



**VILLAMOSENERGIA-FELHASZNÁLÁST
OPTIMALIZÁLÓ INNOVATÍV RENDSZER
FEJLESZTÉSE IPARI-, LAKOSSÁGI
FOGYASZTÓK ÉS ELEKTROMOS
JÁRMŰVEK SZÁMÁRA
2024**

**KONFERENCIA
ELŐADÁSAI**

Miskolc, 2024. április 22.

Miskolc

ISBN 978-963-358-334-0

Kiadta:

Miskolci Egyetem
Gépészmérnöki és Informatikai Kar
Fizikai és Elektrotechnikai Intézet
Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék

Szerkesztette:

Dr. habil. Bodnár István
egyetemi docens

Tudományos Bizottság tagjai:

Prof. Dr. Palotás Árpád Bence, Dr. habil. Bodnár István, Dr. Bencs Péter, Dr. Bölkény Ildi,
Dr. Dobó Zsolt, Dr. Garami Attila, Dr. Kozsely Gábor, Dr. Lengyel Ákos József,
Dr. Matusz-Kalász Dávid, Dr. Nagy Gábor, Dr. Olajos Péter, Dr. Pintér Judit Mária,
Dr. Rónai László, Somogyiné Dr. Molnár Judit, Dr. Szaszák Norbert

ISBN 978-963-358-334-0

Miskolc, 2024. április 22.

A kiadványban megjelenő publikációk lektoráltak!

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

A teljes felelősség a szerző(ke)t terheli!

ELŐSZÓ

A Miskolci Egyetem számos közleményt jelentet meg, amelyek évtizedek óta hozzájárulnak a tudományos élet fejlődéséhez. E fejlődéshez csatlakozva a *Villamosenergia-felhasználást optimalizáló innovatív rendszer fejlesztése ipari-, lakossági fogyasztók és elektromos járművek számára 2024* című konferencia előadásaiból készült publikációk elektronikus kiadványa a 2020-1.1.2-PIACI-KFI-2020-00138 azonosító számú projektben folytatott kutatómunkák legújabb közleményeit tartalmazza.

A 2020-1.1.2-PIACI-KFI-2020-00138 azonosító számú, „Villamosenergia-felhasználást optimalizáló innovatív rendszer fejlesztése ipari-, lakossági fogyasztók és elektromos járművek számára” című projektben a konzorcium vezetői feladatokat a PowerQuattro Zrt. látja el. A projekt konzorciumi tagja a Ferr-Váz Kft. és a Miskolci Egyetem. A projekt legfőbb célja olyan intelligens akkumulátoros energiatároló rendszerek fejlesztése, amelyek nem csak az ipari és a lakossági fogyasztókhoz, azok hálózataikhoz illeszthetők, hanem alkalmasak elektromos járművekben történő alkalmazásra is. A projekt két fő irányvonalat definiált. Az egyik projektrészben az ipari és lakossági felhasználásra szánt rendszerek kutatása, fejlesztése és innovációja zajlik. A másik projektrész kifejezetten az elektromos járművekre, kiemelten a városi közlekedésre alkalmas buszokra koncentrál.

A projekt során célul tűztük ki, hogy kidolgozunk egy olyan koncepciót, amely a belső égésű motorral szerelt autóbuszok elektromos meghajtásúvá történő átalakításának tervét tartalmazza a műszaki és gazdasági optimum figyelembevételével. A kutatómunkánk során tanulmányoztuk a rendelkezésre álló szakirodalmakat és különböző műszaki és gazdasági számításokat, valamint környezeti hatásvizsgálatokat végeztünk, amelyek eredményeként kijelölésre kerültek a lehetséges autóbuszok köre, amelyek átalakítása megtérülő befektetés. Jelen ismeretek alapján a CNG üzemű szóló buszok elektromos meghajtásúvá történő átalakítása a legcélszerűbb a belsőégésű motorral szerelt buszok közül.

Jelen kiadvány a projekt második szakaszának kutatási eredményeit mutatja be, amely eredmények nem csak szakirodalmi források tanulmányozásán és az első körös saját számítási, valamint mérési eredmények bemutatására koncentrál, hanem konkrét javaslatokat is megfogalmaz, amely a megvalósítási folyamat fontos elemeivé váltak.

A projekt vezetősége fontos feladatának tekinti a kutatómunka különböző szakágain folyó tudományos kutatási tevékenységnek színvonalas publikálási lehetőséget biztosítani. A színvonalat a szervezőbizottság azzal is biztosítani kívánja, hogy a kötetben megjelenő valamennyi cikk alapos lektorálási folyamaton és szerkesztőbizottsági értékelésen megy keresztül. A publikálásra elfogadott cikkek magas színvonalának az is záloga, hogy a cikkek lektorálásánál minden esetben törekedtünk az adott szakterületen elismert, és független kutatót, szakértőt felkérni. A lektorok észrevételeit a szerzők megkapták, ezzel is elősegítve a minőségi publikáció megjelenését. A lektorálás alapos és szakmailag igényes elvégzése nem kis feladatot ró a felkért lektorokra, amiért ezúton is köszönetünket fejezzük ki valamennyi közreműködő lektornak.

Kelt: Miskolc, 2024. április 22.

Tudományos Bizottság

TARTALOMJEGYZÉK

Ahmed Manaf Noofal Taha, Bencs Péter:

A járműfűtési és -szellőztetési rendszerek fejlesztési technikáinak áttekintése 5

Bencs Péter:

A közlekedés fejlődése során lehetséges jövő üzemanyagainak áttekintése 15

Bencs Péter, Nagy Nóra:

A hidrogénüzemű gépjárművek kockázatelemzésének áttekintése 23

Bodnár István:

Napelemes erőmű feszültségének vizsgálata 31

Bodnár István:

Használt napelemek teljesítménymérése 37

Bodnár István, Boros Rafael Ruben, Matusz-Kalász Dávid, Jobbágy Marcell:

Solar powered electric car with variable-voltage/variable frequency drive control 42

Boros Rafael Ruben, Bodnár István, Matusz-Kalász Dávid, Jobbágy Marcell:

Life cycle assessment of vehicles 51

Fekete Tamás, Tóth Dániel:

Méréstechnikák a szerszámgépiparban 59

Fekete Tamás, Tóth Dániel:

Lézeres mérés technikák a szerszámgépiparban 63

Kovács Attila, Somogyiné Molnár Judit, Jármái Károly:

EV töltők villamos analízise 68

Kozsely Gábor:

A napelem cella p-n átmenetének modellezése 76

Matusz-Kalász Dávid, Bodnár István, Boros Rafael Ruben, Szabó Norbert:

Range-reducing effect of contaminants in case of solar vehicles 85

Matusz-Kalász Dávid, Bodnár István, Jenyó Tamás, Kozsely Gábor:

Li-ion akkumulátor cellák túltöltése 94

Rónai László, Lénárt József:

Polaritás és töltöttségi szint meghatározó rendszer fejlesztése Li-ion akkumulátorhoz 102

Szabó Norbert:

Szuperkondenzátor mérésére szolgáló LabView program megvalósítása 106

Szaszák Norbert Tibor:

Li-ion akkumulátor villamos paramétereinek hőmérséklet-függése 111

Szaszák Norbert Tibor, Lengyel Ákos József:

Li-ion akkumulátor villamos paramétereinek hőmérsékletfüggése – a mérőrendszer összeállítása 117

A JÁRMŰFŰTÉSI ÉS -SZELLŐZTETÉSI RENDSZEREK FEJLESZTÉSI TECHNIKÁINAK ÁTTEKINTÉSE

REVIEW OF VEHICLE HEATING AND VENTILATION SYSTEMS DEVELOPMENT TECHNIQUES

AHMED Manaf Noofal Taha¹, BENCSC Péter²

¹doktorandusz, manaf.noofal.taha.ahmed@student.uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet,
Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Intézeti Tanszék

² Ph.D., egyetemi docens, peter.bencs@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet,
Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Intézeti Tanszék

Kivonat: Ez a kutatás a járművek fűtési és szellőztetési rendszereinek javítási lehetőségeire összpontosít. Az autópárk ezekben az években teljes technológiai átalakuláson megy keresztül a különböző környezetbarát megoldások bevezetésével. Különösen a villamosítás jelent további kihívásokat a jármű körüli és a jármű belsejében lévő légellenállás javítására, valamint a belső hőáramlás szabályozására és javítására irányuló tanulmányokkal összefüggésben. A légáramlások és a hőveszteségek megfelelő szintű szabályozása prioritást élvez, ezért ez a tanulmány ezzel foglalkozik. A javítás érdekében új mérési technikák kerülnek kiemelésre, amelyeket a további kutatás során figyelembe vesznek. Ebben a kutatásban a gépjárművek fűtési és szellőztetőrendszereinek jövőbeli fejlesztési irányait vizsgáljuk.

Kulcsszavak: HVAC, optikai mérések, BOS, légáramlás, hőveszteség

Abstract: This issue focuses on the potential for improving vehicle heating and ventilation systems. The automotive industry is undergoing a complete technological transformation in these years with the introduction of various environmentally friendly solutions. In particular, electrification poses further challenges in the context of studies to improve air resistance around and inside the vehicle and to control and improve internal heat flows. The appropriate level of control of air flows and heat losses is a priority and is therefore addressed in this publication. New measurement techniques for improvement are highlighted and will be considered for further research. In this paper, future development directions for automotive heating and ventilation systems are explored.

Keywords: HVAC, optical measurement, BOS, airflow, heat loss

1. BEVEZETÉS

A fűtési, szellőzési és légkondicionáló rendszerek (HVAC) a járműipar egyik kiemelt kutatási területe. Ennek oka a jármű magas energiafogyasztása. Egy másik ok, hogy az autók villamosításával a HVAC érzékenyebbé válik a hőáramlásnak az elektromos jármű fő meghajtására - az akkumulátorra - gyakorolt közvetlen hatása miatt.

A járművek villamosítása egyre inkább szükségessé vált a piacon a széndioxid-kibocsátásra és a károsanyag-kibocsátásra vonatkozó adószabályok miatt, például Kínában és az Európai Unióban. Mindazonáltal a hagyományos járművek iránti igény még mindig versenyben van az elektromos járművek (EV-k) igényével. Ennek hátterében az időigényes töltés, a töltőállomások szűkössége és az EV-k vásárlóinak megítélése áll [1].

A hagyományos vagy elektromos járművek HVAC-rendszerei jól optimalizálhatók és fejleszthetők a mérési beállítások megfelelő kiválasztásával, amelyek jobban szemléltetik az ilyen rendszerekben előforduló áramlási és hőveszteségeket. Az optikai mérések hatékony eszközök ezen a területen, és gyors fejlődésnek voltak tanúi, így kialakításuk egyszerűbbé és sokoldalúbbá

lúbbá vált. A részecskekép-sebességmérést (PIV) és a Schlieren-méréseket széles körben alkalmazzák különböző alkalmazásokban, különösen a HVAC területén. A tervezésükben és a különböző rendszerekbe való integrálásukban elért előrelépések ráadásul csökkentik a fejlesztési ciklust, és további fejlesztéseket indukálnak ezekben a rendszerekben. Valójában hiányoznak az ilyen optikai mérőrendszereknek a járművek HVAC-rendszerébe történő integrálásával kapcsolatos szakirodalmi adatok, különösen a PIV- és Schlieren-mérések, amelyek a digitális kamerák és a képalkotási technikák fejlődésével jelentős fejlődésnek indultak.

Ebben a cikkben az akkumulátoros-elektromos járművek (BEV) hőátadási kérdéseivel foglalkozunk. Ezután a HVAC-rendszerekben végzett optikai mérések néhány felhasználási példáját mutatjuk be, amelyek a járművek HVAC-rendszerében alkalmazhatók. Végül a legújabb és innovatív optikai mérési megoldásokat mutatjuk be a járművek HVAC-rendszeréhez.

2. AZ ELEKTROMOS JÁRMŰ AKKUMULÁTORÁNAK KEZELÉSE

A hőmérséklet döntő szerepet játszik az akkumulátorok életciklusában az elektromos járművek esetében. A lítium-ion akkumulátorok működési hőmérséklettartománya 15 és 35 °C között van. A magasabb hőmérséklet csökkenti a lítium-ion akkumulátor ciklusszámát; például 45 °C-on ennek az akkumulátornak a ciklusszáma 3323 ciklus; azonban a hőmérséklet 60 °C-ra történő emelése a ciklusszámot 800 ciklusra csökkenti. Továbbá a hőmérséklet emelkedése az akkumulátor teljesítményének csökkenését okozza. Például 50 °C-on 800 ciklus után az akkumulátor teljesítményének több mint 60%-a csökken, míg 55 °C-on 500 ciklus után a teljesítmény 70%-a csökken [2].

Ezt a problémát az akkumulátor hőkezelő rendszerével (BTMS) - az akkumulátor agyával - oldották meg. A BTMS fő funkciója az akkumulátor hőmérsékletének egy adott értéken tartása hűtéssel. A BTMS-nek számos típusa létezik, és ezeket az 1. táblázat szemlélteti [2].

A Li-ion akkumulátorokat az alacsony hőmérséklet is befolyásolja, mivel a kisütési kapacitásuk csökken. Például -10 °C-on a 2,2 Ah kapacitású akkumulátor kapacitása 1 C kisütési sebesség mellett 1,7 Ah-ra csökken, vagy ellenkező esetben 0,9 Ah-ra csökken 4,6 C-s kisütési sebesség fenntartása esetén. A probléma kezelésére különböző előmelegítési technikákat alkalmaznak.

1. A folyadékfűtés egyenletes hőmérsékletet biztosít az akkumulátorcellákban. Ezenkívül nagyobb a hőátadási hatékonysága a levegővel történő fűtéshez képest.

2. Vezetékes fűtésről akkor beszélünk, amikor a fűtőelemek közvetlenül az akkumulátorcellákhoz vannak csatlakoztatva, így a hőveszteség a hőátadás során csökken.

1. táblázat: Különböző BTMS típusok hűtéshez [2].

BTMS típus	Megjegyzések
Légűtéses	<ul style="list-style-type: none">- Költséghatékony,- Egyszerű,- Biztonságos,- Könnyű,- Könnyen karbantartható stb.
Folyadékűtéses	<ul style="list-style-type: none">- Nagyobb hőteljesítmény, és- jobb hatásfok
PCM-alapú	<ul style="list-style-type: none">- A nagy mennyiségű hőfelvétel a PCM-ek látens hőjének köszönhető.
Hőcső (HP) alapú	<ul style="list-style-type: none">- Az utóbbi években széles körben használják,- A HP-k csekély mennyiségű folyadékkal töltött hőátadó csövek.

Hibrid	<ul style="list-style-type: none">- Egyesíti két vagy több BTMS-típus előnyeit, és- kiküszöböli a kombináció hátrányait.
Egyéb újabb típusok	<ul style="list-style-type: none">- Például: hidrogélek, termoelektromos és hideg hidrogén.

3. A belső fűtés kihasználja az akkumulátor magas impedanciáját alacsony hőmérsékleten az elektrokémiai reakcióból származó jelentős mennyiségű hő előállítására, amikor az áram átfolyik [2].

3. OPTIKAI MÉRÉSEK HVAC RENDSZEREKBE A JÖVŐBELI JÁRMŰALKALMAZÁSOK SZÁMÁRA

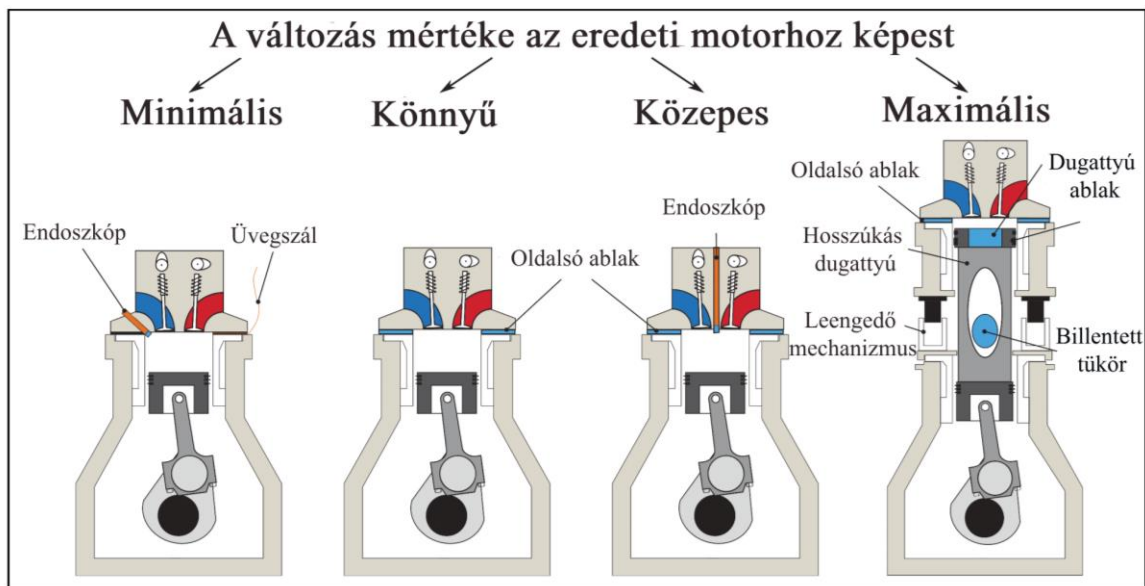
A múltban a Schlieren-mérési technikát minőségi mérőrendszernek tekintették a lézer Doppler-áramlásméréshez (LDA), a részecske-képebbességméréshez (PIV) és a lézerholográfiához képest. Mindazonáltal a digitális képalkotás és annak feldolgozása terén elért fejlődéssel a Schlieren-mérés kvantitatívabb mérőeszközzé vált, amely gyors sebességgel nyert, kiváló minőségű áramlási képalkotást biztosít. Ezenkívül számos területen alkalmazható, többek között a beltéri levegőminőség, a hőkomfort és a HVAC területén [3]. Háttér Schlieren mérés a BOS, a legjelentősebb és legújabb fejlesztés a Schlieren rendszerben. Számos előnye van, többek között a hordozhatósága és a természetes hátterek felhasználásának lehetősége. Emellett jelentősen széles látómezőt biztosít, legalább fele akkora, mint a háttér [4].

A BOS az áramlási mezőben lévő sűrűséggradiensek által okozott fényelhajlást használja fel a háttérintézet megjelenítésére. Következésképpen a háttér hatással van az áramlás vizualizációjára és a kapott hőmérsékleti adatokra. A háttér BOS-rendszer eredményeire gyakorolt hatásának ellenőrzésére kísérletet tartottak egy zárt szélcsatornában egy fűtött rúd mellett elhaladó örvényutca hőmérsékleti mezőjének vizualizálásával. A mérés megismétlése után 28 különböző háttérrel eltérő eredményeket kaptunk. Ezután a 28 hőmérsékleti görbét összehasonlítva a környezeti és hengeres környezettel, egy háttérrel választottunk ki a legjobbnak, amely reális eredményeket szolgáltatott [5].

Az optikai mérések hagyományos motorba történő integrálásának hatásának vizsgálatára és az égési viselkedésre gyakorolt hatásának nyomon követésére ugyanannak a motornak három beállítását vizsgálták. Ezek a teljesen fémből készült motor, a teljes terhelésű optikai motor és a módosított, teljes optikai motor, lásd az 1. ábrát. A teljesen fémből készült motort termodinamikai kísérletekkel vizsgáltuk. A teljes terhelésű optikai motort egy LaVision vízhűtéses ultraibolya endoszkópjúrával szerelték fel, amelyet a hengerpalást és a hengerfej közé helyeztek be. Ebben az elrendezésben mind az égéstér, mind a hézaghossz a módosítás miatt kissé megváltozik. A teljes optikai motor elrendezése megegyezik a második motoréval, azonban egy halszem endoszkóp helyettesítette az egyik kipufogószelepet, ami tovább módosítja a sűrítési arányt. A halszem-endoszkóp 180 fokos szögben, 45 fokos tükörrel képes hibázni [6].

Az első és a második beállítás összehasonlítása azt mutatta, hogy mindkettő képes elérni a névleges terhelést, miközben az égési jellemzők kis mértékben eltérnek, ami a vízhűtéses endoszkópjúrával csökkentett hőmérsékletének köszönhető. Még az égési viselkedés ezen enyhe különbsége ellenére is a motor összes szénhidrogén-kibocsátásában a különbség körülbelül 50%-os. Az első és a harmadik beállítás összehasonlításakor azok összehasonlíthatóak, különösen, ha a geometriai értékek eltolódását és a hőmérséklet-változást figyelembe vesszük, annak ellenére, hogy a hengerfal hőmérsékletében jelentős eltérés mutatkozik, ami a csökkent hűtőközeg-hőmérsékletnek és a kihagyásos tüzelési üzemmód adaptációjának tulajdonítható. Emellett a második beállítás további módosítása javasolt a motor kibocsátásának jobb összehasonlíthatósága érdekében a holt térfogat csökkentésével. Ezért a teljes optikai motorbeállítás összehasonlítható égési viselkedést mutatott [6].

A hivatkozáson kívül [5], a maximális hosszúságú szekvencia (MLS) háttérképet használtak a ventilátoros fűtőberendezések forró levegőáramlásának BOS-mérésének javítására. Az MLS egy 0 és 1 közötti, $L = 2n - 1$ hosszúságú pseudo-véletlenszerű számhalmaz, ahol n egy egész szám. Nulla késleltetésnél az egypólusú MLS függvények normalizált autokorrelációja 1, míg a többi késleltetésnél $4/(L-3)$. Ez a szekvencia robusztus a külső zajjal szemben, és a szekvenciák teljes hosszát érinti. Ezután a kínai maradéktétel, amely az összes 1D szekvencia 2D képmátrixba történő átalakításának technikája, az ideális autokorreláció megőrzésével és zajelutasítási jellemzőkkel alkalmazzuk. Végül a szekvenciát átlósan egy képmátrixba csomagoljuk. Ez a háttérjavítási módszer kiváló minőségű és sima képet eredményezett anélkül, hogy a BOS-beállításhoz további eszközöket kellett volna bevezetni, mint például a lekérdezési ablakokat [7].



1. ábra: Az optikai mérések hozzáférhetőségi foka [6].

A légkondicionálás és az emberi kényelem témakörében az ember által termelt hőtermelést vizsgálták. Az emberrel analóg, fűtött próbabábut készítettek. Egy új, egytükrös, nagymezős, nagy érzékenységű Schlieren optikai berendezést helyeztek üzembe, és a próbabábu hőfűvójának képét az áramlási sebesség minőségi adataival együtt megkapták, és összehasonlították a termisztor és a forródrótos áramlásmérőből kapott adatokkal.

A 2. ábrán látható Schlieren-berendezés a következőkből áll:

1. Gömb alakú tükör.
2. Fényforrás (LED).
3. Kés élű Schlieren levágás.
4. Digitális kamera.
5. Négykerékű kerekek.
6. Három szintezőbuborék.
7. Nagy kézikerek a tükör magasságának szabályozásához.
8. Vonalzót a tükörközép magasságának szabályozásához.

A mérési művelet elve a következő:

1. A tükör tengelyének görbületi sugaránál a fényforrást elhelyezzük.
2. A tükör visszaveri a fényforrástól elhajló fényt, amelynek hatására az a próbabábu fölött

lévő hőtölcsérrel ütközik, és ugyanazon az úton tér vissza. A Schlieren-objektum minden pontján azonos fénysugár halad át.

3. A hőtölcsér hatására a sugarak megtörnek, ami árnyékot eredményez, amikor a Schlieren-határoló által lefelé megtörnek. Ezzel szemben a sugarak fényesnek tűnnek, amikor felfelé törnek meg. Ennek eredményeképpen az áramlási jellegzetesség láthatóvá válik.

A próbabábu felszíni hőmérséklete 34 °C , ami az emberi test hőleadását szimulálja. A Schlieren-képek elkészítése után a képfeldolgozáshoz a PIVlab programot használtuk. A Schlieren-képekből kinyert adatokat és az áramlásmérési adatokat összehasonlítva mindkettő azonos alakú Gauss-profilokat eredményez; mindazonáltal turbulens fúvókák esetén a Schlieren-mérés középvezetési (CL) sebességértékei feleannyira vannak, mint az áramlásmérési értékek. Ezért arra lehet következtetni, hogy a PIV és az áramlásmérési tömbök CL-sebességértékei a Schlieren-értékek kétszeresei. A dolgozat szerzője ezt a Schlieren-bevezetését ajánlotta a HVAC, a beltéri levegőminőség és a hőkomfort elemzéséhez [3].



2. ábra: Schlieren képalkotási elrendezés [3].

4. A JÁRMŰVEK HVAC MÉRŐBERENDEZÉSEINEK LEGÚJABB FEJLESZTÉSEI

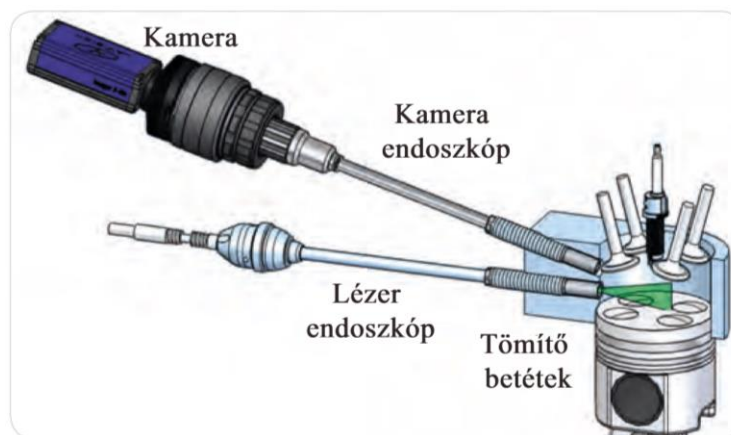
Ebben a szakaszban a járművekben alkalmazott HVAC-rendszerek területén újonnan kifejlesztett optikai mérőeszközöket mutatjuk be, hogy azok beépíthetők legyenek ezekbe a rendszerekbe. A LaVision az egyik úttörő cég ezen a területen. Ezért az ő eszközeit tárgyaljuk. A fejezet végén részletesen bemutatunk egy, a Miskolci Egyetemen nemrég megvalósított kísérletet, amely szintén kombinált optikai mérést alkalmaz.

A hengeren belüli optikai motorjelző (ICOS) (3. ábra) a kipufogógáz koncentrációjának és a gáz hőmérsékletének mérésére szolgáló eszköz. Gyors adatátviteli sebességet biztosít (kHz-es tartományban). A láng terjedési sebességének, a korom hőmérsékletének, koncentrációjának stb. mérésére a hengerbe épített endoszkópos képalkotás alkalmas. Ez a készülék állítja elő a megvilágítást és végzi a képalkotást nagy felbontással és nagy sebességű felvételkészítéssel. Ezenkívül sokoldalú és a motorhoz igazodik, beleértve a tömítőhüvelyeket is [8].



3. ábra: Endoszkópos hengerbe épített képalkotó rendszer [8].

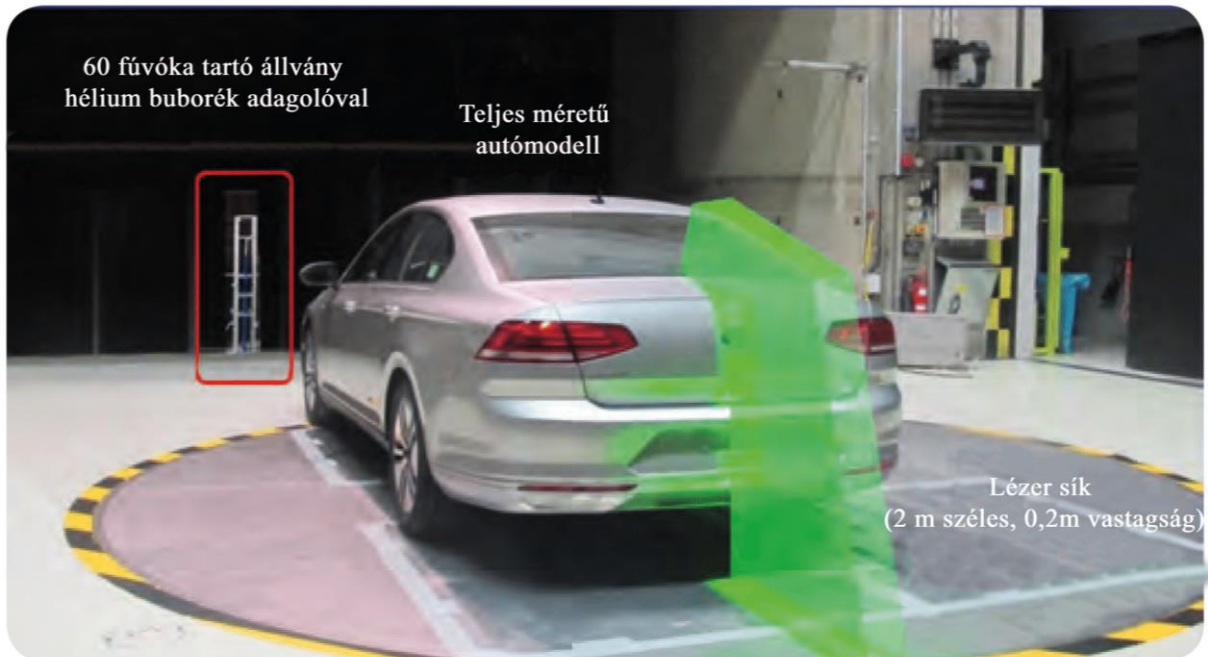
A PIV-technikákhoz áttérve, a hengeren belüli lézeres képalkotó készüléket elsősorban a hengeren belüli áramlási mezők, az NO_x-képződés és a keverékképződés képalkotására használják (4. ábra). Elve a PIV-en alapul. A forgattyúszöggel felbontott hengeren belüli lézeres képalkotás impulzuslézerefénylapokat használ átlátszó motorokban vagy kulcslyuk képalkotást minimálisan invazív endoszkópokkal. A forgattyúszög-leolvasásokat integrálják a motor kódoló jeleivel, hogy pontosan nyomon követhessék a motor olyan üzemmódjait, mint a kihagyásos, a hidegindításos és a gyorsítási üzemmódok. Az endoszkópos PIV-nek köszönhetően minimális optikai hozzáférés, a hengeren belüli részecskemozgás nagysebességű filmjei, valamint a képalkotáshoz és a lap megvilágításához szükséges endoszkópos hozzáférés jellemzi. Egy másik PIV mérőeszköz, de most már a részecskekövetési sebességméréssel (PTV) kombinálva, a FlowMaster PIV rendszer, amely az áramlás pontos és valós idejű mezejét vizualizálja. Lehetővé teszi a távvezérlést, és adatai szinkronizálhatók egy másik szélcsatorna vizsgálati paramétereivel. Ez egy pontos és önkalibráló mérőeszköz, amely a sebességadatokból nyomásmérőt tud mérni. Továbbá nagy látómezőket képes lefedni a héliumbuborék-vetőnek és a 3D-s áramlási mezők letapogatására szolgáló 3D-s kamerarobotnak köszönhetően, lásd a 5. ábrát. Továbbá a 5. ábra mutatja ennek a berendezésnek az elrendezését [8].



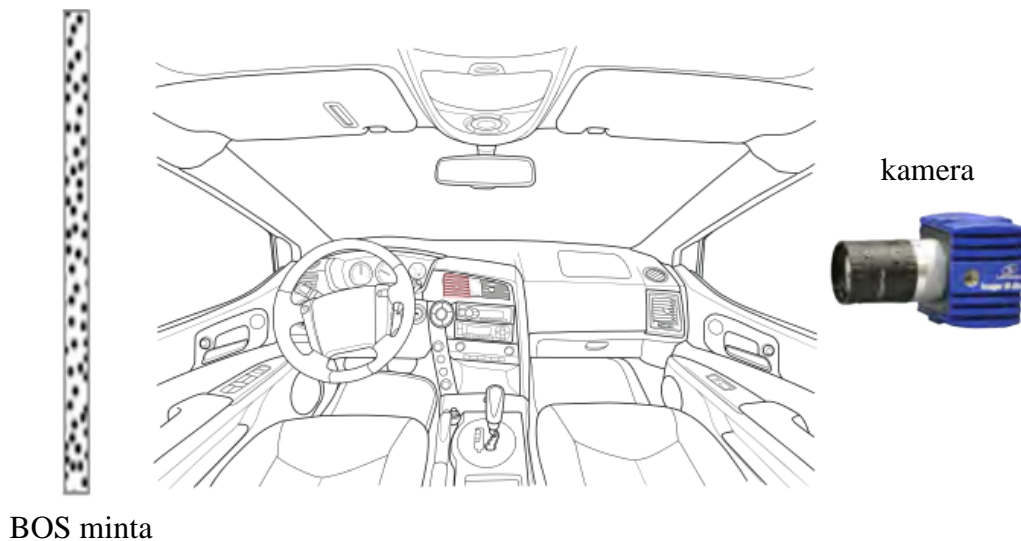
4. ábra: Hengerbe épített lézeres képalkotó rendszer [8]

A járművek beltéri áramlásának vizualizálásához a Schlieren-elvre épülő FluidMaster BOS költséghatékony és egyszerű alternatívát jelent a lézeres képalkotási módszerekhez képest (lásd a 6. ábrát). A készülék rendkívül érzékeny a levegő hőmérsékletének gradiensére vetés nélkül. Egyszerű a beállítása, és rugalmasan használható a jármű belsejében, különösebb módosítások

vagy előkészületek nélkül. Ezenkívül valós idejű képfeldolgozási képességet biztosít [8].



5. ábra: FlowMaster PIV és PTV rendszer elrendezése [8].

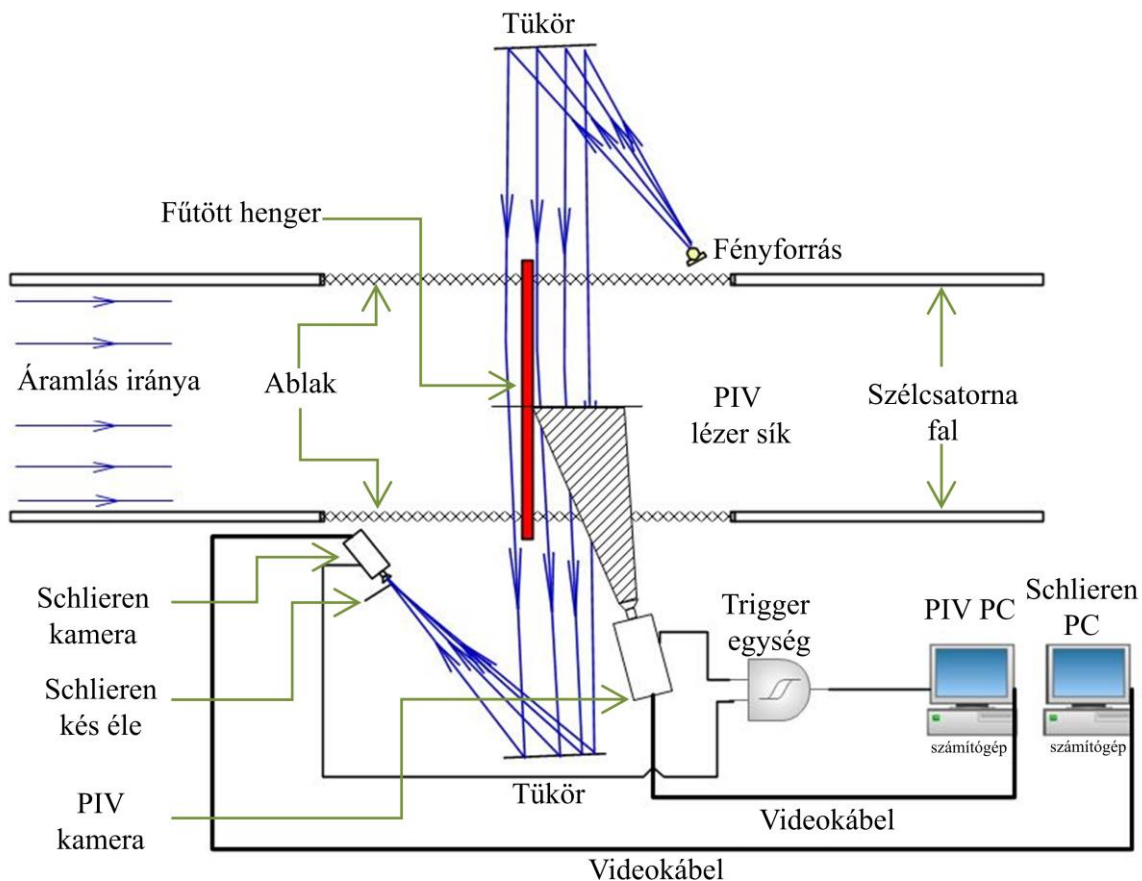


6. ábra: FluidMaster BOS rendszer elrendezése [8].

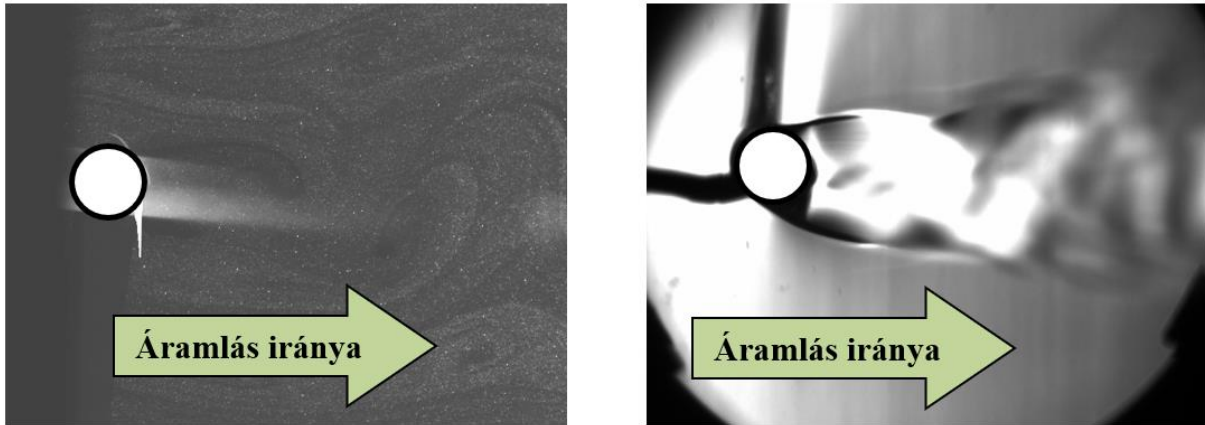
A Miskolci Egyetemen egy kapcsolódó kísérletet hajtottak végre. Ez a kísérlet alkalmazható a hőáramlás és az örvények mérésére a hőcserélőben, amely a járművekben a HVAC rendszerek létfontosságú alkatrészének tekinthető. A kísérlet két optikai mérést kombinál a hőmérséklet-mező és az áramlási sebesség egyidejű mérésére PIV és Schlieren mérőrendszerek segítségével. Egy kör alakú hengert párhuzamos áramlásnak vetettek alá egy szélcsatornában, amelyet különböző hőmérsékletre fűtöttek fel. A 7. ábrán látható, hogy a mérőrendszer egy Z-típusú Schlieren és 2D-PIV rendszerrel összekapcsolt, a PIV kamera, a Schlieren kamera és a PIV lézer kimenetének szinkronizálására szolgáló kioldórendszerrel. A PIV-rendszer egy objektívől, egy kettős képkockás CCD-kamerából, egy kétimpulzusos Wd-YAG lézerekből, egy PIV-szoftverből és egy markolókárttyából; valamint egy trigger egységből áll. A Schlieren-rendszer egy

objektívából, egy CCD-kamerából, egy Schlieren-fényforrásból, egy PC-ből szoftverrel és egy firewire-kártyából; valamint Schlieren-tükrökből áll. A mérési rész megvilágítása LED fényforrással történik. A PIV rendszer a sebességmezőt méri, és pontossága elsősorban a részecskék sűrűségétől, eltolódásától és átmérőjétől, valamint a háttérzajtól függ. Mindezen paramétereket optimalizáltuk, és a zaj eltávolítására egy magas átjárású szűrőt használtunk. Ezenkívül az utófeldolgozáshoz minimális korrelációs szűrőt alkalmaztak a PIV-képekre. A Schlieren-rendszer a hőmérséklet-áramlást méri, és pontossága a háttérben lévő fényzajtól függ. Ezért a Schlieren-méréseket sötét szobában végezték. Ezenkívül a mérés előtt a henger mögött egy egyponos hőmérsékletmérést rögzítettek a Schlieren-képek utólagos feldolgozásának validálása céljából [7].

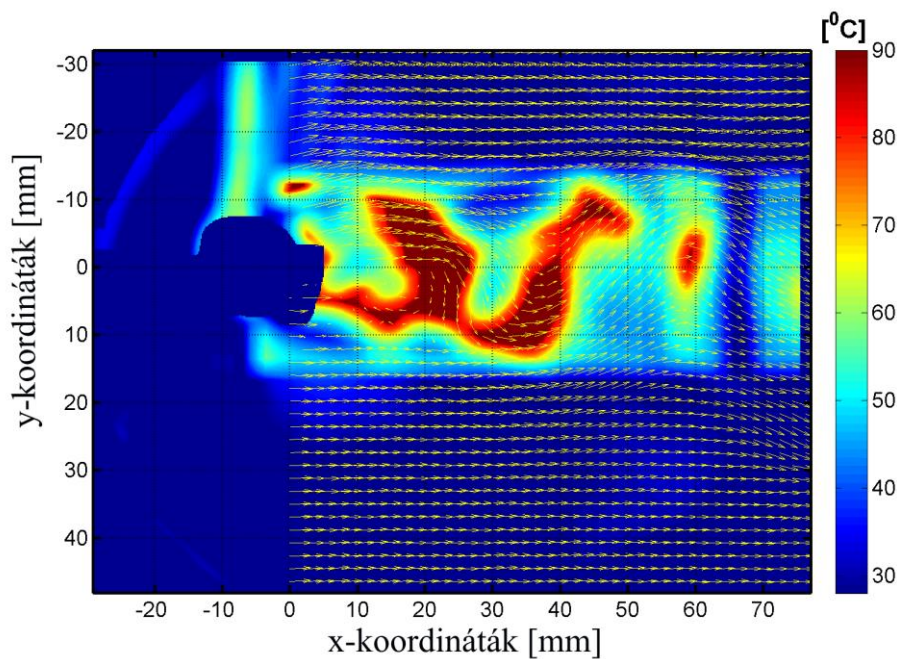
A 8. ábra a PIV-rendszer (balra) és a Schlieren-rendszer (jobbra) nyers képeinek mintáját mutatja. Ezen az ábrán mindkét képen észrevehető az örvényleválás, és a Schlieren nyers képen jól látható a levegő sűrűségkülönbsége miatti fénytörés. A PIV-képek a sebességvektormezőképek kinyerése érdekében egy dewarping-folyamaton mentek keresztül, míg a Schlieren-képeket maszkolással dolgozták fel, és így kapták meg a hőmérséklet-mező képeit. A 8. ábrán látható mintaképek feldolgozásának eredménye a 9. ábrán látható, amelyen mind a hőmérsékleti mezőt, mind a sebességvektormezőt megkaptuk. Ebből a kísérletből kiderült, hogy a Schlieren-képek még további javításra szorulnak a nagyobb pontosság érdekében, és ezt a jövőben meg fogjuk valósítani [9].



7. ábra: A kísérlet elrendezésének vázlatja [7].



8. ábra: PIV (balra) és Schlieren (jobbra) nyers mintaképek [9].



9. ábra: Hőmérsékleti mező és sebességvektormező eloszlása ugyanarról a mintáról a képfeldolgozás után [9].

5. ÖSSZEFOGLALÁS

Ebben a tanulmányban az EV-kel kapcsolatos termikus légáramlási és hőveszteséggel kapcsolatos kérdések, valamint a szakirodalmi áttekintésből származó megoldások kerülnek bemutatásra. A fejlett optikai mérések felhasználását és azok hagyományos és elektromos járművekbe történő integrálását tárgyaljuk. Továbbá, hogy lépést tartjunk a rendelkezésre álló, járművekre specializált optikai mérőeszközök fejlődésével, áttekintjük az újonnan kifejlesztett optikai eszközöket, hogy azok integrálhatók legyenek a 3. szakaszban tárgyalt különböző járművek HVAC-rendszereibe.

Egy újonnan megvalósított kísérletet szemléltetünk, amely két optikai eszközt használ áramlásmérésre. Ez a kísérlet a járművek HVAC területén alkalmazható. Azonban további fejlesztésre szorul. Ennek eredményeképpen ez egy jövőbeli irányvonal lesz, amelyet meg kell valósítani.

6. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] I. CVOK, I. RATKOVIĆ, AND J. DEUR, “*Multi-objective optimisation-based design of an electric vehicle cabin heating control system for improved thermal comfort and driving range,*” *Energies* (Basel), vol. 14, no. 4, Feb. 2021, doi: 10.3390/en14041203.
- [2] P. BENCS: Busz hűtési rendszerek áttekintése az átalakítási folyamatban GÉP 74 : 2-3 pp. 30-34. , 5 p. (2023)
- [3] A. W. GENA, C. VOELKER, AND G. S. SETTLES, “*Qualitative and quantitative schlieren optical measurement of the human thermal plume,*” *Indoor Air*, vol. 30, no. 4, pp. 757–766, Jul. 2020, doi: 10.1111/ina.12674.
- [4] G. S. SETTLES AND M. J. HARGATHER, “*A review of recent developments in schlieren and shadowgraph techniques,*” *Measurement Science and Technology*, vol. 28, no. 4. Institute of Physics Publishing, Apr. 01, 2017. doi: 10.1088/1361-6501/aa5748.
- [5] P. BENCS,; SZ. SZABÓ; R. BORDÁS; T. DOMINIQUE AND Z. KATHARINA.: “*Influence of Background Pattern on the Temperature Field Measured by Background Oriented Schlieren*” In: National, Academy of Sciences of Belarus Luikov Heat; Mass, Transfer Institute (szerk.) ISFV-15 The 15th International Symposium on Flow Visualization Minsk, Fehéroroszország : [s. n.] (2012) pp. 1-10. , 10 p.
- [6] S. KARMANN, S. EICHELDINGER, M. PRAGER, M. JAENSCH, AND G. WACHTMEISTER, “*Experimental comparison between an optical and an all-metal large bore engine,*” *International Journal of Engine Research*, vol. 24, no. 3, pp. 1223–1238, Mar. 2023, doi: 10.1177/14680874221082794.
- [7] M. J. ADKIN AND J. LAMB, “*Large Field Background Oriented Schlieren for Visualising Heated Air Projection of Fan Heaters,*” 2014.
- [8] “LAVISION AUTOMOTIVE INNOVATIVE MEASUREMENT TECHNOLOGIES.” Accessed: Feb. 15, 2024. [Online]. Available: <https://www.lavision.de/en/download.php?id=1316>
- [9] P. BENCS; SZ. SZABÓ AND O. DARIA: “*Simultaneous Measurement of Velocity and Temperature Field Downstream of a Heated Cylinder*” In: Car, Zlatan; Kudláček, Jan; Pepelnjak, Tomaž (szerk.) International Conference on Innovative Technologies, IN-TECH 2012

A KÖZLEKEDÉS FEJLŐDÉSE SORÁN LEHETSÉGES JÖVŐ ÜZEMANYAGAINAK ÁTTEKINTÉSE

REVIEW OF FUTURE FUELS IN TRANSPORTATION

BENC S Péter

Ph.D., egyetemi docens, peter.bencs@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet,
Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Intézeti Tanszék

Kivonat: A kutatás elsődleges célja a fosszilis tüzelőanyaggal működő járművek üvegházhatású gázkibocsátásra gyakorolt hatásának vizsgálata. Tekintettel a műszaki fejlődés lehetőségeire, a fosszilis tüzelőanyaggal működő járművek fokozatos kivonása egyre gyorsul. A prioritás az üvegházhatású gázok semlegességének mielőbbi elérése a közlekedésben. Ez a tanulmány bemutatja a különböző hajtásláncok hatását az üvegházhatású gázok semlegességének elérésére (különös tekintettel a kombinált technológiák hatására), valamint az akkumulátoros elektromos járművek hatását az üvegházhatású gázok semlegességének elérésére. A tanulmány különböző forgatókönyvek alapján megmutatja, hogy a különböző technológiák kombinációja hatékonyabb az üvegházhatású gázok csökkentésében, mint egy teljesen tiszta technológia.

Kulcsszavak: üzemanyag, közlekedés, üvegházhatás, dízel

Abstract: The primary objective of this research is to investigate the impact of fossil fuel vehicles on green-house gas emissions. Given the potential for techno-logical progress, the phase-out of fossil fuel vehicles is accelerating. The priority is to achieve green-house gas neutrality in transport as soon as possible. This study will present the impact of different powertrains on achieving greenhouse gas neutrality (with a particular focus on the impact of combined technologies) and the impact of battery electric vehicles on achieving greenhouse gas neutrality. The study will show, under different scenarios, that combining different technologies is more effective in reducing greenhouse gases than a completely clean technology.

Keywords: fuel, transport, greenhouse, diesel

1. BEVEZETÉS

A légkör szén-dioxid szintje 403 ppm koncentrációban riasztó szintet ért el. A tüzelőanyagok égetése során a szén oxidációjából származó CO₂ teszi ki a globális antropogén üvegházhatású gázkibocsátás legnagyobb részét [1]. Ennek eredményeképpen a globális felszíni középhőmérséklet az iparosodás előtti szinthez képest körülbelül 1 °C-kal emelkedett [2]. A globális felmelegedés lassítása vagy megállítása érdekében a szén-dioxid-kibocsátást csökkenteni kell a hagyományos fosszilis tüzelőanyagoktól való függőségünk csökkentésével, és ezáltal ösztönözni kell a tiszta és fenntartható tüzelőanyagok kifejlesztését, különösen a megújuló forrásokból. A bioüzemanyagok azon folyékony üzemanyagok közé tartoznak, amelyek gazdasági és környezetvédelmi okokból egyre nagyobb jelentőséggel bírnak.

Jelenleg a bioüzemanyagok előállításának minden kereskedelmi szempontból életképes módszere a napsugárzás fotoszintetikus befogását és a napenergiának a szén kémiai redukciója révén kémiai energiává történő átalakítását foglalja magában [3]. A fotoszintézis a napenergiát a növényekben tárolt kémiai energiává alakítja át; ilyen növény lehet a kukorica vagy a biohulladék, amelyet később bioüzemanyaggá alakítanak át. A bioüzemanyag-előállításához szükséges jelenlegi biomassza-feldolgozási módszerek azonban nagy földterületeket és napfényt igényelnek. Így az élelmiszertermeléssel versenyezve olyan erőforrásokért, mint a víz és a föld, ráadásul ezek a módszerek összességében alacsony hatékonyságúak [4]. 2009-ben az Egyesült Államok Energiaügyi Minisztériuma (DOE) létrehozta az Elektroüzemanyagok programot, hogy

tanulmányozza és fejlessze az új módszereket a közlekedési energiahordozók előállítására, illetve az üzemanyagok nem fotoszintetikus módszerekkel történő kifejlesztése [3].

Az elektroüzemanyagokat energiatárolási technikának lehetne tekinteni, amelyben a fotocellák segítségével nyert napenergiát kémiai energiává alakítják át / energiává alakul, az energiát a gáz vagy az energiahordozó kémiai kötési között tárolják vagy folyékony tüzelőanyagok között. Továbbá, mivel közlekedési üzemanyagként az elektroüzemanyagok kihasználhatják a már meglévő infrastruktúrát, így a szállítás sokkal egyszerűbbé válik és olcsóbbá teszi [6, 7]. A közelmúltban e tényezők eredményeként az elektroüzemanyagok számos autógyártó figyelmét keltették fel, például a Porsche és a Mazda [8].

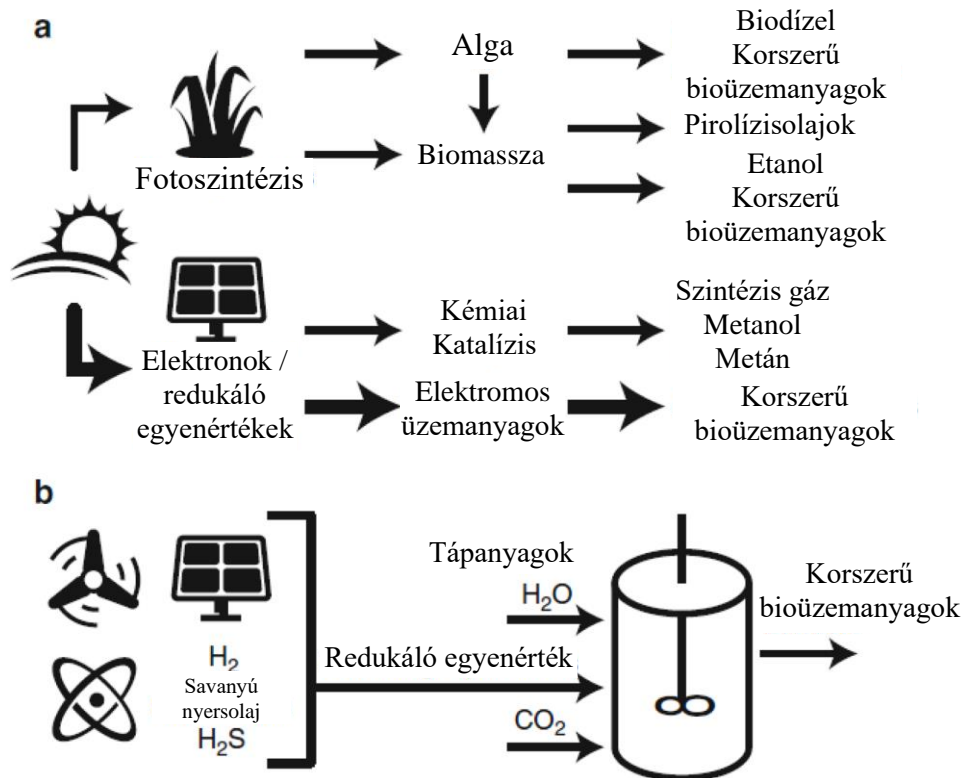
A hidrogén is használható energiahordozóként, azonban alacsony térfogati energiasűrűségével, ami sokkal alacsonyabb, mint a benziné [9]; a szállításához nagy nyomás vagy alacsony hőmérséklet szükséges a térfogati energiasűrűség növeléséhez, illetve könnyen és biztonságosan szállítható [10].

Az üzemanyagot olyan redukált anyagként lehet meghatározni, amely oxidációval kémiai energiát tud felszabadítani, az oxidáció tiszta oxigénnel vagy levegőből származó oxigénnel történő égetéssel vagy oxidációs reakciókkal valósulhat meg, amelyek eredményeként hasznos energia keletkezik [11]. Sajnos a szakirodalomban az elektroüzemanyagok és a szintetikus üzemanyagok kifejezéseket néha felcserélve használják, így ugyanazt az üzemanyagot jelentik. Ridjan et al. szerint az elektroüzemanyag kifejezés olyan üzemanyagot jelent, amely az üzemanyag előállításához CO₂-t használ fő forrásként; ez az üzemanyag azonban különböző módszerekkel állítható elő. Míg a szintetikus üzemanyag kifejezést a szénből, gázból és biomasszából termokémiai átalakítással előállított, gáz- vagy folyékony üzemanyagot előállító üzemanyagok megjelölésére használják [12], például a szintetikus paraffinkerozint (SPK), amely egyfajta repülőgép-üzemanyag, gázból folyadékká (GTL) eljárással állítják elő [13]. Elektroüzemanyagot két fő módszerrel lehet előállítani; az első a CO₂ biológiai átalakítása energiasűrű üzemanyaggá [14], a második pedig az újrahasznosított CO₂-gáz és a víz elektrolíziséből származó hidrogén kombinálásával előállított üzemanyag [15].

Az *1a. ábra* a napenergia különböző energiaátalakítási útvonalait mutatja a bioüzemanyagok és az elektroüzemanyagok felé [3], míg az *1b. ábra* a napenergiából a bioüzemanyagok és az elektroüzemanyagok felé vezető útvonalakat mutatja a bioreaktorba táplálható különböző források és tápanyagok, amelyekből bioüzemanyagot lehet előállítani gáz vagy folyékony üzemanyag előállítására [3].

A szakirodalomban néha a fémüzemanyagokat elektroüzemanyagoknak, fém a fémek elektrokémiai redukciós reakciói révén állítják elő az üzemanyagokat. Oxidjait, ha a reakció energiaforrása villamos energia lenne, akkor ez a fajta tüzelőanyagot nevezhetjük elektroüzemanyagoknak [16]. A fémtüzelőanyag-ciklusban a termelt fém tüzelőanyagot a végső felhasználási helyre szállítják, ahol elégetik közvetlenül (oxidálva) egy atmoszférikus levegővel működő égetőben [17]. A Brynolf et al. nemrégiben megjelent áttekintő cikkében [18], az elektroüzemanyagok előállítási költségeit különböző módokon értékelték: az első a szakirodalom áttekintése volt, a második egy részletesebb szakirodalmi áttekintés, amely az előállítási és a hatékonysági költségeket és határfokokat tartalmazza az ezen tüzelőanyagok szétválasztását, végül pedig számítások sorozatának elvégzésével a költségek becslésére és összehasonlítására a kutatásban és szakirodalomban található adatokkal. Masri [19] áttekintette a szakirodalmat a kihívások és az elektroüzemanyagok turbulens égetése előtt álló nehézségeket. Következtetése szerint, hogy folyamatos kutatásokra van szükség a turbulens égés területén, hogy az előrejelzési képességek megfelelő szintre kerüljenek, amely lehetővé teszi, hogy megbízható szabványos eszközzé váljanak a jövő égéstermékeinek tervezéséhez és ellenőrzéséhez. Ennek az áttekintésnek a célja, hogy a közelmúltban elért eredményekkel foglalkozzon a következő területeken az elektroüzemanyagok területén, amely magában foglalja az elektroüzemanyagok kémiá-

ját és az előállításukhoz szükséges reakciókat, valamint a különböző tanulmányok összehasonlítása az elektroüzemanyagok életciklus-értékelését, valamint gazdasági és műszaki értékelését. Ezen túlmenően ez az áttekintés kitér az égés az elektroüzemanyagok viselkedésére és azt, hogy ez hogyan befolyásolja a teljesítményüket és az üzemanyagokat a jövőbeli energiarendszerekbe való integrálásukat.



1. ábra: (a) a napenergiától a bioüzemanyagok és az elektroüzemanyagok felé vezető különböző energiaátalakítási utak b) a bioreaktorba táplálható különböző források és tápanyagok gáz- vagy folyékony tüzelőanyagok előállításához [3].

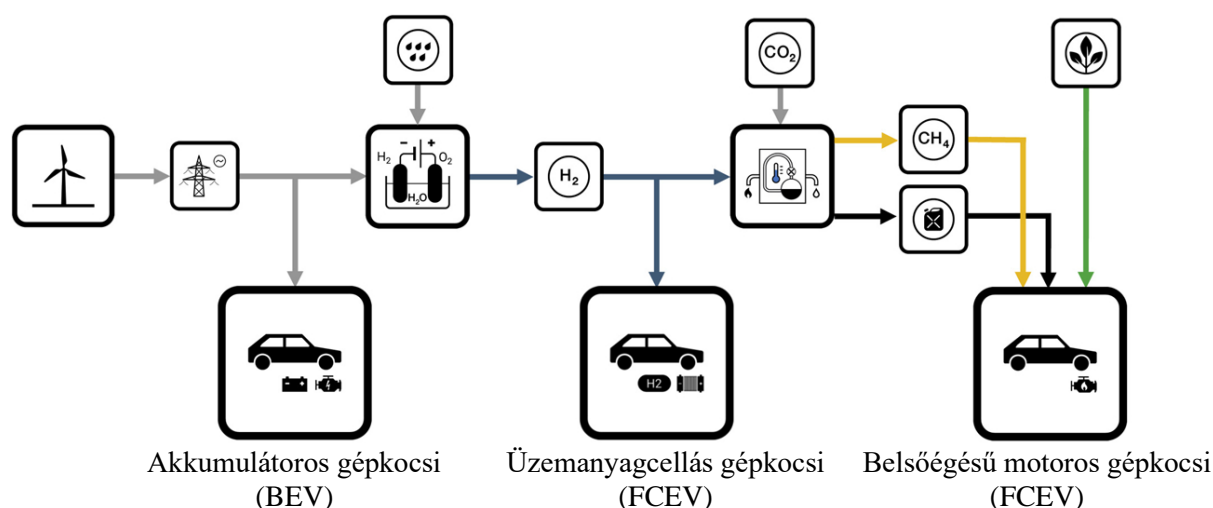
2. A KÖZLEKEDÉS DEKARBONIZÁLÁSA

Németország, amely az üvegházhatású gázok (ÜHG) kibocsátásának legnagyobb kibocsátói közé tartozik, 2015-ben ratifikálta a Párizsi Megállapodást, 2016. októberében kötelezettséget vállalt arra, hogy jelentősen csökkenti az üvegházhatású gázok kibocsátását [20]. A németországi kibocsátás csökkentésére irányuló erőfeszítések szén-dioxid-kibocsátás csökkentésére irányuló erőfeszítések máris az üvegház-hatásúgáz-kibocsátás csökkenéséhez vezettek a gazdaságának legtöbb ágazatában. A közlekedési ágazat szénlábnyomának nem csökkentését, hanem az üvegházhatású gázok kibocsátásának enyhe növekedését mutatja, az 1990-es 163 Mt CO₂-egyenértékről 164 Mt CO₂-egyenértékre 2014-ben [21], amelynek mintegy 95%-át a közúti közlekedés okozta. A közúti közlekedés 60%-ban személygépkocsik és 35%-ban haszongépjárművek [22]. Az általános megközelítések ÜHG-kibocsátás csökkentésére a közlekedésben négyféle megközelítés létezik: az üzemanyagok szén-dioxid-intenzitásának csökkentése, a járművek energiahatékonyságának növelése, a közlekedési módok áthelyezése közlekedési módok, és a teljes kereslet csökkentése [23]. Míg az utóbbi kettőt mobilitási átállásnak nevezik, addig az elsőt kettő a közlekedés energetikai átmenetére vonatkozik [24]. Bár a szén-dioxid-

mentesítésre irányuló törekvés egyértelmű és a közúti közlekedés energetikai átállásának számos különböző technológiai megoldása, például az elektromos járművek rendelkezésre állnak, a legjobb lehetőség(ek)et illetően mind a mai napig fennáll a nézeteltérés. Bár a bizonytalanság vitathatatlanul nagy szerepet játszik ebben a nézeteltérésben. Nem derült ki egyértelműen, hogy a különböző technológiai lehetőségek hogyan viszonyulnak egymáshoz a bizonytalanságuk tekintetében.

2.1. Technológiák összehasonlítása

A közlekedésben az energiaátállítás megvalósítása érdekében általában három különböző technológiai lehetőségről folyik a vita: akkumulátoros-elektromos járművek (BEV), hidrogén-alapú üzemanyagcellás elektromos járművek (FCEV) és belső égésű motorral hajtott járművek (ICEV), amelyek vagy a következőkkel működnek bioüzemanyagokkal vagy szintetikus üzemanyagokkal. A 2. ábra szemlélteti a közúti közlekedés széndioxid-mentesítésének e lehetőségeit, amelyek a megújuló energiaforrásokból származó villamos energián alapulnak.



2. ábra: Az alacsony széndioxid-kibocsátású közúti közlekedés alapvető technológiai lehetőségei [25].

A BEV-ek olyan járművek, amelyek elektromos energiával működnek, amelyet egy fedélzeti akkumulátor biztosít, amely egy villanymotort táplál. Az elektromotor magas, akár 95%-os hatásfokának és a mechanikus energia részleges visszanyerésének lehetőségének köszönhetően, a BEV-ek mutatják a legmagasabb (70% körüli) "well-to-wheel" hatásfokot az összes vizsgált technológia közül [26, 27].

Az FCEV-k a villamosenergia-ellátás tekintetében különböznek a BEV-ektől. Az FCEV a fedélzeten a szükséges energiát hidrogénből állítja elő egy üzemanyag-cella egységen keresztül. Ezt a villamos energiát aztán egy villanymotor működtetésére használják. A BEV-ekhez képest a rendszer egy további lépést tartalmaz, mivel a villamos energiát először egy energiahordozó (hidrogén) elektrolízis útján történő előállítására használják fel, amely aztán lehetővé teszi a fedélzeti átalakítást, villamos energiává. Ennek megfelelően a teljes "well-to-wheel" hatásfok viszonylag alacsony (25 és 30% között) [27, 28].

A harmadik technológia, az ICEV alapvetően egy hőmotor, amely az üzemanyag elégetéséből mechanikus energiát termel. Az energiaátalakítás szempontjából ez az üzemanyag lehet szintetikus üzemanyag vagy bioüzemanyag, és mindkettő potenciálisan széndioxid-semleges

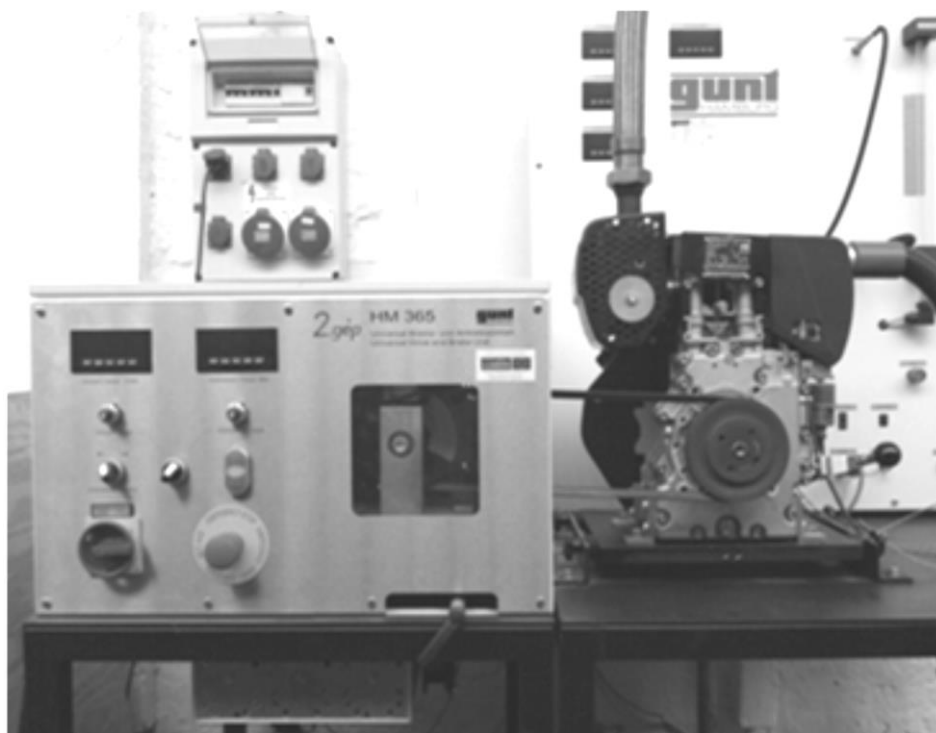
működést tesz lehetővé. A szintetikus üzemanyagok előállításának fő forrásai a hidrogén és a széndioxid. Az átalakítási lépések sokasága miatt a kútról-kerékre hatásfok itt a legalacsonyabb az összes lehetőség közül (13-20%) [27, 28]. Ezzel szemben a szerves anyagból, például termesztett növényekből vagy szerves hulladéktermékekből előállított bioüzemanyagok elméletileg széndioxid-semlegesnek tekinthetők, mivel helyileg csak annyi szénet bocsátanak ki, amennyit a növény korábban felvett (a szántáshoz és az átalakítási folyamatokhoz szükséges energiafelhasználást figyelmen kívül hagyva) [29].

3. MÉRÉSI FELADAT

Oktatási célra gyártott Gunt gyártmányú berendezésen végeztük üzemanyag vizsgálati kutatásokat (3. ábra). A gépegyüttes egy egyhengeres Hatz 1B20-6 típusú dízelmotorból és a hozzá csatlakoztatható fékgépből áll. Ahhoz, hogy a motorban lezajló folyamatokról átfogóbb képet kapjunk, a kipufogógáz összetételét is vizsgálunk kellett, amire egy Testo 330-2 típusú mérőberendezés alkalmaztunk. Ennek köszönhetően a különböző üzemanyagok emissziós értékekre gyakorolt hatását is dokumentálni tudtuk.

3.1. A vizsgált üzemanyagok

Két különböző üzemanyag kísérleti dízelmotorra gyakorolt hatását mutatjuk be. Az egyik, kereskedelmi forgalomban is kapható normál dízel üzemanyag (MSZ EN 590:2009 szabvány szerinti összetétel), amely az előírásoknak megfelelően már alpból tartalmaz 4,8 térfogatszázalék bio komponens zsírsav metil-észtert. Az általunk vizsgált alternatív üzemanyag-keverék ezzel ellentétben átészterezés nélküli növényi eredetű olajjal készült, amit a fentebb említett kereskedelmi forgalomban kapható normál dízel üzemanyaghoz kevertünk. A nemzetközi szakirodalmakban az alternatív üzemanyag előállítása során, a növényi olajat átészterezési eljárással előkezelik [30].



3. ábra: A kísérleti dízelmotor és a hozzákapcsolt fékező berendezés.

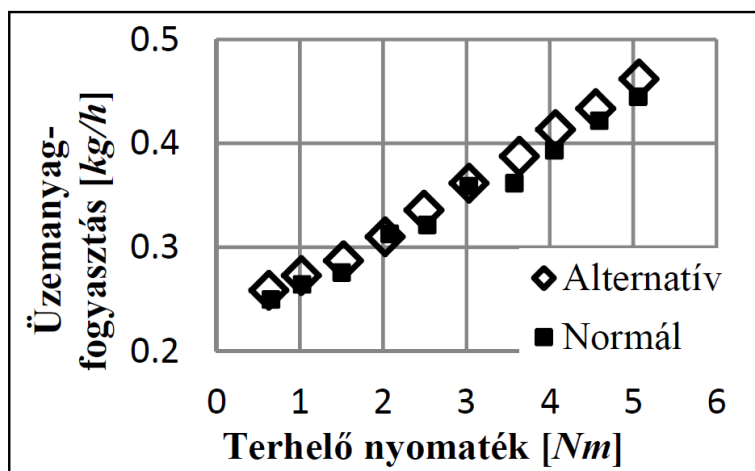
Kutatásunk során arról szerettünk volna információt gyűjteni, hogy milyen hatással van a dízelmotorra és annak kipufogó gázának összetételére egy átészterezés nélküli, háztartásokban is használt növényi olaj hozzáadásával készült alternatív üzemanyag-keverék. Az így kialakított alternatív üzemanyag 2/3-ad térfogatszázaléka normál dízel, 1/3-ada pedig napraforgó növényi olajat tartalmazott.

4. EREDMÉNYEK

Vizsgálataink során mindkét üzemanyag használata mellett úgy végeztük el a méréseket, hogy az üzemi paraméterek azonosak legyenek, tehát a motort állandó fordulatszámmal üzemeltetve, a terhelő nyomatékot növeltük. A mérést az előállítható legkisebb fékező-nyomatékról indítottuk, ami 0,5 Nm-t jelentett. Ezt követően a további mérési pontokat úgy alakítottuk ki, hogy 0,5 Nm-enként emeltük a terhelő nyomatékot 5 Nm-ig, gondosan ügyelve arra, hogy a terhelés változtatása után a mérendő paraméterek beálljanak állandó értékre. Hasonló mérési módszert figyelhetünk meg Wang és szerzőtársai publikációjában is [31].

Az üzemanyag-fogyasztási adatokat értékeltük ki, amik a 4. ábrán láthatók. A diagramon egyértelműen megfigyelhető, hogy az alternatív üzemanyag használata mellett az üzemeltetési tartományon átlagosan óránként 3,2%-kal több tömegegységnyi üzemanyag fogyott, ugyanolyan működési körülmények között. A többletfogyasztásnak több oka is létezik.

Az egyik, hogy az alternatív üzemanyagkeverék energiatartalma kisebb, mint a normál dízel üzemanyagnak; a másik ok az égés minőségének változása lehet. Az általunk előállított üzemanyag átészterezés nélkül felhasznált növényi olajat tartalmaz, aminek hatására a viszkozitás megnőtt. Ennek következtében a porlasztás, és így az égés minősége romlott. A mért többletfogyasztás azonban eltöri annak tudatában, hogy a vizsgált üzemanyag harmad részét nem fosszilis energiaforrás teszi ki.



4. ábra: Üzemanyag fogyasztás [kg/h].

5. ÖSSZEFOGLALÁS

Stratégiaileg hasznosnak tűnik tehát minden technológiai lehetőséget nyitva tartani, hogy alkalmazkodni tudjunk az előre nem látható fejleményekhez. A gyakorlatban ez nem jelenthet kivárási stratégiát, hanem az összes lehetőség párhuzamos fejlesztését. Ez ugyan magasabb kezdeti költségekkel jár, de növelheti az energetikai átmenet hosszú távú ellenálló képességét, és segít elkerülni a pillanatnyi döntéseket. Végző soron mind a BEV-, mind az FCEV-infra-

struktúra kiépítésének társadalmi-gazdasági költsége viszonylag csekélynek tűnik más infrastrukturális költségvetésekhez képest.

A kutatásaink során elvégzett kísérletek szintén sok lehetőséget mutatnak a IBEV rendszerekben. Alternatív megoldások a különböző nem fosszilis eredetű üzemanyagok előállítása és bekeverése a jelenlegi üzemanyagokba (illetve teljesen szintetikus üzemanyag előállítása). Kutatásainkat tovább kívánjuk folytatni normál körülmények között féktermi próbapadon (dízel nagyteljesítményű motoron). Az eredményeink egy újabb kutatási együttműködés kialakítását célozzák nagy autóiipari céggel (új üzemanyag típusok vizsgálata kapcsán).

6. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A szerző hálás az AVL vállalatnak a kutatás technikai (szoftver tudományos licenc) támogatásáért.

7. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. *CO2 Emissions from Fuel Combustion* 2017. OECD Publishing, 2017.
- [2] IPCC, *Global warming of 1.5 °C An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5° C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change*, 2018.
- [3] CONRADO, R. J., et al. *Electrofuels: a new paradigm for renewable fuels*. In: Advanced biofuels and bioproducts. New York, NY: Springer New York, 2012. p. 1037-1064.
- [4] AGARWAL, A. S., et al. *Conversion of CO2 to value added chemicals: Opportunities and challenges*. Handbook of climate change mitigation and adaptation, 2022, 1585-1623.
- [5] TARASCON, J.-M.; ARMAND, M. *Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries*. Nature, 2001, 414.6861: 359-367.
- [6] LEVINE, R. B.; PINNARAT, T.; SAVAGE, P. E. *Biodiesel production from wet algal biomass through in situ lipid hydrolysis and supercritical transesterification*. Energy & Fuels, 2010, 24.9: 5235-5243.
- [7] GUAN, J., et al. *Development of reactor configurations for an electrofuels platform utilizing genetically modified iron oxidizing bacteria for the reduction of CO2 to biochemicals*. Journal of biotechnology, 2017, 245: 21-27.
- [8] ABABNEH, H.; HAMEED, B. H. *Electrofuels as emerging new green alternative fuel: A review of recent literature*. Energy conversion and management, 2022, 254: 115213.
- [9] MØLLER, K. T., et al. *Hydrogen-A sustainable energy carrier*. Progress in natural science: Materials International, 2017, 27.1: 34-40.
- [10] NIAZ, S.; MANZOOR, T.; PANDITH, A. H. *Hydrogen storage: Materials, methods and perspectives*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 50: 457-469.
- [11] GUST, D.; MOORE, T. A.; MOORE, A. L. *Solar fuels via artificial photosynthesis*. Accounts of chemical research, 2009, 42.12: 1890-1898.
- [12] RIDJAN, I.; MATHIESEN, B. V.; CONNOLLY, D. *Terminology used for renewable liquid and gaseous fuels based on the conversion of electricity: a review*. Journal of cleaner production, 2016, 112: 3709-3720.
- [13] ABABNEH, H., et al. *Enhancing the lubricity of gas-to-liquid (GTL) paraffinic kerosene: impact of the additives on the physicochemical properties*. BMC Chemical Engineering, 2020, 2: 1-16.

- [14] HAWKINS, A. S., et al. *Biological conversion of carbon dioxide and hydrogen into liquid fuels and industrial chemicals*. Current opinion in biotechnology, 2013, 24.3: 376-384.
- [15] PEARSON, R. J.; TURNER, J. W. G. *Renewable fuels-an automotive perspective*. In: Comprehensive Renewable Energy: Vol. 5-Biomass and Biofuel Production. Elsevier, 2012.
- [16] BERGTHORSON, J. M. *Recyclable metal fuels for clean and compact zero-carbon power*. Progress in Energy and Combustion Science, 2018, 68: 169-196.
- [17] BERGTHORSON, J. M., et al. *Direct combustion of recyclable metal fuels for zero-carbon heat and power*. Applied Energy, 2015, 160: 368-382.
- [18] BRYNOLF, S., et al. *Electrofuels for the transport sector: A review of production costs*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 81: 1887-1905.
- [19] MASRI, A. R. *Challenges for turbulent combustion*. Proceedings of the Combustion Institute, 2021, 38.1: 121-155.
- [20] AGREEMENT, Paris. *United nations paris agreement*. The Paris Agreement| United Nations [accessed on 15 August 2022], 2015.
- [21] FEDERAL MINISTRY FOR THE ENVIRONMENT, NATURE CONSERVATION, Building and Nuclear Safety, *Klimaschutz in Zahlen: Fakten, Trends und Impulse deutscher Klimapolitik* (2015). https://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/klimaschutz_in_zahlen_bf.pdf
- [22] FEDERAL MINISTRY FOR THE ENVIRONMENT, NATURE CONSERVATION, Building and Nuclear Safety, *Klimaschutz in Zahlen: Fakten, Trends und Impulse deutscher Klimapolitik* (2018). https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/klimaschutz_in_zahlen_2018_bf.pdf
- [23] BONGARDT, D., et al. *Low-carbon land transport: policy handbook*. Routledge, 2013.
- [24] HOCHFELD, C., et al. *Mit der Verkehrswende die Mobilität von morgen sichern*. 12 Thesen zur Verkehrswende. 2017.
- [25] WANITSCHKE, A.; HOFFMANN, S. *Are battery electric vehicles the future? An uncertainty comparison with hydrogen and combustion engines*. Environmental Innovation and Societal Transitions, 2020, 35: 509-523.
- [26] HACKER, F., et al. *eMobil 2050-Szenarien zum möglichen Beitrag des elektrischen Verkehrs zum langfristigen Klimaschutz*. Öko-Institut eV, 2014.
- [27] WOLFRAM, P.; LUTSEY, N. *Electric vehicles: Literature review of technology costs and carbon emissions*, 2016.
- [28] VERKEHRSWENDE, A. *Agora Energiewende, Frontier Economics, Die zukünftigen kosten strombasierter synthetischer kraftstoffe* (2018)[cited March 25, 2018]. URL <https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2017/SynKost,2017,2050>.
- [29] MALINS, C. *Thought for food: A review of the interaction between biofuel consumption and food markets* [cited March 20, 2018]. URL <https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/CerologyThought-for-foodSeptember2017.pdf>.
- [30] MÁTRAI, Zs.; BODNÁR, I. *Dizelmotor környezeti terhelésének vizsgálata fosszilis és alternatív üzemanyagok használata mellett*. Műszaki Tudományos Közlemények, 2015, 3: 219-222.
- [31] WANG, Y. D., et al. *An experimental investigation of the performance and gaseous exhaust emissions of a diesel engine using blends of a vegetable oil*. Applied thermal engineering, 2006, 26.14-15: 1684-1691.

A HIDROGÉNÜZEMŰ GÉPJÁRMŰVEK KOCKÁZATELEMZÉSÉNEK ÁTTEKINTÉSE

REVIEW OF RISK ANALYSIS OF HYDROGEN POWERED CARS

BENC S Péter¹, NAGY Nóra²

¹Ph.D., egyetemi docens, peter.bencs@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet,
Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Intézeti Tanszék

²tanársegéd, nora.nagy@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Anyagszerkezet-tani és Anyagtechnológiai Intézet,
Szerkezetintegritási Intézeti Tanszék

Kivonat: Ez a kutatás a hidrogénüzemű járművek kockázatértékeléséhez használt módszereket mutatja be. A hidrogénüzemű járművek tervezésénél a biztonságos hajtásláncot (legkisebb kockázat) kell előtérbe helyezni. A járműveknek a mindennapi életben szokásos körülmények között is használhatónak kell lenniük, és a felhasználóra jelentett kockázatot a lehető legkisebbre kell csökkenteni. A szakirodalmi áttekintés kimutatta, hogy a hidrogénüzemű járművek használatakor a legnagyobb kockázatot a hidrogénzivárgás jelenti. A hidrogénzivárgás az üzemanyagrendszerekben (tartályokban, csővezetékekben) fordulhat elő, és a kockázatértékelési módszereket ennek a kérdésnek a kezelésére kell alkalmazni. A jövőben a környezetbarát hidrogénüzemű járművek fontos szerepet fognak játszani az üvegházhatású gázok kibocsátásának csökkentésében, de a biztonságos üzemeltetés is fontos követelmény lesz. A vizsgált kockázatértékelési eljárások támogatni fogják ennek az új technológiának a jövőbeni alkalmazását.

Kulcsszavak: Hidrogén, Kockázatértékelés, Gépjárművek

Abstract: This research presents the methods used for risk assessment of hydrogen vehicles. The design of hydrogen-powered vehicles should be prioritized to ensure a safe powertrain (lowest risk). Vehicles should be usable under normal conditions in everyday life, and the risk to the user should be minimized. A literature review has shown that the greatest risk in the use of hydrogen powered vehicles is hydrogen leakage. Hydrogen leakage can occur in fuel systems (tanks, pipings), and risk assessment methods should be applied to address this issue. In the future, green hydrogen vehicles will play an important role in reducing greenhouse gas emissions, but safe operation will also be an important requirement. The risk assessment procedures under consideration will support the future application of this new technology.

Keywords: Hydrogen, Risk analysis, Vehicles

1. BEVEZETÉS

A világ kereskedelmi célú hidrogéntermelésének 48%-át, 30%-át, 18%-át és 4%-át négy elsődleges forrás, a földgáz, a kőolaj, a szén és az elektrolízis adja. Az ipari hidrogén fő forrása a fosszilis tüzelőanyagok. Általában a hidrogént a földgáz gőzzel történő átalakításával állítják elő.

Lehetőség van a következő primer energiaforrások alkalmazására: Földgáz, napenergia, szélenergia és biogáz vagy biometán. Biogáz a földgáz vagy biometán egy termokémiai folyamaton megy keresztül, amelyet gőzzel történő metánreformálásnak neveznek, ami gőzzel történő reakciót eredményez, és egy szintetikus gázt hoz létre, amely elsősorban hidrogénből áll. A víz hidrogénre és oxigénre történő szétválasztásához az elektrolízisnek nevezett technikát alkalmazzák, amely fő energiaforrásként földgázt, napenergiát vagy szelet használhat. Mindkét módszer hidrogén előállítását eredményezi [1].

- Elsődleges energiaforrás: A következő elsődleges energiaforrások alkalmazására van lehetőség: Földgáz, napenergia, szélenergia, biogáz vagy biometán.
- Termokémiai átalakítás: A biogáz A földgáz, más néven biometán egy termokémiai folyamaton, a gőz-metán reformján megy keresztül, amely gőzzel való reakciót eredményez, és egy szintetikus gázt hoz létre, amely elsősorban hidrogénből áll.
- Elektrolízis: A víz hidrogénre és oxigénre történő szétválasztásához az elektrolízisnek nevezett technikát alkalmazzák, amelynek fő energiaforrása földgáz, napenergia vagy szél lehet.
- Végső energiahordozó: Mindkét módszer hidrogén előállítását eredményezi.

A hidrogén energiamezőkbe történő beépítésének egyik módja a hidrogén szénhidrogének üzemanyag-adalékanyagaként történő felhasználása. A szénből és szénhidrogénekből előállított városi gázokban mindig is jelentős mennyiségű hidrogén volt. Napjainkban a városi gázok többségét metán vagy földgáz teszi ki. A hidrogénnek a földgázhoz való hozzáadása előrevetíti a fokozatos átállást a hidrogénre, mint energiaforrásra. A belsőégésű motorok üzemanyagai is használhatnak hidrogént adalékként.

Kimutatták, hogy a hidrogén földgázmotorokba történő beépítése javíthatja azok égési képességeit és csökkentheti a szennyezőanyag-kibocsátást, különösen a sovány égésű üzemmódban. Ha ezt a keveréket használják üzemanyagként, az autóknak lényegesen kevesebb nitrogén-oxidot, szénmonoxidot és szénhidrogént kellene kibocsátaniuk. A hidrogéntartalmú földgázzal működő közlekedési rendszer sikeres módszer lenne a nagyvárosi területek környezeti problémáinak csökkentésére és az energiaellátás infrastruktúrájának hidrogénnel való kiegészítésére.

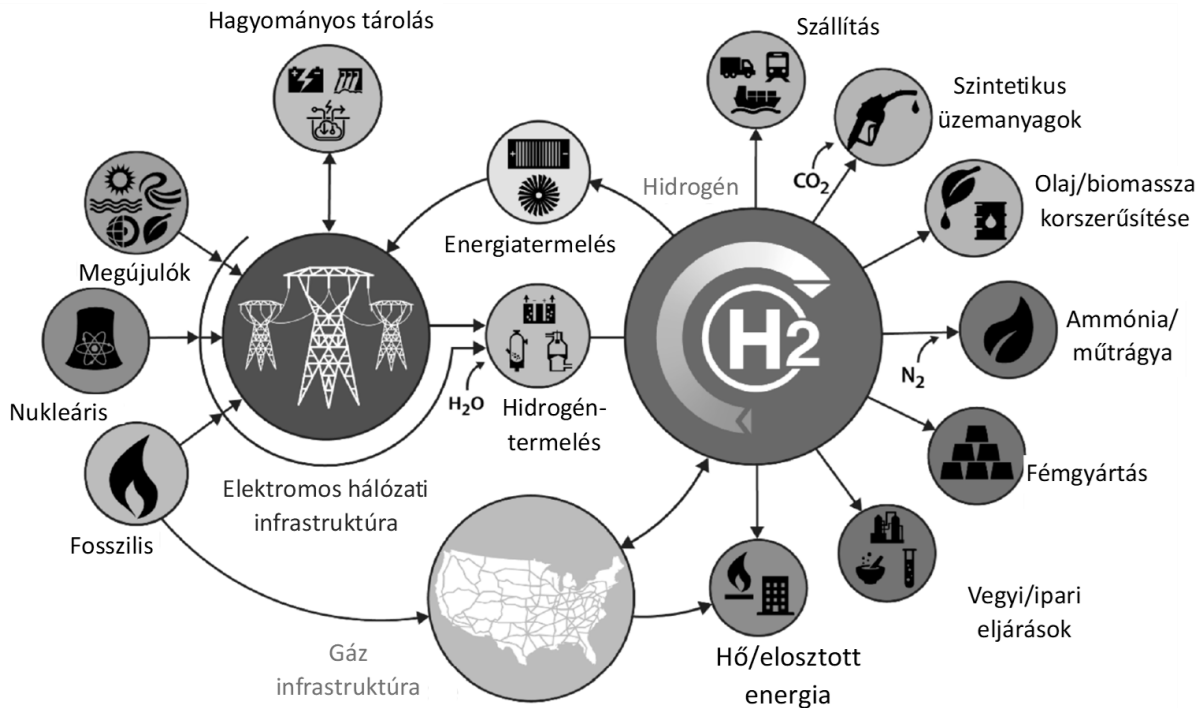
A hidrogénskála koncepcióját az *1. ábra* mutatja be a hidrogén számos előállítási módszerével és felhasználási módjával együtt. A földgáz hagyományos felhasználási módjai mellett, mint például a villamos energia, hő, vegyi anyagok és ipari folyamatok előállítása, valamint fémek és műtrágyák gyártása, a hidrogén szintetikus üzemanyagok előállítására vagy közvetlenül hidrogénüzemű autók üzemanyagaként is felhasználható. [2]

A hidrogénüzemű autók üzemanyagrendszer több részből áll. A hidrogénnek a meghajtási mechanizmus energiahordozójaként való felhasználásának egyik lehetséges koncepciója a hidrogén üzemanyagcellák alkalmazása. Ezeket nagynyomású tartályokból látják el hidrogénnel, amelyek kialakítása az elmúlt évtizedekben változott. A hidrogén üzemanyagcella kimenete elektromos energia, amelyet kis akkumulátorokban tárolnak a motorvezérlő rendszer táplálására (ezek biztosítják annak üzembe helyezését, ha a reakció az üzemanyagcellában még nem aktív), a maradék energiát pedig magára az autó meghajtására használják. A mai hidrogénautók, jó közelítéssel, elektromosnak tekinthetők autóknak, csak az elektromos áram más forrásból származik - közvetlenül az autó fedélzetén nyerik. Az ilyen járművek előnye, hogy a hidrogént gyorsan lehet a tartályokba tankolni (a hidrogén normál szivattyúzása ugyanannyi ideig tart, mint a dízel vagy benzin szivattyúzása - általában percekig tart). Ennek a megoldásnak a negatív következménye, hogy a hidrogént a fedélzeten kell tartani a gépkocsiban, ami a minimális kockázat szintjével szemben támasztott követelmények növekedésével jár. Szükséges továbbá figyelembe venni, hogy még a fosszilis üzemanyaggal működő klasszikus autók is gyúlékonyak és sajátos kockázati értékekkel bírnak.

Ugyanez vonatkozik az elektromos autókra is - az autó padlójában tárolt akkumulátorok biztonsági kockázatot jelentenek. Mindegyik autóra más-más kockázati értékek jellemzőek a különböző tulajdonságaik miatt. A hidrogén hátránya, hogy a nyomástartó tartályokból vagy az elosztórendszerből történő esetleges szivárgás esetén széles körű robbanékonyással rendelkezik. Ezért meg kell határozni egy esetleges robbanás hatásait a környezetre, és meg kell határozni egy biztonságos zónát a tartály körül.

Több szerző is foglalkozott ezekkel a területekkel. Shen et al. [3] egy nyomás alatt álló tartály valódi robbanását végezte el. Hidrogéntartály 35 MPa nyomáson történő felrobbantását,

elemezve a nyomáshullám intenzitását, a termikus sugárzást és a repülő szilánkokat a biztonságos zóna meghatározásához. Zhang et al. [4] a hőmérsékletet elemezte, nyomás és sebesség hatásait zárt térben bekövetkező hidrogénrobbanás során numerikus szimulációval. Lidor et al. [5] a H₂-O₂ rendszer robbanási határértékeit elemezte. Li és munkatársai [6] elemezték a metán és levegő keverékének robbanási mechanizmusát egy zárt edényben. Hasonlóképpen, Wang et al. [7] is egy épületben bekövetkező metán-robbanás numerikus szimulációját és a szerkezetre gyakorolt hatásokat vizsgálták.



1. ábra: A számítási modell geometriája [2].

2. BIZTONSÁGI ÉRTÉKELES [11]

A hidrogén üzemanyagként vagy energiahordozóként való használatára jellemző tulajdonságok megkövetelik, hogy olyan műszaki és üzemeltetési intézkedéseket kell alkalmazni, amelyek a meghibásodás vagy baleset kockázatát elfogadható szintre csökkentik.

A hidrogénhajtások üzemeltetésének alapvető kockázatai a következők:

1. Az égés, a gyulladás és a robbanás kockázata;
2. A nyomás túllépésének kockázata;
3. Az alacsony üzemi hőmérsékletre kapcsolódó kockázat;
4. A hidrogén ridegségből eredő kockázat;
5. A hidrogénnek az emberi testet érő expozícióból eredő kockázat [5].

2.1. Az égés, a gyulladás és a robbanás kockázata

Az égés, a gyulladás és a robbanás veszélye jelenti a hidrogénrendszer domináns kockázatát. A hidrogén nagy valószínűséggel szivárog fizikai és kémiai tulajdonságai miatt. A szivárgás közvetlenül összefügg a gyúlékony keverék kialakulásával és gyulladáshoz és robbanáshoz vezethet. Ezt az is feltételezi, hogy a hidrogén égés közben szüntelen lánggal ég, amely szabad

szemmel gyakorlatilag láthatatlan, és UV-sugárzást bocsát ki. Nem szabad figyelmen kívül hagyni azt a tényt, hogy a láng terjedési sebessége egy nagyságrenddel magasabb, mint a foszszilis tüzelőanyagok esetében [8].

2.2. A nyomás túllépésnek kockázata

A túlnyomás veszélye a hidrogéntechnológia működési elvén alapul. A nagy mennyiségű hidrogén nagy nyomáson történő tárolása miatt, figyelembe kell venni a hidrogéntechnológia nagynyomású részének minden alkatrészére ható megnövekedett terhelést. Az ilyen típusú kockázat meglétét és annak növekedését meghatározza az erre a típusra jellemző jelenség a hidrogén ridegség [8].

2.3. Az alacsony üzemi hőmérséklethez kapcsolódó kockázat

Az alacsony üzemi hőmérséklethez kapcsolódó kockázat a hidrogénrendszerben lévő anyagok tulajdonságainak megváltozásából adódik. A veszély a hidrogénnek a folyékony hidrogén hőmérsékletére (- 253 °C) történő lehűtése során keletkezik. Ennek következtében az anyagok lehűlése során a hidrogénrendszer szerkezeti csomópontjainak szilárdsági tulajdonságaiban változás történik.

2.4. A hidrogén ridegségéből eredő kockázat

A hidrogén ridegségből eredő kockázat a hidrogén és felhasznált anyag között sajátos kölcsönhatása miatt áll fenn. A tartályok, nyomástartó edények és egyéb berendezések anyagai elveszíthetik szilárdságukat, tulajdonságait a hidrogén hosszú távú hatása alatt. Az ezt befolyásoló tényezők közé sorolhatók, pl. az anyag típusa, a hidrogén koncentrációja, az üzemi nyomás, a hőmérséklet, az anyag típusa, a hidrogén típusa, a hidrogén koncentrációja, a hidrogéntartalom, az üzemi nyomás, a hőmérséklet, az üzemanyagrendszer alkatrészeinek igénybevétele típusa, a szemcsék átmérője, mint a mikroszerkezet részét képező anyagok és annak hőkezelésének előzményei, valamint a hidrogénben lévő nedvesség [8].

2.5. A hidrogénnek az emberi testet érő expozícióból eredő kockázat

A hidrogén emberi szervezetet érintő expozíciójának kockázata nem életveszélyes, azonban ezt a kockázatot is figyelembe kell venni. A gáznemű vagy folyékony hidrogénnel való közvetlen érintkezés helyi érzéketlenséghez és az emberi test egyes részein fagyási égési sérülésekhez vezethet. A hidrogén égése, amely magas hőmérsékletet és sajátos lángot hoz létre, szintén egészségügyi kockázatot jelent. A hidrogén nem jellemzi közvetlen mérgező hatásai. Viszont fulladást okozhat, különösen zárt helyiségekben (például autóban utastérben) [9,10].

3. KOCKÁZAT ELEMZÉS

A hidrogént vezetéken keresztül kell elosztani és szállítani ahhoz, hogy energiahordozóként lehessen használni. A meglévő vezeték és tartály alkalmazása során tisztán szállítják a hidrogént a hálózat meghatározott részein, amely néhány egyedi átmérőjű, nyomású és anyagú jellemzővel rendelkezik, és amely a tiszta hidrogénre összpontosít. A hidrogén előállításának két módszere a víz-elektrolízis (szél- vagy fotovoltaiikus energiával együtt) és a gőzzel történő metánreformálás gázosítással.

3.1. Összegegyeztetetőség, életciklus-kibocsátás, műszaki-gazdasági elemzés [12]

1. A vezetékek hidrogénnel való kompatibilitása: Az SNL és a PNNL értékeléseket végez a fém és polimer csővezetékek és csővezetékek (pl. acél és polietilén) anyagainak élettartamának becslésére. Ezeket az információkat beépítik egy nyilvánosan elérhető modellbe, amely a csővezetékek élettartamának becslésére használható a legfontosabb mérnöki feltételezések mellett.
2. Életciklus-elemzés: Az ANL elemezni fogja a hidrogént használó technológiák, valamint az alternatív útvonalak, például a szintetikus földgáz életciklus-kibocsátását.
3. Technikai-gazdasági elemzés: Az NREL számszerűsíteni fogja a hidrogén előállításának költségeit és lehetőségeit, valamint az alternatív utakat, például a szintetikus földgázt.
4. A hidrogén potenciáljának kiszélesítésére irányuló kutatás erőfeszítése a HFTO által vezetett, az SNL és a PNNL által vezetett Hidrogén Anyagok Kompatibilitási Konzorcium (H-Mat), amely nemzetközileg elismert keretrendszer a hidrogén-anyagok kompatibilitásának tanulmányozására.

4. MÉRÉSI FELADAT

Amint a 3.1 fejezetben is látható szükséges a megfelelő anyagok vizsgálata. Az egyetemi kutatóhelyen különböző vizsgálatokat végzünk az alkalmazott tartály anyagok kapcsán. A vizsgált anyagtípus: hipoeutektoidos, szerkezeti acél, amiből a tartály készült.

A tiszta hidrogénnel való vizsgálatok esetén szükséges pontosítani, hogy mennyi ideig kell hagyni pihentetni a rendszert (hidrogénnel töltött tartályt), hogy a hidrogén hatásait vizsgálni tudjuk az anyagtulajdonságok kapcsán. Több szakirodalom foglalkozik a vizsgálati paraméterek pontosításával [13-16]. Az irodalmi adatok vizsgálata során arra a következtetésre jutottunk, hogy 2 mintadarab vizsgálatára lesz szükség. Első vizsgálat esetén 41 napig és 128-130 bar-on kerültek pihentetésre a mintadarabok. A hosszabb időbeli vizsgálatra is szükség lesz, így irodalom alapján a 3 hónapos időtartam került meghatározásra (vizsgálati nyomás hasonló, mint az előző mintadarabok esetén).

Az egyetemi kutatóhelyen lehetőség nyílik a tartályok repesztéses vizsgálatára. A biztonságos vizsgálatához egy földalatti vizsgálóhelyen van lehetőség ~300 bar maximális nyomáson repesztetni a vizsgálati darabokat. Amint a 2. ábrán is látható a repesztéses vizsgálat jól sikerült és megfelelő végállapot alakult ki.

Az alábbi két vizsgálati módszert alkalmaztuk eddig a tartályokra:

1. repesztve (H₂ nélkül, referencia darab).
2. fásasztva, repesztve, +2 σ hajlító terhelés (H₂, 100%, 41 nap, 128-130 bar).

A repesztéses vizsgálatok után a tartályból megfelelő helyeken próbatestek kerültek kimunkálásra (csak alapanyagban és varratrészből is).



2. ábra: Mintadarab repesztve.

A kimunkált próbatetek esetén az alábbi vizsgálatok végezzük majd el:

1. hajlító vizsgálat.
2. keménység vizsgálat.
3. szakítóvizsgálat
4. szövetszerkezet vizsgálat.

A vizsgálatok eredményei szolgáltatják majd az előző fejezetekben bemutatott kockázater-tékelési vizsgálatok adatait.

A 3. ábrán látható az egyetemi kutatólaborban található szabványos hajlítóvizsgáló berendezés és a vizsgált próbateteket (4. ábra).



3. ábra: Mintadarab hajlítóvizsgálata.



4. ábra: Vizsgált mintadarabok.

Jelenleg az előzőekben bemutatott vizsgálatok zajlanak, azok eredményei a későbbiekben kerülnek bemutatásra.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

Amennyiben a kocsitartályból hidrogén szivárog, és ezt követően robbanás következik be. A hidrogén nagy nyomáson történő tárolása a tartályban jelentős kockázatot jelent. Az alábbi módszerekkel nyert releváns információk szimulációval megteremtik a hidrogén-üzemű autók tervezői számára a következő alkalmazásokhoz szükséges előfeltételeket a karosszériatérben való elhelyezésük, valamint az alkalmazott technológiák kiválasztása, pl. az anyagtípus kiválasztása a felhasznált anyagtípus, a karosszéria motortérben lévő alkatrész paramétereinek megválasztása, a méretezés a csatlakoztatott alkatrészek méretezése, a hidrogénszállításhoz használt szelepek és csövek anyagának kiválasztása, valamint a szelepek és csövek méretezése. és a tartályok anyagának kiválasztása.

Nyilvánvaló, hogy az egyes hajtástípusokat eltérő jellemzők és kockázati értékek jellemzik. A hidrogénhajtások tervezésének több szempontú döntéshozatalon kell alapulnia. Feltételezhető, hogy a döntő paraméter az összes kockázattípus minimalizálása lesz.

6. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A szerző hálás az AVL vállalatnak a kutatás technikai (szoftver tudományos licenc) támogatásáért.

7. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] TOPOLSKI, K., et al. *Hydrogen blending into natural gas pipeline infrastructure: review of the state of technology*. 2022.
- [2] RUTH, M. F., et al. *The technical and economic potential of the H2@ Scale hydrogen concept within the United States*. National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States), 2020.
- [3] SHEN, C., et al. *Consequence assessment of high-pressure hydrogen storage tank rupture during fire test*. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2018, 55: 223-231.
- [4] ZHANG, S.; ZHANG, Q. *Effect of vent size on vented hydrogen-air explosion*. International Journal of Hydrogen Energy, 2018, 43.37: 17788-17799.
- [5] LIDOR, A.; WEIHS, D.; SHER, E. *Theoretical analysis of the explosion limits of hydrogen-oxygen mixtures and their stability*. Chemical Engineering Science, 2018, 192: 591-602.

- [6] LI, M., et al. *Thermal and kinetics mechanism of explosion mitigation of methane-air mixture by N₂/CO₂ in a closed compartment*. Fuel, 2019, 255: 115747.
- [7] WANG, D., et al. *Numerical simulation analysis of explosion process and destructive effect by gas explosion accident in buildings*. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2017, 49: 215-227.
- [8] Branislav, K. *Riziká pri Využívaní Vodíkových Technológií—Aplikácia pre Mobilnú Techniku*. Ph.D. Thesis, Technical university of Kosice, Košice, Slovakia, 2017.
- [9] HUDÁK, R., et al. *Material and thermal analysis of laser sintered products*. acta mechanica et automatica, 2013, 7.1: 15-19.
- [10] KURIC, I. *New Methods and Trends in Product Development and Process Planning*. Academic Journal of Manufacturing Engineering, 2011, 9.1.
- [11] Allison, T. C., & SIMONS E., S. *Impacts of Hydrogen Transport in Pipelines*, 2022.
- [12] DE VRIES, H.; FLORISSON, O.; TIEKSTRA, G. C. *Safe Operation of Natural Gas Appliances Fuelled with Hydrogen & Natural Gas Mixtures* (Progress Obtained in the Naturalhy-Project). 2007.
- [13] NACE TM0284-2016. *Evaluation of Pipeline and Pressure Vessel Steels for Resistance to Hydrogen-Induced Cracking*. 2016.
- [14] MENTZ, J., et al. *Manufacturers' view on specifying linepipe requirements for hydrogen applications*, 2022.
- [15] KITTEL, J., et al. *Hydrogen induced cracking (HIC) testing of low alloy steel in sour environment: Impact of time of exposure on the extent of damage*. Corrosion Science, 2010, 52.4: 1386-1392.
- [16] MARTIN, M. L.; SOFRONIS, P. *Hydrogen-induced cracking and blistering in steels: A review*. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2022, 101: 104547.

NAPELEMES ERŐMŰ FESZÜLTSGÉNEK VIZSGÁLATA

SIMULATION OF A SOLAR POWER PLANT VOLTAGE

BODNÁR István

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

Kivonat: Jelen cikkben egy napelemes kiserőmű hálózati hatását vizsgáljuk szimulációs módszerrel, kiemelten a feszültségesésre. A napelemes kiserőművek egyre nagyobb teret nyernek a kis- és nagyipari fogyasztók, valamint a háztartási méretű fogyasztók körében. A kiserőművek által termelt villamosenergia minőségének azonban meg kell felelnie a köz- és ipari villamosenergia-szolgáltatás előírt követelményeinek, ami azt jelenti, hogy figyelembe kell venni az villamos hálózatra gyakorolt hatásukat. A villamosenergia-szolgáltatás mindig arra törekszik, hogy biztonságos, folyamatos és jó minőségű villamos energiát biztosítson a fogyasztóknak.

Kulcsszavak: napelem panel, napelemes erőmű, szimuláció, villamos hálózat, feszültségesés

Abstract: In the present article, the effects of a solar powered small power plant on the power grid are investigated via simulations, with voltage drop being emphasized. Solar powered small power plants are gaining larger grounds among small and large industrial consumers, as well as among household-sized consumers. However, the quality of electric power produced by small power plants must meet the prescribed requirements of public and industrial electricity service, meaning that their effects on the power grid must be taken into account. The electricity service always aims to provide safe, continuous and good quality electric power to its consumers.

Keywords: solar panel, solar power plant, simulation, power grid, voltage drop

1. BEVEZETÉS

Modern társadalmunkban a villamosenergia-függőség egyre növekvő tendenciát mutat. A technológia fejlődésével és a gyártási költségek minimalizálásával a társadalom egyre szélesebb rétegének válnak elérhetővé saját energiatermelő berendezések üzemeltetése. A kiserőművek szerepvállalása egyre nagyobb teret nyer és megfelelő szabályozásokkal - bizonyos korlátok között - ezek az erőművek a villamosenergia-rendszerbe integrálhatók és ezzel a hosszabb távú energetikai stratégia részévé válnak. Alkalmazásuknak köszönhetően a nagyobb teljesítményű erőművi kapacitás csökkenthető lehet, így egy ország energia-függősége is jelentősen mérséklődhet. De, a megújuló energiával működő, döntően nap- és szélenergiát hasznosító erőművek termelése időjárásfüggő, így energiátárolók hiányában nem képeznek stabil rendszertartalmat. Ugyanakkor a villamosenergia-szolgáltatásnak egyre szigorodó minőségi paramétereinek a kiserőművek által megtermelt villamos energiának is meg kell felelni, így az elosztóhálózatra gyakorolt hatásukat sem hagyhatjuk figyelmen kívül. A fogyasztó szempontjából ugyanis a legfontosabb a biztonságos, folyamatos, megfelelő minőségű energiaellátás, melyre a villamosenergia-szolgáltatónak minden körülmény között törekednie kell [1].

2. KÖZÉP- ÉS KISFESZÜLTSGŰ ELOSZTÓHÁLÓZATOK FESZÜLTSGÉNEK SZABÁLYOZÁSA

A villamos hálózatra csatlakozó fogyasztóknak megfelelő, szabványban meghatározott (MSZ EN 50160) minőségű hálózati feszültséget kell biztosítani. Mivel a fogyasztók nem állandó teljesítményigényű, ún. „zsinórterhelésként” viselkednek a hálózaton, nem elegendő a fix tápponti feszültség. Ugyanis a csúcs- és völgyidőszakokban tapasztalható eltérő terhelések miatt - ami arányos a hálózati elemek feszültségesésével - könnyen kritikus tartományba kerülhet

a fogyasztóknál fellépő feszültség. Ezért is elemi fontosságú a feszültség szabályozás kérdése, amit igazítani kell a mindenkori fogyasztói terheléseknek megfelelően [2].

A közép feszültségű (KÖF) közcélú elosztóhálózatok energiaellátása villamos alállomásokban a nagy/közép feszültségű transzformátorokon keresztül történik. Ezek a transzformátorok feszültség szabályzó automatikával rendelkeznek, lehetőséget adva ezzel a KÖF hálózat tápponti feszültségének terhelés alatti változtatására. A szabályozás lényege, hogy a terhelőáram és a primer oldali feszültség változása miatt módosítjuk a szekunder oldali feszültséget, amelyet a primer oldali menetszám változtatásával érünk el. A szabályozás célja, hogy a KÖF hálózatok optimális bontáspontjában a feszültségesés maximum 8%-on belül, illetve a kisfeszültségű (KIF) fogyasztói csatlakozási pontokon a feszültség a névleges értékhez viszonyított +8/-7,5%-os tartományban legyen tartható.

Az áttétel változtatás pl. egy 132/22 kV-os NAF/KÖF transzformátor esetén több fokozatban történhet. Általában ± 13 fokozat áll rendelkezésre egy ilyen transzformátornál, beleértve a középpálláshoz tartozó „0” fokozatot, így a szabályzás 27 lépcsőben történhet, egy $U_n \pm 15\%$ -os tartományban. Egy fokozatváltoztatással ebben az esetben 1,154%-os feszültségváltozás (ΔU) érhető el, ami az alábbiak szerint számítható [2, 3]:

$$\Delta U = \frac{\text{Szabályozási tartomány} [\%]}{\text{Fokozatok száma} - 1} = \frac{30}{27 - 1} \cong 1,154 \% \quad (1)$$

Felfelé történő szabályzásnál a primer oldali menetszám növekedésével az áttételre érvényes egyenlet miatt a szekunder oldali feszültség csökken. Ideális körülmények között - a veszteségek elhanyagolása mellett - ez a fenti feltételek mellett a +13-as (feszültség csökkentő) fokozatban és az ezzel ellentétes folyamatot jelentő -13-as (feszültség növelő) fokozatban [1]:

$$U'_{sz,+13} = \frac{U_p}{U'_{p,+13}} U_{sz} = \frac{132}{132 \cdot 1,15} \cdot 22 \cong 19,13 \text{ kV} (-13,045 \%) \quad (2)$$

$$U'_{sz,-13} = \frac{U_p}{U'_{p,-13}} U_{sz} = \frac{132}{132 \cdot 0,85} \cdot 22 \cong 25,88 \text{ kV} (+17,273 \%) \quad (3)$$

3. 500 KW ALATTI TELJESÍTMÉNYŰ NAPELEMES KISERŐMŰ VIZSGÁLATA

A következő példában egy 486 kW-os napelemes kiserőmű feszültségviszonyait vizsgáltam meg. A rendszerhez 18 db invertert választottam, amelyek egyenként 27 kW névleges teljesítményűek (AC oldalon), így a rendszer teljesítménye $18 \cdot 27 \text{ kW} = 486 \text{ kW}$, amely alapján a nem engedélyköteles kiserőművekhez tartozik.

Az inverterek DC oldalára egyenként maximum $37,8 \text{ kW}_p$ névleges teljesítményű napelem csatlakozhat, összesen $680,4 \text{ kW}_p$. A rendszerhez 250 W_p teljesítményű napelemeket választottam. Általánosságban egy inverterre az AC teljesítmény 80-120%-ának megfelelő napelemes DC teljesítmény kell, hogy jusson. A méretezés során meg kell határozni, hogy egy inverterre mennyi napelem kapcsolódhat biztonságosan sorosan- és párhuzamosan. Az egymással sorba kapcsolódó napelemek sztringeket alkotnak. Egy sztringen belüli maximális napelemszám meghatározásához üresjárás állapotot és egy hideg, derűs téli napot kell feltételezni, amikor a napelemcellák hőmérséklete jellemzően -10°C . Ekkor viszonylag magas feszültségen üzemelnek a napelemek ($U_{oc(-10^\circ\text{C})}$), így a maximális napelemszám az inverter maximális bemeneti feszültségének ($U_{dc,max}$) figyelembevételével [1]:

$$n_{s,max} = \frac{U_{dc,max}}{U_{oc(-10^\circ\text{C})}} = \frac{1000}{37,9 \cdot \left(1 + \frac{(-0,33) \cdot (-35)}{100}\right)} \cong 23,65 \text{ db} \quad (4)$$

Egy sztringen belüli minimális napelemszám meghatározásakor az a cél, hogy az inverter minimális munkaponti feszültségénél ($U_{mpp,min}$) ne legyen több a napelem sztring munkaponti feszültsége. Ehhez jellemzően $+70\text{ °C}$ modulhőmérsékletet feltételeznek, így a napelemek feszültségére ($U_{mp(+70\text{°C})}$) vonatkozó egyenlet [1]:

$$n_{s,min} = \frac{U_{mpp,min}}{U_{oc(+70\text{°C})}} = \frac{580}{30,1 \cdot \left(1 + \frac{(-0,33) \cdot 45}{100}\right)} \cong 22,63 \text{ db} \quad (5)$$

Célszerű a hatértékek figyelembevételével mellett a lehető leghosszabb napelem sztringek alkalmazása egy inverter esetén, hogy a munkaponti feszültségtartomány alsó határa elérhető legyen a kora reggeli- és késő esti órákban is. Az egymással párhuzamosan kapcsolható sztringek számának meghatározásakor figyelni kell, hogy a napelemek rövidzárási árama biztosan az inverter maximális bemeneti árama alatt legyen ($I_{dc,max}$). A napelemek rövidzárási áramának értékét szintén $+70\text{ °C}$ -ra szokták megadni ($I_{sc(+70\text{°C})}$), így az összefüggés [1]:

$$n_{p,max} = \frac{I_{dc,max}}{I_{sc(+70\text{°C})}} = \frac{47,7}{8,64 \cdot \left(1 + \frac{0,056 \cdot 45}{100}\right)} \cong 5,39 \text{ db} \quad (6)$$

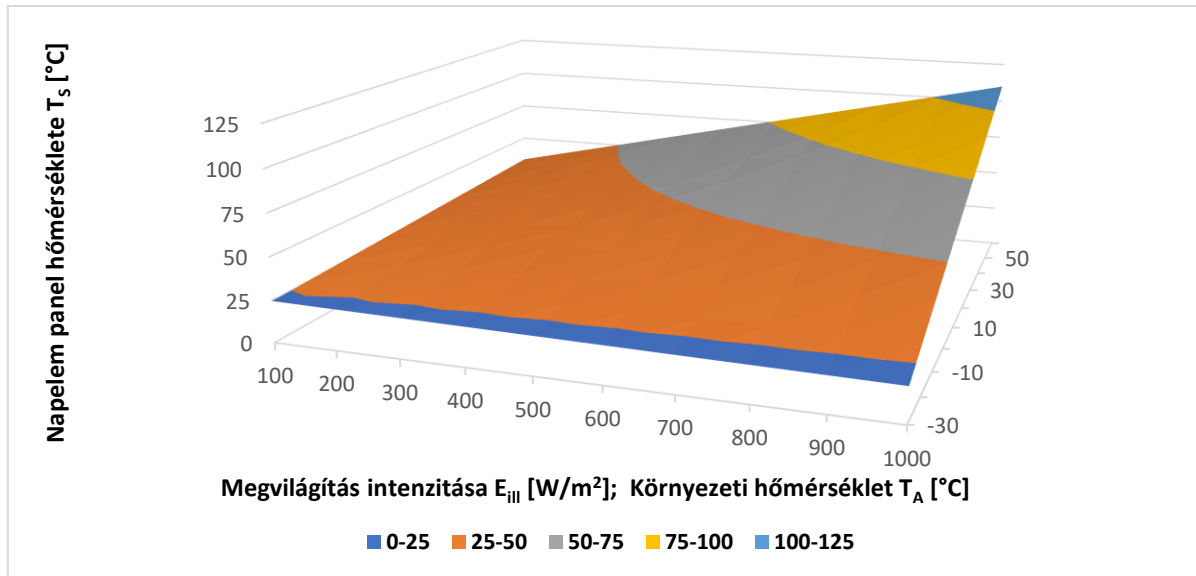
A számítások során összesen 2.070 db napelem panellel számoltam. 23 db napelem egymással sorba kapcsolva sztringeket alkot, majd 5 db sztring párhuzamosan kapcsolódva csatlakozik az inverterek DC bemeneteire. Egy inverterre $5 \cdot 23 \cdot 250 \text{ kW}_p = 28,75 \text{ kW}_p$ napelemes teljesítmény jut, egy string üresjárású feszültsége $23 \cdot 37,9 \text{ V} = 871,7 \text{ V}$, maximális teljesítménynél ez az érték $692,3 \text{ V}$, a maximális bemeneti munkaponti áram $41,55 \text{ A}$, a rövidzárási áram pedig $43,2 \text{ A}$, amelyek megfelelő értékek az inverter katalógus adatai alapján.

Alkalmaztuk a két dióda modellen alapuló matematikai módszert a napelemes kiserőmű működésének szimulációjára vonatkozóan. A napelem felületi hőmérsékletét a környezeti hőmérséklet és a megvilágítás intenzitásának függvényében határoztam meg, amelyet az 1. ábra szemléltet. A környezeti hőmérsékletet -30 °C és $+60\text{ °C}$ között vizsgáltuk, amely lefedi az inverter garantált hőmérsékletfüggő működési tartományát. A megvilágítás intenzitását 100 W/m^2 és 1000 W/m^2 között változtattam. Megfigyelhető, hogy 20 °C környezeti hőmérséklet és 1000 W/m^2 intenzitású megvilágítás esetében a napelem eléri a 70 °C hőmérsékletet. Sivatagi környezetben, ahol a napi csúcshőmérséklet elérheti az 50 °C -t, 1000 W/m^2 intenzitásnál a napelem hőmérséklete 100 °C is lehet, amely már kritikus értéknek számít az élettartam tekintetében. Ilyen hőmérsékleten a cellák kiéghetnek, azaz elromlanak.

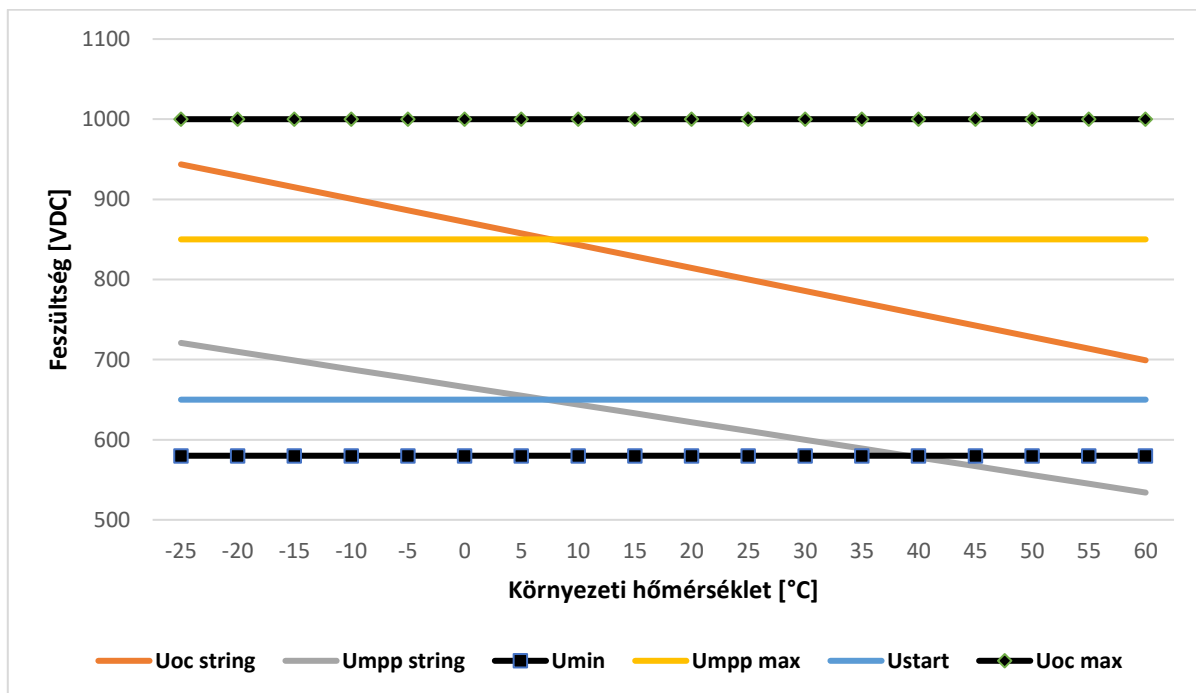
A 2. ábrán megfigyelhető, hogy az inverter működéséhez minimálisan 580 VDC feszültségre van szükség. Az ideális munkaponttartomány 650 és 850 VDC között helyezkedik el. Amennyiben ideális a napelemek megvilágítása és 1000 W/m^2 intenzitás éri őket, akkor már 39 °C -os környezeti hőmérsékleten olyan mértékű a napelemsztring feszültségesése, hogy az inverter nem tud tovább működni és lekapcsol. Az is megfigyelhető, hogy 3 °C -os környezeti hőmérséklet felett már szükséges az inverternek beavatkoznia a feszültségesés miatt. Ugyanakkor a váltakozó áramú oldalon a szabvány által előírt feszültségtűrést egészen 55 °C környezeti hőmérsékletig tudná tartani.

Amennyiben szigetüzemű invertert alkalmaznánk, akkor a 3. ábra szerint alakulna az inverter AC oldali feszültsége. Megfigyelhető, hogy -10 °C és $+55\text{ °C}$ környezeti hőmérséklet esetében az inverter nem képes tartani a $+20\%$ -os, illetve -30% -os feszültségtűrést. Ilyenkor az akkumulátoros energiatároló szabályozásával érhető el a feszültségstabilitás. A gyakorlatban ehhez nagy kapacitású akkumulátorcsomagra lenne szükség, amely nem gazdaságos. Emiatt szabályozott invertereket alkalmazunk, még kváziszigetüzemben is. A szabályozás hatására a

DC oldali feszültségcsökkenés DC/DC konverter segítségével kikompenzálásra kerül, így az AC oldalon a feszültség szintet akár változatlan értéken lehetne tartani. Ennek következménye viszont az áramfelharmonikusokban jelentkeznek, amely jelentősen, akár 15-20%-kal is növelheti az erőmű által leadott elektromosáram teljes harmokikus torzítását.

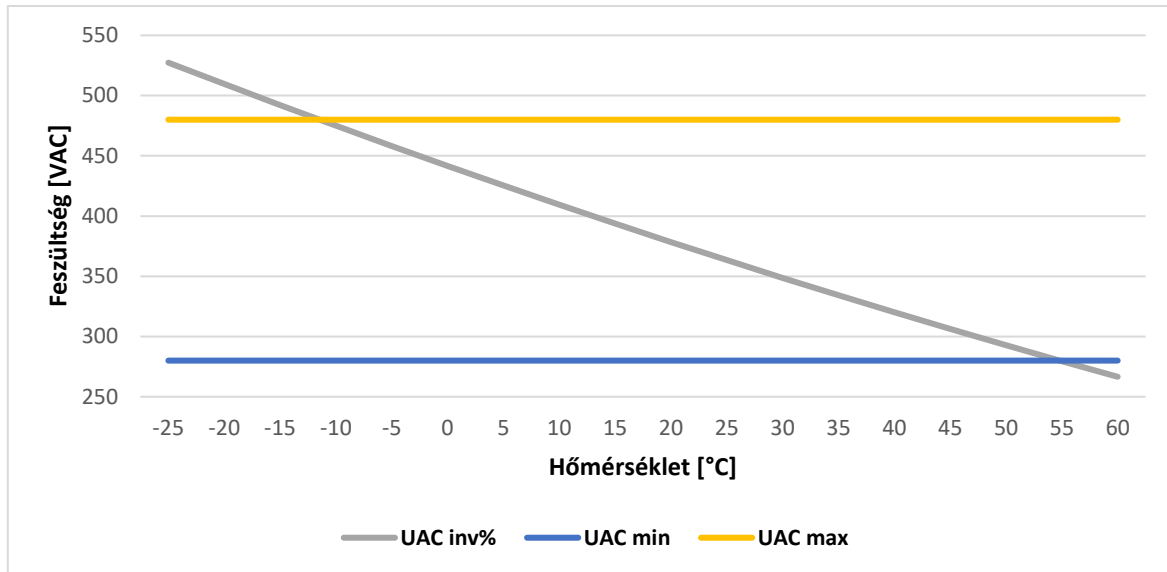


1. ábra: A napelem üzemi hőmérsékletének alakulása.



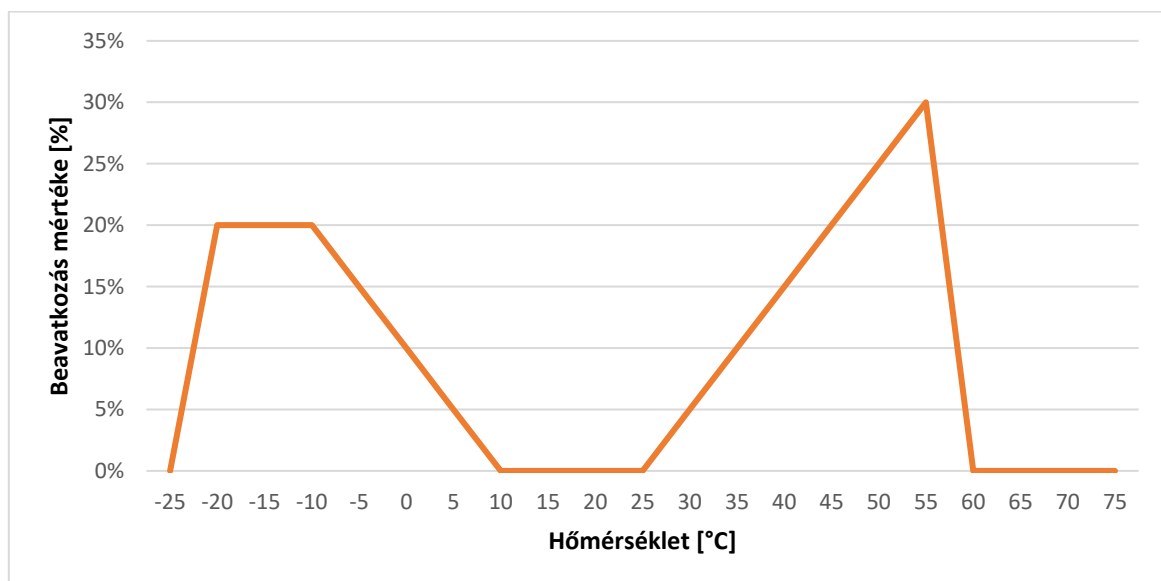
2. ábra: DC oldali feszültségek alakulása.

Ugyanakkor azt is be kell látni, hogy csökkenő önfogyasztásnál a hálózatba történő visszatápláláshoz növekvő feszültségre van szükség. Azaz az inverter tovább fog szabályozni, amely tovább növeli a felharmonikusokat. Nagy teljesítményű erőműveknél középfeszültségű visszatáplálás esetében ez a középfeszültség emelkedésével is jár, amely visszahat a transzformátorra.



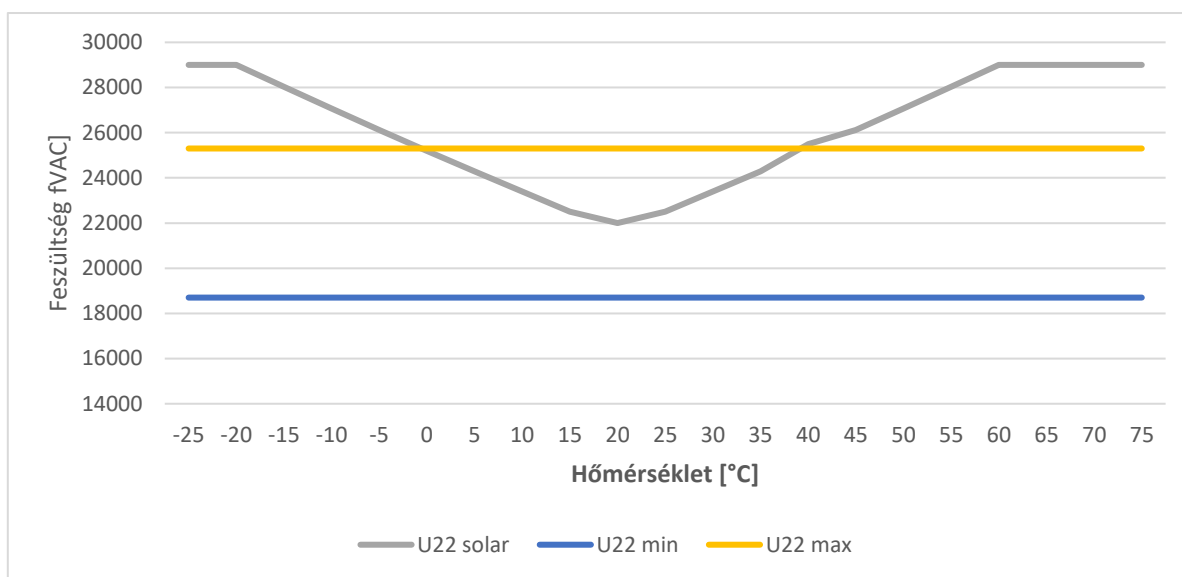
3. ábra: Szabályozatlan szigetüzemű inverter AC oldali feszültségének alakulása.

Amennyiben azt vizsgáljuk, hogy milyen mértékben szükséges az inverternek beavatkoznia, azaz szabályozni az AC oldali feszültséget a DC oldali feszültség-változás miatt a hőmérséklet függvényében, akkor a 4. ábrán található eredményt kapjuk. Az inverter működési hőmérséklet-tartományában negatív környezeti hőmérsékletek esetében a feszültségetlefeles, nagyobb környezeti hőmérsékletek esetében pedig felfelé szükséges szabályoznia.



4. ábra: Inverter szabályozásának mértéke a környezeti hőmérséklet függvényében.

A napelemes erőmű középvezetési szinten, azaz 22 kV feszültségszinten kapcsolódik a közcélú hálózatra. Jól látható az 5. ábrán, hogy ha a környezeti hőmérséklet $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ alá csökken, vagy $+32\text{ }^{\circ}\text{C}$ felé emelkedik, a középvezetési hálózat feszültszintje kívül esik a szabályozási tartományon. Mivel a napelemes erőmű inverterei nem képesek tartani a szabvány által előírt feszültségértéket, ezért további, más típusú beavatkozás, szabályozás válik szükségessé. Megoldást jelenthet az inverterek teljesítményének leszabályozása, akkumulátoros energiatarolás, vagy a lakossági/ipari energiafogyasztás felszabályozása.



5. ábra: A középvezetési hálózat feszültségének alakulása.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Az eredmények alapján elmondható, hogy a környezeti hőmérséklet, valamint a megvilágítás hatására a napelemez átfolyó áram melegítő hatása igen nagy mértékben befolyásolja a napelemek, ezen keresztül pedig a napelemez erőmű által szolgáltatott feszültséget. Extrém működési hőmérsékleti körülmények között a napelemez rendszer feszültségváltozása nagyobb mértékű, mint amit a közcélú hálózat el tud viselni, ezért bizonyos esetekben a napelemez erőmű jelentős mértékű hálózati zavarokat eredményezhet. A hálózati visszahatások részben csökkenthetők a napelemez erőmű szabályozásával, amely első sorban hiszterézis jellegű feszültség-és teljesítmény-szabályozással valósítható meg.

5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatómunka a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal támogatásával a 2020-1.1.2-PIACI-KFI-2020-00138 kódszámú, „Villamosenergia-felhasználást optimalizáló innovatív rendszer fejlesztése ipari-, lakossági fogyasztók és elektromos járművek számára.” című projekt keretében valósult meg.

6. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] BODNÁR, I., FARAGÓ, D., DOJCSÁK, GY.: *Simulation of a solar power plant*. 20th International Carpathian Control Conference (ICCC 2019) Proceedings. 2019. p. 6. Doc Nr. 146. (IEEE) ISBN 978-1-7281-0702-8.
- [2] ELMŰ-ÉMÁSZ Társaságcsoport: *D_U-010 középvezetési és kisfeszültségű hálózatfejlesztési irányelvek (VU-246)*.
- [3] DÁN, A., HARTMANN, B., KISS, P.: *Hálózati áramellátás és feszültségminőség*. BME, 2012. p. 112.

HASZNÁLT NAPELEMEK TELJESÍTMÉNYMÉRÉSE

PERFORMANCE MEASUREMENT OF USED SOLAR PANELS

BODNÁR István

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

Kivonat: A tanulmány 5 éve használatban lévő napelemek teljesítménymérésének eredményeit mutatja be. A napelemek egy erőmű egy sztringjéből származnak. A panelek felületen természetes szennyeződés-lerakódás volt tapasztalható. A panelek teljesítménymérését tisztítás előtt és tisztítás után is elvégeztem. A koszos napelemek jellemzően 5-10 %-kal kisebb teljesítményt szolgáltatottak, mint tisztítást követően.

Kulcsszavak: napelem, öregedés, teljesítmény

Abstract: This paper presents the results of measuring the performance of solar panels that have been in use for 5 years. Solar cells come from a string of a power plant. A natural dirt deposit was observed on the surface of the panels. We measure the performance of the panels before and after cleaning. Dirty solar panels typically provide 5-10% less performance than after cleaning.

Keywords: solar panel, damage, performance

1. BEVEZETÉS

A hazai napelemes erőművek összkapacitása 2024. első negyedévében átlépte a 6.000 MW teljesítményt. Az energiastratégia 2030-ra tervezte ezen érték elérését. Ugyan a napelemes erőművek kapacitás-bővülése lelassult, azonban a következő években ezer MW nagyságrendben várható új rendszerek telepítése. Várhatóan e rendszerek jelentős része energiátárolóval kerül kiegészítésre, így a hálózatra gyakorolt negatív visszahatások mérsékelhetők lehetnek.

Hazánkban az első napelemes erőmű 2004-ben került átadásra, tehát az ott üzemelő napelemek életkora elérte a 20 évet, így hamarosan várható elbontása. Ugyan a napelemek várható életkora 25-30 év, azonban a 10 évnél régebben gyártott napelemeknél gyakran tapasztalható gyorsabb öregedés és tönkremenetel, így a rendszeres állapotfelmérés elkerülhetetlen [1, 2, 3].

A degradáció a napelemeknél a dióda jellegből adódóan egyrészt természetes alapon, másrészt a környezeti hatások révén indukált módon játszódik le. A napelem a degradációs folyamat során továbbra is elláthatja az elsődleges funkcióját, még akkor is, ha a használata már nem optimális. Azonban a modul problematikusá válhat, ha ez a degradáció elér egy kritikus szintet. Ami a gyártók szerint akkor következik be, amikor a teljesítmény lecsökken a kezdeti teljesítmény 80%-ára. Ez várhatóan 25 év alatt következik be [4, 5, 6, 7, 8, 9].

Egy napelem teljesítménye (hatékonysága) különböző tényezők miatt romolhat, mint például: hőmérséklet, páratartalom, besugárzás mértéke vagy mechanikai behatás. Ezek különféle indukált öregedést, anyagszerkezeti átalakulást idézhetnek elő. Tipikusan korrózió, elszíneződés vagy akár repedések, törések keletkezhetnek egyes cellákon, de nem elhanyagolható a napelemeket borító edzett üveg térfogati és/vagy felületi struktúrájának a megváltozása sem. A napelemek degradációját szimulációs modellezéssel próbálják megjósolni, amelyek első sorban anyagtechnológiai modelleket alkalmaznak. A teljesítménycsökkenési arány akár 0,6%-5%/év is lehet, de a szimulációs értékek nem feltétlen a legpontosabbak ugyanis a degradáció mértéke nemcsak a környezeti feltételektől, hanem az alkalmazott napelemtechnológiáktól is függ [1].

A napelemek tönkremenetelének időbeni lefutását a gyártók jellemzően két értékpárral adják meg. A napelemek első 10 évében 90%-os, az azt követő 15 évben pedig 80%-os teljesítménygaranciát adnak. A valóságban az üzemeltetés és karbantartás jellegétől ezen értékek jelentősen eltérhetnek. A gyakorlatban a napelemek hőmérsékletének növekedése és a napelemek felületén lerakódó szennyeződések okozta hőmérsékletnövekedés a leggyakoribb degradációs ok. A napelemeknek is van hőtehetlensége, így a változó megvilágítások során ún. hőmérsékleti tranziens folyamatok játszódnak le. Ezek a folyamatok egyfajta hőkezelésciklusnak tekinthetők, amely folyamat során indukált degradáció alakul ki. Egy panel részleges árnyékba kerülése vagy megnövekedett degradációja hőmérsékletkülönbséget hoz létre a napelempanelen, ami tovább fokozza a teljes panel tönkremenetelét. E hatások lényegében gyorsító paraméterként tekinthetők, így a napelemek gyártó által garantált használati időhöz képest hamarabbi tönkremenetelét eredményezik. Ezen indukált tönkremenetel mikrorepedések megjelenésével, a korábbi mikrorepedések kiszélesedésével, cellarész-leválásával járhat [9].

2. A VIZSGÁLAT EREDMÉNYEINEK BEMUTATÁSA

Kutatómunkám során egy 5 éve üzemelő erőműből származó napelemek teljesítménymérését és állapotfelmérését végeztem el. A napelemek polikristályos típusúak és a gyártáskori teljesítményük 260 Wp. A napelemek adattáblája az *1. táblázatban* található.

1. táblázat: A vizsgált napelemek adattáblája.

Teljesítmény és tűrés	260 Wp + 3%
Üresjáratú feszültség	37,99 V
Munkaponti feszültség	30,75 V
Rövidzárlati áramerősség	8,9 A
Munkaponti áramerősség	8,37 A
Hatásfok	15,73%
Cellaszám	60 db

A gyártó az első üzemévre 97%-os termékgaranciát vállalt, a 10. évig 90%-ot, a 25. évig pedig 85%-ot. Tekintve, hogy a vizsgált napelemek 5 évesek, ezért a vizsgálat időpontjában az elvárt teljesítményük a gyártáskori teljesítmény 93,89%-ánál nem lehet kisebb, amennyiben az öregedés mértéke nem volt nagyobb, mint amennyi a természetes öregedésből származik. Ez azt jelenti, hogy az elvárt teljesítménye a napelemeknek 244,11 Wp. Mivel a mérés pontossága 1,5%, így a 240,45 Wp-nél nagyobb teljesítményű napelemek jellemezhetők a természetes öregedési ütemmel. Ettől kisebb teljesítmények esetében indukált öregedés feltételezhető.

A napelemeken többféle mérést végeztem el. Egyrészt napelem-teszterrel, másrészt műterhelés alkalmazásával az aktuális teljesítményt és egyéb villamos paramétereket, valamint hőkamerával a napelem felületi hőmérséklet-eloszlását. A méréseket elvégeztem a napelemek beszállított állapotában, valamint lágyvizes tisztítást követően. Mivel a napelemek az erőműből történő leszerelésük után nem voltak megtisztítva, ezért a valós működési körülmények között rájuk rakódó szennyeződések hatását is vizsgálni tudtam. Minden leszerelt és vizsgált napelem panel egy inverter egy sztringjéből származnak.

A vizsgált napelemek egy részében szerves, növényi eredetű szennyeződések is megfigyelhetők voltak (*1. ábra*). E szennyeződések az eső tisztító hatása miatt nem a napelem felületén, hanem a sarkaiban, illetve éleiben figyelhető meg. Mivel a napelem panelek peremes kialakításúak, ezért ezeken a részeken könnyen felhalmozódnak a szennyeződések. Ugyanakkor jellemzően a felületen lerakódó szálló por volt a mérvadó szennyeződés.

Korábbi, más paneleken végzett laboratóriumi méréseimből egyértelműen megállapítható volt, hogy a napelemek felületén lerakódó szennyeződések csökkentik a napelem teljesítményét és hatásfokát, valamint a szennyeződések helyén és környezetében megnövekszik a napelem hőmérséklete, amely tovább rontja a működőképességét és mesterséges öregedést indukál. Jelen mérések során is ez volt az alapfeltevés, ezért végeztem el tisztítás előtt és után a méréseket.



1. ábra: Szennyeződött napelem.

A 2. táblázat foglalja össze a vizsgálati eredményeket. Az 1. és a 2. jelű napelemek újak, azok referenciaképzés céljából kerültek lemérésére. Mivel újak, ezért e két panelnél csak tiszta állapotra vonatkozó eredmények állnak rendelkezésre.

2. táblázat: A vizsgált napelemek mért teljesítménye.

Napelem sorszama	Szennyezett panel teljesítménye [Wp]	Tisztított panel teljesítménye [Wp]	Szennyeződés okozta teljesítményveszteség [W]
1	-	261,74	-
2	-	260,33	-
3	219,44	238,88	19,44
4	240,24	254,73	14,49
5	236,32	250,58	14,26
6	227,36	255,36	28,00
7	236,46	257,07	20,61
8	209,07	245,33	36,26
9	204,94	238,45	33,51
10	219,56	239,15	19,59
11	221,16	245,40	24,24
Átlag	223,84	247,22	23,38

A 2. táblázatból több információt is leszűrhető. Például, hogy a szennyezett napelemek teljesítménye mindegyik panel esetében kisebb, mint az életkor alapján elvárt teljesítmény. Egyedül a 4. jelű panel közelíti meg azt az értéket.

Amennyiben a tisztítást követő teljesítményt vizsgáljuk, akkor 6 db panel (4, 5, 6, 7, 8, 11 jelű panelek) teljesítménye nagyobb, mint az elvárt, így azok öregedése természetes értéktartományon belül helyezkedik el. 3 panel esetében (3, 9, 10 jelű panelek) teljesítménye az elvárt érték alatt maradt, így ezek öregedése nagyobb fokú volt, mint amit a gyártó garanciálisan vállalt.

A 3. táblázat az öregedés mértékét, valamint további két viszonyszámot tartalmaz. Megfigyelhető, hogy a vizsgált 9 db napelem panel átlagos öregedésének mértéke a gyártói érték alatt marad. Ugyanakkor az is megfigyelhető, hogy a gyártáskori teljesítményhez viszonyítva, a napelem felületén lerakódó szennyeződések átlagosan 14,24%-os teljesítménycsökkenést mutatnak. Amennyiben a tisztított panelek aktuális teljesítményéhez viszonyítjuk a szennyezett panelek teljesítményét, akkor azt tapasztaljuk, hogy a szennyeződések átlagosan 10,81%-kal csökkentik a napelemek teljesítményét. A legszennyezettebb, 9 jelű panel esetében 23,12% volt a teljesítménycsökkenés. A legkevésbé szennyezett 4 és 5 jelű paneleknél ez az érték 5,69%.

A vizsgált sztringben 18 db panel helyezkedik el, amelyből 9 db került megvizsgálásra. Mivel a vizsgálat a panelek felét érintette, ezért feltételezhető, hogy a másik 9 db panel esetében is hasonló értékek, illetve eloszlás tapasztalható.

3. táblázat: A vizsgált napelemek öregedésének mértéke.

Napelem sorszáma	Öregedés mértéke [%]	Szennyeződés okozta teljesítményvesztés a gyártáskori teljesítményre vonatkoztatva [%]	Szennyeződés okozta teljesítményvesztés az aktuális teljesítményre vonatkoztatva [%]
1	-	-	-
2	-	-	-
3	8,12	15,60	8,14
4	2,03	7,60	5,69
5	3,62	9,11	5,69
6	1,62	12,55	11,12
7	1,13	10,58	10,69
8	5,64	19,59	14,78
9	8,29	22,60	23,12
10	8,02	15,56	8,19
11	5,62	14,94	9,88
Átlag	4,90	14,24	10,81

A vizsgált napelemeket az erőművi normál üzemi körülmények között nem szokták tisztítani, így azokról csak az esőzések során távozik a szennyeződés. A napelemek 3 héttel a legutolsó esőzést követően kerültek leszerelésre nyári időszakban. Ugyan nem tekinthető reprezentatívnak az eredmény, azonban a szakirodalomban is hasonló veszteségi értékek találhatók.

Amennyiben nem történik rendszeres tisztítás a szennyeződések eltávolítására, úgy az éves energiatermelés-csökkenés várhatóan 10% és 20% közötti érték közé tehető, amely jelentős bevételkiesést jelenthet. Tehát, ha a napelemes rendszerünk kevesebb energiát termel az elméleti értéknél, akkor az minden bizonnyal a felületen lerakódó szennyeződéseknek és az azok által indukált öregedésnek róható fel.

Ugyanakkor nem szabad figyelmen kívül hagyni, hogy a szennyeződések hatására megnövekszik a napelem hőmérséklete, amely indukált öregedéshez vezet, így 25 évnél kisebb a várható élettartamuk. Méréseim során készítettem hőkamerás felvételeket is, amelyek egyértelműen rámutattak a szennyezett felületek hőtermelésére.

3. ÖSSZEFOGLALÁS ÉS KÖVETKEZTETÉSEK

A tanulmányban egy napelemes erőműből származó és 5 éve üzemelő napelemek teljesítménymérésének eredményeit mutattam be. Az eredményekből megfigyelhető, hogy a napelemek öregsznek, így a teljesítményük és hatékonyságuk folyamatosan csökkenő tendenciát mutat. E tendencia nem fordítható vissza, ráadásul a napelemek felületén lerakódó szennyeződések ezt tovább gyorsíthatják. Ez a megfelelő tisztítás szükségességében jelentkezik.

Amennyiben a napelemeket állandó üzemi körülményekre méretezzük és nem számolunk az öregedéssel, akkor az az ellátandó technológia működőképességét veszélyezteti. Ez kifejezetten problémát tud jelenteni elektromos járművek, illetve energiatárolók esetében, ahol a villamos paraméterek megváltozása a hatótávot és az ellátás biztonságát csökkenti. Mindezek alapján elmondható, hogy a napelemek túlméretezése és rendszeres karbantartása, illetve állapotfelmérése elengedhetetlen a hosszútávú magas hatékonyságú üzemeltetéshez.

4. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatómunka a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal támogatásával a 2020-1.1.2-PIACI-KFI-2020-00138 kódszámú, „Villamosenergia-felhasználást optimalizáló innovatív rendszer fejlesztése ipari-, lakossági fogyasztók és elektromos járművek számára.” című projekt keretében valósult meg.

5. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] NDIAYE, A., KÉBE, C.M.F., BILAL, B.O., CHARKI, A., SAMBOU, V., NDIAYE, P.A.: *Study of the Correlation Between the Dust Density Accumulated on Photovoltaic Module's Surface and Their Performance Characteristics Degradation*. Innovation and Interdisciplinary Solutions for Underserved Areas. 2018. pp. 31-42.
- [2] OH, S., FIGGIS, B.W., RASHKEEV, S.: *Effect of thermophoresis on dust accumulation on solar panels*. Solar Energy. Vol. 211. 2020. pp. 412-417.
- [3] ALGHAMDI, A.S., BAHAJ, A.S., BLUNDEN, L.S., WU, Y.: *Dust Removal from Solar PV Modules by Automated Cleaning Systems*. Energies. Vol. 12. 2019. paper. 2923.
- [4] KLUGMANN-RADZIEMSKA, E. SHADING: *Dusting and Incorrect Positioning of Photovoltaic Modules as Important Factors in Performance Reduction*. Energies. Vol. 13. 2020. paper. 1992.
- [5] AL SIYABI, I., AL MAYASI, A., AL SHUKAILI, A., KHANNA, S.: *Effect of Soiling on Solar Photovoltaic Performance under Desert Climatic Conditions*. Energies. Vol. 14. 2021. paper. 659.
- [6] TANG, S., XING, Y., CHEN, L., SONG, X., YAO, F.: *Review and a novel strategy for mitigating hot spot of PV panels*. Solar Energy. Vol. 214. 2021. pp. 51-61.
- [7] GERBER, A., HUH, V., TRAN, T.M.H., SIEGLOCH, M., AUGARTEN, Y., PIETERS, B.E., RAU, U.: *Advanced large area characterization of thin-film solar modules by electroluminescence and thermography imaging techniques*. Solar Energy Materials and Solar Cells. Vol. 135. 2015. pp. 35-42.
- [8] SALAZAR, A.M., MACABEBE, E.Q.B.: *Hotspots Detection in Photovoltaic Modules Using Infrared Thermography*. MATEC Web Conf. 2016. paper. 10015.
- [9] BERARDONE, I., LOPEZ-GARCIA, J., PAGGI, M.: *Analysis of electroluminescence and infrared thermal images of monocrystalline silicon photovoltaic modules after 20 years of outdoor use in a solar vehicle*. Solar Energy. Vol. 173. 2018. pp. 478-486.

SOLAR POWERED ELECTRIC CAR WITH VARIABLE-VOLTAGE/ VARIABLE-FREQUENCY DRIVE CONTROL

**BODNÁR István¹, BOROS Rafael Ruben², MATUSZ-KALÁSZ Dávid³,
JOBÁGY Marcell⁴**

¹Ph.D., egyetemi docens, istvan.bodnar@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet,
Elektrotechnikai és Elektronikai Tanszék

²egyetemi tanársegéd, ruben.boros@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet,
Elektrotechnikai és Elektronikai Tanszék

³Ph.D., egyetemi tanársegéd, david.matusz-kalasz@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet,
Elektrotechnikai és Elektronikai Tanszék

⁴tanszéki mérnök, marcell.jobbagy@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet,
Elektrotechnikai és Elektronikai Tanszék

Abstract: *The popularity of electric vehicles has been expanding rapidly due to the subsidies and are worldwide used. What if, solar panel help us to drive the car? The World Solar Challenge is exemplary. In Australia directly solar powered cars can across the continent during a 3000 km long race. Let's use this technology! Our goal is to create a theoretical model of an electric car, which can directly use solar energy or restore it. We would like to use a three-phase induction motor to drive the electric car. The motor is control by variable voltage frequency drive (VVFD). The solar panel string supplies the inverters DC link.*

Keywords: *solar cell, electric vehicles, three phase*

1. INTRODUCTION

Nowadays energy hunger favours the accelerated expansion of renewables. Of the renewable energy sources, solar electric power generation is one of the least located options. Since the solar panels generate direct current, it is an obvious solution to place them on top of vehicles and connect them to a 12 VDC system. Although solar panels are not suitable for running an electric car in its entirety, however they can provide power to the control circuits or provide a slight increase in range. Over the past decade, many vehicle manufacturers have experimented with solar cars, with greater or lesser success. The solar panels are always used to charge the vehicle battery pack. For some cars, the charge only works when stationary. Basically, electric cars run on tens of kW electric motors, on the other hand, only a few hundred watts of solar power capacity can be placed on them. It follows that solar panels alone are not enough to charge and operate the vehicle. For this reason, the importance of solar cars lies primarily in the daily commuting of the urban population. If the distance travelled per day is considered and how much energy the solar panels produce daily in unclouded, sunny days, then the difference between consumption and production is less perceptible. It should not be overlooked that most cars are usually used by one person at a time, so it is unnecessary to produce large and powerful solar cars. It would be practical to design these vehicles for daily, low-power commuting, rather than for a family car. It is worth researching in this direction and developing cheaper solar cars.

2. INDUCTION MOTORS

AC induction motors are the most common motors used in industrial motion control systems, as well as in main powered home appliances. Simple and rugged design, low-cost, low maintenance and direct connection to an AC power source are the main advantages of AC induction motors. Various types of AC induction motors are available in the market. Different motors are suitable for different applications. Although AC induction motors are easier to design than DC motors, the speed, and the torque control in various types of AC induction motors require a greater understanding of the design and the characteristics of these motors [1].

Like most motors, an AC induction motor has a fixed outer portion, called the stator and a rotor that spins inside with a carefully engineered air gap between the two. Virtually all electrical motors use magnetic field rotation to spin their rotors. A three-phase AC induction motor is the only type where the rotating magnetic field is created naturally in the stator because of the nature of the supply. DC motors depend either on mechanical or electronic commutation to create rotating magnetic fields. A single-phase AC induction motor depends on extra electrical components to produce this rotating magnetic field. Two sets of electromagnets are formed inside any motor. In an AC induction motor, one set of electromagnets is formed in the stator because of the AC supply connected to the stator windings. The alternating nature of the supply voltage induces an Electromagnetic Force (EMF) in the rotor (just like the voltage is induced in the transformer secondary) as per Lenz's law, thus generating another set of electromagnets; hence the name – induction motor. Interaction between the magnetic field of these electromagnets generates twisting force or torque. As a result, the motor rotates in the direction of the resultant torque [1].

2.1. Stator

The stator is made up of several thin laminations of aluminium or cast iron. They are punched and clamped together to form a hollow cylinder (stator core) with slots. Coils of insulated wires are inserted into these slots. Each grouping of coils, together with the core it surrounds, forms an electromagnet (a pair of poles) on the application of AC supply. The number of poles of an AC induction motor depends on the internal connection of the stator windings. The stator windings are connected directly to the power source. Internally they are connected in such a way, that on applying AC supply, a rotating magnetic field is created [1].

2.2. Rotor

The rotor is made up of several thin steel laminations with evenly spaced bars, which are made up of aluminium or copper, along the periphery. In the most popular type of rotor (squirrel cage rotor), these bars are connected at ends mechanically and electrically using rings. Almost 90% of induction motors have squirrel cage rotors. This is because the squirrel cage rotor has a simple and rugged construction. The rotor consists of a cylindrical laminated core with axially placed parallel slots for carrying the conductors. Each slot carries a copper, aluminium, or alloy bar. These rotor bars are permanently short-circuited at both ends by means of the end rings. This total assembly resembles the look of a squirrel cage, which gives the rotor its name [1].

The rotor is mounted on the shaft using bearings on each end; one end of the shaft is normally kept longer than the other for driving the load. Some motors may have an accessory shaft on the non-driving end for mounting speed or position sensing devices. Between the stator and the rotor, there exists an air gap, through which due to induction, the energy is transferred from the stator to the rotor. The generated torque forces the rotor and then the load to rotate. Regardless of the type of rotor used, the principle employed for rotation remains the same [1].

2.3. Application

The use of induction motors in electric cars is subservient because of their low maintenance requirements. This is due to the fact, that induction motors do not contain carbon brushes and slip ring, in contrast with synchronous and DC motors. Therefore, only the bearings should be maintained. The induction motor has good starting torque, which gives good acceleration in cars.

2.4. Speed of an Induction Motor

The magnetic field created in the stator rotates at synchronous speed (*equation 1*). Where: f_1 the supply frequency, p the number of pole pairs [1].

$$n_0 = \frac{f_1 \cdot 60}{p}, \quad (1.)$$

The magnetic field produced in the rotor because of the induced voltage is alternating in nature. To reduce the relative speed, with respect to the stator, the rotor starts running in the same direction as that of the stator flux and tries to catch up with the rotating flux. However, in practice, the rotor never succeeds in “catching up” to the stator field. The rotor runs slower than the speed of the stator field. This speed is called the Base Speed (n). The difference between n_0 and n is called the slip. The slip varies with the load. An increase in load will cause the rotor to slow down or increase slip. A decrease in load will cause the rotor to speed up or decrease slip. The slip is expressed as a percentage and can be determined with the following formula (*equation 2*) [1, 8]:

$$s [\%] = \frac{n_0 - n}{n_0} \cdot 100, \quad (2.)$$

3. SPEED OF CONTROL

The best way to control the rotor speed is to change the f_1 supply frequency. Variable frequency drives can vary the frequency stepless from 0 Hz to a few hundred Hz. The variable frequency drive is an electronic device which has three main parts inside: rectifier, DC link with filter capacitor and inverter. The input and output can be one or three-phase AC voltage. For high power usages, a three-phase motor is recommended which requires a three-phase inverter. The inverter makes AC voltages from DC voltage where the frequency can vary. If the inverter’s input is constant voltage, we called it VVFD (Variable Voltage Frequency Drive). The rectifier and the filter capacitor make the constant voltage at the inverter’s input.

$$\Phi_{max} = \frac{U_{i1}}{4,44 \cdot f_1 \cdot N_1 \cdot \xi_1} \quad (3.)$$

3.1. Voltage control

The torque will be constant only if the flux is constant as well (*equation 3*). U_{i1} means the induced voltage in the stator, is the flux amplitude, N_1 is the number of turns, is the winding factor. If we do not reduce the voltage at low frequency, the stator iron core is saturated. So, the frequency and the voltage must also be changed together [8].

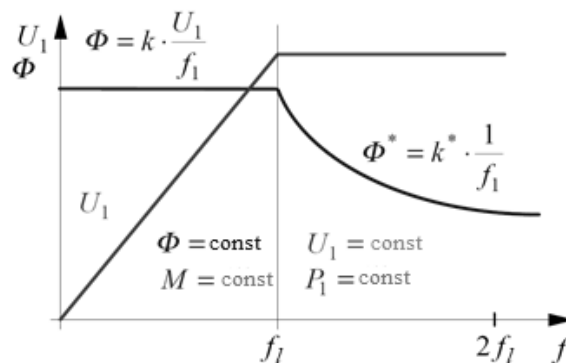
3.2. V/f control

The variable-voltage/variable-frequency (VVVF) drive powered induction motors have several control engineering problems. For optimal utilization of the drive, the slip-frequency should not be bigger than the pull-up slip-frequency.

Current overload must also be eliminated, the slip must remain below the nominal slip. Therefore, it is expedient to measure the slip and, on this basis to control the frequency of the VVVF drive, so that a specific adjustable slip frequency is not exceeded. In addition, it must be ensured that the motor is always supplied with the correct frequency-proportional voltage. This is necessary, on the one hand, to ensure that the machine flux does not exceed the nominal value, on the other hand, to achieve the nominal flux, apply the motor torque with the lowest possible current and reach the nominal torque at any speed. This condition can be achieved by controlling the voltage directly in proportion to the frequency [2].

Figure 1 shows two sections [3]. In the first section, the frequency and the voltage are increased proportionally to the limit frequency, then the flux and the torque are constant. Once the nominal voltage has been reached, the voltage applied to the motor terminals can no longer be increased, but the frequency can.

This has the disadvantage that the flux is reduced, so that the motor torque and the engine power do not increase further. In the second section we talk about field weakening, not to be confused with that of DC machines. In this case, the field weakens due to constraints, and is not intentionally weakened.



1. Figure: Voltage and flux variations as a function of frequency.

4. POWER ELECTRONICS IN ELECTRIC CARS

In electric cars, the input DC comes from the battery for the inverter. DC/DC converter is needed because the battery voltage is different from the motor voltage. If we charge the battery with solar panel, one more DC/DC converter is required. These converters reduce efficiency due to power dissipations.

In many electric cars, the three-phase inverter consists of IGBT switches. These high power IGBT modules contain driver circuits as well. The modules are mounted on a heatsink.

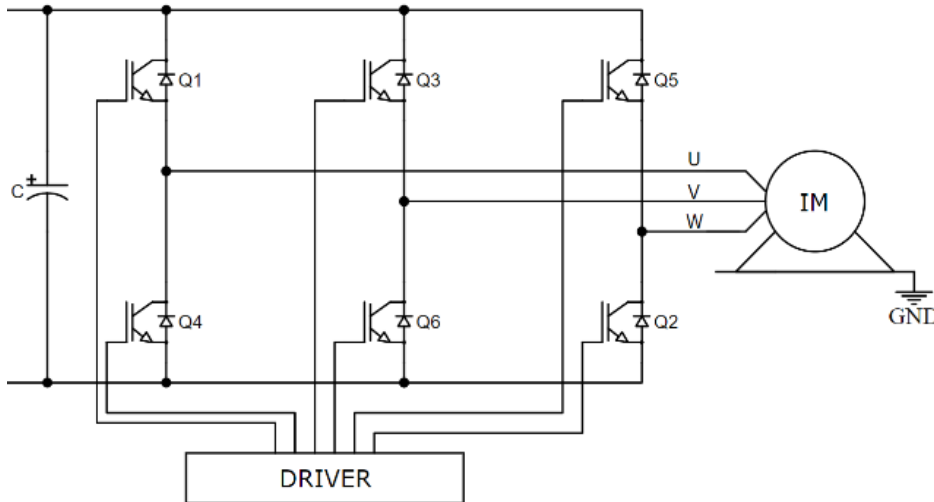
5. THREE-PHASE INVERTER

A power inverter is an electrical device that converts direct current (DC) to alternating current (AC). The frequency of the generated AC voltage is arbitrary.

Simple control is when modulation of the control voltage is not applied. By simple control

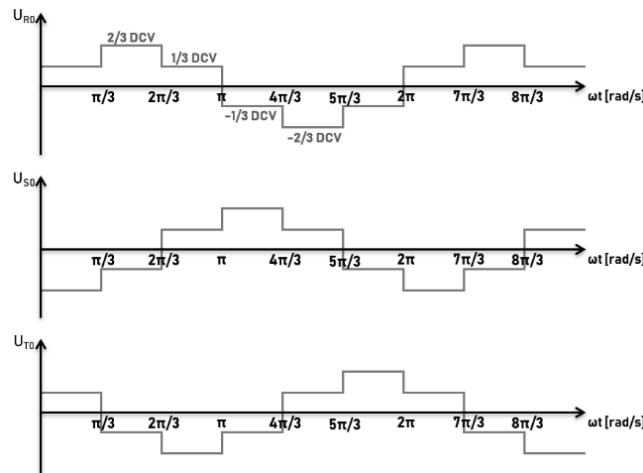
neither sine current nor sine voltage can be realized at the output. If a pulsating torque on the motor shaft is not tolerated, a simple controlled inverter is not advisable.

Six IGBT semiconductor switches are connected to the intermediate DC circuit. The alternating voltage is realized by switching these, which forms a three-phase network. The phase is offset from the others by 120° . During one period, one of the IGBT elements is switched off or on six times. An IGBT can take part in driving till 180° . The structure of the inverter is shown in *Figure 2*, where the induction motor is connected to the output.



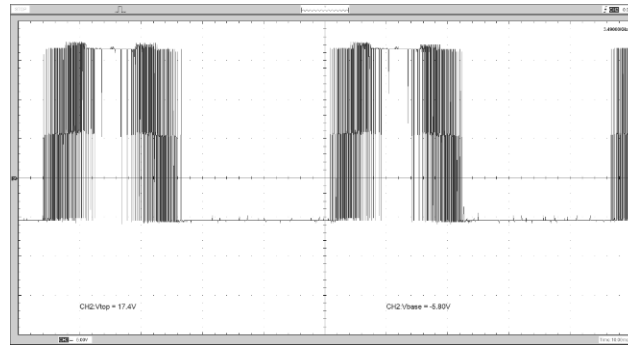
2. Figure: Three-phase inverter.

The phase voltages generated on the star-connected power supply are shown in *Figure 3*. In the case of electric cars, simple control is not allowed because the torque will be pulsating, the car will not accelerate smoothly. The smoothest torque is created by sinusoidal current and flux.



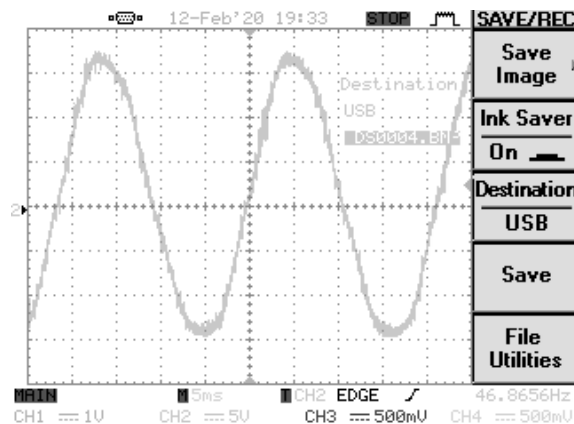
1. Figure: The three-phase voltage.

Since IGBT switches are only controlled by rectangular signals, Sine Pulse Width Modulation (SPWM) must be used. This method results that the fundamental frequency of the control signal will be sinusoidal. Therefore, the basic harmonic of the current includes the sine as well as overtones due to the switching frequency. The amplitude of the overtones can be greatly reduced by an LC low-pass filter. The IGBT Gate-Emitter capacity has the following control voltage in case SPWM control (*Figure 4*), switching frequency is 7,3 kHz.



2. Figure: IGBT driver voltage.

If a low pass filter on the inverter output is used, the current of *Figure 5* is obtained on one of the motor coils. Of course, THD is not 0% even so, but the amount of overtone content is greatly reduced. During the measurement, the DC/DC converter stably provided a DC voltage powered by the solar cell string.



3. Figure: Phase current.

6. TYPE OF SOLAR CELLS

The solar cell is an electrical device, that converts the energy of light directly into electricity, its operational background is the photovoltaic effect. They are more and more popular year after year and their residential and industrial usage is constantly increasing. As a result of their development, their efficiency is increasing, while their production cost is constantly decreasing. Depending on the type, the efficiency of the solar panel can reach 22%. Under laboratory conditions, efficiency of 30% also has already been achieved. The vast majority of currently used solar cells are based on silicon semiconductors, but there is ongoing research into the development of new technologies to further maximize existing efficiency [4].

The major types of currently applied solar cells:

- amorphous
- polycrystalline
- monocrystalline
- organic.

Nowadays amorphous solar cells are faded into the background, among other things, due to their low efficiency (5 – 8%). In the case of amorphous silicon solar cells, the silicon atoms are less ordered, and atoms are less attached to neighbours, like in the crystalline version. One of the advantages of amorphous silicon solar cells is that they are cheaper to produce than crystalline silicon cells, have thinner layers, thus they can be placed in rigid or flexible frames [5, 7]. They absorb more light, so their power decreases lesser in low-light, cloudy conditions than crystalline types. Among their disadvantages are the lower efficiency, and the degradation of efficiency by aging. The reason for this is the lower stability of amorphous silicon [6].

The use of polycrystalline solar cells is the most common among residential users. This is due to the fact, that they have the most favourable cost per produced energy. Price plays a very important role in the development of silicon based crystalline solar cells. The production of monocrystals is very expensive due to the technology. This led to the development of polycrystalline solar cells. The bottom line of the production of polycrystals, that the electronic grade silicon base material is melted and poured into a graphite crucible and crystallized under controlled cooling. Crystallization starts at several focal points and the solidified material becomes polycrystalline [6, 7].

Their efficiency can reach 18%, and this value is less dependent on the age of the solar panel. Manufacturers generally warrant staying the loss of efficiency within the 20% limit for 25 years [5, 7]. Crystalline solar cells can be easily recognized by their cellular structure, which cells are galvanically coupled to one another and their combined power supplies the electricity of a solar module.

Monocrystalline solar cells produce the highest efficiency. However, their manufacturing technology is very expensive, so their popularity in the residential usage is less significant than the polycrystalline type. Crystalline silicon solar cells, and generally most semiconductor devices are made on a crystalline semiconductor chip, also known as a wafer. Their efficiency can reach 22% [5].

Organic solar panels are the youngest type of solar panels. Their development began in the last decade and has developed significantly during this time. As thin-film technologies, organic cells can be used to coat different surfaces like glass, metal, plastic, or can be print by using 3D printers. Another advantage of organic technology is that it is less sensitive to the angle of incidence of light, thus they are ideal for the not exactly southern orientation. They are also excellent for colouring and patterning. The most important promise, that they will be produced very cheaply, large surfaces will be coated with them, however this could not be proved in practice in the absence of large-scale production [7]. Organic solar panels are now seen as a major, untapped, environmentally friendly possibility for large energy and oil companies. Carbon-based organic polymer solar cells still operate at very low efficiency (<4%), however they were able to achieve 6% efficiency under laboratory conditions. Another disadvantage, that their production is relatively expensive compared to silicon based solar cells. In addition to the high price, there is another problem to be solved, which is their short lifetime. While conventional, crystalline and thin-film solar cells are sold with a 20- to 25-year performance guarantee, organic solar cells operate for 3 to 5 years based on current tests.

In fact, organic solar technology can be divided into two main groups:

- semiconducting organic polymers,
- dye-sensitised cells (DSC) [7].

Table 1.: The parameters of the most commonly used monocrystalline solar cells.

Power [W]	Operating voltage [V]	Dimensions [mm]
5	12	220x250x18
10	12	370x250x18
20	12	500x350x25
25	12	500x350x25
30	12	520x510x28
40	12	530x520x28
50	12	630x545x35
80	12	1080x545x35
100	12	1205x545x35
140	12	1480x680x35

Solar panels are manufactured in a variety of sizes. There are many categories ranging from the very small cell of a few mm² to the module of 1.6 m². The solar modules are made up of small cells, usually 100 cm² cells connected in series and parallel. While unit price per power in case of a 100 W monocrystalline solar cell is ~602 Ft/W, a polycrystalline solar cell with the same performance is only ~484 Ft/W. Because of this difference in value for money, polycrystalline solar panels are the best choice to use in solar cars. In addition, the dimensions of the solar panel can be selected depending on the location. It is advisable to install fewer but larger solar panels on the roof or engine hood. *Table 2* contains the parameters of the most commonly used solar cells. 10 W polycrystalline solar panel (in uppermost row of *Table 2*) can generate only ~98 W of electricity per square meter (since the solar panel has a surface of ~ 0.1 m²), while its value for money is ~895 Ft/W. On the other hand, the capacity per unit surface area of a 270 W solar panel (in undermost row of *Table 2*) is ~165 W/m², while its value for money is ~284 Ft/W. (The used values for money and values per unit surface area are informative average values given the large number of manufacturers and distributors.)

Table 2.: The parameters of the most commonly used polycrystalline solar cells.

Power [W]	Operating voltage [V]	Dimensions [mm]
10	12	245x415x17
20	12	345x535x25
30	12	356x798x30
50	12	655x668x30
80	12	674x950x35
85	12	674x951x35
100	12	674x1131x35
130	12	674x1482x35
140	12	680x1479x35
150	12	674x1482x35
200	12	992x1488x35
250	24	992x1650x40
260	24	992x1640x40
270	24	992x1640x40

7. CONCLUSIONS

The source of our inspiration was the World Solar Challenge. However, these cars are one-man vehicles and not particularly suitable for daily use. Several companies and universities are already working to resolve this issue. Build a family car powered by solar panels.

Solar powered prototype is currently being developed by the Lightyear company and the German start-up Sono Motors. The Lightyear One is a large hatchback, with 5 m² of solar panels. The company Lightyear claims that the car can add 50–65 km of range per day during summer. It seats five adults and luggage.

The Sono Sion (Sono Motors) is an announced solar powered, electric car. The drive will be a three-phase induction motor with a power of 120 kilowatts (161 hp). The top speed of 140 kilometres per hour should be possible. The total area of photovoltaic modules is 7.5 m². The daily range gained in Central Europe is at a maximum of 34 kilometres a day under favourable conditions and on average over a whole year about 10 kilometres a day. The production of both vehicles is scheduled to start in 2021.

An induction motor can operate by being powered exclusively by the solar cell string through the DC / DC converter and inverter. The current is sinusoidal, so little torque pulsation occurs on the motor shaft. The solar panel on top of cars can run the motor only at very low power. Therefore, it is best, if only the battery is charged continuously by it. Another option is to supply the auxiliary circuit of the inverter, independently of the battery, from a solar panel. The auxiliary circuit may cover the control power of the IGBTs from the solar panel. IGBT modules require high control power in pulsed mode due to their Gate-Emitter capacity.

Consider an average-sized electric car with a consumption of 200 Wh/km and a roof area of 4 m². Ideally 350 W solar capacity can be placed on a surface of this size. On an average summer day, we can expect 3.5 kWh of electricity. This means that our car would ideally be able to cover 17.5 km with electricity from solar panels. Of course, this requires that the roof of the car (where the solar panels are located) is constantly shining by the sun. Annually, this small solar power plant can produce maximally 950-1000 kWh/year of electricity, which is enough to cover 4750-5000 km/year. The annual average is 13 km per day. It should not be overlooked, that the battery pack and electronic devices, charge controllers, and electric motor controllers have efficiency-reducing effect, which can reduce these theoretical distances.

8. REFERENCES

- [1] PAREKH, R.: *AC Induction Motor Fundamentals (AN887)*, Microchip Technology Inc., 2003, p. 24
- [2] BEDERKE, H. J., PLASSEK, R., ROTHENBACH, G., VASKE, P.: *Villamos hajtások és vezérlések*. Műszaki Könyvkiadó, 1973, p. 234.
- [3] http://cms.sulinet.hu/get/d/cf6b9279-8013-4909-b965-c7cb424f9f51/1/3/b/Large/fe-szultseg_frekvencia_diagram_nagyitott.png
- [4] JUHÁSZ, Á. LÁNG, I. BLASKOVICS, GY. MIKA, J. SZÉPSZÓ, G. HORÁNYI, A. DOBI, I. NAGY, Z.: *Megújuló Energiák*. Sprinter Kiadói Csoport, Budapest, 2009.
- [5] FERENCZI, Ö.: *Áramtermelés nap- és szélenergiából*. Budapest, 2007.
- [6] NEMCSICS, Á.: *A napelem és fejlesztési perspektívái*, Budapest, 2001.
- [7] DR. BODNÁR, I.: *Napelem működésének alapjai, a napelemes villamosenergia-termelés elmélete és gyakorlati megvalósítása*. Miskolci Egyetem, 2019. p. 108. ISBN 978-615-00-4566-5.
- [8] RETTER, GY.: *Az egységes villamosgép elmélet*. 1970. p. 243.

LIFE CYCLE ASSESSMENT OF VEHICLES

**BOROS Rafael Ruben¹, BODNÁR István², MATUSZ-KALÁSZ Dávid³,
JOBÁGY Marcell⁴**

¹egyetemi tanársegéd, ruben.boros@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet,
Elektrotechnikai és Elektronikai Tanszék

²Ph.D., egyetemi docens, istvan.bodnar@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet,
Elektrotechnikai és Elektronikai Tanszék

³Ph.D., egyetemi tanársegéd, david.matusz-kalasz@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet,
Elektrotechnikai és Elektronikai Tanszék

⁴tanszéki mérnök, marcell.jobbagy@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet,
Elektrotechnikai és Elektronikai Tanszék

Abstract: *This paper presents the LCA (Life Cycle Assessment) of traditional and electric vehicles. Among the traditional cars, we examined diesel, petrol, LPG, and CNG, as well as petrol hybrid and diesel hybrid cars. In case of analysis took into production (indirect) and in-use (direct) environmental emissions from a vehicle. While using traditional vehicles, direct emissions are higher than for electric vehicles. In contrast, the environmental emissions from vehicle production show reverse proportionality. Among the cumulative emissions, there is no large difference. Depending on the design life and mileage of the vehicles and how they are used, an electric car can pose an even greater environmental risk over its lifetime than a conventional car.*

Keywords: *LCA, electrical vehicles, diesel and petrol vehicles*

1. INTRODUCTION

The accelerated extraction of crude oil and the gradual depletion of oil fields, as well as their environmental impacts, are one of the most controversial topics in modern society. Crude oil consumption is concentrated in two areas. One area is plastics production, the other is fuel production. In the 20th century, vehicles equipped with internal combustion engines spread explosively and replaced conventional, animal-powered, or steam-powered machines. While in 1900 barely 100 million barrels of crude oil were produced annually, in 2019 this value had already exceeded 3,000 million barrels. This about thirty times increase also left a very significant mark on the environment. In addition to the carbon footprint, the depletion of fossil fuels as well as the effects of smog formation have also become key issue. However, we must reckon with environmental damage not only for vehicles running on conventional fuels (petrol and diesel), but also for electric vehicles. While indirect and direct emissions can be quantified in the former, only indirect emissions can be expected in the latter. If we look at vehicles from a life cycle perspective, both indirect and direct emissions should be considered. For conventional vehicles, direct emission is authoritative, while for electric vehicles it is indirect. In the case of electric cars, the way in which the electricity used is generated plays a very decisive role. It does not matter whether the electricity comes from a fossil (e.g. coal-fired) or renewable power plant (e.g. solar). For electric cars, the battery is another key factor. The production of batteries and their recycling and disposal have significant environmental effects. The question arises, is an electric car more environmentally friendly than a traditional one?

2. THE METHODS OF LIFE CYCLE ASSESSMENT

Nowadays, Life Cycle Assessment (LCA) is one of the most popular environmental management system tools, the application of which is the most expedient, especially for substitute services, products, and technologies. Apropos of LCA, we quantify and estimate the environmental impact of a product, technology, or service over its entire life cycle (production, distribution, use, disposal of waste) and what and how much natural resources it uses (including energy expenditure).

Based on ISO 14040, life cycle analysis can be defined as follows: " a method of assessing product-related environmental factors and potential impacts that takes stock of the inputs and outputs of a system of product-related processes; assess the potential environmental impacts associated with them; interprets the results of the inventory analysis and impact assessment phases taking into account the objectives of the study " [1].

In the classical sense, a product or technology can only be described as environmentally friendly if the product itself and the waste generated during its production and consumption do not have a direct and indirect impact on the environment. In this sense, the ecological balance of a given product in the "cradle to grave" approach is positive, but at least neutral to the environment. In practice, a production and consumption process that can be considered waste-free is inconceivable. Therefore, the use of the positive indicator itself in this case suggests that adverse environmental impacts on products and technologies are smaller. Recognizing the environmentally friendly nature of a product or technology is not an easy task and in practice we may encounter many contradictions [1].

The interpretation phase: Life cycle interpretation is the final phase of the LCA procedure, in which the results of the LCI or an LCIA, or both, are summarized and discussed as a basis for conclusions, recommendations and decision-making in accordance with the goal and scope definition [1].

The Life Cycle Assessment study has four main phases. In the first stage, we define the purpose and scope of the analysis. In the second stage, we perform an inventory analysis of whether basic physical laws, such as the law of conservation of matter and energy, prevail. The third stage is the most interesting, as this is where the impact assessment takes place. Based on the inventory data, we assign an environmental impact to each material and energy flow. Environmental impacts are classified into so-called environmental impact categories. Finally, the fourth stage is the comparison, evaluation, and decision-making of LCA results [1, 13].

In the second stage of the analysis, a reference unit is defined for each impact category, against which other inventory data with the same impact are compared. For example, greenhouse gases are measured in kg CO₂ equivalent. The impact of 1 kg of CO₂ on global warming represents 1 kg of CO₂ equivalent. The contribution of methane emissions to global warming is given in kg CO₂ equivalent, which can be 21, 23 or 25 kg, depending on the method used. An inventory data can be linked to multiple impact categories [1, 10].

There are different methods for weighting impact categories that allow the expression of potential environmental impacts using an indicator after life-cycle assessment. There are different methods for weighting impact categories that allow the expression of potential environmental impacts using an indicator after life-cycle modelling. In our studies, we can also use a free trial version of commercially available life cycle analysis software called GaBi. The GaBi 8 software contains about 100 evaluation methods (e.g. CML 96, CML 2001, EDIP 97, EDIP 2003, EPFL 2002+, TRACI, Eco-indicator 95, Eco-indicator 99 etc.), thus practically covering the most widely used current methods. The environmental impact categories according to the CML are given in *Table 1*.

Table 1.: The environmental impact categories according to the CML.

Environmental Impact Categories	Reference	Environmental Impact Categories
Global Warming Potential (GWP)	kg CO ₂ - Equivalent	Global Warming Potential (GWP)
Acidification Potential (AP)	kg SO ₂ - Equivalent	Acidification Potential (AP)
Eutrophication Potential (EP)	kg phosphate- Equivalent	Eutrophication Potential (EP)
Human Toxicity Potential (HTP)	kg DCB- Equivalent	Human Toxicity Potential (HTP)
Photochemical Ozone Creation Potential (POCP)	kg ethylene- Equivalent	Photochemical Ozone Creation Potential (POCP)
Ozon Layer Depletion Potential (ODP)	kg R11- Equivalent	Ozon Layer Depletion Potential (ODP)
Terrestrial Ecotoxicity Potential (TETP)	kg DCB- Equivalent	Terrestrial Ecotoxicity Potential (TETP)
Marine Ecotoxicity Potential (MAETP)	kg DCB- Equivalent	Marine Ecotoxicity Potential (MAETP)
Freshwater Aquatic Ecotoxicity (FAETP)	kg DCB- Equivalent	Freshwater Aquatic Ecotoxicity (FAETP)
Abiotic Depletion Potential fossil (ADP fossil)	MJ	Abiotic Depletion Potential fossil (ADP fossil)

3. TRADITIONAL AND ELECTRICAL VEHICLES

Internal combustion engines in vehicles require much more maintenance than electric motors used in electric cars. Electric cars are fitted with electric motors that do not contain carbon brushes. Electric cars are equipped with a permanent magnet synchronous machine (PMSM) that can deliver high torque even when starting the car at 0 km/h. These electric motors require large Li-ion battery packs. Batteries generate electricity electrochemically, so their production, use and recycling are not environmentally friendly. The Li-ion battery, on the other hand, is flammable, so its use is not safe. The materials that make up a Li-ion battery, when released into the environment, do more damage than carbon dioxide. Battery life is estimated at 2022 years, so ideally no battery needs to be replaced during the life of the car. However, the reality does not reflect this, the capacity of batteries is reduced by about 3-4% per year. Because of this, the battery pack will be replaced prematurely because the range of the car will be greatly reduced at low capacity. Obsolete batteries can still be used for other purposes, but this does not cause a large reduction in emissions. Due to the rapid spread of electric car use, there is a growing demand for electricity. For this reason, transmission lines also need to be scaled up and more and more installed [5, 6].

In internal combustion cars, lubricating oil changes and fuel filter replacements cause a lot of pollution. The production of lubricating oils is also associated with high carbon dioxide emissions. Internal combustion cars also have a battery, which also increases emissions, but these batteries are smaller in size and less flammable. Improperly maintained cars easily release lubricating oil or fuel into the environment, which gets into the ground [11].

4. TRADITIONAL AND ELECTRICAL VEHICLES

The Life Cycle Analysis was performed for 7 passenger cars with different fuels. The analysis in each case consists of two parts. On the one hand, we examined direct emissions from fuel consumption and, on the other hand, indirect emissions from car production. According to the EPD, these so-called Life stages “A” and “B”. In both cases, distance of 1 km was chosen as the functional unit [9]. For all vehicles, it was assumed that no major service was required for the first 150,000 km of service life. The total lifetime was taken as 300,000 km. Details of the vehicles and fuels tested are given in *Table 2*. [3, 4].

Table 2.: Baseline data for LCA analysis.

Tested vehicle types	Tested fuel types
EURO 6 Diesel 1400-2000 cm ³	Diesel EU-28
EURO 6 Petrol 1400-2000 cm ³	Petrol EU-28
EURO 6 LPG 1400-2000 cm ³	LPG EU-28
EURO 6 CNG 1400-2000 cm ³	CNG EU-28
EURO 6 Diesel-hybrid 1400-2000 cm ³	Diesel EU-28, Electricity EU-28
EURO 6 Petrol-hybrid 1400-2000 cm ³	Petrol EU-28, Electricity EU-28
Pure electric 100 kW electric motor (50 kWh battery bank)	Electricity EU-28

Table 3. compares the emissions from the fuel used to cover 1 km. It can be observed that the largest direct greenhouse gas emissions are found in the petrol car. The smallest value is represented by the electric car. This value can be further reduced if the electricity used comes from renewable energy sources or a nuclear power plant. It can also be seen that the direct emissions of hybrid vehicles are lower than those of their purely diesel or gasoline-powered counterparts. This finding is only valid for the EURO 6 category. If we consider older hybrid vehicles of EURO 3 or EURO 4 environmental class, their emissions exceed those of conventional fuels of EURO 6 category [2, 8, 12].

If emissions are summed and compared to the electric car, the petrol vehicle is up 269.6%, the LPG up 265.6%, the CNG up 263.5%, and the gasoline hybrid up 235.7%, diesel has 207.0% higher diesel direct emissions and 185.6% higher direct emissions.

Table 3.: Emissions from (indirect) fuel consumption.

	GWP	AP	EP	ODP	ADP elements	ADP fossil	HTP
Diesel	0,131	1,10E-04	2,99E-05	2,38E-17	1,11E-08	1,950	2,98E-03
Petrol	0,158	1,44E-04	2,38E-05	6,32E-17	1,18E-08	2,550	6,16E-03
LPG	0,140	1,25E-04	9,60E-06	2,74E-17	5,13E-09	2,530	4,68E-03
CNG	0,133	6,77E-05	3,51E-06	2,94E-17	1,04E-10	2,520	1,41E-04
Diesel-hybrid	0,123	1,74E-04	3,05E-05	1,61E-16	1,19E-08	1,741	4,29E-03
Petrol-hybrid	0,144	2,01E-04	2,56E-05	1,92E-16	1,24E-08	2,222	6,83E-03
Electricity	0,089	4,28E-04	3,30E-05	7,08E-16	1,49E-08	0,908	9,52E-03

Table 4. shows the emissions from vehicle production per 1 km. It can be observed that in all environmental impact categories, the electric car has the highest emissions. This is understandable, as the battery technology currently used represents a very significant environmental risk. The electric car is followed by gasoline and diesel-powered hybrids. In terms of total emissions, the petrol-powered car increased by 35.3%, the LPG-powered car by 34.7%, the CNG by 34.58%, the diesel by 29.23%, and the petrol hybrid by 25.67 % and the diesel hybrid has 19.81% lower indirect emissions.

Table 4.: Emissions from vehicles production.

	GWP	AP	EP	ODP	ADP elements	ADP fossil	HTP
Diesel car	3,46E-02	8,58E-05	1,64E-05	4,46E-12	5,07E-06	1,71E+02	2,70E-04
Petrol car	1,21E-02	8,08E-05	1,82E-05	4,08E-12	4,63E-06	1,57E+02	2,17E-03
LPG car	3,58E-02	2,67E-05	7,55E-06	4,12E-12	4,68E-06	1,58E+02	5,85E-06
CNG car	2,65E-02	2,90E-05	7,62E-06	4,13E-12	4,69E-06	1,58E+02	6,53E-06
Diesel-hybrid	1,96E+00	5,56E-03	5,29E-04	5,00E-12	5,68E-06	1,92E+02	1,21E-01
Petrol-hybrid	1,99E+00	5,68E-03	5,43E-04	4,63E-12	5,26E-06	1,78E+02	1,26E-01
Electric car	2,05E+01	5,81E-02	5,45E-03	5,74E-12	6,52E-06	2,20E+02	1,29E+00

We summarize direct and indirect emissions. The results shown in Table 5. are then obtained. It can be observed that the electric car has the highest environmental impact values. All this is illustrated in Fig. 1. based on the relative distribution of total emissions. The larger the area under a curve, the greater the environmental impact of the car associated with it.

Table 5.: Cumulative emissions (direct and indirect).

	GWP	AP	EP	ODP	ADP elements	ADP fossil	HTP
Diesel car	1,66E-01	1,96E-04	4,63E-05	4,46E-12	5,08E-06	1,73E+02	3,25E-03
Petrol car	1,70E-01	2,25E-04	4,20E-05	4,08E-12	4,65E-06	1,59E+02	8,33E-03
LPG car	1,76E-01	1,52E-04	1,72E-05	4,12E-12	4,68E-06	1,61E+02	4,69E-03
CNG car	1,60E-01	9,67E-05	1,11E-05	4,13E-12	4,69E-06	1,61E+02	1,48E-04
Diesel-hybrid	2,09E+00	5,73E-03	5,60E-04	5,00E-12	5,69E-06	1,94E+02	1,26E-01
Petrol-hybrid	2,13E+00	5,88E-03	5,68E-04	4,63E-12	5,27E-06	1,80E+02	1,33E-01
Electric car	2,06E+01	5,86E-02	5,48E-03	5,74E-12	6,53E-06	2,21E+02	1,30E+00

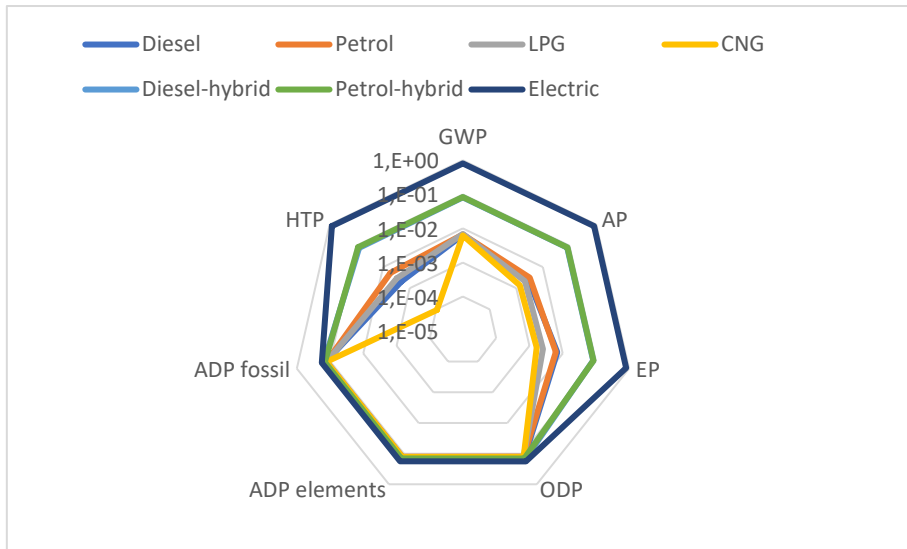


Figure 1.: Cumulative emissions.

If we examine the percentage distribution of the environmental load of each car, we get Fig. 2. as a result. From a life cycle perspective, the most environmentally friendly car is gasoline-powered. This is followed in turn by LPG, CNG, diesel, gasoline hybrid, diesel hybrid and finally the electric car.

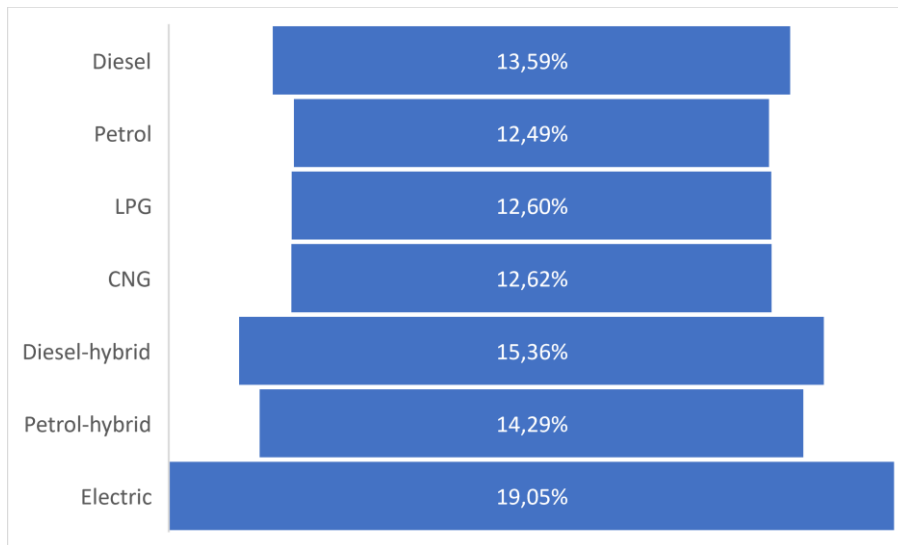


Figure 2.: Relative emissions.

There is no clear significant difference between the results reported above. This is because, in addition to the mileage expressed in km, the operating hours and annual km usage, as well as the mode of operation, must not be disregarded. In urban conditions, not only consumption but also wear and tear is more significant, so those cars may need more maintenance. It does not matter whether the vehicle reaches the planned service life of 10 or 20 years. Older cars are more prone to corrosion, so there is a greater environmental impact of maintenance due to the body being locked and repainted. For LPG and CNG vehicles, replacing the gas storage tank, while for an electric car, replacing the battery has an additional environmental impact. Battery

replacement is more authoritative, so the life-cycle environmental emissions of electric vehicles outweigh the same environmental impacts of conventional vehicles [7, 14].

Consider the case where each vehicle is used under the same conditions. Then operating expenses can be divided into two groups. One group includes factors that occur equally in all vehicles. Examples are the environmental effects of replacing wearing parts (such as brake pads and brake discs). The other group includes those that occur only for individual vehicles. For example, in cars with an internal combustion engine, changing the engine oil or maintaining the engine itself (control change). Since the factors in the first group occur equally, they do not substantially change the proportions shown in the above price range. Those in the second group, on the other hand, do. Due to oil changes and maintenance of internal combustion engines, the emission rates of those cars are increasing. Since the electric motors of electric cars are practically maintenance-oriented, the emissions there are unchanged, i.e. the proportions converge, equalize, or even the weights can be placed t. If the batteries of electric and hybrid cars can withstand the planned service life of 300,000 km, then the life-cycle emissions of each car can be of the same order of magnitude, almost the same value.

At the end of the life cycle, we still must reckon with the emissions from the disposal / recycling. Here, in the first place, the utilization of batteries may differ from that of cars without batteries. Overall, therefore, it can be said that there is no significant difference between the life-cycle environmental impacts of individual hairy vehicles, so it is appropriate to conduct further studies on specific cars.

5. CONCLUSIONS

Overall, there are no significant differences in the environmental impact of EURO 6 traditional cars and electric cars. While in the case of traditional cars, direct emissions are authoritative, in the case of electric cars, the production and recycling life cycle of the car is more environmentally burdensome. Depending on the design life and mileage of the vehicles and how they are used, an electric car can pose an even greater environmental risk over its lifetime than a traditional car. Of course, several other factors (e.g. maintenance and refurbishment) also depend on the life-cycle environmental emissions. The environmental impact of electric cars can be reduced if the electricity they use comes from renewable energy sources or nuclear power plants. The continuous development of battery technology can also benefit electric cars. Based on all this, the effects caused by each vehicle can be balanced. Diesel cars older than EURO 6 that do not use a particulate filter are typically more polluting than their electric counterparts. The environmental impact of hybrid vehicles is heavily dependent on the type of battery and charge, but they are typically more environmentally burdensome than their traditional counterparts. The future goal is a full lifecycle comparison.

6. ACKNOWLEDGEMENT

The research was funded by the National Research, Development, and Innovation Office under the grant 2020-1.1.2-PIACI-KFI-2020-00138, "Development of an innovative system for optimizing electricity use for industrial and residential consumers and electric vehicles." The project was carried out in the framework of the project entitled.

7. REFERENCES

- [1] HAUSCHILD, M. Z.: *Introduction to LCA Methodology*, Life Cycle Assessment pp. 59-66 (2017).

- [2] DONATEO, T., INGROSSO, F., BRUNO, D., AND LAFORGIA, D.: *Effect of Driving Conditions and Auxiliaries on Mileage and CO2 Emissions of a Gasoline and an Electric City Car*, SAE Technical Paper, 2014-01-1812, p. 13 (2014).
- [3] DANILECKI, K., MROZIK, M., SMURAWSKI, P.: *Changes in the environmental profile of a popular passenger car over the last 30 years – Results of a simplified LCA study*, Journal of Cleaner Production 141, 208-218 (2017).
- [4] PIOTROWSKA, K., KRUSZELNICKA, W., BAŁDOWSKA-WITOS, P., KASNER, R., RUDNICKI, J., TOMPOROWSKI, A., FLIZIKOWSKI, J., OPIELAK, M.: *Assessment of the Environmental Impact of a Car Tire throughout Its Lifecycle Using the LCA Method*, Materials 12, 4177, p. 12 (2019).
- [5] BOUREIMA, F. S., MESSAGIE, M., MATHEYS, J., WYNEN, V., SERGEANT, N., VAN MIERLO, J., DE VOS, M., DE CAEVEL, B.: *Comparative LCA of electric, hybrid, LPG and gasoline cars in Belgian context*, World Electric Vehicle Journal 3, pp. 469-479 (2009).
- [6] REINHARDT, R., PAUTZKE, F., SCHRÖTER, M., WIEMERS, M.: *A case study of sustainable manufacturing strategy: comparative LCA of wheel hub engine for solar car application*, 2017 International Conference on Research and Education in Mechatronics (REM), pp. 1-6, IEEE, Wolfenbuttel, Germany (2017).
- [7] WEYMAR, E., FINKBEINER, M.: *Statistical analysis of empirical lifetime mileage data for automotive LCA*, International Journal of Life Cycle Assessment, 21, pp. 215-223 (2016).
- [8] ANTONIO, F., RIZZO, G., DE FEO, G., LANDOLFIL, S.: *Converting a Conventional Car into a Hybrid Solar Vehicle: a LCA Approach*, IFAC-PapersOnLine 51 (31), pp. 188-194 (2018).
- [9] SCHAUBROECK, S., SCHAUBROECK, T., BAUSTERT, P., GIBON, T., BENETTO, E.: *When to replace a product to decrease environmental impact?—a consequential LCA framework and case study on car replacement*, International Journal of Life Cycle Assessment, 25, p. 22 (2020).
- [10] DING, N., PAN, J., ZHANG, Z., YANG, J.: *Life cycle assessment of car sharing models and the effect on GWP of urban transportation: A case study of Beijing*, Science of The Total Environment 688, pp. 1137-1144 (2019).
- [11] DEL PERO, F., DELOGU, M., PIERINI, M.: *The effect of lightweighting in automotive LCA perspective: Estimation of mass-induced fuel consumption reduction for gasoline turbocharged vehicles*, Journal of Cleaner Production 154, 566-577 (2017).
- [12] QIANG, Z. Y., QUANG, W. Y., YUAN, S. H.: *Energy Management of Low Voltage Power Supply of Plug-in Hybrid Electric Vehicle*, IFAC-PapersOnLine 51 (31), pp. 1-6 (2018).
- [13] ÖZTAS, S. K.: *The Limitations of LCA Methodology Towards Sustainable Construction Materials*, In: International Sustainable Buildings Symposium ISBS 2017: Proceedings of 3rd International Sustainable Buildings Symposium (ISBS 2017), pp. 102-113, Springer, Dubai, United Arab Emirates (2017).
- [14] MORO, A., HELMERS, E.: *A new hybrid method for reducing the gap between WTW and LCA in the carbon footprint assessment of electric vehicles*, International Journal of Life Cycle Assessment 22, pp. 4–14 (2017).

MÉRÉSTECHNIKÁK A SZERSZÁMGÉPIPARBAN

MEASURING TECHNIQUES IN THE MACHINE TOOL INDUSTRY

FEKETE Tamás¹, TÓTH Dániel²

¹Ph.D., egyetemi tanársegéd, fekete@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Szerszámgépezési és Mechatronikai Intézet,
Szerszámgépek Intézeti Tanszéke

²egyetemi tanársegéd, beosztás, daniel.toth1@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Szerszámgépezési és Mechatronikai Intézet,
Szerszámgépek Intézeti Tanszéke

Kivonat: A szerszámgépek az ipar szerves részét képezik. Amennyiben valamilyen gépelemet kívánunk létrehozni, akkor használatuk elengedhetetlen. Olyan gépek, amelyekkel különböző anyagok átalakítására, megmunkálására is képesek voltak, már az ókori Egyiptomban is léteztek. A XVIII. és XIX. században többnyire saját felhasználásra készítettek szerszámgépeket [1]. Ennek köszönhetően később olyan gyárak jöttek létre melyek célja a szerszámgépek gyártása volt. A gyártási pontosság és a szerszámgépipar rohamos fejlődése tette szükségessé azt a mérés-technikát, amellyel meg tudjuk vizsgálni ezeket a gépeket. A korszerű mérés-technikák segítségével biztosítani tudjuk, a megfelelő minőségű munkadarabok előállítását, és a szerszámgép hosszú élettartamát is.

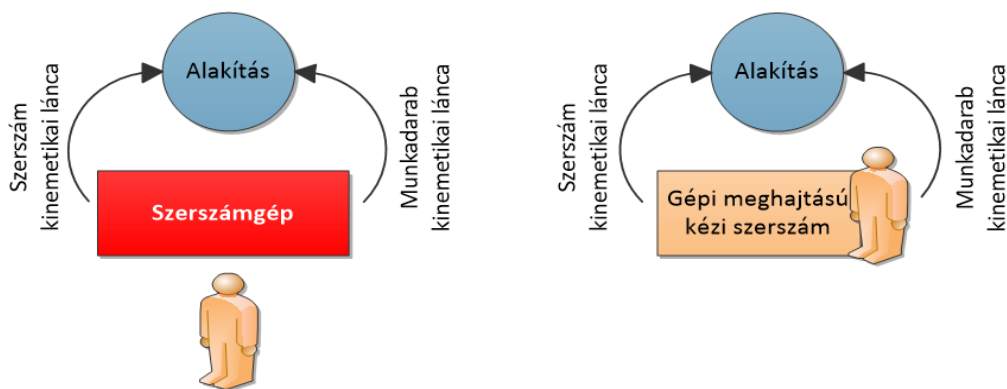
Kulcsszavak: szerszámgép, mérés-technika, pontosság, munkadarab

Abstract: Machine tools are an integral part of industry. If we want to create some kind of machine element, then their use is essential. Machines with which they were able to transform and process various materials already existed in ancient Egypt. In the 18th and 19th centuries, they mostly made machine tools for their own use. Thanks to this, factories were later created whose purpose was the production of machine tools. Production precision and the rapid development of the machine tool industry necessitated the measuring technology with which we can examine these machines. With the help of modern measuring techniques, we can ensure the production of the right quality workpieces and the long service life of the machine tool.

Keywords: machine tool, measuring technique, accuracy, workpiece

1. SZERSZÁMGÉPEK FOGALMA

Azokat a munkagépeket, amelyeknek a segítségével a kívánt munkadarabokat vagy valamilyen használati tárgyakat tudunk elkészíteni, szerszámgépeknek nevezzük. Hétköznapi használatban a gépi meghajtású kéziszerszámok esetében elterjedt a „szerszámgép” kifejezés használata, de ez hibás. Szerszámgépeknél a gépkezelő nem része a munkadarab, készülék, gép és a szerszám együttesen képzett rendszerének (MKGS rendszer). A szerszámgép és a kézi szerszám közötti különbséget az 1. ábra mutatja.



1. ábra: A szerszámgép és a kézi szerszám rendszere [2].

A szerszámgépeket az alakítási módok szerint három nagy csoportba sorolhatjuk. Az egyik lehetséges csoportosítási módja az 1. táblázatban látható.

1. táblázat: A szerszámgépek osztályozása az alakítási mód szerint. (saját szerkesztés [3] alapján)

Anyagválasztással dolgozó gépek			Anyagválasztás nélkül dolgozó gépek		Nagyenergiájú sugarakkal dolgozó gépek	
Forgácsoló gépek	Szikraforgácsoló gépek	Daraboló gépek	Hidegalakító gépek	Melegalakító gépek	Folyadéksugaras gépek	Lézer / plazma sugaras gépek
Esztergák Gyalugépek Vésőgépek Fűrőgépek Marógépek Üregelőgépek Fűrészgépek Fogazógépek Kőszőrűgépek Felületfinomító gépek stb.	Huzalelektrodás gépek Tömbelektrodás gépek stb.	Ollók Kivágó gépek Lyukasztó gépek stb.	Prések Hidegsajtoló gépek Hajlító gépek Mélyhúzó gépek Mángorló gépek Hideghengerlő gépek Hidegfolyató gépek Dróthúzó gépek Rúgógyártó gépek stb.	Extruderek Fröccsöntő gépek Kovács kalapácsok Melegsajtoló gépek Meleghengerlő gépek Csőhengerlők Meleghúzó gépek stb.	Kivágó gépek Térfogatalakító gépek stb.	Kivágó gépek Anyagfűtlakó gépek Felületfűtlakó gépek stb.

Az 1. táblázat alapján belátható, hogy a szerszámgépek rendkívül széles kínálata miatt sokféle mérési eljárásra van szükség, hogy megfelelő minőségű munkadarab előállítását biztosítani tudjuk. A továbbiakban egy napjainkban is használatos méréstechnikai módszert szeretnék bemutatni.

2. SZERSZÁMGÉPEK PONTOSSÁGÁNAK VIZSGÁLATA

A megfelelő minőségű munkadarab gyártása miatt elengedhetetlen a szerszámgépeken bizonyos időközönként különböző mérési módszerek elvégzése. A mérési módszereken azon elvek összességét kell érteni, amelyeknek előírásait követve és pontosan betartva a méréseket elvégezzük. A mérendő mennyiség jellegét tekintve, az alkalmazási lehetőségek függvényében a mérési módszereket többféle szempont szerint lehet csoportosítani.

A közvetlen mérési módszernek azt az eljárást tekintjük, amikor a mérni kívánt mennyiség közvetlenül kerül összehasonlításra a mértékegységet megtestesítő etalonnal (pl.: szögmérés szögmérővel).

A közvetett mérési módszernek azt az eljárást tekintjük, amikor a mérendő mennyiséggel összefüggő egyéb jellemző mérése közvetlen módszerrel valósul meg (pl.: térfogatmérés) [4].

A szerszámgépeknek az alábbi feltételeket kell kielégíteniük:

- előírt pontossággal,
- a legnagyobb mennyiségben,
- a legkisebb energiafelhasználással és
- a környezetet legkevésbé szennyezve kell a munkadarabot elkészíteni.

Az említett feltételek teljesítésére olyan szerszámgépet kell építeni, amelynek tulajdonságai a következő szempontoknak megfelelnek:

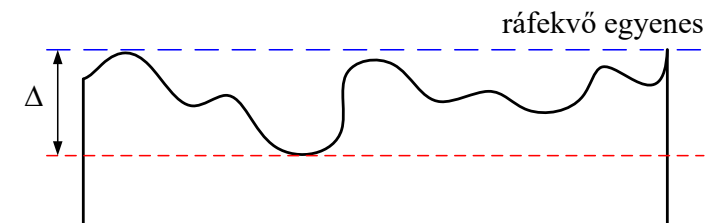
- megfelelő geometriai és megmunkálópontosság,
- termelékenység,
- alacsony zaj- és rezgésszint.

A felsorolt géptulajdonságokban erőteljes szerepet játszik a statikus és a dinamikus merevség. A statikus merevség alapvetően meghatározza a gép pontosságát, a dinamikus merevség behatárolja terhelhetőségét és hatással van a zajára és rezgésére. [5, 6, 7, 8]

2.1. Geometriai pontosság vizsgálata, egyenességtérés mérése

A szerszámgépek vizsgálatának szempontjából a geometria fogalma alatt a vizsgálandó berendezés fő egységeinek összefüggő, a méret-, alak- és relatív-helyzet jellemzők által meghatározott térbeli alakzatát értjük. Egy szerszámgép-geometriát nem lehet állandónak tekinteni, megváltozását a működési mozgások – elsődlegesen az egységek előírt relatív elmozdulásai – hatásaira jön létre. Léteznek azonban állandónak vett geometriai jellemzők is, mint például a relatív helyzet jellemzői, amelyek közül a mozgásirány-főorsótengely párhuzamosság említendő példaként. Ezen jellemzők állandóság-vizsgálatait az adott szerszámgépre vonatkoztatott és kiválasztott egységeinek mozgatása alatt szükséges elvégezni [4].

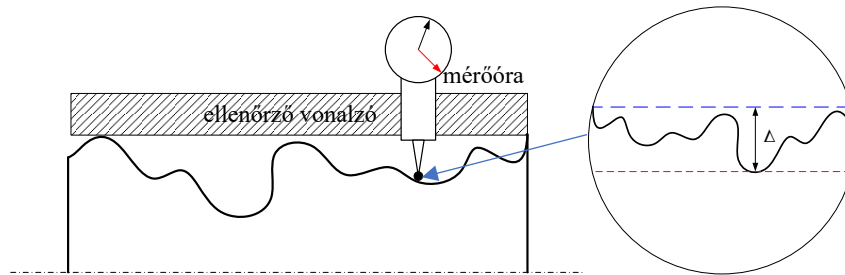
Ezen módszerek közé tartozik az egyenességtérés mérése. Egymáson elmozduló síkfelületelempárok és mozgáspálya egyenességét és egyenesvonalúságot különböztethetünk meg egymástól. Bármelyik esetről legyen is szó egy referenciavonalhoz képest mérünk és értékelünk. A referenciavonalat ráfekvő egyenesnek nevezzük. Ez egy olyan, a valóságos egyenestől eltérő vonalszakaszt érintő egyenes, amelyhez képest a vizsgált vonalszakasz legnagyobb távolsága minimális. A 2. ábra a ráfekvő egyenes vizsgált szakasz képesti elhelyezkedését és az egyenességtérés értelmezését szemlélteti.



2. ábra: Egyenesség eltérés elmélete.

A 2. ábra alapján megállapítható, hogy a ráfekvő egyeneshez képest mekkora Δ értékkel tér el a vonalszakasz. Amennyiben a vizsgálni kívánt felület (görbe) esetében nem pusztán az egyenességtérés értékét szeretnénk meghatározni, úgy a görbe több különböző pontjában meg kell ismételnünk a mérést. A továbbiakban ennek a lehetséges módját szeretném bemutatni.

Hagyományos mérés technika alkalmazása esetén a mérés elvégzéséhez egy ellenőrző vonalzóra és egy indikátor mérőórára lesz szükség. A mérés elvi elrendezését a 3. ábra mutatja.



3. ábra: Egyenességtérés mérése hagyományos módszerrel.

Ezen mérés technika alkalmazása esetén nem tudunk teljes képet kapni a felület (jelen esetben vizsgált egyenes) geometriai adatairól. Ebben az esetben közelítő paraméterekkel kívánjuk ellenőrizni a mérendő szakaszt. A közelítés úgy fog megvalósulni, hogy adott távolságokban felvett pontok információi alapján állítjuk elő a karakterisztikánkat. A mérést úgy végezzük el, hogy a vizsgált vonalszakaszt egyenlő hosszúságú szakaszokra osztjuk, és minden egyes osztáspontban egy mechanikus vagy digitális indikátorórával rögzítjük a pont és az ellenőrző vonalzó távolságát.

A vizsgálat eredményeként meg tudjuk állapítani, hogy szükséges-e a szerszámgép karbantartása, és amennyiben igen, úgy mely részeit kell kijavítani.

3. ÖSSZEFOGLALÁS

Az egyenességtérés vizsgálatát napjainkban lézeres mérés technika segítségével is elvégezhetjük, de ez nem jelenti azt, hogy a cikkben részletesen bemutatott méréseknek ma már ne lenne jelentősége. Míg a lézeres mérőműszer viszonylag drága eszközt igényel, addig a hagyományos módszer töredékébe kerül, és általában minden műhelyben megtalálhatók hozzá az eszközök. A szerszámgépek ellenőrzésének rendszeres és megfelelően kivitelezett eljárásának köszönhetően biztosítható, hogy a termelés folyamatosan megfelelő minőségű terméket tudjon előállítani, váratlan leállások valószínűségének a minimálisra csökkentése végett.

4. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] KAZINCZY, L.: *Szerszámgépek I-II*. Tankönyvkiadó Vállalat, ISBN 2399981823295, Budapest, 1955.
- [2] TAKÁCS, GY.: *Korszerű szerszámgépek (Miskolci Egyetem előadásanyag)*. Miskolc, 2018.
- [3] VELEZDI, GY.: *Szerszámgépek I. (Miskolci Egyetem előadásanyag)*. Miskolc, 2016.
- [4] SZILÁGYI, A.: *Lézeres mérés technikák alkalmazása szerszámgépek mérésében és diagnosztikájában (Miskolci Egyetem oktatási segédlet)*. Miskolc, 2015.
- [5] BARÁTI, A.: *Szerszámgép vizsgálatok*. Műszaki Kvk., Budapest 1988.
- [6] WEBSTER J.G.: *The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook*, CRC Press, 1999.
- [7] VENKATESHAN, S.P.: *Mechanical measurements*. Wiley&Sons, 2015.
- [8] MADISETTI, V.K.: *The digital signal processing handbook*. CRC-Press, 2009.

LÉZERES MÉRÉSTECHNIKÁK A SZERSZÁMGÉPIPARBAN

LASER MEASUREMENT TECHNIQUES IN THE MACHINE TOOL INDUSTRY

FEKETE Tamás¹, TÓTH Dániel²

¹Ph.D., egyetemi tanársegéd, fekete@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Szerszámgépészeti és Mechatronikai Intézet,
Szerszámgépek Intézeti Tanszéke

²egyetemi tanársegéd, beosztás, daniel.toth1@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Szerszámgépészeti és Mechatronikai Intézet,
Szerszámgépek Intézeti Tanszéke

Kivonat: *A szerszámgépek állandó karbantartására napjainkban igen nagy szükség van. A megnövekedett termelési igények és a gyártók között kialakult versenyhelyzet nem teszi lehetővé, hogy egy szerszámgép meghibásodása miatt a teljes gyártási folyamat leálljon. Amennyiben ez a helyzet előáll, úgy a gyártó hatalmas összegeket képes elveszíteni az ily módon kimaradt munkadarabok miatt. Ezen indokok miatt a szerszámgépek rendszeres diagnosztikája már egy bevett, szigorú eljárás. A pontossági vizsgálatoknál korábban hagyományos mutatóval rendelkező műszereket használtak, amelyek eredményeinek a dokumentálása nehézkes folyamatos rögzítése pedig bizonyos esetekben megvalósíthatatlan. A lézeres mérés technika egy olyan érintésmentes mérés technikai eljárás, ahol a lézersugár valósítja meg az egyenes mentén értelmezett pontossági jellemzők méréséhez szükséges elméleti egyeneseket és a merőlegességet. Lézeres pontosságvizsgálat előnye, hogy nincs szükség ellenőrzőeszközökre. Az ellenőrzőeszközök tipikus mérés technikai hibája a mechanikai lehajlás és a hődeformációs hibák is. A cikk a lézeres mérés technikát kívánja bemutatni és annak jelentőségét a projekt kapcsán.*

Kulcsszavak: *szerszámgép, lézer, mérés, pontosság*

Abstract: *Constant maintenance of machine tools is very necessary these days. The increased production demands and the competitive situation between the manufacturers do not allow the entire production process to stop due to the failure of a machine tool. If this situation arises, the manufacturer can lose huge sums of money due to missing work pieces in this way. For these reasons, the regular diagnostics of machine tools is already an established, strict procedure. In the past, instruments with traditional indicators were used for the accuracy tests, the results of which are difficult to document and the continuous recording of which is impossible in some cases. The laser measuring technique is a non-contact measuring technique where the laser beam realizes the theoretical straight lines and perpendicularity required for measuring the accuracy characteristics interpreted along the straight line. The advantage of laser accuracy testing is that no inspection devices are required. Mechanical bending and thermal deformation errors are also typical measurement technical errors of control devices. The article aims to present the laser measurement technique and its significance in relation to the project.*

Keywords: *machine tool, laser, measurement, accuracy*

1. BEVEZETÉS

A projekt keretein belül egy Volvo 7700 B9L típusú, CNG üzemű szóló busz (1. ábra) kerül átalakításra, amely egy prototípus lesz, de a jövőben 150-200 darab példány megvalósítása a cél. A prototípus akkumulátorainak elhelyezése miatt szükséges volt tartószerkezetet is tervezni, amely korábban a belsőégésű motor miatt nem került kialakításra. Ezen új tartószerkezet elemeinek párhuzamosságának és merőlegességének a biztosítása is fontos szempont. A konstrukció szignifikáns átalakítása végett szükség lesz rengeteg új alkatrészre és ezekhez új szerszámgépeket, illetve új célgépeket kell eszközölni. Ezeket a berendezéseket a magas színvonalú minőségbiztosítás miatt rendszeresen meg kell vizsgálni, amire a lézeres mérés technika egy kiváló módszer. Mivel a prototípus még nem készült el, ezért ezzel kapcsolatban az egyetemen

található szerszámgépeken végeztünk méréseket, amelyeket sikeresen lehet alkalmazni a későbbiekben. A mérés menete a 2. fejezetben kerül részletes bemutatásra.



1. ábra: A VOLVO 7700 B9L típusú szólóbusz.

Az adott alkatrész legyártásának pontosságában fontos szerepet játszik az adott szerszámgép geometriai pontossága, amelyet a gép megtervezése és legyártása során alakul ki. Egy gép geometriai pontosságán a gép fő szerkezeti egységeinek gyártási és szerelési pontosságát, vagyis a:

- megfelelő felületek alakhűségét,
- megfelelő felületek egymáshoz viszonyított helyzetpontosságát,
- a szánok mozgáspályáinak alakhűségét,
- a mozgáspályák egymáshoz, illetve a felületekhez viszonyított helyzet-pontosságát, valamint
- a mozgások pályamenti pontosságát értjük [2].

A munkadarab pontossága a geometriai pontosságon kívül sok más tényezőtől is függ, melyeket kiegészítő pontossági jellemzőkkel definiálhatunk. Ezek többnyire lehetnek:

- a geometriai pontosság külső erőhatásra történő megváltozása,
- üresjáratú vagy terhelés alatti melegedés hatására bekövetkező alaktani változás,
- a gépben fellépő rezgések hatására bekövetkező pontatlanság.

A szerszámgép gyártási pontosságát a vizsgálati szabványokban a gépre vonatkozó gyártási és szerelési pontosságként értelmezik és így a pontosság vizsgálat lehet:

- terheletlen, üzemen kívüli és kézi mozgatású,
- terheletlen, üresjáratú és gépi mozgatású,
- próbamunkadarabok és szerszámok tömegeivel terhelt, rendszerint kissebességű, gépi mozgatású [8].

Az egyetemes forgácsoló szerszámgépek egyik lehetséges csoportosítási módját az 1. táblázat mutatja meg.

1. táblázat: A szerszámgépek osztályozása (saját szerkesztés [1] alapján).

Egyetemes forgácsoló szerszámgépek áttekintése és osztályozása											
Szerszámgép		Jellegzetes szerszám	Jellemző mozgások								
Csoport	Fajta		Jellege	Főmozgás		Jellege	Mellékmozgás				
				végzi			végzi				
			Mdb	Szszám		Mdb	Szszám				
Esztergák	Csúcseszterga	Esztergakés	Forgó	•		Folyamatos		•			
	Rövid-, vagy fronteszterga										
	Sikeszterga										
	Revolverszterga										
	Többkéses eszterga										
	Automataeszterga										
Gyalugépek	Hosszgyalugép	Gyalukés, Vésőkés	Lineáris alternáló		•	Szakaszos	• vagy •	•			
	Harántgyalugép										
	Vésőgép										
Fúrógépek	Asztali fúrógép, Oszlopos fúrógép, Sugárfúrógép	Egy, vagy többélű fűrő	Forgó		•	Lineáris, folyamatos	•	•			
	Fúrómű (horizont), Koordináta fúrómű	Egy, vagy többélű fűrő, kés, maró							•	• és •	
Marógépek	Konzolos marógép	Maró	Forgó		•	Folyamatos	• és/v. •	•			
	Állványos marógép										
	Portálmárógép										
Fűrészgépek	Körfűrész	Fűrész tárcsa	Forgó		•	Lineáris, folyamatos	• vagy •	•			
	Szalagfűrész	Fűrészszalag	Lineáris						Folyamatos	•	
	Keretes fűrész	Fűrészlap	Lineáris alternáló						Szakaszos	•	
Alakhúzógépek	Üregelőgép	Húzótüske	Lineáris egyirányú		•	Nincs					
	Külső alakhúzógép	Marólap									
Köszűrőgépek	Körköszűrőgép	Köszűrőkorong	Forgó		•	Folyamatos vagy alternáló	• és/v. •	•			
	Sikköszűrőgép										
	Élköszűrőgép										
Felületfinomító gépek	Csiszológép	Csiszolókorong vagy szalag	Forgó vagy haladó		•	Folyamatos (kézi)	• vagy •	•			
	Dörzscsiszoló (hónoló)	Kötöttzsemcséjű csiszolótest	Forgó						•	Alternáló	
	Tükrösítő (leppelő) gép	Laza szemcse + tárcsa v. tüske	Forgó						•	Alternáló, folyamatos	•
	Finomtükrösítő (szuperfiniselő)	Kötöttzsemcséjű csiszolótest	Rezgő						•	Forgó és haladó, folyamatos	• vagy •

Az 1. táblázatból leszűrhetjük azt a következtetést, hogy a szerszámgépek rendkívüli változatossága miatt speciális mérés-technikai eljárásokra van szükség a pontos vizsgálatok végett.

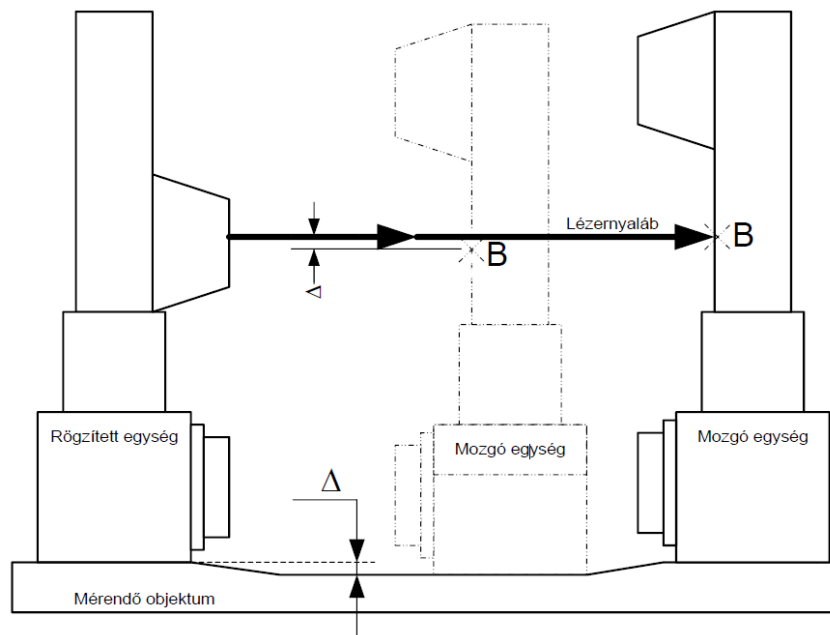
2. LÉZERES VIZSGÁLAT

A megfelelő minőségű munkadarab gyártása miatt elengedhetetlen a szerszámgépeken bizonyos időközönként különböző mérési módszerek eszközölése [3, 4]. A mérési módszereken azon elvek összességét kell érteni, amelyeknek előírásait követve és pontosan betartva a méréseket elvégezzük [5, 6]. A mérendő mennyiség jellegét tekintve, az alkalmazási lehetőségek függvényében a mérési módszereket többféle szempont szerint lehet csoportosítani. A lézeres vizsgálati berendezés (2. ábra) egy olyan érintésmentes mérőeszköz, ahol a lézersugár – az elméleti egyenes vonal megtestesítője – elsősorban egyenes mentén értelmezett pontossági jellemzők méréséhez szükséges ideális egyeneseket és merőleges szögszárakat képes ellenőrizni.



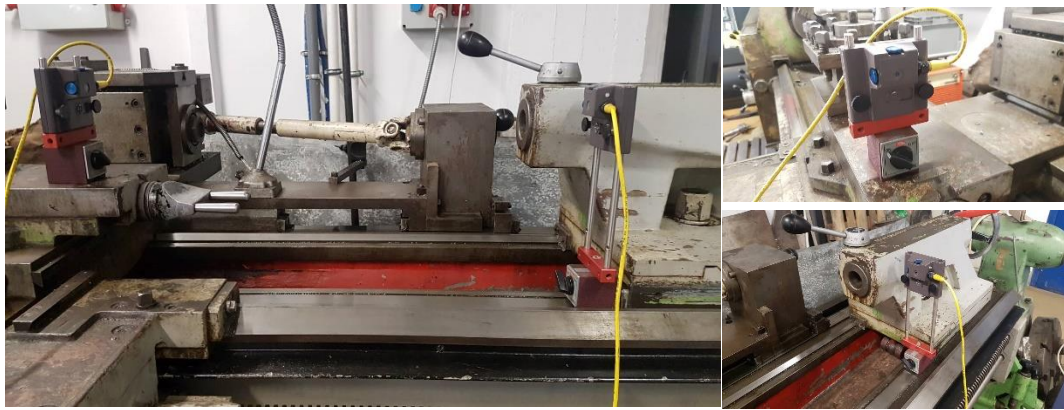
2. ábra: Lézeres mérőberendezés. [4]

A lézeres mérőberendezés általában egy lézeradó és egy vevő-, valamint egy kiértékelő egységet tartalmaz [7]. Az egyenességeltérés mérésének elvi vázlatát a 3. ábra mutatja.



3. ábra: Az egyenességeltérés mérésének lézerrel történő elvi vázlata.

A 3. ábrán látható rögzített adó egységünk, amely a lézert fényt is kibocsájtja a mérés során mozdulatlan helyzetben marad. A mozgó egységünk segítségével első lépésben definiáljuk az úgynevezett ráfekvő egyenesünket. A továbbiakban az előző módon felvett első ponthoz képest fogjuk látni a mérendő objektum felületének alakulása tekintetében, hogy mekkora eltéréssel rendelkezik az adott vizsgálati helyen. Ezt a folyamatot a mérendő felület több közbülső (előzetesen kijelölt) pontjában is megismételjük. Végezetül a kiértékelő eszközünk egy grafikon segítségével meg fogja mutatni a mérendő objektum felületének paramétereit. Az adott pontok pontos koordinátáit is ki lehet nyerni a jelfeldolgozó egységből. A mérési elrendezés egy megvalósított példáját a 4. ábra mutatja, ahol egy esztergán végeztem el a vizsgálatot.



4. ábra: Egyetemes eszterga lézeres pontosságvizsgálata.

3. ÖSSZEFOGLALÁS

A szerszámgépek ellenőrzése -rendszeres és megfelelően kivitelezett eljárások mellett- biztosítja, hogy a termelés folyamatosan megfelelő minőségű terméket tudjon előállítani. Ezen kívül a lézeres mérés technika segítségével a váratlan leállások valószínűségének a minimálisra csökkentése megoldható. A cikkben bemutatásra került a mérési elrendezés felépítése és kivitelezésének a lépései. A korszerű mérés technika előnye a hagyományos eljárásokkal összehasonlítva, hogy számítógépes mérőszoftver segítségével lehetőség nyílik a folyamatos adatgyűjtésre, a mért adatok tárolására és látványos megjelenítésére is, ami napjainkban elengedhetetlen feltétele a modern gyártástechnológiának.

4. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] VELEZDI, GY.: *Szerszámgépek I. (Miskolci Egyetem előadásanyag)*. Miskolc, 2016.
- [2] SZILÁGYI, A.: *Lézeres mérés technikák alkalmazása szerszámgépek mérésében és diagnosztikájában (Miskolci Egyetem oktatási segédlet)*. Miskolc, 2015.
- [3] BARÁTI, A.: *Szerszám gép vizsgálatok*. Műszaki Kvk., Budapest 1988.
- [4] GINIOTIS V.: *Measurement and Monitoring*. ISBN: 1606503790, Momentum Press, 2014.
- [5] VENKATESHAN, S.P.: *Mechanical measurements*. Wiley&Sons, 2015.
- [6] MADISETTI, V.K.: *The digital signal processing handbook*. CRC-Press, 2009.
- [7] TRÄGER F.: *Springer Handbook of Lasers and Optics*. ISBN: 3642194087, Springer, 2012.
- [8] HE, L., Feng, B.: *Fundamentals of Measurement and Signal Analysis*. EAN: 9789811965487, Springer, Berlin, 2022.

EV TÖLTŐK VILLAMOS ANALÍZISE

ANALYSIS OF EV CHARGERS

KOVÁCS Attila¹, SOMOGYINÉ MOLNÁR Judit², JÁRMAI Károly³

¹Ph.D. hallgató, attila.kovacs@zf.com

Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet,
Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék

²Ph.D., Egyetemi docens, judit.somogyine@uni-miskolc.hu

Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet,
Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék

³DSc, Egyetemi tanár, karoly.jarmai@uni-miskolc.hu

Miskolci Egyetem, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet,
Vegyipari Gépészeti Intézeti Tanszék

Kivonat: Az elektromos járművek (Electric Vehicle - EV) a töltőberendezéseiken keresztül, közvetetten jelentős hatást gyakorolhatnak a villamos elosztóhálózat energiaminőségére, mivel ezek a töltők is nem lineáris terhelések. Ne feledkezzünk meg arról sem, hogy manapság az egyre növekvő számuk és egyre nagyobb teljesítményük, például a nagyteljesítményű gyorsöltők állomások (Fast Charging Station - FCS) miatt az energiaigényük is jelentős. Általában ezek a berendezések a közüzemi hálózatra csatlakoznak, a különböző gyártóktól származó töltőállomások jelentős harmonikus áramkibocsátást eredményezhetnek, mert megváltoztathatják az áram-színusz hullám alakját, eltorzíthatják azt. Emiatt jelentős áramharmonikus injektáció jöhet létre a hálózat felé. Sajnos csekély információ van az EV töltőknek közvetlenül az energia minőségre gyakorolt hatásáról, az FCS töltőkéről pedig még kevesebb. A cikk célja, hogy gyakorlati mérési eredmények alapján mutassa be a töltőállomások által generált áramharmonikusok szintjeit, azok szabványnak való megfelelésségét.

Kulcsszavak: áramminőség; harmonikus torzítás; elektromos járművek; elektromos járművek töltése; elektromos jármű töltőállomás

Abstract: Electric Vehicles (EVs) can indirectly have a significant impact on the power quality of the electricity distribution network through their charging facilities, as these chargers are also non-linear. Let us not forget that nowadays their energy demand is also significant due to their growing number and their increasing complexity, e.g., Fast Charging Stations (FCS). Usually connected to the utility grid, charging stations from different manufacturers can cause significant harmonic emissions because they can change the shape of the current sine wave, distorting it. This can result in significant current harmonic injection into the grid. Unfortunately, there is little information on the direct impact of EV chargers on power quality and even less on FCS chargers. The aim of this paper is to present the levels of current harmonics generated by charging stations and their compliance with standards, based on practical measurement results.

Keywords: power quality; harmonic distortion; electric vehicles; electric vehicle charging; electric vehicle charging station

1. BEVEZETÉS

Az elmúlt néhány évben jelentősen megnőtt a nyilvánosan elérhető elektromos töltőállomások száma. Az elektromos járművek töltési infrastruktúrája is tovább fejlődik. 2030-ra a világon a nyilvánosan elérhető töltők száma elérheti a 12,7 milliót, amelyből 7,9 millió (62%) lesz a hagyományos lassú, 4,8 millió (48%) pedig a gyors töltő [1]. Ez komoly kihívások elé állítja a villamos hálózat fejlesztőket, illetve a villamos energia minőségi előírásait betartatók munkáját. Vannak olyan EV tulajdonosok, akik inkább otthon töltik gépjárműveiket, vagy mert erre csak munkaidőn túl van lehetőségük, vagy mert rendelkeznek saját tulajdonú háztartási méretű kis-

erőművel (HMKE). Az elektromos autók töltésének a villamos hálózatra gyakorolt hatását számos paraméter befolyásolja, az egyidejűleg feltöltött elektromos járművek száma, a töltő vezérlési algoritmus, a töltők telepítési helye, a töltési sebesség és a töltés időpontja, vagyis a nap mely időszakában használjuk azokat [2]. Az EV-töltőkben nemlineáris teljesítményelektronikai eszközöket használnak. A tipikus struktúra az AC/DC/DC/AC köztes konverzió, a nagyfrekvenciás transzformátor használata és az AC/DC végső feszültség simítás. A feszültség átalakítók, szaggatók használata a töltők teljesítmény elektronikájában, azok szerves részét képezik. Ezek működéséből adódó tulajdonságai miatt lesz a töltő nem lineáris fogyasztó és hozzájárul az áram szinuszhullám alakjának a torzulásához, így az áramharmonikusok létrejöttéhez.

2. AZ ANALÍZIS CÉLJA

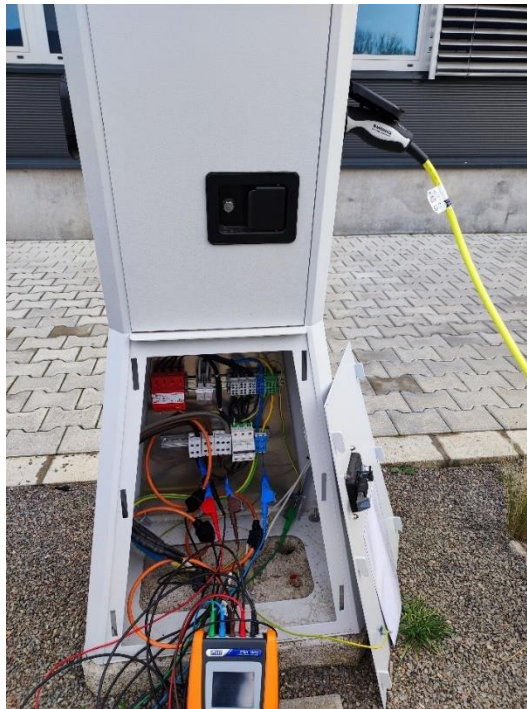
A mérések egyik célja, hogy gyakorlati megközelítéssel megvizsgáljuk, a közüzemi hálózatra telepített elektromos gépjárművek töltésére használt töltőberendezések áramharmonikus injektálását. Ezáltal lehetőség nyílik arra, hogy információink legyenek arról, mennyire tekintjük azokat potenciális harmonikus zavarforrásoknak, mekkora hatással lehetnek a villamos energia minőségére. A vizsgált berendezések 2022. és 2023. évi telepítésű, normál teljesítményű és nagyteljesítményű gyorstöltők voltak, ezért előzetes reményeink szerint már el vannak látva hatásos, felharmonikusokat kiszűrő elektronikákkal. Az elemzés során megvizsgáltuk a gyorstöltő állomásokra (Fast Charging Station - FCS) jellemző szupraharmonikus [3] kibocsátási szinteket is. Természetesen ilyen kevés adatból még nem tudunk messzemenő következtetéseket levonni, kiindulási alapnak viszont jó, illetve ezeket a mérési eredményeket fel lehet majd használni egy összehasonlító elemzés során, hogy a csoportosan telepített töltőknél, a harmonikusok esetében, lehet-e a szuperpozíció elvét lineárisnak tekinteni és az egyes töltőknél azok rendenként összeadódnak-e, a töltők számával arányosan növekszik-e a közös csatlakozási pontjukon, azonos rendenként, az áram felharmonikusok amplitúdója.

3. A HÁLÓZAT ANALÍZIS MÉRÉSI METÓDUSA

A mérések során a vélhetően harmonikus torzításokat okozó elektromos járművek töltőberendezéseit vizsgáltunk meg. Normál és gyorstöltőket is analizáltunk, azok szupraharmonikus kibocsátását is kiszámoltuk (Fast Fourier Transform - FFT) transzformáció segítségével a mért értékekből. A méréshez a HT gyártó PQA824 típusú hálózat analizátorát használtuk [4]. A műszer főbb jellemzői: regisztrálás MIN/MAX/AVG, feszültség anomáliák észlelése, felharmonikus analízis, patch elemzés, villogás analízis, nagysebességű feszültség tranziensek rögzítése 5,5 μ s-tól, bekapcsolási áramok rögzítése. A műszer paraméterezése a magyarországi forgalmazó által készített használati útmutató [5] alapján, míg a rögzített adatok kiolvasás a HT Italia Topview 2.2.2.3 verziójú szoftverével történt [6]. A mérési eredményeket a szerző által transzformált adatok segítségével szerkesztett táblázatokban kerülnek szemléltetésre.

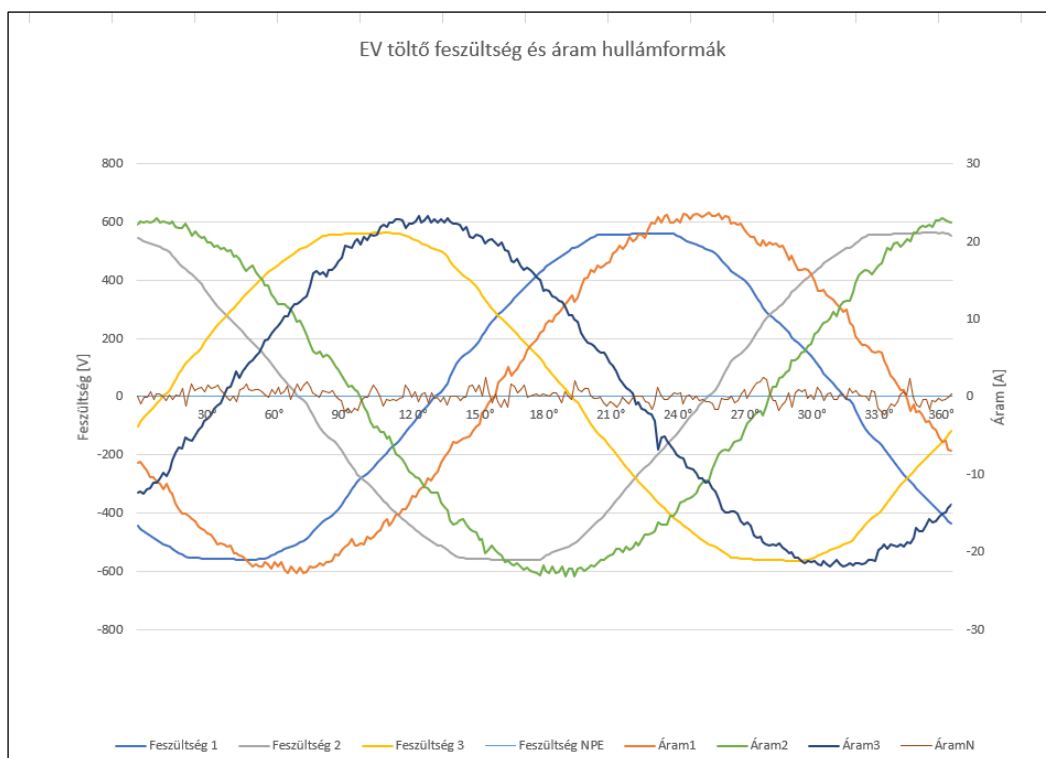
3.1. Hagyományos EV töltőállomás vizsgálata

Az 1. ábrán látható a vizsgált EV töltőállomás. Ez egy Lumi-EVC-222 típusú berendezés, 230/400VAC / 50 Hz, mely az egyik egri cég magántulajdonában van. A berendezés kimeneti teljesítménye 2x22kW, két jármű tölthető róla egyszerre. Protokoll: pillanatnyilag az OCPP protokoll 1.6-JSON verzió támogatott. Magyar fejlesztés és gyártás [7].



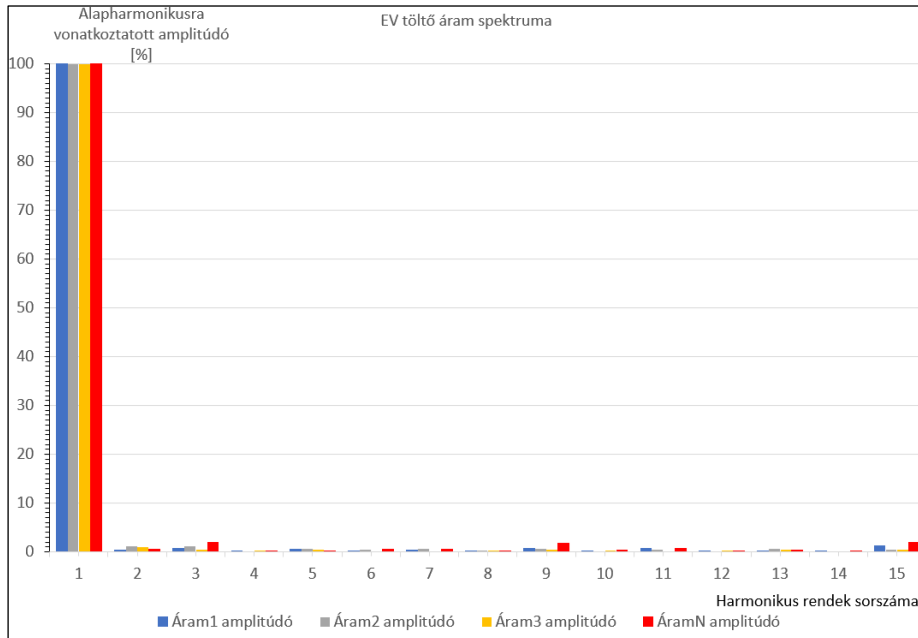
1. ábra: Magántulajdonú Lumi-EVC-222 típusú hagyományos EV töltőállomás analízise.

A 2. ábra alapján megállapíthatjuk, hogy a feszültség és áram szinuszhullámjainak torzulása nem tekinthető jelentősnek. Ezen az ábrán láthatjuk azt is, hogy nullavezetőn 2,54 A áram folyik, ez 10,7% a I_{\max} 23,72 A képest, ami jelentősnek mondható és a nullavezetőn melegedést okozhat. A nullavezetőn megjelenő áram a töltő aszimmetrikus áramfelvételét jelzi.



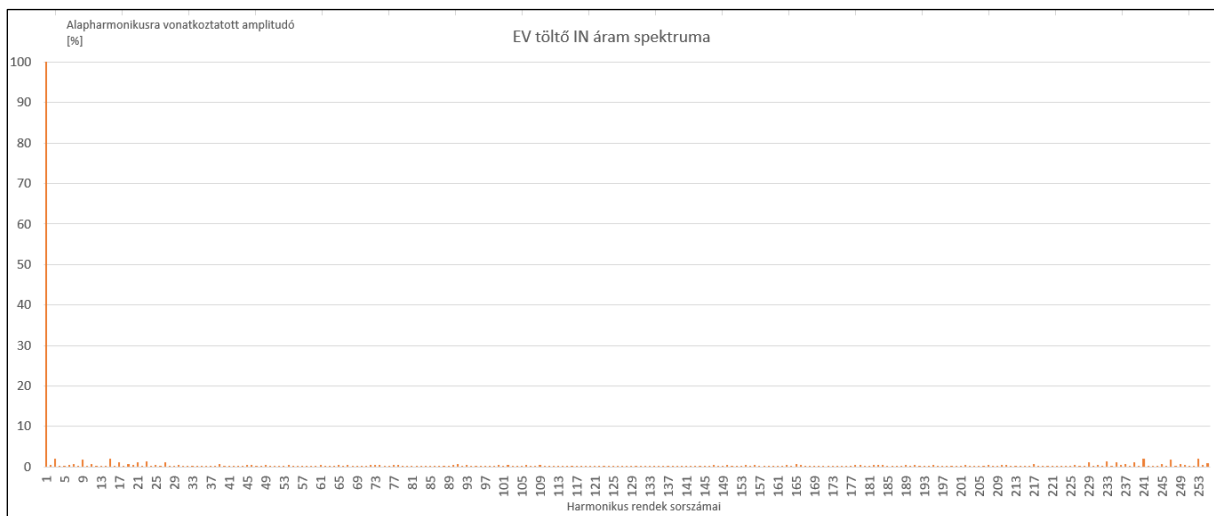
2. ábra: Hagyományos EV töltő torzított feszültség és áramhullámformák saját mérés alapján.

A 3. ábra a mért áramok spektrumát szemlélteti. Mivel a nullavezetőn is folyik áram, ezért a spektrumba felvettük az I_N nullavezető áramot is, melyet a piros szín jelöl a grafikonon. Láthatóan ennek az amplitúdója a legnagyobb az áram harmonikusok között. Ezzel az üzemeltetőnek foglalkoznia kell, időszakos hőkamerás ellenőrzéseket szükséges végezni, a lehetséges kábel melegedések miatt, illetve meg kellene szüntetni az I_N áramot kiváltó aszimmetrikus áramfelvételt.



3. ábra: Hagyományos EV töltő áram-hullámformájának harmonikus áram-amplitúdó összetevői saját mérés alapján.

Ha megvizsgáljuk a 4. ábrát, azon a szuprharmonikusok kategóriájába tartozó frekvenciák (2-150 kHz) amplitúdói közül több is látható. Igaz nem folyamatos a spektrum, de jó közelítéssel elmondható, hogy szuprharmonikus torzítás szempontjából sem találtunk semmilyen kirívó eredményt.



4. ábra: Hagyományos EV töltő áram-hullámformájának szuprharmonikus áram-amplitúdó összetevői saját mérés alapján.

A következőkben az IEEE 519-2022 szabványnak való megfelelés vizsgálatát végezzük el. A töltőberendezés közös csatlakozási ponton (PCC) mért teljes áram harmonikus torzítása THD = 2,88% volt. Az IEEE 519-2022 szabvány az áram teljes harmonikus torzításának megengedett maximális értékét a teljes áram-igény szerinti harmonikus torzítás, a (Total Current Demand Distortion – TDD) értékével adja meg, amely a közös villamos hálózati csatlakozási pont, a PCC zárlati áramának (I_{sc}) és az adott eszköz terhelő áramának (I_L) arányától függ. Ez az arány most $63 \text{ A} / 16 \text{ A} = 3,94$, ami < 20 , tehát a 1. táblázat szerint a teljes áram-igény szerinti harmonikus torzítás mértéke 5% lehet. Ha megvizsgáljuk a 3. ábrán lévő harmonikus áramok spektrumát, akkor észrevehető, hogy a harmonikus rendenkénti határértéket egyik alulfrekvenciára vonatkoztatott amplitúdó sem éri el. Elmondható, hogy a mért töltő, egy jóminőségű berendezés és nem rontja a villamos energia minőségét a csatlakozási ponton.

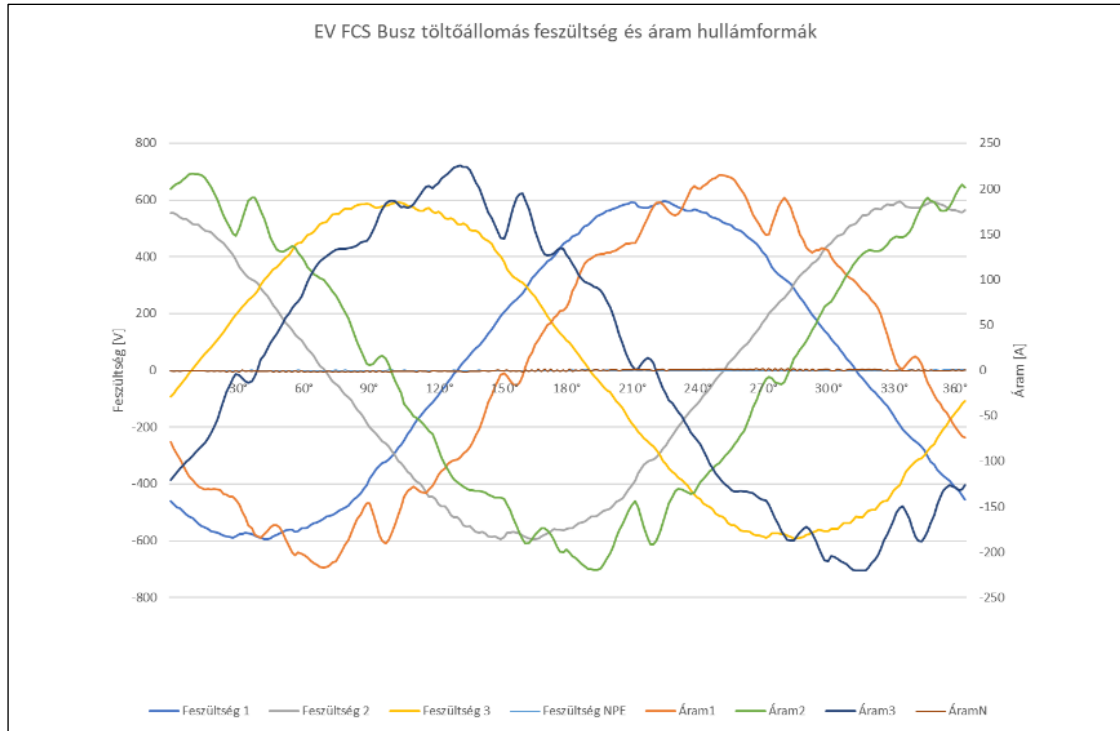
3.2. Nagyteljesítményű autóbusz gyorsító állomások vizsgálata

Az 5. ábrán láthatjuk a BYD K9UD típusú elektromos buszok töltésére használt TITAN 120 kW típusú gyorsító állomást (Fast Charging Station - FCS) 400 VAC / 50 Hz, $U_{ki} = 150 \text{ VDC} - 1000 \text{ VDC}$, $I_{ki \max} = 200 \text{ A}$, a berendezés kimeneti teljesítménye 120 kW. Protokoll: az OCPP protokoll 1.6-J verzió támogatott. Magyar fejlesztés és gyártás [8].



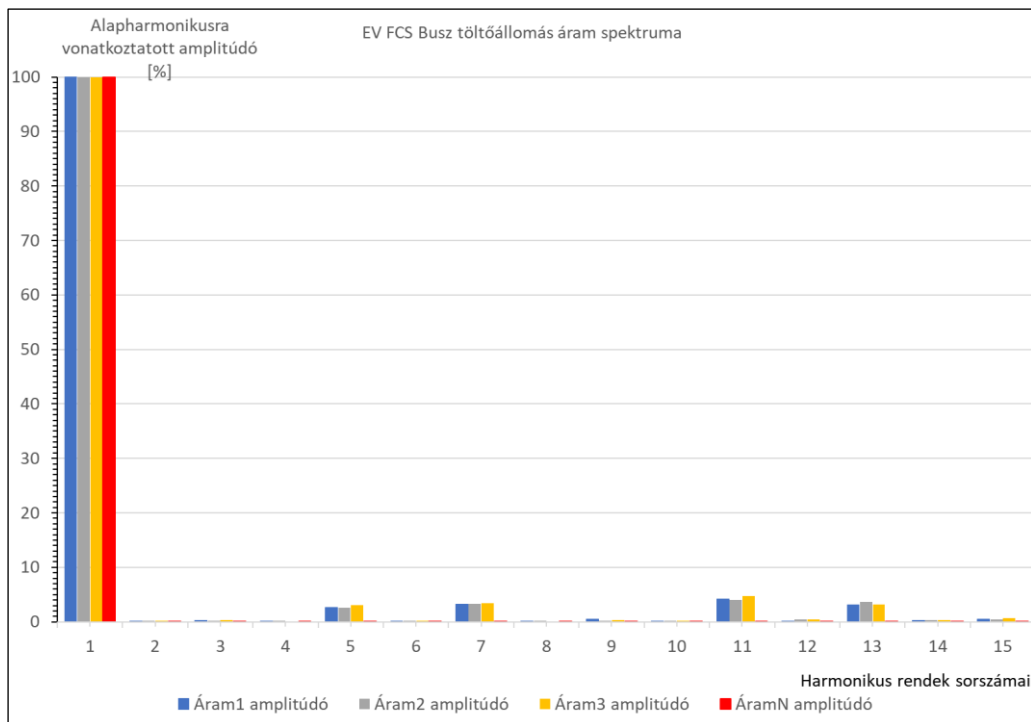
5. ábra: VOLÁN tulajdonú TITAN 120 kW típusú FCS EV gyorsító-állomás analízise.

A 6. ábrán láthatjuk, hogy a feszültség és áram szinuszhullámainak torzulása nem tekinthető jelentősnek, a nullavezetőn 1,49 A áram folyik, ez 0,7% az $I_{\max} 215,23 \text{ A}$ képest, ami elhanyagolhatónak mondható, ezért a hálózatról az áramfelvétel szimmetrikus.



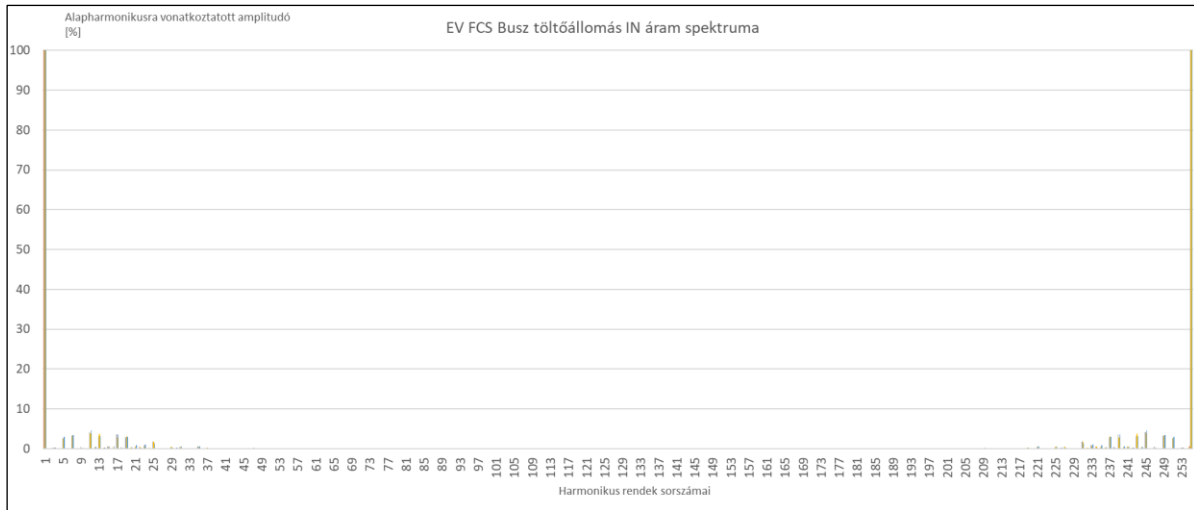
6. ábra: TITAN 120 kW típusú FCS EV gyorsító-állomás torzított feszültség és áramhullámformák saját mérés alapján.

A 7. ábrán a mért áramok spektruma, a harmonikus rendek alap harmonikusra vonatkoztatott amplitúdói láthatóak. Az egyes rendekhez tartozó amplitúdók értékének a szabványnak megfelelését a későbbiekben elemezzük.



7. ábra: TITAN 120 kW típusú FCS EV gyorsító-állomás áram-hullámformájának harmonikus áram-amplitúdó összetevői saját mérés alapján.

Ha megvizsgáljuk a 8. ábrát, azon a szupraharmónikusok kategóriájába tartozó frekvenciák (2-150 kHz) amplitúdói közül több is látható. Igaz nem folyamatos a spektrum, de jó közelítéssel elmondható, hogy szupraharmónikus torzítás szempontjából sem találtunk semmilyen rend esetén kirívó amplitúdót.



8. ábra: TITAN 120 kW típusú FCS EV gyorsító-állomás áram-hullámformájának szupraharmónikus áram-amplitúdó összetevői saját mérés alapján.

Ebben az esetben is ellenőrizzük az IEEE 519-2022 szabványnak való megfelelést. A töltőberendezés közös csatlakozási ponton (PCC) mért teljes áram harmonikus torzítása (THD) 8,77% volt. A teljes áram-igény szerinti harmonikus torzítás, a (TDD) értéke, amely a közös villamos hálózati csatlakozási pont, a PCC zárlati áramának (I_{sc}) és az adott eszköz terhelő áramának (I_L) arányától függ. A berendezés 630 kVA-es transzformátor 400 V-os szekunder oldali gyűjtősínjére csatlakozik, melynek a maximális árama 900 A. Ezért az arány most $900 \text{ A} / 215,23 \text{ A} = 4,18$, ami < 20 , tehát a 1. táblázat szerint a teljes áram-igény szerinti harmonikus torzítás mértéke 5% lehet, a mért 8,77%-os THD érték meghaladja ezt a megengedett értéket. Ha megvizsgáljuk a 7. ábrán lévő harmonikus áramok spektrumát, akkor észrevehető, hogy a 11. rend 4,68% meghaladja ennek a harmonikus rendnek a 4%-os határértékét, illetve a 13. rend 3,7%, a határérték 2%. Mindezekkel együtt elmondható, hogy a mért töltő, egy jóminőségű berendezés és csak csekély mértékben rontja a villamos energia minőségét a csatlakozási ponton.

4. KÖVETKEZTETÉSEK

A kutatás egyik célja, hogy megvizsgáljuk, a közüzemi hálózatra telepített elektromos hajtású gépjárművek akkumulátorainak töltésére használt töltő berendezések áramharmonikus injektálását. A mérési eredmények elemzése után a következő következtetéseket vonhatjuk le. A mérés során rendszerint áram harmonikus torzításokat (1.) és THD_I teljes harmonikus áram torzítást (2.) mértünk. Az IEEE 519-2022 szabványnak való megfelelést az 1. táblázat segítségével vizsgáltuk meg. A hagyományos, személygépkocsi töltésére használt állomás, minden szempontból megfelelt a szabvány előírásainak. Az elektromos buszok töltésére használt FCS gyorsító állomás kis mértékben meghaladta a harmonikus torzításra vonatkozó határértéket, de ez nem tekinthető jelentősnek. Összefoglalva elmondható, hogy a mért berendezések a villamos energia minőségére gyakorolt hatásuk szempontjából megfelelőek voltak.

1. Táblázat: IEEE 519-2022 szabvány szerint lehetséges áramtorzítási határértékek 120 V-tól 69 kV-ig (IEEE 519-2022, IEEE Standard: [9])

I_{SC}/I_L	Harmonikus határértékek rendek szerint [%]	Harmonikus határértékek rendek szerint [%]	Harmonikus határértékek rendek szerint [%]	Harmonikus határértékek rendek szerint [%]	Harmonikus határértékek rendek szerint [%]	Teljes áram-igény szerinti harmonikus torzítás [%]
	$2 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20<50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50<100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100<1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

$$D_h = \frac{I_h}{I_1} \quad (1.)$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \quad (2.)$$

ahol:

- I_h = h -adik rendszámú felharmonikus áram effektív értéke;
- I_1 = alapharmonikus áram effektív értéke;
- D_h = egyedi harmonikus áramtorzítás;
- $THDI$ = teljes harmonikus áramtorzítás.

5. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] Global EV Data Explorer. Available online: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/global-ev-data-explorer> (accessed on 4 November 2021). (2024.03.13.)
- [2] AWADALLAH, M.A.; SINGH, B.N.; VENKETESH, B.: *Impact of EV Charger Load on Distribution Network Cápái: A Case Study in Toronto*. Can. J. Electr. Comput. Eng. 2016, 39, 268–273. <https://opus.lib.uts.edu.au/handle/10453/160467> (2024.03.13.)
- [3] SLANGEN, T., CUK, V., & COBBEN, S.: *Summation of supraharmonic currents (2–150 kHz) from EV fast charging stations*, Electric Power Systems Research, 220, Article 109371. 2023. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779623002602> (2024.03.13.)
- [4] RAPAS KFT.: Hálózat analízátorok PQA400-PQA823-824. Budapest, 2023. <https://rapas.hu/analizator/analizator-pdfs/pqa823-824.pdf> (2024.03.13.)
- [5] RAPAS KFT.: Használati útmutató PQA400-PQA823-824. Budapest, 2007.
- [6] HT ITALIA: Management software Topview. 2012. <https://www.ht-instruments.com/en/accessories/topview/> (2024.03.13.)
- [7] <https://www.luminancity.com/> (2024.03.19.)
- [8] https://titan.mvm.hu/-/media/MVMOVITSite/Documents/Tevekenysegek/E-toltoGyartas/OVIT-TITAN_Sajat-gyartasu-etoltoberendezesek.ashx (2024.03.19.)
- [9] IEEE 519-2022, IEEE Standard for Harmonic Control in Electric Power Systems <https://standards.ieee.org/ieee/519/10677/> (2024.03.13.)

A NAPELEM CELLA P-N ÁTMENETÉNEK MODELLEZÉSE

MODELLING OF P-N JUNCTION OF A SOLAR CELLS

KOZSELY Gábor

Ph.D., egyetemi adjunktus, gabor.kozsely2@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet,
Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék

Kivonat: A napelem cellákban az energiaátalakítás oly módon történik, hogy a sugárzás kölcsönhatásba lép a napelem anyagával és ez elektromos töltéshordozókat generál az anyagban. Elvi felépítésüket tekintve egy félvezető dióddal egyeznek meg, így működési elvük megértéséhez elengedhetetlen ezek alapvető ismerete is. A gyakorlatban a szilícium alapú napelemek messze a legelterjedtebbek, így a tanulmány röviden p-n átmenet modelljét mutatja be, amely kiinduló pontja a napelem cellában lejátszódó folyamatok szimulációjának.

Kulcsszavak: félvezetők transzport folyamata, tranzienst állapot leírása, p-n átmenet

Abstract: In solar cells, energy conversion occurs by radiation interacting with the solar cell material to generate electrical charge carriers in it. In principle they are like a semiconductor diode, so fundamental understanding of their operation is essential to understand their principle of operation. In practice, silicon-based solar cells are by far the most widely used, so this paper will briefly describe models of p-n junction, which is the starting point for simulating the processes in the solar cell.

Keywords: semiconductor transport mechanisms, transient state description, p-n junction

1. BEVEZETÉS

A fotovoltaiikus rendszerek a napfényt napelemek segítségével közvetlenül elektromos árammá alakítja. Napjainkban a hagyományos fosszilis tüzelőanyagokkal történő villamosenergia-termelés gyorsan növekvő és egyre fontosabb megújuló alternatívája, de más villamosenergia-termelő technológiákhoz képest viszonylag új keletű.

A napelemcella modellezés alapjául p-n átmenetben lejátszódó folyamatok magyarázatán alapul. Ezek a folyamatok nemcsak a napelemek nagy többségének, hanem a legtöbb más elektronikus eszköznek, például a lézereknek és a bipoláris átmenetű tranzisztoroknak is az alapját képezi. A szilárdtest-félvezetők elméletének nagy részét a tranzisztor feltalálása során dolgozták ki a 40-es évek végén és az 50-es évek elején.

2. MODELLALKOTÁS FOLYAMATA

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

A rendszer és a modellezés fogalma szorosan összefügg. Első közelítésben a rendszer egy fizikai objektum valamilyen modellje, amelynek segítségével modellezhetjük, matematikailag

leírhatjuk annak működését. A szakirodalmak a rendszer fogalmát az alábbi tulajdonságok meg-
léte alapján definiálják: [4; 5; 6]

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

2.1. Makroszkopikus és mikroszkopikus megközelítés

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

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

Ha a probléma kezelésére az általunk megfelelőnek ítélt modellt választottuk, akkor ezután a megoldáshoz szükséges matematikai apparátust is kell kidolgozni, fel kell állítani azokat az egyenleteket, amelyek a kísérletileg megfigyelhető mennyiségeket tartalmazzák. Ezekben az egyenletekben általában van néhány olyan paraméter, amelyeknek az értékei kísérletekből származnak. Az illeszthető paraméterek miatt a modell pontosságát nem bizonyítja az, ha a modell által jóslt eredmények megegyeznek a kísérletekkel. Ez azt is jelenti, hogy a teljesen eltérő modellek, amelyek mindegyike a saját paramétereit tartalmazza, a fizikai rendszernek azonosan elfogadható leírását adják. Ekkor részletesebben meg kell vizsgálni a rendszert, hogy olyan sajátosságokat találjunk (hőmérséklet-, és/vagy nyomásfüggés, esetlegesen a különböző terek és/vagy hőmérséklet gradiens összetett hatása), amelyek a különböző modellek esetében különböző eredményeket jósolnak. Ekkor viszont már nem a megfigyelt eredményeket próbáljuk megmagyarázni, hanem újabb kísérleteket tervezünk, illetve további mérési módszerekkel vizsgáljuk az adott fizikai rendszert. [1; 7]

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

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

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

A műszaki rendszerekre ható tényezők elvben „végtelen” nagy száma és a rendszeren belüli összetett kölcsönhatások miatt többnyire „zárt rendszerek” vizsgálatára szorítkozunk. Az úgynevezett zárt rendszer határainak kijelölése komoly tárgyi tudást és igen nagy szakmai tapasztalatot feltételez.

2.2. Transzportfolyamatok fenomenológiai leírása

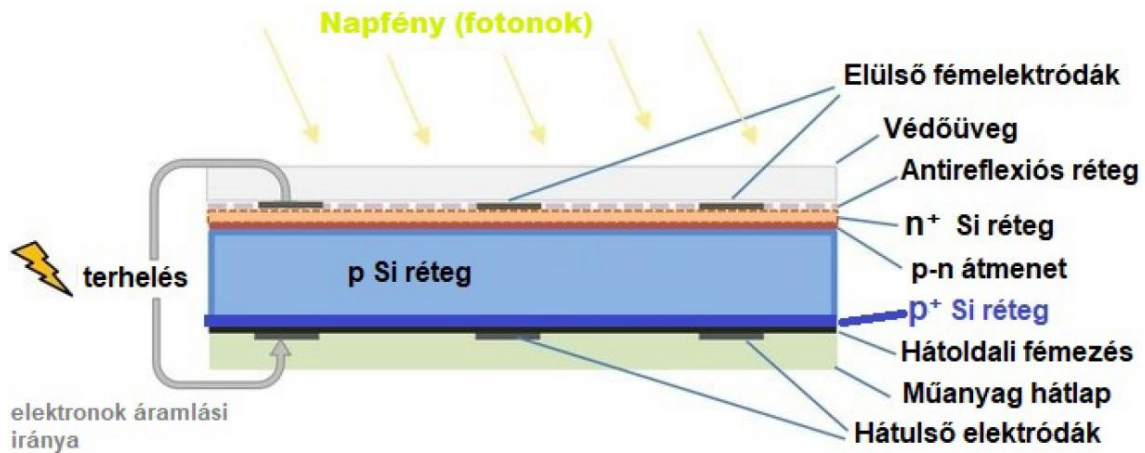
A tapasztalataink alapján azt az általános érvényű megállapítást tehetjük, hogy a magára hagyott, nem-egyensúlyi állapotban lévő rendszerben, ez az állapot stabilan nem maradhat fent. Az egyensúlytalanságok megszüntetésére olyan kiegyenlítődési folyamat keletkezik, amelyet összefoglaló néven transzportjelenségeknek nevezünk.

Transzportjelenség fogalmán a vizsgált rendszert leíró extenzív fizikai mennyiségnek, a tér egyik részéből egy másik részébe történő elmozdulását, átadását, szállítását értjük. A jelenség hajtóereje az adott extenzív mennyiséghez szorosan kapcsolódó az intenzív mennyiség így kialakult gradiense a rendszeren belül. Ilyen transzportjelenségek: diffúzió (anyag részecskék transzportja), hőátvitel (energiatranszport), sűrűdésos áramlás (impulzustranszport), elektromos vezetés (elektromos töltések transzportja). A valóságban ezek mindig irreverzibilis folyamatok. A valóságban azonban egyetlen intenzív mennyiség különbsége több extenzív mennyiség áramlását is indukálhatja.

2.3. Napelemek cella felépítése

A napelem vagy másnéven fotovoltaiikus elem, PV elem (a hatásmechanizmus alapján fotovoltaiikus kifejezésből) olyan szilárdtest eszköz, amely az elektromágneses sugárzást (fotonbefogást) közvetlenül villamos energiává alakít

A fotovoltaiikus hatás szorosan kapcsolódik a fotoelektromos hatáshoz. Mindkét jelenség esetében az fény abszorbeálódik, ami egy elektron vagy más töltéshordozó magasabb energiájú állapotba történő gerjesztését okozza. A fő különbség az, hogy a fotoelektromos hatás kifejezést ma már általában akkor használják, amikor az elektron emittálódik az anyagból (általában vákuumba), és a fotovoltaiikus hatás kifejezést pedig akkor, amikor a gerjesztett töltéshordozó még az anyagban van. Mindkét esetben elektromos potenciál keletkezik a töltések szétválásával, és a fénynek elegendő energiával kell rendelkeznie ahhoz, hogy a gerjesztéshez leküzdje a potenciálgátat. A különbség fizikai lényege általában az, hogy a fotoelektromos emisszió ballisztikus vezetéssel, a fotovoltaiikus emisszió pedig diffúzióval választja szét a töltéseket. A potenciálkülönbségből adódó elektromos tér rendezett mozgásra kényszeríti a töltéshordozókat, azaz elektromos áram jön létre. Ez a jelenség bármilyen megfelelő fény spektrummal rendelkező fényforrás esetén is lejátszik, nem szükséges kizárólagosan napfény. [8]



1. ábra: Hagyományos napelem szerkezet.

A félvezető napelemek alapvetően igen egyszerű eszközök. A félvezetők képesek elnyelni a fényt, és az elnyelt fotonok energiájának egy részét az elektromos áram hordozóinak - elektronoknak és lyukaknak - átadni. A félvezető dióda szétválasztja és összegyűjti a hordozókat, és a keletkező elektromos áramot előnyösen egy meghatározott irányba vezeti. A napelem tehát egyszerűen egy félvezető dióda, amelyet gondosan úgy terveztek és építettek meg, hogy hatékonyan elnyelje és elektromos energiává alakítsa a napfény energiáját. A napelem cella felépítést az 1. ábra mutatja be.

A felső üvegborítás védi a napelemet a sérülésektől. Ez alatt (és esetleg felett) közvetlenül egy olyan speciális réteg van, ami a reflexiós veszteségeket csökkenti. Erre azért van szükség, mert a szilícium legalább 30%-át visszaverné a ráeső fénynek. Az antireflexiós borítás egy vagy több vékony réteg dielektrikumot jelent, amelyek vastagságát és törésmutatóját úgy állítják be, hogy a réteg elülső és hátulsó felületéről visszaverődött fény destruktív interferencia révén kioltsa egymást. Csakhogy a törésmutató függ a hullámhossztól, így nem lehet egyszerre minden hullámhosszra igaz a teljes kioltás.

Az optimalizálás során a 600 nm-es hullámhosszra minimalizálják a reflexiót, mivel ez közel van a beeső fény intenzitásmaximumához. Másfelől előnyös az, ha a viszonylag távoli infravörös, amelyet a napelem úgysem tudna hasznosítani, visszaverődik, hogy a hőmérsékletet ne növelje.

Az elülső fémelektrodák mérete és alakja is fontos tényező a hatásfok maximalizálásánál. Ha túl szélesek, akkor kitakarják a beeső fény nagy részét, ha túl keskenyek, akkor viszont a generált áramnak túl nagy távolságot kell megtennie a relatíve nagy ellenállású félvezetőben, ami növeli az ohmos veszteséget. [9]

3. FÉLVEZETŐK FIZIKÁJA

A napelemek számos félvezető anyagból, leggyakrabban szilíciumból (Si) amely lehet egykristály polikristályos és amorf - gyárthatók. Napelemeket gyártanak még GaAs, GaInP, Cu(InGa)Se₂ és CdTe anyagokból is, hogy csak néhányat megemlítve a széles műszaki palettából. A napelemek anyagait nagyrészt az alapján választják ki, hogy abszorpciós jellemzőik mennyire illeszkednek a napelem spektrumához, illetve mennyibe kerül a gyártásuk. A szilíciumot gyakran választották, mivel abszorpciós jellemzői meglehetősen jól illeszkednek a napelem spektrumához, és a szilíciumgyártási technológia jól fejlett, mivel a félvezető elektronikai iparban elterjedt.

A szilícium, germánium, és a gallium-arszenid legfontosabb jellemzőit a táblázatban tüntettem fel: [10; 11; 12]

1. táblázat: Néhány félvezető fontosabb tulajdonságai.

Fogalom megnevezése	Jelölés	Si	Ge	GaAs	Mérték-egység
Rendszám	Z	14	32	-	-
Vegyérték elektronok száma	n	4	4	-	-
Olvadáspont	T _{op}	1414	938	1238	°C
Tiltott sáv szélessége	E _G	1,12	0,67	1,424	eV
Elektronok mozgékonyága	μ _n	0,135	0,39	0,88	m ² ·V ⁻¹ ·s ⁻¹
Lyukmozgékonyág	μ _p	0,048	0,19	0,01	μm
Fajlagos ellenállás	ρ	2,1·10 ³	4,6·10 ⁻¹	4·10 ⁶	Ω·m
Permittivitás	ε _r	11,7	16,2	13,1	-
Intrinsic koncentráció	n _i	2·10 ⁻²	25	1,5·10 ⁻⁶	μm ⁻³
Elektronok diffúziós állandója	D _n	35	100	290	cm ² ·s ⁻¹
Lyukak diffúziós állandója	D _p	12,5	49	10,4	cm ² ·s ⁻¹

A félvezető szerkezetében, illetve eszközökben lejátszódó elektromos folyamatokat az alábbi alap összefüggésekkel írhatók le:

- a töltéshordozók mennyiségének időbeli változását a töltésmegmaradás törvények, illetve folytonossági egyenletekkel;
- a töltéshordozók mozgásából származó áramokat transzportegyenletekkel;
- a töltéshordozók mennyisége és helyhez kötött töltések kapcsolatát az elektromos erőterrel Poisson -egyenlettel, illetve Gauss-t örvénnyel;
- a vezetési és eltolási áramok összegzési szabályát első Maxwell - egyenlet).

Ezek az összefüggések általában differenciálegyenletek és az elektromos mennyiségek mellett a félvezető anyagjellemzőit is tartalmazza. [10; 11; 13]

A félvezetőben két különböző jellegű áramvezetés jöhet létre: a drift és a diffúziós áram. Drift (sodródási) áram: a félvezetőben a villamos tér hatására létrejövő áram. A félvezető kristályban létesített elektromos térerősség hatására a szabad töltéshordozók mozgásának kitüntetett iránya van. A lyukak a tér irányába, az elektronok a tér irányával ellentétesen mozognak, sebességük arányos az elektromos tér nagyságával és az illető töltéshordozó mozgékonyágával. A mozgékonyág függ a félvezető anyagától, a töltéshordozók számától és a kristály hőmérsékletétől. [10; 11; 12; 13]

A nem egyensúlyi állapotokra is érvényesek a kontinuitási egyenletek, azaz az elektronmegmaradási, illetve lyukmegmaradási, valamint a töltésmegmaradási egyenletek. [11 - 15]

4. A P-N ÁTMENET MODELLEZÉSE

A p-n átmenet egy n típusú és egy p típusú félvezető találkozásánál alakulhat ki. Mivel az átmenet két oldalán eltér a félvezetőpolaritás, ezért más-más lesz a többségi töltéshordozó. Termikus egyensúlyban nincs áram, és a definíció szerint a Fermi-energiának a helyzettől függetlennek kell lennie. Mivel a kétféle félvezető között lyukak és elektronok koncentrációkülönbsége van, a lyukak a p-típusú tartományból az n-típusú tartományba diffundálnak, és hasonlóképpen az elektronok az n-típusú anyagból a p-típusú tartományba diffundálnak. és találkozásakor rekombinálnak. Ennek következtében az összeillesztés helyén. elfogynak a lyukak és az elektronok, csak a pozitív és negatív ionok maradnak. Gyakran ezt kiürített rétegnek is nevezik, mivel a lyukak és az elektronok is gyakorlatilag kiürülnek belőle. Miután a kiürített rétegben a többségi töltéshordozók rekombináldtak, ezen a területen megszűnik az anyag elektromos semlegessége.

A p - rétegben a negatív (akceptor), az n rétegben a pozitív (donor) ionok helyhez kötöttek, ezért a látható töltésfelhalmozódás történik emiatt a kiürített réteget tértöltésű tartománynak is hívják. Az ionok által létrehozott feszültség, amelyet diffúziós potenciálnak (U_d) neveznek akadályozza a további diffúziós töltésmozgást. Az ionok egy úgynevezett potenciálfalat vagy másnéven potenciálgátat képeznek, amin csak azok a töltéshordozók képesek átjutni, amelyek elegendő energiával rendelkeznek ehhez. A diffúziós potenciál a többségi töltéshordozók mozgását, vagyis a diffúziós áram folyását tehát akadályozza, azonban a termikus képzés során létrejött kisebbségi töltéshordozókat átsodorja a másik oldalra, létrehozva ezzel a driftáramot. Külső energiaközlés (feszültség rákapcsolása a kristályra, hőmérséklet növelés, sugárzás, fény) nélkül kialakul a termodinamikai egyensúly és a diffúziós és a driftáram értéke megegyezik. Miután ezek áramok iránya ellentétes, kiegyenlítik egymást, azaz az nincs eredő áram. Ahhoz, hogy a töltéshordozók térbeli változását fel tudjuk írni, a rájuk érvényes kontinuitási egyenletet kell megoldani

Az elektrosztatikus potenciál ϕ változik a tértöltési tartományban, a kiszámításához szükséges peremfeltételek az alábbiak szerint adódnak meg, (1) és (2) egyenlet:

$$\phi(x = -x_n) = 0 \quad (1)$$

$$\phi(x = x_p) = U_d \quad (2)$$

Így egydimenzió esetben, az Einstein-összefüggést felhasználva, az elektromos térerősséget a következőképpen lehet felírni; (3) egyenlet:

$$E = \underbrace{\frac{k \cdot T}{q}}_{=U_T} \cdot \frac{1}{p_0} \cdot \frac{dp_0}{dx} = U_T \cdot \frac{1}{p_0} \cdot \frac{dp_0}{dx} \quad (3)$$

A (3) egyenlet egyenletben lévő fizikai állandókat és a hőmérsékletet egy paraméterben szokták összevonni, amelyet termikus feszültségnek (U_T) neveznek a szakirodalomban. Ezek alapján a diffúziós potenciált (4) egyenlettel lehet megadni:

$$U_D = \int_{-x_n}^{x_p} E \cdot dx = \int_{p_0(-x_n)}^{p_0(x_p)} \frac{U_T}{p_0} \cdot dp_0 = U_T \cdot \ln \frac{p_0(x_p)}{p_0(-x_n)} = U_T \cdot \ln \frac{p_0(x_p)}{p_0(-x_n)} \quad (4)$$

$$= U_T \cdot \ln \frac{N_a \cdot N_d}{n_i^2}$$

A fenti egyenletbe azzal feltételezés él, hogy $p_0(-x_n) = \frac{n_i^2}{N_D}$ és $p_0(x_p) = N_A$.

Ezek alapján a p-n átmenetben az elektrosztatikus potenciált (Φ) és elektromos térerősséget (E) a következőképpen lehet megadni; (5) és (6) egyenletek: [11 - 15]

$$\phi(x) = \begin{cases} U_D & x \leq -x_n \\ U_D - \frac{1}{2} \cdot \frac{q}{\varepsilon} \cdot N_d \cdot (x + x_n)^2 & -x_n < x \leq 0 \\ \frac{1}{2} \cdot \frac{q}{\varepsilon} \cdot N_a \cdot (x - x_p)^2 & 0 < x \leq x_p \\ 0 & x_p < x \end{cases} \quad (5)$$

$$E(x) = \begin{cases} 0 & x \leq -x_n \\ \frac{q}{\varepsilon} \cdot N_d \cdot (x + x_n) & -x_n < x \leq 0 \\ \frac{q}{\varepsilon} \cdot N_a \cdot (x - x_p) & 0 < x \leq x_p \\ 0 & x_p < x \end{cases} \quad (6)$$

Az $x=0$ helyen az elektrosztatikus potenciálnak egyszer folytonosan deriválhatónak kell lennie a térerősségnek pedig folytonosnak kell lennie, ha nincs határfelületen töltés. Ebből következik az alábbi összefüggés; (7) egyenlet:

$$x_n \cdot N_d = x_p \cdot N_a \quad (7)$$

A fenti összefüggésből az is következik, hogy kiürített réteg annál keskenyebb, minél nagyobb az adaléksűrűség az adott tartományban. A valóságban általában több nagyságrend különbség van a két oldal adaléksűrűsége között, a kiürített réteg az átmenetnek főként az egyik oldalára terjed ki. A kiürített réteg vastagság n és p tartományba eső részét a a (8.a) és (8.b) egyenletekkel magát a vastagságot pedig a (8.c) egyenlet alapján lehet kiszámolni: [11 - 15]

$$x_n = -\sqrt{2 \cdot \frac{\varepsilon}{q} \cdot \frac{N_a}{N_d} \cdot \frac{1}{N_a + N_d} \cdot U_D} \quad (8.a)$$

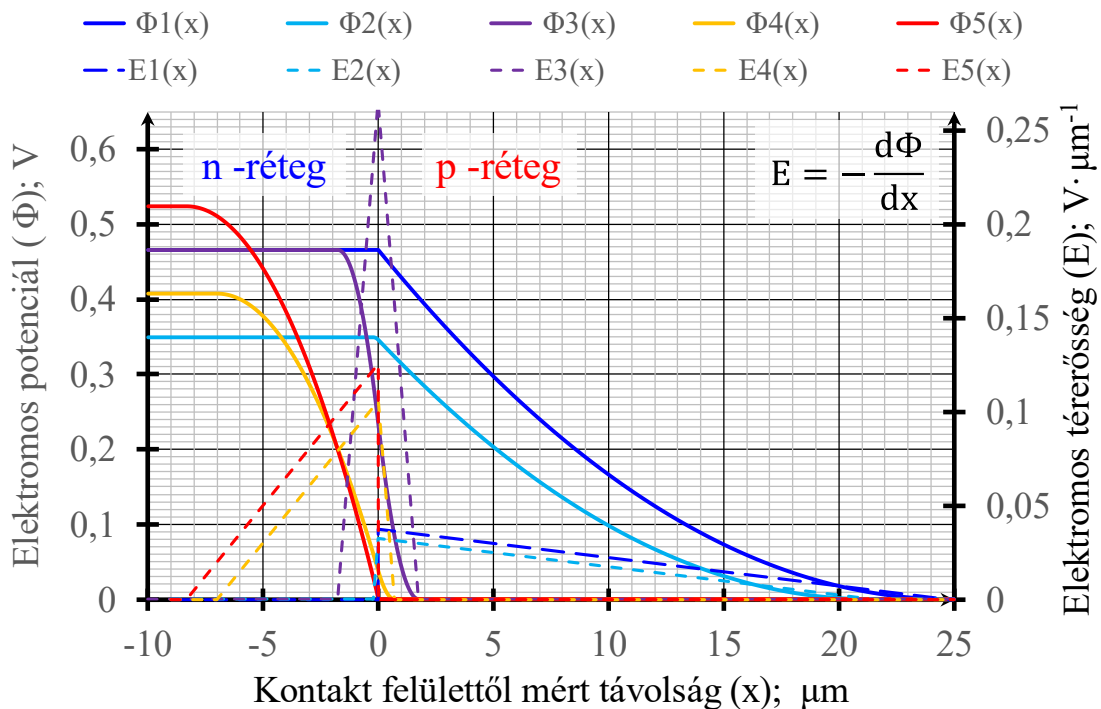
$$x_p = \sqrt{2 \cdot \frac{\varepsilon}{q} \cdot \frac{N_d}{N_a} \cdot \frac{1}{N_a + N_d} \cdot U_D} \quad (8.b)$$

$$w_D = x_p - x_n = \sqrt{2 \cdot \frac{\varepsilon}{q} \left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right) \cdot U_D} \quad (8.c)$$

A (4) és a (8 a-c) egyenletek felhasználásával számításokat végeztem a diffúziós feszültség és a kiürített réteg vastagságára vonatkozóan az eredményeket a 2. táblázatban ismertetem. A 2. ábrán különböző esetekben számított elektrosztatikus potenciált (Φ) és elektromos térerősséget (E) ábrázolja a kontaktfelülettől mért távolság függvényében.

2. táblázat: A p-n átmenetre.

Paraméterek/eset	1. eset	2. eset	3. eset	4. eset	5. eset
Az effektív állapotossűrűsége a p-tartomány (N_a); μm^{-3}	1	1	100	100	10000
Az effektív állapotossűrűsége az n-tartomány (N_n); μm^{-3}	10000	100	100	10	10
Diffúziós feszültség (U_D); V	0,4653	0,3490	0,4653	0,4072	0,5235
A kiürített réteg vastagság n és p tartományba x_n ; μm	0,0025	0,2141	1,7567	7,0068	8,3285
A kiürített réteg vastagság n és p tartományba x_p ; μm	24,8420	21,4081	1,7567	0,7007	0,0083
A kiürített réteg vastagság w_D ; μm	24,8445	21,6222	3,5134	7,7074	8,3369



2. ábra: különböző esetekben számított elektrosztatikus potenciált (Φ) és elektromos térerősséget (E) ábrázolja a kontaktfelülettől mért távolság függvényében.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

A számításokhoz csak fizikai és geometriai paramétereket használtunk fel. A számítási eredmények összhangban vannak a vonatkozó szakirodalomban publikált eredmények. Ezek az eredmények képezik a további szimulációk alapjait. Jelen publikációban még nem vettük figyelembe a hőmérséklet hatását, amely többé-kevésbé mindegyik fizikai paraméteren keresztül kifejti hatását, amely nagyobb hőmérséklet tartományban nem is lineáris függvény, hanem exponenciális jellegű.

6. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatómunka a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal támogatásával a 2020-1.1.2-PIACI-KFI-2020-00138 kódszámú, „Villamosenergia-felhasználást optimalizáló innovatív rendszer fejlesztése ipari-, lakossági fogyasztók és elektromos járművek számára.” című projekt keretében valósult meg.

7. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] GITTERMAN, M., HALPERN, V.: *Fizikai problémák kvalitatív elemzése*. Műszaki könyvkiadó, Budapest 1985
- [2] RACZYNSKI, S.: *Models for Research and Understanding Exploring Dynamic Systems, Unconventional Approaches, and Applications*. Springer 2022
- [3] SEROVAJSKY, S.: *Mathematical Modelling*. Taylor & Francis Group, LLC 2022
- [4] KUCZMANN M.: *Jelek és rendszerek*. Universitas Győr Kht. Győr 2005
- [5] FODOR GY.: *Jelek és rendszerek*. Műegyetemi Kiadó, Budapest 2006
- [6] POKORÁDI L.: *Rendszerek és folyamatok modellezése*. Campus Kiadó, Debrecen 2008
- [7] FÉNYES I. (SZERK): *Modern fizikai kisenciklopédia*. Gondolat könyvkiadó, Budapest 1971
- [8] KOVÁCS E.: *Napelemek fizikája*. Egyetemi jegyzet, Miskolci Egyetem 2022
- [9] PIERRET, R.: *Semiconductor Device Fundamentals 2nd Edition*. Pearson Education Inc 2003.
- [10] KIRIJEV, P.SZ.: *Félvezetők fizikája*. Tankönyvkiadó, Budapest 1974
- [11] SIMONYI K.: *Elektronfizika*. Tankönyvkiadó, Budapest 1981
- [12] GYURMÁNCZI GY., SELMECZI K., MAYER T.: *Műszaki Fizika III*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest 1990
- [13] NELSON J. A.: *The Physics of Solar Cells (Properties of Semiconductor Materials)* 1st Edition World Scientific Publishing Company, 2003
- [14] WÜRFEL, P.: *Physics of Solar Cells: From Principles to New Concepts*. Wiley-VCH, Berlin 2009
- [15] LUQUE, A., HEGEDŰS S. (EDS): *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. John Wiley & Sons Ltd. 2003

RANGE-REDUCING EFFECT OF CONTAMINANTS IN CASE OF SOLAR VEHICLES

MATUSZ-KALÁSZ Dávid¹, BODNÁR István², BOROS Rafael Ruben³, SZABÓ Norbert⁴

¹Ph.D., egyetemi tanársegéd, david.matusz-kalasz@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet,
Elektrotechnikai és Elektronikai Tanszék

²Ph.D., egyetemi docens, istvan.bodnar@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet,
Elektrotechnikai és Elektronikai Tanszék

³egyetemi tanársegéd, ruben.boros@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet,
Elektrotechnikai és Elektronikai Tanszék

⁴mesteroktató, norbert.szabo1@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet,
Elektrotechnikai és Elektronikai Tanszék

Abstract: *Over the past decade, the numbers of solar power plants and the capacity in-stalled have increased rapidly. In Hungary, the total installed capacity of solar power plants in 2010 barely exceeded 2 MW, in 2020 this value will already exceed 1000 MW. Hungary wants to reach 6000 MW in the capacity of solar power plants in this decade. Solar panels are not only spread in solar power plants, smaller ones have also used in laptop and mobile phone charges, as well as in electric or hybrid vehicles. Solar-powered ships appeared years earlier, and it didn't take long to create solar-powered airplane. In the case of land vehicles, light vehicles for 1-2 people appeared in the first round, but we can also find examples of family cars and vans.*

Keywords: *contaminant, solar, DC/DC converter*

1. INTRODUCTION

As is well known, several factors can affect the operation of solar panels. We have no influence on certain factors in case of fixed solar panels, such as the ambient temperature, the intensity of the solar radiation and its angle of incidence. In addition to these factors, we must also consider the effect of natural pollutants as shadow formers. These factors are difficult to identify, and their impact cannot be calculated in an exact way. Surface contaminants have two main effects on solar cell operation. One effect is the shadow effect, through which the power generation capacity of the solar cell decreases. The surface contaminant reduces the active surface of the solar cell. The other effect is the thermal insulation, as the contaminants deposited on the surface of the solar cell act as a thermal insulating layer, thereby reducing the heat dissipation capacity of the solar cell and warming over. As a result of the heating, the terminal voltage of the solar cell decreases. As a result of both effects, the solar cell continues to work at a lower operating point, which essentially means an efficiency loss [1].

Since solar cells are semiconductor electronic circuits containing a p-n junction, persistently high temperatures can lead to degradation of the p-n junction. In essence, the recrystallization of cells causes a permanent decrease in efficiency and shortening of lifetime. Under extreme conditions, it can even lead to rapid burnout of the cells, i.e. immediate destruction.

Sources of contamination can be natural or artificial. The most common natural sources of pollution are animal feces, leaves, and pollen from vegetation, agricultural fly dust, or sand in the desert environment, and volcanic ash near volcanoes. Artificial sources of pollution include

dust and soot from industry, power plants, household fires and transport, or minerals in the wash water. Surface contamination reduces efficiency. In the case of a solar cell placed on a roof, the amount of contamination cannot be determined, but under laboratory conditions (*Figure 1*) we can place an exact amount on it and infer from the results obtained.



1. Figure: *Leaves as large contaminants on the surface of the solar cell.*

Larger contaminants such as leaves or high particle size (e.g. sand) roll off the surface of the solar cell. Some of the fly dusts come into contact with water to form a muddy layer on the surface of the solar cells, so they partially run off, but their complete removal is a more difficult task. The most common airborne dusts, such as PMM 2.5 and PMM 10, adhere electrostatically to the surface of the solar cell, making them the most difficult to remove. However, the biggest problem is animal feces, primarily bird droppings. Because they are concentrated on a small surface, they can form a thick layer of thermal insulation on the surface of the solar cell. Such contaminants, mostly affecting one cell, less often two cells, create hot spots on the solar cell. These hot spots are more prone to permanent damage, faster destruction. However, it is more difficult for bird droppings to leave the solar cell in a natural way, so their artificial removal may be justified. When removing contaminants, care must be taken to ensure that the water is hard in some geographical areas. After removing the contaminants, make sure that the water is hard in some geographical areas. As a result, the hard water evaporating from the solar cell causes surface contamination in the form of limescale or mineral deposits [2].

Hot spots are detected primarily by thermal imaging. In a highly polluting environment, it is advisable to perform the thermal imaging examination annually, so that it is easy to filter out which cells have been damaged or defective. Faulty cells can affect the operation not only of the modules but also of the entire solar power plant. The more failed cells, the greater loss in efficiency of the system. Some manufacturers give a 10-20-year warranty on their solar panels, therefore feedback to a distributor / manufacturer within the warranty period for defects may constitute a free replacement of the module.

Contaminants reduce the operating efficiency of the solar cell, i.e. the instantaneous efficiency, which also reduces the amount of generated electricity. The extent of this reduction also affects the operation of solar-powered equipment. Depending on the environmental conditions, there may be a decrease of up to several percent in the daily energy production of solar cells. Measurements and simulations are required to quantify the effects, as there is currently no exact mathematical model to pinpoint them. In our research, we performed measurements to estimate the effects.

2. SOLAR POWERED CARS

Since the solar panels generate direct current, it is an obvious solution to place them on top of vehicles and connect them to a 12 VDC system. Although solar panels are not enough for running an electric car, however they can provide power to the control circuits or provide a slight increase in range. Over the past decade, many vehicle manufacturers tried to build solar cars, with greater or lesser success. Solar powered prototype is currently being developed by

the Lightyear Company (Netherlands) and the Sono Motors (Germany) [5]. The parameters of solar cars can be seen in *Table 1*.

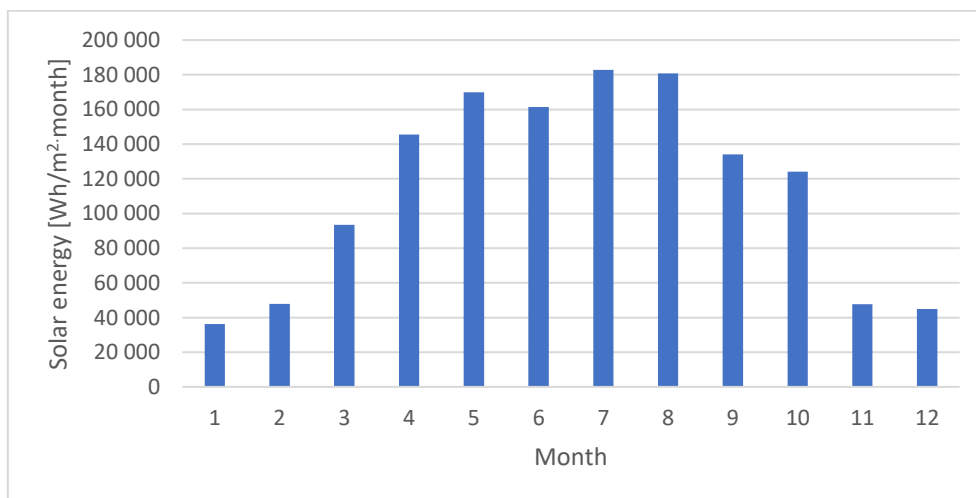
Table 1.: Comparison of solar powered prototype vehicles.

Name of prototype	Lightyear One (Car 1)	Sono Sion (Car 2)
Manufacturer	Lightyear	Sono Motors
Total area of solar panels	5 m ²	7.5 m ²
Solar range	50–60 km	34 km
Ratio of solar usage	57%	19%
Nr. of seats	5	5

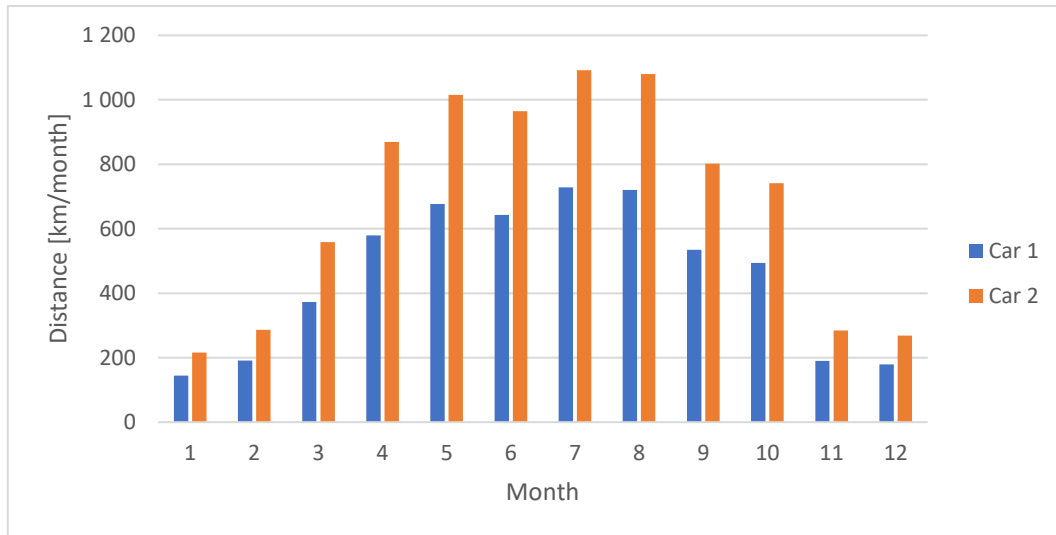
The solar panels are always used to charge the vehicle battery pack, however, electric cars run on tens of kW electric motors. On the other hand, only a few hundred watts of solar power capacity can be placed on them. It follows that solar panels alone are not enough to charge and operate the vehicle, therefore, the importance of solar cars lies primarily in the daily commuting of the urban population. It should not be overlooked that most cars are usually used by one person at a time. For this reason, it is unnecessary to produce large and powerful solar cars. It would be practical to design these vehicles for daily, low-power commuting, rather than for a family car. It is worth researching in this direction and developing cheaper solar cars [3, 4, 5].

Figure 2 contains the monthly distribution of the amount of solar energy measured in Budapest with a 45% south facing Pyranometer. It can be observed that about 71.2% of the annual solar energy falls in the period from April to September (6 months). As the tested solar cell has an efficiency of 18.75%, the electricity generated by the solar cell would be 256.61 kWh/m² per year. Because the solar panels in the electric car are located almost horizontally, they are able to produce only 85% of this value. We can count on an annual energy production of 218.12 kWh/m².

The Car 1 has 5 m² and the Car 2 has 7.5 m² of solar panels. Accordingly, the solar panels of Car 1 produce 1090.6 kWh of electricity per year and the solar panels of Car 2 generate 1635.9 kWh of electricity. If both vehicles have a consumption of 200 Wh/km, which is the average consumption of the electric cars currently in use, the Car 1 would be able to cover (5453 km) per year and the Car 2 (8179.5 km). The energy conversion efficiency of the vehicle, which is the product of the charging, storage and DC/AC conversion efficiencies, should not be overlooked. The energy conversion efficiency varies between 80-90% depending on the charge and the type of battery used in the car [3, 4, 5].



2. Figure: The monthly distribution of the amount of solar energy in Budapest.



3. Figure: Comparison of monthly solar range of solar powered vehicles.

Table 2.: Quantifying daily solar range of solar powered vehicles in every month of a year.

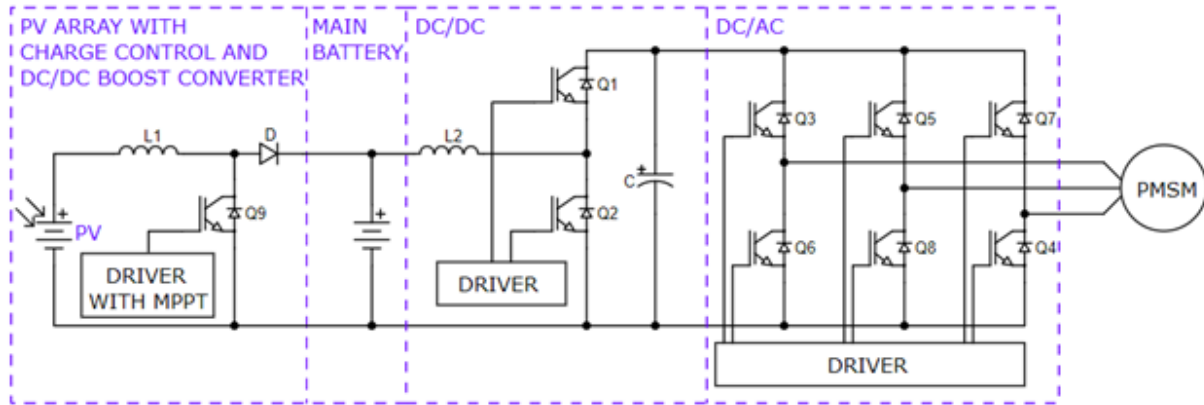
Month	Car 1 [km/day]	Car 2 [km/day]
1	4.65	6.97
2	6.81	10.22
3	12.02	18.03
4	19.33	28.99
5	21.83	32.75
6	21.43	32.15
7	23.49	35.24
8	23.23	34.84
9	17.81	26.72
10	15.95	23.92
11	6.32	9.48
12	5.78	8.67

Consider a conventional electric car with an average roof area of 4 m². Ideally 750 Wp solar capacity can be placed on a surface of this size. The annual energy production of these solar cells is 872.479 kWh. With so many solar panels, neglecting the losses, it would be able to cover 4362 km per year. This means an average of 11.95 km per day. It should not be overlooked that solar cells are contaminated by contaminants in the environment around them. Contaminants reduce their efficiency, thus the range of solar-powered cars [5].

3. POWER ELECTRONICS IN ELECTRIC CARS

The transmission system for electric cars is simpler than for cars with combustion engines, as there is no need for a clutch, a large gearbox. The transmission system is driven by an electric motor. It is advisable to install electric motors in vehicles that have a high starting torque and are as constant as possible. This assumption is well satisfied by the permanent magnet synchronous motor (PMSM). The PMSM motor is usually three-phase, the rotor is made of permanent magnet, so the need for maintenance is minimal. The stator requires three-phase AC voltage for winding. The speed is proportional to the frequency of the voltage.

The power electronics circuit diagram that can be integrated with the solar system is shown in *Figure 4*. The AC voltage is generated by a three-phase inverter (DC/AC converter) from the DC voltage of the battery. The switching elements of a modern inverter consist of SiC MOSFETs, so the inverter has good efficiency. The inverter is controlled by a microcomputer that implements a field-oriented drive, thus providing the highest possible torque at any speed. The inverter is a voltage source inverter, so its input requires a constant DC voltage that is connected to the intermediate DC circuit. Here, a buffer capacitor performs voltage smoothing [6, 7].



4. Figure: Voltage and flux variations as a function of frequency

The battery voltage varies over a wide range between charged and discharged. In most cases, the nominal voltage of the battery is lower than the rated voltage of the motor, so a DC/DC converter must be used. In order to increase the range of the car, it is advisable to use kinetic energy in the form of electricity when braking. In regenerative mode, the PMSM machine is able to feed electricity back into the battery during braking. The amount of voltage generated must be controlled, as it is much higher than the battery voltage, so a voltage-reducing DC/DC converter is required. The two DC/DC converters can be combined to create a bidirectional DC/DC converter (buck-boost) [8].

The range of the car can be further extended by charging that battery with a solar cell. The solar cell generates a constant direct current at a constant light intensity. The solar cell cannot be connected directly to the battery, as the solar cell generates a lower voltage than the battery terminal voltage. The solar cell is a current generator, so a step-up DC/DC converter is required, which uses the Maximum Power Point Tracking algorithm (MPPT) of the solar cell to charge the battery [8].

4. EFFECT OF CONTAMINANTS

In the first round, we performed outdoor measurements, the aim of which was to see to what extent the pollutants deposited on the solar cells reduce the performance and production of the solar cells. For the measurements, a 1.5 kW peak power solar system placed on the roof of a garage with a 20 ° slope was used in an urban area (*Figure 5*).



5. Figure: *Measured solar panels on the roof of a garage.*

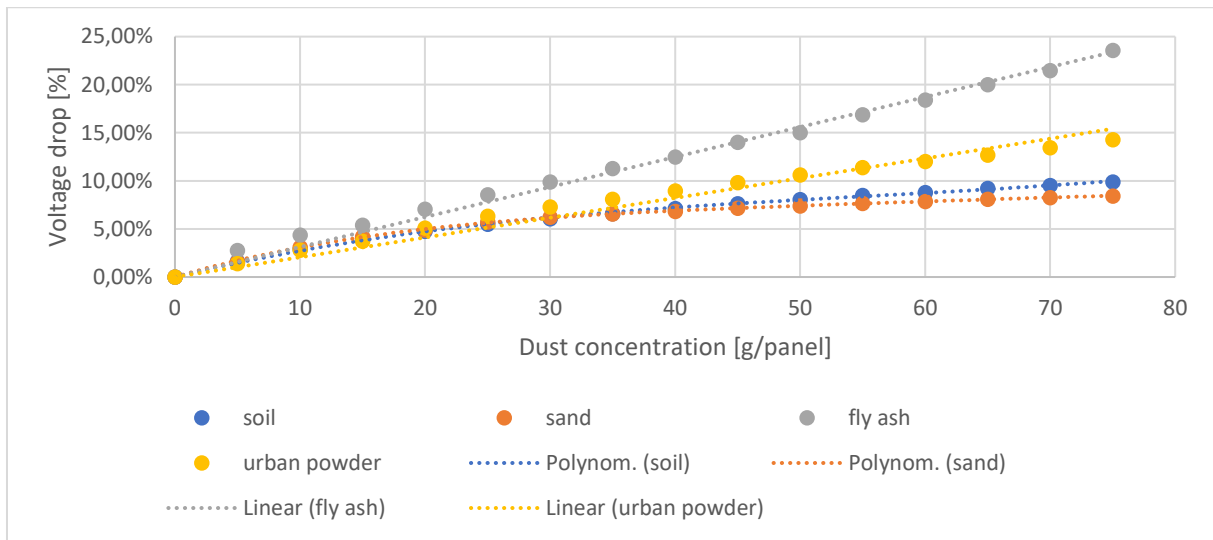
On the first day, the solar panels were cleaned. Subsequently, we continuously measured the performance and energy production of the solar cell. The solar panels used as controls were washed daily. In the first days, we hardly experienced any differences in production. By day 9, the peak performance of the solar cell had decreased by 2.53%, with cumulative production losses approaching 10%. On day 9, a thunderstorm cleared the solar panels (*Figure 6*). As the amount of deposited powder could not be measured, laboratory tests were started. The aim of the laboratory test was to determine how much dirt deposits cause power loss or loss of production [9].



6 Figure: *The ninth day was dirty solar panel (left) and post-rain solar panel (right).*

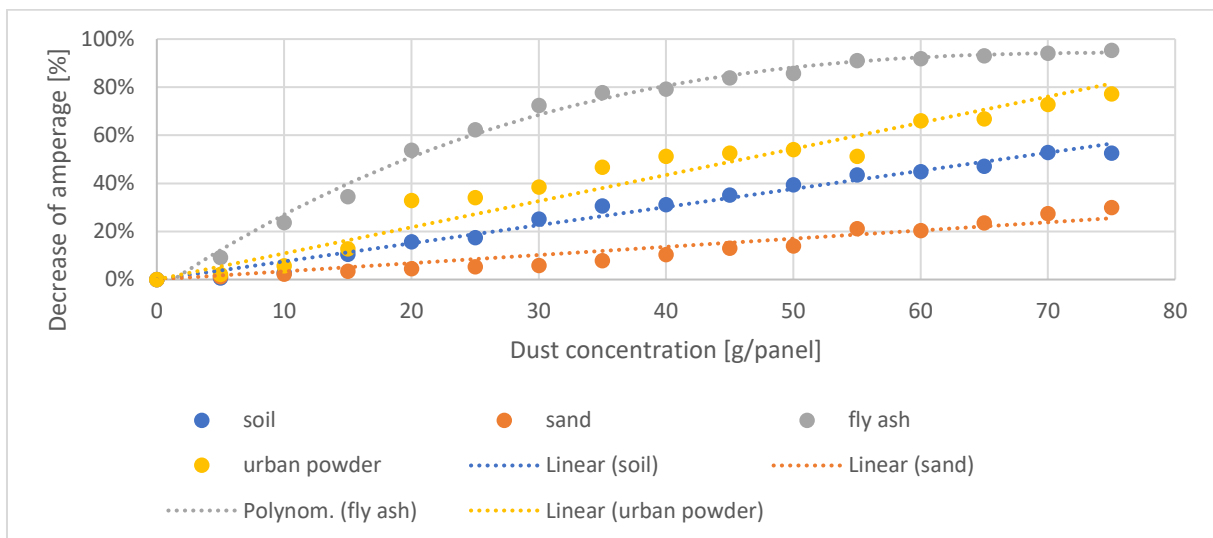
In our laboratory tests, a KS-85 type solar panel was placed on a table of the same size during measurements. The ambient temperature was 20 °C. The area of the solar panel is 0,5 m². The type of solar panel is monocrystalline. The surface of solar panel was illuminated by eight reflectors. The voltage and current of the solar panel were measured by a METRIX MX-59HD digital multimeter. We polluted the solar cell with powder having four different properties. These were sand, fly ash, soil and urban dust. The dust concentration was between 0-75 g/panel (0-150 g/m²) at 5 g/panel scale. The weight of powder doses was measured by a Voltcraft PS-200B jeweler scale. The method of scattering was the sieving. The maximal grain size was 0,5 mm. Due to the sieving; pollutants can spread almost perfectly over the entire surface. In this way we can approximate the real deposition much better by eliminating large differences in grain size (selection of larger grains). When the solar cell is exposed to light along with heat radiation, causing a certain amount of voltage drop. The pollutant accumulates the heat, thereby

enhancing its negative impact. The greatest reduction in voltage was observed for ash, the smallest nonlinearity was measured with sand [10,11]. The results of voltage drop can be seen in *Figure 7*.



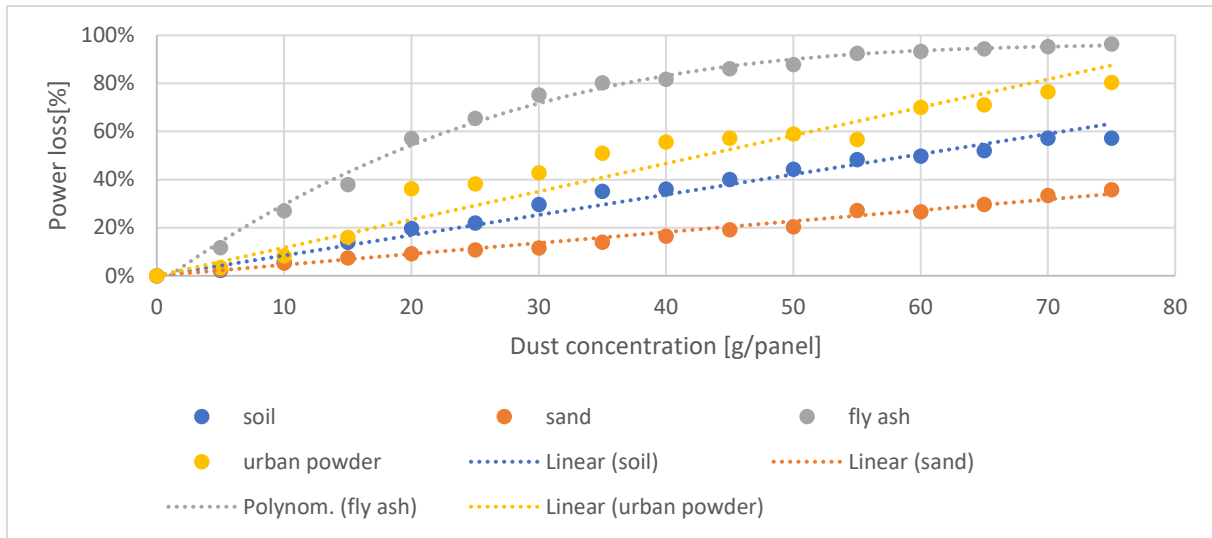
7. Figure: The measured voltage drop caused by contaminants.

Similar trends can be observed in the case of voltage and current decreases. The decrease of illumination can cause the decrease of current, which is further exacerbated by surface contamination. As pollutants spread on the surface in a thinner but more extensive layer, their shading effect deepened the amperage reduction. The greatest reduction in amperage was observed for ash as in case of voltage (*Figure 8*) [10,11].



8. Figure: The measured amperage reduction caused by contaminants.

The decrease in power provided by the solar panel is a significant problem, while electric motors have a constant significant energy demand. Since the product of these two quantities is the electrical power, similar trends (*Figure 9*) can be observed in the case of voltage and current decreases [12].



9. Figure: Power-reducing effect of contaminants.

5. CONCLUSIONS

The highest specific surface area has a significant impact on the operation and lifetime of the solar cell. Lower density pollutants as ash form a thicker insulating layer on the solar panel, resulting in more heating. The ash data set shows a polynomial change as a function of concentration due to this thick cover layer. If the solar cell operates at a higher temperature, the service life is reduced due to the nature of the electronics.

The other three contaminants show a close, linear change. At low concentrations (below 15 g/panel) no significant difference was observed between the different materials. It is expected that later measurements with low concentrations are worthwhile, as in this case we can examine a case that is closer to reality. Under real conditions the cleaning effect of the air flow can remove a significant amount of larger grain size contaminants. Only contaminants that remain electro-statically adhere on the surface. Furthermore, wet contaminants are difficult to remove, resulting in permanent performance degradation.

At concentration level of 10 g/panel (20 g/m²) the power loss was about 8%. Consider an average roof area of 4 m², which means ideally 750 Wp solar capacity, 8% power loss cause numerous reductions in total solar range. The annual power loss of this solar car is 69,798 kWh, which is equal to 448.96 km solar range loss per year. This means an average of 0.956 km per day.

6. ACKNOWLEDGEMENT

The research work is supported by the National Office for Research, Development and Innovation under the code number 2020-1.1.2-PIACI-KFI-2020-00138, "Development of an innovative system optimizing electricity use for industrial, residential consumers and electric vehicles." was realized in the framework of the project.

7. REFERENCES

- [1] ABDERREZEK, M., FATHI, M.: *Experimental study of the dust effect on photovoltaic panels' energy yield*, Solar Energy 142, pp. 308–320 (2017).
- [2] GÜRTÜRK, M., BENLI, H., ERTÜRK, N.K.: *Effects of different parameters on energy – Exergy and power conversion efficiency of PV modules*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 92(9), 426–439 (2018).
- [3] BETANCUR, E., MEJÍA-GUTIÉRREZ, R., OSORIO-GÓMEZ, G., ARBELAEZ, A.: DESIGN OF STRUCTURAL PARTS FOR A RACING SOLAR CAR. IN: EYNARD B., NIGRELLI V., OLIVERI S., PERIS-FAJARNES G., RIZZUTI S. (eds) *Advances on Mechanics, Design Engineering and Manufacturing*, Lecture Notes in Mechanical Engineering pp 25-32 (2017).
- [4] MINAK, G., FRAGASSA, C., DE CAMARGO, F.V.: *A Brief Review on Determinant Aspects in Energy Efficient Solar Car Design and Manufacturing*. In: Campana G., Howlett R., Setchi R., Cimatti B. (eds) *Sustainable Design and Manufacturing 2017*. SDM 2017. Smart Innovation, Systems and Technologies 68, pp 847-856 (2017).
- [5] BODNÁR, I., BOROS, R. R., MATUSZ-KALÁSZ, D.: *Solar powered electric car with VVVF drive control*, GÉP 71(3-4), pp 55-60 (2020).
- [6] TROVÃO, J. P., PEREIRINHA, P. G., FERREIRA, F. J. T. E., JORGE, H. M.: *Study of inductor effects in a bidirectional DC-DC converter for electrical vehicle*, The XIX International Conference on Electrical Machines - ICEM 2010, pp. 1-6. Rome, Italy (2010).
- [7] GAUTAM, D. S., MUSAVI, F., EBERLE, W., DUNFORD, W. G.: *A Zero-Voltage Switching Full-Bridge DC-DC Converter With Capacitive Output Filter for Plug-In Hybrid Electric Vehicle Battery Charging*, IEEE Transactions on Power Electronics 28(12), pp 5728–5735 (2013).
- [8] PERDIGÃO, M., TROVAO, J. P., ALONSO, J. M., SARAIVA, E.: *Large-Signal Characterization of Power Inductors in EV Bidirectional DC-DC Converters Focused on Core Size Optimization*, IEEE Transactions on Industrial Electronics 62(5), pp 3042-3051 (2015).
- [9] MALIK, A. Q., DAMIT, S. J. B. H.: *Outdoor testing of single crystal silicon solar cells*. Renewable Energy 28, pp 1433-1445 (2003).
- [10] BHATTACHARYA, T., CHAKRABORTY, A. K., PAL, K.: *Influence of Environmental Dust on the Operating Characteristics of the Solar PV Module in Tripura, India*, International Journal of Engineering Research 4(3), pp 141-144 (2015).
- [11] RAO, A., PILLAI, R., MANI, M., RAMAMURTHY, P.: *An experimental investigation into the interplay of wind, dust and temperature on photovoltaic performance in tropical conditions*, Proceedings of the 12th International Conference on Sustainable Energy Technologies, pp 2303-2310. The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China (2013).
- [12] ADINOYI, M. J., SAID, S. A. M.: *Effect of dust accumulation on the power outputs of solar photovoltaic modules*, Renewable Energy 60, pp 633-636 (2013).

LÍTIUM-ION AKKUMULÁTOR CELLÁK TÚLTÖLTÉSE

OVERCHARGE OF LITHIUM-ION BATTERY CELLS

**MATUSZ-KALÁSZ Dávid¹, BODNÁR István², JENYÓ Tamás³,
KOZSELY Gábor⁴**

¹ Ph.D., egyetemi tanársegéd, david.matusz-kalasz@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet,
Elektrotechnikai és Elektronikai Tanszék

²Ph.D., egyetemi docens, istvan.bodnar@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet,
Elektrotechnikai és Elektronikai Tanszék

³tanszéki mérnök, tamas.jenyo@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet, Fizikai Tanszék

⁴Ph.D., egyetemi adjunktus, gabor.kozsely2@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet,
Elektrotechnikai és Elektronikai Tanszék

Kivonat: Az utóbbi években az elektromos mobilitás világszerte egyre népszerűbb lett. Az elektromos járművek egyik veszélyforrása az energiatárolásra szolgáló lítium ion akkumulátor cellák. Ahogy a forgalomba hozott járművek száma nő, azzal egyenes arányban nő a kiégett járművek száma is. A cellák gyakran égnek ki közúti baleset, spontán cellazárlat, vagy akár a gépjármű feltöltése során. A kutatás Battery Management System (BMS) esetleges meghibásodása során a töltőáram megugrását és a megengedett érték túllépése esetében tapasztalható folyamatokat vizsgáltuk meg egyaránt új és használt cellák esetében. A töltőáram mértéke 5-30 A között változott. A vizsgálatok során azt tapasztaltuk, hogy a már használt cellák sokkal érzékenyebbek a töltőáram megugrására, mint az új cellák. A kísérleteket során megfigyelhető robbanásokat és lángcsóvákat normál kamerával dokumentáltuk, de a hőmérsékleteket hőkamerával is figyeltük. Számos alkalommal az alkalmazott készülék által maximum érzékelhető 400°C fölé emelkedett a kiégett akkumulátorok hőmérséklete.

Kulcsszavak: lítium-ion; töltőáram; stresszteszt

Abstract: In recent years, electric mobility has become increasingly popular worldwide. One of the sources of danger in electric vehicles is lithium-ion battery cells for energy storage. As the number of vehicles put into circulation increases, the number of burnt-out vehicles also increases in direct proportion. Cells often burn out due to road accidents, spontaneous cell shorting, or even when charging the vehicle. In the course of the research, in the case of a possible failure of the Battery Management System (BMS), the surge of the charging current and the processes experienced in the case of a significant exceeding of the permissible value were examined for both new and used cells. The amount of charging current varied between 5 and 30 A. During the tests, we found that used cells are much more sensitive to charging current surges than new cells. The explosions and flame plumes observed during the experiments were documented with a normal camera, but the temperatures were also monitored with a thermal camera. On several occasions, the temperature of the exhausted batteries rose above the maximum 400°C detectable by the device used.

Keywords: lithium-ion; charging current; stress test

1. BEVEZETÉS

Az elmúlt évek nemzetközi tapasztalatai azt mutatják, hogy emelkedő tendenciát mutat a forgalomba hozott elektromos járművek száma, ebből fakadóan a lítium-ion akkumulátor pak-
kok tüzeinek száma is folyamatosan évről-évre nő. Nagyon fontos, hogy mindannyian megért-
sük ezen eszközök használatának tűzvédelmi kockázatait és felkészüljünk arra az esetre, ha

valami probléma lépne fel használatuk során. Az elektromos járművekkel foglalkozó szakirodalom három alapvető tüzeseti forrást különböztet meg: spontán gyulladást (valamilyen gyártási hiba), túlterhelésből eredő (kiemelendő a töltési ciklus során bekövetkező), valamint közúti beleset (fizikai behatás) során bekövetkező tüzesetet. A felsorolt eseteket befolyásolhatják még hőhatások (hősokk, extrém meleg vagy hideg), amelyek lehetnek tüzesetek közvetlen forrása, vagy egyszerűen csak hajlamosító tényezők [1, 2].

Kutatásunknak nem célja az elektromobilitás rossz színben való feltüntetése, sokkal inkább a veszélyforrások magasabb szintű megértése és a káresetek megelőzésének támogatása. Kiemelendő, hogy az elektromos járművek csoportján belül nem magasabb a tüzesetek előfordulásának mértéke. Számos kutatás foglalkozik a témával, és szinte az összes kiemeli, hogy az elektromos motorral, valamint a belsőégésű motorral szerelt járművek összehasonlítása rendkívül összetett folyamat [1, 2, 3].

2. LÍTIUM-ION AKKUMULÁTOR CELLÁK

BMS (Battery Management System) rendszer alkalmazása lehetővé teszi a cellák állapotának folyamatos nyomon követését, azonban ezek a rendszerek olykor nem működnek megfelelően, vagy meghibásodnak. A tűz szinte minden esetben a használati, tárolási szabályok megsértése esetén következik be, nagyon fontos a dolgozók oktatása ismereteinek szélesítése a témában, mely egyben megelőző lépés is lehet.

2.1. Lítium-ion akkumulátor cellák felépítése és működése

Minden lítium-ion cella pozitív és negatív elektródából, az anódból és a katódból áll. Egy ionvezető elektrolit van közöttük. Ez garantálja a lítiumionok szállítását az elektródák között a töltési vagy kisütési folyamat során. A lítium energiatároló eszközök legismertebb formája a lítium-ion akkumulátorok, amelyekben folyékony elektrolitot használnak. Egy másik fontos alkotóelem az elválasztó. Megakadályozza az anód és a katód közötti közvetlen érintkezést, és ezáltal megakadályozza a rövidzárlatot. Kisütéskor lítium-ionok és elektronok szabadulnak fel az anód oldalán. Az elektronok átfolynak a külső áramkörön, és elvégzik az elektromos munkát. Ezzel párhuzamosan a lítium-ionok az elektrolitfolyadékban és az elválasztón keresztül a katódra vándorolnak. Töltéskor ez a folyamat megfordul.

A lítium-polimer akkumulátorban az elektrolit egy polimer réteg molekulaszervezetébe van beépítve. Ez azt jelenti, hogy a külön leválasztó elhagyható. A lítium-polimer energiatároló készülékek csak kis kisülési áramot képesek generálni. A polimer réteg azonban lapos kialakítást tesz lehetővé, ezért az ilyen energiaraktárakat elsősorban mobiltelefonokban és laptopokban használják. A vékonyrétegű lítiumcella egy energiatároló eszköz, amelyben az elektrolitot egy ionvezető üveggel helyettesítik. Ez lehetővé teszi a lítiumfém használatát és ezáltal a rendkívül nagy energiasűrűséget.

Általában anódként használják a grafitot (C), amelyet a CLP-rendelet értelmében nem kell címkézni.

A katódban sokféle anyagot használnak. A katód anyagának pontos összetétele nagymértékben meghatározza az olyan tulajdonságokat, mint az élettartam, a töltési idő és a teljesítmény. A katódban gyakran vasat, mangánt, kobaltot vagy nikkelt használnak [4].

2.2. Lítium-ion akkumulátor cellák használata elektromos járművekben

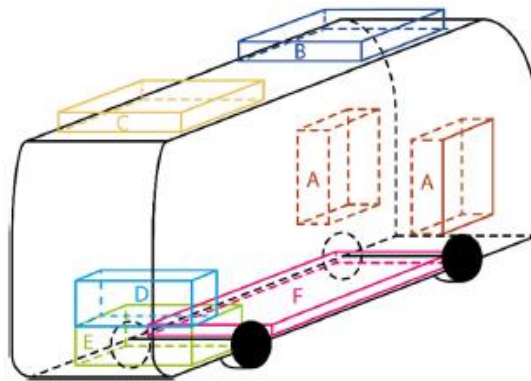
Az akkumulátor pakkok gépjárművekben történő elhelyezésének elsődleges kritériuma, hogy megtaláljuk azt a legbiztonságosabb zónát a jármű felépítésében, ahol a legkisebb valószínűséggel érheti kár.

Az energiatárolási megoldások gyártónként és típusonként is nagyon eltérőek lehetnek. Tisztán elektromos személygépjárművek nagyobb pakkot igényelnek, ezek esetében a „Floor” vagy „T” megoldást alkalmazzák. Kis méretű és hibrid járművek esetén „Rear” megoldás is elfogadott, mivel elegendő a kisebb méretű akkumulátor csomag.

Nagyobb járművek, kiemelendők a buszok, esetében nagyobb tárolókapacitást kell biztosítani, az akkumulátor csomag mérete és tömege jóval meghaladja a személygépjárművek számára elegendő értékeket.

Elektromos buszok akkumulátor csomagjainak lehetséges elhelyezési megoldásai a 1. ábrán vázoltak szerint [1, 5]:

- A: futóművek felett
- B-C: tetőn különböző pontjain
- D-E: busz hátsó végében
- F: utastér alatt, alvázba rejtett;
- működő megoldás lehet ezek kombinációja.



1. ábra: Akkumulátor csomagok lehetséges elhelyezése elektromos buszokban.

2.3. Elektromos járművek tüzeseteinek vizsgálata

Megvizsgálva az elektromos járművek tüzeseteivel, hőmegfutasaival foglalkozó szakirodalmat, a leggyakoribb szituációk mikor cellatűz keletkezhet a következők: jármű töltési ciklusa során, spontán cellazárlat (számos oka lehet: hőmérséklet, gyártási hiba), valamint a közúti baleset.

Amennyiben a kiváltó körülményeket vesszük alapul beszélhetünk termikus, mechanikai és elektrotechnikai hatásokról. Ha az konkrét kiváltó okokat akarjuk vizsgálni, abban az esetben egy elég hosszú listát is kaphatunk. Célzott termikus kiváltó ok lehet az extrém meleg és hideg, vagy akár ezek kombinációja egy hősokk. Speciális formája lehet a nyílt láng, ami származhat a már begyulladt cellákból, vagy a jármű egyéb részeiből.

Mechanikai kiváltó ok lehet ütés (deformáló hatású), olyan sérülés mely felszakítja, átszúrja az akkumulátor cella külső borítását, de akár erős, hosszú ideig fennálló vibráció is lehet kiváltó ok.

Az elektrotechnikai hatások csoportját fel lehet bontani számos kiváltó okra. Ezek az okok, meghibásodások érinthetik a cellákat, de érinthetik a cellákat felügyelő elektronikákat (BMS) is. Történhet rövidzárlat, de egyéb hatásokkal együttesen (pl. termikus) a túltöltés és túlmerítés (pl. mély-, gyorskisütés) is eredményezhet tönkremenetelt [1, 6, 7, 8, 9].

Jelen cikk bemutatásáig csak a nem megfelelő töltési mechanizmust vizsgáló kísérletek el-

végzésére került sor. Ekkor azt szimuláltuk a kísérletek során, hogy a BMS rendszer nem működik megfelelően.

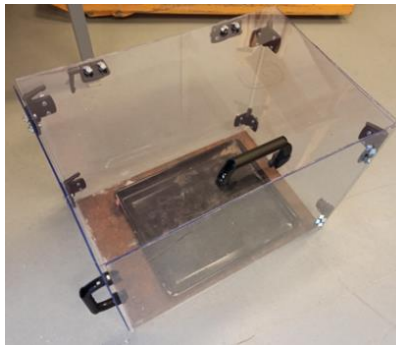
A következő vizsgálati eljárások lettek kiválasztva az akkumulátor cellák tesztelésére:

- nem megfelelő töltés,
- mechanikai sérülések (ütésvizsgálat),
- hőmérséklet hatásának vizsgálata.

3. AKKUMULÁTOR CELLÁK TÚLTÖLTÉSE

3.1. Tesztekre való felkészülés

Biztonsági szempontokat szem előtt tartva egy tesztelő kamra építésére volt szükség, vagyonevédelem és az emberi sérülések elkerülése végett. A mobil kamra alap méreteit egy, az aláhelyezett 10 mm vastagságú acéllemez határozta meg amelyre egyrészt, a tesztelt cella rögzítése miatt másrészt, a cella magas égési hőmérséklet miatt volt szükség. Az oldalfalak és a tető a korábban is használt UV álló SAN lemezből készült (2. ábra). Ezeket zsanérokkal rögzítettük egymáshoz, amik biztosítják a könnyű nyithatóságot és a rugalmasságot is. A kamra részben nyitottra lett tervezve, egyrészt, hogy a robbanás során felszabaduló energia ne tegyen kárt benne másrészt, hogy ez az energia egy előre meghatározott irányba távozhasson, harmadrészt pedig a mérésekről videó, illetve termokamerás felvételek készültek, és utóbbinak közvetlen rálátás szükséges a céltárgyra.



2. ábra: A mobil mérőkamra.

A túltöltéses méréseket egy Sorensen DCS40-30E típusú labor tápegység segítségével végeztük. A tápegységet áramgenerátoros üzemben használva különböző töltő áramokat kapcsolunk a cellákra melyeknek töltés közben mértük a hőmérséklet változását.

A méréseknél LG INR 18650 MH1 GA274J017N1 típusszámú 3200 mAh kapacitású cellákat használtunk. Adatlapjuk szerint ezeknek a celláknak, a normál töltés esetén 1,5 A, míg gyors töltés esetén 3,2 A lehet a maximális töltőáramuk.

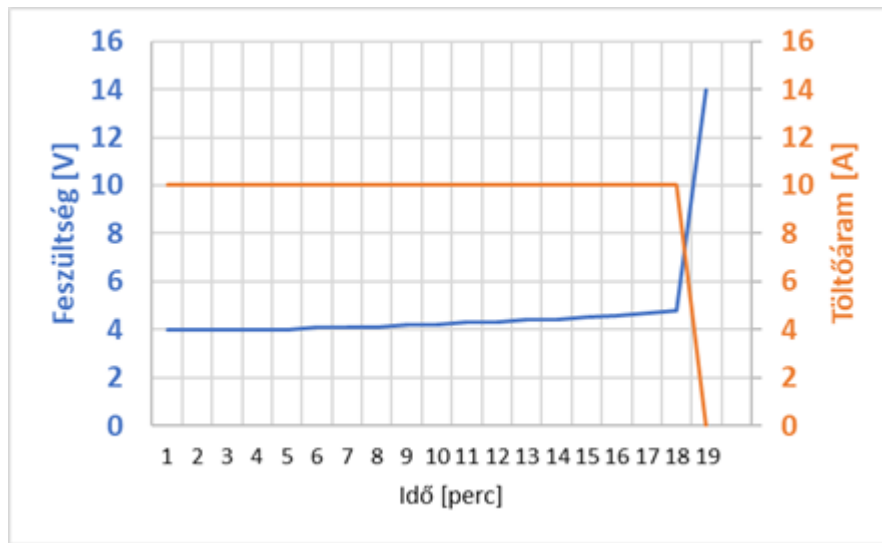
További méréseket végeztünk használt, bontott 18650-es Li-Ion cellákkal is referencia adatok gyűjtésének céljából.

3.2. Tesztek során tapasztalt jelenségek

Villamos paraméterek

A mérések során egy Sorensen DCS40-30E típusú labor tápegység segítségével végeztük. A tápegység áramgenerátorként szolgált, tehát az áramerősség lett állandó értékre beállítva, a feszültség igazodott a körülményekhez.

Általános tapasztalat volt, hogy a detonációk előtt a feszültség értéke hirtelen megszaladt, megnőtt. Ezzel egy időben az áramerősség lecsökkent mivel a cella megsemmisült, ezzel egy időben az áramkör is megszakadt (3. ábra).

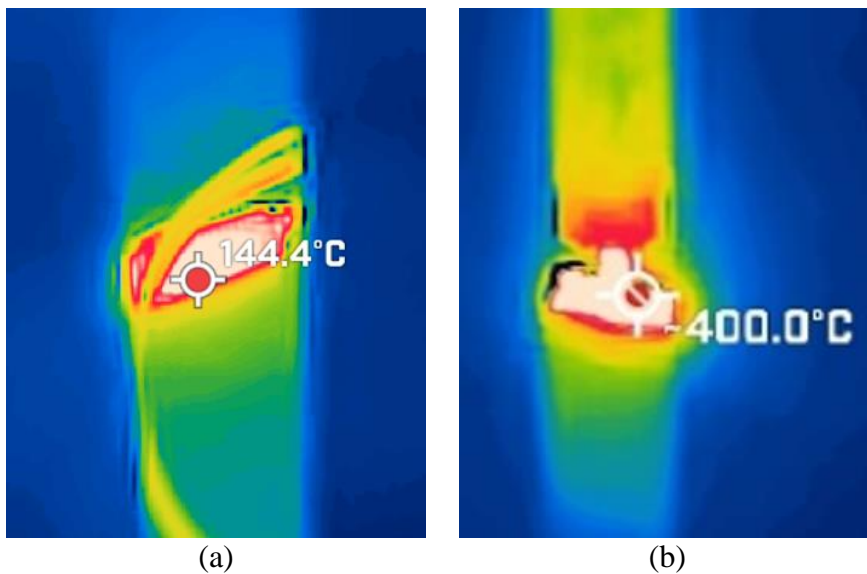


3. ábra: A detonáció előtti hőmérsékletek

Egyéb jelenségek

A vizsgálatok során azt tapasztaltuk, hogy mikor a töltőáram meghaladja a megengedett értéket az akkumulátorok hőmérséklete jelentősen megnő (4. a. ábra).

A kiegészítő minden esetben meghaladta a cella hőmérséklete a hőkamera méréstartományának felső határát (400 °C) (4. b. ábra). Tekintve, hogy az égés beindulásához 3 dolog szükséges: éghető anyag, oxigén és gyulladási hőmérséklet, 400 °C felett számos anyag képes lángra kapni. A mérés során a mérődoboz biztosította, hogy a felrobbanó akkumulátor celláról az égés ne terjedjen tovább, azonban egy járműbe való beépítés után ez már szinte lehetetlen.



4. ábra: (a) Az akkumulátor cella hőmérséklete a detonáció előtti másodpercekben 30 A-es töltéskor; (b) egy túltöltés miatt kiégett (felrobbant) cella hőmérséklete.

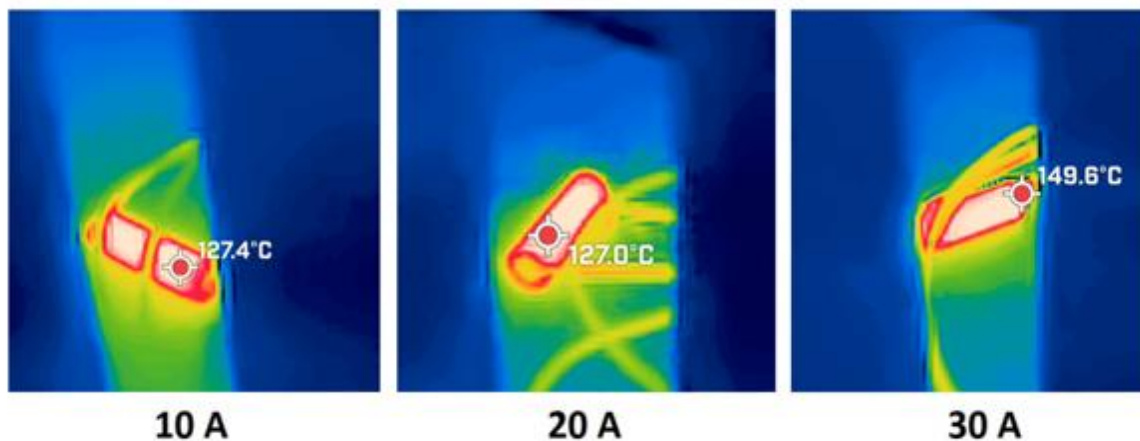
Tesztek eredményeinek bemutatása

Mikor a töltőáram értéke 5 A volt, a maximális értéket 1,8 A-rel léptük túl. A mérés megnyugtató eredménnyel zárult, mivel 37 perc töltés után kioldott az akkumulátor cella PTC védelme 78,5 °C-os hőmérséklet elérésekor.

1. táblázat: Az újonnan beszerzett akkumulátor cellák stressztesztjének adatai.

Töltő áram [A]	Max áram túllépés [A]	Töltési idő [perc]	Maximális cellahőmérséklet [°C]	Végeredmény
5	1,8	~ 37	78,5	Hővédelem kioldása
7,5	4,3	~ 26	116,3	Robbanás
10	6,8	~ 19	127,4	Robbanás
20	16,8	~ 5	137,8	Robbanás
30	26,8	~ 3	149,6	Robbanás

További vizsgálatok során, mikor a töltőáramot növeltük, minden esetben kiégett (felrobant) az akkumulátor cella, tehát elmondható, hogy az estek 80%-ban kiégés lett a végeredmény. 7,5 A esetén 26 perc után 116,3 °C elérésekor következett be a detonáció. 10 A esetén 19 perc után 127,4 °C elérésekor következett be a detonáció. 20 A esetén 5 perc után 137,8 °C elérésekor következett be a detonáció. 30 A esetén 3 perc után 149,6 °C elérésekor következett be a detonáció (5. ábra).



5. ábra: A detonáció előtti hőmérséklet értékek

A töltőáram növelésével csökkent a detonáció ereje, ami abból fakad, hogy 7,5 A esetén 26 perc alatt jóval több villamos energiát tudott elnyelni a cella kémiai energia formájában, mint 30 A esetén 3 perc alatt, így a több kémiai energia erőteljesebb detonációt eredményezett (6. ábra).



6. ábra: A detonációk

További méréseket végeztünk használt, bontott 18650-es Li-Ion cellákkal is. Ezeknél, ugyanolyan a töltőáramnál jóval rövidebb idő alatt akár 1-2 percen belül következettbe a detonáció, mivel az évek során töltéstároló képességük jelentős részét elveszítették. A használt cellák esetében is 80% volt a detonációval végződő tesztek részaránya (6. ábra).

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A lítium akkumulátor cellák kutatását egy elektromos járműépítéssel kapcsolatos projekt és az Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék kutatási tevékenységei miatt kezdtük meg. Az akkumulátor cellák stressz tesztelésének elsődleges célja, azok megbízhatóságának tesztelése volt. Az eddig elvégzett tesztek kizárólag a töltés során felmerülő, túltöltést eredményező meghibásodás lett vizsgálva. A vizsgálatokhoz készítettünk egy tesztelő, védő dobozt, amire a tesztek veszélyessége okán volt szükség. Az eredmények azt mutatják, hogy a kiválasztott akkumulátor cellák jól ellen álltak a maximálisan megengedett töltőáram többszörös értékének is. Ugyanakkor az esetek döntő többségében a túltöltés kiegészül, detonációval végződött.

Lehetséges folytatási irányvonal a mechanikai és termikus károsító hatásokat a vizsgálat stressztesztek elvégzése és adott esetben a körülmények kombinálása. Ezzel átfogó eredményt kapva a felhasználásra szánt akkumulátor cellák károsító hatásokkal szembeni próbabíráásával és megbízhatóságával kapcsolatban.

5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatómunka a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal támogatásával a 2020-1.1.2-PIACI-KFI-2020-00138 kódszámú, „Villamosenergia-felhasználást optimalizáló innovatív rendszer fejlesztése ipari-, lakossági fogyasztók és elektromos járművek számára.” című projekt keretében valósult meg.

6. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] SUN, P., BISSCHOP, R., NIU, H. et al. *A Review of Battery Fires in Electric Vehicles*. Fire Technology 56, 1361–1410 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10694-019-00944-3>
- [2] KANG, S.; KWON, M.; CHOI, J.Y.; CHOI S. Full-scale fire testing of battery electric vehicles, Applied Energy, Volume 332, 2023, 120497, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120497>
- [3] LECOCQ, A., BERTANA, M., TRUCHOT, B., MARLAIR, G. *Comparison of the fire consequences of an electric vehicle and an internal combustion engine vehicle*. In International conference on fires in vehicles-FIVE, 2012, Vol. 2, pp. 183-94.
- [4] ŞENYÜREK, Ü.; SOYHAN, H.S.; ÇELİK, D.D.C. *Battery Caused Fires in Electric Vehicles*, Uluslararası Yakıtlar Yanma Ve Yangın Dergisi, vol. 10, no. 1, pp. 21-27, Dec. 2022, doi:10.52702/fce.1054263
- [5] BISSCHOP, R.; WILLSTRAND, O.; ROSENGREN, M. *Handling Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles: Preventing and Recovering from Hazardous Events*. Fire Technol 56, 2671–2694 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10694-020-01038-1>
- [6] HELD, M.; TUCHSCHMID, M.; ZENNEGG, M.; FIGI, R.; SCHREINER, C.; MELLERT, L.D.; WELTE, U.; KOMPATSCHER, M.; HERMANN, M.; NACHEF L. *Thermal runaway and fire of electric vehicle lithium-ion battery and contamination of infrastructure facility*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 165, 2022, 112474, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112474>
- [7] REN, D.; FENG, X.; LU, L.; HE, X.; OUYANG M. *Overcharge behaviors and failure mechanism of lithium-ion batteries under different test conditions*, Applied Energy Volume 250, 2019, pp. 323-332.
- [8] OUYANG, D., CHEN, M., LIU, J., WEI, R., WENG, J., WANG, J. *Investigation of a commercial lithium-ion battery under overcharge/over-discharge failure conditions*. RSC advances, 2018, 8(58), 33414-33424. <https://doi.org/10.1039/C8RA05564E>
- [9] FENG, L., JIANG, L., LIU, J., WANG, Z., WEI, Z., WANG, Q. *Dynamic overcharge investigations of lithium ion batteries with different state of health*. Journal of Power Sources, 2021, 507, 230262.

POLARITÁS ÉS TÖLTÖTTSÉGI SZINT MEGHATÁROZÓ RENDSZER FEJLESZTÉSE LI-ION AKKUMULÁTORHOZ

DEVELOPMENT OF POLARITY AND CHARGE LEVEL DETERMINATION SYSTEM FOR LI-ION BATTERY

RÓNAI László¹, LÉNÁRT József²

¹Ph.D., adjunktus, laszlo.ronai@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Szerszámgépészeti és Mechatronikai Intézet,
Robert Bosch Mechatronikai Intézeti Tanszék

²egyetemi tanársegéd, jozsef.lenart@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Szerszámgépészeti és Mechatronikai Intézet,
Robert Bosch Mechatronikai Intézeti Tanszék

Kivonat: A cikk egy Li-ion típusú akkumulátorhoz kifejlesztett polaritás- és töltöttségi szint kijelző céláramkört és programot mutat be, amely egyszerűen integrálható automatizált összeszerelési folyamatba. Először egy analóg komparátoros áramkör tesztelése valósul meg, majd egy PIC mikrovezérlőt tartalmazó nyomtatott áramkört lap tervezése és elkészítése történik meg. A mikrovezérlőn futó, C nyelven írt program gondoskodik a megfelelő kiértékelésről. Két digitális, optocsatolókkal ellátott kimenet segítségével kommunikál a rendszer a környezetével.

Kulcsszavak: PIC mikrovezérlő, NYÁK tervezés, Li-ion akkumulátor

Abstract: The article presents a special purpose circuit and its program, which can determine the polarity and charge level for Li-ion batteries. The unit can be easily integrated into an automated assembly process. The first of the development introduces a test circuit with analog comparators, thereafter a printed circuit board containing a PIC microcontroller is designed and made. The program written in C language running on the microcontroller takes care of the appropriate evaluation. The system communicates with the environment using two digital outputs equipped with optocouplers.

Keywords: PIC microcontroller, PCB design, Li-ion accumulator

1. BEVEZETÉS

Az automatizálás nagyfokú fejlődésének [1], [2] köszönhetően egyre több folyamatnál megjelent a törekvés a gépekkel történő műveletek elvégzésére, nincs ez másképp az összeszeréseket érintő tevékenységeknél. Az iparban több olyan, eddig ember által végzett művelet, mozzanat található, amelyek gépekkel kiválthatók. A szerelések elvégzésére célgépeket is lehet alkalmazni, de mivel azoknál az adott célfeladat végrehajtása élvez prioritást, ezért kevésbé számítanak rugalmasnak, átkonfigurálhatónak. Ezzel szemben az ipari robotok alkalmazása szerelési folyamatokhoz eredményesnek bizonyulnak [3], [4].

Jelen cikk egy akkumulátor automatizált szereléséhez tartozó kiértékelő céláramkört kíván bemutatni, amely képes a polaritás ellenőrzésére, valamint a töltöttségi szint meghatározására. A Li-ion akkumulátoroknál szereléskor általában az elvárás a 3,6 – 3,7 V névleges töltöttségi szint megléte $\pm 0,1$ V megengedett eltérés mellett. A kifejlesztett áramkör könnyen illeszthető egy automatizált gyártósorhoz.

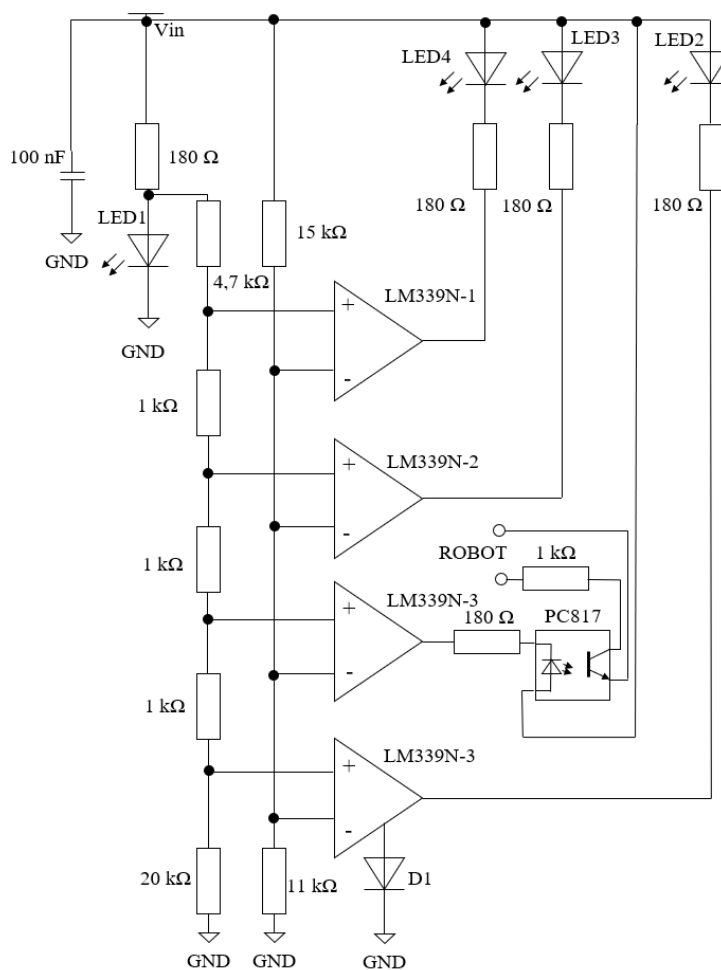
A cikk második fejezete röviden bemutatja a prototípus áramkört, amely analóg komparátorokat tartalmaz. A szerelési folyamat tesztelése a tanszéken található 6 szabadsági fokkal rendelkező Fanuc LR Mate 200iC ipari robottal történt. A harmadik fejezet a mikrovezérlő alapú céláramkört részletezi, amelyhez NYÁK (nyomtatott áramkör) tervezése és programírás is társult. Az összefoglalás tartalmazza az elért eredményeket.

2. POLARITÁS ÉS TÖLTÖTTÉG VIZSGÁLÓ ÁRAMKÖR PROTOTÍPUS

A vizsgálat tárgyát 18650 típusú Li-ion akkumulátor cellák képezik, amelyek 18 mm átmérővel és 65 mm hosszúsággal rendelkeznek. Több elektronikai berendezés is ezen típusokat használja fel pl. különféle kéziszerszámgepek.

Ahhoz, hogy a szereléshez felhasznált robot el tudja végezni a cella manipulálását, ezzel pedig a polaritás- és töltöttségi szint ellenőrzését, szükséges volt készíteni POM (polioximetilén) anyagból megfogó pófákat, melyekbe 1-1 fém érintkező nyelv beépítése valósult meg a céláramkörhöz történő hozzávezetés miatt.

Az 1. ábra szemlélteti a prototípus egység áramkörét, amely egy 4 csatornás analóg komparátoron (LM339N) alapszik. A prototípus áramkörbe 3 darab LED (LED2-LED4) beépítésével, valamint 180 Ω -os előtét ellenállásokkal nyomon követhető az adott cella töltöttségi szintje. A LED1 dióda egyfelől kijelzi a megfelelő polaritást, továbbá a rajta lévő feszültségeseést felhasználva megfelelő nagyságú ellenállásokkal, feszültségosztással diszkrét feszültség szintek alakíthatók ki, amelyek a komparátorok bemeneteire kapcsolhatók. A referencia feszültség az adott cella kapocsfeszültségének 11/26-a lesz. A nem invertáló bemeneten, hogyha nagyobb feszültség van, szemben az invertáló bemeneten lévővel, akkor az adott komparátor logikai 1 jelet ad a kimeneten. A 3. számú komparátor, hogyha logikai 0 értéket ad a kimenetén, azaz nem kapcsol, akkor megfelelő a töltöttségi szint, amely információ egy optocsatolón keresztül a robot egyik digitális bemenetére köthető. A D1 dióda a megfelelő polaritás védelme/eldöntése érdekében van az áramkörben.



1. ábra: A tesztelő áramkör kapcsolási rajza.

3. MIKROVEZÉRLŐ ALAPÚ TESZTÁRAMKÖR FEJLESZTÉSE

Annak érdekében, hogy az ellenőrzés szempontjából fontos küszöbfeszültség állítható legyen, illetve a céláramkör programozható is legyen egy mikrovezérlőt tartalmazó megoldás megtervezése vált szükségessé. A 2. ábrán látható a PIC 18F25K80 típusú mikrokontrollert, mint központi elemet magában foglaló tesztelő áramkör kapcsolási rajza.

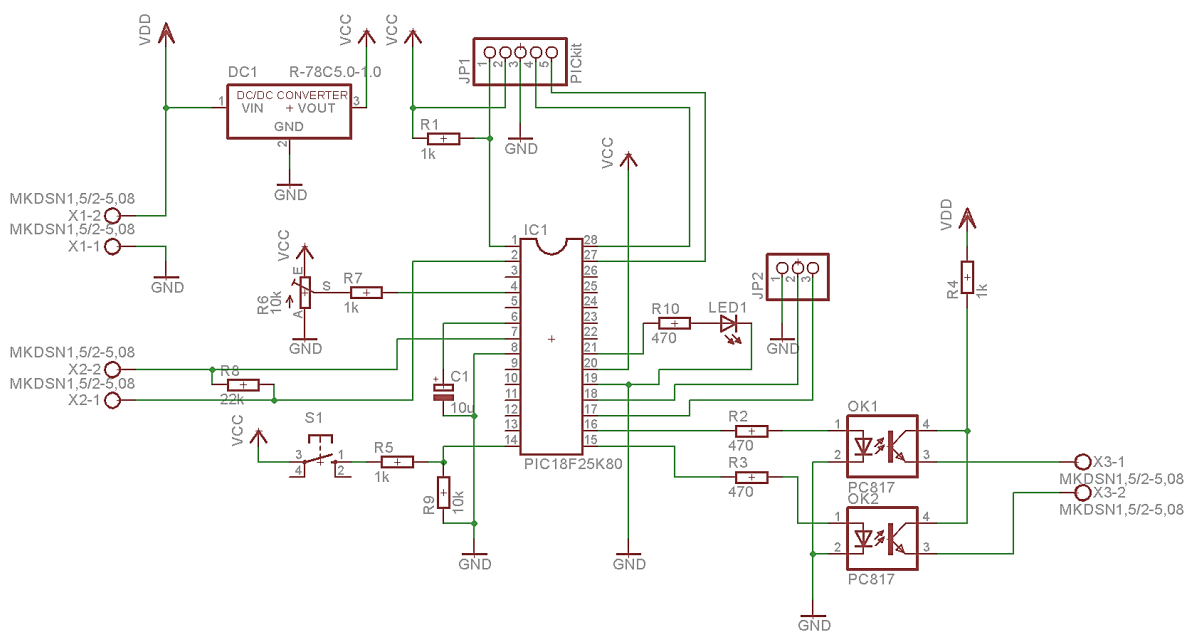
1-1 sorkapocs található az áramkör tápellátásához, illetve az akkumulátor mérővezetékeinek bekötésére, további 1 felelős a döntési jel robot felé történő továbbítására. Egy DC/DC konverter beépítésével a TTL jelszint biztosítható a mikrovezérlő számára. A 10 k Ω -os trimmer potenciométerrel szabadon állítható az ellenőrzéshez szükséges referencia feszültség értéke. Az S1 nyomógomb segítségével tárolható el a controller EEPROM egységébe az aktuális referencia feszültség nagysága. Az akkumulátor két pólusa a mikrokontroller analóg bemeneteire kapcsolódik, melyek differenciális üzemmódban működnek.

A robottal összeköttetésben lévő két kimenet optocsatolókkal felszerelt. Mivel egyszerre vizsgáljuk a polaritást és a töltöttségi szintet, így az alábbi lehetőségek lesznek:

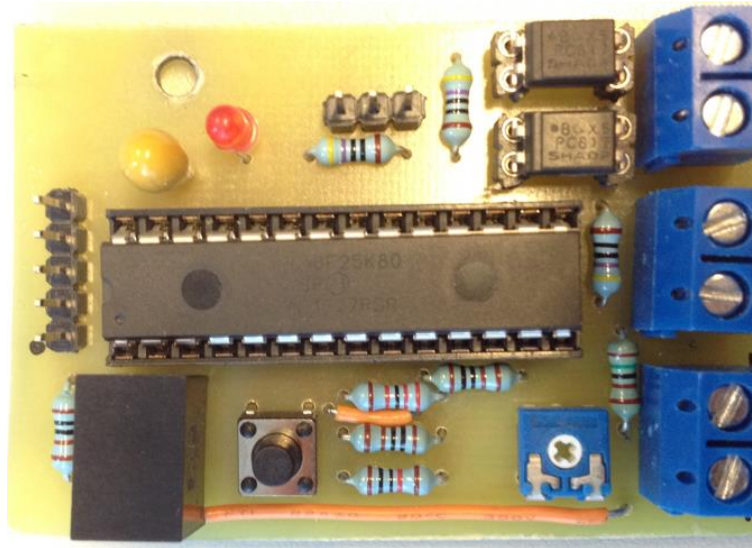
- ha a polaritás és a töltöttségi szint is megfelelő, akkor az OK1 optocsatoló logikai 1, míg az OK2 logikai 0,
- ha a töltöttség megfelelő, de fordított polaritás van, akkor az OK2 optocsatoló lesz kapcsolva, míg az OK1 logikai 0,
- ha a töltöttség nem megfelelő, akkor mindkét optocsatoló logikai 0 lesz.

A NYÁK-on helyett kapott egy LED, amely akkor világít, ha a mérés során a töltöttségi szint abszolút értéke eléri vagy meghaladja a beállított referencia értéket. Egy túsor is a panelre került az újra programozás lehetősége miatt.

A 3. ábra mutatja az elkészült panelt a beforrasztott áramköri elemekkel egyetemben. Az egység méretei: 58,4 mm hosszú és 41 mm széles.



2. ábra: A tesztelő áramkör kapcsolási rajza.



3. ábra: Az elkészült áramkör.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A cikkben egy polaritás- és töltöttségi szint ellenőrző céláramkör kifejlesztése történt meg, amely Li-ion akkumulátorok szerelésének automatizálására készült. Egy komparátoros egységgel felszerelt prototípus megalkotásával, illetve egy ipari robottal megtörtént a kapcsolás tesztelése. A jövőbeni könnyebb konfigurálhatóság érdekében egy mikrovezérlőt tartalmazó NYÁK megtervezése és elkészítése valósult meg. A modul egy PIC mikrovezérlőt tartalmaz, amellyel a feladat függvényében könnyen újra programozható a panel. Több teszt elvégzése után kijelenthető, hogy a rendszer hibamentesen működik, mely könnyen integrálható az automatizált szerelési folyamatba.

5. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] BRECHER, C., MÜLLER, A., DASSEN, Y., STORMS, S.: *Automation technology as a key component of the Industry 4.0 production development path*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 117, pp. 2287–2295, 2021.
- [2] NOF, S. Y.: *Springer Handbook of Automation – Second Edition* –. Springer Cham, 2023.
- [3] JIANG, Y., HUANG, Z., YANG, B., YANG, W.: *A review of robotic assembly strategies for the full operation procedure: planning, execution and evaluation*. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol. 78, 2022.
- [4] WANG, S., CHEN, G., XU, H., WANG, Z.: *A Robotic Peg-in-Hole Assembly Strategy Based on Variable Compliance Center*. IEEE Access, Vol. 7, 2019.

SZUPERKONDENZÁTOR MÉRÉSÉRE SZOLGÁLÓ LABVIEW PROGRAM MEGVALÓSÍTÁSA

IMPLEMENTATION OF A LABVIEW PROGRAM FOR SUPERCONDUCTOR MEASUREMENT

SZABÓ Norbert

mesteroktató, norbert.szabol@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Fizikai és Elektrotechnikai Intézet,
Elektrotechnikai és Elektronikai Intézeti Tanszék

Kivonat: Jelen cikkben egy szuperkondenzátor mérésére alkalmas programot mutat be, amely LabView környezetben került megvalósításra. A szuperkondenzátorok az elektromos hajtásokban az akkumulátorok kímélésére alkalmazott megoldások. Laboratóriumi körülmények között teszteltük, hogyan illeszthető be egy ilyen hajtásrendszerbe a szuperkondenzátor. Ezen mérésekhez szükségessé vált egy mérésadatgyűjtő- és feldolgozó rendszer kiépítése mind hardveres, mind pedig szoftveres oldalról. A tanulmány a program rövid bemutatásáról szól.

Kulcsszavak: szuperkondenzátor, LabView program, mérés

Abstract: This paper presents a program suitable for measuring a supercapacitor, which was implemented in the LabView environment. Supercapacitors are solutions used in electric drives to conserve batteries. In laboratory conditions, we tested how the supercapacitor can be inserted into such a drive system. For these measurements, it became necessary to build a measurement data collection and processing system from both the hardware and software side. The study is about a brief presentation of the program.

Keywords: superconductor, LabView program, measurements

1. BEVEZETÉS

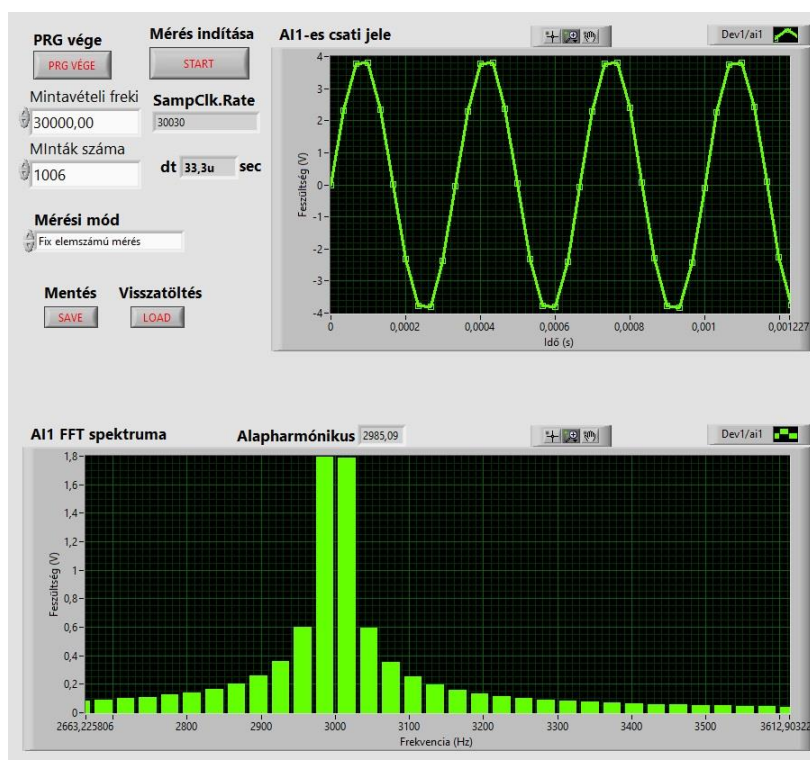
A kutatómunka során az elektromos meghajtásúvá alakított buszban tervezzük szuperkondenzátorokat elhelyezni a dinamikus gyorsulás és visszatáplálás során átadandó energiamegnyomás kiegyenlítése és az akkumulátorcsomag kímélése céljából. Laboratóriumi körülmények között teszteltük, hogyan illeszthető be egy ilyen hajtásrendszerbe a szuperkondenzátor. Ezen mérésekhez szükségessé vált egy mérésadatgyűjtő- és feldolgozó rendszer kiépítése mind hardveres, mind pedig szoftveres oldalról. E feladatot valósítottam meg.

2. A MÉRÉSI FELADAT MEGVALÓSÍTÁSA

A szuperkondenzátor működését a mért jeleinek a mérése alapján tudjuk meghatározni. Ezen paraméterek mérése azért fontos mert nagyon nagy tömeget kell gyorsítani, amely gyorsításhoz szükséges energiát tudja-e biztosítani a szuperkondenzátor. A busz saját tömege közel 10 tonna és a szállított személyekkel együtt 16 tonna felett is lehet. Ezen hatalmas tömeg gyorsítása, illetve az egyenletes sebességgel történő mozgatása hatalmas energiát igényel. Ezt a fosszilis üzemanyag helyett, most ebben a projektben az akkumulátorokban tárolt energia biztosítja, azonban a rövid ideig tartó, dinamikus áramerősségváltozásokat az akkumulátorok nem képesek elviselni, így a szuperkondenzátorban tárolt energia segítségével kell megoldanunk a kiegyenlítést.

A mérési tesztek során egy apró eltérésre lettem figyelmes, aminek szerettem volna a végére járni a mérések minél pontosabb eredménye érdekében. A problémát akkor tapasztaltam mikor

egy 3 kHz-es szinuszos jel mérése során, a frekvencia feldolgozása kapcsán 30 kHz-es mintavételezési frekvencia mellett, a feldolgozás 15,05 kHz-es frekvencia komponensről is tudott mért eredményt adni (1. ábra). Pedig ez a Shannon törvény alapján ez lehetetlen.



1. ábra: A mért frekvenciák.

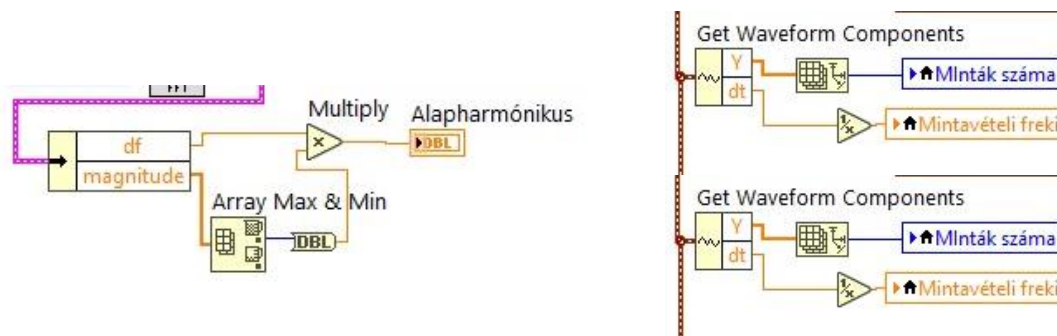
$$f_{mv} > 2 f_{jelmax} \quad (1.)$$

A fenti (1.) képlet alapján a mintavételezési törvény az egyenlőt sem engedi meg, nemhogy még a mintavételi frekvencia felétől nagyobb komponenseket kaphassunk eredményként! Tehát elkezdtem vizsgálni a probléma okát.

Két módszert gondoltam ki a „valós” mérési frekvencia meghatározására. Az első gondolatom az volt, a frekvencia komponensek segítségével meghatározható a mérési frekvencia. Tehát ha azt szeretnénk, hogy a frekvencia spektrum alapján meghatározzuk a mérési frekvenciát, akkor a legnagyobb frekvencia komponens + df dupláját kell vennünk. Ahol a df a frekvencia lépcső értéke. Tehát a feldolgozás finomságát befolyásolja a df értéke. Természetesen a df értékét a mérőprogramban megadott két paraméter segítségével tudom beállítani. Tehát a mintavételi frekvencia és a minták számának a hányadosa megadja a frekvencia tengely felbontását. Ezt a műveletet is elvégezve 30 kHz-től egy kicsit nagyobb frekvenciát kaptam.

A másik ötletem, hogy a frekvencia lépcső képletéből fejezem ki a mintavételifrekvencia értékét. Ekkor a df nagyságát megszoroztam a mért minták számával, és megkaptam a mintavételi frekvencia nagyságát. Ez az érték is 30 kHz-től egy kicsit nagyobb lett. Végül a mintavételi frekvencia reciprok értéke megadja azt a „dt” időt amilyen sebességgel a mintákat gyűjti a rendszer. Tehát ez esetben 1 másodperc alatt 30000 mintát gyűjt, tehát egy minta levételéhez 1/30000 másodpercre van szükség. Ekkor 30 kHz esetén a frekvencia reciprok értéke lesz a mérések között eltelt idő, azaz 33,3333 μs. Persze a 3 az végtelen tizedes tört lenne. De természetes mérésadatgyűjtő pontosságában ezt kerekíteni fogja a rendszer. Ez az érték könnyen lekérdezhető a „get waveform component” és a „dt” segítségével a mérés során. Ennek vége a reciprok értékét megkaphatjuk a mérési frekvencia értékét. Amire eredményként megint

csak 30 kHz-től egy kicsit nagyobb értéket kaptam (30030 Hz). Tehát a mérés időzítése $1/30030=0,0000333$ s, azaz 33,3 μ s-al történt meg.



2. ábra: LabView tömbök.

Végezetül kiolvastam a mérés során a mintavételi frekvencia értékét, amely megint csak 30030 Hz-es értéket adott. Tehát bebizonyosodott számomra, hogy a mintavételi frekvencia nem lehet akármilyen értékű, csak olyan, aminek reciprok értéke beállítható a mintavevő tartó áramkörben. Tehát úgy módosítottam a teszt programot, hogy a valóságban alkalmazott mintavételi frekvenciát írja ki a program a mérés végeztével. Így az itt elért eredményeket beintegráltam a buszon alkalmazható többszörös mérőprogramomba.

A programom tesztelése során látható, hogy a mérési frekvencia növelésével egyre jobban csökken mintavételi idő, 25 μ s-ról 3 μ s, illetve 1,1 μ s és végül 1 μ s-ra.

Mintavételi freki	SampClk.Rate	Mintavételi freki	SampClk.Rate
40000,00	40000	330000,00	333333
MInták száma	dt 25u sec	MInták száma	dt 3u sec
1030		1030	
Mintavételi freki	SampClk.Rate	Mintavételi freki	SampClk.Rate
900000,00	909091	1000000,00	1E+6
MInták száma	dt 1,1u sec	MInták száma	dt 1u sec
1030		1030	

3. ábra: Mintavételi frekvenciák.

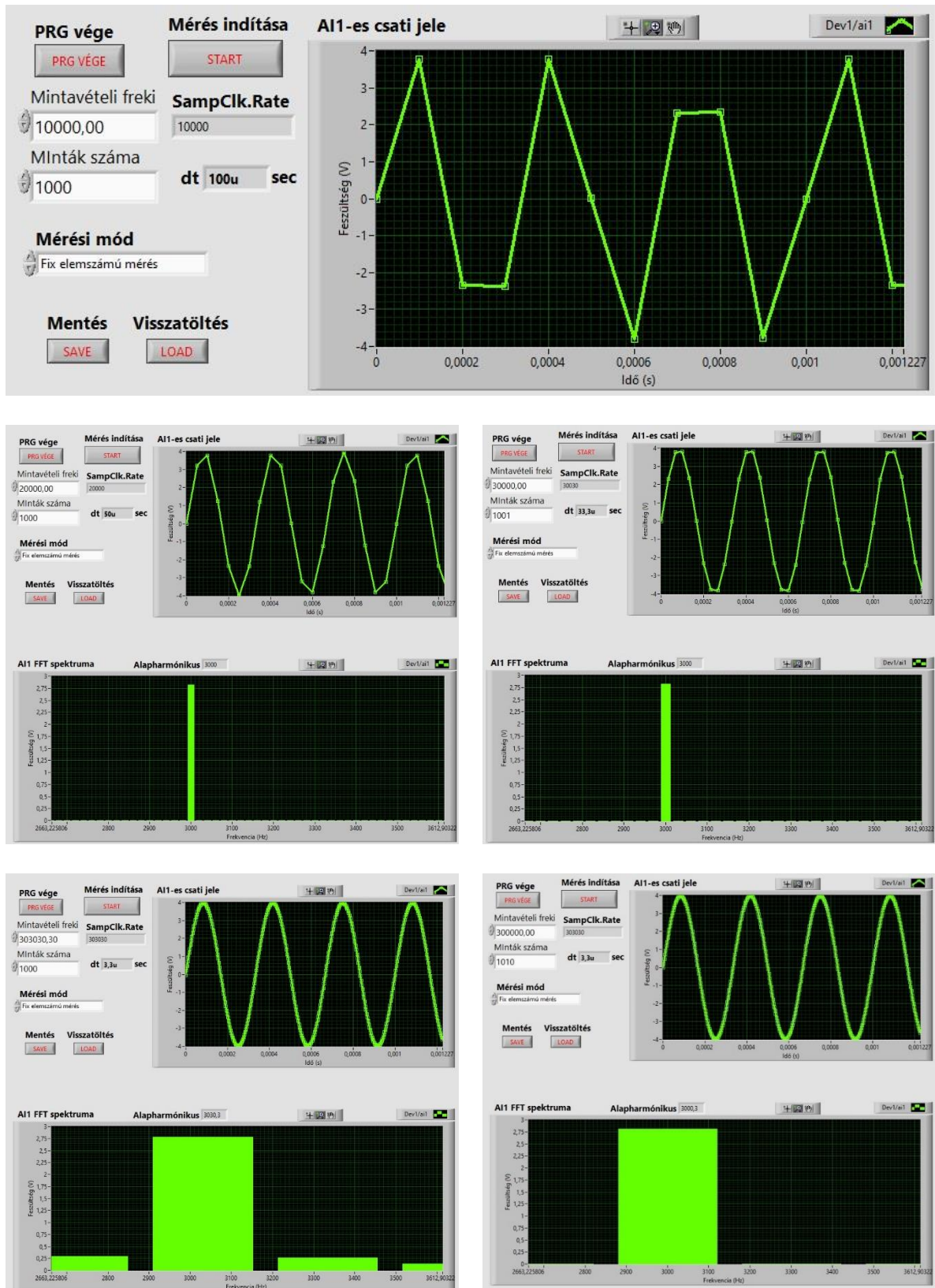
Az fenti négy példán is látható, hogy a mérési frekvencia beállítása során, nem minden frekvenciával tud mérni a rendszer, és a nem beállíthatókat automatikusan módosítja olyan értékre, ami már mérhető.

A mérés során fontos a mintavételi frekvencia, amit 10, 20 és 30 kHz-re állítva, látható a különbség az alábbi ábrákon.

Tízszeres mintavételi frekvencia esetén a kapott frekvencia komponensek romlanak, jóval nagyobb hibával mérhetőek az egyes komponensek, mivel egyre kevesebb teljes periódust tud mérni a rendszer.

Látható, hogy 3 kHz helyett 3,0303 kHz lett a mért frekvencia értéke. Természetesen a mintaszám növelésével javítani tudjuk az eredmény értékén, ami az alábbi ábrán látható.

Ekkor csökkent az oldalharmonikusok értéke, de egyértelműen megfigyelhető, hogy a frekvencia spektrum szempontjából nem jó a nagy mintavételi frekvencia. Így a mérő rendszerbe ezeket az eredményt is felhasználva módosítottam a mérési beállításokat.



4. ábra: A mért jelek.

3. ÖSSZEFOGLALÁS

A program működőképességének vizsgálata laboratóriumi körülmények között zajlott. Az első tesztelések során számos észrevétel fogalmazódott meg, így azok mentén kezdtem el a feltárt hibák korrigálását és a program fejlesztését. Az elkészült program első funkcionális tesztjei alapján elmondható, hogy egy, a célra alkalmas program került kidolgozásra.

4. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatómunka a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal támogatásával a 2020-1.1.2-PIACI-KFI-2020-00138 kódszámú, „Villamosenergia-felhasználást optimalizáló innovatív rendszer fejlesztése ipari-, lakossági fogyasztók és elektromos járművek számára.” című projekt keretében valósult meg.

5. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] SZABÓ, N.: *Méréstechnika elektronikus jegyzet*. Letölthető a www.electro.uni-miskolc.hu/~elkszabo honlapról.
- [2] ZOLTÁN, I.: *Méréstechnika*. Egyetemi tankönyv. Műegyetemi Kiadó. 1997.
- [3] National Instruments, LabView, <http://www.ni.com/labview/>
- [4] Data Acquisition Handbook, Measurement Computing Corporation, 2012. Third Edition. <http://www.mccdaq.com/pdfs/anpdf/Data-Acquisition-Handbook.pdf>
- [5] Friedl, G.: *LabVIEW segédlet*. p. 38. http://max-well.sze.hu/~friedl/Szab%C3%A1lyoz%C3%A1si_rendszerek/LabVIEW%20seg%C3%A9dlet.pdf (Megtekintés dátuma: 2023.05.03.)
- [6] MINGESZ, R., GINGL, Z.: *Mérés és adatgyűjtés laboratóriumi jegyzet*. SZTE. 2014. p. 109.

LI-ION AKKUMULÁTOR VILLAMOS PARAMÉTEREINEK HŐMÉRSÉKLETFÜGGÉSE

TEMPERATURE DEPENDENCE OF THE ELECTRICAL PARAMETERS OF A LI-ION CELL

SZASZÁK Norbert Tibor

Ph.D., egyetemi docens, norbert.szaszak@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet,
Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Intézeti Tanszék

Kivonat: Jelen tanulmányban egy 18650 típusú Li-ion akkumulátorcella laboratóriumi vizsgálatának eredményeit mutatjuk be. A vizsgálatok célja annak meghatározása volt, hogy az akkumulátor töltésének és kisütésének villamos paraméterei hogyan függenek annak hőmérsékletétől. Egy-egy mérés során a cella kezdeti hőmérsékletét egy temperáló-berendezéssel állítottuk be $0^{\circ}\text{C} \div 50^{\circ}\text{C}$ közötti hőfoktartományban. A töltési és a kisütési ciklusokat a gyártó által ajánlott karakterisztika szerint végeztük el. Az eredmények alapján megállapítottuk, hogy a vizsgált hőfoktartományon belül a cella-hőmérséklet jelentős hatással van mind a töltési, mind pedig a kisütési karakterisztikára, s ilyen módon a töltési és kisütési hatékonyságra is.

Kulcsszavak: Li-ion, akkumulátor, hatékonyság, hőfokfüggés.

Abstract: This paper presents the results of a laboratory experimental setup dedicated for measurement of a 18650 type Li-ion battery. The aim of the present research is to find the temperature dependence of the electrical parameters in both charging and discharging processes. During the experiments in each case the initial temperature of the battery was set a desired value in the range of $0^{\circ}\text{C} \div 50^{\circ}\text{C}$ by using a temperature-controlled unit. Both the charging and discharging processes were performed by the manufacturer's recommendations. Based on the results it was found that the cell temperature has significant effect on both the charging and discharging characteristics consequently, on the charging and discharging efficiency.

Keywords: Li-ion, battery, efficiency, temperature dependence.

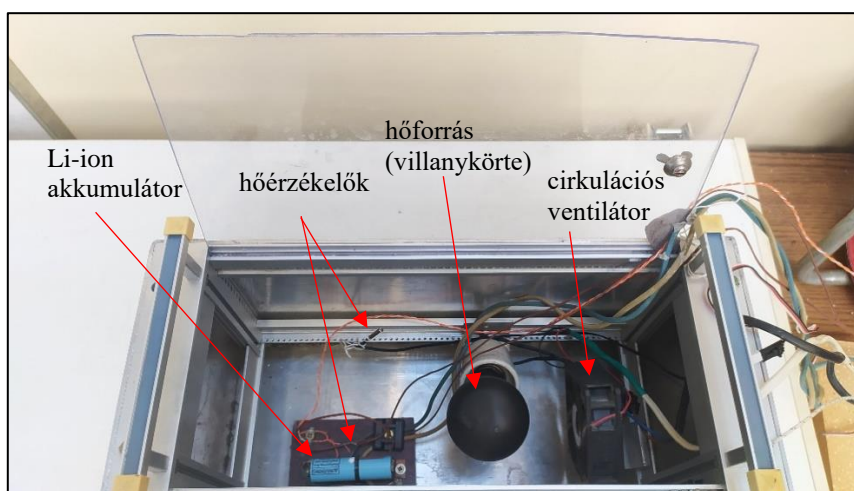
1. A KUTATÁS CÉLKITŰZÉSEI

Egy elektromotoros hajtású és akkumulátoros energiatárolású autóbusz fókuszú kutatóprojekten belül olyan laboratóriumi vizsgálatok elvégzése történt meg, amelyek segítségével meghatározhattuk bizonyos típusú lítium-akkumulátorcella töltési-kisütési hatékonyságát és egyéb villamos-paramétereit különböző környezeti hőmérsékletek mellett. E paraméterek hőfokfüggésének ismerete az akkumulátoros-elektromos személyszállítás esetében igen fontos, mivel a környezeti hőmérséklet változása okán jelentős energetikai kérdés a hőfokfüggő energiadisszipáció (hőfejlődés) jelensége, amely a töltési- kisütési hatásfok csökkenését vonja maga után. Ez a hatásfok a kisütéskor hasznosítható villamos energiának, továbbá a töltéséhez szükséges energiának az arányaként adódik. Így a töltési és kisütési cella-hőfok egyértelműen jelentős hatással lehet az akkumulátoros gépjárművek üzemeltetésének gazdasági aspektusaira [1].

E célból olyan laboratóriumi méréseket terveztünk majd végeztünk el, amelyekkel meghatározható volt a vizsgálat tárgyát képező 18650 típusú Li-ion akkumulátor optimális töltési és kisütési hőmérséklete, továbbá arra is választ kaptunk, hogy milyen mértékben változik (azaz romlik) a töltési/kisütési hatékonyság az optimálistól eltérő hőmérsékletek esetében [2]. Amennyiben a hatásfok erősen függ a környezet (azaz a cella) hőmérsékletétől, úgy megvizsgálendő, hogy milyen konstrukcióban érdemes az akkumulátor-pakkot egy cella-temperáló rendszerrel kiegészíteni, hiszen így jelentős hatásfok-növekedés érhető el, ami adott esetben gazdaságosabb üzemeltetést eredményez.

2. A VIZSGÁLATOKHOZ ALKALMAZOTT MÉRŐRENDSZER

A laboratóriumi mérésekhez egy olyan mérőrendszert állítottunk össze, amely segítségével a kívánt értékre lehetett beállítani a vizsgált cella kezdeti hőfokát. Ehhez egy digitális termosztáttal szerelt alumínium dobozt alkalmaztunk, amelyben többek között elhelyeztük magát a cellát és csatlakozóvezetékeit, hőmérő-szenzorokat, továbbá egy fűtő elemet (izzószálas villanykörte). Ezek mellett egy axiális ventilátort is beépítettünk a konvekciós hőátvitel fokozásához. Ezzel az elrendezéssel egy-egy mérés alatt a cella körül keringő levegő hőfokát a kívánt hőfokérték $\pm 1^\circ\text{C}$ tartományban tudtuk tartani. Mivel a fűtés segítségével csak a környezetitől magasabb hőmérsékletű méréseket lehetett volna kivitelezni, így az egész egységet egy laboratóriumi hűtőlábadában helyeztük el a vizsgálatok ideje alatt. Ilyen módon a fűtés kikapcsolását követően az egység levegőjének hőfoka a kívánt – a környezetitől alacsonyabb – hőfokra hűlhetett le mindaddig, amíg a termosztát vissza nem kapcsolta a fűtést. A kialakított temperáló-egység az 1. ábrán látható.



1. ábra: A temperáló-egység a benne elhelyezett akkumulátorral és segédberendezésekkel.

Az 1. ábrán látható, hogy a cellához több vezeték is csatlakozott. Ezek közül az egyik (barna) vezeték a K-típusú hőelemhez tartozott. Ez az akkumulátor felületének hőfokát mérte, amivel megfelelő termikus kontaktust hővezető paszta alkalmazásával alakítottunk ki. A cella töltéséhez/kisütéséhez a kék és a barna színű, nagyobb keresztmetszetű vezetékeket használtuk. Viszont mivel még így is esett egy kis feszültség a vezetéken, ezért külön mérővezetékeket kötöttünk a pozitív és a negatív pólusokra, amelyekről a feszültséget egy nagy impedanciájú feszültségmérő műszerbe vezettük. A kapocsfeszültséget és a cella-hőmérsékletet és a töltő/kisütő áramot is egy National Instruments gyártmányú USB-9162 típusú, USB-s csatlakozású adatgyűjtő egységgel digitalizáltuk, majd pedig egy adatgyűjtő programmal (LabView) mentettük ki a mért adatokat.

A töltéseket és a kisütéseket a gyártó által megadott paraméterek figyelembevételével végeztük el. Ezek alapján az előzetesen 2,5 V-os kapocsfeszültségig kisütött (teljesen lemerített) cellát úgy töltöttük, hogy a kisütés és töltés közötti minimum 20 perces relaxációs időt követően közel a teljes töltési idő alatt konstans, 1,5 A-es áramerősségű töltőáramot alkalmaztunk. Ezen a módon addig töltöttük a cellát, amíg a cella kapocsfeszültsége el nem érte a 4,2 V-ot. Ezt követően átváltottunk konstans, 4,2 V-os feszültségű töltésre. Innentől a cella töltőárama időben folyamatosan csökkent, s ez a folyamat addig tartott, amíg a töltőáram el nem érte az 50 mA-t. Ekkor a gyártó utasítása alapján a cella teljesen feltöltöttnek minősül. A töltés esetében az állandó áramú és az állandó feszültségű szakaszokat egy Voltcraft DPPS 32-20 típusú

laboratóriumi tápegységgel biztosítottuk.

A kisütést is állandó kisütőáram (3 A) mellett végeztük, ám ehhez egy külön kapcsolást kellett elkészítenünk, amely biztosítani tudta a csökkenő kapocsfeszültség mellett is a konstans kisütőáram-értéket. Erre a célra egy tranzistoros áramtükör kapcsolást építettünk fel. A kisütés minden esetben addig tartott, amíg a kapocsfeszültség le nem csökkent 2,5 V-ra.

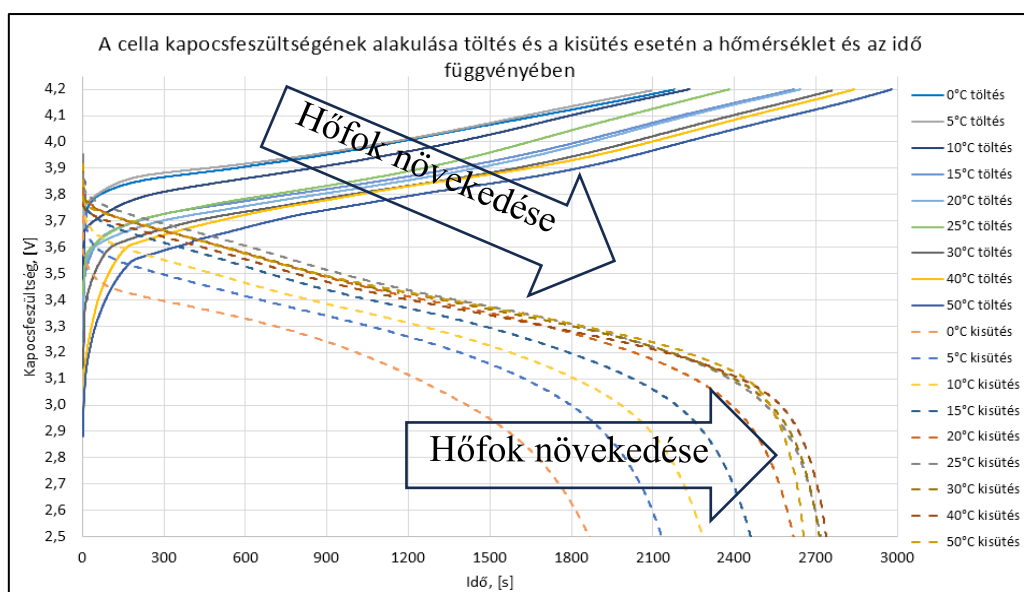
3. AZ ELVÉGZETT VIZSGÁLATOK, TOVÁBBÁ AZOK EREDMÉNYEI

A vizsgálatainkat 0°C÷50°C hőmérséklet-intervallumon végeztük el 5°C-os hőfoklépcsőkkel 30°C-ig, majd azt követte a 40°C és az 50°C-os mérés, így összesen 11 különböző hőfok mellett vizsgáltuk az akkumulátor töltési és kisütési karakterisztikáját. Ehhez az előzőekben ismertetett mérő és adatgyűjtő rendszert alkalmaztuk. A mérőrendszer 1 Hz-es mintavételi frekvenciával gyűjtötte a következő adatokat:

- a cella felületének hőmérséklete,
- a cella kapocsfeszültsége,
- a cellán átfolyó töltő- vagy kisütőáram értéke (közvetetten, feszültségesésből számítva).

A mért adatok alapján számos összefüggést állapítottunk meg, amelyeket a következőkben ismertetünk.

A cella kapocsfeszültségét mind a töltés, mind pedig a kisütés során mértük (2. ábra).

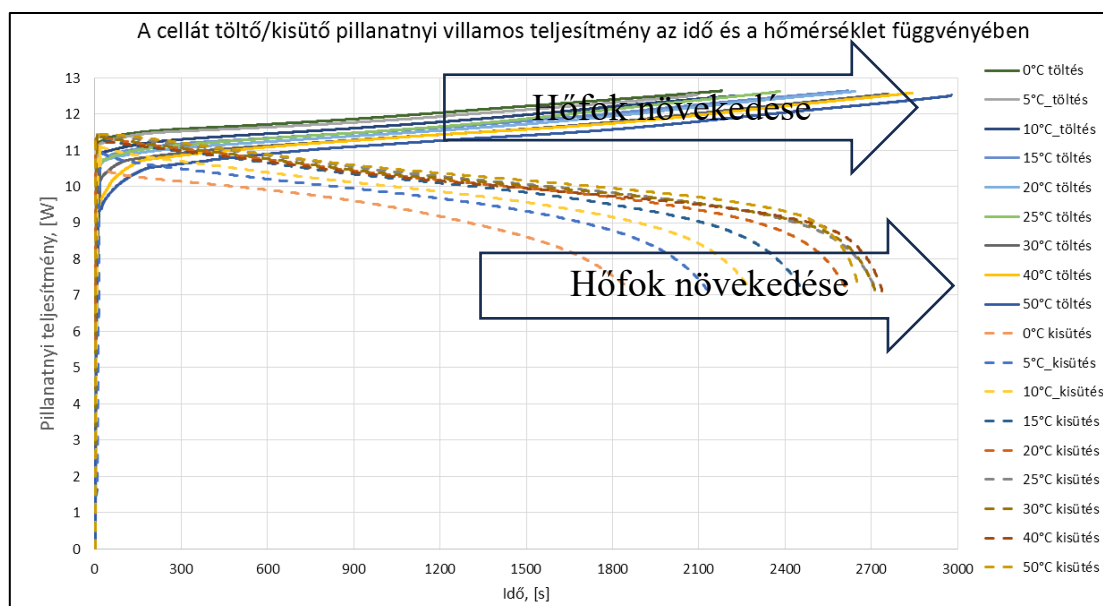


2. ábra: A kapocsfeszültség alakulása az idő és a hőmérséklet függvényében.

A diagram alapján látható, hogy a cella töltése közben egy kezdeti, időben gyorsan növekvő kapocsfeszültség-tartományt követően (ez kb. 1-2 perc) a növekedés jellege közel lineáris az összes vizsgált kezdeti hőfok esetén. Megfigyelhető, hogy a 4,2 V-os kapocsfeszültség eléréséig eltelt idő jellemzően annál nagyobb, minél magasabb a cella hőmérséklete (mindegyik esetben azonos töltőáram mellett). Ez a töltési idő különbség igen szignifikáns a szélső hőfokokat figyelembe véve: míg a legalacsonyabb hőfokok esetén kb. 35 perc (2100 s) alatt érhető el a 4,2 V-os érték, addig 50°C esetén már közel 50 perc szükséges ehhez. Ez közel 43%-os növekedést jelent, ami egyértelműen egy fontos műszaki kérdéssé teheti a helyes töltési hőfok megválasztását.

Amennyiben a cella kisütés-jelleggörbéit tekintjük, úgy az előzőtől eltérő jelleg látható: egy rövid, intenzíven csökkenő szakaszt követően lineárishoz közelítő kisütési szakasz következik, majd a teljesen kisütött állapot előtt hirtelen leesik a kapocsfeszültség értéke. Ez a letörési szakasz annál meredekebb (azaz annál rövidebb idő alatt következik be), minél magasabb a cella hőfoka. Viszont az is látható, hogy a letörési szakasz kezdeti időpontja a hőmérséklettel együtt magasabb értékeknél adódik. Ebből az következik, hogy adott kisütőáram mellett a magasabb hőfokú cellák hosszabb ideig képesek a konstans áramérték leadására. Ez szintén jelentős mértékű eltérést mutat: miközben 5°C esetén 32 perctől kevesebb idő alatt érhető el az alsó, 2,5 V-os feszültség, addig 50°C esetén ugyanehhez már 45 perc szükséges. Ez esetben is több, mint 40%-os növekedés adódik. Tehát itt is elmondható, hogy a kisütés időtartama a hőmérsékletnek igen erős függvénye.

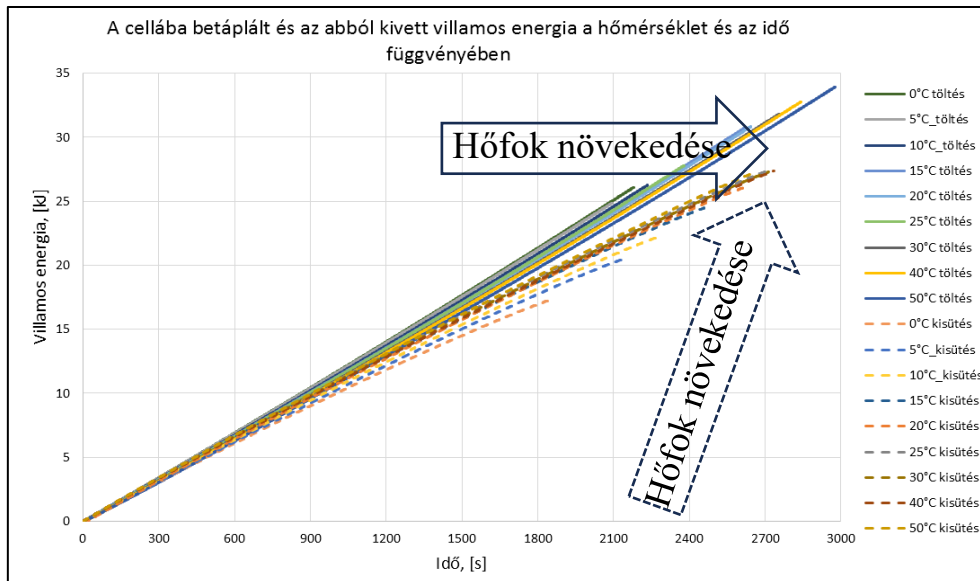
Amennyiben nem csupán az áramokat, hanem a pillanatnyi teljesítményeket vizsgáljuk, úgy a kapocsfeszültség és a töltő/kisütőáram szorzatát kell vennünk. Ez jellegre tehát hasonlóságot fog mutatni az előzőekben bemutatott görbékkel, azonban a teljesítmény energetikai szempontból már több információval szolgál. A pillanatnyi teljesítmények láthatók a 3. ábrán.



3. ábra: A pillanatnyi villamos teljesítmény alakulása az idő és a hőmérséklet függvényében.

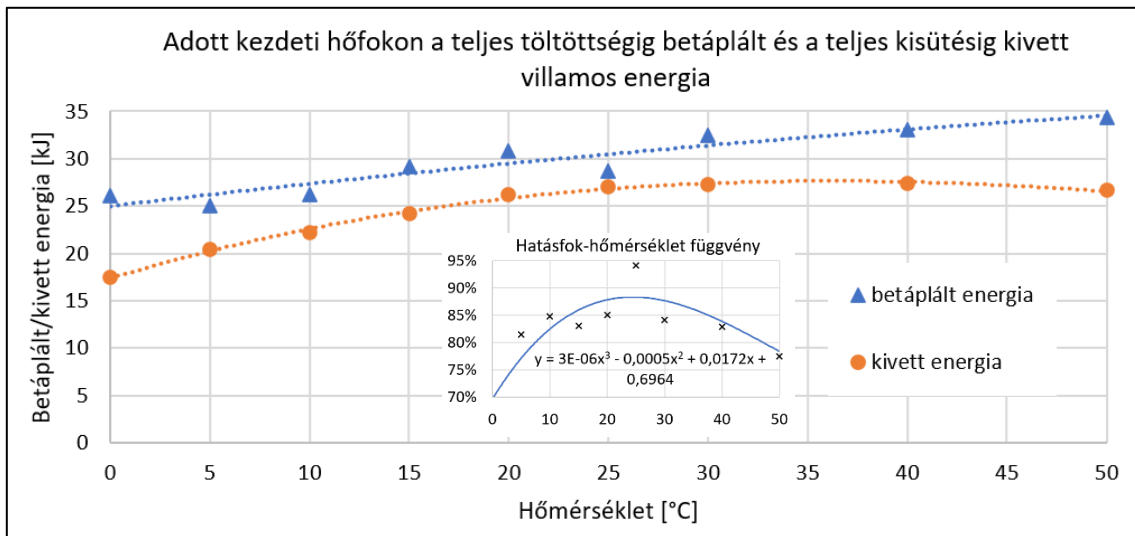
E diagramon a teljesítmény-skálát a zérus értéktől kezdve rajzoltuk fel, így arányosan látható, hogy milyen az eltérés mértéke adott hőfokon a töltési és kisütési teljesítmények között. Mivel töltés közben konstans áram mellett a kapocsfeszültség nőtt, ezért a töltő teljesítmény is monoton növekedett. Ennek maximális értéke közel 13 W értékű volt, továbbá megfigyelhető, hogy – adott töltési időpontnál – alacsonyabb hőfok esetén a teljesítményértékek rendre magasabbak. Viszont magasabb hőfokhoz hosszabb töltési idő is tartozott. A kisütés éppen fordított jellegű: a feszültség csökkenésével együtt csökkent a teljesítmény is, mégpedig hosszú szakaszon lineáris jelleggel. Fontos még, hogy magasabb hőfokok esetén a nagyobb pillanatnyi teljesítmények mellett a kisütés is hosszabb ideig tartott. Mivel az akkumulátorból kivett (és a betáplált) energia a pillanatnyi teljesítmény-idő függvénynek az idő szerinti integrálja, ebből következően lényegesen nagyobb kivett energia várható magasabb hőfokok esetén.

A 4. ábrán az akkumulátorba betáplált és az abból kivett energiákat szemléltettük. Az értékek úgy adódtak, hogy másodpercenként mintavételezett adatokból kalkulált pillanatnyi teljesítményértékekből kiszámítottuk az egy másodpercre eső energiaértéket ($E=P \cdot \Delta t$), s az így kapott értékeket összegeztük az adott időpillanatig.



4. ábra: A pillanatnyi villamos teljesítményből számolt betáplált és kivett villamos energia az idő és a hőmérséklet függvényében.

A töltés során betáplált energia (folytonos vonal) jelentősen függ a hőfoktól: magasabb hőfokokhoz rendre magasabb energiaértékek adódtak. A 0°C-hoz tartozó esetben a teljes töltésig betáplált energia 26 kJ körül alakult, míg 50°C esetén ez az érték már elérte a 38 kJ-t. A kisütésnél ez a tendencia hasonló volt: 0°C esetén a kivehető energia közel 17 kJ, miközben a legmagasabb hőfokok esetén 27 kJ körüli érték adódott. Ez a töltésnél betáplált energia esetén 46%-os növekedés, kisütésnél pedig közel 59%. Így tehát a cella hőfoka jelentős hatással van annak üzemére. Az 5. ábrán a betáplált és a kivett energiák, továbbá a hatásfok alakulása látható.



5. ábra: A betáplált és a kivett villamos energiák értékei, továbbá az ezekből kalkulált hatásfokgörbe és -értékek a kezdeti cellahőfok függvényében.

Az előző, 5. diagramon is megfigyelhető, hogy minden vizsgált hőfok esetén magasabb a betáplált energia mennyisége a kivettől (ugyanis 100%-os hatékonyság nem valósítható meg). Továbbá látható, hogy a betáplált és a kivett energia közötti különbség függ a hőfoktól: mind

alacsonyabb, mind pedig magasabb vizsgálati hőmérsékletek esetén nagyobb különbségek adódtak. Mivel a különbség minden esetben veszteség, ezért a hatásfok is ezzel együtt változik.

Mindezek ismeretében már számítható a cella töltési/kisütési hatékonysága (adott hőmérséklet esetén a kivethető energiamennyiségnek és a cellába betáplált energiának a hányadosa). Ezek az arányok az 5. ábra görbéinek pontjaihoz tartozó energiaértékekből számíthatók (1. táblázat), továbbá azokat grafikusán is jelöltük az 5. ábrába beillesztett hatásfok-hőmérséklet diagramon. Mivel ezek a származtatott, pontbeli értékek szórást mutattak, ezért meghatároztuk a hatásfok-függvényt is, amelyhez a töltéskor és kisütéskor kalkulált energiaértékekre illesztett polinomfüggvényeket használtuk fel. Ez a függvény az 5. ábrába illesztett belső diagramon látható.

1. táblázat: A vizsgált cellába betáplált és az abból kivett energiák, továbbá a cella töltési/kisütési hatásfoka a hőmérséklet függvényében.

Cella hőfoka	0°C	5°C	10°C	15°C	20°C	25°C	30°C	40°C	50°C
Töltési energia, kJ	26,1	25,0	26,3	29,2	30,8	28,7	32,4	33,1	34,4
Kisütési energia, kJ	17,4	20,4	22,2	24,2	26,2	27,1	27,3	27,4	26,6
Akkumulátor hatékonysága	66,8%	81,4%	84,8%	83,1%	85,0%	94,1%	84,1%	82,8%	77,4%

A táblázat és az 5. ábra belső diagramja szerint a legkisebb hatásfok 0°C-hoz tartozik, továbbá a legmagasabb hőfokhoz is a maximálistól kisebb érték társul. A maximális hatásfok-értéket, 94%-ot 25°C-os hőmérsékletnél mért adatokból számoltuk (az összes adatpontra illesztett hatásfok-görbe maximum-értéke alacsonyabb, 88%-os), ettől eltérő hőfokokon az akkumulátor kisebb hatásfokkal használható. Ez egyébként összhangban van a gyártó által megadott adatokkal, amelyek szerint a cella névleges kapacitása 23°C-hoz tartozik, e felett és ez alatt csökken a kapacitás értéke.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

E dolgozatban egy kutatóprojekthez kapcsolódó laboratóriumi vizsgálatok s azok eredményei kerültek bemutatásra. Az összeállított mérő-temperáló rendszerrel széles hőfoktartományban tudtunk vizsgálatokat végezni. Megállapítottuk, hogy a vizsgált Li-ion cella villamos paramétereinek hőmérsékletfüggése jelentős, annak töltési/kisütési hatékonysága is szoros kapcsolatban áll a hőmérséklettel. Az eredmények alapján a legmagasabb hatásfok elérése céljából mindenképp ajánlott a cellák hőfokát menedzselő temperáló-rendszert alkalmazni.

5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatómunka a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal támogatásával a 2020-1.1.2-PIACI-KFI-2020-00138 kódszámú, „Villamosenergia-felhasználást optimalizáló innovatív rendszer fejlesztése ipari-, lakossági fogyasztók és elektromos járművek számára.” című projekt keretében valósult meg.

6. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] RAIJMAKERS, L. H. J. et al: *A review on various temperature-indication methods for Li-ion batteries.* APPLIED ENERGY Vol. 240 pp. 918-945. 2019.
- [2] SAITO, Y., KANARI, K., Takano, K.: *Thermal studies of a lithium-ion battery.* JOURNAL OF POWER SOURCES Vol. 68 pp. 451-454. 1997.

LI-ION AKKUMULÁTOR VILLAMOS PARAMÉTEREINEK HŐMÉRSÉKLET-FÜGGÉSE – A MÉRŐRENDSZER ÖSSZEÁLLÍTÁSA

TEMPERATURE DEPENDENCE OF THE ELECTRICAL PARAMETERS OF A LI-ION CELL – THE MEASUREMENT SYSTEM

SZASZÁK Norbert Tibor¹, LENGYEL Ákos József²

¹Ph.D., egyetemi docens, norbert.szaszak@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet, Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Intézeti Tanszék

²Ph.D., egyetemi docens, akos.lengyel@uni-miskolc.hu
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Műszaki Mechanikai Intézet

Kivonat: Jelen tanulmányban egy 18650 típusú Li-ion akkumulátorcella laboratóriumi vizsgálatához kialakított mérőrendszer felépítését és a vizsgálatok menetét mutatjuk be. A vizsgálatok célja annak meghatározása volt, hogy az akkumulátor töltésének és kisütésének villamos paraméterei milyen módon függnek annak hőmérsékletétől. Ehhez egy temperáló berendezést is magában foglaló mérőrendszert állítottunk össze, amellyel 0°C ÷ 50°C közötti hőfoktartomány beállítása volt lehetséges. A töltési és a kisütési folyamatokat a gyártó által ajánlott metódus alapján végeztük el, s ilyen módon áramgenerátoros és feszültséggenerátoros üzemmódokat egyaránt alkalmaztunk. A kisütéshez szükséges állandó áramú terhelést egy áramtükör-kapcsolással valósítottuk meg.

Kulcsszavak: Li-ion, akkumulátor, hatékonyság, hőfokfüggés.

Abstract: This paper presents the details of a laboratory experimental setup dedicated for measurement of a 18650 type Li-ion battery. The aim of the present research is to find the temperature dependence of the electrical parameters in both charging and discharging processes. For this purpose, a temperature-controlled measurement system was built with which the initial temperature of the battery was possible to be set in the interval of 0°C ÷ 50°C. The charging and discharging processes were performed based on the manufacturer's recommendations: both constant-current and constant-voltage phases were applied. In case of discharge the constant-current mode was achieved by using a current-mirror circuit.

Keywords: Li-ion, battery, efficiency, temperature dependence.

1. A KUTATÁS CÉLKITŰZÉSEI

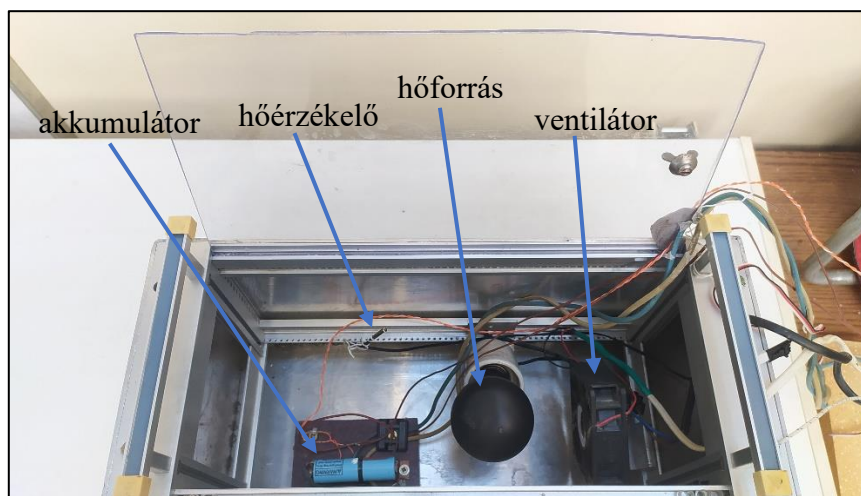
Egy kutatási projekt keretein belül olyan kísérleti módszerek kidolgozása, majd pedig olyan vizsgálatok elvégzése vált szükségessé, amelyek alapján meghatározható bizonyos típusú lítium-ion akkumulátorcella töltési és kisütési hatékonysága különböző környezeti hőmérsékletek mellett. Ennek fontossága az akkumulátoros-elektromos személyszállítás esetében nem lehet kérdés, hiszen a külső környezeti paraméterek folyamatos változása okán (elsődlegesen a hőfok, ami a magyarországi éghajlati viszonyok mellett igen széles tartományban változik az év folyamán) fontos energetikai kérdés az akkumulátorok töltési-kisütési hatékonysága, ami a kisütésekor hasznosítható villamos energiának, továbbá az akkumulátor töltéséhez szükséges energiának az aránya. Ez egyértelműen jelentős hatással lehet az akkumulátoros személyszállító gépjárművek üzemeltetésének gazdasági aspektusaira [1].

Ezen okból kifolyólag olyan laboratóriumi méréseket terveztünk meg, majd végeztünk el, amelyekkel meghatározható volt a vizsgált Li-ion akkumulátorcella optimális töltési és kisütési hőmérséklete, továbbá arra is választ kaptunk, hogy milyen mértékben változik (romlik) a töltési/kisütési hatékonyság az optimálistól eltérő hőmérsékletek esetében [2]. Amennyiben a hatásfok erősen függ a környezet (pontosabban véve a cella) hőmérsékletétől, úgy megvizsgál-

landó, hogy milyen konstrukcióban érdemes az akkumulátor-pakkot egy cella-temperáló rendszerrel kiegészíteni, hiszen így jelentős hatásfok-növekedés érhető el, ami adott esetben gazdaságosabb üzemeltetést eredményez. Mindezen vizsgálatokhoz tehát egy olyan mérőrendszer megtervezése és összeállítása vált szükségessé, amely segítségével az akkumulátor különböző hőfokokhoz tartozó elektromos karakterisztikái meghatározhatók.

2. A VIZSGÁLATOKHOZ ÖSSZEÁLLÍTOTT MÉRŐRENDSZER

A mérések elvégzéséhez minden esetben szükség volt az akkumulátor kívánt kezdeti hőfokra való beállítására. Ehhez egy digitális termosztátot használtunk, amely segítségével a vizsgált cella körül áramló levegő hőfokát a kívánt hőfokérték $\pm 1^\circ\text{C}$ tartományban tudtuk tartani a vizsgálatok ideje alatt. Így tehát egy kisméretű légtérrel kellett kialakítani (kb. $400 \times 160 \times 160$ mm), amelynek a hőfokszabályozását a termosztát elvégezhette. A kialakított temperáló-egység a benne elhelyezett egyéb rendszerelemekkel az 1. ábrán látható.



1. ábra: A temperáló-egység a villamos fűtéssel, a ventilátorral és az akkumulátorral.

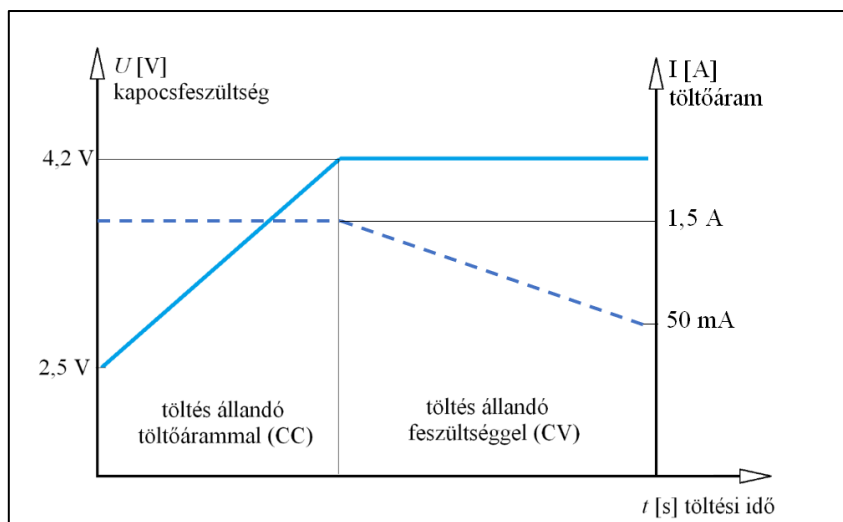
Az egység egy jó hővezetésű, alumíniumból készült ládába szerelt hőforrásból, ezen felül egy – az akkumulátorcella hőcseréjét növelő– axiális ventilátorból állt, továbbá a dobozban helyeztük el az akkumulátorcella befogó szerkezetét is. A hőforrás egy feketére festett, 60 W-os teljesítményű izzószálas villanykörte volt, amit a digitális termosztát relé-kimenete kapcsolgatott be és ki annak megfelelően, hogy a kívánt hőfokhoz képest mekkora volt a belső légtér hőmérséklete. Mivel a 60 W-os teljesítmény túl gyors melegedést eredményezett a temperáló-egység hűlésének sebességéhez képest, ezért az izzót egy toroid-transzformátorral tápláltuk meg a hálózattól alacsonyabb, 200 V-os feszültséggel. Ennek eredményeként az izzó teljesítménye $60 \cdot (200/230)^2 \approx 46$ W-ra csökkent. A belső légtér hőmérsékletének mérésére egy fémtokkal ellátott hőérzékelőt alkalmaztunk, ami az ábrán az akkumulátortól felfelé látható. Mivel a fűthető egységgel csupán a környezeti hőmérséklet feletti hőfokok állíthatók be, így a környezeti hőfoktól alacsonyabb mérések elvégzéséhez az egész egységet hűtött térbe volt szükséges helyezni. Erre a célra egy mélyhűtő ládat alkalmaztunk, amelyben a léghőmérséklet lehető legegyszerűbben tartása miatt előre lehűtött nagyértékű hőkapacitást helyeztünk el. Ezzel a megoldással tehát a hűtött tér hőfoka feletti bármilyen hőmérsékletet be lehetett állítani.

Miként az az 1. ábrán látható, a vizsgált cellához több különböző elektromos vezeték is csatlakozott. Ezek közül az egyik (barna) vezeték a hőelemhez tartozott. Ez a (K típusú) hőelem az akkumulátor felületének hőfokát mérte, amivel jó termikus kontaktust alakítottunk ki hővezető paszta alkalmazásával. Az akkumulátor töltéséhez és kisütéséhez a kék és a barna színű,

2,5 mm² keresztmetszetű vezetékeket használtuk, amelyeken vezető-keresztmetszetük miatt a lehetőleg minél kisebb feszültségesés elérése volt a cél. Viszont mivel a zéró feszültségesés még így sem volt kivitelezhető (azaz a tápegység által kijelzett feszültségtől kisebb kapocsfeszültség alakult ki a cellán), ezért külön mérővezetékeket kötöttünk a pozitív és a negatív pólusokra, amelyekről a feszültséget egy nagy impedanciájú feszültségmérő adatgyűjtő egységbe vezettük. Ezzel a megoldással pontosan tudtuk mérni a cella mindenkor kapocsfeszültségét. Mind a kapocsfeszültséget, mind pedig a cella-hőmérsékletet és a töltő/kisütő áramot egy National Instruments gyártmányú USB-9162 típusú, USB-s csatlakozású adatgyűjtő egységgel digitalizáltuk, majd pedig egy erre a vizsgálati sorozatra készített adatgyűjtő programmal (Lab-View) mentettük ki a mért adatokat.

Mivel ez az egység nem rendelkezett árammérő csatlakozóportokkal, így az árammérést feszültség mérésre vezettük vissza. Ehhez mind a kisütésnél, mind pedig a töltésnél pontosan meghatározott, konstans értékkel rendelkező huzalellenállásokat építettünk be soros kapcsolatban az áramkörbe. Az ezen az ellenálláson eső feszültség – Ohm törvénye értelmében – már arányos volt a rajta, s így az akkumulátoron is átfolyó áram értékével (mivel soros kapcsolatnál stacionárius esetben az áramkörben folyó áram értéke minden áramköri elemen azonos), így ezt a feszültséget már nagy pontossággal tudtuk mérni az NI egységgel. Ezek alapján tehát az aktuális töltő- vagy kisütőáram meghatározásához az $I=U/R$ összefüggést alkalmaztuk, amely összefüggésből az U , azaz az ellenálláson eső feszültség értékét mértük (ebben az esetben is az ellenállás két csatlakozási pontjáról vezettük a feszültséget a műszerbe a feszültségesés elkerülése végett). Az ellenállás (R) értékét pedig egy nagy pontosságú ellenállásmérő műszerrel határoztuk meg (típus: Keithley 2410 1100V SourceMeter). Az ellenállás értéke a rajta átfolyó áram Joule-hője ($P=I^2 \cdot R$) miatti hőmérsékletnövekedéssel együtt változhat, azonban ezt a hibát az ellenállások desztilláltvíz-hűtésével minimalizáltuk.

A töltési és a kisütési folyamatokat a gyártó által megadott paraméterek figyelembevételével végeztük el, mivel a vizsgált akkumulátor adatlapján definiálta a gyártó, hogy milyen módon történjen a „standard” töltés továbbá kisütés is. Ennek alapján úgy töltöttük a lemerült cellát, hogy az előzetesen 2,5 V-os kapocsfeszültségig kisütött cella töltésekor minimum 20 perces relaxációs időt követően, közel a teljes töltési idő alatt konstans, 1,5 A-es áramerősségű töltőáramot alkalmaztunk. Ez a folyamat addig tartott, amíg el nem érte a cella kapocsfeszültsége a 4,2 V-ot. Amint ez bekövetkezett, átváltottunk állandó, 4,2 V-os feszültségű töltésre. Ennek eredményeként a cella töltőárama időben folyamatosan csökkent. Ez a töltési részfolyamat addig tartott, amíg a töltőáram le nem esett 50 mA-re. Ekkor nyilvánítottuk teljesen feltöltöttnek a cellát, s ekkor azt lekapcsoltuk a töltőkészületről. Az akkumulátor töltésénél alkalmazott töltési metódus grafikusán a 2. ábrán tekinthető meg.



2. ábra: A Li-ion cella töltésének részfolyamatai (nem jelleghelyes szerkesztés).

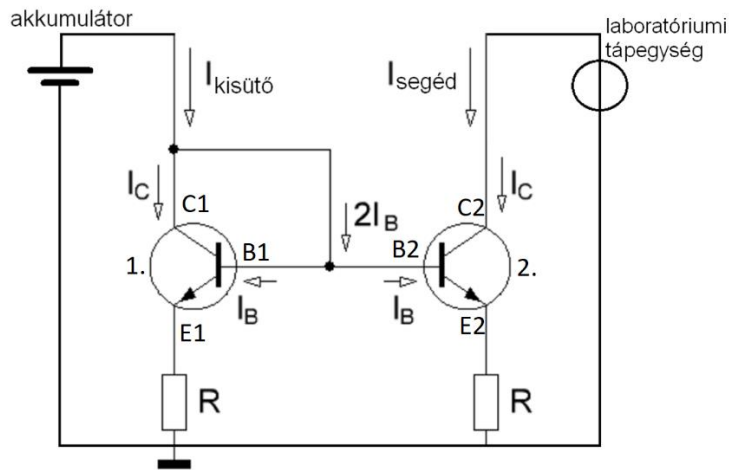
Az 1500 mA-es konstans töltőáram a standard töltési ciklusnál megadott 0,5 C értékből adódott, ahol C az akkumulátor névleges kapacitása. Mivel ennek értékét a gyártó 3200 mAh-ra adta meg, viszont a minimális értékét is ismertette, ami 3100 mAh, így a terhelőáramot egy valamelyest kisebb kapacitásértékre, konkrétan 3000 mAh-ra választottuk meg. Így adódott tehát a 0,5·3000, azaz az 1500 mA-es töltőáram-érték.

A feltöltött cellát a töltést követően legalább 15 percig pihentettük a kisütés megkezdése előtt. Ez az időérték 50%-kal nagyobb volt a gyártó által javasolt 10 perctől. Továbbá több mérés esetén ettől nagyobb időt hagytunk a kisütés megkezdéséig, mivel a cella hőmérsékletének be kellett állnia az aktuális vizsgálathoz szükséges hőfokra.

Az akkumulátor ilyen jellegű (két részből álló) töltési ciklusához logikailag két töltési üzemmódot volt szükséges alkalmaznunk. Az első töltési fázisban állandó áramérték mellett töltöttük az akkumulátort (ez az ún. CC töltés, azaz constant current), a második esetben pedig állandó feszültség mellett (CV-constant voltage) történt a töltés. Mindkét töltési mód beállítható volt a vizsgálatokhoz alkalmazott Voltcraft DPPS 32-20 típusú laboratóriumi tápegységgel.

Az akkumulátor töltése ezzel a készülékkel, ilyen töltési módok mellett megoldható volt. Viszont a kisütési ciklus is megkövetelte, hogy annak teljes időtartama alatt állandó értékű legyen a kisütőáram értéke. Ennek nagyságát éppen 3 A-es értékűre választottuk meg. A gyártó a sztenderd kisütést 0,2 C értékűre javasolja, viszont a maximális kisütőáramhoz 10 A-t adott meg, ami kicsivel több, mint 3 C -nek felel meg. Mi – figyelembe véve a későbbi, üzem közben várható nagyobb áramú terheléseket, – az előbbi két szélsőérték között választottuk a jó közéletéssel 1 C -nek megfelelő áramértéket.

A kisütés esetén azonban valamilyen módon biztosítani kellett az állandó áramerősséget, amit egy egyszerű rezisztív (ellenállás) terheléssel nem lehetett volna megvalósítani, mivel az azon átfolyó áram értéke arányos lenne a cella kapocsfeszültségével (az arányossági tényező az R ellenállásérték), így a kisütés miatt csökkenő akkumulátor-kapocsfeszültséggel együtt csökkent volna a kisütőáram értéke is. Ebből a célból ún. áramtükrös kapcsolást készítettünk, amely kapcsolás tranzistorokat alkalmaz a – jó közelítéssel – konstans áramerősség fenntartásához. Az általunk a cella kisütéséhez összeállított áramtükrös kapcsolás felépítése a 3. ábrán látható.



3. ábra: A Li-ion cella kisütéséhez alkalmazott áramtükrös kapcsolás áramköri rajza.

Az áramtükrös kapcsolás a működési elve alapján lehetségessé teszi azt, hogy a jobb oldali tranzisztor (lásd: 3. ábra) – általunk a laboratóriumi tápegység és az R teljesítményellenállás segítségével – beállított kollektoráramának ($I_{\text{segéd}}=I_C$) megfelelő áram folyjék a bal oldali tranzisztor kollektorán keresztül is. Az áramkör működése azon alapszik, hogy a két, azonos típusú tranzisztor elvileg tökéletesen megegyező karakterisztikájú, továbbá, hogy a bázisáramok (I_B) elhanyagolhatóan kicsik a kollektoráramokhoz (I_C) képest. A 2. számú tranzisztoron a bázisáram miatt bázis-emitter feszültségesés (U_{BE}) alakul ki, azonban mivel egy zárt hurkot alakítottunk ki a két tranzisztor bázisának és a kettő darab R ellenállás összekapcsolásával, ezért a hurokban lévő feszültségek előjelhelyes összege zérust kell, hogy adjon (Kirchoff hurok törvénye értelmében). Ebből – továbbá a tranzisztorok megegyező paramétereiből – következik, hogy a bal oldali R ellenálláson mérhető feszültségnek meg kell egyeznie a jobb oldali R ellenálláson eső feszültséggel. Ez az ellenállások egyezősége miatt viszont csak akkor lehetséges, ha a rajtuk folyó áram is megegyezik. Ebből adódik tehát, hogy a cellát kisütő $I_{\text{kisütő}}$ kollektoráram jó közelítéssel megegyezik a tápegység által létrehozott $I_{\text{segéd}}$ áram értékével. Mindezek eredményeként a bal oldalon mérhető cella-kapocsfeszültségtől függetlenül fog kialakulni az akkumulátor kisütőárama. Az áramérték természetesen csak addig maradhat konstans, amíg az akkumulátor kapocsfeszültsége le nem esik egy adott érték alá, azonban a kisütési ciklus esetén a gyártó utasítása alapján a kisütésnél a legalacsonyabb elérendő kapocsfeszültség (tehát a teljesen lemerített cellához tartozó érték) 2,5 V-os volt, ami a kívánt kisütőáramot még át tudta hajtani az áramkörön.

Mivel az áramtükrös kapcsolás esetén kiemelten fontos, hogy a két tranzisztor hőmérséklete ne változzon (az azonos paraméterek biztosítása miatt), ezért mindkettőt alumínium hűtőbordával láttuk el, továbbá az alumínium bordákat desztillált vízbe helyeztük a jobb hűtés és a közös hőfok elérése céljából.

Az előzőekben bemutatott rendszerekkel és megoldásokkal már elvégezhetők voltak a temperált töltési- és kisütési ciklusok, így a számítógépes adatgyűjtés segítségével számos adatot gyűjthettünk össze, amelyek kiértékelésével hasznos információkat nyerhettünk a cella töltésével és kisütésével kapcsolatban. A 4. ábrán a mérőszámítógépen futó adatgyűjtő program képernyőképe látható.



4. ábra: A vizsgálatokhoz készített mérő-adatgyűjtő LabView program.

A vizsgálatok alatt a képernyőn folyamatosan nyomon követhettük a megfigyelni kívánt paraméterek alakulását, továbbá a beépített jelzőfény (zöld/piros) és riasztás is segítséget adott ahhoz, hogy a töltési/kisütési határtértékek megközelítésekor beavatkozhassunk a ciklusba, s azt pontosan a kívánt értékek elérésekor állíthassuk le.

3. ÖSSZEFOGLALÁS

Jelen tanulmányban egy kutatóprojekthez kapcsolódó laboratóriumi vizsgálatok elvégzéséhez szükséges akkumulátorcella-temperáló egységet, s a vizsgálati metódusokat mutattunk be. Az elkészített temperáló-egység segítségével biztosítható volt a cella töltése és kisütése közben a kívánt léghőmérséklet a környezetitől alacsonyabb, s magasabb hőfokokon egyaránt. Továbbá a töltési és kisütési folyamatokhoz olyan megoldásokat és laboratóriumi gépeket alkalmaztunk, amelyek segítségével biztosítható volt a gyártó által ajánlott állandó áramú vagy állandó feszültségű mód. A számítógépes adatgyűjtéssel lementett adat-idősorok alapján számos, a későbbi üzem szempontjából fontos megállapítások tehetők, amelyeket egy következő tanulmányban kívánunk bemutatni.

4. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatómunka a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal támogatásával a 2020-1.1.2-PIACI-KFI-2020-00138 kódszámú, „Villamosenergia-felhasználást optimalizáló innovatív rendszer fejlesztése ipari-, lakossági fogyasztók és elektromos járművek számára.” című projekt keretében valósult meg.

5. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] RAIJMAKERS, L. H. J. et al: *A review on various temperature-indication methods for Li-ion batteries.* APPLIED ENERGY Vol. 240 pp. 918-945. 2019.
- [2] SAITO, Y., KANARI, K., Takano, K.: *Thermal studies of a lithium-ion battery.* JOURNAL OF POWER SOURCES Vol. 68 pp. 451-454. 1997.