

MTK 17.

**TUDOMÁNYOS BIZOTTSÁG/LEKTOROK
SCIENTIFIC ADVISORY BOARD/PEER REVIEWERS**

Bagyinszki Gyula (Budapest)
Bitay Enikő (Kolozsvár/Marosvásárhely)
Czigány Tibor (Budapest)
Dávid László (Marosvásárhely)
Diószegi Attila (Jönköping, Sweden)
Dobránszky János (Budapest)
Domokos József (Marosvásárhely)
Dusza János (Kassa)
Erdei Timotei István (Debrecen)
Forgó Zoltán (Marosvásárhely)
Gobesz Ferdinánd-Zsongor (Kolozsvár)
Horváth Sándor (Budapest)
Kakucs András (Marosvásárhely)
Kelemen András (Marosvásárhely)
Kovács Tünde (Budapest)
Kovács Zsolt (Szombathely)
Máté Márton (Marosvásárhely)
Pokorádi László (Budapest)
Réger Mihály (Budapest)
Réti Tamás (Budapest)
Roósz András (Budapest)
Szántó Attila (Debrecen)
Talpas János (Kolozsvár)
Tolvaly-Rosca Ferenc (Marosvásárhely)

ISSN 2393 – 1280

MŰSZAKI TUDOMÁNYOS KÖZLEMÉNYEK

17.

Szerkesztette / Edited by
BITAY ENIKŐ – MÁTÉ MÁRTON



ERDÉLYI MÚZEUM-EGYESÜLET
Kolozsvár
2022

A kötet megjelenését támogatta a Magyar Tudományos Akadémia,
a Bethlen Gábor Alapkezelő Zrt., a Communitas Alapítvány,
az EME Műszaki Tudományok Szakosztálya

The publication of this volume was supported by the Hungarian Academy of Sciences,
by the Bethlen Gábor Fund, by the Communitas Foundation,
by the TMS – Department of Engineering Sciences



Copyright © a szerzők/the authors, EME/TMS 2022

*Minden jog a kiadvány kivonatos utánnnyomására, kivonatos vagy teljes másolására
(fotokópia, mikrokópia) és fordítására fenntartva.*

*All rights reserved. No part of this publication may be reproduced or transmitted in
any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the
prior written permission of the publisher.*

Kiadó/Publisher: Erdélyi Múzeum-Egyesület
Felelős kiadó/Responsible Publisher: Biró Annamária
Szerkesztette/Edited by: Bitay Enikő, Máté Márton
Olvasószerkesztő/Proofreader: András Zselyke (magyar), David Speight (English)
Műszaki szerkesztő/DTP: Szilágyi Júlia
Borítóterv/Cover: Könczey Elemér

Nyomdai munkálatok/Printing-work
F&F International Kft. Kiadó és Nyomda, Gyergyószentmiklós
Ügyvezető igazgató/Manager: Ambrus Enikő
Tel./Fax: +40-266-364171

online elérhető/online available at:
<https://eme.ro/publication-hu/mtk/mtk-main.htm>
DOI: 10.33895/mtk-2022.17

TARTALOM

Bitay Enikő, Bagyinszki Gyula	
<i>A műszaki felsőoktatás didaktikai és módszertani szempontjai</i>	1
Darvay Zsolt, Garfield Adrienne	
<i>Szemidefinit optimalizálásra vonatkozó algoritmusok implementálása javában</i>	6
Darvay Zsolt, Jakab Zsanett	
<i>Az algebrailag ekvivalens átalakítás módszere súlyozott lineáris komplementaritási feladatokra</i>	11
Elek Patrícia, Szántó Attila, Sziki Gusztáv Áron	
<i>Változtatható frekvenciájú és erősségű szinuszos váltóáram előállítása villamosmotorok elektromágneses jellemzőinek méréséhez</i>	16
Gáti József, Kuti János, Némethy Krisztina	
<i>A Ford T-modell tervezője, Galamb József kapcsolata szülőföldjével</i>	20
Kerekes Tamás	
<i>Fotovoltaiikus rendszerek: szabályozási stratégiák hálózati csatlakozáshoz</i>	25
Kocsis Imre, Sipos Dóra	
<i>Gondolatok a műszaki kutatásról és képzésről a gépészeti diagnosztika kapcsán</i>	31
Korsoveczki Gyula, Pál Patrik, Husi Géza	
<i>PID-szabályozóval ellátott robothajtás szimulációja Bond-gráf-modell alapján</i>	37
Ledenyak Daniel, Rosta Tamás	
<i>Az I4.0 gyártási rendszerekben alkalmazott modern mérési módszerek</i>	42
Menyhárt Hunor, Forgó Zoltán	
<i>Vízszintes polárgráf fejlesztése ipari célokra</i>	46
Mudabbiruddin Mohammed, Kovács Tünde Anna	
<i>AlSi1MgMn-alumíniumötvözet öregedési folyamatának vizsgálata</i>	50
Szabó István-Sándor, Pásztor Judit, Farnos Rudolf-László	
<i>Kompresszoros hűtőkörfolyamat szemléltetése és vizsgálata</i>	55

Tóth Szabolcs Balázs, Erdei Timotei István, Husi Géza*Kollaboratív robot és ipari számítógép kommunikációs lehetőségeinek vizsgálata 60***SZERZŐK JEGYZÉKE 65**

CONTENT

Enikő BITAY, Gyula BAGYINSZKI <i>Didactic and Methodological Aspects of Technical Higher Education</i>	1
Zsolt DARVAY, Adrienne GARFIELD <i>Implementation in Java of Algorithms for Semidefinite Optimization</i>	6
Zsolt DARVAY, Zsanett JAKAB <i>Algebraically Equivalent Transformation Technique for Weighted Linear Complementarity Problems</i>	11
Patrícia ELEK, Attila SZÁNTÓ, Gusztáv Áron SZIKI <i>Generation of Sinusoidal Alternating Current of Variable Frequency and Intensity for Measuring the Electromagnetic Characteristics of Electric Motors</i>	16
József GÁTI, János KUTI, Krisztina NÉMETHY <i>József Galamb, Designer of Ford T-Model and His Relationship with Homeland</i>	20
Tamás KERÉKES <i>Photovoltaic Systems: Control Strategies for Grid Connection</i>	25
Imre KOCSIS, Dóra SIPOS <i>On Research and Training in Machinery Diagnostics in Engineering Education</i>	31
Gyula KORSOVECZKI, Patrik PÁL, Géza HUSI <i>The Simulation of a PID Controlled Robotic Drive Based on Bond Graph Modelling</i>	37
Daniel LEDENYAK, Tamás ROSTA <i>Modern Measurement Methods Introduced in I4.0 Manufacturing Systems</i>	42
Hunor MENYHÁRT, Zoltán FORGÓ <i>Development of Industrial Grade Horizontal Polarograph</i>	46
Mohammed MUDABBIRUDDIN, Tünde Anna KOVÁCS <i>Examination of Aging of AlSi1MgMn Type Aluminium Alloy</i>	50
István-Sándor SZABÓ, Judit PÁSZTOR, Rudolf-László FARMOS <i>Study of a Compressor Refrigeration Circuit</i>	55

Szabolcs Balázs TÓTH, Timotei István Erdei, Géza HUSI

*Studying the Communication Possibilities between a Collaborative Robot
and an Industrial Computer* 60

LIST OF AUTHORS 65

A MŰSZAKI FELSŐOKTATÁS DIDAKTIKAI ÉS MÓDSZERTANI SZEMPONTJAI

DIDACTIC AND METHODOLOGICAL ASPECTS OF TECHNICAL HIGHER EDUCATION

Bitay Enikő,¹ Bagyinszki Gyula²

¹ Sapientia Erdélyi Magyar Tudományegyetem, Marosvásárhelyi Kar, Marosvásárhely, Románia
ebitay@ms.sapientia.ro

² Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Budapest, Magyarország
bagyinszki.gyula@bgtk.uni-obuda.hu

Abstract

Technical higher education - that is engineering education, unlike the general practice of secondary vocational education - already deals with adult “students”. Although the emphasis on educational tasks in universities is less, the attitude-shaping effect and example of lecturers play a key role. With this compilation, we aim to provide clues for this.

Keywords: *education, training, didactics, methodology, curriculum.*

Összefoglalás

A műszaki felsőoktatás, vagyis a mérnökképzés – eltérően a középfokú szakképzés általános gyakorlatától – már felnőttkorú „diákokkal” foglalkozik. Bár az egyetemeken a „nevelési” feladatokon kisebb a hangsúly, viszont az oktatók szemléletformáló hatásának, példamutatásának kiemelt szerepe van. Jelen összeállításunkkal ehhez szándékozunk támpontokat adni.

Kulcsszavak: *oktatás, képzés, didaktika, módszertan, tanterv.*

1. Bevezetés

Az [1]-ben a mérnökképzés oktatási módszereivel foglalkoztunk, a [2]-ben a műszaki felsőoktatás tananyag- és oktatásszervezési szempontjaira hívtuk fel a figyelmet, a [3]-ban a mérnökképzés gyakorlatainak szerepét, funkcióit és formáit tekintettük át, míg a [4]-ben a mérnökképzési gyakorlatokban alkalmazható oktatási anyagokat és didaktikai eszközöket foglaltuk össze. Az [5]-ben pedig egy konkrét szakterületi példát választva mutattuk be a módszertani szempontokat. Jelen összeállításunkban a mérnökképzés néhány általános didaktikai és módszertani vonatkozására térünk ki.

2. A felsőoktatási didaktika alapelvei

A felsőoktatási didaktika tárgya a felsőoktatási intézményekben folyó oktatás, képzés és ta-

nulás [6]. A felsőoktatási didaktikában két tematikai kört különböztetnek meg [7]:

– az egyiket a felsőfokú oktatás és önképzés körébe tartozó olyan általános elméleti problémák jelentik, amelyek közösek és jellemzőek minden felsőfokú oktatási intézmény esetében, ill. nem függenek azok szakmai profiljától.

– a második tematikai kört a képzéseméletnek azon kérdései alkotják, amelyek az egyes képzési szakirányokra (specializációkra) vagy a különböző szakokon előadott tantárgyakra vonatkoznak. Idetartoznak a szakterületi (pl. a műszaki-felsőoktatás), valamint a tantárgyi didaktikák, amelyek bár alárendeltek az általános egyetemi didaktikához viszonyítva, de annak alapelveit alkalmazzák, és részletesen továbbfejlesztik.

Ez utóbbi definíció kiemeli a szakterületi didaktika általános elveket alkalmazó, továbbfejleszt-

tő mivoltát, aminek nagy jelentősége van pl. az egyes speciális képzési területek gyakorlati foglalkozásainak megtervezésében, lebonyolításában.

Az általános és a speciális képzési célok megvalósításának helyes irányítása megköveteli, hogy az oktatási, képzési folyamatot alárendeljük a didaktikai alapelveknek, amelyek a didaktikai tevékenység általános normáiból, az oktatási folyamat elemzéséből és meghatározott törvényszerűségeiből fakadnak, ill. a tevékenység irányát megszabó célok elérésének feltételei. A felsőfokú oktatásban különösen nagy szerepet játszó didaktikai alapelvek közül a következőket emelhetjük ki [7]:

2.1. A tudomány, az oktatás és a szemléletformáló kompetenciafejlesztés egységének elve

A tantervi anyagok magas tudományos színvonalát – amely feltételezi a folyamatos korszerűsítést és lépéstartást a tudományág fejlődésével – úgy kell megvalósítani, hogy a hallgató megértesse, rögzíthesse és ezáltal elsajátíthassa azokat, ugyanakkor a tartalmak kiválasztása egyúttal lehetővé tegye azon tényezők feltárását, kiemelését, melyek biztosítani tudják a szemléletformáló, kompetenciafejlesztő hatás érvényesülését az oktatási, képzési folyamatban. Lényeges tényező a megértés alapján történő elsajátítás az emlékezetre támaszkodó verbális tanulással szemben.

2.2. A hallgatók oktatási folyamatban való tudatos és aktív részvételének elve

A didaktikai folyamatot úgy kell irányítani, hogy a hallgatók teljes egészében értsék a képzés célját és saját felelősségüket azok megvalósításában, kialakuljon bennük a pozitív motiváció és az önellenőrzés, ill. ne legyenek a kész ismeretek passzív fogyasztói, hanem bizonyos értelemben annak aktív „teremtőivé” is váljanak, pl. projektfeladatok teljesítése során.

2.3. A rendszeresség elve

Ez két értelemben is megnyilvánul:

- az oktató részéről: rendezett, logikus és áttekinthető előadásokban és gyakorlatokban, azok egész menetének rendszerszemléletű megszervezésében, amely megkönnyíti az oktatási célok megvalósítását is;
- a hallgatók részéről: fegyelmezett, rendezett tevékenységben, ütemezett és tervszerű munkában, elősegítve a pozitív személyiségjegyek kialakulását és megelőzve a tanulmányi kudarcokat.

A hallgatók rendszeressége nagymértékben függ az oktató rendszerességétől.

2.4. Az elfogadott didaktikai rendszer egységességének és következetességének elve

Egységes és következetes viszony minden hallgatóhoz, a szemeszter elején meghatározott követelmények következetes érvényesítése (félévközi módosítások nélkül) minden tantárgyban, minden oktató esetében, az egész egyetemen elfogadott szabályzatnak megfelelően.

2.5. A szemléletesség elve

Betartása megkönnyíti egyes problémák megértését, fokozza az érdeklődést a tananyag iránt, végső soron pedig elősegíti a pozitív tanulási motiváció kialakulását és a hallgatók egyéni aktivitásának kibontakozását. Ez elsősorban a korszerű oktatás(technika)i eszközök és technológiai bevezetések alkalmazását jelenti.

2.6. A könnyebbtől a nehezebb felé való fokozatos haladás elve

A tantervi anyagok olyan elrendezését jelenti, hogy az alapvető, elemi és könnyebb ismeretek elsajátításából kiindulva fokozatosan haladjunk a nehezebbek felé; az új témaegységek megértéséhez szükséges ismereteket már korábban közöljük. Ez egyúttal fejleszti a rendszeres, logikus gondolkodást és érvelést, kialakíthatja a folyamatos tanulás szokását, és közvetve a rendszeresség elvét is megvalósítja.

3. Oktatási célok és módszerek az egyetemen

A „távlati” oktatási, képzési célok megfogalmazása azért szükséges, hogy az egyes szakterületeket művelő oktatók ennek alapján saját kurzusukat, közép- és rövidtávú tevékenységüket megtervezzék, melynek segítségével a kívánt típusú szemléletbeli és kompetenciákat illető változásokat tanítványaikban elősegítsék. A hagyományos tantárgyi adatlap, amely témák vagy elolvasandó szakirodalom jegyzékéből áll, nem felel meg ennek a célnak, mivel nem nevezi meg pontosan, milyen kompetenciákat kell a hallgatóknak elsajátítaniuk.

A [8] alapján – azt aktualizálva – az **1. táblázat** szerint vázolhatók az egyetemi oktatási célok, az oktatási módszerek vagy a hallgatói tevékenységek és az értékelési rendszer közötti összefüggések, egyfajta iránymutatásként.

1. táblázat. Az egyetemi oktatási célok, az oktatási módszerek vagy a hallgatói tevékenységek és az értékelési rendszer közötti összefüggések

Oktatási célok	Oktatási módszerek/Hallgatói aktivitás	Kiértékelés/Visszacsatolás
Ismeretek		
<p>A hallgatóknak</p> <ul style="list-style-type: none"> - ismernie kell tárgyának alapvető terminológiáját - ismernie kell tárgyának alapvető törvényszerűségeit és fogalmait - értenie kell tárgyának használhatóságát - ismernie kell tárgyával kapcsolatos tárgyak alapjait és alkalmazásait 	<ul style="list-style-type: none"> - előadások; kötelező szakirodalom; gyakorlati munka; demonstráció stb. - előadások; kötelező szakirodalom; gyakorlati munka; demonstráció stb. - kapcsolat a kutatással, az iparral, a területen dolgozó szakemberekkel; kísérletek, projektek (ahol és amennyiben az szükséges) - általános tanulmányok; „hát-tér”-szakirodalom olvasása 	<ul style="list-style-type: none"> - feleletválasztásos vizsgák; a kifejezések korrekt használata a dolgozatokban; szemináriumi viták stb. - korrekt utalások a megfelelő törvényekre, fogalmakra stb.; indoklások, bizonyítások; tanulmányírás stb. - a projektmunkákról készített beszámolók értékelése stb. - a különböző forrásokból szerzett információk szintézise
Készségek		
<p>Az egyetemi oktatásnak képessé kell tennie a hallgatót arra, hogy</p> <ul style="list-style-type: none"> - írásban adekvát módon tudja magát kifejezni - tisztán és érthetően tudjon előadni - önállóan tudjon ítéletet, véleményt alkotni - értsen a célravezető információszerzéshez - tudjon alkotóan képzelőerővel és elvont kategóriákban gondolkodni - értsen a kollégákkal és leendő életpályájával kapcsolatos többi szakemberrel való együttműködéshez - kialakuljon alkalmazkodóképessége az ismeretek és szemléletek változásaihoz (mind az általános technikai fejlődést, mind a saját tárgyában felmerült új meglátásokat illetően) 	<ul style="list-style-type: none"> - dolgozatok (esszék); laboratóriumi jegyzőkönyvek stb. - dolgozatok ismertetése; megbeszélés és vita szemináriumi csoportokban; konzuKációk stb. - ellentmondásokba ütközés és azok felismerése; ellentétes nézetekkel való szembekerülés; a szeminárium felhasználása a hallgató feltevéseinek kifejtésére stb. - könyvtárak, internet, ismertetők, kivonatok stb. használata; tanulmányokra, projektekre való készülés; nyitott célú kísérletek - kutatási projektek; megoldatlan problémákkal való birkózás; tudományos fogalmak használata a bizonyításokban, megbeszélésekben, vitákban - társas, kombinált projektek; szerepjátszás, csoportviták a csoportbeli kölcsönhatások megvilágítására - új eszmék, elképzelések hatásának való kitétel (nem mindent „tényként” elfogadva) 	<ul style="list-style-type: none"> - ezek informatív értékelése - más hallgatók kritikája - pl. „hasonlítsd össze és állítsd szembe!” kérdések a vizsgákon; az elhangzott érvek értékelése stb. - informatív megjegyzések a teljesítményre; „nyílt könyves” vizsgáztatások - az írásos munkák (esetleg publikációk) minősége; a problémák megragadása; az eredetiség méltánylása - a hallgató viselkedésének, magatartásának más hallgatók általi, csoportbeli értékelése - graduálás utáni figyelemmel kísérés
Attitűdök		
<p>A cél tudata az egyetemi oktatásban hivatva van a hallgatókban előmozdítani a következőket:</p> <ul style="list-style-type: none"> - a tanulás iránti lelkesedést - a pontosság iránti tudományos igényt - a társadalom morális, gazdasági és tudományos problémáit illető tudatosság 	<ul style="list-style-type: none"> - szabadon választott irodalom olvasása; tanórákon kívüli összefüggések (pl. szakmai klubok és szakosztályok...) - olyan oktatókkal és kutatókkal való kapcsolat, akik ezt a pontosságot testesítik meg; saját eredmények folyamatos ellenőrzése - általános művelődési tanulmányok; projektek; szociológia, közgazdaságtan, fakultációk... 	<ul style="list-style-type: none"> - a tanórákon kívüli tevékenység kiterjedése; új problémák meglátása a saját kutatási munka számára - a vizsgákon a pontosságnak érdemjeggyel történő jutalmazása - benyomáskereső, a hallgató írásbeli munkái és a szemináriumi viták alapján

4. Az egyetemi oktatási-személyiségfejlesztési folyamat elemei

Céljait az egyetem a tervszerűen megszervezett – a képzés általános és speciális céljainak alárendelt – oktatási, képzési folyamat segítségével valósítja meg. Az oktatási, képzési folyamat alapvető alkotóelemei a következők [7]:

- a tantervek (a képzés tartalma),
- az ismeretek átadásának formái és módszerei (a képzés megvalósítása),
- a szemléletformálás, kompetenciafejlesztés formái és módszerei,
- a tanulmányok szervezete és anyagi bázisa,
- az egyetemi hallgatók,
- az egyetemi oktatók.

A tantervek helyes koncepciója a képzés részletes, érdemi céljai megvalósításának alapvető feltétele. Az egyes szakok észszerű tanulmányi terveinek kidolgozása a „szak modelljén” alapul, amelyet az adott szakra jellemző ipari igényeknek, azok funkcionális tartalmainak, valamint az ott szükséges ismereteknek, jellemvonásoknak, technikai és gazdasági vonatkozásoknak részletes elemzésével dolgoznak ki, különös tekintettel az egyes ipari beosztások mérnöki feladatainak minél eredményesebb megvalósítására (pl. a duális képzésben).

A „szak modelljén” alapuló tantervek körülhatárolják az adott szakon végző hallgatók számára szükséges ismeretek, jártasságok és készségek egészét az elméleti és a gyakorlati felkészültség terén. A tanulmányi tervek tehát meghatározzák az elméleti tárgyak, a szaktárgyak, a kiegészítő tárgyak és a humán tárgyak, a szükséges gyakorlatok számát és körét, az oktatás tartalmának globális mennyiségét és helyes arányait úgy, hogy azok reálisan beleférjenek a képzési idő teljes, ill. részekre lebontott időszakába.

A tanulmányi tervek végleges formájukban meghatározzák:

- az előadandó tantárgyak számát és azok logikai összefüggéseit az egyes félévekben;
- az előadások és gyakorlatok óraszámát minden tantárgyból;
- az alapvető követelményeket (vizsgák, évközi jegyek, aláírások) és a megszerezhető krediteket;
- a termelésben lebonyolítandó szakmai, ill. szakértői gyakorlatok számát és időtartamát.

A tanulmányi tervek alapján dolgozzák ki az egyes tantárgyak ún. kerettanterveit, amelyek az adott szakon nélkülözhetetlen oktatási tartalmat határozzák meg minden tantárgyból. Az egyes előadók és gyakorlatvezetők e kerettantervek

alapján dolgozzák ki a tantárgyak részletes tanterveit.

Az oktatási folyamatnak rugalmasnak kell lennie, megfelelő mértékben kell alkalmazkodnia azokhoz a személyekhez, akik részt vesznek benne, továbbá a konkrét és egyúttal változó körülményekhez, az egyes tantárgyakhoz, amelyek mindegyike más és más módszertani sajátosságokkal rendelkezik.

Az oktatási, képzési folyamat anyagi bázisát a megfelelő és korszerű laboratóriumi berendezések, a tankönyv- és jegyzetellátás biztosítása, jól felszerelt könyvtárak és olvasótermek, korszerűen berendezett előadó és gyakorlati termek, ill. laboratóriumok, jól szervezett műhelyek és kollégiumok jelentik. A tanulmányok lefolyásának helyes megszervezése is legalább ennyire fontos, amelyhez a következők tartoznak:

- a hallgatók olyan kritériumok alapján történő beosztása csoportokba, amelyek biztosítják a közösség gyors integrációját és a kollektív felelősségérzet kialakulását a tanulás eredményeiért;
- a kötelező foglalkozások észszerű órarendjének kidolgozása, figyelembe véve a hallgatók idejének gazdaságos felhasználását;
- a félévi követelmények arányos (komplex és részletes) elosztása;
- észszerű vizsgabeosztás kialakítása;
- a tanterv tartalmának gondos, részletes összeválogatása.

A [9] hangsúlyozza, hogy napjainkban folyamatosan jelennek meg az egyetemi padsorokban azok a hallgatók, akik fiatalabbak, mint a tömeges közszolgáltatásban megjelenő internet. Számukra az internet és számítógép-használat, a multimédia, ill. mobil eszközök sokoldalú felhasználása a hétköznapi természetes része. Gyermekként találkoztak először az internettel, a digitális technikával és azóta ezek használata az életük meghatározó részévé vált. Mindez természetesen jelentős mértékű hatással van hallgatói szerepfelfogásukra, a felsőoktatással kapcsolatos gondolkodásuk formálódására.

Természetesen erről nem megfélekedve kell a mérnökképzést is szervezni, de fontos azt is szem előtt tartani, hogy a „műszaki érzék”, a gyakorlatias kompetenciák fejlesztése csak virtuális környezetben, „online” módszerekkel, ill. távoktatási anyagokkal nem lehet hatékony és eredményes.

A [10] szerzői segítséget kívánnak nyújtani a felsőoktatási intézményeknek ahhoz, hogy a más szektorokban és ágazatokban már bevált és a felsőoktatási intézmények számára is releváns stratégiai menedzsment-módszertanokat megfelelően

alkalmazzák, stratégiai menedzsment-gyakorlatokat általában is fejlesszék. Ezt a módszerek gyakorlatorientált leírásával, felsőoktatási példák bemutatásával segítik elő.

5. Következtetés

A hallgatók aktív magatartása, a tanuláshoz való öntudatos viszonya és az oktatási, képzési folyamatban való motivált részvétele nélkül az oktatószemélyzet nem tudja elérni a céloknak megfelelő eredményt. Viszont az oktatók közösségét terheli a felelősség a képzési folyamat egészéért, annak tartalmáért és köréért, a képzési célok megvalósításának módszereiért, a helyes szervezés biztosításáért, a fiatalok együttműködésének megfelelő irányításáért és hasznosításáért is. Ehhez szükséges a célokkal és feladatokkal tisztában levő elkötelezett tanári magatartás, megfelelő tudományos, pedagógiai és erkölcsi felkészültség.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Bagyinszki Gy., Bitay E.: *Mérnökképzés oktatási módszerei*. MTK 13. (2020) 19–23.
<https://doi.org/10.33895/mtk-2020.13.02>
- [2] Bagyinszki Gy., Bitay E.: *Tananyag- és oktatásszervezés a műszaki képzésekben*. MTK 11. (2019) 23–26.
<https://doi.org/10.33895/mtk-2019.11.02>
- [3] Bagyinszki Gy., Bitay E.: *Anyagtudományi gyakorlat-modulok a gépész- és mechatronikai mérnök képzésben*. Műszaki Tudományos Füzetek 16. (2011) 5–16.
<https://doi.org/10.36243/fmtu-2011.04>
- [4] Bitay E., Bagyinszki Gy.: *Oktatási anyagok és didaktikai eszközök a mérnökképzési gyakorlatokban*. MTK 15. (2021) 7–10.
<https://doi.org/10.33895/mtk-2021.15.02>
- [5] Bitay E., Bagyinszki Gy.: *Hegesztőrobotokra vonatkozó ismeretek oktatásának módszertani szempontjai*. Műszaki Tudományos Füzetek 19. (2014) 73–76.
<https://doi.org/10.36243/fmtu-2014.011>
- [6] Wincenty Okoń: *Felsőoktatási didaktika*. Felsőoktatási Pedagógiai Kutatóközpont, Budapest, 1973.
- [7] Kietlińskja Z.: *A műszaki felsőoktatás pedagógiája*. Felsőoktatási Pedagógiai Kutatóközpont, Budapest, 1974.
- [8] R. Beard: *Tanítás és tanulás a felsőoktatásban*. Felsőoktatási Pedagógiai Kutatóközpont, Budapest, 1974.
- [9] Ollé J.: *Egy módszer alkonya: a katedrapedagógia végnapjai a felsőoktatásban*. NFKK FÜZETEK 5. „Korszerű felsőoktatási pedagógiai módszerek, törekvések”, Budapesti Corvinus Egyetem Nemzetközi Felsőoktatási Kutatások Központja, 2010. november, 22–31.
- [10] Mészáros Á. (szerk.): *Felsőoktatási stratégiai módszertani kézikönyv*. Oktatáskutató és Fejlesztő Intézet Budapest, 2011.

SZEMIDEFINIT OPTIMALIZÁLÁSRA VONATKOZÓ ALGORITMUSOK IMPLEMENTÁLÁSA JAVABAN

IMPLEMENTATION IN JAVA OF ALGORITHMS FOR SEMIDEFINITE OPTIMIZATION

Darvay Zsolt,¹ Garfield Adrienne²

¹ Babeş-Bolyai Tudományegyetem, Matematika és Informatika Kar. Kolozsvár, Románia, darvay@cs.ubbcluj.ro; Erdélyi Múzeum-Egyesület, Matematikai és Informatikai Szakosztály

² Babeş-Bolyai Tudományegyetem, Matematika és Informatika Kar. Kolozsvár, Románia, adriennegarfield2000@gmail.com

Abstract

We discuss the possibility of solving the semidefinite optimization problem using interior-point algorithms. We present the primal and dual semidefinite programming problems, and then determine the interior-point condition and the optimality criteria. We analyze the central path system and the modification of this, using the method of algebraically equivalent transformation. We use the Nesterov-Todd scaling technique to obtain the proper search directions. We give a modified version of the Nesterov-Todd step interior-point algorithm based on the implementation point of view. We present some numerical results based on a code implemented in the Java programming language. We compare the results obtained for the identity map and the square root function within the framework of the algebraically equivalent transformation technique.

Keywords: *semidefinite optimization, interior-point algorithm, central path, algebraically equivalent transformation.*

Összefoglalás

A szemidefinít optimalizálási feladat belsőpontos algoritmusokkal történő megoldási lehetőségét tárgyaljuk. Bevezetjük a primál, illetve duál szemidefinít programozási feladatokat, majd ezt követően meghatározuk a belsőpont-feltételt és az optimalitási kritériumot. Elemezzük a centrális útnak megfelelő rendszert, valamint ennek módosítását az algebrailag ekvivalens átalakítás módszerével. A Nesterov-Todd skálázási technikát használjuk a megfelelő keresési irányok meghatározása érdekében. Az implementáció szemszögéből módosított változatát adjuk meg a teljes Nesterov-Todd-lépéses belsőpontos algoritmusnak. Numerikus eredményeket mutatunk be egy Java programozási nyelvben fejlesztett kód segítségével. Az algebrailag ekvivalens átalakítás technikája keretében használt azonos függvényre, illetve négyzetgyökfüggvényre vonatkozó eredményeket hasonlítjuk össze.

Kulcsszavak: *szemidefinít optimalizálás, belsőpontos algoritmus, centrális út, algebrailag ekvivalens transzformáció.*

1. Elméleti alapok

1.1. A szemidefinít optimalizálási feladat

A szemidefinít optimalizálás a konvex optimalizálásnak egy olyan sajátos esete, amely számos alkalmazással rendelkezik például a kombinato-

rikus optimalizálás területén. Mérnöki szempontból a szerkezeti optimalizálás esetén, a mesterséges intelligenciában pedig az ellipszoidokkal végzett minta-elválasztás során találkozhatunk ilyen jellegű feladatokkal [1].

Jelölje $\mathbb{R}^n, \mathbb{R}^{n \times n}$, illetve S^n az n -ed rendű oszlopvektorok, mátrixok, illetve szimmetrikus mátrixok halmazát. Tetszőleges $X, S \in \mathbb{R}^{n \times n}$ esetén bevezetjük az alábbi algebrai műveletet:

$$X \circ S = \text{Tr}(X^T S),$$

ahol X^T az X mátrix transzponáltját jelöli. Ha az $X \in S^n$ mátrix pozitív szemidefinit, illetve pozitív definit, akkor ezt az $X \succcurlyeq 0$, illetve $X \succ 0$ alakban írjuk fel.

A szemidefinit optimalizálási feladat az alábbi módon adható meg:

$$\begin{aligned} \min C \circ X, \\ A_i \circ X = b_i, \quad i = 1, 2, \dots, m, \\ X \succcurlyeq 0, \end{aligned} \tag{1}$$

ahol $A_i, C \in S^n$ és $b_i \in \mathbb{R}$ minden $i = 1, 2, \dots, m$ esetén. Ez azt jelenti, hogy olyan szimmetrikus és pozitív szemidefinit X mátrixot keresünk, amelyre fennállnak a korlátozó feltételek, és a $C \circ X$ kifejezés minimális. Az (1) feladatot primál feladatnak nevezzük.

1.2. Duál feladat

A primál feladathoz hozzárendelhető egy duál feladat, melyben egy lineáris célfüggvény maximumát keressük az A_i illetve C mátrixokkal kifejezett korlátozó feltételek teljesítése mellett:

$$\begin{aligned} \max b^T y, \\ \sum_{i=1}^m y_i A_i + S = C, \\ S \succcurlyeq 0. \end{aligned}$$

A duál feladat esetén az $y \in \mathbb{R}^m$ oszlopvektort, illetve az S pozitív szemidefinit szimmetrikus mátrixot keressük úgy, hogy teljesüljenek a megengedettségi feltételek, és a $b^T y$ lineáris függvény maximális legyen.

1.3. Kezdeti pontra vonatkozó feltétel

A továbbiakban a primál-duál feladattal foglalkozunk, melyet egy útkövető belsőpontos algoritmus oldunk meg. Fontos, hogy már az (X^0, y^0, S^0) kezdőpont esetén kell, hogy teljesüljön a belsőpont-feltétel (BPF), melyet az alábbi módon írhatunk le:

$$\begin{aligned} A_i \circ X^0 = b_i, \quad X^0 \succ 0, \quad i = 1, 2, \dots, m, \\ \sum_{i=1}^m y_i^0 A_i + S^0 = C, \quad S^0 \succ 0. \end{aligned}$$

1.4. Optimalitási kritérium

Igazolható, hogy amennyiben a BPF fennáll, akkor az alábbi rendszer határozza meg az optimális megoldást [2]:

$$\begin{aligned} A_i \circ X = b_i, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad X \succcurlyeq 0, \\ \sum_{i=1}^m y_i A_i + S = C, \quad S \succcurlyeq 0, \\ XS = 0. \end{aligned}$$

Az optimalitási feltétel első két sorát megengedettségi feltételnek, a harmadikat pedig komplementaritási feltételnek nevezzük.

1.5. Centrális út

A centrális útnak megfelelő rendszert úgy kapjuk, hogy az optimalitási kritérium komplementaritási feltételében szereplő nullmátrixot a μI_n kifejezéssel helyettesítjük, ahol $\mu > 0$ egy pozitív valós szám, és I_n az n -ed rendű egységmátrix. A kapott egyenlőséget centralizációs összefüggésnek nevezzük. A centrális utat leíró rendszert így adhatjuk meg:

$$\begin{aligned} A_i \circ X = b_i, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad X \succcurlyeq 0, \\ \sum_{i=1}^m y_i A_i + S = C, \quad S \succcurlyeq 0, \\ XS = \mu I_n. \end{aligned} \tag{2}$$

Igazolható, hogy ha a BPF teljesül, akkor minden μ pozitív valós számra a fenti rendszernek egyetlen megoldása van [2]. A μ paraméter különböző értékeire kapott megoldások határozzák meg a centrális út pontjait. Ennek mentén fog haladni a belsőpontos algoritmus.

1.6. Keresési irányok

A keresési irányoknak fontos szerepe van a belsőpontos algoritmusok különböző változatainak a bevezetésében. A keresési irányoknak egy teljes osztályát a centrális utat meghatározó rendszer algebrailag ekvivalens átalakítása [3, 4] által adhatjuk meg, amely abban rejlik, hogy a (2) rendszer harmadik egyenlete által megadott centralizációs összefüggést előbb elosztjuk a μ paraméterrel, majd ezt követően az egyenlőség mindkét oldalára alkalmazunk egy folytonosan differenciálható és invertálható $\varphi: (0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$ függvényt. Így az alábbi rendszerhez jutunk [5]:

$$\begin{aligned} A_i \circ X = b_i, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad X \succcurlyeq 0, \\ \sum_{i=1}^m y_i A_i + S = C, \quad S \succcurlyeq 0, \\ \varphi\left(\frac{XS}{\mu}\right) = \varphi(I_n). \end{aligned}$$

Megjegyezzük, hogy a φ függvény alkalmazása, tetszőleges $U \in S^n$ szimmetrikus és pozitív szemidefinit mátrix esetén, az alábbi módon történik. Felhasználjuk, hogy U felírható $U = Q^T \Lambda Q$ alakban, ahol

$$\Lambda = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$$

a sajátértékekből alkotott diagonálmátrix és Q egy ortonormált mátrix, azaz $Q^T = Q^{-1}$. Ebben az esetben

$$\varphi(U) = Q^T \text{diag}(\varphi(\lambda_1), \varphi(\lambda_2), \dots, \varphi(\lambda_n)) Q.$$

A Wang és Bai [5] által megadott elemzés értelmében a keresési irányokat az

$$A_i \circ \Delta X = 0, \quad i = 1, 2, \dots, m,$$

$$\sum_{i=1}^m \Delta y_i A_i + \Delta S = 0, \quad (3)$$

$$\Delta X + X \Delta S S^{-1} = \mu \left(\varphi' \left(\frac{XS}{\mu} \right) \right)^{-1} \left(\varphi(I_n) - \varphi \left(\frac{XS}{\mu} \right) \right) S^{-1}.$$

rendszer segítségével adhatjuk meg.

1.7. Nesterov–Todd-skálázás

A keresési irányokat meghatározó (3) egyenletrendszernek nincs olyan egyértelmű $(\Delta X, \Delta y, \Delta S)$ megoldása, melyre ΔX szimmetrikus mátrix volna. Mivel a szimmetrikus mátrixok terében keresendő a megoldás, emiatt szükséges a rendszer skálázása. Többféle skálázási módszer létezik. A továbbiakban a Nesterov és Todd által bevezetett skálázást alkalmazzuk [6, 7].

A módszer értelmében egy P szimmetrikus mátrix bevezetése szükséges, mely által felírt egyenletrendszer közelítése lesz az előzőnek. A mátrix az alábbi két egymással egyenlő összefüggéssel adható meg.

$$P := X^{1/2} (X^{1/2} S X^{1/2})^{-1/2} X^{1/2} = S^{-1/2} (S^{1/2} X S^{1/2})^{1/2} S^{-1/2}.$$

Így az alábbi rendszert kapjuk:

$$A_i \circ \Delta X = 0, \quad i = 1, 2, \dots, m,$$

$$\sum_{i=1}^m \Delta y_i A_i + \Delta S = 0,$$

$$\Delta X + P \Delta S P^T = \mu \left(\varphi' \left(\frac{XS}{\mu} \right) \right)^{-1} \left(\varphi(I_n) - \varphi \left(\frac{XS}{\mu} \right) \right) S^{-1}. \quad (4)$$

A (4) egyenletrendszerben szereplő harmadik egyenlet bal oldalát egy egyszerű összeggé szeretnénk alakítani. Ennek érdekében bevezetjük a

$$D = P^2,$$

$$D_X = \frac{1}{\sqrt{\mu}} D^{-1} \Delta X D^{-1}, \quad (5)$$

$$D_S = \frac{1}{\sqrt{\mu}} D \Delta S D \quad (6)$$

mátrixokat. Figyeljük meg, hogy az (5) és (6) egyenlőségeket arra is használhatjuk, hogy a D_X illetve D_S ismeretében meghatározzuk a ΔX és ΔS keresési irányokat.

Alkalmazva a skálázást, a fenti jelölések bevezetésével az alábbi rendszert kapjuk:

$$\bar{A}_i \circ D_X = 0, \quad i = 1, 2, \dots, m,$$

$$\sum_{i=1}^m \Delta y_i \bar{A}_i + D_S = 0,$$

$$D_X + D_S = P_V,$$

ahol

$$\bar{A}_i := \frac{1}{\sqrt{\mu}} D A_i D, \quad i = 1, 2, \dots, m,$$

$$V = \frac{1}{\sqrt{\mu}} D S D,$$

$$P_V = \sqrt{\mu} D^{-1} (D \varphi'(V^2) D^{-1})^{-1} \cdot (\varphi(I_n) - D \varphi(V^2) D^{-1}) S^{-1} D^{-1}.$$

2. Implementációra vonatkozó sajátosságok

2.1. Hibavektorok és hibamátrixok

A belső pontos algoritmusok implementációja esetén nem mindig élhetünk azzal a feltételezéssel, hogy a megengedettségi feltételek az algoritmus minden iterációjában teljesülni fognak. Ez azt jelenti, hogy a (4) rendszer első két egyenletének jobb oldalán nem feltétlenül a 0 vektor, illetve a zérusmátrix jelenik meg. Mivel az $A_i \circ X = b_i$ egyenlőség nem mindig áll fenn, emiatt szükséges az alábbi jelölés bevezetése:

$$r_i^b = A_i \circ X - b_i, \quad i = 1, 2, \dots, m.$$

Megjegyezzük, hogy ily módon lényegében az r^b hibavektort vezettük be, melynek komponensei a fenti különbségek. Hasonlóan kell eljárni a

$$\sum_{i=1}^m y_i A_i + S = C$$

egyenlettel, melyhez hozzárendeljük az R^C hibamátrixot:

$$R^C = \sum_{i=1}^m y_i A_i + S - C.$$

A keresési irányokat meghatározó (4) rendszer első két egyenlete ennek megfelelően módosulni fog:

$$A_i \circ \Delta X = -r_i^b, \quad i = 1, 2, \dots, m,$$

$$\sum_{i=1}^m \Delta y_i A_i + \Delta S = -R^C,$$

$$\Delta X + P \Delta S P^T = \mu \left(\varphi' \left(\frac{XS}{\mu} \right) \right)^{-1} \left(\varphi(I_n) - \varphi \left(\frac{XS}{\mu} \right) \right) S^{-1}. \tag{7}$$

Bevezetve az

$$\bar{r}_i^b = \frac{r_i^b}{\mu}, \quad i = 1, 2, \dots, m,$$

$$\bar{R}^C = \frac{1}{\sqrt{\mu}} D R^C D$$

jelöléseket, a (7) rendszer skálázott alakja így írható:

$$\bar{A}_i \circ D_X = -\bar{r}_i^b, \quad i = 1, 2, \dots, m,$$

$$\sum_{i=1}^m \Delta y_i \bar{A}_i + D_S = -\bar{R}^C, \tag{8}$$

$$D_X + D_S = P_V.$$

2.2. Lépéshossz

A Wang és Bai [5] által bevezetett elméleti algoritmus teljes Nesterov–Todd-lépéses, amely azt jelenti, hogy az új (X, y, S) hármast az eredetiből úgy kapjuk, hogy hozzáadjuk a $(\Delta X, \Delta y, \Delta S)$ által megadott irányokat. Ebben az esetben a μ paraméter csökkentése az $(1 - \theta)$ szorzó segítségével történik, ahol $0 < \theta < 1$. A θ megválasztásából kiderül, hogy rövid lépéses algoritmusról van szó. Az implementáció szempontjából viszont hatékonyabb az X és S mátrixok alapján megválasztani a következő μ értéket az alábbi módon:

$$\mu = \sigma \frac{X \circ S}{n},$$

ahol $0 < \sigma < 1$ egy rögzített paraméter. Ugyanakkor a lépéshossz megválasztása segítségével érjük el azt, hogy a kapott X és S a pozitív szemidefinit mátrixok kúpjában maradjon. Ennek érdekében tetszőleges $M \in S^n$ esetén legyen $\lambda(M)$ az M mátrix sajátértékeiből alkotott oszlopvektor, és vezessük be a

$$\lambda_{\min}(M) = \min(\lambda(M)),$$

jelölést is, amely megadja az M mátrix legkisebb sajátértékét. Hasonlóan vezethetjük be a $\lambda_{\max}(M)$ jelölést is, amely az M mátrix legnagyobb sajátértékét adja meg. A lépéshossz meghatározását a Tütüncu, Toh és Todd [8] által megadott módszer módosításával végezzük. Bevezetve az

$$\alpha(M) = \begin{cases} -1 & \lambda_{\min}(M) \leq -1 \\ \lambda_{\min}(M) & \lambda_{\min}(M) \in (-1, +\infty) \end{cases} \tag{9}$$

jelölést, az X mátrixra alkalmazott lépéshossz

$$\alpha_X = \alpha(X^{-1} \Delta X), \tag{10}$$

az y vektorra és az S mátrixra kiszámított lépéshossz pedig

$$\alpha_S = \alpha(S^{-1} \Delta S) \tag{11}$$

lesz. Megjegyezzük, hogy a (10) és (11) által kiszámolt értékeket egy $0 < \rho < 1$ konstans szorzóval is csökkenteni fogjuk, ezáltal biztosítva, hogy az X és S a pozitív szemidefinit mátrixok kúpjának belsőjében maradjon.

2.3. Megállási feltétel

Az algoritmus megállási feltétele három részre bomlik. Az első arra vonatkozik, hogy a

$$\text{relgap} = \frac{X \circ S}{1 + |C \circ X| + |b^T y|} \tag{12}$$

kifejezéssel megadott relatív dualitási rés egy rögzített $\varepsilon > 0$ valós számnál kisebb legyen. Vezessük be az

$$A \circ X = \begin{bmatrix} A_1 \circ X \\ A_2 \circ X \\ \dots \\ \dots \\ A_m \circ X \end{bmatrix}$$

jelölést. Mivel az algoritmus során megtörténhet, hogy egy adott iterációban a megengedettség nem teljesül, ezért a megállási feltétel részeként megadunk két erre vonatkozó mértéket is. A primál megengedettséget a

$$\text{pinfeas} = \frac{\|A \circ X - b\|}{1 + \|b\|} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^m (A_i \circ X - b_i)^2}}{1 + \sqrt{\sum_{i=1}^m b_i^2}} \tag{13}$$

kifejezéssel, a duál megengedettséget pedig a

$$\text{dinfeas} = \frac{\|\sum_{i=1}^m y_i A_i + S - C\|}{1 + \|C\|} \tag{14}$$

segítségével fejezzük ki, ahol tetszőleges $M \in S^n$ mátrix esetén $\|M\| = \sqrt{(\lambda_{\max}(M^T M))} = |\lambda_{\max}(M)|$.

Figyeljük meg, hogy a primál megengedett megoldás esetén a pinfeas értéke nulla. Hasonlóan belátható az is, hogy duál megengedett megoldás esetén a dinfeas értéke zérus. Ezért a megállási feltétel részeként azt fogjuk vizsgálni, hogy a pinfeas, illetve dinfeas értéke kisebb-e egy adott $\varepsilon > 0$ valós számnál.

3. Az algoritmus

A fenti elméleti leírás alapján módosítjuk a Wang és Bai [5] által bevezetett belsőpontos algoritmust annak érdekében, hogy hatékony implementációt tudjunk megvalósítani.

Szemidefinit optimalizálásra vonatkozó belsőpontos algoritmus

Legyen $\varepsilon > 0$ a pontossági paraméter, $0 < \rho < 1$ konstans szorzó, mely csökkenti a lépés méretét, és $0 < \sigma < 1$ konstans szorzó, mely csökkenti a μ értékét.

Feltételezzük, hogy az (X^0, y^0, S^0) hármásra teljesül

a BPF, és legyen $\mu_0 = \frac{X^0 \circ S^0}{n}$ linear;

begin

$X := X^0; y := y^0; S := S^0;$

$\mu := \mu_0;$

relgap := 1; pinfeas := 1; dinfeas := 1;

while relgap $\geq \varepsilon$ **or** pinfeas $\geq \varepsilon$ **or** dinfeas $\geq \varepsilon$ **do**

begin

meghatározzuk a $(D_x, \Delta y, D_s)$ hármast (8) alapján;

meghatározzuk a ΔX mátrixot (5) alapján;

meghatározzuk a ΔS mátrixot (6) alapján;

kiszámítjuk az α_x lépéshossz értékét (10) alapján;

kiszámítjuk az α_s lépéshossz értékét (11) alapján;

$X := X + \rho \alpha_x \Delta X;$

$y := y + \rho \alpha_s \Delta y; S := S + \rho \alpha_s \Delta S;$

$\mu = \sigma (X \circ S) / n;$

meghatározzuk a relgap értékét (12) alapján;

meghatározzuk a pinfeas értékét (13) alapján;

meghatározzuk a dinfeas értékét (14) alapján;

end

end.

4. Numerikus eredmények

A szemidefinit optimalizálásra vonatkozó belsőpontos algoritmust a [9] weboldalon található példákra teszteltük. Az első változatban az algebrai ekvivalens átalakítás módszerét az identikus függvénnyel, míg a másodikban a négyzetgyökfüggvénnyel alkalmaztuk. Az 1. táblázat mutatja be a kapott eredményeket.

Megállapítható, hogy az iterációs számok nem térnek el jelentősen egymástól, de bizonyos esetekben a négyzetgyökfüggvényre alapozott módszer hatékonyabban működik az identikus függvényesnél.

1. táblázat. Eredmények az $\varepsilon = 10^{-7}$, $\rho = 0,95$, $\sigma = 0,3$ értékekre

Feladat	φ függvény	Mátrix mérete	Iterációs szám
sdp01	$\varphi(t) = t$	n=20	21
sdp01	$\varphi(t) = \sqrt{t}$	n = 20	18
sdp02	$\varphi(t) = t$	n = 30	19
sdp02	$\varphi(t) = \sqrt{t}$	n = 30	18
sdp03	$\varphi(t) = t$	n = 40	17
sdp03	$\varphi(t) = \sqrt{t}$	n=40	15

Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönetüket fejezik ki az Erdélyi Múzeum-Egyesületnek a kutatási munkához nyújtott támogatásért.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Vandenberghe L., Boyd S.: *Semidefinite Programming*. SIAM Review. 38/1. (1996) 49–95. <https://doi.org/10.1137/1038003>
- [2] Klerk E. de: *Aspects of Semidefinite Programming. Interior Point Algorithms and Selected Applications*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2002.
- [3] Darvay Zs.: *A new Algorithm for Solving Self-Dual Linear Optimization Problems*. Studia Universitatis Babeş-Bolyai, Series Informatica, 47/1. (2002) 15–26.
- [4] Darvay Zs.: *New Interior Point Algorithms in Linear Programming*. Advanced Modeling and Optimization, 5/1. (2003) 51–92.
- [5] Wang G. Q., Bai Y. Q.: *A New Primal-Dual Path-Following Interior-Point Algorithm for Semidefinite Optimization*. Journal of Mathematical Analysis and Applications, 353/1. (2009) 339–349. <https://doi.org/10.1016/j.jmaa.2008.12.016>
- [6] Nesterov Yu. E., Todd M. J.: *Primal-Dual Interior-Point Methods for Self-Scaled Cones*. SIAM Journal on Optimization, 8/2. (1998) 324–364. <https://doi.org/10.1137/S1052623495290209>
- [7] Nesterov Yu. E., Todd M. J.: *Self-Scaled Barriers and Interior-Point Methods for Convex Programming*. Mathematics of Operations Research, 22/1. (1997) 1–42. <https://doi.org/10.1287/moor.22.1.1>
- [8] Tütüncü R. H., Toh K. C., Todd M. J.: *Solving Semidefinite-Quadratic-Linear Programs Using SDTP3*. Mathematical Programming, Ser. B 95/2. (2003) 189–217. <https://doi.org/10.1007/s10107-002-0347-5>
- [9] Darvay Zs., Garfield A.: *Examples of Semidefinite Optimization Problems*. 2022. <https://www.cs.ubbcluj.ro/~darvay/sdp/> (letöltve: 2022. november 17.)

AZ ALGEBRAILAG EKVIVALENS ÁTALAKÍTÁS MÓDSZERE SÚLYOZOTT LINEÁRIS KOMPLEMENTARITÁSI FELADATOKRA

ALGEBRAICALLY EQUIVALENT TRANSFORMATION TECHNIQUE FOR WEIGHTED LINEAR COMPLEMENTARITY PROBLEMS

Darvay Zsolt,¹ Jakab Zsanett²

¹ Babeş-Bolyai Tudományegyetem, Matematika és Informatika Kar. Kolozsvár, Románia, darvay@cs.ubbcluj.ro; Erdélyi Múzeum-Egyesület, Matematikai és Informatikai Szakosztály

² Babeş-Bolyai Tudományegyetem, Matematika és Informatika Kar. Kolozsvár, Románia, zsanett28@yahoo.com

Abstract

We study the algebraically equivalent transformation technique using an application implemented in the Java programming language that solves weighted linear complementarity problems. In general, in the case of the algebraically equivalent transformation, we divide the nonlinear equation of the system that characterizes the central path, the so-called centrality equation, by the barrier parameter. However, in this case, we divide, component-wise, the centrality equation by the right-hand side vector, which depends on the barrier parameter. We apply the same continuously differentiable and invertible function to both sides of the obtained equation and generate different search directions using Newton's method. We analyze the numerical results provided by our application in the case of applying the algebraically equivalent transformation technique using the identical map and the square root function.

Keywords: *weighted linear complementarity problem, algebraically equivalent transformation, interior-point algorithm.*

Összefoglalás

Az algebrailag ekvivalens átalakítás módszerét tanulmányozzuk egy Java programozási nyelvben implementált súlyozott lineáris komplementaritási feladatokat megoldó alkalmazás által. Az algebrailag ekvivalens átalakítás módszere esetén a centrális utat meghatározó rendszer nem lineáris egyenletét, az úgynevezett centralitási egyenletet, általában elosztjuk a barrier-paraméterrel. Ebben az esetben viszont a centralitási egyenletet a barrier-paramétertől függő jobb oldali vektorral komponensenként osztjuk el. A kapott összefüggés mindkét oldalára alkalmazunk egy folytonosan differenciálható, invertálható függvényt, majd a Newton-módszer segítségével különböző keresési irányokat kapunk. Elemezzük az alkalmazás által szolgáltatott numerikus eredményeket abban az esetben, ha az algebrailag ekvivalens átalakítás módszerét az identikus függvény, illetve a négyzetgyökfüggvény segítségével alkalmazzuk.

Kulcsszavak: *súlyozott lineáris komplementaritási feladat, algebrailag ekvivalens átalakítás, belsőpontos algoritmus.*

1. A súlyozott lineáris komplementaritási feladat ismertetése

A súlyozott komplementaritási probléma (WLCP) jelentősen kiterjeszti a hagyományos lineáris komplementaritási feladat (LCP) fogalmát. A WLCP bevezetése Potra [1] által történt 2012-ben.

Legyen \mathbb{R}_+^n az n -ed rendű nem negatív valós számokból álló vektorok halmaza. Feltételezzük, hogy $M \in \mathbb{R}^{n \times n}$ egy monoton mátrix, azaz $x^T M x \geq 0$ bármely $x \in \mathbb{R}^n$ vektorra.

A hagyományos komplementaritási feladathoz hasonlóan, az alábbi rendszer tekinthető [2]:

$$\begin{aligned} -Mx + s &= q, \\ xs &= w, \\ x \geq 0, s &\geq 0, \end{aligned}$$

ahol $x, s, q \in \mathbb{R}^n$ és $w \in \mathbb{R}_+^n$.

Megfigyelhető, hogy a súlyozott feladat esetén az xs komponensenkénti szorzat a w , nem negatív valós számokból álló vektorral kell egyenlő legyen. Emellett teljesülnie kell a $-Mx + s = q$ összefüggésnek, valamint annak is, hogy az x és s vektorok komponensei nem negatív valós számok.

A belsőpontos algoritmusok általában a centrális utat követik, a WLCP esetén viszont egy sajátos útvonalat vezetünk be. Feltételezve, hogy adottak az x_0 és s_0 kezdeti belső pontok és $\mu^0 = \frac{(x_0^T s_0)}{n}$ vezessük be a μ pozitív paramétertől függő alábbi vektort [1, 2]:

$$w(\mu) = \left(1 - \frac{\mu}{\mu_0}\right)w + \frac{\mu}{\mu_0}c, \text{ ahol } c = x_0 s_0.$$

Ezáltal a centrális út, amely kijelöli a haladási irányt, a következőképpen adható meg:

$$\begin{aligned} -Mx + s &= q, \\ xs &= w(\mu), \\ x > 0, s > 0, \end{aligned} \quad (1)$$

ahol $\mu \in (0, \mu^0)$. Mivel az M mátrix monoton és létezik az (x^0, s^0) kezdeti belső pont, igazolható a centrális út létezése és egyértelműsége [3].

A továbbiakban a fenti rendszernek egy lehetséges módosításával foglalkozunk.

2. Az algebrailag ekvivalens átalakítás módszere

Legyen $e = [1 \ 1 \dots 1]^T$ az egyesekből álló n -dimenziós vektor. Az algebrailag ekvivalens átalakítás módszere [4, 5] esetén a hagyományos esetben

úgy járunk el, hogy az $xs = \mu e$ centralitási egyenletet elosztjuk a μ barrier-paraméterrel, ezt követően pedig egy folytonosan differenciálható és invertálható $\varphi: (0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$ függvényt alkalmazunk az egyenlet mindkét oldalára. Így a $\varphi\left(\frac{xs}{\mu}\right) = \varphi(e)$ egyenletet kapjuk. A WLCP esetén viszont a centralitási egyenlet az $xs = w(\mu)$ alakban van megadva, ezért ezt a jobb oldali $w(\mu)$ vektorral fogjuk komponensenként elosztani. Ezt követően alkalmazzuk a φ függvényt, így az (1) rendszer a következő alakot ölti:

$$\begin{aligned} -Mx + s &= q, \\ \varphi\left(\frac{xs}{w(\mu)}\right) &= \varphi(e), \\ x > 0, s > 0. \end{aligned}$$

A Newton-módszert alkalmazva megkapjuk azt a rendszert, amely egyértelműen meghatározza a Δx és Δs keresési irányokat [3]:

$$\begin{aligned} s\Delta x + x\Delta s &= w(\mu) \cdot \frac{\varphi(e) - \varphi\left(\frac{xs}{w(\mu)}\right)}{\varphi'\left(\frac{xs}{w(\mu)}\right)}, \\ -M\Delta x + \Delta s &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Figyeljük meg, hogy a φ függvény bevezetése által a keresési irányokat meghatározó lineáris egyenletrendszer mátrixa mindig ugyanaz lesz, csak a jobb oldali vektor függ a φ függvénytől. Az implementáció esetén kétféle φ függvényt használunk, az identikus, illetve a négyzetgyök függvényt: $\varphi(t) = t$, $\varphi(t) = \sqrt{t}$.

Az algoritmus elemzése érdekében be kell vezetni a δ függvényt is, amely a centrális út adott pontjának a környezetét határozza meg. Ezáltal egy közelségi mértéket adunk meg, amely az x és s pontoknak a centrális úttól való távolságát fejezi ki:

$$\delta(x, s, \mu) = \left\| \frac{w(\mu)}{\mu} - v^2 \right\|, \text{ ahol } v = \sqrt{\frac{xs}{\mu}}, \mu > 0.$$

A továbbiakban az algoritmusnak az elméleti, illetve az implementáció szempontjából módosított változatát ismertetjük.

3. Az algoritmus

Először a teljes lépéses belsőpontos algoritmust mutatjuk be, majd az implementáció szemszögéből módosított változatot vezetjük be, amely a súlyozott lineáris komplementaritási feladatok hatékony megoldására alkalmas. Az elméleti algoritmus az alábbi módon írható [2].

WLCP-re vonatkozó elméleti algoritmus

Adott az (x^0, s^0) pár úgy, hogy $-Mx_0 + s_0 = q$.

Feltételezzük, hogy $x^0 > 0, s^0 > 0$, valamint

$$\delta(x^0, s^0, \mu^0) \leq \tau, \text{ ahol } \tau \in (0,1) \text{ és } \mu^0 = \frac{(x^0)^T s^0}{n}.$$

$$x = x^0, s = s^0;$$

while $\|x s - w\| > \varepsilon$ **do**

$$\mu = (1 - \theta) \mu;$$

$(\Delta x, \Delta s)$ meghatározása a (2) rendszer alapján

$$x = x + \Delta x;$$

$$s = s + \Delta s;$$

end while

Az algoritmus bemenő adatai az induló belső pontok, melyeket az x^0 és s^0 vektorok jelölnek; a $0 < \theta < 1$ változó, amely a μ barrier-paraméter csökkenéséért felel; a $0 < \tau < 1$ paraméter, amely a centrális út környezetét szabályozza, és a leállási kritériumot meghatározó $\varepsilon > 0$ érték. Emellett természetesen szükséges megadni a feladat feltételei alapján felírt összefüggésnek megfelelő M mátrixot, illetve a q vektort. Az (x^0, s^0) kezdeti pontpárhoz hozzá kell rendelni egy kezdeti μ^0 értéket. Ebből a párból kiindulva, addig lehet haladni a ciklusban, amíg a megadott feltétel teljesül. A cikluson belül a μ értékét csökkenteni kell, erre pedig a legegyszerűbb módszer, hogy egy $1 - \theta$ -val. Ugyanakkor a Δx és Δs irányokat az (2) rendszerből számoljuk ki. Ebben az esetben mindig teljes Newton-lépéssel határozzuk meg az új x és s pontokat.

Mivel a teljes Newton-lépéses belsőpontos algoritmusok megvalósítása általában nem elég hatékony, ezért számos módosítást végzünk annak érdekében, hogy kisebb futási idővel rendelkező módszereket kapjunk. Az általunk implementált algoritmus esetén, a μ^0 -ra vonatkozóan használunk egy $0 < \sigma \leq 1$ szorzótényezőt a csökkentés gyorsítása céljából. Ugyanakkor bemeneti adatként megjelenik még az aktuális, valamint maximális iteráció szám, és az ε, ρ , illetve σ paraméterek. Az implementált algoritmus hatékonyságának növelése érdekében nem teljes Newton lépést használunk, hanem kiszámítjuk az $\alpha(x)$ és $\alpha(s)$ maximális lépéshosszokat a határig hányadosztestet alkalmazva. Ezt követően az $\alpha(x)$ és $\alpha(s)$ minimumát tekintjük és a kapott α pozitív valós szám adja meg a lépés hosszúságát, melyet megszorozunk egy 0 és 1 közötti ρ állandóval.

Az aktuális x és s pontok alapján a μ kiszámítása az [6] cikkben ismertetett módon történik, feltételezve, hogy $e^T c \neq e^T w$.

WLCP-re vonatkozó módosított algoritmus

Adottak az $x^0 > 0, s^0 > 0$ vektorok úgy, hogy

$$-Mx_0 + s_0 = q.$$

$$\text{Legyen } 0 < \sigma \leq 1 \text{ és } \mu^0 = \frac{(x^0)^T s^0}{n};$$

Feltételezzük, hogy $\delta(x^0, s^0, \mu^0) \leq \tau$, ahol $\tau \in (0,1)$.

Legyen $0 < \rho < 1$ és $\varepsilon > 0$.

$$x = x^0, s = s^0;$$

$$\text{iter} = 0, \text{ max_iter} = 3000;$$

do

$$\mu = \sigma \cdot \left| \frac{\mu_0(x^T s - e^T w)}{e^T c - e^T w} \right|;$$

$(\Delta x, \Delta s)$ meghatározása a (2) rendszer alapján;

$\alpha(x)$ és $\alpha(s)$ meghatározása;

$$\alpha = \min\{\alpha(x), \alpha(s)\};$$

$$x = x + \rho \cdot \alpha \cdot \Delta x;$$

$$s = s + \rho \cdot \alpha \cdot \Delta s;$$

$$\text{gap} = \left| \frac{x^T s - e^T w}{e^T c - e^T w} \right|;$$

$$\text{infeasibility} = \frac{\|Mx - s + q\|}{1 + \|q\|};$$

$$\text{iter} = \text{iter} + 1;$$

while $(\text{gap} \geq \varepsilon \text{ or } \text{infeasibility} \geq \varepsilon)$ **and** $\text{iter} < \text{max_iter}$; **do**

4. Numerikus eredmények

A továbbiakban különböző súlyozott komplementaritási feladatokra mutatunk be numerikus eredményeket.

1. feladat

Az első feladat megegyezik az Asadi és Mansouri [7] által tanulmányozott 1. feladattal, azzal a különbséggel, hogy $w = 0$ helyett most egy nullától különböző súlyvektort tekintünk. Legyenek

$$n = 4,$$

$$q = \begin{pmatrix} 4.0 \\ 4.0 \\ -2.0 \\ -1.0 \end{pmatrix}, w = \begin{pmatrix} 15.0 \\ 10.0 \\ 12.0 \\ 23.0 \end{pmatrix},$$

$$M = \begin{pmatrix} 1.0 & -2.0 & 1.0 & -1.0 \\ 2.0 & 0.0 & -2.0 & 1.0 \\ 1.0 & 2.0 & 0.0 & -3.0 \\ 2.0 & -1.0 & 3.0 & 3.0 \end{pmatrix}.$$

2. feladat

A második feladat a Mansouri és Pirhaji [8] által vizsgált 5.2. feladat módosított változata. Ebben az esetben is egy $w \neq 0$ súlyvektorral dolgozunk:

$$n = 7, q = \begin{pmatrix} -1.0 \\ -3.0 \\ 1.0 \\ -1.0 \\ 5.0 \\ 4.0 \\ -1.5 \end{pmatrix}, w = \begin{pmatrix} 10.0 \\ 12.0 \\ 15.0 \\ 35.0 \\ 15.5 \\ 12.0 \\ 20.2 \end{pmatrix},$$

$$M = \begin{pmatrix} 1.0 & 0.0 & -0.5 & 0.0 & 1.0 & 3.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.5 & 0.0 & 0.0 & 2.0 & 1.0 & -1.0 \\ -0.5 & 0.0 & 1.0 & 0.5 & 1.0 & 2.0 & -4.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.5 & 0.5 & 1.0 & -1.0 & 0.0 \\ -1.0 & -2.0 & -1.0 & -1.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ -3.0 & -1.0 & -2.0 & 1.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 1.0 & 4.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \end{pmatrix}$$

3. feladat

Az utolsó feladat az Achache [9] által tanulmányozott 3. feladat, de ebben az esetben is a $w \neq 0$ feltételezéssel élünk. Legyenek

$$n = 500, q = \begin{pmatrix} -1,0 \\ -1,0 \\ \dots \\ \dots \\ -1,0 \\ -1,0 \end{pmatrix}, w = \begin{pmatrix} v_0 \\ v_1 \\ \dots \\ \dots \\ v_{498} \\ v_{499} \end{pmatrix},$$

$$M = \begin{pmatrix} 1.0 & 2.0 & \dots & 2.0 & \dots & 2.0 \\ 0.0 & \ddots & 2.0 & \dots & 2.0 & \dots \\ \dots & 0.0 & 1.0 & 2.0 & \dots & 2.0 \\ 0.0 & \dots & 0.0 & 1.0 & 2.0 & \dots \\ \dots & 0.0 & \dots & 0.0 & \ddots & 2.0 \\ 0.0 & \dots & 0.0 & \dots & 0.0 & 1.0 \end{pmatrix},$$

ahol $v_i, 1 \leq i \leq n$ véletlenszerűen generált pozitív valós számok.

Az irányok meghatározásához először a $\varphi(t) = t$ identikus függvényt, majd a $\varphi(t) = \sqrt{t}$ négyzetgyökfüggvényt alkalmazzuk. Továbbá az első esetben legyen $\epsilon = 10^{-6}, \rho = 0,95$ és $\sigma = 0,3$, melyekre az 1. táblázatban leírt módon alakulnak a kapott értékek a WLCP-feladatok esetén.

Megfigyelhető, hogy a 4×4 -es mátrixot tartalmazó feladat esetén a négyzetgyökfüggvény alkalmazásakor több iteráció alatt jutottunk el a megoldáshoz, mint az identikus függvény esetén. A másik két feladatra vonatkozóan ennek ellenkezője mondható el (1. táblázat).

A 2. táblázatra is hasonló megfigyelések mondhatóak el, mint az 1. táblázatra, viszont az ϵ értékének csökkentésével megnőnek az iterációs számok, hiszen e módosítás során nagyobb pontossággal szeretnénk megkapni az x és s értékeit.

A ρ értékének növelése esetén az első feladatra az identikus függvényes módszer bizonyult a leghatékonyabbnak. A második feladatot a négyzetgyökfüggvényes módszer oldotta meg kevesebb iteráció alatt, míg a harmadik esetén az iterációs számok megegyeztek (3. táblázat).

A 4. táblázat alapján megállapítható, hogy több iteráció alatt jutott el a program a megoldásokhoz, mint az előző esetben, viszont ez várható volt, mivel a σ paraméter növelésével a μ változó csökkenését lelassítottuk.

1. táblázat. Eredmények az $\epsilon = 10^{-6}, \rho = 0,95, \sigma = 0,3$ értékekre.

Feladat	φ függvény	Mátrix mérete	Iterációs szám	Futási idő (ms)
1	$\varphi(t) = t$	$n = 4$	6	1,382
1	$\varphi(t) = \sqrt{t}$	$n = 4$	14	1,947
2	$\varphi(t) = t$	$n = 7$	15	3,918
2	$\varphi(t) = \sqrt{t}$	$n = 7$	10	2,977
3	$\varphi(t) = t$	$n = 500$	19	7117,815
3	$\varphi(t) = \sqrt{t}$	$n = 500$	18	7474,826

2. táblázat. Eredmények az $\epsilon = 10^{-8}, \rho = 0,95, \sigma = 0,3$ értékekre.

Feladat	φ függvény	Mátrix mérete	Iterációs szám	Futási idő (ms)
1	$\varphi(t) = t$	$n = 4$	10	1,614
1	$\varphi(t) = \sqrt{t}$	$n = 4$	19	2,362
2	$\varphi(t) = t$	$n = 7$	20	3,276
2	$\varphi(t) = \sqrt{t}$	$n = 7$	19	3,756
3	$\varphi(t) = t$	$n = 500$	23	9283,661
3	$\varphi(t) = \sqrt{t}$	$n = 500$	22	8764,180

3. táblázat. Eredmények az $\epsilon = 10^{-6}, \rho = 0,98, \sigma = 0,3$ értékekre.

Feladat	φ függvény	Mátrix mérete	Iterációs szám	Futási idő (ms)
1	$\varphi(t) = t$	$n = 4$	11	1,646
1	$\varphi(t) = \sqrt{t}$	$n = 4$	14	2,134
2	$\varphi(t) = t$	$n = 7$	15	2,772
2	$\varphi(t) = \sqrt{t}$	$n = 7$	14	3,013
3	$\varphi(t) = t$	$n = 500$	18	7102,162
3	$\varphi(t) = \sqrt{t}$	$n = 500$	18	7119,939

4. táblázat. Eredmények az $\epsilon = 10^{-6}, \rho = 0,95, \sigma = 0,9$ értékekre.

Feladat	φ függvény	Mátrix mérete	Iterációs szám	Futási idő (ms)
1	$\varphi(t) = t$	$n = 4$	138	15,872
1	$\varphi(t) = \sqrt{t}$	$n = 4$	140	21,080
2	$\varphi(t) = t$	$n = 7$	139	18,307
2	$\varphi(t) = \sqrt{t}$	$n = 7$	140	19,608
3	$\varphi(t) = t$	$n = 500$	143	100614,3
3	$\varphi(t) = \sqrt{t}$	$n = 500$	143	105317,7

5. Következtetések

A WLCP megoldására vonatkozóan bevezettük az algebrailag ekvivalens átalakítás módszerét. Egy, a Java programozási nyelvben megírt alkalmazás segítségével megállapítottuk, hogy az irány meghatározását leíró függvény befolyásolhatja a WLCP-megoldó által szolgáltatott eredményeket. Az algebrailag ekvivalens átalakítás módszerét az implementáció szemszögéből nézve az identikus függvény és a négyzetgyökfüggvény esetére vizsgáltuk. Megállapítható, hogy az iterációs szám függ az ε pontossági paramétertől, valamint a barrier-paramétert csökkentő σ , illetve a lépés hosszúságát szabályozó ρ paraméterek értékeitől is.

Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönetüket fejezik ki az Erdélyi Múzeum-Egyesületnek a kutatási munkához nyújtott támogatásért.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Potra F. A.: *Weighted Complementarity Problems - a New Paradigm for Computing Equilibria*. SIAM Journal on Optimization, 22/4. (2012) 1634–1654. <https://doi.org/10.1137/110837310>
- [2] Asadi S., Darvay Zs., Lesaja G., Mahdavi-Amiri N.: *A Full-Newton Step Interior-Point Method for Monotone Weighted Linear Complementarity Problems*. Journal of Optimization Theory and Applications, 186/3. (2020) 864–878. <https://doi.org/10.1007/s10957-020-01728-4>
- [3] Potra F. A.: *Sufficient Weighted Complementarity Problems*. Computational Optimization and Applications, 64/2. (2016) 467–488. <https://doi.org/10.1007/s10589-015-9811-z>
- [4] Darvay Zs.: *A new Algorithm for Solving Self-Dual Linear Optimization Problems*. Studia Universitatis Babeş-Bolyai, Series Informatica, 47/1 (2002) 15–26.
- [5] Darvay Zs.: *New Interior Point Algorithms in Linear Programming*. Advanced Modeling and Optimization, 5/1. (2003) 51–92.
- [6] Darvay Zs., Orbán A.-Sz.: *Implementation of the Full-Newton Step Algorithm for Weighted Linear Complementarity Problems*. Műszaki Tudományos Közlemények, 15/1. (2021) 15–18. <https://doi.org/10.33894/mtk-2021.15.04>
- [7] Asadi S., Mansouri H.: *Polynomial Interior-Point Algorithm for $P_*(\kappa)$ Horizontal Linear Complementarity Problems*. Numerical Algorithms, 63/2. (2013) 385–398. <https://doi.org/10.1007/s11075-012-9628-0>
- [8] Mansouri H., Pirhaji M.: *A Polynomial Interior-Point Algorithm for Monotone Linear Complementarity Problems*. Journal of Optimization Theory and Applications, 157/2. (2013) 451–461. <https://doi.org/10.1007/s10957-012-0195-2>
- [9] Achache M.: *Complexity Analysis and Numerical Implementation of a Short-Step Primal-Dual Algorithm for Linear Complementarity Problems*. Applied Mathematics and Computation, 216/7. (2010) 1889–1895. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2010.03.015>

VÁLTOZTATHATÓ FREKVENCIÁJÚ ÉS ERŐSSÉGŰ SZINUSZOS VÁLTÓÁRAM ELŐÁLLÍTÁSA VILLAMOSMOTOROK ELEKTROMÁGNESES JELLEMZŐINEK MÉRÉSÉHEZ

GENERATION OF SINUSOIDAL ALTERNATING CURRENT OF VARIABLE FREQUENCY AND INTENSITY FOR MEASURING THE ELECTROMAGNETIC CHARACTERISTICS OF ELECTRIC MOTORS

Elek Patrícia,¹ Szántó Attila,² Sziki Gusztáv Áron³

¹ Debreceni Egyetem, Műszaki Kar. Debrecen, Magyarország, epatri014@gmail.com

² Debreceni Egyetem, Műszaki Kar. Debrecen, Magyarország, szanto.attila@eng.unideb.hu

³ Debreceni Egyetem, Műszaki Kar. Debrecen, Magyarország, szikig@eng.unideb.hu

Abstract

The electric vehicle drive is nowadays considerably widespread in everyday road transport. These vehicles have an important component: the electric motor. The motors are tested using a simulation program for which knowledge of its electromagnetic and dynamic parameters are needed. These data are usually not provided by the manufacturers; therefore, it must be determined experimentally by measurements. For this purpose, at the Faculty of Engineering of the University of Debrecen there is the structure of a complex measuring system in progress. With this system, we can determine the motor parameters required for the simulation for all electric motors used in the automotive industry. In this publication, we will present a method designed to produce one of the characteristic electromagnetic parameters of electric motors; the variable frequency and strength sinusoidal alternating current required to determine the inductance of windings.

Keywords: *electric motor, measuring system, motor test bench, simulation.*

Összefoglalás

Az elektromos járműhajtás manapság széles körben elterjedt a mindennapi közlekedésben. Ezeknek a járműveknek egyik fontos eleme a villanymotor. A különböző motorokhoz szimulációs programokat fejlesztünk, amihez elengedetlen az elektromágneses és dinamikai jellemzőik, mint bemenő paraméterek ismerete. Ezeket az adatokat általában nem közlik a gyártók, ezért mérésekkel kell őket meghatározni. Ehhez a Debreceni Egyetem Műszaki Karán folyamatban van egy mérőrendszer felépítése, mellyel minden, a járműiparban alkalmazott villanymotor esetén meg tudjuk határozni a szimulációhoz szükséges motorparamétereket. Jelen publikációban a villanymotorok egyik jellemző elektromágneses paraméterének, a tekercsek induktivitásának meghatározásával foglalkozunk, és részletesen ismertetjük a tekercsek gerjesztéséhez szükséges, változtatható frekvenciájú és erősségű szinuszos váltóáram előállítására szolgáló áramforrás terveit.

Kulcsszavak: *elektromos motor, mérőrendszer, motorteszt-pad, szimuláció.*

1. Bevezetés

Manapság egyre több figyelem fordul az alternatív hajtású járművekre, és az elektromos és hibrid hajtásra. [1] Ez a technológia fejlődése

mellett, környezettudatosabb életmódunknak is köszönhető, hiszen mind vágyunk egy tisztább, káros anyagoktól mentes világra.

Az alternatív járműhajtásoknak többféle konstrukciójával találkozhatunk, de legtöbbszörben valamilyen elektromos motor hajtja a kerekeket.

A Debreceni Egyetem Műszaki Karán is sok kutatás zajlik az alternatív hajtásokkal kapcsolatban, és több versenyen indult és ért el sikereket elektromos hajtású, saját tervezésű versenyautóval a Kar valamelyik hallgatói csapata. A járművek tudatos fejlesztéséhez elengedhetetlen egy járműdinamikai szimulációs program [2, 3], amellyel számítani tudjuk a villanymotor, valamint az autó teljesítményét, menetdinamikai jellemzőit, és optimalizálhatjuk a jármű műszaki jellemzőit egy adott verseny célhoz. Ehhez szükséges a járműparaméterek, beleértve a járművet hajtó elektromos motor jellemzőinek ismerete.

A villamosmotor teljesítménye és egyéb jellemzői számos elektromágneses és dinamikai paramétertől függenek, melyeket a gyártó általában nem közöl. Ebből adódóan ezeket kísérleti úton kell meghatározni. [4–8]

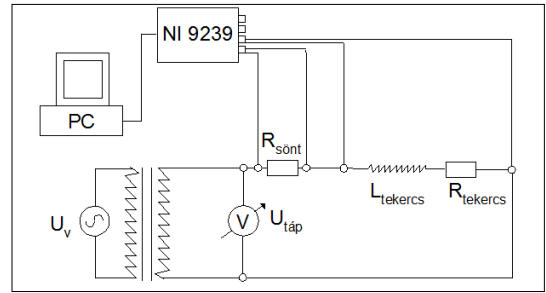
A sikeres mérésekhez nagyon fontos egy komplex, hitelesített mérőrendszer megléte. Ehhez a Debreceni Egyetem Műszaki Karán folyamatban van egy mérőrendszer felépítése [9], mellyel minden, a járműiparban alkalmazott villanymotor esetén, meg tudjuk határozni a szimulációhoz szükséges motorparamétereket.

Jelen publikációban a villanymotorok egyik jellemző elektromágneses paraméterének, a tekercsek induktivitásának meghatározásával foglalkozunk, amely függ a tekercsen átfolyó áram erősségétől. Itt részletesen ismertetjük azon áramforrás terveit, amely a változtatható frekvenciájú és erősségű szinuszos váltóáram előállítására szolgál, amellyel a motorok tekercseit gerjeszthetjük, mérve a bennük indukálódott feszültséget. Ezzel a berendezéssel a korábban felépített mérőrendszerünket egészítjük ki.

2. A tekercsek induktivitásának meghatározása

A különböző típusú (SWDC, BLDC, PMSM, IM) villanymotorok szimulációjához szükség van a motorban lévő tekercsek induktivitásainak mint bemenő paramétereknek az ismeretére. [10] Ezt a gyártók általában nem adják meg, így kísérleti úton kell őket meghatározni. Az erre alkalmas mérőelrendezést az 1. ábra szemlélteti.

A mérésekhez a motorban lévő gerjesztő- vagy armatúratekercsre szinuszos váltófeszültséget kapcsolunk, majd a tekercsen eső feszültséget ($U(t)$) és rajta átfolyó áramerősséget ($I(t)$) az



1. ábra. Mérőelrendezés az induktivitás meghatározásához

NI 9239-mérésadatgyűjtő kártyával mérjük. A mérést különböző áramerősségek esetén végezzük el. Ez alapján a tekercs mágneses fluxusa ($\Psi(t)$) az alábbi összefüggéssel [4, 5] számítható:

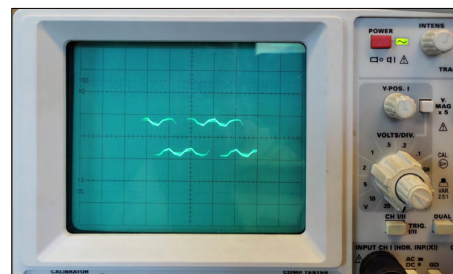
$$\Psi(t) = \int_0^t (U(\tau) - I(\tau) \cdot R) d\tau + \Psi(0) \quad (1)$$

A számítást a MATLAB program Simulink moduljával végeznénk el. A $\Psi(t)$ és $I(t)$ függvények ismeretében a mágneses fluxus megadható az áramerősség függvényében. A mágneses fluxus I áramerősség szerinti deriváltja megadja az $L(I)$ induktivitást az áramerősség függvényében, amit a szimulációs programban egy „Lookuptable” segítségével tudunk megadni.

A továbbiakban, a korábban említett, a mérések elvégzéséhez szükséges váltóáramú áramforrás terveit ismertetjük.

3. A tervezett áramforrás

A megfelelő mérések elvégzéséhez szükségünk van változtatható frekvenciájú (5–50 Hz) és erősségű (0–200 A) szinuszos váltóáram előállítására. Ennek egyik módja egy frekvenciaváltó alkalmazása lenne. Ehhez rendelkezésünkre áll egy Morgensen MSI200A-004G/5R5P-4-típusú eszköz, amelynek megvizsgáltuk a kimenőfeszültség-jelét egy HAMEG HM303-6-típusú analóg oszcilloszkóp segítségével. A mért feszültséget a 2. ábra szemlélteti.



2. ábra. A frekvenciaváltó kimenőfeszültség-jele

A frekvenciaváltó által előállított feszültségjel, ahogy az ábrán látható, nem szinuszos, ezért közvetlenül nem használható a mérésekhez. Valamint megfigyeltük, hogy a frekvenciaváltó bekapcsolás után csak bizonyos idő elteltével képes elérni a beállított frekvenciát, tehát emiatt sem alkalmas a mérések elvégzésére, mivel nagy áramerősségek esetén nem célszerű a tekercset huzamosabb ideig terhelni. Továbbá csak akkor biztosít feszültséget a kimenetén, ha az egy háromfázisú motorra van kapcsolva. A fenti problémák megoldására egy olyan berendezést terveztünk, amely alkalmas tisztán szinuszos, változtatható frekvenciájú és áramerősségű váltóáram előállítására.

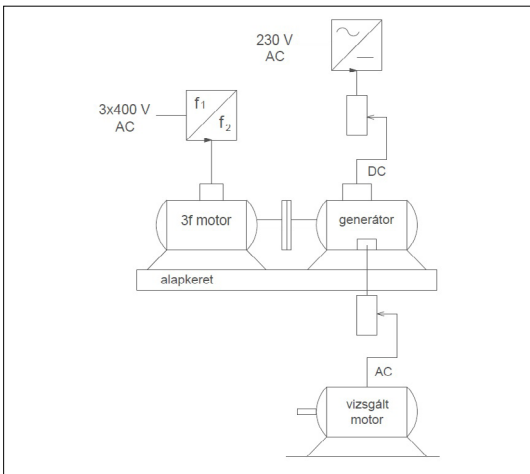
3.1 Az elrendezés elvi vázlata

A **3. ábra** a tervezett áramforrás sematikus rajzát mutatja.

A mérésekhez szükséges szinuszos váltóáramot egy külső gerjesztésű generátor állítaná elő. Ennek a gerjesztőtekercseire (állórészére) változtatható egyenfeszültséget kapcsolnánk, ezzel változtatva a generátor kimenetén a feszültséget, ezáltal a tekercsek gerjesztésére alkalmazott váltóáram áramerősségét.

A fenti váltóáram erősségének további szabályozására a mérőkörben is alkalmazhatunk egy változtatható ellenállást. Emellett szükség esetén transzformátort is használhatunk az áramerősség további növeléséhez.

A generátort egy tengelykapcsolón keresztül hajtáná meg egy 3 fázisú aszinkron motor. Ez a motor a korábban említett frekvenciaváltóra lenne kapcsolva, így biztosítva a különböző fordulatszámok és ezáltal a különböző kimeneti frekvenciák beállítását.



3. ábra. Az áramforrás elvi vázlata

Az egész rendszer egy saját tervezésű alapkereken helyezkedne el, kiegészítve a korábbi villanymotorok vizsgálatára kifejlesztett mérőrendszerünket.

3.2 A kiválasztott részegységek

A motor meghajtására egy Morgensen MSI200A-004G/5R5P-4-típusú, 4/5,5 kW teljesítményű frekvenciaváltót használnánk. (**4. ábra**)

Ez hajtáná meg a Morgensen MSE3-90L-2-típusú, 2,2 kW teljesítményű, háromfázisú aszinkron motort, amely az **5. ábrán** látható. A motor teljesítménye várhatóan megfelelő lesz a mérések elvégzéséhez.

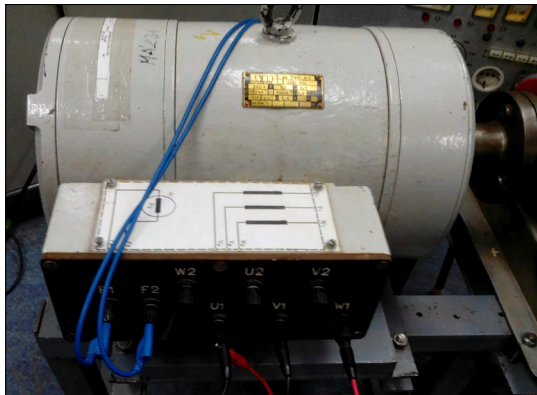
A generátor egy EVIG-típusú, külső gerjesztésű generátor lenne terveink szerint. (**6. ábra**) Külső gerjesztésre azért van szükség, hogy a generátor kimenetén, adott fordulatszám (frekvencia) mellett, szabályozhassuk a létrejövő feszültség értékét. Ezt a gerjesztőtekercsre kapcsolt, 0–230 V között változtatható feszültségű egyenárammal tud-



4. ábra. Morgensen MSI200A-004G/5R5P-4-típusú frekvenciaváltó



5. ábra. A generátor meghajtására szolgáló villanymotor



6. ábra. A külső gerjesztésű generátor

juk megtenni. Ehhez egy egyenirányítót és toroid transzformátort alkalmazunk.

4. Összefoglalás

A jelen közleményben a járműiparban alkalmazott elektromos motorokban található tekercsek induktivitásának kísérleti meghatározásával foglalkoztunk, különböző, a motoron átfolyó áramerősségek esetén. A mérésekhez változtatható frekvenciájú és erősségű, tisztán szinuszos gerjesztőáramra van szükség. Ehhez megvizsgáltunk egy rendelkezésünkre álló frekvenciaváltót, amelyről a méréseink alapján kiderült, hogy kimeneti feszültsége közvetlenül nem alkalmas a mérések elvégzéséhez.

Ezért egy olyan berendezést terveztünk, amely a követelményeinknek megfelelő váltóáram előállítására alkalmas. Ennek főbb elemei a frekvenciaváltó által meghajtott 3 fázisú aszinkron motor és egy ahhoz kapcsolódó külső gerjesztésű generátor. Bemutattuk a tervezett mérőelrendezés felépítését, működését, valamint a hozzá kiválasztott eszközöket.

A mérőelrendezést a Debreceni Egyetem Műszaki Karának Gépelemek laboratóriumában tervezzük felépíteni, ezzel kiegészítve a korábban létrehozott, elektromos motorok kísérleti vizsgálatára alkalmas mérőrendszerünket. Amint a rendszer felépül, járműhajtásokban alkalmazott motorok tekercseinek induktivitását fogjuk mérni, majd a mért adatokat szimulációs programokban mint bemenő adatokat fogjuk felhasználni.

Köszönetnyilvánítás

Az innovációs és technológiai minisztérium ÚNKP-21-3 kódszámú új nemzeti kiválóság programjának a nemzeti kutatási, fejlesztési és innovációs alapról finanszírozott szakmai támogatásával készült.

A tanulmány alapjául szolgáló kutatást az innovációs és technológiai minisztérium által meghirdetett tématerületi kiválósági program (TKP2020-NKA-04) támogatta.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Szántó A., Sziki G. Á.: *Review of Modern Vehicle Powertrains and Their Modelling and Simulation in MATLAB/Simulink*. International Journal of Engineering and Management Sciences / Műszaki és Menedzsment Tudományi Közlemények, 5/2. (2020) 232–250.
- [2] Szántó A., Sziki G. Á., Hajdú S., Gábora A., Sipos K. B.: *Járműdinamikai szimuláció és optimalizáció*. Műszaki Tudományos Közlemények, 9. (2018) 219–222. <https://doi.org/10.33895/mtk-2018.09.50>
- [3] Szántó A., Sziki G. Á., Hajdu S.: *Dynamics Simulation of a Prototype Race Car Driven by Series Wound DC Motor in Matlab-Simulink*. Acta Polytechnica Hungarica, 17/4. (2020) 103–122. <https://doi.org/10.12700/APH.17.4.2020.4.6>
- [4] Sziki G. Á., Sarvajcz K., Kiss J., Gál T., Szántó A., Gábora A., Husi G.: *Experimental Investigation of a Series Wound Dc Motor for Modeling Purpose in Electric Vehicles and Mechatronics Systems*. Measurement, 109. (2017) 111–118. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.05.055>
- [5] Hadziselimovic M., Blaznik M., Štumberger B., Zagradišnik I.: *Magnetically Nonlinear Dynamic Model of a Series Wound DC Motor*. Przeglad Elektrotechniczny, 87/12b. (2011) 60–64.
- [6] Sziki G. Á., Szántó A., Mankovits T.: *Dynamic Modelling and Simulation of a Prototype Race Car In MATLAB/Simulink Applying Different Types of Electric Motors*. International Review of Applied Sciences and Engineering, 12/1. (2020) 1–7. <https://doi.org/10.1556/1848.2020.00145>
- [7] Szántó A., Szántó A., Sziki G. Á.: *Review of the Modelling Methods of Series Wound DC Motors*. Műszaki Tudományos Közlemények, 13. (2020) 166–169. <https://doi.org/10.33894/mtk-2020.13.31>
- [8] Szántó A., Kiss J., Mankovits T., Sziki G. Á.: *Dynamic Test Measurements and Simulation on a Series Wound DC Motor*. Applied Sciences, 11/10. (2021) 1–18. <https://doi.org/10.3390/app11104542>
- [9] Szántó A., Décese R., Kujbus M., Fejes L., Papcsák N., Sziki G. Á.: *Design of a Measuring System Suitable for Measuring the Electromagnetic and Dynamic Characteristics of Electric Motors*. Műszaki Tudományos Közlemények, 15. (2021) 99–102. <https://doi.org/10.33894/mtk-2021.15.19>
- [10] Szántó A., Sziki G. Á.: *Mérőrendszer fejlesztése villanymotorok elektromágneses és dinamikai jellemzőinek méréséhez és teszteléséhez*. Proceedings of the Conference on Problem-based Learning in Engineering Education, Debrecen, University of Debrecen Faculty of Engineering, (2021) 61–71.

A FORD T-MODELL TERVEZŐJE, GALAMB JÓZSEF KAPCSOLATA SZÜLŐFÖLDJÉVEL

JÓZSEF GALAMB, DESIGNER OF FORD T-MODEL AND HIS RELATIONSHIP WITH HOMELAND

Gáti József,¹ Kuti János,² Némethy Krisztina³

¹ Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Anyagtechnológiai Intézeti Tanszék, Budapest, Magyarország, gati@uni-obuda.hu

² Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Anyagtechnológiai Intézeti Tanszék, Budapest, Magyarország, kuti.janos@bgk.uni-obuda.hu

³ IBS, International Business School, Budapest, Magyarország, knemethy@ibs-b.hu

Abstract

In October 1908, a Ford Model T designed by József Galamb and companions, rolled out of the assembly line and achieved for the company a worldwide success it still enjoys today. The car's ease of use and reliable construction, as well as its affordable price, won the favour of buyers so much that the model was produced until 1927. The increasingly successful Hungarian chief designer of the Ford Motor Company, József Galamb never forgot his homeland. When he returned home, he supported his brothers in building up and running a Ford site and assembly plant in Makó, and established scholarships, gave lectures to members of the professional community, and supported the Reformed Church in Makó.

Keywords: *József Galamb, Ford Model T, Ford Motor Company.*

Összefoglalás

1908 októberében gördült ki a szerelőcsarnokból Galamb József és társai által tervezett Ford T-modell, amely máig tartó világsikert aratott. Az autó egyszerű kezelhetősége és megbízható konstrukciója, illetve a kedvező ára miatt annyira megnyerte a vevők tetszését, hogy a típust 1927-ig gyártották. A Ford Művek főkonstruktőre, az egyre sikeresebb Galamb József nem feledte el, hogy honnan származik. Amikor hazalátogatott, támogatta testvéreit egy makói Ford telephely és szerelőüzem kialakításában, működtetésében, valamint ösztöndíjat alapított, előadásokat tartott a szakmai közösségek tagjainak, és támogatta a makói református egyházat.

Kulcsszavak: *Galamb József, Ford T-modell, Ford Motor Company.*

1. Felkészülés a műszaki pályára

Galamb József 1881. február 3-án, Makón, református családban született id. Galamb József és Putnoki Erzsébet házasságából. Galamb Józsefet a makói elemi és polgári fiúiskolai tanulmányait követően a Szegedi Állami Fa- és Fémipari Szakiskola fémipari szakosztályában tanult. Az I. és II. évfolyama elvégzését követően Budapesti Magyar Királyi Állami Felső Ipariskolában (mai Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész és Biztonságtechni-

kai Mérnöki Kara) folytatta tanulmányait, melyet 28 társával együtt, az 1900/1901. tanévben fejezett be.

Ezt követően a diósgyőri Vasgyárba került műszaki rajzolóknak, majd 1901-ben katonai szolgálatra vonult be Pulába, ahol a Horthy Miklós parancsnoksága alatt álló naszádon szolgált. Leszerelése után rövid ideig Hódmezővásárhelyen, majd Aradon a Magyar Automobil Rt.-nél dolgozott. 1903-ban ösztöndíjjal, majd saját finanszírozásban tanulmányútra Nyugat-Európába utazott.

Drezda, Berlin, Hamburg, Bréma nagy gépgyárait tekintette meg, bejárta Belgiumot és Hollandiát, majd ezután Düsseldorfba, végül Frankfurt am Mainban az Adler autógyárba került. Itt hallotta a hírt, hogy világkiállítás lesz 1904-ben Saint Louisban.

2. Egy sikeres életpálya indítása

1903. október 6-án érkezett New Yorkba, ahol munkát vállalt egy dobozgyárban. A St. Louis-i világkiállítás megtekintése oly nagy hatást tett rá, hogy elhatározta, Amerikában marad. Rövid kitérő után Detroitban utazott, ott keresett állást, a három ajánlat – a Cadillac, a Silent Northerm és a Ford közül – az utóbbit választotta. 1905. december 11-én belépett a Ford Motor Company alkalmazottai közé. A jelentkező mérnököktől akkoriban nem a diplomájukat, hanem próbarajzot kértek. Az N-modell tervezésével kezdett foglalkozni. Újszerű hűtőt, keringtető szivattyút készített.

Galamb József 1952-ben a Ford Múzeum számára hangszalagra mondta visszaemlékezéseit. Ebből egy részlet: „1907. elején Mr. Ford így szólt hozzám: Joe, van egy ötletem. Tervezzünk egy új kocsit. Vigye a rajzabláját egy külön szobába, hozzákezdünk egy új modell tervezéséhez. Nem kell róla tudni senkinek. Az első dolog, hogy új sebességváltó kell, mert az eddigiekkel elégedetlen vagyok, nem elég praktikus. Akkor persze nem tudtuk, hogy ez lesz a T modell! Vagy fél évet dolgoztam a sebességváltó megtervezésén.” [1]

1908. október 1-én legördült az első eladásra szánt példány a gyártósorról. A Tin Lizzie-ként világhírűvé vált autót közel 20 évig gyártották, több mint 15 milliót adtak el belőle, 1997-ben pedig egy nemzetközi szakzsűri a szintén döntőbe jutott Porsche 911, Volkswagen Bogár, Citroën DS és Morris Mini közül választotta a XX. század autójának.

Az egyszerűen kezelhető és megbízható konstrukció, illetve a kedvező ár annyira megnyerte a vevők tetszését, hogy a típust 1927-ig gyártották. A megrendeléseket csak szalagszerű szereléssel és gyártással lehetett teljesíteni.

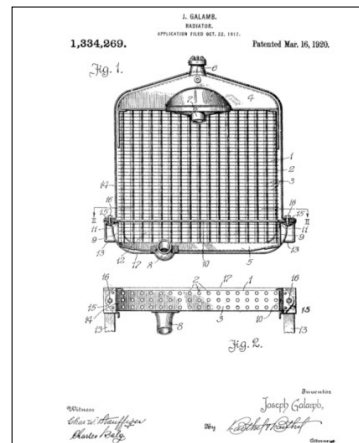
A világ első szériaautójának motorja Otto-rendszerezű, négyhengeres, négyütemű, termoszfion vízhűtésű. A legnagyobb teljesítménye 15 kW, ezt 1450 ford/min mellett érte el. A fogyasztás 100 km-enként 13,5 liter benzin, legnagyobb sebesség 65 km/h. A kocsit legszemlésebb műszaki megoldása a bolygóműrendszerezű sebességváltó volt, amelyet Galamb József tervezett.



1. ábra. Galamb József 1905-ben Pittsburghben készült fényképfelvétele



2. ábra. Az Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Karán restaurált 1922-es gyártású T-modell



3. ábra. A hűtő szabadalmi vázlata

Alfred Liebfeld lengyel író „Henry Ford az «isten»” című könyve ezt írja: „Kiderült, hogy az új kocsni nemcsak a falusi lakosság szükségleteit elégíti ki, hanem a városi lakosságét is. Felépítése olyan egyszerű volt, hogy bárki odaülhetett a kormánykerék mögé, és ahogy ígérték, maga is elvégezhetette a kisebb javításokat.” [2]

A T-modell ára a kezdeti 825 dollárról négy év alatt 575 dollárra csökkent, volt idő, amikor elérte a 355 dolláros minimumot.

Az amerikai mezőgazdaság gépesítésében fontos szerepet töltött be a Galamb József és Farkas Jenő tervei alapján készült olcsó Fordson traktor, melyből több milliót gyártottak, és az egész világon elterjedt.

Galamb József a fentiekén kívül még sok más konstrukciót is tervezett: részt vett többek között más Ford gépkocsimodellek fejlesztésében, teherautókat, pályamunkás kocsikat tervezett, és emellett a prototípusok kísérletein, új gyárrészlegek tervezésén is dolgozott. Az első világháborúban tervezett tengeralattjáró-keresőt és könnyű harckocsit is [3].

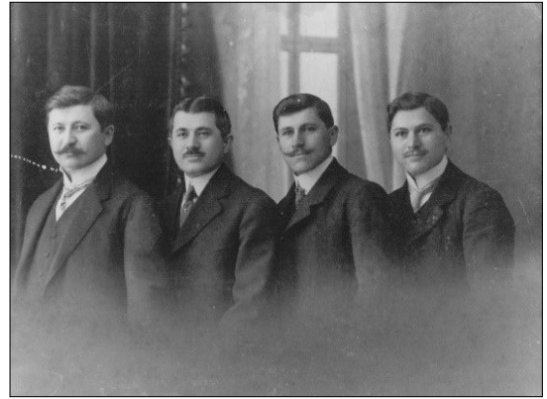
Galamb gépszerkesztői munkásságát jól jellemzi szabadalmi tevékenysége. Az Amerikai Szabadalmi Hivatalhoz, a United States Patent Office-hoz 1920 és 1952 között benyújtott összesen 27 szabadalmi leírás gondosan szerkesztett, világosak, pontos mérnöki munkát tükröznek.

Galamb József négy évtizedes konstruktor főmérnöki munkássága az amerikai csoda és érvényesülés példája. 1905-ben a Ford cég még egy 300 főt foglalkoztató kisüzem volt, és 1944-re az USA óriásvállalatainak egyik legnagyobbika lett. Az 1910-es évek közepén napi 250 autót gyártottak, húsz évvel később a termelés napi 10.000 kocsihoz emelkedett.

3. Kapcsolat a szülőfölddel

A makói tősgyökeres Galamb család anyakönyvi kivonata szerint Galamb József szüleinek második gyermeke volt, és még öten (négy fiú és egy leány) követték őt a sorban (két fiútestvére korán meghalt). Az értelmes parasztgazda a református tanító rábeszélésére a két elsőszülött fiút, Sándort és Józsefet továbbtaníttatta. A legidősebb fiú, Sándor jogász lett.

Galamb József 1911 őszén látogatott haza először. Édesanyja és testvérei nagy szeretettel fogadták a nyolc éve nem látott fiút. Ekkor készült a Homonnai műteremben a négy Galamb fiút ábrázoló híres kép. 1915-ben lett amerikai állampolgár.



4. ábra. A Galamb testvérek Makón: Sándor, József, János, Ferenc (balról jobbra)

1921-ben 100.000 koronás ösztöndíjat alapított a továbbtanulás támogatására. Az Alapító okirat szerint: "Galamb József makói születésű, jelenleg detroiti (Észak-amerikai Egyesült Államok, Michigan) lakos arra való emlékezővel, hogy a felső ipariskolai tanulmányait ösztöndíjak élvezetével végezte el; a felső ipariskola gépészeti osztályának szegénysorú, de jól tanuló növendékei részére, tanulmányaik könnyebb végzése céljából 100 ezer korona ösztöndíj alapítványt tesz, s ezen összeget Makó város közpénztárába be is fizette" [4].

János öccsét kivitte Amerikába, és két évig ő is a Fordnál dolgozott. A világháború után 1921-ben Galamb József hat Fordson traktort küldött Makóra testvéreinek, hogy ezzel dolgozzanak, és propagálják a Ford termékeket. Így született meg a családi cég, melyet két fiatalabb Galamb testvér, János és Ferenc vezetett. Galamb József 1922 őszén az üzletet beindítani Makón járt, mely alkalomból a Pénzvilág című lap hosszabb interjút közölt vele.

A makói telephely a Deák Ferenc utca sarkán állt. A szerelőműhely külső falára a 20-as évek végén festették fel a színes Ford autók, melynek nyomai a mai napig megtalálhatók a homlokzaton. A lerakat műhelyét és szervizét János vezette, a kereskedelmi feladatokat Ferenc irányította. A forgalom növekedésével Békéscsabán is nyílt egy Galamb lerakat, ahol 35 szerelő dolgozott [4].

Hazalátogatásaikor Galamb József nemcsak rokonait kereste fel, hanem előadásokat is tartott a Magyar Mérnök és Építész Egyletben és a Műszaki Akadémián. Filmeket hozott magával, amelyeket levetítve a szakemberek megismerkedhettek a sorozatgyártás Ford gyárbeli megvalósításával és a termékek műszaki jellemzőivel.

A Ford márka népszerűsítését szolgálta Magyarországon a Ford-karaván megjelenése. Egész Európát bejárta a Ford választékának legjavát képviselő autósor. Magyarországra 1926. május elsején érkezett meg a 25 különféle kocsiból álló karaván, amelyet Triesztből indítottak útnak. Ekkor járt ismét Makón Galamb József.

Ez alkalommal a kormányzó kihallgatáson fogadta a Várban. Pillanatok alatt kiderült, hogy 25 évvel azelőtt a gépészképző iskolahajón találkoztak először. A protokoll ezzel véget ért, és Horthy Miklós meghívta és átvezette Galamb Józsefet magánlakosztályába. Megismerkedett a kormányzó családjával, és több mint négy órát beszélgettek. Szóba került a kormányzó István fia, megbeszéltek, hogy az egyetem elvégzése után Horthy István tanulmányútra megy Detroitba [5].

Az első világháborúban a fémhiánynak a makói harangok is áldozatul estek, leszerelésüket követően hadi célokra beolvasztották őket. Pótlásukban jelentős szerepet játszott Galamb Sándor, a református egyház főgondnoka.

Az 1927 októberében a református templom tornyába elhelyezett 2660 kg tömegű, ún. Horthy-harangon „a makói református egyház közhasználatára öntették” adományozói felsorolásban első helyen áll „dr. vitéz Galamb Sándor” neve, mellette szerepel a „Galamb József Amerika” felirat is [6].

Horthy István, a kormányzó idősebb fia 1928-ban szerezte meg gépészmérnöki oklevelét. Az angolul, németül, franciául kitűnően beszélő fiatalember készült az amerikai tanulmányútra.

Horthy kormányzó 1929. szeptember 29-én avatta föl a világháborús hősök emlékművét Makón. Itt magához hívatta a kormányzó Galamb Sándort, és megkérte, írjon testvérének, hogy István végzett, és mehet Amerikába. Közbenjárására Henry Ford saját kezűleg írt a kormányzó-nak, hogy jöhet a fia, szívesen fogadja Detroitban. A későbbi kormányzóhelyettes 1929 őszétől előbb egyszerű munkásként dolgozott, majd a traktorszerelési osztályra és végül a kísérleti tervezőosztályra került. Összesen 18 hónapot töltött a Fordnál.

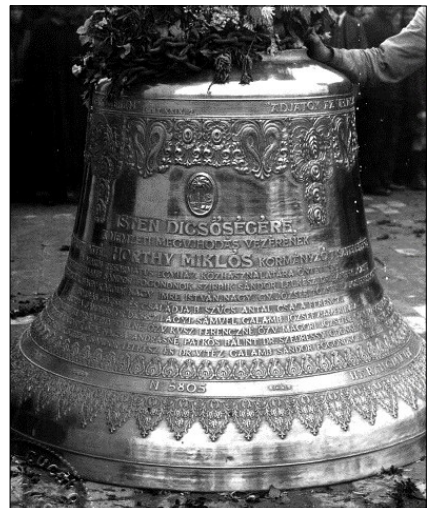
Galamb 1932-ben volt utoljára itthon. Ekkor is előadást tartott a Magyar Mérnök és Építész Egylet székházában, és ismételten filmet vetített a Ford gyártmányokról. Ez volt az utolsó magyarországi látogatása, 1944-ben egy szívrohamból felépülve kérte nyugdíjazását. 1955. december 4-én, 74 éves korában a világ egyik legnagyobb autógyártó konszernjének nyugdíjas főmérnöke elhunyt.



5. ábra. A makói Ford lerakat látképe az udvar felől



6. ábra. A szegedi Ford-karaván reklámja



7. ábra. A makói reformátusok adakozásaiból öntött Horthy-harang

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Galamb Józseffel folytatott angol nyelvű, hangszalagra felvett beszélgetés kézirata a Ford Archívumból. Riporter Owen Bombard, Pontchartrain, 1952. január 30.; február 6. Fordította Terplán Zénó egyetemi tanár
- [2] Liebfeld A.: *Henry Ford, az „isten”*. Kossuth Kiadó, Budapest, 1973.
- [3] Gáti J.: *Galamb József. Ford T-modell, a XX. század autója*. Magyar Örökség Díj nyolcvankettedik díj-átadó ünnepsége. Laudáció. Magyar Tudományos Akadémia, 2016. március 19.
- [4] Halmágyi P.: *Egy világra szóló karrier. Galamb József életútja*. Makói História, József Attila Múzeum Kulturális Lapja, Makó, 2006.
- [5] Gáti J., Horváth S., Legeza L.: *A XX. század autója. 100 éves a Ford T-modell*. Budapest Műszaki Főiskola, Budapest, 2008.
- [6] Harangzúgás, a Makói Református Egyház lapja, Makó, 1927. október 9.

FOTOVOLTAIKUS RENDSZEREK: SZABÁLYOZÁSI STRATÉGIÁK HÁLÓZATI CSATLAKOZÁSHOZ

PHOTOVOLTAIC SYSTEMS: CONTROL STRATEGIES FOR GRID CONNECTION

Kerekes Tamás

Aalborg University, Faculty of Engineering and Science, Department of Energy; Aalborg, Denmark,
tak@energy.aau.dk;

Abstract

Renewable energy is one of the best solutions for generating clean energy. Wind and solar installations have seen a huge increase in the last decades and will be the major power production technology in the future, phasing out classical power production such as coal and gas, which result in the increase of CO₂ and other greenhouse gases. This article gives an overview on how grid connected renewable energy systems, like a photovoltaics, can play an important role in the energy supply of the future. Also it shows that such renewable energy sources need to be combined with storage in order to be able to comply with grid codes and make the energy system of the future clean and secure.

Keywords: *renewable energy, grid-connected, current control.*

Összefoglalás

A megújuló energia az egyik legmegfelelőbb megoldás a tiszta energia előállítására. A szél- és napenergia-bevezetések hatalmas növekedést értek el az elmúlt évtizedekben, és a jövőben a fő energiatermelési technológiává válnak, megszüntetve a klasszikus energiatermelést, mint a szén és a gáz, amelyek a szén-dioxid és más üvegházhatású gázok kibocsátásának növekedését eredményezik. Ez a cikk áttekintést ad arról, hogy a hálózatra kapcsolt megújuló energiarendszerek, mint például a fotovoltaikus rendszerek, hogyan játszhatnak fontos szerepet a jövő energiaellátásában. Azt is mutatja, hogy az ilyen megújuló energiaforrásokat a tárolással kombinálni kell, hogy megfeleljenek a hálózati előírásoknak, és zöldre, valamint biztonságosak legyenek a jövő energiarendszerét.

Kulcsszavak: *megújuló energia, hálózatra kapcsolt, áramszabályozás.*

1. Bevezetés

A megújuló energia nagyon felkapott téma volt az elmúlt két évtizedben. A teljesítmény elektronikaalapú megújuló energiás rendszerekhez, főként a szél- és napenergia-alkalmazásokhoz kapcsolódnak, ahol a szélturbinás (WT) generátor vagy a fotovoltaikus (PV) erőmű teljesítményelektronikai konverterek segítségével csatlakozik az elektromos hálózathoz. Ezekre a konverterekre azért van szükség, mert a szélgenerátorból származó váltakozó áramot (AC) vagy a fotovoltaikus erőműből származó egyenáramot (DC) al-

landó frekvenciájú váltakozó áramú elektromos energiává kell alakítani ahhoz, hogy a hálózatba lehessen juttatni.

Az éves telepítéseket tekintve 2021-ben összesen 97,5 GW új szélerőművet telepítettek világszerte [1]. Ezt azonban felülműlják az új fotovoltaikus létesítmények, mivel 2021-ben mintegy 168 GW új napelemes erőművet telepítettek [2]. A szél és fotovoltaikus rendszerek globálisan telepített kumulatív kapacitását tekintve világszerte 2021 végén 837 GW szél és 940 GW photovoltikus volt.

A fotovoltaikus erőműveket nézve elképzelhető, hogy csak néhány napelemes panelt telepítenek a

háztetőkre. Ez igaz a lakó- és kereskedelmi épületekre telepített rendszerek esetében, ahol az ilyen rendszerek teljesítménye néhány kWp-tól körülbelül több száz kWp-ig terjed, az épület méretétől függően.

Ennek ellenére a napelemes létesítmények elértek a GWp-kapacitást, és a termelési csúcspont elérheti a hagyományos szélerőművek vagy akár az atomreaktorok termelését, feltéve, hogy az adott helyen napsütés áll rendelkezésre.

A legnagyobb fotovoltaikus erőművek az **1. táblázat**ban vannak felsorolva, ennek ellenére sok kisebb napelemes rendszer létezik akár több száz kWp teljesítménytartományban akár lakossági, akár kereskedelmi célú telepítésként. Ez azt jelenti, hogy manapság a villamosenergia-termelés hatalmas kapacitása nagyobb területen oszlik el („elosztott energiatermelés”), míg korábban a villamos energiát központi erőművekben állították elő, és hosszú távvezetékeken szállították a fogyasztókhoz, amelyek több száz km-re is kiterjedhettek.

1. táblázat. A világ legnagyobb fotovoltaikus erőművei

Neve	Ország	Kapacitás MW _{DC} vagy MW _{AC}	Terület km ²	Év
Bhadla Solar Park	India	2,700	160	2020
Longvangxia Dam Solar Park	Kína	2,400		2015
Huanghe Hydropower Hainan Solar Park	Kína	2,200	50	2020
Pavagada Solar Park	India	2,050	53	2019
Benban Solar Park	Egyipt	1,650	37	2019
Tengger Desert Solar Park	Kína	1,547	43	2016
Noor Abu Dhabi	Egyesült Arab Emírátságok	1,177	8	2019
Mohammed bin Rashid Al Maktoum Solar Park	Egyesült Arab Emírátságok	1,013		2020
Kurnool Ultra Mega Solar Park	India	1,000	24	2017
Datong Solar Power Top Runner Base	Kína	1,000		2016
NP Kunta	India	900		2020

A fotovoltaikus erőművek moduláris felépítésűek, és több ezer napelempanelből állnak, amelyek PV-sorokba vannak kapcsolva, majd ezeket a PV-sorokat párhuzamosan PV-tömbökbe kötik. Ezeket a PV-tömböket ezután egy PV-inverteren keresztül csatlakoztatják az elektromos hálózathoz. A legtöbb esetben az ilyen napelemes erőművek háromfázisú invertereket használnak, és egy MV/LV-transzformátor-állomáson keresztül csatlakoznak a középfeszültségű hálózathoz [3].

2. Hálózati szabályok és követelmények

A hálózatra csatlakoztatott rendszereknek meg kell felelniük a helyi elektromos hálózat tulajdonosa által meghatározott szabályoknak és követelményeknek. Ezek a követelmények meghatározzák a feszültségrendszer szimmetriáját, a feszültség amplitúdóját, a frekvencia eltérését, a hibákat és a harmonikusokat egy háromfázisú rendszerben annak érdekében, hogy a hálózatra csatlakoztatott egység ne zavarja a hálózatot, és ne legyen negatív hatással a hálózati feszültség minőségére.

Az IEEE által még 2003-ban kiadott IEEE 1547. szabvány az elosztott energiaforrások összekapcsolására és interoperabilitására tér ki, és ezen rendszerek villamos hálózatra való kapcsolására. A dokumentumban azt olvashatjuk, hogy a hálózatra csatlakoztatott átalakító [4]:

- nem szabályozhatja aktívan a feszültséget
- az elektromos hálózat rendellenes feszültsége vagy frekvenciája esetén nem maradhat a hálózatra csatlakozva.

Ezen szabály azért volt érvényben, mert abban az időben mindössze 2,8 GWp napelemes és 39 GW szélerőmű-létesítmény volt világszerte, ami a teljes energiatermelésnek csak nagyon kis hányadához járult hozzá.

Az energiatermelésben a megújuló energia arányának növekedésével a hálózati szabványok is fejlődtek. 2014-ben frissítették az IEEE 1547. szabványt, és megemlítették, hogy a hálózathoz csatlakoztatott konverter:

- aktívan szabályozhatja a feszültséget
- abnormális feszültségen vagy frekvencián csatlakozva maradhat
- frekvenciaválaszt biztosíthat

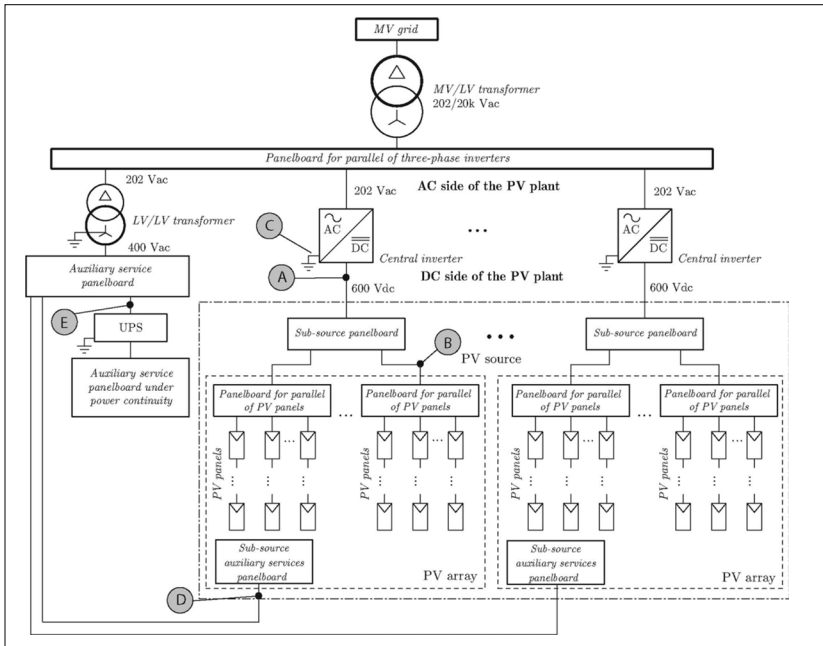
Ez azt jelenti, hogy a hálózatra kapcsolt rendszerek immár képesek az elektromos hálózatot kiegészítő szolgáltatásokkal támogatni, ezáltal erősebbé, jobbá és biztonságosabbá teszik az elektromos hálózatot.

A telepített megújulóenergia-rendszerek számának folyamatos növekedésével 2018-ban ismét frissült az IEEE 1547. hálózati kód követelmény, ahol megemlítik, hogy a hálózatra kapcsolt rendszernek a következőket kell teljesíteni:

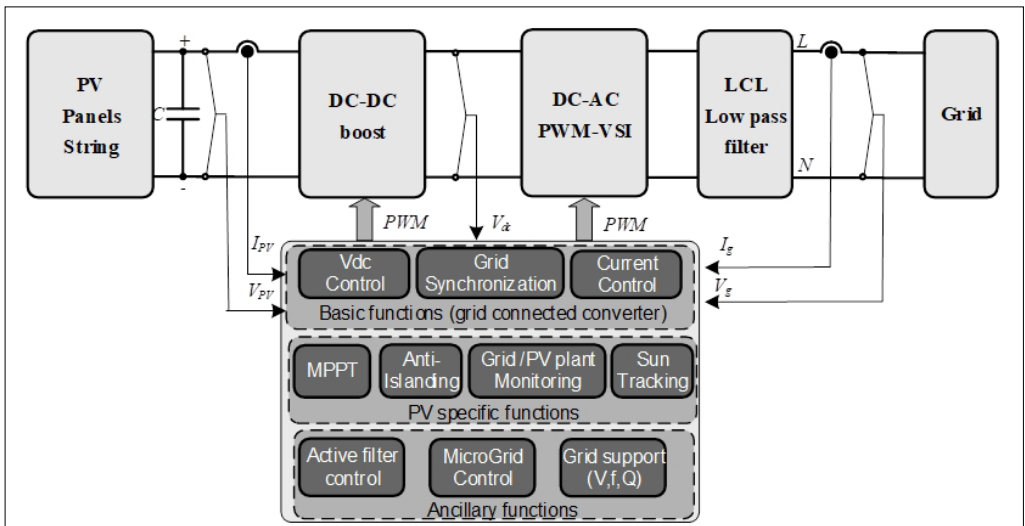
- képesnek kell lennie a feszültség aktív szabályozására
- kapcsolódva kell maradnia akkor is, ha az elektromos hálózat paraméterei abnormális

feszültség-/frekvenciaértékeket mutatnak

-képesnek kell lennie frekvenciaválásra
 Ezekkel a járulékos szolgáltatásokkal a hálózatra kapcsolt konverterek aktívan részt vesznek a hálózatban, nemcsak áramot szolgáltatva, hanem az aktuális hálózati paraméterek függvényében alakítják viselkedésüket, ugyanúgy, ahogy a hagyományos erőművek tennék.



1. ábra. Egy PV-erőmű egyvonalas diagramja



2. ábra. Vezérlőhurkok egy hálózatra csatlakoztatott áramirányító alkalmazásban

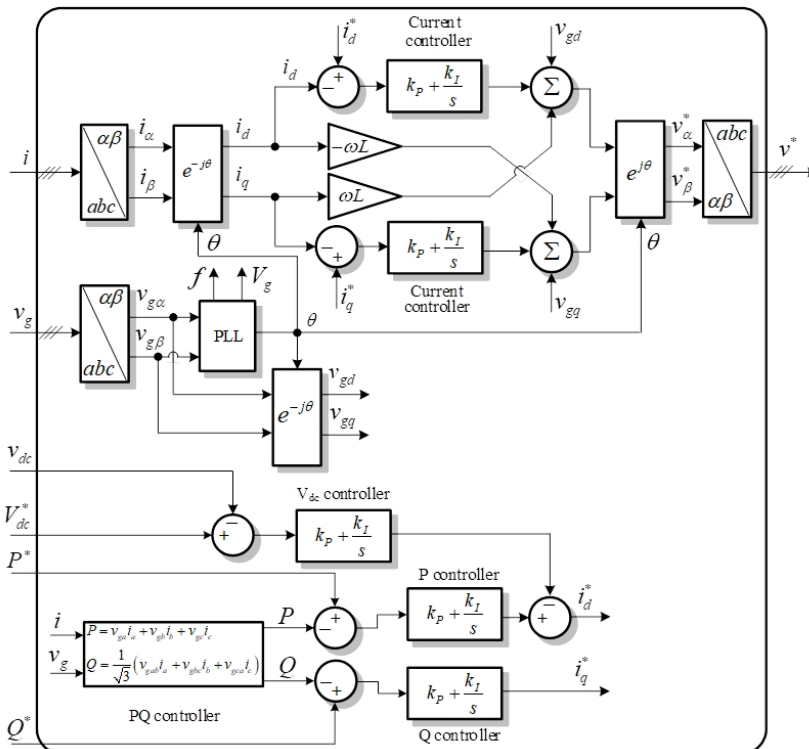
3. Hálózatra kapcsolt átalakítók vezérlése

A hálózatra kapcsolt konverterek többszintű irányítási algoritmussal rendelkeznek. A fő irányítási réteg az alacsony szintű vezérlés, és minden hálózatra csatlakoztatott konverternél ugyanaz. Ez általában egy egyenfeszültség-szabályozó hurokból, hálózatszinkronizálásból és egy áramszabályozó hurokból áll. Az ezekről a hurkokról szóló elmélet számos kiadványban és könyvben megtalálható, mint pl. [5], és ezen cikkben nem lesz róla részletesen szó. A hálózati áramszabályozás a szabványok által előírt teljes felharmónikus torzítás (THD)-határértékekre, a hálózati impedancia ingadozása és a hálózati feszültség zavarai esetén fennálló stabilitásra összpontosít. Az egyenáramú feszültség-szabályozás a hálózati feszültségváltozásokhoz és a hálózati feszültségzavarokhoz való alkalmazkodással foglalkozik. Végül a hálózatszinkronizálás célja a hálózathoz való szinkronizálás fáziszárt hurok (PLL) vagy frekvenciazárt hurok (FLL) segítségével, amely a hálózathoz való csatlakozáshoz vagy egy hálózati

esemény, például hálózati hiba utáni újracsatlakozáshoz szükséges.

Ezek az irányítási algoritmusok, amelyek az **3. ábrán** láthatók, mind szükségesek hálózatra csatlakoztatott alkalmazások esetében, így biztosítva a hálózati követelmények, például az IEEE 1547 betartását. Fotovoltaikus alkalmazások esetén léteznek speciális PV-funkciók, mint például:

- maximális teljesítménypont-követés (MPPT), (tipikus hatásfok > 99%), gyors követés a gyors besugárzási változások során (dinamikus MPPT-hatékonyság) és stabil működés nagyon alacsony besugárzási szinteken
- a (szigetüzemmód elkerülése, anti-islanding – AI) a hálózatról való leválasztáshoz meghatározott hálózati események esetén, ha ezt a hálózati kódok és szabványok megkövetelik
- hálózati felügyelet az egységnyi teljesítmény-tényező biztosításához, illetve a feszültség és frekvencia gyors méréséhez, a szabványok szerint
- üzemfelügyelet a napelemes panelsor diagnosztikájával vagy részleges árnyékolás érzékelésével.



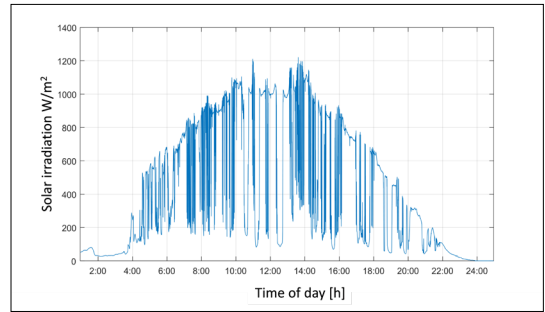
3. ábra. A hálózati áramok szabályozási struktúrája, hagyományos PI-szabályozóval, illetve fázis- és koordinátatranszformációkkal.

Az ilyen speciális PV-funkciók biztosítják, hogy a PV-tömb optimális körülmények között működjön, miközben betartják a specifikus szabványokban meghatározott hálózati kódokat és követelményeket.

A hálózatra csatlakoztatott konverterben a hálózati áram szabályozásához két hurokra van szükség. A **3. ábrán** látható a külső hurok (PQ-szabályozó), amely kiszámítja a szükséges áramreferenciákat (i_d^* és i_q^*) az aktív (P^*)- és reaktív (Q^*)-teljesítmény-referenciák alapján. A kiszámolt áram-referenciaértékek felhasználásával a **3. ábrán** látható belső hurok (áramszabályozó) kiszámítja a szükséges feszültségreferenciákat a kétfázisú szikron koordináta-rendszerben, majd ezeket a stacionárius háromfázisú koordináta-rendszerbe transzformálja. Ezt a háromfázisú referenciafeszültség-rendszert használja fel az impulzusszélesség-modulátor a háromfázisú konverter tranzisztorvezérlő jeleinek az előállítására, amelyek a háromfázisú teljesítmény elektronikai konvertertranzisztorait vezérlik, ahogy azt a **3. ábra** is mutatja.

Az áram és a teljesítmény szabályozása csak egyike azon feladatoknak, amelyeket a hálózatra csatlakoztatott rendszereknek el kell végezniük. A hálózati kódok azt is meghatározzák, hogy a betáplált teljesítmény milyen gyorsan változhat, amikor a rendszer a hálózathoz van csatlakozva. Ennek célja az áramingadozások korlátozása, amelyek negatívan befolyásolják a hálózat biztonságát. Figyelembe véve, hogy a napelemes rendszerekben nincs tehetetlenség, mint amit a nagy generátorokban a forgó tömeg adna, a kapott napfény intenzitásában bekövetkező bármilyen változás közvetlenül látható lesz az átalakító kimeneti teljesítményén, és ez nagyon meredek teljesítményingadozásokhoz vezet.

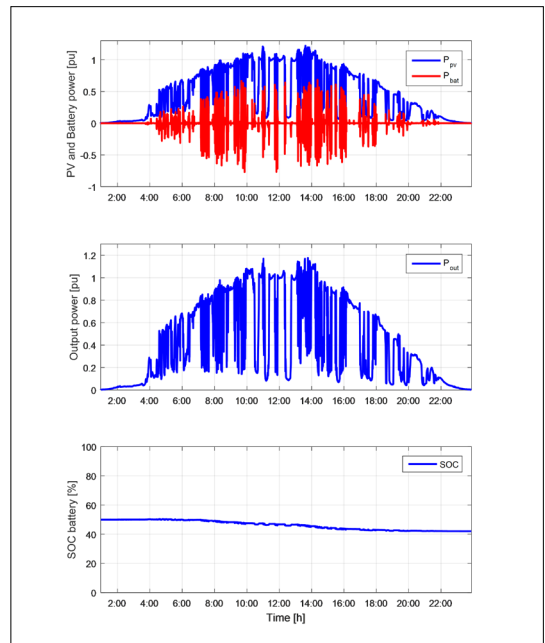
Egy ilyen forgatókönyvet szimuláltunk egy 5,7 kW-os PV-rendszerrel. Amint az **5. ábrán** látható, a napelemes rendszer kimenő teljesítménye a napfény mintáját követi, és feszültségingadozást okoz az elektromos hálózaton. Ez egy nemkívánatos mellékhatás, és a teljesítményváltozást korlátozni kell. Míg a növekedési sebesség korlátozható pusztán a konverter kimenő teljesítményének korlátozásával és leszorításával, addig a csökkenési sebességnem korlátozható, mivel ehhez a teljesítményelektronikai konverterben tárolt energia nem elegendő. Ez azt jelenti, hogy az ilyen forgatókönyvek során a PV-rendszer nem fogja teljesíteni a hálózati előírásokat és követelményeket.



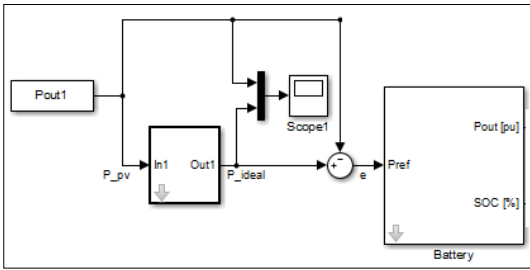
4. ábra. Napsugárzási profil egy napsütéses napon, átvonuló felhőkkel

Az ilyen teljesítményingadozások tárolással, akkumulátoros rendszer formájában korlátozhatók. Ebben a konkrét esetben, ha 10 kW-os és 2,5 kWh-s akkumulátorrendszert használunk, akkor az akkumulátorfelügyeleti rendszertől (BMS) függően az ingadozás olyan szintre korlátozható, amely a hálózati kódok által meghatározott határokon belül van. Egy ilyen rendszer modelljét a **6. ábra** mutatja, a hibrid rendszer kimenő teljesítményének eredményeit pedig a **7. ábra**.

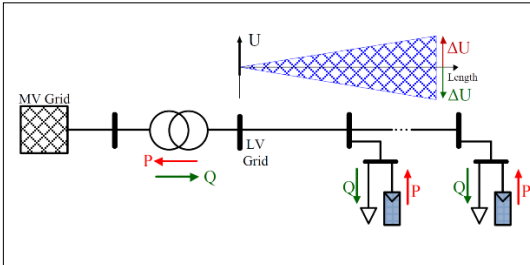
Az **5. ábra** és a **7. ábra** eredményeit összehasonlítva látható, hogy a P_{out} – kimeneti teljesítmény – ingadozásai csökkennek az energiatároló használatakor, mivel az akkumulátor szűri és kompenzálja a napelemből származó teljesítményin-



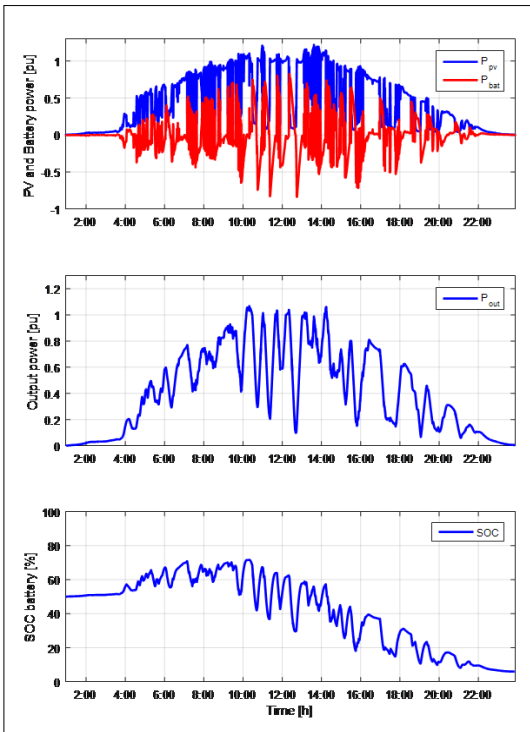
5. ábra. A fotovoltaikus rendszer P_{out} kimeneti teljesítményének változása egy napsütéses napon, felhőátvonulások esetén



6. ábra. PV-energiatermelés akkumulátoros energia-tárolással



7. ábra. Az alacsony feszültségű hálózat impedanciájának befolyása a hálózati feszültségre



8. ábra. Szimulációs eredmények, amelyek a PPV-PV-teljesítményt, a Pbat-akkumulátor teljesítményét, a rácsba injektált Pout-teljesítményt és az akkumulátor töltöttségi állapotát (SOC) mutatják

gadozásokat. Továbbá, ha figyelembe vesszük a kábelek impedanciáját, amelyek a PV-rendszer és az alacsony feszültségű (LV) elosztó transzformátor között található, akkor ezek a teljesítményingadozások feszültségingadozásokhoz is vezetnek, amelyeket szintén szabályoz a hálózati előírás. Ezeket a feszültségingadozásokat a megnövekedett aktív teljesítmény (P) okozza, és a meddőteljesítmény (Q) segítségével kompenzálhatók. Ez azt jelenti, hogy a PV-konvertert annak megfelelően kell méretezni, hogy a tranzisztorok névleges áramerőssége minden forgatókönyv esetén képes legyen az aktív és a meddő teljesítmény kombinált áramának elvezetésére.

4. Következtetés

A megújuló energia az egyik legjobb megoldás a tiszta energia előállítására. A szél- és napenergia-berendezések hatalmas növekedést értek el az elmúlt évtizedekben, és a jövőben a fő energiatermelési technológiává válnak, megszüntetve a klasszikus energiatermelést, mint a szén és a gáz, amelyek a CO₂ és más üvegházhatású gázok kibocsátásának növekedését eredményezik. A megújuló energia időszakossága azonban kihívást jelent. Ezért a különböző megújuló energiaforrásokat energiátárolási megoldásokkal kell kombinálni, hogy az energiatermelés a jövőben is sikeres legyen.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1]. Global Wind Energy Council: *Global Wind Report 2022*;
- [2]. *Global Market Outlook for Solar Power 2022–2026*; SolarPower Europe; ISBN NUMBER 9789464518610;
- [3]. Araneo R., Lammens S., Grossi M., Bertone S.: *EMC Issues in High-Power Grid-Connected Photovoltaic Plants*, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 51/3. (2009) 639–648.
- [4]. *IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces*; IEEE 1547;
- [5]. Teodorescu R., Liserre M., Rodríguez P.: *Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems*. John Wiley & Sons Ltd. 2010.
<https://doi.org/10.1002/9780470667057>

GONDOLATOK A MŰSZAKI KUTATÁSRÓL ÉS KÉPZÉSRŐL A GÉPÉSZETI DIAGNOSZTIKA KAPCSÁN

ON RESEARCH AND TRAINING IN MACHINERY DIAGNOSTICS IN ENGINEERING EDUCATION

Kocsis Imre,¹ Sipos Dóra²

¹ Debreceni Egyetem Műszaki Kar Műszaki Alaptárgyi Tanszék, Debrecen, Magyarország, kocsisi@eng.unideb.hu

² Debreceni Egyetem Műszaki Kar Műszaki Alaptárgyi Tanszék, Debrecen, Magyarország, dorasipos@eng.unideb.hu

Abstract

We have a decades-long tradition of examining the operation and maintenance issues of mechanical engineering systems at the Faculty of Engineering at the University of Debrecen. In the last decade, technical diagnostic research has come to the fore, especially bearing diagnostics, a lot of experience has been gathered in this field and many results have been achieved. With the development of the tools of technical diagnostics, the presentation of the topic at all levels of engineering education, and the establishment of industrial relations, an environment has been created in which it is possible to answer the current questions on the topic. Technical diagnostics, which is largely applied informatics (and mathematics) – together with several other engineering topics – also raises educational questions, which we intend to answer by transforming some elements of the training.

Keywords: *engineering education, technical diagnostics, teaching engineering mathematics.*

Összefoglalás

A Debreceni Egyetem Műszaki Karon több évtizedes hagyománya van a gépészeti rendszerek üzemeltetési és karbantartási kérdései vizsgálatának. Az utóbbi évtizedben előtérbe kerültek a műszaki diagnosztikai kutatások, különösen a csapágy-diagnosztika, ezen a téren sok tapasztalat gyűlt össze, és számos eredmény született. A műszaki diagnosztika eszközrendszerének fejlesztésével, a témakörnek a mérnökképzés minden szintjén való megjelenítésével, az ipari kapcsolatok kialakításával egy olyan környezet alakult ki, melyben lehetőség kínálkozik a témakör aktuális kérdéseinek megválaszolására. A műszaki diagnosztika, amely jórészt alkalmazott informatika (és matematika) – több más mérnöki témakörrel együtt –, felvet oktatási kérdéseket is, melyekre szintén választ kívánunk adni a képzés egyes elemeinek átalakításával.

Kulcsszavak: *mérnökképzés, műszaki diagnosztika, mérnöki matematika oktatása.*

1. Bevezetés

A Debreceni Egyetem Műszaki Karon több évtizedes hagyománya van a gépészeti rendszerek üzemeltetési és karbantartási kérdései vizsgálatának. Az utóbbi évtizedben előtérbe kerültek a műszaki diagnosztikai kutatások, különösen a csapágy-diagnosztika, ezen a téren sok tapasztalat gyűlt össze és számos eredmény született. A

műszaki diagnosztika eszközrendszerének fejlesztésével, a témakörnek a mérnökképzés minden szintjén való megjelenítésével, az ipari kapcsolatok kialakításával egy olyan környezet alakult ki, melyben lehetőség kínálkozik a témakör aktuális kérdéseinek megválaszolására, beleértve a műszaki diagnosztikai eszközök integrációját digitalizált gyártó- és üzemeltetőrendszerekbe,

előtérbe helyezve az okoseszközök használatát, a gép-gép kommunikációt, a klasszikus állapotfelügyeletet felváltó folyamatfelügyeletet és a valós idejű, diagnosztikai alapú alkalmazásokat. A műszaki diagnosztika, amely jórészt alkalmazott informatika (és matematika) – több más mérnöki témakörrel együtt –, felvet oktatási kérdéseket is, melyekre szintén választ kívánunk adni a képzés egyes elemeinek átalakításával.

2. A műszaki diagnosztika szerepe és eszközrendszere

2.1. A műszaki diagnosztika szerepe

A karbantartás színvonala a termelékenységgel és a jövedelmezőséggel egyik meghatározó eleme az ipari termelő vállalatok működésében. A műszaki diagnosztika legújabb eszközeinek alkalmazása jelentős versenyelőnyt képes biztosítani azáltal, hogy hatékonyan támogatja a prediktív karbantartást, ami a rendelkezésre állás és a gépállapot magas szintjében és a váratlan leállások alacsony számában nyilvánul meg.

A műszaki diagnosztika lehetőségeit mindig a mérés-technikai eszközök (elektronika, a számítástechnika: adatátviteli és adattárolási kapacitás, jelfeldolgozó algoritmusok) aktuális fejlettsége határozta meg, az eszközrendszer együtt fejlődött az informatikával. A jövedelmezőségben betöltött szerepe miatt mindig a műszaki diagnosztika volt az egyik olyan terület, mely leghamarabb alkalmazta az új informatikai megoldásokat, ehhez az ipari finanszírozás folyamatosan biztosítva volt (és lesz a jövőben is).

Az ipari termelés nagyfokú automatizálása, a nagy teljesítményű gépek alkalmazása, a magas szintű termelékenységi elvárások tovább növelik a megbízhatóságot növelő műszaki megoldások jelentőségét.

A diagnosztikai eszközök és adatok a digitalizált gyártórendszerek, az okosgyárak integrált részévé válnak, sőt az állapotfelügyelet és a karbantartást támogató informatikai rendszerek terén szerzett tapasztalatok az egyik alapját képezik az ilyen irányú fejlesztéseknek.

2.2. A rezgésdiagnosztika szintjei

A rezgésmérésen alapuló állapotfelügyelet a legszélesebb körben és a leghatékonyabban alkalmazott diagnosztikai módszer.

A cél, az alkalmazott eszközök „finomsága” és a szolgáltatott információ értéke alapján három alapvetően különböző szintet azonosíthatunk.

A legegyszerűbb vizsgálat a „rezgésszint” megállapítása átlagértékekre (leginkább a rezgésebség négyzetes közepére, RMS) vagy csúcsertékekre (például a peak vagy a peak-to-peak-értékekre) alapozva. Ezen a szinten a gépek általános állapotának súlyossága ítélnélhető meg, a meghibásodás nem azonosítható be. Ha a rezgés meghalad egy szintet, akkor le kell állítani a gépet, és meg kell vizsgálni a megnövekedett rezgésszint okát. Például az ISO 2372 és az ISO 10816 szabványok általános rezgésebség-szinteket definiálnak a különböző géposztályokra, melyek túllépése figyelmeztetés az üzemeltetőnek. Ezek az értékek függetlenek az adott gép üzemeltetési körülményeitől és az életkorától, így csak tájékoztatóként szolgálnak. Olyan gépek esetén, ahol a nagy energiájú rezgések „csupán” az élettartam csökkenését eredményezik, de rövid távon nem befolyásolják a működést (például alárendelt szerepű villamos motorok, szivattyúk), a rezgések súlyosságának (vagy még inkább a súlyosbodásának) érzékelése elegendő lehet a szükséges döntések meghozatalához.

A rezgésmérésen alapuló állapotfelügyelet mára általánosan elterjedt eszközei a meghibásodások szimptomáinak detektálásán alapulnak. Ezek alkalmazása jelenti a második szintet, ahol a cél a tipikus meghibásodások minél korábbi és minél pontosabb azonosítása. Itt kulcsfontosságú a megfelelő időben való észlelés, ami azt jelenti, hogy a hiba detektálása és a leálláshoz vezető súlyosbodása közti időszakban legyen lehetőség a helyreállító beavatkozásra. Ez az időtartam lehet néhány nap, de akár fél év is. Egy nagy teljesítményű automata gép esetén azonban néhány percre is lemehet a kritikus időtartam, és szükség lehet diagnosztikai mérésen alapuló valós idejű beavatkozásokra a nem megfelelő gyártási folyamat leállításához vagy a nem megfelelő működés javításához.

A legtöbb mechanikai és számos elektromos meghibásodás szimptomái a frekvenciaspektrumban megjelenő mintázatok (vonalrendszerek), de az időjeltől számított egyes statisztikai jellemzők is hatékonyak lehetnek bizonyos problémák detektálásában. Különösen fontos terület a lökésimpulzus-módszer alkalmazása a csapágy-diagnosztikában és a fogaskerekek diagnosztizálásában.

A korszerű állapotfelügyeleti rendszerek – a szimptomák alapján – képesek a hibák széles körének azonosítására és a súlyosság megállapítására. Ezek az információk teszik lehetővé a karbantartási tevékenységek optimalizálását.

A harmadik szintet a speciális módszerekkel történő egyedi vizsgálatok képviselik. Az elérhető rendszerek és jelfeldolgozási algoritmusok a meghibásodások egy meghatározott körére adnak detektálási módszert. Egyéb esetben a mérőrendszerben a feldolgozási algoritmusokban is új megoldások szükségesek. Például csak a csapágy-diagnosztikában százsámra jelentek meg speciális diagnosztikai módszerek, köztük növekvő számban olyanok, melyek transzformációk, szűrési módszerek egyedi kombinációit és a gépi tanulás eszközeit alkalmazzák.

A [1] doktori disszertáció például kúpörgős csapágyak gyártása során fellépő köszörülési hibák detektálására és a hibák méretének becslésére ad módszert, ami hatékony zajos környezetben is. Ebben a speciális waveletek tervezése és alkalmazása, valamint a sokskalás felbontás (MRA) az alapvető eszköz, de gyártási hibák osztályozására a tartóvektor-gépek és a mesterséges neurális hálózatok is alkalmazásra kerültek.

2.3. A műszaki diagnosztika eszközrendszerének fejlődése

A műszaki diagnosztika eszközrendszere az 1950-es évek óta az érzékszervi diagnosztika szintjéről a – digitalizált gyártásban megvalósuló, gép-gép kommunikáció alapú – automatizált vizsgálat és döntéshozatal szintjére fejlődött.

A termelékenységi követelmények és a gépek precizitásának alacsony szintje mellett a meghibásodásig való üzemeltetés elfogadott volt. Ezt váltotta a tervszerű megelőző (preventív) karbantartás, mely nagy statisztikai minta alapján meghatározott élettartam-jellemzőkön, például a meghibásodásiráta-diagramokon („kádgörbék”) alapult. A statisztikai alapú megközelítés hatékonyságának nyilvánvaló korlátja volt, hogy az egyedi üzemeltetési körülményeket nem tudta figyelembe venni, nagy volt a túl korai vagy a túl késői beavatkozás esélye.

Az ipar számára elérhető számítástechnikai eszközök megjelenésekor volt lehetőség az állapotfüggő, prediktív karbantartás megvalósítására, az üzem közbeni állapotfelmérés eszközeinek fejlesztésére.

A műszaki diagnosztika fejlesztése töretlen volt az 1970-es évek óta, ma széles körben elterjedtek az online rendszerek, a vezeték nélküli szenzorok, a távdiagnosztika, folyamatos adatszolgáltatás, diagnosztikai alapú folyamatfelügyelet, az IoT-diagnosztikai eszközök a digitalizált gyártórendszerek integrált elemeiként vannak jelen az okosgyárakban.

A 1980-as évekig elsősorban a műszaki fejlesztés jelentette a karbantartás fejlődését, később azonban egyre nagyobb szerepe lett olyan szervezési módszereknek, mint a megbízhatóság-alapú karbantartás, a kockázatalapú karbantartás vagy a TPM, valamint a számítógéppel támogatott karbantartás-menedzsment rendszereknek.

Ma az ipar 4.0 és a digitalizálás világában újra a műszaki fejlesztés a fejlődés alapja, de ezek elsősorban informatikai fejlesztések, szemben a korai gépészeti és villamos alapú fejlesztésekkel.

3. A műszaki diagnosztika oktatása

3.1. A matematika szerepének változása a mérnökképzésben

A modern mérnöki tudományok igényei, főleg a gépi tanulási eszközök széles körű alkalmazásának igénye új helyzetbe hozza a matematikát és annak oktatását.

A technológia gyors változását követni próbáló műszaki képzésekben egyre több olyan témakör jelenik meg már a mérnöki alapképzésekben is, ahol nagymértékben építenek bizonyos magasabb szintű absztrakt matematikai ismeretekre. Ilyen témakörök vannak például a műszaki diagnosztika és az irányítástelelmélet tárgyakban.

Közben a mérnökhallgatók jelentős része küzd az alapvető számolási módszerek elsajátításával is. Ezt az ellentmondást úgy lehet feloldani, hogy a matematikaoktatásban másképpen fogalmazzuk meg a célokat, és új szemléletet, módszertani eszközöket alkalmazunk. Be kell látni, hogy míg a klasszikus mérnökmatematika-oktatás gerincét képező elmélet jelentős részével nem találkozik egy mérnök a pályája során, addig az alkalmazott matematika egyes módszereit készségszinten tudnia kellene. [2]

Mérnöki tudományok professzorai szorgalmazták a mérnöki matematika oktatásának átalakítását. Tóth László, a Debreceni Egyetem egykori mechanikaprofesszora több előadásában hangsúlyozta, hogy „a mérnökhallgatók kezébe eszközként kell adni a matematikát”. Ma rendelkezésre állnak nagy tudású matematikai szoftverek, így a gyakorlatban problémák tömege oldható meg, ha tudjuk kezelni az eszközöket. Megfelelő eszköz nélkül sokáig a matematika csak elegáns háttérként volt jelen a mérnöki munkában, a számítások gyakorlatilag kivitelezhetetlenek voltak a napi munka során, jellemzően mérnöki becslésen, a szakterületen kialakult gyakorlaton, tapasztalatokon alapuló döntések születtek.

A szoftverekbe épített numerikus (és néha szimbolikus, analitikus) módszerek ma lehetővé teszik a „pontos” számolásokat, aminek nagy gazdasági haszna van. Itt ki kell térni a „pontosság” tartalmára. A szimbolikus (analitikus) számolások ugyan valóban pontos választ adnak azokra a matematikai problémákra, melyek megoldhatók, de megoldható problémához a valós rendszerek vizsgálatakor sok esetben csak jelentős elhanyagolásokkal, egyszerűsített modellek megalkotásával jutunk. Így a megoldás hiába pontos valamilyen értelemben, az eredeti műszaki problémának csak közelítő megoldása, és gyakran nem is ellenőrizhető, hogy mekkora az eltérés a pontos megoldástól. A numerikus módszerek deklaráltan csak közelítő megoldást adnak, de a „hiba” általában tetszőlegesen csökkenthető részletesebb modell alkalmazásával, ami persze általában a számolási idő drasztikus növekedését eredményezi.

A mérnöki matematika oktatásának szembeülnie kell azzal, hogy „a jövőben sokkal több mérnöknek kell tudni olyan matematikát, amit mélységében kevesen értenek meg”, ahogyan ezt Korondi Péter, a Debreceni Egyetem mechatronikaprofesszora több előadásában hangsúlyozta. Nem várható el a tömegektől az absztrakt matematika megértése, de az elengedhetetlen, hogy a matematika eszközként rendelkezésre álljon a mérnökök számára, legalábbis azoknak, akik fejlesztő munkát végeznek. És mivel az okos eszközök korát éljük, ahol a beépített tudás adja a termék használati értékét, egyre többen válnak valamilyen szinten fejlesztővé.

3.2. Hatékony matematikaoktatás a mérnökképzésben

A megközelítésünk lényeges elemei:

- a kívánt kompetenciák megfogalmazása;
- a matematika-tananyag kompetenciaalapú strukturálása;
- a hatékonyság definiálása, mérése [3];
- tantárgyakon átívelő projektek megfogalmazása és (elsősorban) házi feladatként való kiadása;
- a kurzushoz szükséges matematikai ismeretek összefoglalása a műszaki tárgyak keretében, a matematika projektalapú tanulása;
- a matematika tanulását, újratanulását támogató matematikai „munkafüzetek” készítése az önálló tanulás segítésére.

Kompetenciaként fogalmazható meg például a diszkrét idejű rendszermodellekben való számolások megértése.

A tananyag kompetenciaalapú strukturálása ekkor a deriválás és a numerikus deriválás párhuzamos tárgyalását jelenti.

Az oktatás hatékonyságát pedig azzal mérjük, hogy a műszaki problémák megoldásakor képesek-e a hallgatók felismerni és elvégezni a szükséges számolásokat.

Tantárgyakon átívelő házi feladatok segítik a hallgatókat a matematikai és a műszaki fogalmak összefüggéseinek felismerésében, és a tanult módszerek alkalmazásában.

A matematikai szoftverek (elsősorban a Matlab) mindennapi eszközként (számológépként és mérnöki fejlesztő környezetként) való érték használatát el kell kezdeni a képzés elején a matematikai tárgyak keretében.

3.3. Projektalapú matematikatanulás a műszaki diagnosztika tárgy keretében

A speciális szakmai tárgyak tanulásakor sokszor már jó eséllyel megkoppnak a hallgatók matematikai ismeretei, másrészt a matematikai eszközök tanulásakor nem is kerülnek elő az alkalmazások speciális igényei. Mindamelllett, hogy a matematika oktatásakor törekedni kell az alkalmazások széles körének szakszerű bemutatására, ez minden egyes alkalmazásra nem terjedhet ki, egyrészt a rendelkezésre álló korlátozott idő miatt, másrészt azért, mert egyes alkalmazások csak a hallgatók kis csoportját érintik a specializáció alapján.

A vizsgált képzésben a matematika tanulása és a diagnosztikában való alkalmazása közt legalább két év telik el. Így nem csak az a kérdés vetődik fel, hogy mit kell újonnan megtanulni a diagnosztika tárgy keretében, hanem az is, hogy mit kell újratanulni.

A diagnosztika tárgy fő részét képező rezgésdiagnosztika (1. ábra) elméleti része jelfeldolgozási (alkalmazott matematikai) ismereteket tartalmaz.



1. ábra. Laboratóriumi mérés: tesztpad és mérőrendszer

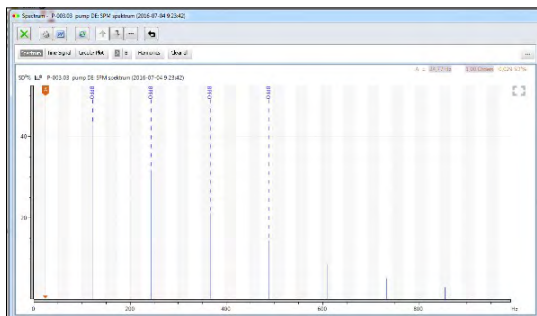
Így a kapcsolódó matematika tanulását, újratanulását kézenfekvő szakmai projekt-feladathoz kapcsolni. Ezzel egyrészt meg tudjuk világítani a korábban tanult ismeretek hasznát, másrészt motiválni tudjuk a hallgatókat az újabb ismeretek megszerzéséért.

A fő rezgésdiagnosztikai témakörök:

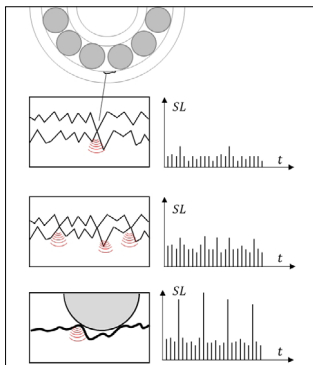
- harmonikus rezgések (amplitúdó, periódus, frekvencia, fázis);
- elmozdulás, sebesség, gyorsulás, szuperpozíció;
- szimptómák az „időtartományban”;
- szimptómák a „frekvenciatartományban” **2. ábra**);
- együttes vizsgálat idő- és frekvenciatartományban, lökésimpulzus-módszer **(3. ábra)**;
- jelkondicionálás.

A szorosan kapcsolódó matematikai témakörök:

- szinusz- és koszinuszfüggvények (értékkészlet, periódus, előjel, zérushelyek);
- alapvető függvénytranszformációk;
- deriválás, integrálás;
- alapvető statisztikai jellemzők;
- Fourier-elmélet;
- wavelet transzformáció, sokskálás felbontás;
- szűrők.



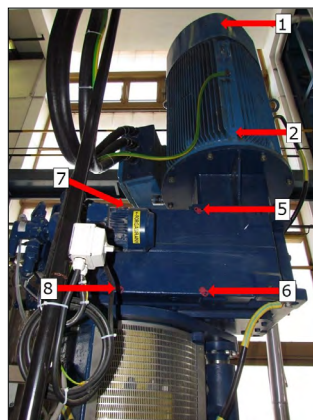
2. ábra. Szimptóma a spektrumban [4]



3. ábra. Csapágyvizsgálat lökésimpulzus-módszerrel [4]

Egy tipikus projekt, mely alkalmas a matematikatanulás keretének megteremtésére: hajtás (elektromos motor, hajtómű) állapotfelmérése **(4. ábra)**. Lépések:

1. Tervezés
 - mérési pontok azonosítása;
 - mérési technikák kiválasztása az egyes mérési pontokhoz;
 - a mérési technikák alkalmazásához szükséges adatok megadása;
 - a kívánt értékelési módok megadása, a szükséges mérési paraméterek beállítása.
2. Mérés
3. A vizsgált gépelemek állapotának értékelése



4. ábra. Üzemi mérés: csapágyak vizsgálata hajtás-láncban

General	
Name	1000 Hz, 1600 lines
Short time memory	Full spectrum
Long time memory	Full spectrum
SPM spectrum type	Shock level (SL)
Settings	
Order tracking	No
Upper frequency, Hz	1000
Window	Hanning
Lines in spectrum	1800
Advanced settings	
FFT type	Linear
Averaging type	
Zoom center	
Zoom factor	

5. ábra. Spektrum paramétereinek beállítása [4]

1. táblázat. Kapcsolódó diagnosztikai és matematikai eszközök a projektben:

Diagnosztika	Matematika
ferdeség, csúcosság (kurtózis), csipkesség (crest factor = peak/RMS)	leíró statisztika, sűrűséghisztogram
frekvenciaspektrum, frekvenciatartomány, vonalak száma, ablakolás	Fourier-sor, Fourier-együtthatók, Fourier-transzformáció, Diszkrét Fourier-transzformáció, FFT, ablakfüggvények
lökésimpulzus-módszer, csapágy-diagnosztika, fogaskerék-diagnosztika, villamosmotor-meghibásodások	együttes idő- és frekvenciavizsgálati módszerek, wavelet transzformáció, sokskalás felbontás, scalogram

4. Következtetések

A műszaki tudományok folyamatosan gyorsuló fejlődése nagy kihívás elé állítja a változásokkal lépést tartani kívánókat.

Pár évtized alatt teljesen megváltoztak az ismeretszerzés hatékony formái, a hagyományos műszaki képzés életképessége, melyben oktatás-módszertani kérdések szinte fel sem vetődtek, egyre gyengébb. Ezt igazolja a fiatalok általános véleménye, hogy „internetről” sokkal eredményesebben lehet tanulni. Ha megvizsgáljuk a professzionális képzések népszerűségének okát, akkor hamar rájövünk, hogy az átgondolt módszertan az alapvető különbség (feltéve persze, hogy szakmailag mindkét forrás korrekt).

Az intézményesített oktatásban is lépést kell tartani a módszertani eszközök fejlődésével, és szem előtt kell tartani a hatékonyságot, vagyis azt, hogy rögzüljenek az ismeretek, melyek a mérnöki munka során szükségesek. Semmi sem jellemzi jobban egy témakör oktatásának hatékonyságát, mint az alkalmazás képessége más szaktárgyakban vagy a gyakorlati mérnöki munkában.

A matematika szerepe még nagyobbát változott az oktatásban, mivel a technikai eszközök valóban használhatóvá, sőt elengedhetetlenné teszik a matematikát, legalábbis annak bizonyos részeit. Tehát egyre kevésbé lesz „letudni való” tárgy, a matematika tanulásának be kell épülnie a szakmai tárgyakba a témakörök összehangolása, közös projektek, házi feladatok és speciális (alkalmazáscentrikus) matematikai tananyagok által.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Deák K.: *Development of Bearing Fault Diagnostics Methodology Based on Signal Processing and Machine Learning Tools*. PhD Thesis. Debreceni Egyetem Informatikai Tudományok Doktori Iskola, Debrecen, 2020.
- [2] Sipos D.: *A numerikus számítások szerepe a műszaki modellekben*. International Journal of Engineering and Management Sciences, Debrecen, 3/5. (2018) 76–83. <https://doi.org/10.21791/IJEMS.2018.5.9>.
- [3] Sipos D.: *A matematikaoktatás hatékonyságának vizsgálata*. In: Proceedings of the Conference on Problem-based Learning in Engineering Education, Debrecen, Magyarország, University of Debrecen, Faculty of Engineering, 2021. 47–52.
- [4] *Leonova Infinity User Guide*. 71792 B. SPM Instrument AB, Sweden, 2006.

PID-SZABÁLYOZÓVAL ELLÁTOTT ROBOHTAJTÁS SZIMULÁCIÓJA BOND-GRÁF-MODELL ALAPJÁN

THE SIMULATION OF A PID CONTROLLED ROBOTIC DRIVE BASED ON BOND GRAPH MODELLING

Korsoveczki Gyula,¹ Pál Patrik,² Husi Géza³

Debreceni Egyetem, Műszaki Kar, Mechatronikai Tanszék. Debrecen, Magyarország.

¹ korsoveczki.gyula@gmail.com

² palpatrik5@gmail.com

³ husigeza@eng.unideb.hu

Abstract

During the study, the simulation of a robotic drive was realised using the 20-sim simulation software. The assumed robotic drive consists of an ideal permanent magnetic DC motor, a gear pair to realise the speed reduction, a torque transfer torsion shaft and a differential gear pair to change the direction and inertia. The drive is controlled by a speed control loop using a PID controller. In line with the purpose and result of the study, the simulation proved the effectiveness of Bond Graph-based modelling.

Keywords: *mechatronika, robotic drive, Bond Graph, block diagram, PID, 20-sim.*

Összefoglalás

A tanulmány során egy robothajtáslánc szimulációja valósult meg a 20-sim szimulációs szoftver alkalmazásával. Az említett hajtáslánc egy ideális állandó mágneses egyenáramú motorból, egy sebességsökkentő fogaskerékpárból, egy nyomatékátvitelt megvalósító torziós tengelyből és egy differenciál-fogaskerék párból áll, amely a mozgás hatásláncának irányát változtatja. A hajtáslánc rendelkezik egy PID-szabályozóval ellátott fordulatszám-szabályozó hurokkal. A tanulmány eredményeként és céljaként alkalmazásra és bizonyításra került a Bond-gráf-alapú modellezés hatékonysága.

Kulcsszavak: *mechatronika, robotikai hajtáslánc, Bond-gráf, blokkdiagram, PID, 20-sim.*

1. Bevezetés

A mai mérnöki tudományok egyre összetettebb szintre jutnak el. Ahogy a rendelkezésre álló technológia fejlődik, úgy nő a mérnöki rendszerek komplexitása is. Célzott folyamatról beszélünk, hiszen ennek eredményeként gyakorta a rendszerek több és több feladatot képesek ellátni. Ezzel együtt jár azonban, hogy a rendszerek megvalósítása részletesebb tervezési vagy modellezési folyamatot igényel. Olyan modellezési nyelvet szükséges találni, amely nem erőforrás-igényes, és a modell válasza a valós fizikai rendszer válaszával megegyező.

2. A Bond-gráf-alapú modellezés

2.1. A Multi-Domain-rendszerek modellezése

Minden rendszer rendelkezik a saját leírónyelvezetével. Azokat a rendszereket, amelyek csak egy fizikai tartományban működnek, Single Domain-rendszereknek nevezzük. A modern tervezés azonban az összetett rendszerekre összpontosít. Az alrendszerek között fizikai vagy információs kapcsolat van, és a változók hatása átadódik. Ezeket a rendszereket Multi-Domain-rendszereknek nevezzük. A mechatronikai rendszerek jellemzően Multi-Domain rendszerek [1]. Ezek esetében

a legnagyobb kihívást a működésük modellezése jelenti. A dinamikus modell létrehozásához kapcsolatok létrehozásának szükségese. Ez azonban nehéz eltérő leírnyelvezetek esetén. A kulcs egy olyan fizikai változó, amely minden rendszerben jelen van. Ez a fizikai változó az energia [1].

2.2. A Bond-gráf-modellezés alapjai

A Bond-gráf egy speciális vizuális és matematikai leírnyelvezet, amely energiaalapú. Hatékony modellezési módszer Multi-Domain-rendszereknél, mivel az energia olyan fizikai változó, amely minden Single Domain-rendszerben jelen van. A módszert Henry Paynter dolgozta ki 1959-ben, mely szerint a kétirányú energiaáramlás a jelölésrendszer különböző elemein keresztül követhető nyomon. Ennek eredményeként lehetőség nyílik rendszeregyenletek, valamint a köztük lévő kapcsolatok definiálására [1, 2].

2.3. A Bond-gráf leírnyelvezete

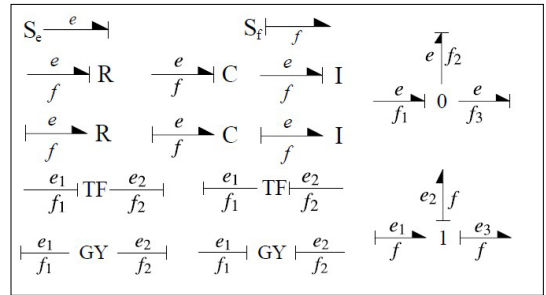
A Bond-gráf alapja 2 teljesítményváltozó. Ezek szorzata adja az átadott teljesítményt, amely [1-3]:

$$P(t) = e(t) \cdot f(t) \quad (1)$$

Ezek szerepe meghatározott, és nem felcserélhető. A nyelv a Bondokon alapul, amelyek az elemek közötti fizikai vagy információs kapcsolatot reprezentálják. Az elemek lehetnek: [3-5]:

- passzív egykapus elemek (R, C, I)
- aktív egykapus elemek (Se, Sf)
- két-/háromkapus csomópontok ($TF, GY, 0, 1$)

A passzív elemek energia tárolására vagy disszipálására szolgálnak. Új energiát nem állítanak elő, csak a meglévőt használják fel. Lehetnek R elemek (pl. csillapítás, csapágyazás, elektromos ellenállás), C elemek (pl.: rugó, a tengely, a kondenzátor) és az I elemek (pl.: tömeg, a tehetetlenség, az áramköri tekerecs). Az egykapus aktív elemek új teljesítményváltozót adhatnak a rendszerhez. Ez effort (Source of effort), vagy flow (Source of flow). Az alapvető kétkapus csomópontok közül a transzformátor (TF) az energiát egyik formából a másikba alakítja át, miközben szigorúan megtartja a teljesítményváltozók szerepét a girátorral (GY) szemben. A csomópontok másik nagy csoportja a három-/többkapus csomópontok, melyek közül a 0-s csomópontban az effort értéke állandó, míg az 1-es csomópontban a flow értéke konstans. Mindkét esetben a másik teljesítményváltozó előjeles összege zérus. A Bond-gráf alapú rendszermodellezés legfontosabb aspektusa a kauzalitás vagyis ok-okozati összefüggés.



1. ábra. Az alapvető Bond-gráf-elemek [4]

A kauzalitás megmutatja az effort és flow áramlási irányát a Bondok mentén, meghatározásukhoz pedig a vonatkozó szabályok ismerete szükséges [6-8]. Az alapvető Bond-gráf-elemeket az 1. ábra szemlélteti.

3. Ipari robotok hajtáslánca

Az ipari robotok mozgó mechanizmusok, amelyek csuklókból és szegmensekből állnak, valamint legalább 3 szabadságfokkal rendelkeznek. Mozgásuk precíz kényszermozgás, ismétlési pontosságuk századmilliméteres. A szegmenseket a hajtólánc mozgatja, a következő egységekkel [9]:

- tápegység
- meghajtóegység
- mozgásátalakító egység
- irányítóegység.

Az ipari robotok rendelkezhetnek pneumatikus, hidraulikus vagy elektromos hajtáslánccal. A pneumatikus hajtások sűrített levegőt használnak. Tiszta, robbanásbiztos, és kedvező teljesítmény/tömeg arányú, és kis beépítési hellyel rendelkezik, viszont rossz a jelátviteli képessége, és magas a zajszintje. A hidraulikus hajtások speciális folyadékot használnak nagyobb erőkkel. Előnye a kedvező teljesítmény/tömeg arány és az olaj jó jelátvivő képessége. Hátránya a robbanás- és tűzveszély, a zajproblémák, az olajszenyezés és az erős hőmérsékletfüggés. A leggyakrabban használt megoldások az elektromos hajtások. Fontos az alacsony motortömeg, mivel a kinematikai lánc részét képezik. Fontos még a nagy nyomaték, mivel az ipari robotokat ugyanazzal a dinamikával kell mozgatni a teljes terhelési tartományban. A motornak széles fordulatszám-tartományt kell produkálnia. A kimeneten jellemzően nincs állítható áttétel, így a fordulatszám változtatása széles mozgástartományt biztosít. Léptetőmotorok, DC- vagy AC-szervomotorok használata. A cél a kis sebességű robotkarok mozgatása kis tömegű, de nagy sebességű, nagy nyomatékú

motorokkal. A hajtások feladata a fordulatszám és nyomaték illesztése és a mozgásformák átalakítása. Fogaskerekek, bolygóművek és hullámhajtóművek használatosak. Utóbbival akár (1/200) sebességátvitel is elérhető [9–11].

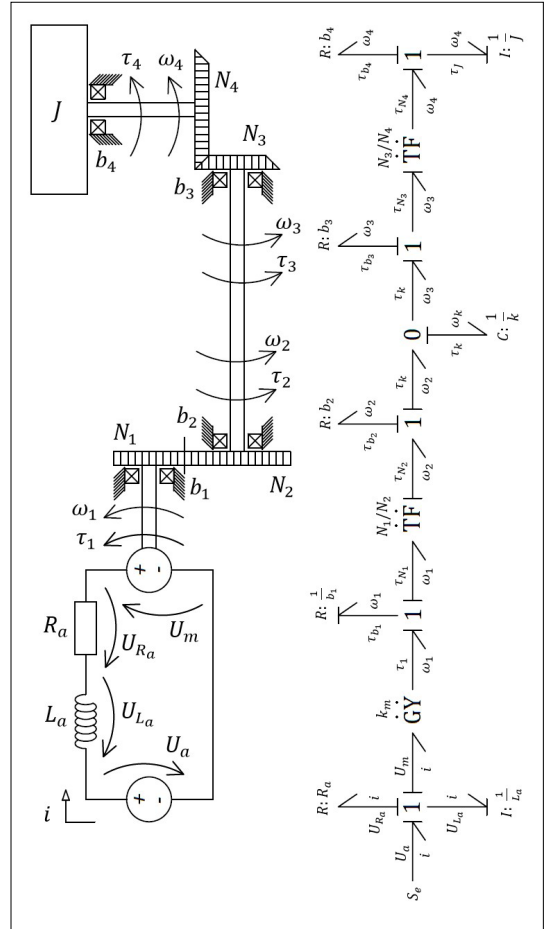
4. A hajtáslánc modellezése

4.1. A hajtáslánc felépítése

A hajtáslánc alapvető eleme a PMDC-motor. A motor R_a armatúra ellenállással, L_a armatúra induktivitással, U_a bemeneti feszültséggel U_m elektromotoros feszültséggel és i armatúra árammal rendelkezik. A motor τ_1 nyomatékot és ω_1 szögsebességet állít elő. Kimenő tengelye b_1 csillapítási állandójú csapágyakkal rendelkezik. Mivel a motor alapvetően széles fordulatszám-tartományban képes mozogni, de az axisok stabil, nagy nyomatékot és alacsony fordulatszámot igényelnek, a kívánt fordulatszám az N_1/N_2 fogaskeréppárral valósul meg. A nyomatékátvitelt a k torziós tengely végzi. A motor axiális iránya merőleges a mozgás hatástengelyére, így egy N_3/N_4 differenciál-fogaskerékpár került alkalmazásra. A differenciálmű-pár 90°-os mozgásátalakítást tesz lehetővé. A csapágyak b_3 és b_4 csillapítási állandóval rendelkeznek. Az axist a J tehetetlenségi nyomaték reprezentálja.

4.2. A hajtáslánc Bond-gráf-alapú modellje

Fontos az elemek és a változók helyes megválasztása. A motor sorosan kapcsolt áramkörre 1-es csomóponttal modellezhető. A feszültségforrás Se elemmel, az armatúra ellenállása R elemként, induktivitása pedig I elemként modellezhető. A motor maga egy k_m motor, konstans arányú girátor (GY). A motor kimenete szintén 1-es csomópont, mely egy R csapágyelemet tartalmaz. A sebességcsökkentő fogaskerékpár transzformátor (TF) N_1/N_2 áttétellel. Az N_2 tengely kimenő csapágyát b_2 értékű R tagként írhatjuk le. A k torziós tengely C tagként modellezhető. Ez a csatlakozás felelős a nyomatékátvitelért, így 0-s csomóponttal reprezentálható. A kimeneti csapágy egy b_3 állandójú R tag, míg a differenciál-fogaskerékpár TF elem N_3/N_4 arányszámmal. Végül a kimeneti oldalt 1 csomóponttal került modellezésre, ahol a csapágy b_4 értékű R tag, a tengely pedig J jellemző értékű I tag. A hajtáslánc felépítése és annak Bond-gráf-alapú modellje a 2. ábrán látható.



2. ábra. A hajtáslánc és a Bond-gráf modellje

4.3. A rendszeregyenletek

A Bond-gráf-alapú modellezés előnye az egyenletek közvetlen meghatározásának lehetősége. Az egyenáramú motorra vonatkozó egyenletek az alábbiak:

$$U_{L_a} = U_a - U_{R_a} - U_m \tag{2}$$

$$L_a \cdot \frac{di}{dt} = U_a - R_a \cdot i - k_m \cdot \omega_1 \tag{3}$$

$$\tau_{b_1} = \tau_1 - \tau_{N_1} \tag{4}$$

$$b_1 \cdot \omega_1 = k_m \cdot i - \frac{N_1}{N_2} \cdot \left(b_2 \cdot \omega_2 + \frac{1}{k} \cdot \int \omega_k dt \right) \tag{5}$$

Az effort és a flow változók viszonya az ezt követő GY elem kapcsán a következő:

$$U_m = k_m \cdot \omega_1 \tag{6}$$

$$\tau_m = k_m \cdot i \tag{7}$$

Az $m_1 = N_1/N_2$ áttételű TF elem alapján az alábbi egyenletek adódnak:

$$\tau_{N_1} = \frac{N_1}{N_2} \cdot \tau_{N_2} \quad (8)$$

$$\omega_2 = \frac{N_1}{N_2} \cdot \omega_1 \quad (9)$$

Ezek alapján k torziós tengely és a b_3 csapágyszáz viszonya az alábbi:

$$\tau_{N_2} = \tau_{b_2} + \tau_k \quad (10)$$

$$\frac{N_2}{N_1} \cdot \tau_{N_1} = b_2 \cdot \omega_2 + \frac{1}{k} \cdot \int \omega_k dt \quad (11)$$

$$\omega_k = \omega_2 - \omega_3 \quad (12)$$

$$k \cdot \frac{d\tau_k}{dt} = \frac{N_1}{N_2} \cdot \omega_1 - \frac{\tau_{b_2}}{b_3} \quad (13)$$

$$\tau_{N_2} = \tau_k + \tau_{b_2} \quad (14)$$

$$\frac{N_2}{N_4} \cdot \tau_4 = \frac{1}{k} \cdot \int \omega_k dt - b_3 \cdot \omega_3 \quad (15)$$

Az N_3/N_4 áttételű TF differenciál-fogaskerékpár működését a következő összefüggések adják meg:

$$\tau_{N_4} = \frac{N_4}{N_2} \cdot \tau_{N_2} \quad (16)$$

$$\omega_3 = \frac{N_4}{N_2} \cdot \omega_4 \quad (17)$$

Végezetül pedig a J tehetetlenségi nyomaték és a b_4 csapágyszáz viszonya az alábbi:

$$\tau_J = \tau_{N_4} - \tau_{b_4} \quad (18)$$

$$J \cdot \frac{d\omega_4}{dt} = \frac{N_4}{N_2} \cdot \tau_3 - b_4 \cdot \omega_4 \quad (19)$$

4.4. Sebességszabályozás megvalósítása PID-alapon

A hajtáslánc fordulatszámviszonyainak modellezésére egy fordulatszám szabályozó loop került megtervezésre, PID-szabályozó alkalmazásával. A PID-szabályozók párhuzamos kompenzációján alapuló szabályozók, melyeket széles körben használnak lineáris rendszerekben. A szabályozó 3 komponenssel rendelkezik, amelyek az arányos (P), integráló (I) és származékos (D) tagok.

Működése hibajelen alapszik, ami a referenciajel és a szenzor által észlelt valós kimenet közötti előjeles eltérés. Az arányos rész (P) a hibajellel arányos végrehajtó jelet, az integráló tag (I) a hibajel integrálásával arányos, a derivált rész (D) pedig a hibajel deriváltjával arányos jelet hoz létre, melyek hatása összegzésre kerül. A PID szabályozók hiszterézisvezérlést használnak [12].

A PID-szabályozó működését 2 formában leíró egyenletek az alábbiak:

$$e(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_0^t e(t) dt + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (20)$$

$$e(t) = K_p \cdot \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \cdot \int_0^t e(t) dt + T_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (21)$$

5. A szimulációs eredmények

A szimulációs modell elkészítése után a kezdeti értékek definiálása a következő lépés. Ezek az értékek határozzák meg a hajtáslánc viselkedését, valamint a PID-szabályozó hangolásához is szükségesek.

A szimuláció alatt beállított értékek az **1. táblázat**ban láthatók:

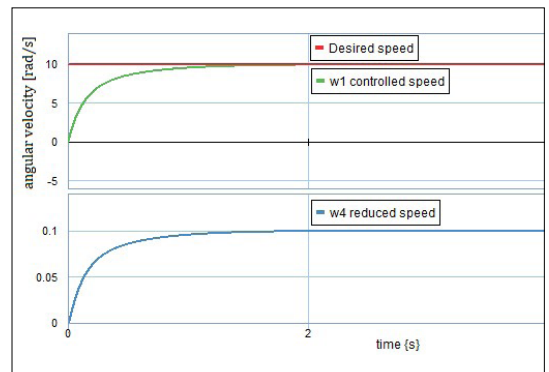
1. táblázat. A szimuláció kezdeti értékei

$R_a = 0,45 \Omega$	$k = 0,09 \text{ Nm/rad}$
$L_a = 0,1 \text{ mH}$	$J = 0,0011 \text{ kgm}^2$
$k_m = 0,067 \text{ Nm/A, Vs/rad}$	$N_1/N_2 = 0,1$
$b_1 = b_3 = b_4 = 0,1 \text{ Nms}$	$N_4/N_3 = 10$
$b_2 = 0,028 \text{ Nms}$	

A szabályozó nélküli hajtáslánc nyílt hurkú és instabil viselkedést eredményez. A PID-szabályozót a Ziegler-Nichols hangolási módszerrel hangoltuk, amely zárt hurokkal rendelkező, szimulált rendszereknél jól alkalmazható megoldás.

A hangolás első lépése a kritikus erősítési tényező és a periódusidő meghatározása az arányos (P) tag segítségével. Az integrálási idő (T_i) végtelen, míg a deriválási idő (T_d) zérus ebben az esetben. A kritikus erősítésnél állandó amplitúdójú rezonancia lép fel, mivel ez a rendszer stabilitásának határa. A K_p , T_i és T_d szabályozóértékek a Ziegler-Nichols-módszer saját összefüggései alapján határozhatók meg [12].

A 20-sim szimulációs szoftverben megjelenített szögsebesség értékek a **3. ábrán** láthatók:



3. ábra. A megjelenített szögsebesség értékek

Az első érték a kívánt referencia-szögsebesség (ω_{ref}), amelyet egy egységugrásfüggvény reprezentál. Ez az egyenáramú motor elvárt szögsebességértéke. A PID-szabályozó viselkedésének visszajelzése céljából a motor tengelyének közvetlen kimeneti szögsebessége is megjelentésre került (ω_1). A harmadik megjelenített érték a J tehetetlenségi nyomaték szögsebessége volt (ω_4). A hajtáslánc az ω_1 értéket a meghatározott áttételnek (1/100) megfelelően módosítja. Így a J tehetetlenségi nyomaték saját szögsebessége századrésze az előzőnek. Rövid tranzien্স állapot után a PMDC-motor kimenetén a szükséges 10 m/s értéknek kell megjelennie a PID-szabályozó hatására. A J tehetetlenségi nyomaték szögsebességének értéke pedig 0,1 rad/s.

6. Következtetések

A tanulmány során egy Multi-Domain-rendszer dinamikus rendszermodellje készült el. A rendszer elektromos és forgó mechanikus tartományokat egyaránt tartalmaz. Fontos kritérium a szimuláció dinamikussága és erőforrásigénye. Ennek megfelelően a Bond-gráf-alapú modellezés optimális megoldásnak bizonyult. A leíró nyelvezet szabályrendszere alapján a rendszeregyenletek közvetlenül a grafikus jelölésrendszerből kerültek meghatározásra. Ezen egyenletek további numerikus szimulációt tesznek lehetővé. Erre a célra szintén optimális környezet a 20-sim szimulációs szoftver, amely alacsony erőforrás-igényű, számos rendszermodellezés-módszert támogat.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] G. Husi, A. H. Abdulkareem: *Mechatronics Systems in the Cyber-physical Space*. Debreceni Egyetem, Műszaki Kar, 2018.
- [2] R. H. Bishop: *The Mechatronics Handbook*. CRC Press LLC, Florida, U.S., 2002.

- [3] *Bond Graph Modelling*. 1st International and 16th National Conference on Machines and Mechanisms, iNaCoMM 2013, IIT Roorke, December 18-20, 2013.
- [4] J. A. Kypuros: *System Dynamics and Control with Bond Graph Modeling*. CRC Press Taylor & Francis Group LLC, U.S., 2013.
- [5] S. Das: *Mechatronic Modeling and Simulation Using Bond Graphs*. CRC Press Taylor & Francis Group LLC, Boca Raton, 2009.
- [6] W. Borutzky: *Bond Graphs for Modelling, Control and Fault Diagnosis of Engineering Systems*. Second edition, Springer International Publishing, Switzerland, 2017.
- [7] D. C. Karnopp: *System Dynamics – Modeling, Simulation, and Control of Mechatronics System*. Fifth Edition, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2012.
- [8] R. C. Dorf, R. H. Bishop: *Modern Control Systems*. Thirteenth Edition, Pearson Education Inc., Hoboken, New Jersey, 2017.
- [9] J. Pintér: *Ipari robotok hajtása*. Robottechnika, 4. előadás, [Online]. <https://docplayer.hu/11254587-Ipari-robotok-hajtasa.html>. [Accessed: 20.01.2022.].
- [10] A. K. Gupta, S. K. Arora, J. R. Westcott: *Industrial Automation and Robotics: An Introduction*. Mercury Learning & Information Publishing, 2016.
- [11] Z. Luo: *Robotics, Automation, and Control in Industrial and Service Settings*. Engineering Science Reference, United States of America, 2015.
- [12] S. Duman, U. Guvenc: *Determination of the PID Controller Parameters for Speed and Position Control of DC Motor Using Gravitational Search Algorithm*, January 2011. https://www.researchgate.net/publication/254048079_Determination_of_the_PID_controller_parameters_for_speed_and_position_control_of_DC_motor_using_Gravitational_Search_Algorithm. [Accessed: 20.01.2022.].

AZ I4.0 GYÁRTÁSI RENDSZEREKBE ALKALMAZOTT MODERN MÉRÉSI MÓDSZEREK

MODERN MEASUREMENT METHODS INTRODUCED IN I4.0 MANUFACTURING SYSTEMS

Ledenyak Daniel,^{1,2} Rosta Tamás²

¹ Eötvös Loránd Tudományegyetem, Savaria Műszaki Intézet, Informatikai Kar, Szombathely, Magyarország, ld@inf.elte.hu

² Soproni Egyetem, Faipari Mérnöki és Kreatívipari Kar, Cziráki József Faanyagtudomány és Technológiák Doktori Iskola, Sopron, Magyarország, fr0c94@uni-sopron.hu, rosta@inf.uni-sopron.hu

Abstract

The main target of this research, as with other I4.0 related research, is to create a system by which a quantitatively lower human resources workload is achieved in manufacturing processes, thereby allowing efforts to be better focused on creating development activities. The focus of the research work is the creation of an I4.0 compatible data processing system and algorithm which can store and forward data obtained from various machine tool and measurement equipment. To establish and appropriately use these measurement values, it is important to process the data in the most optimum way. The first step is to introduce and evaluate the measurement equipment available for our system and its capabilities in the proper transfer of data. This study intends to introduce these systems, focusing on theoretical and practical attainable accuracy.

Keywords: I4.0, CMM, CNC, measurement accuracy.

Összefoglalás

A kutatás fő célja, a többi I4.0-hoz kapcsolódó kutatáshoz hasonlóan, egy olyan rendszer létrehozása, amely segítségével a tényleges gyártási, előállítási műveletekbe lényegesen alacsonyabb élőmunka-mennyiséget vonhatunk be. Ennek köszönhetően a dolgozók a magasabb értékteremtő folyamatokra összpontosíthatnak. A kutatómunka fókuszában egy I4.0 kompatibilis adatfeldolgozó rendszer és algoritmus létrehozása áll, amely képes tárolni és továbbítani a különböző szerszámgépekről és mérőberendezésekről származó adatokat. A mérési értékek megfelelő kezeléséhez és felhasználásához fontos az adatok legoptimálisabb feldolgozása. Első lépésként a rendszerünkhöz kapcsolható, megfelelő adatátvitellel alkalmas mérőberendezések bemutatását és eredményeik kiértékelését határoztuk meg. Jelen tanulmány ezeket a rendszereket kívánja bemutatni, az elérhető elméleti és gyakorlati mérési pontosságra összpontosítva.

Kulcsszavak: I4.0, CMM, CNC, mérési pontosság.

1. Bevezetés

A nagyszámú specifikációval rendelkező, rendkívül összetett műszaki alkatrészek gyártása megköveteli a vállalatoktól, hogy a megfelelőségi mérések, vizsgálatok gyors ellenőrző eszközökkel rendelkezzenek. Könnyű belátni, hogy ebben az összefüggésben a mérés technika az innovációs és

fejlesztési folyamatok, valamint a gyártás támogatásának fontos forrása. A metrológia megfelelő alkalmazása és a mérőszámok megfelelő felhasználása lehetővé teszi a technológiai fejlődés nyomon követését az Ipar 4.0 elveivel összhangban; a gyártási folyamat megbízhatóságának garantálása, valamint a műszaki alkatrészek méret- és geometriai megfelelőségének biztosítása érdekében.

Ennek a folyamatos fejlődésnek eredményeképpen a vállalatok egyre összetettebb mérési eszközöket igényelnek, amelyek képesek biztosítani a mérési funkciók helyes elvégzését. A műszaki alkatrészek méret- és geometriai megfelelőségének biztosításának megnövekedett igénye koordináta mérőgépekkel történő ellenőrzéssel teljesíthető. Ez a technológia támogatja a gyors ellenőrzést, emellett nagy mennyiségű adat előállítására képes, javítva a gyártási folyamattal való interakciót a megfelelőség garantálása érdekében. [1]

A koordinátamérő-gép egy univerzális felhasználásra kifejlesztett, többtengelyes mérőgép. Szerkezeti felépítését tekintve a háromtengelyes kialakítás elterjedt, de vannak öttengelyes kialakítás is. Ennek a gépnek minden tengelye helyzetérzékelővel van felszerelve, és a mérőtapintó helyzete alapján tetszőleges pontot és a pontokhoz kapcsolódó pozícióvektorokat rögzíthet a gép koordinátarendszerében. A mérőgépek legtöbbször portálkivitelűek, de vannak mozgóasztalos, mozgószopos vagy mozgóhidas változatok is. A legelterjedtebb kialakítás a légcsapágyas mozgóelemekkel rendelkező; amelynek nagy előnye a súrlódásából eredő alacsony ellenállás, de vannak görgős típusok is. Mivel a koordinátamérő-gép mérőrendszere pontos pozicionálási felbontást igényel, nem elegendő a CNC-szerszámgépeken általánosan használt rotációs jeladó módszer alkalmazása. Jellemzően üveg mérőlécekkel van ellátva a megfelelő pontosság biztosítása érdekében. A folyamatos, külső rendszerből érkező levegő a rendszer ellátásához elengedhetetlen a légcsapágyak miatt. Leggyakrabban az üzem levegő-ellátását használják, de ebben az esetben különös figyelmet kell fordítani a levegő minőségére. [2]

A mérőtapintó közvetlenül érintkezik a munkadarabbal. Számos típus létezik, amelyek közül a legelterjedtebb a tökéletes gömb alakú, rubin anyagú, de speciális mérésekhez speciális alakú (pl. csillag, L alakú. stb.) szárkialakítású tapintók.

Jelen munka az Ipar 4.0 által kínált korszerű lehetőségekhez használt mérőrendszerek működéséről és adaptálhatóságáról szól. Fő célom a Savaria Műszaki Intézetben elérhető különböző I4.0 kompatibilis mérőrendszerek valós körülmények közötti pontosságának felmérése. A mérési eredmények alapján és az adatok megfelelő felhasználásával összehasonlításra kerül a különböző mérőeszközök pontossága.

2. Mérési eljárások

A mérőgépek és szerszámgépek esetében a pontosság kulcsfontosságú teljesítménykövetelmény. A mérő- és ellenőrző berendezések pontosságának ellenőrzése fontos előfeltétele az ipari minőségügyi intézkedéseknek, mivel a gyártás minősége a „nulla hiba” célkitűzésén alapul. Ezért elengedhetetlen a berendezés állapotának alapos ismerete. A koordinátamérő-gépek esetében a DIN EN ISO 10360-2:2009 szabvány előírja a rendszeresen és meghatározott időközönként elvégzendő kalibrálást. Ezenkívül ismételtetőségi pontossági vizsgálatokat kell végezni.

A méréseket mind a CNC-gépen belül, mind a koordinátamérő-gépen a DIN EN ISO 3650 szerinti, 2. pontossági osztályú blokkmérővel és kalibrálógyűrűvel végeztük el, 20°C-on, $-0,32 \mu\text{m}$ gyártói tűréssel.

A mérési bizonytalanság a mérőeszköz gyártója által megadott, szabvány szerinti összefüggéssel határozható meg:

$$U = 1,5 \cdot 10^{-6} \cdot L \quad (1)$$

ahol esetünkben:

$$U = 1,5 \cdot 10^{-6} \cdot 20 \text{ mm} = 0,03 \mu\text{m}.$$

Az etalon alapanyagának lineáris hőtágulási együtthatója a gyártó által megadottak szerint $11,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Az egyes mérési változatokat 30 alkalommal végeztem el, és a kapott eredményeket és a különböző mérési módszerek közötti különbségeket különböző statisztikai elemzésekkel vizsgáltam.

Az értékelés megkezdése előtt kulcsfontosságú, hogy tisztában legyünk a berendezés pozicionálási pontosságával. Ez a gyártó vagy más akkreditált szervezetek által végzett mérésekből érhető el. A CNC-gép esetén a lineáris pozicionálási pontosság lézeres interferométerrel végzett kalibrációval történt meghatározásra. [3–6]

A CNC-gépen történő mérésekhez egy Renishaw OMP40-2 tapintó egységet használtunk. A mérések megkezdése előtt be kell állítani a tapintó sugárirányú ütését. A szoftver maximum $\pm 2,5 \mu\text{m}$ ütem képes áthidalni, ami jelen esetben $\pm 0,02 \mu\text{m}$ volt. Az elért értéket az adapteren lévő csavarokkal állítottuk be.

3. Az eredmények kiértékelése

A mérendő munkadarabot először CNC-gépen helyeztük el és rögzítettük, az ismert pozíció alapján a munkadarabot meghatározott sebességgel közelítettük meg, majd az elődefiniált pontok érintésével végeztük a mérést. A jelenlegi munká-

ban a mérőeszköz párhuzamos felületeit egy-egy ponton érintjük, és a pontok távolságát a szoftver segítségével a koordinátaértékek kivonásával határoztuk meg. A pontos rögzítést a satukon lévő függőleges segédlapok és a pófák párhuzamos oldalai biztosították.

A következő méréseket gyűrűetalonokon végeztük. A 63.0021 mm középső furatátmérőt a gyártó adta meg. A művelet megkezdése előtt meg kell határozni a gyűrű helyzetét, majd a közép-pontnak felvett pozíciót kell kiindulási pontnak használni. A mérés során 4 pontot érintett meg a tapintó, és ezekből számítja ki a szoftver az átmérőt egy elméleti kör alapján. Az eredményeket az **1. táblázat**ban mutatjuk be.

A további mérésekhez a Savaria Műszaki Intézet mérés technikai laboratóriumában lévő koordinátamérő-gépet használtam. Renishaw mérőrendszerrel és TouchDMIS szoftverrel felszerelt, amelynek pontossága a DIN EN ISO 10360-2 szerint kiadott kalibrációs tanúsítványból számítható ki az adott hosszokra [4]:

$$MPE = \pm(15 \mu\text{m} + L/333), \quad (2)$$

ami esetünkben:

$$MPE = \pm(1,5 \mu\text{m} + 20 \text{mm}/333) = 1,56 \mu\text{m}.$$

A mérések megkezdése előtt kalibrációs gömb segítségével ellenőriztem, hogy a mérőgép hibája nem haladja meg a megengedett tartományt. Ezt a kalibrációt az előírt időközönként kell elvégezni, használatától függően, de általában hetente egyszer.

A kalibrálás után méréseket végeztem mind a mérőhasábokon, mind a gyűrűs idomszeren. A folyamat megkezdése előtt állandó laboratóriumi hőmérsékletet kell biztosítani. A mérőszoftver beépített hőmérséklet-kompenzációval rendelkezik [4].

A méréseket a koordinátamérő-gépen végeztük különböző módszerekkel, két pont között, két sík között mérőhasáb esetén. Gyűrűs etalon használatkor kilencpontos és szkennelt mérést végeztünk, hogy ne csak a mérőműszerek, hanem a mérési módszerek is összehasonlíthatók legyenek. A pont-pont között történő mérések ugyanúgy történnek koordinátamérő-gép használatkor, mint a CNC-megmunkáló központnál. A sík-sík mérés során a koordinátamérőgép-szoftver egy elméleti síkot illeszt a pontokhoz, majd megadja a két eredményül kapott sík távolságát.

A kilencpontos gyűrűmérés esetén az első 5 mérési pont a kalibrálógyűrű elülső felületéhez tartozik, aminek az oka a mérendő tárgy pozicionálási hibáiból adódó pontatlanságok kompen-

zálása volt. A mérési sík felvétele során ügyelni kell arra, hogy a pontok ne legyenek rögzítve a kalibrációs vagy érvényességi matricákon vagy egyéb jelöléseken a sík felületen. A további 4 pont megérintésével a szoftver meghatároz egy elméleti kört.

A kör átmérőjének meghatározásakor a szoftver pontosan úgy működik, mint CNC-gépen történő méréskor. A szkennelt felület esetében a teljes felületen felvett 2400 pontból húzott profilból egy értéket kapunk.

A **2. táblázat** eredményei alapján arra a következtetésre jutottam, hogy nincs szisztematikus hiba a mérési rendszereink között. A megfigyelt változók szórása minden mérési eljárás esetén elfogadható tartományon belül van. Mivel a vizsgált mérési eredmények bizonytalansága egy nagyságrenddel kisebb, mint a mi mérőrendszereink pontossága, megállapítható, hogy a két mérési rendszer egyenértékű egymással az adott alkalmazásnál.

1. táblázat. Mérési eredmények (CNC)

	x irány	y irány	Gyűrű
Átlag [mm]	20,0018	20,0000	63,0024
Átlagos eltérés [mm]	0,0021	0,0005	0,0003
Szórás [mm]	0,0003	0,0006	0,0003
Minimum [mm]	20,0008	19,9991	63,0019
Maximum [mm]	20,0027	20,0013	63,0030
+2 σ szórás [mm]	20,0024	20,0012	63,0030
-2 σ szórás [mm]	20,0011	19,9989	63,0018

2. táblázat. Mérési eredmények (CMM)

	Két pont között	Két sík között	Kör (9 pont)	Kör (szkennelt)
Átlag [mm]	20,0004	19,9994	63,0023	63,0024
Átlagos eltérés [mm]	0,0008	0,0002	0,0002	0,0003
Szórás [mm]	0,0002	0,0001	0,0001	0,0001
Minimum [mm]	20,0003	19,9993	63,0021	63,0023
Maximum [mm]	20,0006	19,9995	63,0026	63,0026
+2 σ szórás [mm]	20,0007	19,9996	63,0026	63,0026
-2 σ szórás [mm]	20,0002	19,9993	63,0020	63,0022

4. Konklúzió

Az újonnan kalibrált marógépbe integrált mérőrendszer pontossága könnyen megfelel a gyártó által megadott tűrésmezőknek. A tapasztalatok alapján a mérés jellemzően gyors, a kapott adatok a MES-rendszer segítségével könnyen továbbíthatók és tárolhatók.

A munkadarabok gyártás utáni mérése az egyik legelterjedtebb, mégis legtöbbet vitatott terület a minőségbiztosítás és a termékfelelőség szempontjából. A legegyszerűbb példa a sokféle méret és tűrés alkalmazása, majd az ezekre mutató valószínű igény, amely gyakran csak a termék összeszerelése során vagy a használatból származó adatok alapján módosul. A szükségtelenül szűk tűréstartomány gyakran megsokszorozza az adott megmunkálás költségeit, nem beszélve a szükségtelen környezetterhelésről. A kutatásban használt CNC-szerszámgép integrált munkadarabmérő rendszere a gyártó által meghatározott tűréstartománynál lényegesen szűkebb tűréssel képes méréseket végezni. A CMM-mérőgép a CNC-megmunkálógép kiváló felügyeleti eszköze, mivel a mérési folyamat szinte azonos lehet. Ennek alapján könnyen integrálható és feldolgozható adatokat kapunk a termelési rendszerünk számára. Az intézetben időközben beszerzésre került egy 3D-szkennerek. Klasszikus tapintó mérések kiegészítéséhez tökéletes, gyors előszűrő

lehet. Ugyanis gyorsabb, továbbá ha hibát talál, a program emberi beavatkozás nélkül áttérhet a pontosabb, de lassabb tapintóval történő mérésekre. Ezzel intézetünkben fejlett és precíz minőségbiztosítási rendszer alakítható ki.

References

- [1] A koordinátamérő-gépek szerkezeti kialakítása. CNC MEDIA. 2021
<https://www.cnc.hu/2015/04/a-koordinata-mero-gepek-szerkezeti-kialakitasa-i/>
- [2] Yongjin Kwona, Tzu-Liang Tsengb, Yalcin Ertekinc: *Characterization of Closed-loop Measurement Accuracy in Precision CNC Milling*. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 22. (2006) 288–296.
- [3] Hau-Wei Lee, Jr-Rung Chen, Shan-Peng Pan, Hua-Chung Liou and Po-Er Hsu: *Relationship between ISO 230-2/-6 Test Results and Positioning Accuracy of Machine Tools Using LaserTRACER*. Center for Measurement Standards, Industrial Technology Research Institute (2016)
- [4] Renishaw: Touch Trigger Probes. 2021
<https://www.renishaw.com/en/touch-trigger-probes-6652>
- [5] COORD3 Metrology. Industrial Metrology System. 2021
<https://coord3.com/en/cmm-universal-2/>
- [6] Akira-Seiki. Vertical Machining Center V2.5XP. 2021
<https://www.akiraseiki.com/vertical-machining-center-v/vmc-v2-5xp.html>

VÍZSZINTES POLÁRGRÁF FEJLESZTÉSE IPARI CÉLOKRA

DEVELOPMENT OF INDUSTRIAL GRADE HORIZONTAL POLARGRAPH

Menyhárt Hunor,¹ Forgó Zoltán²

¹ Sapientia EMTE, Marosvásárhelyi Kar, Gépészmérnöki Tanszék. Marosvásárhely, Románia, menyhart.hunor@student.ms.sapientia.ro

² Sapientia EMTE, Marosvásárhelyi Kar, Gépészmérnöki Tanszék. Marosvásárhely, Románia, zforgo@ms.sapientia.ro

Abstract

This article describes the basis for a horizontal compact drawing robot, its use in the industry, constituent parts and how these parts and methods – drawn from electronics, mechanics and informatics – combine to make up the entirety of this machine.

Keywords: *horizontal polargraph, drawing robot, Arduino.*

Összefoglalás

Ebben a cikkben egy kompakt rajzolórobotnak a különböző működéséhez szükséges alkatrészeit, valamint ezek funkcióinak a megfelelő céljait mutatom be, valamint hogy ezek az elemek miként kapcsolódnak egymáshoz. Mind a mechanikai, elektronikai és informatikai rendszerek egymásba beágyazódásáról szó lesz, valamint ezek a rendszerek szükségéről is.

Kulcsszavak: *vízszintes polárgráf, rajzolórobot, Arduino.*

1. Bevezetés

Az iparban nagy hangsúlyt kell fektetnünk a megbízhatóság és legfőképp a teljesítmény maximalizálására, bizonyos feladatok leegyszerűsítése jelenti a különbséget a nyereség és veszteség között.

Sok folyamat tapasztalt és képzett munkaerővel gyorsan kivitelezhető ám a képzett munkaerő sokszor túl drága vagy egyszerűen elérhetetlen amennyiben nincs elég érdeklődés az iparág iránt. Kevésbé felkészült vagy kevésbé jártas munkaerő sokszor nem képes ugyanazzal a sebességgel vagy precizitással dolgozni, esetleg problémák esetén nem képesek megoldást kapni a különböző helyzetekben.

Emiatt sok helyen robotokkal helyettesítjük az emberek szerepét, így matematikailag garantálni tudjuk a legtöbb probléma megoldását.

Egyik ilyen probléma megjelenhet a hajlított lemezalkatrészek gyártása során, mivel sokszor az alkatrésztervező mérnök megtervezi a darabot,

és leküldi a plazmagépnek a kivágandó részeket, ám mikor hajlítani kell, a szakember, aki lehet különbözik az alkatrész tervezőjétől, egyenként végig kell, hogy sétáljon a darabon, és lejegyezze a hajlítópontokat kézzel. Ez nagyon időigényes munka, mi több, minél tapasztalatlanabb a szakember, annál nagyobb a hibalehetőség, így akár selejtes termék is keletkezhet. Sokszor az sem segít, ha az alkatrész gyártója és a hajlítást végző ember egy és ugyanaz, hiszen ő sem tudhatja pontosan a hajlítási pontokat fejből minden egyes alkalommal.

Ez a probléma egy automata rendszert igényel, amely kiküszöböli az emberi tényezőt, mint amilyen például egy rajzolórobot.

A gépünk tehát meg kell, hogy feleljen egy pár kritériumnak annak érdekében, hogy ipari és praktikus értelme legyen a használatának:

- nagy munkaterülettel rendelkezzen;
- felszerelése a munkaterület felé és elindítása ne kerüljön több időbe, mint 5 percbé;

–kezelése egyszerű kell, hogy legyen, és magától értetődő.

A piacon a különböző rajzológépek hatalmas támasztószervezetekkel rendelkeznek, ami a precíziót növeli, viszont ez a precízió nekünk nem szükséges ilyen mértékben, valamint a munkaterületükön konstans és nagyobb lemezek esetén ezen gépek nagysága miatt a felszerelésük a munkaterületre akár 3-4 embert is megkövetel, és hatalmas területet foglal el.

Az úgynevezett polárgráf [1] megfelel a feladatnak – változtatható munkatér, egyszerű felhelyezés –, ám a legnagyobb probléma, hogy a gravitáció segítségével valósul meg x tengelyen való haladás, és a motorok mindössze egy irányba terelik a munkapontot.

Emiatt erre a feladatra egy új megoldást kellene találni, mivel a létező lehetőségek nem kielégítőek. Itt jön be a képbe egy új megoldása egy már létező ötletnek, illetve a technológiának az újragondolása.

Amit mi keresünk, az egy szalag, mely képes megtartani a súlyát a gravitáció ellenében, képes erőt kifejteni tengelyirányban, és felcsavarodás esetén képes összecukodni és elhajlani. Ennek segítségével két motorral, két tárolócsuklóval és két szalaggal képesek vagyunk létrehozni egy olyan kompakt polárgráfot, amely képes a vízszintes síkon dolgozni is, ezáltal lényegesen megkönnyítve a felszerelést, illetve praktikussá téve a behelyezését a gyártási folyamatba.

2. A berendezés geometriai kialakítása

2.1. A gép teljes geometriai munkatere és ennek kiszámítása

Legelőször is a két csukló közötti távolságot szeretnénk meghatározni, melyet a (1) képlet ad meg.

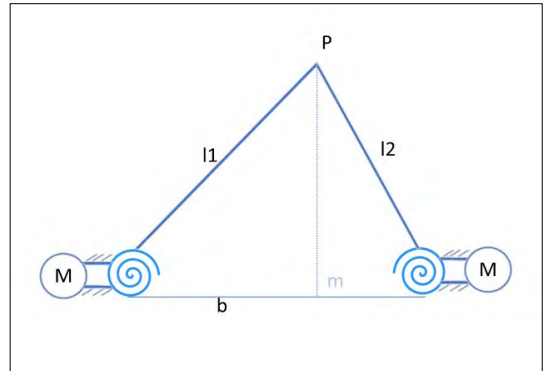
Ezek után a szalagok aktív hosszát határozzuk meg, és a direkt geometria segítségével a rajzolóeszköznek (a berendezés munkapontjának) pozíciója a (3) képlet segítségével kerül meghatározásra. (2.ábra)

$$b = l1 * \cos \theta 1 + l2 * \cos \theta 2 \tag{1}$$

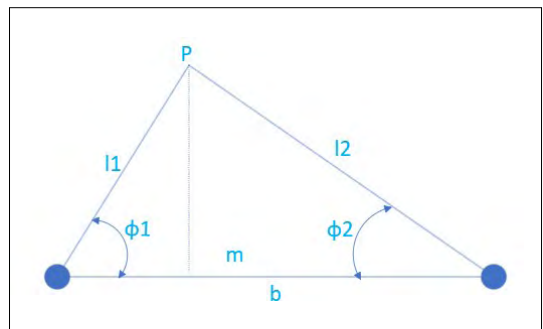
$$l1 = \left(\frac{l2 * \cos \theta 2}{b} \right) \tag{2}$$

$$x = \left(\frac{(l1^2 - l2^2)}{b} \right) \tag{3'}$$

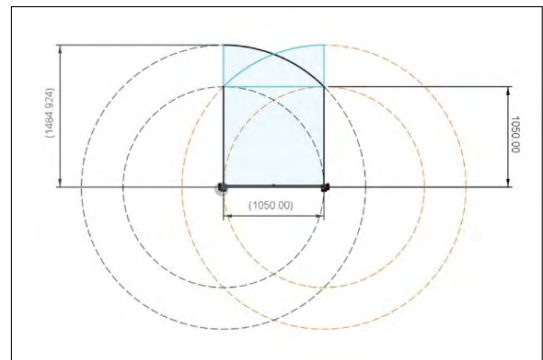
$$y = \left(\frac{1}{\sqrt{2}} * \sqrt{l1^2 + l2^2 - \frac{b^2}{2} - \frac{(l1^2 - l2^2)}{2 * b^2}} \right) \tag{3''}$$



1. ábra. A gép paramétereit felülnézetből



2. ábra. A berendezés paramétereit felülnézetből



3. ábra. A gép teljes munkaterülete felülnézetből

2.2. A gyakorlati munkaterület

A gépet két oldalról irányítjuk, a két motor segítségével bármilyen pontot elérhetünk munkaterületen belül. (3.ábra)

A terület 3 kiemelt zónából áll: az első zóna a primer munkatér, mely egy négyszög és egy polinomiális háromszög összege, ezt a területet mindkét csukló mozgásával el lehet érni, ezáltal lehet benne dolgozni.

A szekunder területhez csak egy-egy csukló fér hozzá, így ámbár az egyenkénti szalaghossz elég lenne az elérésére, a teljes terület elérhetetlen mindkét csukló mozgásintervallumait figyelembe véve.

A legutolsó terület pedig a primer és a szekunder területen kívül eső terület, melyet a gép sehogys tud elérni.

3. Megvalósítás

3.1. Szalagrugó

Ezek a szalagok képesek megtartani a formájukat egyik irányba, és hajlani a másikba (4.ábra). Ez különleges mechanikai tulajdonság a robotikában, kompakt kis terhelésű mozgókarokat lehet ezzel létrehozni. [2, 3]

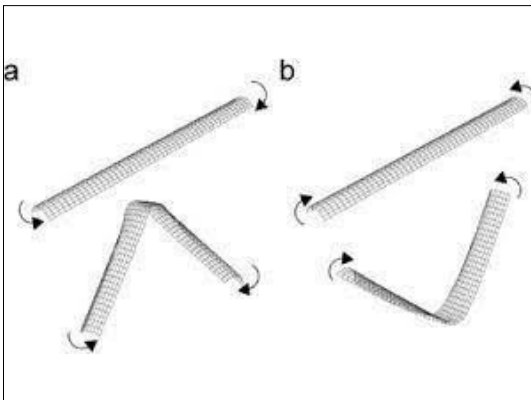
Amennyiben az erő nem haladja meg a kritikus értéket, a kar képes kifejteni egy erőt a tengellyel egy irányban, bár ez nagy teljesítményű feladatokra alkalmatlan, de mi a könnyű rajzolóceruzákat probléma nélkül mozgathatjuk [4]. (5.ábra)

3.2. Csukló

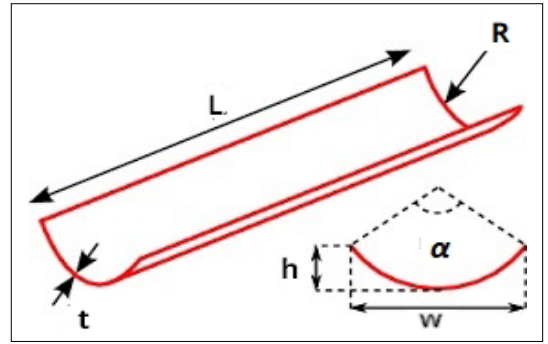
A gépünk csuklójának feladata felcsavarva tárolni, illetve keresztben, összenyomni a szalagot a domború konfigurációjára. Minderre két szembe elhelyezett korongot használunk spirálbemélyedéssel. (6. ábra)

A csuklótárcsák fémből készülnek; a magasabb strapabíróság és jobb csúszás végett ezeket majd egy műanyag orsó köti össze, melynek magassága precízen követi a szalagszélességet. [5] (7.ábra)

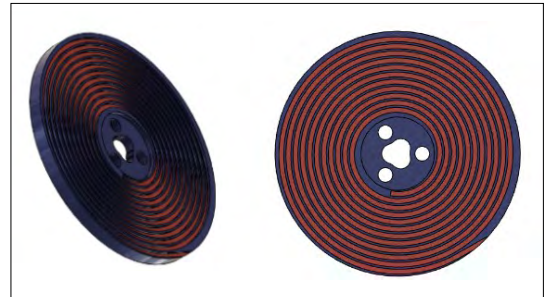
Mivel a két korong távolsága kisebb mind a feltekert szalag szélessége, letekeredésnél, a kinyúló szalag domború formára erőlteti. Emiatt a lemez erőnek képes ellenállni, úgy kereszt, mint hossz irányban.



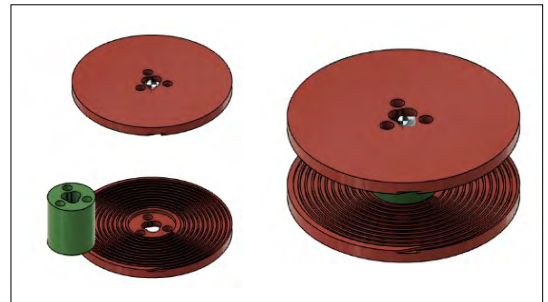
4. ábra. Szalagrugók és mozgás típusai



5. ábra. Egy szalagrugó felépítése



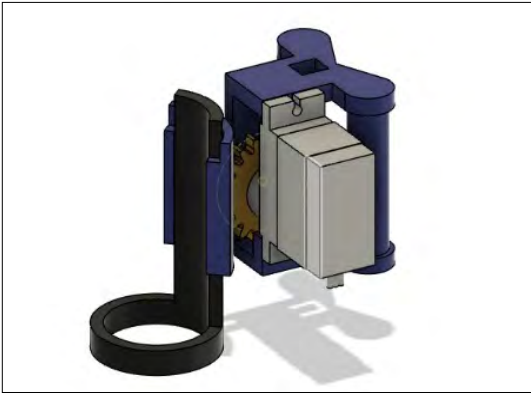
6. ábra. A csukló tárcsájának geometriai felépítése



7. ábra. A teljes csukló összeszerelés előtt, majd után



8. ábra. Egy nema 17 es léptetőmotor



9. ábra. A rajzolószerkezet kialakítása

3.3. A hajtás

Szerepe forgatni a csuklót, ezáltal ki-be mozgatva a lemezeket, így elérve egy megfelelően nagy lineáris erőt, amely mozgatja a ceruzát.

Erre a szerepre egy NEMA 17 bipoláris, 1,8° fokos lépéssel rendelkező motort használunk, (8. ábra) a nagy pontosság és könnyű kezelés végett.

A léptetőmotort egy A4988-as 2A-es motorvezérlővel irányítjuk, mivel ez a vezérlő könnyen elérhető, és könnyen helyettesíthető probléma esetén. Az előnyök közé tartozik az is, hogy a vezérlő elégséges sebességgel és pontossággal tudja irányítani a motort.

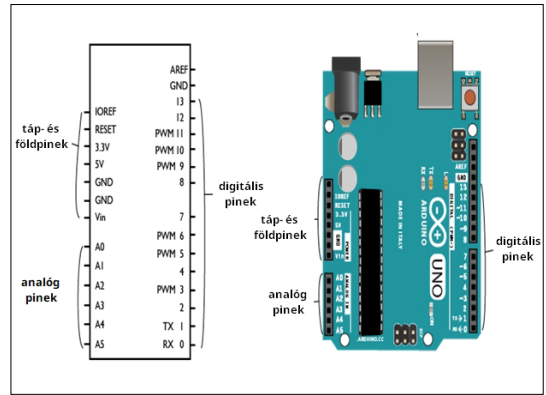
3.4 Rajzolószerkezet

A szalagok végén egy szerkezet helyezkedik el, ennek több része is van, az első rész a 2 hengeres csuklóból áll, mely csatlakozik a szalagokhoz, a második rész tartja a SR 90-es szervómotor vázát, mely motor tengelyén egy fogaskerék-fogasléc kapcsolással képes fel-le mozgatni bilincset, melyben különböző méretű és formájú rajzolóeszközök rögzíthetők. (9. ábra)

3.5 Arduino és irányítás

A gép irányítására egy Arduino Unót használunk (10. ábra), és a kompaktabb kivitelezés elérésére egy CNC-shieldet használunk mely az arduinóval egy direkt kapcsolatot létesít.

Majd ezekre rákerülnek a motorvezérlők és a hozzájuk kapcsolódó léptetőmotorok.



10. ábra. Egy ARDUINO UNO lábkiosztása és grafikus bemutatása

4. Következtetések

Az ipar fejlődése érdekében az új technológiák lehetővé kell, hogy tegyék a könnyebb és gyorsabb termékgyártást, annak érdekében, hogy utolérhesse a piaci keresletet. A bemutatott felépítéssel, a rajzológép képes betölteni egy kis feladatot ebben a láncban,

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Polargraph UK, Polargraph on Hiatus 2019, <http://www.polargraph.co.uk/>, (Letöltve 2021.02.15)
- [2] Project Scribble-Theorz Craft, 2021, <https://invalidentry.engineer/blog/project-scribble-part-1/> (Letöltve 2022.04.17)
- [3] S.J.I. Walker, Guglielmo Aglietti: A Study of Tape Spring Fold Curvature for Space Deployable Structures. Engineering Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part G Journal of Aerospace 221/3 (2007) 313–325. <https://doi.org/10.1243/09544100JAERO209>
- [4] Dewalque F., Collette J. P., Brüls O.: Mechanical Behaviour of Tape Springs Used in the Deployment of Reflectors around a Solar Panel. Acta Astronautica, 123. (2016) 271–282. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0094576515302952>
- [5] Ekelöw J.: Design and Manufacturing of Thin Composite Tape Springs. 2014. (Letöltve 2021.02.03) <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:805332/FULLTEXT01.pdf>

ALSi1MGMN-ALUMÍNIUMÖTVÖZET ÖREGEDÉSI FOLYAMATÁNAK VIZSGÁLATA

EXAMINATION OF AGING OF ALSi1MGMN TYPE ALUMINIUM ALLOY

Mudabbiruddin Mohammed,¹ Kovács Tünde Anna²

¹ Óbudai Egyetem, Anyagtudományok és Technológiák Doktori Iskola, Budapest, Magyarország, mohammed.mudabbir@uni-obuda.hu

² Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Anyagtechnológiai Intézet Tanszék, Budapest, Magyarország, kovacs.tunde@bgk.uni-obuda.hu

Abstract

In the world of manufacturing, aluminium alloy is mostly used because of its suitable properties, such as mechanical behaviour and machinability. The formation of the cluster, the erosion and corrosion, the precipitation process, artificial ageing and other factors are also discussed in this study. From the practical point of view, the main objective of this experimental study is the investigation of the ageing process of AlSi1MgMn (EN AW 6082 T6) aluminium alloy. To investigate the compound precipitation in the aluminium alloy, a heat treatment process is conducted after which a hardness test is performed and hardness values evaluated to obtain the optimal hardness value according to ageing time and temperature. Significant results have been obtained in the hardness test, however, the metallography shows no clear significant result. For better results, more tests are suggested.

Keywords: *AlSi1MgMn, ageing, heat treatment, hardness.*

Összefoglalás

Az ipari gyakorlatban az alumíniumötvözeteket elterjedten alkalmazzák: ennek oka leginkább, hogy mechanikai tulajdonságai és megmunkálhatósága megfelelő. A tanulmány a klaszterek kialakulását, az eróziót és korróziót, a kiválási folyamatokat, a mesterséges öregedést és egyéb tényezőket és azok hatását taglalja. A kísérleteink során az alumíniumötvözetek kísérleti vizsgálatát végeztük gyakorlati úton, ami azt jelenti, hogy az AlSi1MgMn (EN AW 6082 T6)-típusú alumíniumötvözet öregedési folyamatának vizsgálatát tűztük ki fő célkitűzésként. Az alumíniumötvözetek vegyületkiválásának vizsgálatára hőkezelést végeztünk. A hőkezelés után elvégeztük a keménységmérést, és kiértékeljük a keménységi értékeket, mely segítségével megkaptuk az optimális keménységi értéket, az öregedési időnek és a hőmérsékletnek megfelelően. A vizsgálatok során a keménységmérések eredményei szignifikánsak voltak, ezzel szemben a metallográfiai képelemzés nem adott releváns eredményt. A pontosabb eredmények érdekében további vizsgálatok javasoltak.

Kulcsszavak: *AlSi1MgMn, öregedés, hőkezelés, keménység.*

1. A kutatás bemutatása

Az anyagok öregedése általában az anyagtulajdonságoktól, míg a műszaki rendszerek öregedése az alkalmazásuktól függ. Az öregedési folyamat három fő csoportba sorolható: termikus, mechanikai és elektromos. Az öregedés fő

okai lehetnek az erózió és a korrózió, a kopás és a karbantartás hiánya, ami hirtelen meghibásodást okozhat, és az egész rendszer károsodásához vezethet [1]. Az időbeli meghibásodások aránya az időjárástól is függhet. A probléma leküzdése és bármely műszaki rendszer hatékonyságának

növelése érdekében nagyon fontos a buszkábelek előregedésének előrejelzése. A fáradási tulajdonság nagyon fontos szerepet játszik az öregedés előrejelzésében, anyagi és mechanikai megközelítések segítségével. A szerzők egy probléma megoldására mutatták be munkájukat. Az anyagi viselkedés megértéséhez matematikai modellezés használható.

A mai „ipar 4.0”-ás környezetben az alumíniumötvözeteket többnyire különböző alkalmazási területeken használják, kiváló tulajdonságaik miatt: kis sűrűség, megfelelő szilárdság és keménység, kiváló önthetőség és korrózióállóság. Ezen tulajdonságok miatt az Al-Si-Mg-ötvözetek keresett anyagokká válnak az építőiparban, az autóiparban és a repülőgépiparban, különböző alkalmazásokhoz. Fő alkalmazási terület a nagy igénybevételnek kitett alkalmazások, rácsos szerkezetek, hidak, daruk, szállítási alkalmazások, érchordók, söröshordók és teleshordók. Tudni kell, hogy az AlMgSi-ötvözetek mechanikai tulajdonságai elsősorban a feldolgozási technológiától függ.

Az évek során sok szerző tanulmányozta az alumíniumötvözeteket és azok mechanikaitulajdonság-függését különböző hőkezelési állapotban. Az alumíniumötvözetek tulajdonságairól kiterjedt kutatásokat mutattak be. A kovácsolást és a képlékeny alakítást a [2] mutatja be, és ezeket a módszereket alkalmazták a 6082 Al-ötvözet szilárdságának elemzésére is. A fáradási élettartam becslésére a különböző kémiai összetételű és mikroszerkezetű AlMgSi ötvözetek esetében kis ciklusú kifárasztó vizsgálatot végeznek. [3] A korábbi munkák azt mutatják, hogy az ilyen típusú ötvözetekben a repedés a magnézium és a króm jelenlétének köszönhető. A nagy magnéziumtartalmú ötvözetben a kiválások kialakulásának jelensége többször előfordul, mint a kis magnéziumtartalmú ötvözetben a természetes öregedési folyamat során. Az AlMgSi-ötvözeteket kis hőmérsékleten kifejtett, hatékony öregedésgátló hatásuk miatt tartják számon, amely nagymértékben befolyásolja a visszakeményedési reakciót [4, 5]. Az AlMgSi-ötvözetek mesterséges öregítése során a kiválási folyamatot tanulmányoztuk, kísérletek segítségével. Az ilyen típusú ötvözeteket széles körben használják szerkezeti anyagként, ezért érdemes fejleszteni a gyártási folyamatot és az anyag tulajdonságait. A 6082-T6-alumíniumötvözet repedésnövekedésének viselkedését tanulmányozza a [6]-os irodalom. Alkalmazva „Paris” törvényét, a mintákon fáradásos repedésnövekedést tapasztal

hatunk. Ebben a tanulmányban kétféle bemetszés hatását vesszük figyelembe, az ívelt U-bemetszés és V-bemetszés. A tervezés során egy öregedési modellt használnak, hogy előre jelezzék az öregedési hatást a különböző terhelések alatt. Az elvégzett károsodási tesztek a 2017A-T4- és 6082-T6-alumíniumötvözetekkel hasonlították össze. Az átlagos torziós feszültség alapján a statisztikai elemzést követően ez a modell az öregedés becslésére szolgál. Az idő és a hőmérséklet alapján a kiválási viselkedést differenciálpáasztázó kalorimetriával, páasztázó elektronmikroszkóppal, transzmissziós elektron-mikroszkópos metallográfiai elemzésekkel és keménységvizsgálattal értékelik [8]. A vizsgálathoz alumíniumötvözeteket használtak, mint például 6082-T6, 6060, 6005A, 6063, változó hűtési sebességgel. A kiválások viselkedése bizonyos hűtési sebességtartományban ugyanazt az eredményt mutatta. Vicker-mikrokeményiség-mérések segítségével enyhe mikroöregedés-, valamint szakitószilárdsági vizsgálati elemzéssel a 6082-alumíniumötvözet öregedési viselkedését vizsgálja a [9] irodalom. Az anyagvizsgálat során a mikroszkópos kép a maratás után nem ad egyértelmű választ az anyag keményedésére. A hegesztési technikák hatását és az ötvözők hatásait vizsgálja a [10] irodalom.

2. Az anyag és a hőkezelés

2.1. AlMgSi (6082-T6)

A nemesíthető ötvözetek, például az alumínium kiválása várhatóan elszórtan finom kiválásokat tartalmaz, amely a gömb alakútól a lemezkes tartományig terjedhet. Ezért a további elemzéshez alumíniumalapú ötvözetet használnak, amely AlMgSi (6082-T6). A 6082-T6-alumíniumötvözet a megmunkált alumínium – magnézium – szilícium csoport ötvözet. Jellemzően extrudálással és hengerléssel alakítják ki. Általában hőkezelik, hogy nagyobb szilárdságú, ugyanakkor kisebb szívósságú anyagot hozzanak létre. A 6082-es ötvözetből nehéz vékony falú, bonyolult formákat előállítani extrudálás segítségével. A 6082-T6-alumíniumötvözet közepes szilárdságú ötvözet, amely kiváló erózió- és korrózióállósági tulajdonságokkal rendelkezik. A 6000-es sorozatú ötvözetek közül a legnagyobb szilárdsággal rendelkezik.

A T6-6082-alumíniumötvözet kémiai összetételét és anyagtulajdonságait az alábbi, 1. és 2. táblázat tartalmazza.

1. táblázat. Kémiai összetétel

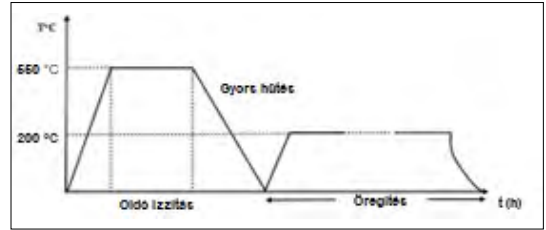
Elem	Százalék
Alumínium	95.2 - 98.3%
Chromium	0.25% max.
Copper	0.1% max.
Iron	0.5% max.
Magnesium	0.6 - 1.2% max.
Manganese	0.4 - 1% max.
Silicon	0.7 - 1.3% max.
Titanium	0.15% max.
Zinc	0.2% max.
Egyéb	0.15% max.

2. táblázat. Anyagtulajdonságok

Tulajdonságok	Érték
Sűrűség	2,71 g/cm ³
Young's Modulus	71 GPa
Szakítószilárdság	140–330 MPa
Folyáshatár	280 MPa
Keménység	35-100 HV
Keménység	84 HB
Olvadáspont	555 °C

2.2. Hőkezelés

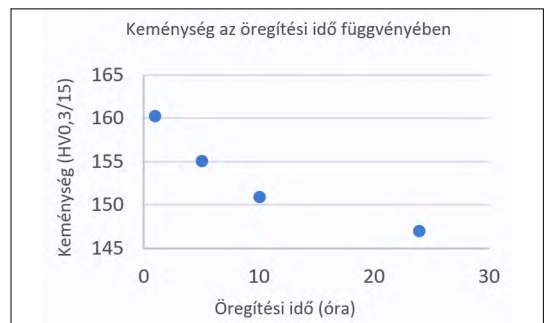
Az alumíniumötvözetek szilárdságnövelésére alkalmazott legfontosabb hőkezelés az öregítés, amely oldóízzítást, gyorshűtést és öregítést foglal magában. A kutatás célja az alkalmazott alumíniumötvözet öregedési folyamatának tanulmányozása. Először is a 6082-T6-mintát 5 különböző részre vágtuk, egyenként 4x3,5 cm méretűekre. Ezeket a mintákat hőkezelésük szerint jelöltük. Majd a mintákat kemencében 550 °C-on másfél órán keresztül hevítettük (oldóízzítás). Az összes mintát hevítés után kivettük, majd hideg vízben hűtöttük. Az oldóízzítást minden darab esetében 550 °C-on 1 órás hőtartással végeztük. Ezt a folyamatot követően különböző öregítési időket alkalmazva hőkezeltük. Az időtartam rendre 1 óra, 5 óra, 10 óra és 24 óra állandó 200 °C hőmérsékleten. Az öregítést követően ezeket a mintákat egyenként nyugvó levegőn hűtöttük szobahőmérsékletre, majd minden mintán keménységmérés vizsgálatot végeztünk, Vickers-keménység-méréssel. Az **1. ábra** az elvégzett hőkezelési folyamat hőmérséklet-idő diagramját mutatja.

**1. ábra.** Öregítő hőkezelés diagram**3. Eredmények és összegzés****3.1. Keménységmérés**

A fáradásos meghibásodás számos tényezőtől függ, mint például az anyag típusától és állapotától, a szerkezeti elemek geometriájától, a terhelés típusától vagy a feszültség állapotától. A kísérletek során négy öregített mintát, egy edzett mintát és egy hőkezelés nélküli kontrollmintát vizsgáltunk (**3. táblázat**). A keménységmérésnél alkalmazott terhelés 300 g vizsgálati idő 15 másodperc ($HV_{0,3/15}$). Minden mintán öt mérést végeztünk, és az átlagot számítva határoztuk meg a keménység értékét. A kapott értékeket grafikonon ábrázoltuk (**2. ábra**), az öregítési idő és a keménység függvényében.

3. táblázat. A Vickers-keménysége a daraboknak

A minta száma	Leírás	Mérték egység HV _{0,3/15}
1	Kontroll	101.63
2	Oldóízzítés 550°C, majd gyors hűtés	144.33
3	Öregítés 200°C-on 1 óra	160.33
4	Öregítés 200°C-on 5 óra	155
5	Öregítés 200°C-on 10 óra	151
6	Öregítés 200°C-on 24 óra	147.66

**2. ábra.** A kapott keménységi értékek

Az öregítési idő hatását a keménységre kívántuk ezzel megmutatni, az öregítési idő függvényében. A diagramon jól látszik, hogy a legnagyobb keménységet az 1 órás öregítéssel kaptuk. A hosszabb idejű öregítési hőkezelés a keménység csökkenését okozta.

3.2. Metallográfia

A mikroszkópos vizsgálat előkészítése:

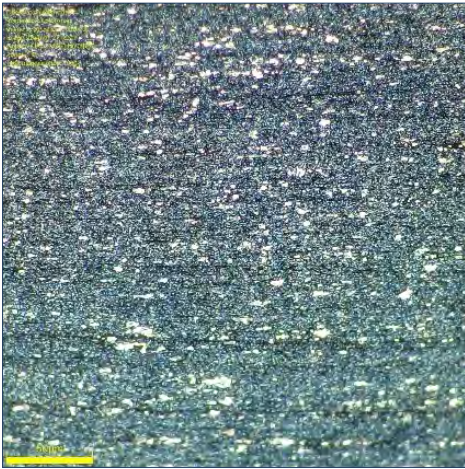
- metszetkészítés,
- a darab beöntése,
- csiszolás,
- polírozás,
- maratás.

A keménységi vizsgálat után az összes mintát beágyasztuk, hogy utána a csiszolás és polírozás el-

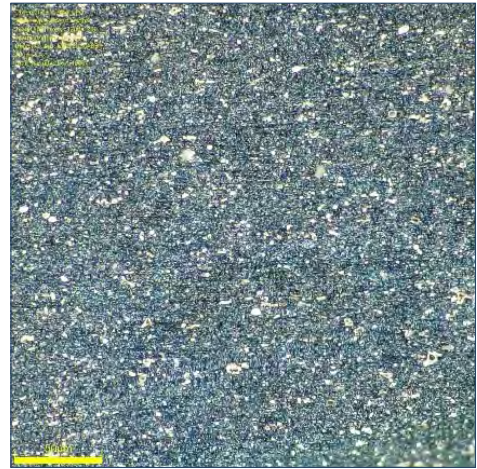
végzésre kerüljön, majd elvégeztük a mikroszkópos vizsgálatot. A darab beöntése gyantaanyaggal készül, hogy megkapja a végső formát a további előkészítéshez. A beöntött mintákat durva csiszolópapírral csiszolva készítettük elő. A csiszolási folyamathoz 80-as durva csiszolópapírtól haladtunk a finom 2500-as csiszolópapírral végzett előkészítésig. A Keller-reagenst, amely salétromsav, sósav és hidrogén-fluorsav keveréke, körülbelül 10-15 másodpercig használtuk a maratáshoz.

A maratást követően mikroszerkezeti vizsgálatot végzünk optikai mikroszkóp segítségével.

A **3–8. ábrák** a felkeményedett alumíniumdarabokat mutatják. Ezek a képek 1000-szeres nagyítás mellett (50 μm) rendelkező optikai mikroszkóppal készültek.



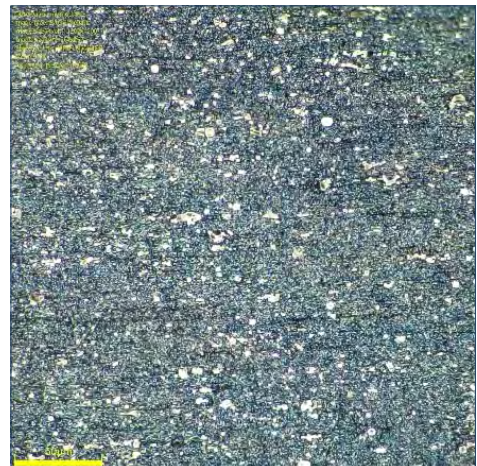
3. ábra. Kontrollminta



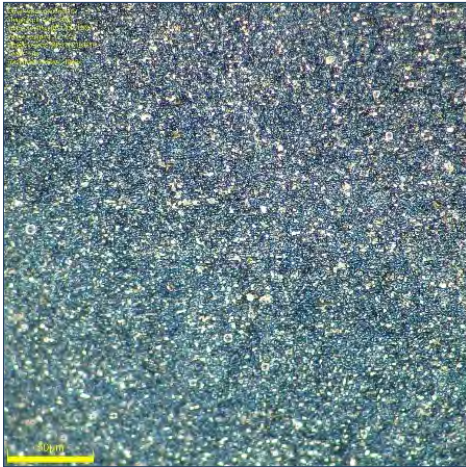
4. ábra. Edzett minta, 550°C, 1 órás hőkezelés



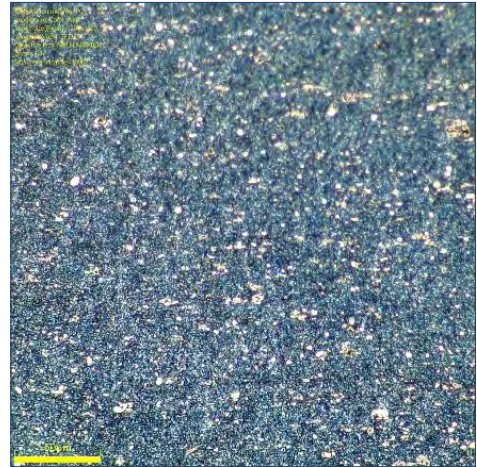
5. ábra. 3. minta, 200 °C, 1 órás hőkezelés



6. ábra. 4. minta, 200 °C, 5 órás hőkezelés



7. ábra. 5. minta, 200 °C, 10 órás hőkezelés



8. ábra. 6. minta, 200 °C, 24 órás hőkezelés

Következtetések

Ebben a tanulmányban az AlMgSi (6082)-alumíniumötvözet öregítését hőkezeléssel majd értékelését keménységi méréssel végeztük. A folyamatot lépésről lépésre ismertettük. Összességében elmondható, hogy a teszt során a keménységmérésekben észrevehető, hogy a 3. minta keménysége a legnagyobb, ezért az optimális öregítési hőkezelésnek a 200 °C-on 1 órán keresztül történő öregítést tekinthetjük. A keménységmérések után a metallográfiai vizsgálatokkal megpróbáltuk megfigyelni a kiválásokat. A metallográfiában jelentős eredmény nem volt egyértelműen látható. Ezt a metallográfiai vizsgálatot optikai mikroszkóppal végeztük, a jobb eredmények érdekében más technikákat lenne ajánlott használni, például pásztázó elektron-mikroszkópot vagy transzmissziós elektron-mikroszkópot.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] M. Mudabbiruddin., L. Pokoradi: *Aging of Technical Systems – Literature Review*. Journal of Production Engineering, 24/1. (2021) 69–74. <https://doi.org/10.24867/JPE-2021-01-069>
- [2] N. Kumar, G. M. Owolabi, R. Jayaganthan: *Al 6082 Alloy Strengthening through Low Strain Multi-axial Forging*. Materials Characterization, 155. (2019) 109-761. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2019.06.003>
- [3] L. P. Borrego, L. M. Abreu, J. M. Costa, J. M. Ferreira: *Analysis of Low Cycle Fatigue in AlMgSi Aluminium Alloys*. Engineering Failure Analysis, 11/5. (2004) 715–725. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2003.09.003>
- [4] J. Kim, J. Im, M. Song, I. Kim.: *Effects of Mg Addition and Pre-aging on the Age-Hardening Behav-*

ior in Al-Mg-Si. Metals, 8/12. (2018) 10-46.

<https://doi.org/10.3390/met8121046>

- [5] M. Stipcich, A. Cuniberti, V. Nosedo Grau.: *Electrical Resistometry Study of an AlMgSi Alloy under Artificial Aging*. Journal of Alloys and Compounds, 542. (2012) 248–252. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2012.07.031>
- [6] J. A. F. O. Correia, A. M. P. De Jesus, A. S. F. Alves, G. Lesiuk, P. J. S. Tavares, P. M. G. P. Moreira.: *Fatigue Crack Growth Behaviour of the 6082-T6 Aluminium Using CT Specimens with Distinct Notches*. In: Procedia Structural Integrity. Vol. 2. Catania, Italy, 2016. 3272-3279. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2016.06.408>
- [7] K. Kluger.: *Fatigue Life Estimation for 2017A-T4 and 6082-T6 Aluminium Alloys Subjected to Bending-Torsion with Mean Stress*. International Journal of Fatigue, 80. (2015) 22–29. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2015.05.005>
- [8] B. Milkereit, N. Wanderka, C. Schick, O. Kessler.: *Continuous Cooling Precipitation Diagrams of Al-Mg-Si Alloys*. Materials Science and Engineering A, 550. (2017) 87–96. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.04.033>
- [9] M. Fujda, M. Matvija, M. Glogovský, I. Orišenko.: *Natural Aging Behaviour of the EN AW 6082 and Lead Free EN AW 6023 Aluminium Alloys*. Manufacturing Technology, 17/5. (2017) 19–20. <https://doi.org/10.21062/ujep/x.2017/a/1213-2489/MT/17/5/701>
- [10] G. Cornacchia, S. Cecchel.: *Study and Characterization of EN AW 6181/6082-T6 and EN AC 42100-T6 Aluminium Alloy Welding of Structural Applications: Metal Inert Gas (MIG), Cold Metal Transfer (CMT), and Fiber Laser-MIG Hybrid Comparison*. Metals, 10/4. (2020) 1–21. <https://doi.org/10.3390/met10040441>

KOMPRESSZOROS HŰTŐKÖRFOLYAMAT SZEMLÉLTETÉSE ÉS VIZSGÁLATA

STUDY OF A COMPRESSOR REFRIGERATION CIRCUIT

Szabó István-Sándor,¹ Pásztor Judit,² Farnos Rudolf-László³

¹ Sapientia Erdélyi Magyar Tudományegyetem, Marosvásárhelyi Kar, Gépészmérnöki Tanszék. Marosvásárhely, Románia, szabo.l.istvan@student.ms.sapientia.ro

² Sapientia Erdélyi Magyar Tudományegyetem, Marosvásárhelyi Kar, Gépészmérnöki Tanszék. Marosvásárhely, Románia, pjudit@ms.sapientia.ro

³ Sapientia Erdélyi Magyar Tudományegyetem, Marosvásárhelyi Kar, Gépészmérnöki Tanszék. Marosvásárhely, Románia, farnos_rudolf@ms.sapientia.ro

Abstract

An important part of technical education is the presentation of processes through experiments and demonstration tools. This direct sensual experience is one of the sources of knowledge acquisition. The illustration provides a deeper understanding of the curriculum, making the cognitive process more intense. In this study we present a refrigerator model we have designed and implemented. Measurements are then performed on a real refrigerator to study the compressor refrigeration process. The locations where data were acquired are shown on the model.

Keywords: *compression refrigeration system, model, refrigeration cycle, temperature measurement.*

Összefoglalás

A műszaki oktatás folyamatának fontos része a folyamatok kísérletek és szemléltetőeszközök segítségével történő bemutatása. Ez a közvetlen érzéki tapasztalás az ismeretszerzés egyik forrása. A szemléltetés biztosítja a tananyag mélyebb megértését, így intenzívebbé válik a megismerési folyamat. Dolgozatunkban bemutatunk egy általunk tervezett és megvalósított hűtőgép-szemléltető eszközt, majd egy valós hűtőgépen méréseket végzünk a kompresszoros hűtőkörfolyamat tanulmányozása érdekében. A mérési pontokat a bemutatatóeszközön szemléltetjük.

Kulcsszavak: *kompresszoros hűtőgép, szemléltetőeszköz, hűtőkörfolyamat, hőmérsékletmérés.*

1. Kompresszoros hűtőgép szemléltetése

A bemutatatóeszköz olyan térbeli taneszköz, amely alkalmas a tárgyak szerkezeti összefüggéseinek, részeinek, működési elvének szemléltetésére. A bemutatatóeszköz didaktikai követelménye, hogy legyen alkalmas a célirányos és sokoldalú megfigyelésre, a folyamatokat egészében és részleteiben is képes legyen bemutatni.

A kompresszoros hűtőgépet bemutató berendezés vizuálisan segíti a gépek felépítésének és működésének megértését, rögzítését, a műszaki oktatásban résztvevők számára.

A kompresszor a gázok nyomásának növelésére alkalmas gép. Hajtása erőgéppel, gyakran villanymotorral történik. Szinte minden háztartásban fellelhető: a hűtőszekrényekben, a klímaberendezésekben, az autókban, a legtöbb levegő felhasználásával működő szerszámban jelen van [1].

A hűtőgép segítségével mesterségesen lehet előállítani és tartósan fenntartani a környezetnél alacsonyabb hőmérsékletet [2].

1.1. Kompresszoros hűtőgép elvi felépítése, működése

A kompresszoros hűtőgép elvi felépítése az 1. ábrán látható. A hűtőgép fő részei, a komp-

resszor, a kondenzátor, a fojtó, az elpárolgató, amelyek egy zárt rendszert alkotnak. A zárt rendszerben a hűtőközeg kering [2].

A hűtőközeg lehet gáz vagy gőz. A leggyakoribb a gőz-halmazállapotú hűtőközeg [3–4]. A következőkben csak ezt tárgyaljuk. A hűtőközeg a hűtés folyamata alatt különböző halmazállapotokban van jelen.

A kompresszor megnöveli a nedvesgőz-halmazállapotú hűtőközeg nyomását és hőmérsékletét, így a nagy nyomású és magas hőmérsékletű gőz tovább áramlik a kondenzátor felé. A kondenzátor egy nagy felületű hőcserélő. Az ideérkező túlhevített, magasnyomású gőz leadja a hőt a környezetnek, emiatt lehül és kondenzálódik. A cseppfolyós hűtőközeg egy fojtón halad át, amely fenntartja a nyomáskülönbséget, és ahol a közeget expandál, emiatt nyomása csökken, így a hőmérséklete is. Az alacsonyabb nyomás miatt alacsonyabb hőfokon kezd forrni. A párolgáshoz hőt von el a környezetéből. A hőfelvétel a párologtatóban valósul meg. Az ideérkező hűtőközeg nedvesgőz-halmazállapotú, ami itt teljesen elpárolog, miközben hőt vesz fel a hűtendő közegből. A párologtatóból hideg gőzként távozik. A hűtőgép kompresszorához általában hozzátartozik egy hőcserélő, rekuperátor, az érkező hideg gőz hűti a távozó meleget, így a kompresszorhoz magasabb hőmérsékletű hűtőközeg érkezik. Ameddig a kompresszor biztosítja a hűtőközeg körforgását, addig ezek a folyamatok lejátszódnak, ezáltal a párologtató környezete lehül, míg a kondenzátoré felmelegedik.

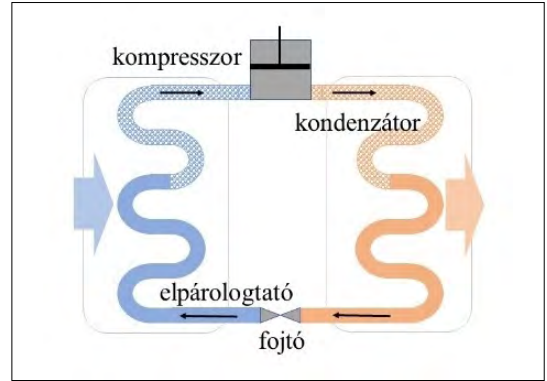
1.2. A kompresszor szemléltetése

A szemléltetőeszköz megalkotásához felhasználtuk egy hűtőgép kompresszorát. A kompresszort felnyitottuk, kiemeltük a házból, így láthatóak a dugattyú, a hengerfej, a szelepek, jelen esetben a hűtőközeg áramlási járatai, a szóróalajozás és a hajtómotor, 2. ábra.

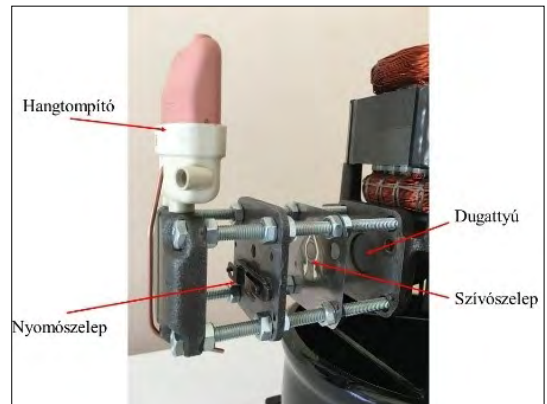
A hengerfedél, a szelepek és a szívóoldali hangtompító megfelelő szemléltetése érdekében az eredeti rögzítő csavarokat lecseréltük, és kialakítottuk a megfelelő távolságot a szemrevételezéshez.

1.3. Hűtőgép szemléltetése

A hűtőgép-szemléltető eszköz megalkotásához szintén egy régi hűtőgép alkatrészeit használtuk fel. A bemutatószerkezet tartalmazza a hűtőkör alapvető részeit: a kompresszort, a kondenzátort, a párologtatót, a párologtatóval közös testként kialakított fojtót. A szemléltetőeszköz kiegészül a szárítóval és a csővezetékekkel (3. ábra, 4. ábra).



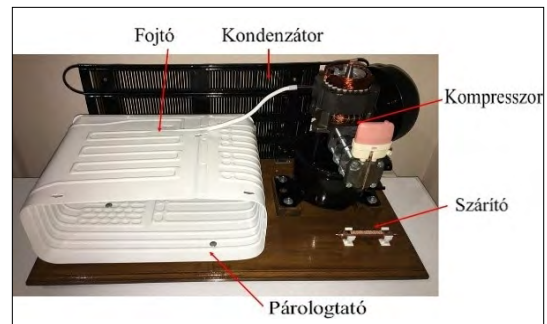
1. ábra. Hűtőgép elvi felépítése, működése



2. ábra. Megvalósított kompresszorszemléltető eszköz



3. ábra. Szárító bemutatása



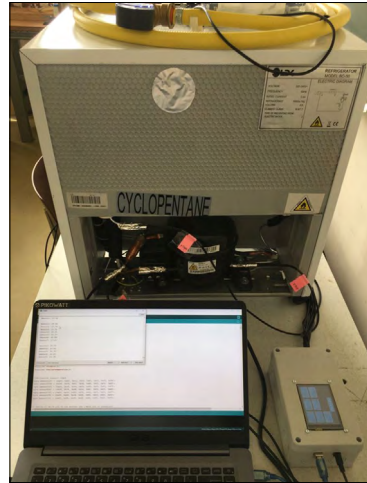
4. ábra. Megvalósított hűtőgép-szemléltető eszköz

A kondenzátor általában nagy méretű, így csak egy részét használtuk fel.

A szárítót a rajta áthaladó hűtőközeget megsűríti, és kivonja belőle az esetleges nedvességet [2]. Felépítésének bemutatásához a burkolatot hosszában bevágtuk, a szűrőket megtisztítottuk, majd a szilikagél golyókat pillanatragasztóval rögzítettük.

A párologtató egy 120×400×300 mm alumíniumdoboz, amelynek falában kialakított csőrendszer található, ebben kering a hűtőközeg. Felületén megfigyelhető a fojtó, amely a belépőoldalon van kiképezve.

A csövek egymáshoz rögzítését a könnyű szerelhetőség érdekében áttetsző, flexibilis PVC-tömlővel valósítottuk meg.



5. ábra. A vizsgált hűtőgép és az adatgyűjtés

2. Kompresszoros hűtőkörfolyamat vizsgálata

A hűtőkörfolyamat tanulmányozása érdekében egy valós hűtőgép elemeit együttesen vizsgáltuk. A hűtőgép zárt rendszer, így csak a hőmérséklet mérésére van lehetőség. Erre egy mérőrendszert alakítottunk ki.

2.1. Mérőrendszer

A vizsgálatot 43 L térfogatú, LDK-hűtőszekrényen végeztük, 5. ábra. A vizsgált hűtőgép kondenzátora az oldalfalakba van beépítve, a párologtató-fagyasztó része kis méretű. Hűtőközege izobután, jelölése: R600a. Az izobután normál légköri nyomáson $-11,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ -on forr, és $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ -on, 3,5 bar nyomással cseppfolyósítható [5].

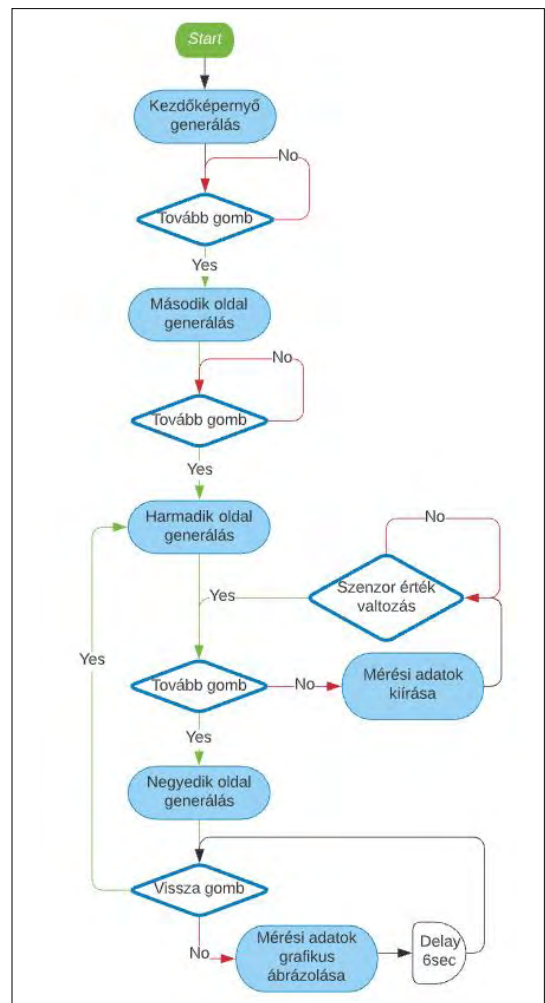
A mérőegység főbb alkotó elemei: Arduino Mega2560, 7 darab DS18B20 hőmérséklet-érzékelő szenzor, 3,2" átmérőjű, érintőképernyős, színes TFT LCD-kijelző.

A mérőprogram célja egy könnyen áttekinthető felület létrehozása, amely a felhasználónak egy időben mutatja az összes szenzor által mért hőmérsékleti értéket [6]. A hőmérséklet-változásokat grafikus felület is szemlélteti. A könnyebb követhetőség érdekében minden szenzornak saját színkódja van. A felhasználói felületen 4 oldal között lehet navigálni, ezt lehetővé teszi az érintésérzékeny kijelző.

A program folyamatábrája a 6. ábrán látható.

2.2. Mérés

A hűtőgép vizsgálatához a hét szenzort a működés szempontjából lényeges, fontos helyekre rögzítettük: a kompresszor elé és a kompresszor után, a kondenzátoron, a szárítót elé, a szárítót után, a fojtó elé és a fojtó után. A hőmérő szen-



6. ábra. A program folyamatábrája

zorok rögzítése alumínium ragasztószalaggal és hővezető paszta segítségével történt.

A hűtőgép elindítása után a szenzorok adatai egy *.txt állományba mentődnek; ezek a képernyő negyedik oldalán követhetők (7. ábra).

A hűtőközegnek a hűtőgép működése közbeni hőmérséklet-változása a mérési helyeken a 8. ábrán követhető.

A 8. ábrán láthatóak a mérési helyek, és azonosíthatóak a hűtőkörfolyamat elemi folyamatai:

- S4-S1: Kompresszor általi hőmérséklet-növeledés;
- S1-S5-S2-S3-S6: Kondenzátoron hőmérséklet-csökkenés;
- S6-S7: Fojtás, hőmérséklet-csökkenés;
- S7-S4: Elpárologatás, hőmérséklet-növekedés.

2.3. A hűtőkörfolyamat vizsgálata

A hűtőkörfolyamat mentén a hűtőközeg halmozállapot-változásának szemléltetéséhez, vizsgálatához gyakorlati jelentőséggel bír a hűtőközeg nyomásának és entalpiájának ismerete [4, 7, 8, 9]. Az entalpia, jele H , energiadimenziójú, kalorikus állapotjelző, mértékegysége [J].

A hőmérséklet alapján meghatározható a hűtőközeg telített gőznyomása, ezt az izobután telítettgőznyomás karakterisztikájára alapoztuk. Az R600a, izobután hűtőközeg adott hőmérséklethez tartozó telítettgőznyomás-értékei a szakirodalomban fellelhetők [5]. Ezen értékek segítségével egy közelítő polinomot képeztünk (9. ábra).

A közelítő polinom összefüggése:

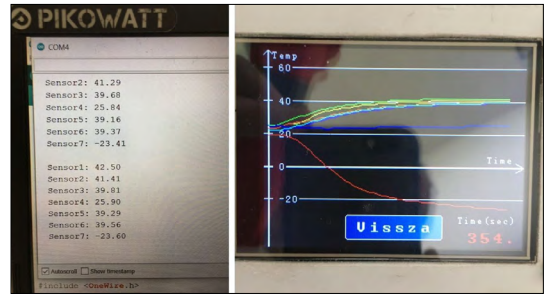
$$p = 4 \cdot 10^{-6} t^3 + 8 \cdot 10^{-4} t^2 + 0,562 t + 1,5624 \text{ [bar]} \quad (1)$$

Az (1)-es összefüggés segítségével meghatároztuk a kompresszor utáni és a fojtó utáni hőmérsékleti értékekhez tartozó telítettgőznyomás-értékeket. Az adatokat az 1. táblázat tartalmazza. Ugyanitt feltüntettük a szakirodalomban megtalálható, R600a hűtőközeg várható adatait is.

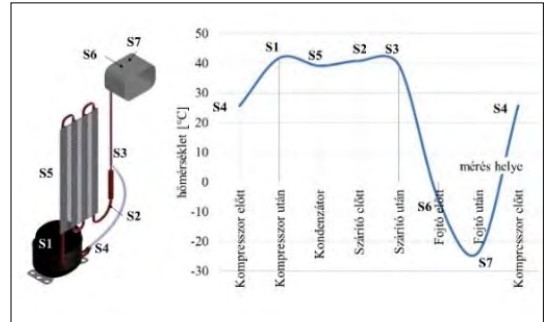
A hűtőkörfolyamat a p-h diagramon jól szemléltethető, 10. ábra, ahol h a fajlagos entalpia, [J/kg].

1. táblázat. Meghatározott telítettgőznyomás-értékek

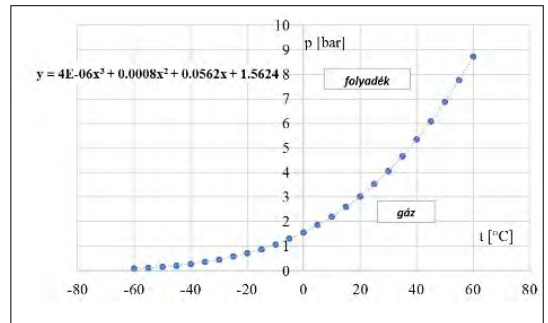
Szenzor száma	Szenzor helye	Hőmérséklet (°C)	Számolt nyomás (bar)	Szakirodalmi adatok
1	Kompresszor után	41,75	5,60	40 ÷ 60 °C max. 8 bar
7	Fojtó után	-23,66	0,61	-25 ÷ -20 °C 0,5 ÷ 1 bar



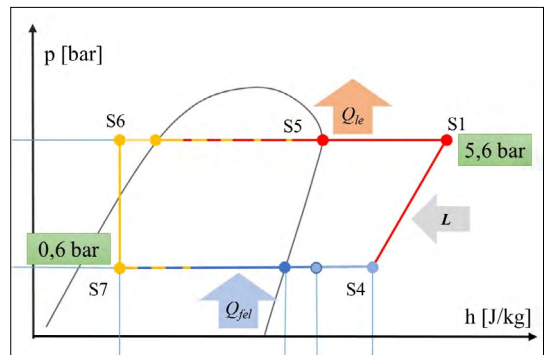
7. ábra. Megjelenített adatok



8. ábra. Hűtőközeg hőmérséklet-változása a mérési helyeken, a körfolyamat mentén



9. ábra. R600a, izobutántelített gőznyomás diagramja



10. ábra. A hűtőkörfolyamat szemléltetése p-h diagramon

A diagram S4-S1 szakaszán követhető a kompresszor nyomásnövelő hatása és az entalpiánövekedés. A hűtőközeg túlhevítettgőz-halmazállapotba kerül. A számolt 5,6 bar nyomás elfogadható a szakirodalmi adatok alapján.

Az S1–S5–S6 szakaszon, a kondenzátoron a hőmérséklet csökken (**8. ábra**). A hűtőközeg gőz-halmazállapotból folyékony halmazállapotba megy át (**9. ábra**). Izobár hőleadás, entalpiacsökkenés történik.

Az S6–S7 szakaszon a fojtón történő nyomásesés látható. A fojtó után mért hőmérsékleti érték illeszkedik a szakirodalmi adatokhoz, (**1. táblázat, 8. ábra**). Ha abból indulunk ki, hogy a fojtó után a hűtőközeg gőz-halmazállapotú, akkor belátható, hogy a meghatározott 0,6 bar nyomás reális lehet (**1. táblázat, 10. ábra**).

Az S7–S4 szakaszon a hűtőközeg elpárolog, izobár hőfelvétel történik, az entalpia növekszik.

3. Következtetések

A szemléltetőeszköz kis helyigényű, könnyen kezelhető, biztonságos. Bemutatja a hűtőgép fontos részeit, lehetőséget ad az elemi folyamatok követhetésére.

A mérőegység segítségével valós időben követhető a hőmérsékletek változása. A szemléltetőeszközön bemutathatóak a mérési helyek.

A kompresszoros hűtőkörfolyamatban a hűtőközeg hőmérséklete, nyomása és halmazállapota változik, ezt a bemutatkozóeszköz magyarázza, és a mérések igazolják, szemléltetik.

A megvalósított szemléltetőeszköz összeköti az elméleti fogalmakat a gyakorlattal.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Kakucs A.: *Áramlástan*. Scientia Kiadó, Kolozsvár, 2006.
- [2] Juhász L., Maiyaleh T., Vadász J., Vasáros Z.: *Gyakorlati hűtéstechnikai ismeretek*. Nemzeti Klímavédelmi Hatóság, Budapest, 2020.
- [3] Santa R.: *Investigation of the Thermodynamic Characteristics of the Ester Oil and R152a, R125, R134a and R123 Refrigerant Mixtures*. Acta Universitatis Sapientiae Electrical and Mechanical Engineering, 13 (2021) 14–24.
<https://doi.org/10.2478/auseme-2021-0002>
- [4] Sánta R.: *Pressure Drop during Condensation of Refrigerant R134a inside Horizontal Tubes*. IEEE 3rd International Symposium on Exploitation of Renewable Energy Sources (EXPRES), (2011) 117–122.
<https://doi.org/10.1109/EXPRES.2011.5741804>
- [5] *A kompresszoros hűtőgép kivitelezése*. <https://www.netfizika.hu/a-kompresszoros-hutokep-kivitelezese>. (letöltve: 2021. május 11.).
- [6] Harsányi R., Juhász M. A.: *Fizikai számítástechnika: elektronikai alapok és Arduino programozás*. Typotex Kiadó, 2014. (letöltve: 2021 május 15.)
- [7] Santa R.: *Comparative Analysis of Heat Pump System with IHX Using R1234yf and R134a*. Periodica Polytechnica, Mechanical Engineering, 65/4. (2021) 1–11.
<https://doi.org/10.3311/PPme.18390>
- [8] Sánta R.: *Investigations of the Performance of a Heat Pump with Internal Heat Exchanger*. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 146. (2021) 11130.
<https://doi.org/10.1007/s10973-021-11130-5>
- [9] Sánta R., Garbai L.: *Measurement Testing of Heat Transfer Coefficients in the Evaporator and Condenser of Heat Pumps*. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 119/3. (2015) 2099–2106.
<https://doi.org/10.1007/s10973-014-4303-4>

KOLLABORATÍV ROBOT ÉS IPARI SZÁMÍTÓGÉP KOMMUNIKÁCIÓS LEHETŐSÉGEINEK VIZSGÁLATA

STUDYING THE COMMUNICATION POSSIBILITIES BETWEEN A COLLABORATIVE ROBOT AND AN INDUSTRIAL COMPUTER

Tóth Szabolcs Balázs,¹ Erdei Timotei István,² Husi Géza³

Debreceni Egyetem Műszaki Kar, Debrecen, Magyarország

¹ szabolcs978@gmail.com

² timoteierdei@eng.unideb.hu

³ husiigeza@eng.unideb.hu

Abstract

This project is based on the study of collaborative robots (hereafter: Cobot) and industrial PCs, including the communication possibilities between them. In the course of the project, a number of possibilities were studied in order to solve the problem and then summarised to select a collaborative robot and an industrial PC. After that, the focus of the project was on the communication options between the two systems: communication via I/O ports and net-work communication (TCP/IP, Modbus/TCP). Finally, the possible solutions were analysed from different points of view (complexity, flexibility, technical aspects, etc.) and communication between the chosen devices was implemented. The implementation was mainly carried out in a simulation environment, but as the project progressed a communication solution was tested on real industrial devices.

Keywords: *KR, Cobot, UR, PLC, IPC, Beckhoff, TCP/IP, Modbus/TCP.*

Összefoglalás

A bemutatásra kerülő projekt alapja, kollaboratív robotok (továbbiakban: KR) és ipari számítógépek, azon belül is a közöttük megvalósítható kommunikációs lehetőségek vizsgálata. A projekt kivitelezése során megvizsgáltam számos lehetőséget a probléma megoldásához, majd ezeket összegezve, egy-egy kollaboratív robot és ipari számítógépet választottam ki. Mindezek után a két rendszer közötti kommunikációs lehetőségek kerültek a projekt fókuszába: I/O portokon való kommunikáció és hálózati kommunikáció (TCP/IP, Modbus/TCP). Különböző szempontok szerint elemeztem a megoldási lehetőségeket (bonyolultság, rugalmasság, műszaki szempontok stb.) Végül megvalósítottam a választott eszközök közötti kommunikációt. A megvalósítás elsősorban szimulációs környezetben történt, viszont a projekt előrehaladtával valós ipari berendezéseken is teszteltem a kommunikációs megoldásomat.

Kulcsszavak: *KR, Cobot, UR, PLC, IPC, Beckhoff, TCP/IP, Modbus/TCP.*

1. Bevezetés

Az iparban egyre inkább nagyobb hangsúlyt kapnak a robotok, így a munka jelentős részét már nem ember végzi. Viszont vannak még olyan feladatok, ahol emberi beavatkozás is szükséges. Ez az oka annak, hogy KR-t fejlesztettek ki [1].

Egy robottal való kommunikációnak sokféle módja van. A robotokat leggyakrabban vezetékes, vezetékek nélküli vagy autonóm módon vezérlik [2].

Céлом az volt, hogy valósítsak meg egy kommunikációs megoldást KR és ipari vezérlő között.

2. Kiválasztott ipari vezérlő és robot

Miután megvizsgáltam a kollaboratív robotok és ipari vezérlők főbb tulajdonságait, kiválasztottam egyet-egyét közülük. Vezérlőnek én az **1. ábrán** látható Beckhoff CX5140 Embedded PC-t választottam. A KR, melyet kiválasztottam, az UR10 Cobot **2. ábra**, mely számos kommunikációs lehetőséggel rendelkezik, többek között támogatja a TCP/IP kommunikációs protokollt is. Mindkét eszköz programozása könnyen elsajátítható, bár az ipari vezérlő igényel némi előismeretet.



1. ábra. CX5140 Embedded PC [3]



2. ábra. UR10 Cobot [4]

3. Kommunikációs lehetőségek a kiválasztott rendszerek között

Három kommunikációs lehetőséget vizsgáltam meg. A TCP (transmission control protocol) az az internetes szabvány, amely biztosítja az adatcsomagok sikeres átvitelét az eszközök között a

hálózaton keresztül. A TCP az internetes protokollal (IP) együttműködve határozza meg az online adatcsere módját. A két protokollt együttesen TCP/IP-nek nevezzük [5].

A Modbus TCP nem más, mint a Modbus RTU üzenet elküldése egy Ethernet csomagba ágyazva, de a soros kapcsolat helyett hálózaton keresztül továbbítjuk az üzenet. A TCP/IP pedig a Modbus TCP-üzenetek átviteli közegét biztosítja. Egyszerűen fogalmazva, a TCP/IP lehetővé teszi az automatizálási eszközök közötti bináris adatblokkok cseréjét [6].

Az I/O modulok a legegyszerűbb módja a kommunikációnak. Feladatom rugalmasságához leginkább a TCP/IP kommunikációs protokoll illik, amely szerver/kliens alapú.

4. TCP/IP-szerver és kliensprogram

A kommunikáció megvalósítása érdekében a két ipari eszköz között a szerver/kliens rendszerben, egy vezeték LAN-kommunikáció létrehozására volt szükség. Szervernek az ipari vezérlőt választottam, míg kliensnek a robotot. Az eszközök IP-címeinek hálózati szegmensei megegyeznek, a szerver IP-címe: 192.168.2.100, a kliens IP-címe: 192.168.2.113. Ebből adódik, hogy az alhálózati maszk: 255.255.255.0, ez az IPv4 címtípus tartozik a C osztályába tartozik.

A beágyazott PC programját a Beckhoff saját fejlesztőkörnyezetében a TwinCat 3-ban írtam meg ST-nyelven. Az UR10 programját URSim Offline Simulatorában írtam meg, URScript-nyelven.

A **3. ábrán** látható a szerver állapotainak program részlete. A 0. állapot a hallgatói állapot, ilyenkor a szerver működik, és várja a bejövő kapcsolatot. Az 1. állapot sikeres kapcsolódáskor áll fel, majd innen a 2., azaz üzenetcsere-állapotba lép. Üzenetküldés után a 3. állapotba lép a program, majd, a 4. állapotba pedig a szerver lezárását követően lép a program.

A **4. ábrán** látható a kliensprogram részlete. A kliens megírásánál a BeforeStart szegmensben deklaráltam egy 'kapcsolat' és egy 'szerver' boolean változót. A 'szerver' változó értéke TRUE lesz, amint a kapcsolat létrejön a szerverrel. Majd a sikeres kapcsolat után a kliens üzenetet küld a szervernek, és belép az üzenetküldő/-fogadó állapotba. Előre definiált üzenetek alapján különböző feladatokat tud az UR-kliens végrehajtani, valamint a TCP/IP sajátosságának köszönhetően az üzenetek az elküldés sorrendjében érnek célba.

```

CASE nState OF
0: (* Listening State *)
  bReceive := FALSE;
  IF eState = eSOCKET_SUSPENDED THEN
    sMessage := 'Kapcsolatra vár...';
    MEMSET(ADR(sReceivedData),0,SIZEOF(sReceivedData)); (* Delete Received data *)
  ELSE IF eState = eSOCKET_CONNECTED THEN
    nState := 1;
  END_IF
END_IF
1: (* Connection State *)
  IF NOT fbServer.bBusy THEN
    IF NOT fbServer.bError THEN
      IF eState = eSOCKET_CONNECTED THEN(* Connected *)
        sMessage := 'Kapcsolat létrejött!';
        bReceive := TRUE;
        nState := 2;
      END_IF
    END_IF
  END_IF
2: (* Exchange data State *)
  (* ----- Receive data ----- *)

  IF NOT fbSocketReceive.bBusy AND NOT fbSocketReceive.bError THEN
    IF fbSocketReceive.nRecBytes = 0 THEN
      bDisableSendButton := TRUE; //Disable Send Button
      //IF there's no data received, reset the fbSocketReceive
      bReceive := TRUE;
    ELSE
      bDisableSendButton := FALSE; //Unlock Send Button
    END_IF
  END_IF
  (* ----- Send data ----- *)
  IF bSEND THEN
    bReceive := FALSE;
    fbSocketSend.bExecute := TRUE;
    MEMSET(ADR(sReceivedData),0,SIZEOF(sReceivedData)); (* Delete Received data *)
    nstate := 3;
    bSEND := FALSE;
  END_IF
3: (* Send data State *)
  MEMSET(ADR(sSentData),0,SIZEOF(sSentData)); (* Delete Sent data *)
  fbSocketSend.bExecute := FALSE;
  IF NOT fbSocketSend.bBusy AND NOT fbSocketSend.bError THEN
    fbSocketReceive.bExecute := TRUE;
    nstate := 1;
  END_IF
4: (* Disconnect *)
  IF bEnable THEN

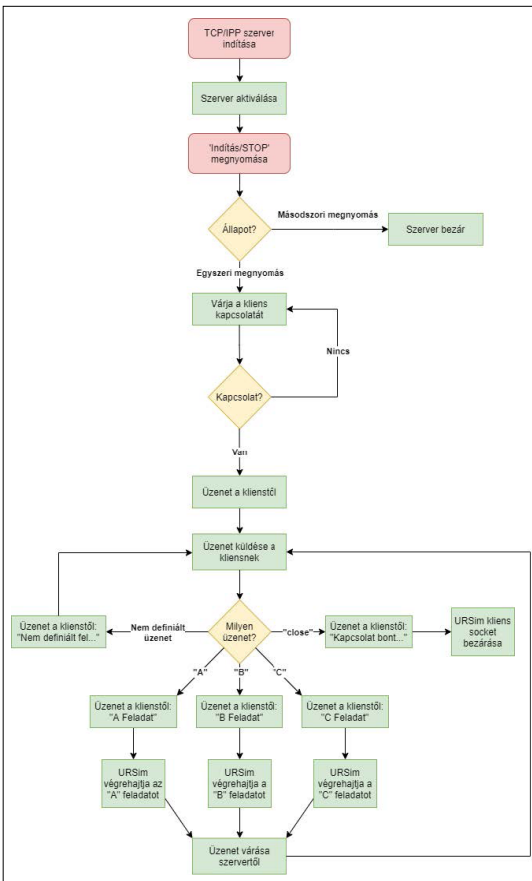
```

3. ábra. Szerverprogramrészlet

```

BeforeSt...
- kapcsolat:= False
- szerver:=socket_open("192.168.2.100",200)
  Loop szerver:= False
  - szerver:=socket_open("192.168.2.100",200)
Robot Program
- If kapcsolat:= False
  - socket_send_string("Kapcsolat 192.168.2.113 Robo
  - kapcsolat:= True
- Szerverüzenet:=socket_read_string()
- If str_len(Szerverüzenet)≥1
  - If Szerverüzenet≠"A"
    - socket_send_string("A feladat")
    - Movej
      - Waypoint_1
      - Waypoint_2
      - Waypoint_1
    - Elseif Szerverüzenet≠"B"
    - Elseif Szerverüzenet≠"C"
    - Elseif Szerverüzenet≠"close"
      - socket_send_string("192.168.2.113 Kapcsolat b
      - socket_close()
    - Else
      - socket_send_string("Nem definiál: feladat")
  
```

4. ábra. Kliensprogramrészlet



5. ábra. Szerver/kliens kapcsolat-folyamatára

5. A szerver/kliens kapcsolat működése

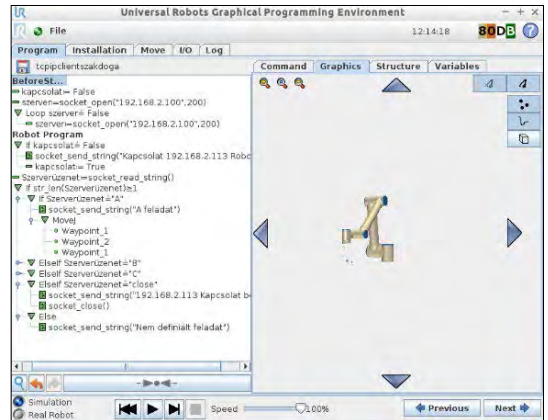
Az 5. ábrán látható folyamatára mutatja be a kapcsolat működését.

Legelőször a szervert állítom be, és indítom el. Majd miután a szerver várja a kliens kapcsolódási szándékát, elindítom a kliensprogramot is, és pár másodpercen belül létre is jön a kapcsolat, amennyiben minden beállítás megfelelő.

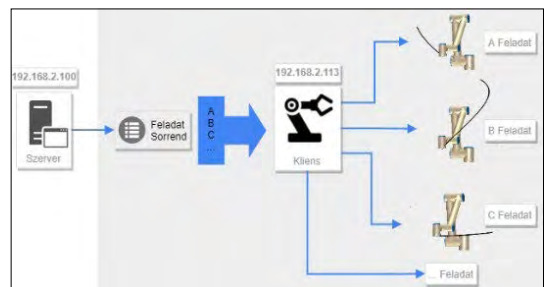
A 6. ábrán látható szimulációs környezetben megvalósított TCP/IP kapcsolat. A kapcsolat létrejötte után a szerver képes üzenetet küldeni, illetve fogadni a kientstől. Ez oda-vissza igaz. A 7. ábrán láthatók azok a feladatok, amelyeket a robotkliens képes végrehajtani a szerver utasításai alapján.

A kliensprogram itt most háromféle különböző feladatot tud végrehajtani a socket lezárásán és a „kaphat "A", "B" vagy "C" üzenetet" üzenet küldésén kívül. Kaphat "A", "B" vagy "C" üzenetet, és ennek megfelelőképpen hajtja végre az adott feladatot.

Ez a konfiguráció a két eszköz direkt összekapcsolásával jött létre. Viszont bizonyos esetekben router közbeiktatásával fejleszthetjük a kommunikációt, amennyiben több klienssel is szeretnénk egy szerverre csatlakozni.



6. ábra. Kapcsolat szimulációs környezetben



7. ábra. A robot feladatai

A megvalósított kommunikációt valóságban is leteszteltem a Vitesco debreceni lokációjában található UR10-es cobottal és egy CX5140 ipari vezérlővel.

6. Fejlesztések

A TCP/IP kommunikációs protokoll egyik nagy előnye, hogy könnyedén tudom bővíteni a szervert programomat, így akár több klienssel való kapcsolathoz is megírhatom azt. Viszont én most csak 2 klienses megoldást fejlesztettem ki. Ez azért fontos fejlesztés, mert ezzel lehetőség nyílik arra, hogy 2 robot kollaboratív módon egy munkatérben, közös időben tudjon dolgozni egy adott munkafolyamaton. Továbbá a robotok pozícióját be tudom olvasni és el tudom küldeni a másik robotnak. Ezt a fejlesztést továbbgondolva egy olyan kollaboráció alakul ki, amelyben nem csak az ember dolgozik együtt a robottal, hanem robot a robottal is azért, hogy képes a két eszköz egymással kommunikálni egy köztes TCP/IP szerveren keresztül. Így még biztonságosabban történhet az ipari munka.

A **8. ábrán** látható egyszerű Pick and Place-feladatot ellátó 2 KR az operátorral együtt dolgozik. A TCP/IP kommunikációs megoldás adta lehetőségeknek köszönhetően gyors adatcsere mehet végbe a két dolgozó robot között, illetve a szervert HMI-jén keresztül az operátor is képes nyomni a feladatot.

A **9. ábrán** látható szervert HMI-je lehetővé teszi a kezelő számára, hogy különböző utasításokat adjon a kliens számára.

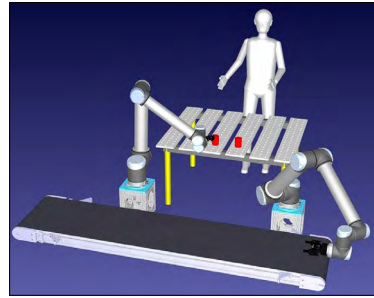
A **10. ábrán** látható 2. kliens kezelőfelületéről utasításokkal lekérdezhethetjük a robot pozícióját, majd később a rögzített állapotba vissza is vezérelhetjük a robotot. Ez a megoldás további lehetőségek számára ad teret, melyek kivitelezését későbbi tanulmányaim során tervezem.

7. Következtetések

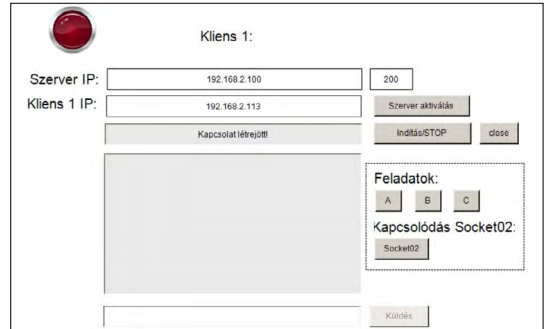
A projekt során kitűzött célok teljesültek, és ezek a projektbeszámolóban kifejtésre kerültek. A kommunikációs megoldás megvalósult szimulációs környezetben, illetve valós ipari berendezéseken is ki lett próbálva. Továbbfejlesztésként pedig egy biztonságosabb, kollaboratív tér megvalósítását realizáltam.

Köszönetnyilvánítás

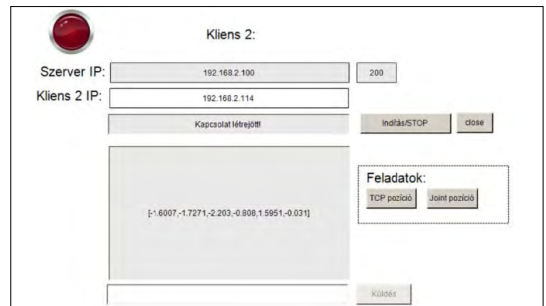
Ezúton szeretnék köszönetet mondani Kamrás Ádám Beckhoff szoftvermérnöknek, hogy segítette munkámat. Kamrás Ádám szakmai tudásával nagy segítségem volt a Beckhoff IPC-k működésének megértésében.



8. ábra. Kollaboráció ember és robot között



9. ábra. Szerver-HMI, 1.kliens



10. ábra. Szerver-HMI, 2.kliens

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Kollaboratív robotok (2021.09.20) <https://www.mmk.hu/informaciok/hirek/kollaborativ-robotok>
- [2] Kulcsár B.: *Robottechnika*. LSI Oktatóközpont, 1998.
- [3] Beckhoff Automation GmbH (2021.09.28) <https://www.beckhoff.com/hu-hu/products/ipc/embedded-pcs/cx5100-intel-atom/cx5140.html>
- [4] Universal Robots (2021.09.28) <https://www.universal-robots.com/cb3>
- [5] Casad J.: *TCP/IP in 24 Hours*. Sams Teach Yourself, Pearson Education (US), 2017.
- [6] Real Time Automation (2021.10.04) <https://www.rtautomation.com/technologies/modbus-tcpip>

SZERZŐK JEGYZÉKE

LIST OF AUTHORS

A – D

BAGYINSZKI GYULA 1
BITAY ENIKŐ 1
DARVAY ZSOLT 6, 11

E – F

ERDEI TIMOTEI ISTVÁN 60
ELEK PATRÍCIA 16
FARMOS RUDOLF-LÁSZLÓ 55
FORGÓ ZOLTÁN 46

G – J

GARFIELD ADRIENNE 6
GÁTI JÓZSEF 20
HUSI GÉZA 37, 60
JAKAB ZSANETT 11

K – L

KEREKES TAMÁS 25
KOC SIS IMRE 31
KORSOVECZKI GYULA 37
KOVÁCS TÜNDE ANNA 50
KUTI JÁNOS 20
LEDENYAK DANIEL 42

M – R

MENYHÁRT HUNOR 46
MUDABBIRUDDIN MOHAMMED 50
NÉMETHY KRISZTINA 20
PÁL PATRIK 37
PÁSZTOR JUDIT 55
ROSTA TAMÁS 42

S – Z

SIPOS DÓRA 31
SZABÓ ISTVÁN-SÁNDOR 55
SZÁNTÓ ATTILA 16
SZIKI GUSZTÁV ÁRON 16
TÓTH SZABOLCS BALÁZS 60