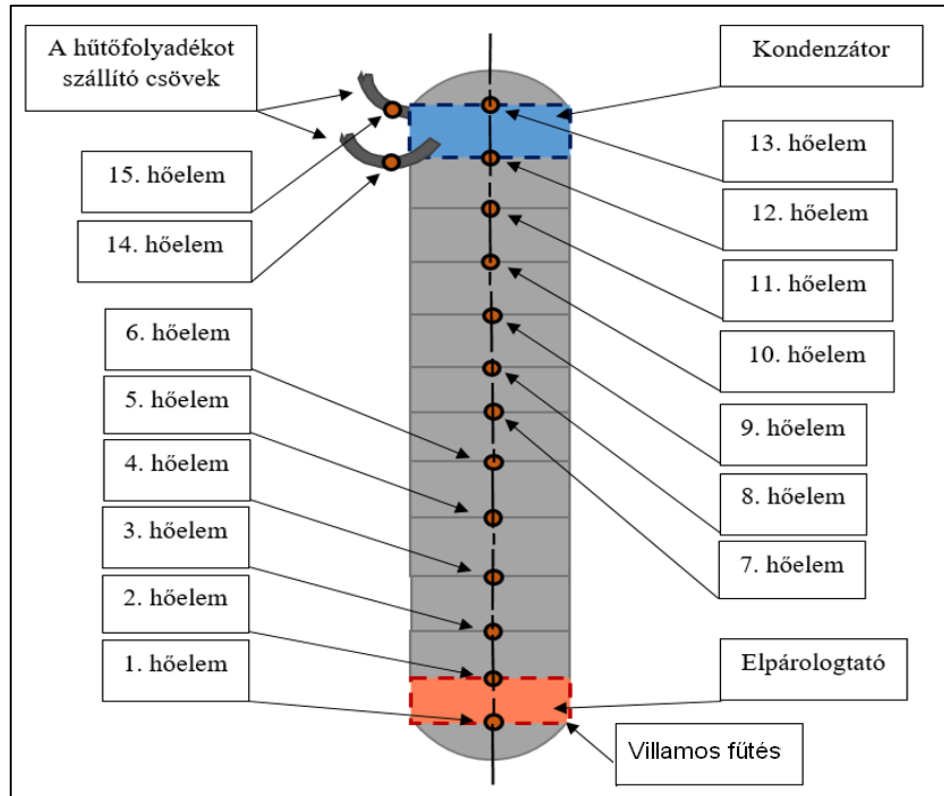
A hőátadást számos tényező befolyásolja, ilyen tényező lehet például a munkaközeg, a munkaközeg mennyisége, a cső belső átmérője, a cső hossza, a hűtött felület és a fűtött felület aránya, a fűtött és hűtött szakaszok közötti adiabatikus szakasz hossza, a hőáram és a működési hőfok is. [2]

A kísérleti eredmények azt mutatták, hogy az önállóan keringő gőzfázisú, folyadékfázisú és kétfázisú állapotok szabályozhatók a feltöltési arány (a párologtató munkafolyadékkal feltöltött térfogatának és a párologtató teljes térfogatának az aránya), valamint a hőforrás és a hőnyelő hőmérsékletének módosításával. A termoszifonok esetében a készülék hőellenállása 50%-os töltési arány mellett a legkisebb, viszont a legnagyobb hőteljesítményt függőleges helyzetben és 65%-os kitöltési aránynál lehet elérni. Továbbá a hőellenállás értéke 70%-nál nagyobb feltöltési aránynál a munkaközeg túltöltött állapota miatt megnő. [7]

A vörösrézcsőből készült kísérleti berendezésben elsőként desztillált vizet használunk munkafolyadékként, a fenti megállapítások alapján szintén 50%-os feltöltési arány mellett.

A hőmérséklet mérése számítógépes adatgyűjtő rendszerrel (NI adatgyűjtő kártya) és K-típusú, 0,3 mm-es szondaátmérőjű hőelemekkel történik a hőcső felületének különböző pontjain.

A 2. ábrán az elkészített prototípus vázlatja látható, az azon kialakított hőfok-mérési pontokkal együtt.



2. ábra. Hőelemek elhelyezési vázlatja (saját szerkesztés)

Míg a 14-es és a 15-ös sorszámú hőelemmel a hűtőfolyadék be- és kilépő hőmérsékletét mértük, addig a többi 13 hőelemet a termoszfion falán helyeztük el a 2. ábrán látható módon, egymástól $h=150$ mm-re, ahol az 1-es jelű hőelem helyzete legalul a 0 mm-nél, míg a 13-as hőelem legfelül a $h=1800$ mm-nél helyezkedik el.

A kísérlethez használt vörösrézcsőből készült, körkeresztmetszetű egyenes cső hossza 1800 mm, külső átmérője 15 mm, falvastagsága pedig 1 mm volt. Ezt a rézcsövet forrasztott rézkorongokkal mindkét végén leforrasztottuk, majd a felső részén egy menetes furatot készítettünk azért, hogy azon keresztül feltölthető és légteleníthető legyen a belső tér. Az alsó, 140 mm-es hosszban az elpárologtató, majd pedig az ezt a szintén 140 mm hosszú kondenzátorral (felső rész) összekötő, 1500 mm-es hosszúságú adiabatikus szakasz kapott helyet. A hőcsövet csőbilincsekkel egy erre a célra alumínium profilokból készített tartóvázon helyeztük el, s így történt annak felműszerezése is.

Az elkészített termoszfion jellemző méretei a következő, 1. táblázatban kerülnek bemutatásra.

1. táblázat: A termoszifon jellemző méretei, paramétereit

Megnevezés	Jele	Értéke	Mértékegysége
Termoszifon teljes hossza	L	1800	mm
Párolgató rész hossza	L_p	140	mm
Kondenzátor rész hossza	L_k	140	mm
Termoszifon belső átmérője	d	13	mm
Termoszifon külső átmérője	D	15	mm
Termoszifon falvastagsága	x	1	mm
Munkafolyadék mennyisége	V_{foly}	12,1	ml
Munkafolyadék magassága a párolgatóban	h	91	mm

A vizsgálatokhoz szükséges biztosítani a pontosan ismert fűtési teljesítményt, amellyel a hőcső alsó részében található elpárolgatóban lévő folyadékot forraljuk el. Ehhez a legegyszerűbb és pontosan szabályozható fűtési mód egy megfelelő paraméterekkel rendelkező ellenálláshuzal alkalmazása, amely esetén a fűtési teljesítmény megegyezik az ellenálláshuzalon átfolyó egyenáram Joule-hőjével. A huzalt a párolgató részre tekertük fel egyenesen, 140 mm hosszon (összesen 2,9 m hosszú huzalt 61 menetben, amelynek ellenállása szobahőmérsékleten közel 5Ω). A párolgatóra feltekert huzalellenállás a 3. ábrán látható.

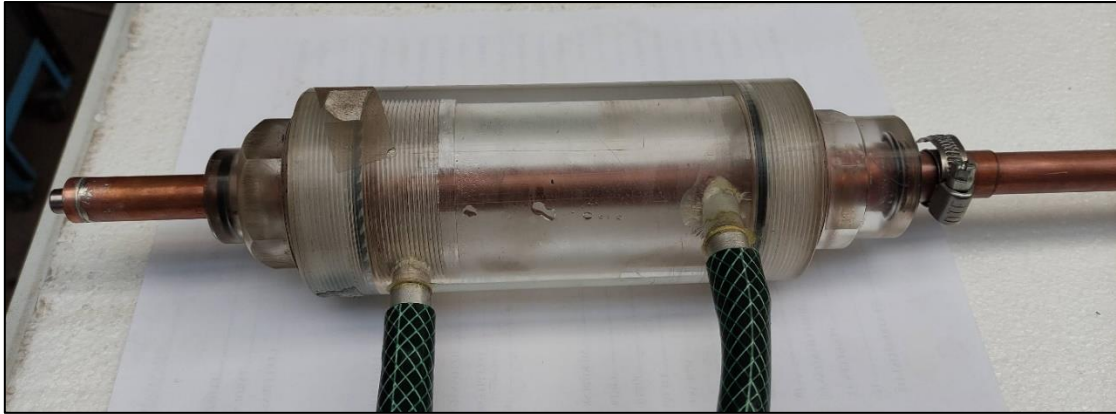


3. ábra. Az elpárolgató szakaszon elhelyezett, hővezető pasztával bekent ellenálláshuzal

Ahhoz, hogy a huzal egyes menetei egymástól és a rézcsőtől el legyenek szigetelve elektromosan, hőálló üvegszövet-csőszigetelés került a huzalra. Továbbá ahhoz, hogy a huzalban felszabaduló hő minél kisebb hőleánálláson keresztül juthasson el a párolgatóba, hővezető pasztával töltöttük ki a rézcső és az üvegszövet-szigetelés közötti réseket. A későbbi vizsgálatok esetén egy Voltcraft DPPS 32-20 típusú egyenáramú kapcsolóüzemű laboratóriumi tápegységet használtunk, amellyel 200 W-os maximális fűtési teljesítményt tudtunk beállítani. Ahhoz, hogy a felszabaduló Joule-hő közel 100%-a a párolgató felé áramoljon, az ellenálláshuzaltekercsen hőszigetelő üvegyapot szigetelést helyeztünk el.

Az adiabatikus, azaz a környezet felé hőszigetelt hőcső-szakaszt úgy alakítottuk ki, hogy a rézcsőre – a hővezetőpasztával bekent hőelemek elhelyezését követően – zártcellás polietilén szigetelőcsíkot tekertünk fel spirálisan. Ezzel természetesen nem állítható elő az elméletileg zéró hőáram a környezet és a csőfal között, azonban a hőbetáplálás teljesítményéhez képest elhanyagolhatóan kicsiny értékűnek feltételezhető a hőveszteség.

A hőcső felső végén került kialakításra annak kondenzátor szakasza, amelyet a rézcsövön elhelyezett, akrilból készített vízteres, vízűtésű hőcserélővel valósítottunk meg. A hőcserélőn átáramoltatott hűtőfolyadék szállította el a hőt a kondenzátorból. Az akrilból készített vízteres hőcserélő a 4. ábrán látható.



4. ábra. A kondenzátor részen elhelyezett folyadékteres hőcserélő



5. ábra. Az összeállított hőcső-egység és a mérőrendszer

A hőcserélőbe belépő folyadék hőmérsékletét egy digitális vezérlésű hűtő-fűtő folyadéktermosztáttal lehetséges beállítani. A későbbi vizsgálatok egyik fontos paramétere lesz a hőcső kondenzátorának hőfoka, amely ezzel az alkalmazott termosztáttal igen pontosan beállítható lesz.

Az előzőekben ismertetett részegységeket és kiegészítőelemeket tartalmazó, állványra rögzített kísérleti berendezés a rajta elhelyezett hőelemekkel és hőszigeteléssel az 5. ábrán látható.

5. ÖSSZEGZÉS

A dolgozatban egy olyan, egyszerű felépítésű hőcső összeállításának és felműszerezésének bemutatása történt meg, amely segítségével laboratóriumi mérések végezhetőek a hőcső termikus paramétereinek meghatározása céljából különböző, előre definiált paraméter-beállítások mellett. A laboratóriumi tápegységgel pontosan beállítható a bevitt hőteljesítmény, amely – a stationer üzemállapot elérése után – megegyezik a hőcsövön átáramló hőteljesítménnyel, továbbá az adiabatikusnak tekintett szakasz valós hőveszteségétől eltekintve megegyezik a kondenzátor által leadott hőteljesítménnyel. Ezek ismeretében mérhető a hőmérséklet-eloszlás, amely aztán többek között felhasználható a hőcső látszólagos hővezetésének számításához is. A későbbiekben különböző fűtési teljesítmények és kondenzátor hőfokok mellett kívánjuk meghatározni a prototípus termikus jellemzőit. Ezek mellett lehetőség lesz a hőhordozó közeg mennyiségének és minőségének változtatására is ahhoz, hogy ezek hatását vizsgálhassuk

6. FELHASZNÁLT IRODALOM

- JOBIN JOSE and TAPANO KUMAR HOTTA.: *A comprehensive review of heat pipe: Its types, incorporation techniques, methods of analysis and applications*. Thermal Science and Engineering Progress, Vol. 42. pp. 101860. 2023.
- CHARLES C.J. VINCENT and JIM B.W. KOK. *Investigation of the overall transient performance of the industrial two-phase closed loop thermosyphon*. International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 35. No. 6. pp. 1419–1426. 1992.
- CHENGLONG WANG, SIMIAO TANG, XIAO LIU, G.H. SU, WENXI TIAN, and SUIZHENG QIU.: *Experimental study on heat pipe thermoelectric generator for industrial high temperature waste heat recovery*. Applied Thermal Engineering, Vol. 175. pp. 115299. 2020.
- MARCO BERNAGOZZI, ANASTASIOS GEORGOULAS, NICOLAS MICHÉ, and MARCO MARENCO.: *Heat pipes in battery thermal management systems for electric vehicles: A critical review*. Applied Thermal Engineering, Vol. 219. pp. 119495. 2023.
- HUSSAM JOUHARA, NICOLAS SEREY, NAVID KHORDEHGAH, ROBERT BENNETT, SULAIMAN ALMAHMOUD, and STEPHEN P. LESTER.: *Investigation, development and experimental analyses of a heat pipe based battery thermal management system*. International Journal of Thermofluids, Vol. 1-2. pp. 100004. 2020.
- ADNAN SÖZEN, TAYFUN MENLIK, METIN GÜRÜ, KURTULU, S BORAN, FARUK KILIÇ, MUSTAFA AKTA, S, and M. TARIK ÇAKIR.: *A comparative investigation on the effect of fly-ash and alumina nanofluids on the thermal performance of two-phase closed thermo-syphon heat pipes*. Applied Thermal Engineering, Vol. 96. pp. 330–337. 2016.
- ARUN KURIEN REJI, G. KUMARESAN, A. SARATHI, G.P. SAIGANESH ARASAPPA, R. SURIYA KUMAR, and M. SHELTON MATTHEW.: *Analysis of thermosyphon working with eco-friendly refrigerant under various fill ratios*. Materials Today: Proceedings, Vol. 45. pp. 2618–2621, 2021.

R.S. ANAND, ANG LI, WENBO HUANG, JUANWEN CHEN, ZHIBIN LI, QINGSHAN MA, and FANGMING JIANG.: *Super-long gravity heat pipe for geothermal energy exploitation - a comprehensive review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 193. pp. 114286. 2024.

SZERSZÁMGÉPEK REZGÉSEINEK VIZSGÁLATA

INVESTIGATION OF VIBRATIONS OF MACHINE TOOLS

TÓTH Dániel¹, FEKETE Tamás²

¹ egyetemi tanársegéd, daniel.toth1@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Szerszámgépészeti és Mechatronikai Intézet,
Szerszámgépek Intézeti Tanszéke

² Ph.D., egyetemi tanársegéd, tamas.fekete@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Szerszámgépészeti és Mechatronikai Intézet,
Szerszámgépek Intézeti Tanszéke

Kivonat: *Napjainkban meghatározó fejlettséget mutató diagnosztikai eszközzé nőtte ki magát a rezgésvizsgálat. Előnye, hogy a termelésben használt szerszámgép vizsgálható anélkül, hogy a gyártást le kellene állítani, tehát a gép szétszerelése nem szükséges az alaposabb vizsgálat elvégzése érdekében. Rezgésméréssel (rezgésdetektálással) feltárható hibák lehetnek például a kiegyensúlyozatlanság, egytengelyűségi hiba vagy a különféle deformációk fellépése is.*

Kulcsszavak: *rezgésdiagnosztika, szerszámgépek, mérés technika*

Abstract: *Nowadays, the vibration analysis has grown into a diagnostic tool showing significant development. The advantage is that the machine tool used in production can be inspected without having to stop production, so it is not necessary to disassemble the machine to carry out a more thorough inspection. Errors that can be detected by vibration measurement (vibration detection) include, for example, imbalance, misalignment or the occurrence of various deformations.*

Keywords: *vibration diagnostics, machine tools, measurement technique*

1. BEVEZETÉS

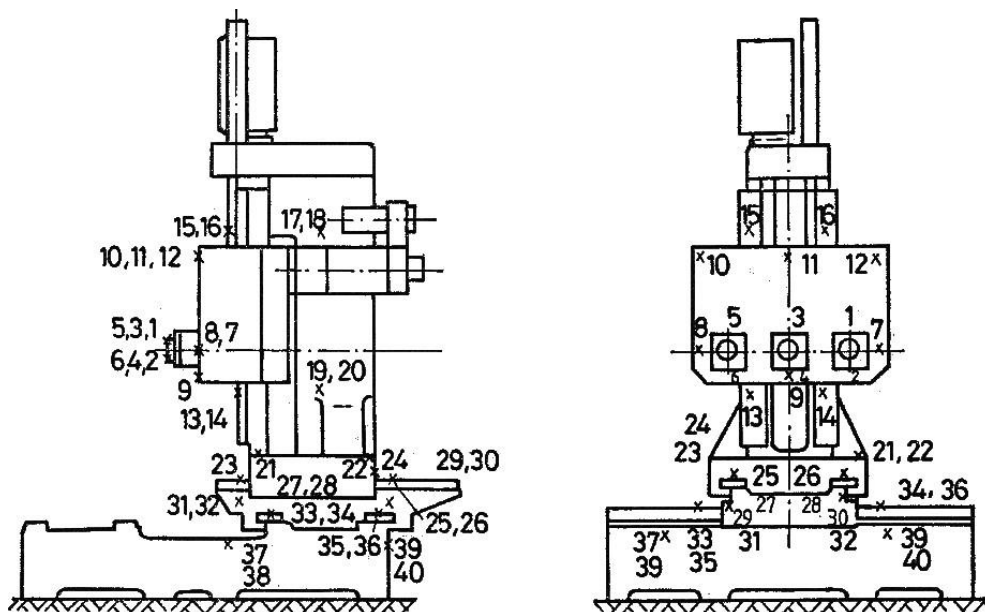
A szerszámgépek tervezése alkalmával különböző dinamikai problémák merülnek fel a tervezési folyamat során, mivel rengeteg követelménynek kell eleget tenni a minél optimálisabb konstrukció kialakítása érdekében. A leglényegesebb elvárások közé tartozik a nagy merevség, a nagy pontosság és a gazdaságosság kritériuma. A dinamikai vizsgálatok rendkívüli mértékben befolyásolják a szerszámgépek merevségi és pontossági tulajdonságait. A megmunkálógépek merevségi vizsgálatainál kétféle típust különböztethetünk meg: lehet dinamikus-, vagy statikus a merevség. Mindkettő hatalmas szerepet játszik a szerszámgépek területén is, mivel a dinamikus merevség a gépek rezgéseire, miközben a statikus merevség a megmunkálógépek pontosságára van nagyon nagy hatással. Az egyes géptípusoknál tapasztalt dinamikai viselkedés relevánsan befolyásolja a gépek bizonyos tulajdonságait, hatással van a felületi érdességre, a különféle gyártási körülményekre, a megmunkálási pontosságra, a rezgés-, és zajszint nagyságra, azaz hatásának figyelembevétele elkerülhetetlen mind a tervezés, mind a gyártás során. A dinamikus viselkedés vizsgálatának ebből adódóan kulcsfontosságú szerepe van napjainkban, ennek megfelelően egy nagyon összetett területet képvisel a szerszámgép-vizsgálatok körében. A szerszámgéptervezés során számos elvet dolgoztak ki, amelyek egyfajta útmutatást nyújtanak a helyes konstrukció kialakítására, a szerszámgépek merevségi szempontból történő vizsgálatára és figyelembevételére a tervezés folyamán. Ilyen a legrövidebb erőfolyam elve, amely a tervezési folyamat mellett alkalmazható különféle szerszámgépek összehasonlító vizsgálatára is, vagy nagyszámú struktúraváltozatot tartalmazó halmaz szűkítésére, mint szűrési kritérium. A mozgás a kisebb tömeget elv során a gépek dinamikai viselkedése kerül előtérbe, ahol a megmunkálógép struktúraláncában mindig azt az elemet kell mozgatni, amelynek kisebb a tö-

mege. Mivel minden gép, gépegység működését rezgések és zajok kísérik, előtérbe kerül a műszaki diagnosztika fogalma is, amely egyik fő szakterülete a rezgésdiagnosztika. A rezgésdiagnosztika során a szerszámgépek állapotfelügyeletéhez tartozó műszaki adatok kerülnek elemzésre, majd ezek alapján végezhető el az állapotminősítés. Ez gyakorlatilag a részegységek kopását és elhasználódását leíró állapotjelzők, valamint az üzemi rendszerjellemzők mérését, és az azt követően elvégzett, mért adatok kiértékelését foglalja magában [1].

2. SZERSZÁMGÉPEK REZGÉSEI

A mechanikai rezgések nem csak egy elméleti területét képezik a tudományoknak, hanem a valóságban minden esetben előforduló, leküzdendő problémát jelentenek számos területen. Tehát a megmunkológépek esetében elég hosszú ideje okoz problémát a rezgések előfordulása, ugyanis minél jobb gép építéséhez, megfelelően el kell látni a konstrukciót rezgéscsillapító elemekkel, és ezt úgy kell megtervezni, hogy dinamikailag is minél merevebb legyen az adott konstrukció. Az egyes gépekre, szerkezetekre, eszközökre vonatkozóan három terhelési állapotot különböztethetünk meg: lehet statikus, kvázi-statikusan és dinamikus jellegű a terhelési állapot. Ha a terhelés időben állandó, és a gép teljes élettartama alatt fennáll, akkor statikus terhelésről beszélhetünk, amelyre tipikus példa a szerszámgépek önsúlyából származó igénybevétel. Elhanyagolható mértékű változás jellemzi a vizsgált folyamat szempontjából a kvázi-statikusan terheléseket, amelyre példa a repülőgépek rotorjának centrifugális terhelése, vagy az úrhajók szerkezetére ható tehetetlenségi erő által kifejtett terhelés. A dinamikus terhelés akkor jön létre, ha a terhelés időben véletlenszerűen vagy harmonikusan változik. A változás érintheti a rezgés amplitúdóját (azaz a terhelés változás mértékét) és annak gyakoriságát (rezgés frekvenciáját) is. A dinamikus terhelés a szerkezet rezgését váltja ki, és néha rezonanciát is okozhat. A rezonancia jelensége nagyon fontos a gyakorlati életben. Olyan gerjesztett rezgéseknél fordul elő, ahol a gerjesztő frekvenciának bármilyen kis változása a rendszer válaszüdejének csökkenését okozza. Kis csillapítások esetén nagyon nagy rezgési amplitúdók jönnek létre a sajátfrekvencia környékén. A rezonancia káros hatása például, ha egy gépalkatrész sajátfrekvenciája megegyezik a gép (működés közbeni) sajátfrekvenciájával, ekkor ugyanis a gépalkatrész nagyon erős rezgésbe jöhet, rezonancia katasztrófa következhet be, és adott esetben a gép tönkremenetelével járhat. A dinamikus merevség hasonlóan a statikus merevséghez terhelésfüggő alakváltozást jellemez, ami pedig a szerszámgép rezgésállóságát határozza meg. A terhelés dinamikus jellemzőkkel rendelkezik, ezek pedig a rezgés amplitúdója és frekvenciája. A gyártásban jellemzően harmonikus rezgések és impulzusszerű igénybevételek fordulnak elő. A periodikusan változó terhelést elsősorban a forgácsoló erők, a kiegyensúlyozatlan tömegek vagy az átviteli elemek pontatlanságából eredő kényszerlengések okozhatják. Statikus merevségnél a hatóerőt, és a hatására kialakuló deformációt, míg ezzel szemben a torziós merevség esetén a nyomatékot és a szögelfordulást kell mérni a vizsgálat során. A mérési összeállításnak tartalmaznia kell valamilyen terhelőberendezést, erőmérő-, vagy nyomatékmérő készüléket a terhelés megállapításához, valamint az elmozdulás mérést megvalósító út-, vagy szögelfordulás mérőt. Statikus deformáció mérésére leggyakrabban induktív típusú útmérőket alkalmaznak. Rezgés vagy dinamikai erő hatására létrejövő elmozdulások piezokristályos gyorsulásmérő segítségével mérhetők, amelyek jelét kétszer integrálja az erősítő, és így állítja elő az elmozdulásjelet. A vizsgálat célja egyúttal meghatározza az alkalmazandó mérési módszert, a mérési folyamat lépéseit, mérőpontok felvételének szabályait. A mérés célja lehet pl. a gép eredő merevségének meghatározása az összehasonlíthatóság érdekében, vagy a teherviselő lánc leggyengébb elemének, azaz a gép gyenge megmunkálási helyzetének a meghatározása. Az első esetben a legáltalánosabb megmunkálási helyzetet, a leggyakrabban előforduló forgácsolóerőt kell szimulálni, ehhez pedig a terhelő erő irányában a szerszám és munkadarab között kialakult deformációt elegendő mérni. Ha a leggyengébb elemet kívánjuk meghatározni, merevségi mérleget célszerű készíteni.

Ebben az esetben az erőhatás irányát és a mérési irányokat célszerű a főkoordináta irányokhoz rendelni. A teherviselő lánc elemein pedig annyi mérőpontot szükségszerű felvenni, amivel még az illető elem deformációja leírható. A mérési pontok kijelölése és számának megállapítása során, törekedni kell arra, hogy a lehető legkevesebb méréssel, a legtöbb adatot tudjuk begyűjteni a merevségi mérleg megszerkesztéséhez [1, 2]. A mérőpontok elhelyezésére az 1. ábrán látható egy lehetséges opció egy vízszintes orsójú megmunkáló központra vonatkozóan.



1. ábra: Lehetséges mérőpontok helye egy megmunkálóközpontra [2].

A forgácsolás során mindig keletkeznek rezgések, mivel a megmunkálógépek alapvetően rezgőrendszert alkotnak. Ezek a rezgések befolyásolják a munkadarab méretpontosságát, alakhűségét és hatással vannak a felületi érdesség előírt értékére is. Van olyan eset, amikor gazdaságosan legyártható a munkadarab az alkatrészrajznak megfelelően, a rezgések figyelmen kívül hagyása esetén is, de előfordulhat, hogy olyan nagymértékű rezgések alakulnak ki, amelyek károsíthatják a forgácsolási folyamat minden résztvevőjét. Utóbbi megállapítás esetén a kész munkadarabon alakhibát vehetünk észre, a felületi minőség se teljesíti az előírásokat, a gép zajkibocsátása megnövekedett, továbbá gyártás során a szerszám is a tervezettnél nagyobb kopást produkál, illetve előfordulhat a forgácsolás közbeni szerszámtörés. Ilyenkor csökkenteni kell a gép terhelését, vagyis a gyártás termelékenységét, ami már gazdasági problémákhoz vezethet, mivel megnő a fajlagos ráfordítás. A szerszámgépen fellépő rezgések összefüggésben állnak a teherviselő lánc merevségével, magával a megmunkálási folyamattal (forgácsolási folyamatával és a forgácsolásban lejátszódó jelenségekkel) és a szerszámgép dinamikai rendszerével [3]. A rezgéstani modell felállítása során a modellezési folyamat egyszerűsíthető, ha a vizsgált gép, berendezés szétválasztható merev, tehetetlen testekre, illetve rugalmas, elhanyagolható tömegű részekre. Emiatt a modellek egyes elemei a lengő rendszerben betöltött funkciójuknak megfelelő paraméterekkel jellemezhetők, pl. a rugalmas elemek tömeg nélkülinek, míg a tehetetlen elemek tökéletesen merevnek tekinthetők. A valóságban egy adott alkatrésznek több funkciója is lehet, így figyelembe vehető a tömege, rugalmassága és belső csillapítása is külön-külön elemek segítségével [4, 5].

3. ÖSSZEFOGLALÁS

A szerszámgépek komplex, sok tömegből felépülő, rugókból és csillapító elemekből álló

többszabadságfokú lengő rendszerek. A szerszámgép vizsgálati gyakorlatban leggyakrabban lineáris rendszerekkel találkozunk, ha nem-lineáris az adott probléma, akkor egyszerűbb megoldás érdekében elhanyagolásokkal oldjuk meg a feladatot, vállalva ezzel a pontatlanság kockázatát. A rendszer rezgései elég sok problémát tudnak okozni, ugyanis minden egyes rezgés, ami a megmunkálás folyamán keletkezik a munkadarab és a szerszám között, nyomot hagy a munkadarab felületén a rezgés amplitúdója és a frekvencia nagyságától függően, és ebből származhat a munkadarab alakhibája és elégtelen felületi minősége. A kialakuló nagy rezgések hatással vannak a gépegységek élettartamára is, mivel csökkentik a csapágyak, szerszámok és egyéb egységek élettartamát. A szerszámgépen fellépő rezgések összefüggésben állnak a teherviselő lánc merevségével, magával a megmunkálási folyamattal és a szerszámgép dinamikai rendszerével.

4. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A cikkben ismertetett kutató munka az EFOP-3.6.1-16-2016-00011 jelű „Fiatalodó és Megújuló Egyetem – Innovatív Tudásváros – a Miskolci Egyetem intelligens szakosodást szolgáló intézményi fejlesztése” projekt részeként – a Széchenyi 2020 keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

5. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] KISS, R.: *CNC megmunkáló központ dinamikai viselkedésének vizsgálata végelelem-módszerrel*. Diplomaterv, Miskolc, 2019.
- [2] BARÁTI, A.: *Szerszámgép vizsgálatok*. Műszaki Kvk., Budapest 1988.
- [3] TAKÁCS, GY., ZSIGA, Z., MAKÓ, I., BARAK, A.: *Forgácsoló szerszámgépek*. Nemzeti Tankönyvkiadó, 2009.
- [4] DÖMÖTÖR, F.: *Rezgésdiagnosztika I.*, Dunaújvárosi Főiskola, Dunaújváros, 2008.
- [5] WECK, M.: *Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme I*. Maschinenarten und Anwendungsbereiche, 2005.

CSAPÁGYREZGÉSEK VIZSGÁLATA

INVESTIGATION OF VIBRATIONS OF BEARINGS

TÓTH Dániel¹, FEKETE Tamás²

¹ egyetemi tanársegéd, daniel.toth1@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Szerszámgépészeti és Mechatronikai Intézet,
Szerszámgépek Intézeti Tanszéke

² Ph.D., egyetemi tanársegéd, tamas.fekete@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Szerszámgépészeti és Mechatronikai Intézet,
Szerszámgépek Intézeti Tanszéke

Kivonat: A csapágyak az egyik legszélesebb körben alkalmazott gépelemek, amelyek meghibásodása komoly következményeket vonhat maga után. A váratlan csapágyhibák okozhatnak gépleállásokat, és egyes esetekben katasztrofális baleseteket is, akár még az emberi életet is veszélyeztethetik. Annak érdekében, hogy ezeket a baleseteket megelőzzük, folyamatos hibavizsgálat szükséges. Jelen cikk a gördülőcsapágyak rezgésdiagnosztikai állapotfelméréseivel foglalkozik.

Kulcsszavak: csapágyállapot, rezgések, csapágykárosodások

Abstract: Bearings are one of the most widely used machine parts so their failure results in ponderous consequences. Unexpected rolling element bearing failures can cause machine breakdown and might even lead to catastrophic accidents or even human casualties. In order to prevent these accidents, continuous failure detection is necessary. The following paper deals with the condition survey of rolling element bearings using vibrational diagnostic tools.

Keywords: bearing condition, vibrations, bearing failures

1. BEVEZETÉS

A gépek állapotának üzem közbeni vizsgálata és a nagyjavítások tervezése egyre nagyobb fontosságúvá válik. A csapágyak kimagasló szerepet játszanak minden forgó alkatrészt tartalmazó eszközben, így azok felügyelete kiemelt feladat. A rezgésdiagnosztikai vizsgálatok során a csapágyak, mint az egyik legfontosabb és leggyakoribb gépelemek, mindenhol jelentős szerepet játszanak. Ennek oka, hogy olyan meghibásodási sorozatot indíthat el a csapágyazás hibája a berendezésekben, amelyek akár több nagyságrenddel meghaladhatják a csapágycseré, illetve a diagnosztikai vizsgálat költségeit. A csapágyhibák korai észlelése lehetővé teszi, hogy kicseréljük a csapágyat a tervezett karbantartás során, így elkerülhető a berendezés váratlan leállása a csapágy meghibásodása miatt. Különböző módszerek léteznek a csapágyak működési viszonyainak felügyeletéhez, amelyek segítenek meghatározni a csapágyhiba közeledtét. A csapágyvizsgálati módszerek túlnyomó többsége rezgésmérésen alapszik. Gyakran alkalmazzák a több paraméter együttes vizsgálatán alapuló eljárásokat, pl. alacsony frekvenciájú rezgések mérését. A csapágyak rezgésdiagnosztikai vizsgálataira különféle, idő- és frekvenciatarományon elvégezhető jelanalizálási technikák léteznek [1, 2].

2. CSAPÁGYREZGÉSEK IDŐBELI JELLEGE

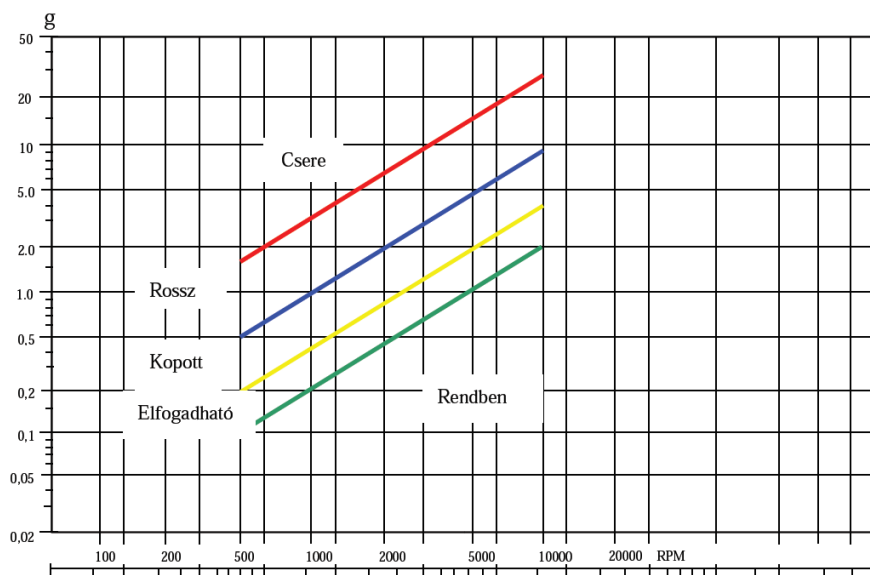
A csapágyak működésük közben kopnak. Ennek során az előírt elméleti alakhűségeket és méretek, felületi minőségeket megváltoznak. Ezek a változások a csapágyakból származó rezgések intenzitásának megváltozását, rendszerint növekedését idézik elő. Ha a gördülőcsapágyban a külső- és belsőgyűrűk, valamint a gördülőtestek megkopnak, akkor ezek a kopások a radiális

játék megnövekedését okozzák. Ennek következtében a forgó tengely kimozdul eredeti tengelyvonalából, nem az elméleti középvonal körül forog. Ezek a változások a csapágyalkatrészek egymáshoz képesti nagyobb elmozdulásához intenzívebb egymáshoz csapódásához, ütközésekhez vezetnek, amelyek következtében a csapágyrezgések intenzitása is fokozódik. A szabálytalan alakúvá vált, megkopott, sérült futógyűrűk és az ezeken mozgó, szabálytalanul kopott sérült gördülőelemek nem szabályosan, akadozva gördülnek. Miközben ezek az alkatrészek egymáshoz ütköznek, a kopás, illetve a sérülés mértékétől függően rezgéshullámokat keltenek. Az ütközések keltette rezgésjelenségek általában csillapodó, tranziens rezgések. A csapágy forgása következtében azonban ezek a jelenségek a relatív sebességektől periodikusan ismétlődnek. Így tehát a fordulatszám, a gördülőtestek száma és egyéb más tényezők határozzák meg az egyes rezgéskeltő jelenségek, ütközések ismétlődési számát, a lökéshullámok ismétlődési frekvenciáját. Amennyiben a gördülőpálya és a test is ideális alakú és felületi minőségű, a gördülőtest a pályán akadály nélkül gördülne. A valóság azonban ettől eltér. Ha a csapágyból kioldjuk a kenőzsírt, majd a csapágyat megforgatjuk, hallani és érezni, hogy a gördülés nem akadálymentes. A pálya egyenetlenségei miatt ilyenkor kis ütődések, ütközések keletkeznek és a csapágy pörgetésekor ezeket észleljük. A gördülő-test a pálya felületi egyenetlenségeit, sérüléseit nem tudja követni, hanem a meredekebb, a mélyebb sérülésbe beleesik, illetve tovább haladva egy kiálló résznek ütközik. A szabálytalan pályán történő mozgás során a gördülőtestre a tömegével arányos tehetetlenségi erők hatnak, amelyek az egész csapágyban észlelhető gyorsulásokat okoznak. Ütközéskor az érintkezés pontjában nagy helyi erőhatások is keletkeznek. Ezek az ütközés sebességétől függenek. Az anyagban nyomáshullám terjed az anyagra jellemző hangsebességgel. Az ütközés későbbi fázisában az érintkező testek deformálódnak, az ütközési energia egy része szétszóródik rezgéseket gerjesztve. Így az egész csapágy bonyolult, összetett mozgást végez. Az ütközés hatására bekövetkező rezgés összetett, amely a viszonylag kisebb rezgésszámú pályaalakváltozásra szuperponálódott igen nagy, mintegy 40 kHz rezgésszámú nagyfrekvenciás rezgésből áll. Az ütközés tranziens lökéshulláma igen rövid idő alatt alakul ki és ez a csapágy testében igen magas frekvenciájú rezgéseket kelt. A keletkező lökéshullámok frekvenciája és a hullámok csillapodása a csapágy anyagi minőségtől, méretétől, kialakításától és egyéb tényezőktől is függ. A csapágy rezgésvizsgálata során az egymásra szuperponálódott rezgéseket szétbontják. A tapasztalatok szerint a csapágyhiba – a kisebb frekvenciájú rezgéseket vizsgálva – a kezdeti stádiumban csak nehezen ismerhető fel az egyéb eredetű rezgések zavaró jellege miatt. A nagyfrekvenciák vizsgálatával azonban egészen jelentéktelen csapágyhibák is észlelhetők [3, 4].

3. CSAPÁGYÁLLAPOT

Mivel a csapágy által keltett (egyébként nagyfrekvenciájú) zaj és rezgés szélessávú, ezért az effektív értéket mérő műszerek részére nehéz bármilyen konkrét frekvenciát vagy szűk frekvenciasávot definiálni, amellyel a csapágy állapota jellemezhető lenne. Ez ráadásul azért is lehetetlen, mert a konkrét, úgynevezett csapágyhiba-frekvenciák egyebek között a csapágytípustól és a gép aktuális fordulatszámától függenek. A gyakorlatban bevált az a módszer, hogy a csapágyállapotot jellemző értéket a 2 kHz és 10 (esetleg 20) kHz közötti frekvenciatartományban mért rezgés gyorsulás effektív értéke alapján határozzák meg. Az átlagos gépek kiegyensúlyozatlanságból vagy tengely beállítási hibákból eredő rezgéseit biztosan 2 kHz alatti frekvenciákon – tehát az alsó határfrekvencia alatt – lépnek fel, így ezek nem befolyásolják a csapágyra jellemző értéket. A felső határ – 10, illetőleg 20 kHz – kiválasztása pedig azon alapszik, hogy a legtöbb rezgésérzékelő felső határfrekvenciája különleges rögzítési módszer nélkül 7 – 10 kHz, és az érzékelő jele 20 kHz fölött már egyébként is meglehetősen kicsi lenne. A szélessávú rezgésebbesség és a nagyfrekvenciájú rezgés gyorsulás effektív értékének mérésére is alkalmas műszerek használatával nemcsak a beállítási és a kiegyensúlyozási problémák jelenléte, hanem

a csapágyhibák is felfedezhetők. Sőt, eldönthető, hogy egy gép melyik csapágya szorul cseréire, és melyik nem, valamint ellenőrizhető, hogy a csapágszerelés kivitelezése hibátlan volt-e, és jó-e a csapágy kenése. A csapágyállapot-jellemző értéket (a 2 – 20 kHz frekvenciatartományú rezgés gyorsulás effektív értékét) gravitációs gyorsulásban (g-ben) szokás kifejezni. Értékelésére útmutatást nyújt az 1. ábra tapasztalati grafikonja [5].



1. ábra: A csapágyállapot-érték alapján levonható következtetések.

4. CSAPÁGYHIBÁK

A spektrumanalízis nyújtotta lehetőségekre támaszkodva a rezgés jellegéről, a hibák csapágyon belüli elhelyezkedéséről, és azok relatív nagyságáról kaphatunk hasznos információkat. A károsodott csapágyalkatrészek különböző úgynevezett hibafrekvenciákon gerjesztenek rezgéseket. A 6303-2RSR csapágy jellegzetes hibafrekvenciáit az 1. táblázatban foglaltuk össze, figyelembe véve, hogy a belső gyűrű forog. A hibafrekvenciák egész számú többszörösei is megjelenhetnek a spektrumokban, fordulatszám frekvencia nagyságú oldalsávokkal. A vizsgált golyóscsapágy forgási frekvenciája 22,85 Hz.

1. táblázat: A 6303-2RSR csapágy hibafrekvenciái 1500 min⁻¹ fordulatszámon.

Hibafrekvencia neve	Általános rövidítés	Speciális jelölés	Értéke [Hz]	Forgási frekvenciával osztott értéke [-]
Belső gyűrű frekvencia	BPFI	I	101,1	4,425
Gördülőtest frekvencia	BSF	G	40,21	1,76
Kosárfrekvencia	FTF	K	8,4	0,368
Külső gyűrű frekvencia	BPFO	O	58,84	2,575

Mivel a legtöbb gép tipikus (mechanikai eredetű) hibája a forgásfrekvenciához (vagy annak

egékszámú többszöröseihez) kötődik, ezért terjedt el a spektrumok frekvenciatengelyének skálázása fordulatszámegységekben is. A csapágó „öregedésével” párhuzamosan a hibafrekvenciák egyre több felharmonikusa jelenik meg, s ezek értékei exponenciálisan nőnek.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

Összefoglalva elmondható, hogy ha a rezgésspektrumban jelen vannak a csapágóhiba alapfrekvenciájának alacsonyfrekvenciás többszörösei (leginkább a 2 – 10-szeres frekvenciák), akkor ez általában nagy és mély csapágósérülésekkel magyarázható. Kis csapágóterhelés, illetve különösen rossz állapotú csapágók esetén (amikor már igazi legördülés nincs is), a csapágóhibák leginkább rezonanciagerjesztések formájában jelennek meg.

6. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] PATEL, J., PATEL, V., PATEL, A.: *Fault Diagnostics of Rolling Bearing based on Improve Time and Frequency Domain Features using Artificial Neural Networks*. IJSRD, Vol. 1, Issue 4, 2013.
- [2] PATKÓ, GY., TAKÁCS, GY., DEMETER, P., BARNA, B., HEGEDŰS, GY., BARAK, A., SIMON, G., SZILÁGYI, A.: *A process for establishing the remanent lifetime of rolling element bearings*. XXIV. microCAD international scientific conference, Miskolc – Egyetemváros, 2010.
- [3] TÓTH, D., TAKÁCS, GY., SZILÁGYI, A.: *Analysis of methods to detect bearing failures*. 7th International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering, ISCAME 2019, pp. 125-126., 2019.
- [4] DYER, D, STEWART, RM.: *Detection of rolling element bearing damage by statistical vibration analysis*. Trans ASME, J Mech Design 1978; 100(2):229–35.
- [5] PATIDAR, S., SONI, P. K.: *An Overview on Vibration Analysis Techniques for the Diagnosis of Rolling Element Bearing Faults*. IJETT, 2013.