

A GÉPIPARI TUDOMÁNYOS EGYESÜLET MŰSZAKI FOLYÓIRATA



GTE Jubileumi Küldöttközgyűlés, visszatekintve a GTE 75 éves múltjára

2025. május 23. GTE székház

A Jubileumi Küldöttközgyűlésen visszatekintünk a GTE 75 éves múltjára az Egyesület Czobor utcai székházában. A hivatalos részt követően ünnepélyes keretek között adjuk át az egyesületi díjakat, kitüntetések. A kitüntetettek kimagasló tudományos és egyesületi, valamint a szakosztályukban végzett munkájuk elismeréseként vehetnek át különböző díjakat, elismeréseket, pl. Bánki Donát és a Technika Fejlesztéséért Díjat. Szakmai lapokban megjelent cikkek vagy konferencián elhangzott előadásuk elismeréseként vehetnek át Műszaki Irodalmi Díjat a díjazottak. A küldöttközgyűlés eszmecserével és állófogadással zárul.



Hungexpo, Ipar Napjai és Automotive Hungary

2025. május 13-16.

Az autopro.hu és a Gépipari Tudományos Egyesület hagyományosan ebben az évben is megszervezi a TechTogether mérnök hallgatói versenyt az Ipar Napjai kiállításon, ahol a zsűrizést ismét a GTE vállalja.

Magyar Ipari Célgép Nagydíj

2025. június 19.

A hazai célgépgyártók versenye. A célgépekkel a gépipar és ipar rugalmas alkalmazkodását teszik lehetővé, ami különösen fontos krízisek idején. A Nagydíjon, hagyományosan a *Millenium Házában* bemutatkoznak a versenyzők és gazdag szakmai programot kínál a GTE immár 5. éve.



Gyártás Konferencia/Manufacturing 2025

2025. október 16-17.

A Gépipari Tudományos Egyesület Gyártási Rendszerek- és Operátor Szakosztálya a Pannon Egyetem Fenntarthatósági Kompetenciaközpontjával immár 26. alkalommal rendezi meg a Gyártás Konferenciát. A rendezvény nem csak szakmai kapcsolatépítésre, hanem az ipari trendek és új technológiák megismerésére is kiváló alkalmat biztosít.

55. Autóbusz Szakértői Tanácskozás

2025. október 29.

Az autóbuszoknak és trolibuszoknak a közösségi közlekedés szervezésében elfoglalt fontos szerepén túl a fejlesztéssel, az üzemeltetési és a karbantartási tapasztalatokkal foglalkozik, beleértve az új technológiák – elektromos hajtás, a vezetőt támogató rendszerek – bevezetését. E-buszok, hidrogénhajtás és a jövő technológiái. Idén 55. alkalommal kerül megrendezésre.



Nemzetközi Vasúti Jármű Forgóváz és Futómű Konferencia (BOGIE'25)

2025. november 10-12.

Kétévente kerül megrendezésre a GTE és a BME Vasúti Járművek és Járműrendszeranalízis Tanszék közös szervezésében.

41. Géptervezők és Termékfejlesztők Szemináriuma

2025. november 13-14.

A 41. szeminárium idén is a felsőoktatási intézményekben és az iparban folytatott kutató és fejlesztő munkára, annak hasznosítására, valamint az oktatás kérdéseire fókuszál. A pályájuk elején álló fiatal kutatók eredményeinek ismertetésére külön szekciót biztosítanak a szervezők.



45. Balatoni Ankét

2025. november 27-29.

A nyomástartó rendszerek gyártása, javítása, karbantartása, vizsgálata területén. Az ipar-politikai tájékoztatás és az aktuális kérdések mellett elsődleges az alapkutatási eredmények minél gyorsabb hasznosítása a gyakorlatban. Kiemelt témánk a hidrogén tárolása. Idén 45. alkalommal rendezi meg a GTE.

X. Gépészeti Szakmakultúra

2025. ősz

A gépészeti termékfejlesztés eszköztárával foglalkozik a stratégiai döntéstől a gyártásig, beleértve az új technikai megoldásokat, pl. a mesterséges intelligencia, az additív gyártás hasznosítását. A módszertani kérdések mellett az előadások többsége megvalósított projekteket mutat be, idén 10. éve.



GÉP

A GÉPIPARI TUDOMÁNYOS EGYESÜLET műszaki, vállalkozási, befektetési,
értékesítési, kutatás-fejlesztési, piaci információs folyóirata

Elnök:

Vadászné

Dr. Bognár Gabriella

Főszerkesztő:

Dr. Dömötör Csaba

Főszerkesztő-helyettes:

Vesza József

Szerkesztőbizottság:

Dr. Ábrahám György

Dr. Barkóczy István

Dr. Borbás Lajos

Dr. Czifra Árpád

Dr. Danyi József

Dr. Fekete Gusztáv

Dr. Horák Péter

Dr. Horváth Sándor

Dr. Illés Béla

Dr. Jánosi Endre

Dr. Jármay Károly

Dr. Kakuk József

Dr. Kalácska Gábor

Dr. Lelkes Márk

Dr. Kanócz János

Dr. Könözy László

Dr. Mankovits Tamás

Dr. Máté Márton

Dr. Orbán Ferenc

Dr. Patkó Gyula

Dr. Piros Attila

Dr. Soltész László

Dr. Szabó István

Dr. Szávai Szabolcs

Dr. Száva János

Dr. Szigeti Ferenc

Dr. Tímár Imre

Dr. Weltsch Zoltán

TISZTELT OLVASÓ!

A Gépipari Tudományos Egyesület által gondozott GÉP folyóirat a tudományos folyóirat-kiadás irányelveinek megfelelő szemlélettel, nyomtatott kötetekkel és online felületen működik. A GÉP évente több alkalommal megjelenő tudományos folyóirat, amely eredeti tudományos közleményeket, kutatási eredményeket, technikátörténeti összefoglalókat, konferenciákról szóló ismertetéseket és különszámként teljes konferenciaanyagokat közöl a gépészettel kapcsolatos alap- és alkalmazott tudomány területeiről.

A folyóirat elsődleges nyelve a magyar, de magyar és angol nyelven is közöl tudományos cikkeket. Az utóbbi évtizedekben töredékére zuhant a magyar nyelven kiadott szakfolyóiratok száma. Célunk a magyar műszaki nyelv ápolása és magyar anyanyelvűek esetén a tudomány magyar nyelven történő műveléséhez szakcikkek közételti lehetőségének biztosítása. Kötelességünknek tartjuk, hogy a GÉP szolgálja a gépészeti tudomány magyar nyelven történő művelését, magyar szaknyelvének állandó fejlesztését és a magyar szaknyelv fejlődését.

A szerkesztőbizottság továbbra is fórumot biztosít a gépészeti tudományok területén született kutatási és fejlesztési eredményeknek.

Vadászné Dr. Bognár Gabriella

a szerkesztőbizottság elnöke

A szerkesztésért felelős: Dr. Dömötör Csaba • A szerkesztőség címe: 3515 Miskolc, Egyetemváros

Telefon: +36-46/565-111 (12-90) • e-mail: mail@gepujsag.hu

Kiadja a Gépipari Tudományos Egyesület, 1147 Budapest, Czobor u. 68., Levélcím: 1371 Bp. Pf.: 433.

Telefon: +36-1/202-0656, fax: +36-1/202-0252, e-mail: mail@gteportal.eu, internet: www.gteportal.eu

A GÉP folyóirat internetcím: <http://www.gepujsag.hu> • Kereskedelmi és Hitelbank: 10200830-32310236-00000000

Felelős kiadó: Dr. Bárdos Krisztina ügyvezető igazgató.

Gazdász Nyomda Kft. 3534 Miskolc, Szervezet u. 67. Telefon: +36-30/9-450-270 • e-mail: mail@gepujsag.hu

Előfizetésben terjeszti a Magyar Posta Zrt. • Postacím: 1900 Budapest

Előfizetésben megrendelhető az ország bármely postáján, a hírlapot kézbesítőknél, www.posta.hu WEBSHOP-ban

<https://www.posta.hu/ugyfelszolgalat/webform/hirlap>, e-mailen a hirlapelofizetes@posta.hu címen, telefonon +36-1-767-8262 számon, levélben a MP Zrt. 1900 Budapest címen. Külföldön terjeszti a Batthyány Kultur-Press Kft., H-1013 Budapest, Attila út 2/A/III/14.

T: +36 1 201 88 91, +36 1 212 53 03, E-mail: batthyany@kultur-press.hu

Egy szám ára: 1260 Ft. Dupla szám ára: 2520 Ft.

INDEX: 25 343 • ISSN 0016-8572 (Nyomtatott) • ISSN 3057-9473 (Online)

A megjelent cikkek lektoráltak.

A kiadvány a Nemzeti Kulturális Alap támogatásával jelenik meg.

TARTALOM

1. Apáti Sándor, Dr. Hegedűs György:

VÁGÓERŐ MODELLEZÉSE

FŰRÉSZELESNÉL – RÖVID

ÁTTEKINTÉS 5

6. Kalmár Krisztián:

FÉMREŐL MŰANYAGRA ÁTTERVEZÉS -

AZ ADATBÁZIS ALAPÚ MEGKÖZELÍTÉS

MEGVALÓSÍTÁSÁNAK HÁTTERE 27

2. Apáti Sándor, Dr. Hegedűs György:

LINEÁRIS VÁGÓERŐ

MODELL ALKALMAZÁSA

SZŰRŐFŰRÉSZEKNÉL 9

7. Lévai Bálint, Kapitány Pálma:

DEMONSTRÁCIÓS CÉLÚ

ELEKTROPNEUMATIKUS

BERENDEZÉS FEJLESZTÉSE 33

3. Dr. Bihari Zoltán:

EGY TELEFONTÖLTŐ ÉLETCIKLUSA

– AVAGY ÉLET AZ ÉLET UTÁN

(ESETTANULMÁNY) 13

8. Siktár Bálint, Dr. Hegedűs György, Dr. Kakuk

József:

SÖVÉNYVÁGÓ BLDC MOTORJÁNAK

DINAMIKAI MODELLJE 37

4. Borsodi Eszter, Winnie Atieno Onyango,

Dr. Takács Ágnes:

FENNTARTHATÓ DRÓNGYÁRTÁS:

A GENERATÍV TERVEZÉS, AZ ADDITÍV

GYÁRTÁS ÉS A KÖRFORGÁSOS

GAZDASÁG INTEGRÁCIÓJA 17

9. Kovács Attila:

WINDBOX - ÚJ PIACKÉPES

TERMÉK KIFEJLESZTÉSE

A MAGYAR FÉMIPARI KFT-NÉL 41

5. Dr. Dömötör Csaba:

PET PALACKOK ERGONÓMIÁJA23

VÁGÓERŐ MODELLEZÉSE FŰRÉSZELESNÉL – RÖVID ÁTTEKINTÉS

CUTTING FORCE MODELING IN SAWING – A BRIEF OVERVIEW

Apáti Sándor*, Dr. Hegedűs György**

ABSTRACT

Accurate prediction of cutting forces in sawing is essential to optimize the machining process efficiency, tool longevity and cut quality. The work extensively reviews numerous cutting-force modeling techniques, such as empirical, mechanistic, numerical, and machine-learning models. Special attention is paid to the effects of tools used in woodworking and raw material properties. The studies also suggest a linear model that allows reliable prediction of forces encountered in jigsaw cutting under different energetic conditions. The results improve the accuracy of the process of understanding sawing and enhance the effectiveness of tool use.

1. BEVEZETÉS

Az áttekintés célja, hogy átfogó képet nyújtson a fűrészelés során fellépő vágóerők modellezésének fejlődéséről, különös tekintettel a fafeldolgozási folyamatokra. A cikk ismerteti a különböző modellezési megközelítéseket – beleértve az empirikus, analitikus, numerikus és gépi tanuláson alapuló módszereket –, azok előnyeit és alkalmazhatóságát különféle anyagok, szerszámok és vágási feltételek esetén. Korábbi eredmények hangsúlyozzák, hogy a vágóerő modellezése során figyelembe kell venni a nyersanyag sűrűségét, nedvességtartalmát, szemcseorientációját, valamint a szerszám geometriáját és anyagát. A modern módszerek – például a gépi tanulás és a számítógépes szimulációk – lehetővé teszik a folyamatok finomhangolását és az energiafelhasználás csökkentését, miközben javítják a megmunkálási pontosságot.

Curti és társai kidolgoztak a perifériás maráshoz egy általánosított vágóerőmodellt, amely a folyamat kiszámíthatóságának javítása érdekében olyan tényezőket integrál, mint a sűrűség, a forgács keresztmetszete, a szemcseorientáció és a szerszám spirálszöge [1]. A körfűrész vágóeleinek tervezett mikrogeometriáit elemezték az SPF lapok felületi minőségére gyakorolt hatásuk szempontjából, ami a teljesítmény optimalizálásához vezetett [2]. A minimális mennyiségű kenés szerszámhőmérsékletre és kopásra gyakorolt hatása a fa megmunkálásában a szerszám élettartamának és hatékonyságának javulását eredményezi [3]. A körfűrészlapok életciklus-értékelése (LCA) vizsgálta a gyártás környezeti hatását és fenntartását [4]. Számítógépes tomográfiát használtak a

vágási erők és a szerkezeti tulajdonságok elemzésére erdeifenyő esetében, javítva a pontosságot a famegmunkálásban [5]. Gépi tanulási technikákat alkalmaztak a termikusan módosított fa marási teljesítményének előrejelzésére, optimalizálva a folyamat paramétereit a hatékonyság és a minőség javítása érdekében [6]. A fűrészelés során fellépő vágóerők modellezése több irányból is megközelíthető. A mechanikai tulajdonságokon alapuló prediktív vágóerőmodelleket javasoltak a fa megmunkálásához, fokozva a folyamat optimalizálását és a szerszám teljesítményét [7]. Fém megmunkálására vonatkozó vágóerő-előrejelző modelleket tekintettek át, összehasonlítva a becslési pontosság javítását célzó megközelítéseket [8]. Fém szalagfűrészelésre vonatkozó dinamikus modellek betekintést nyújtottak a vágási paraméterek optimalizálásába a hatékonyság javítása érdekében [9]. Mikroszerkezet-alapú mechanisztikus modelleket fejlesztettek ki csontfűrészeléshez a vágóerők előrejelzésére, és kiterjesztették az akusztikus energiaarányok elemzésére, javítva a folyamat megértését és a szerszám teljesítményét [10, 11]. Numerikus modellezést alkalmaztak a vágóél sugarának a forgácsolás során a vágóerőre és a feszültségkoncentrációra gyakorolt hatásának elemzésére, a szerszám teljesítményének és az anyageltávolítás hatékonyságának optimalizálására [12]. Fűrészkerő-előrejelző modellt vezettek be gránitvágáshoz, optimalizálva a megmunkálási pontosságot és hatékonyságot a maximális deformálatlan forgácseloszlás alapján [13]. Egy többfokú fűrészkerő-előrejelző modellt alkalmaztak rozsdamentes acél fűrészelési hatékonyságának és paraméterválasztásának optimalizálására [14]. A Johnson-Cook modellt közepes sűrűségű farostlemez (MDF) körfűrészelésének szimulációjára, a vágási teljesítmény finomítására és az anyag viselkedésének elemzésére használták [15]. Kifejlesztettek egy mechanikai modellt az ívelt felületek gyémántdrótos fűrészeléséhez, ami javítja a vágási pontosságot és a szerszám élettartamát, és előnyös a repülőgépipar és a félvezető precíziós megmunkálás számára [16]. A fűrészelést a fa törési szívósságának, nyírási folyáshatárának [17], valamint a fa módosításának a vágási erőre és ellenállásra gyakorolt hatásának felmérésére használták körfűrészelésnél [18]. A megmunkálási pontosság és a szerszámtervezés javítása érdekében a fogprofil paraméterein alapuló modelleket javasoltak az egyfokú fűrészelési erő előrejelzésére [19]. Dinamikus vágóerőmodelleket állítottak fel fém

* PhD hallgató, Miskolci Egyetem, Szerszámgépek Intézeti Tanszéke

** egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Szerszámgépek Intézeti Tanszéke

szalagfűrészeléshez a folyamat előre jelezhetőségének javítása érdekében [20]. Numerikus szimulációkat integráltak anyagellenállási modellekkel a szerszámgeometria és az energiafelhasználás optimalizálása érdekében [21]. A FRAC_MOD modell a törésmechanika és a plaszticitás elveit integrálta a vágási erő előrejelzésének javítása érdekében körfűrészekenél [22]. Az ABAQUS-t használó termikus-mechanikai csatolási modellt fejlesztettek ki a vágóerő-szimulációk optimalizálására, amelyet kísérleti mérésekkel validáltak [23]. Matematikai modelleket javasoltak a vágóerőkre rideg anyagok rögzített koptatós trepánfűrésznél [24]. A vágóerőmodelleket virtuális megmunkálási szimulációkba implementálták a folyamat hatékonyságának növelése érdekében [25]. Különböző modelleket finomítottak a vágóerő-előrejelzések javítása érdekében, beleértve a gránitfűrészelésnél történő anyageltávolítást és a gyémántszemcsék jellemzőinek integrálását figyelembe vevő megközelítéseket [26, 27].

A számítógépes fejlődés olyan hibrid modelleket vezetett be, amelyek kombinálják az empirikus és a gépi tanuláson alapuló előrejelzéseket. Az érzékelők fűzőját és a gépi tanulást alkalmazták a fa tulajdonságainak előrejelzésére a marás során, nagy pontosságot elérve a sűrűség és a felületi érdesség tekintetében [28]. A vágandó nyersanyagok, az alkalmazott szerszámanyagok és a folyamatparaméterek befolyásolják az eredményeket. Ezeknek a paramétereknek és az eredményekre gyakorolt hatásuknak az ismerete fontos a vágóerők pontos, valósághű modellezéséhez. A fafűrészelésnél a vágóerőkről kimutatták, hogy függnek a penge anyagától, a vágási sebességtől, a nedvességtartalomtól és a szemcseorientációtól; a vizsgálatok a vágási erőt és a felületi minőséget elemezték fenyő esetében változó nedvességtartalom mellett [29]. Norvég lucfenyő keresztfűrészélése szinterezett keményfém (SC) és nagysebességű acél (HSS) pengékkel eltéréseket mutatott ki az elméleti és a tényleges erők között, a HSS pengénél a feszültségértékek következetesebbek voltak [30]. A többfázisú szál- és részeskeverésű polimer kompozitok vágási erőit kísérleti és elméleti megközelítéssel vizsgálták [31]. Kimutatták, hogy a II. zóna erői fűrészeléskor jelentősen hozzájárulnak a teljes vágóerőhöz, különösen száraz fa esetén [32]. Fagyott lucfenyőfán vizsgálták a vágási erőket, és kimutatták, hogy alacsonyabb hőmérsékleten, különösen nedves fa esetén megnövekedett erők lépnek fel [33]. A különböző fafajok vágóerő-tendenciái rávilágítottak az anizotróp tulajdonságok vágási hatékonyságra gyakorolt hatására [34]. Kiemelték az oldalirányú erők hatását a méretpontosságra keskeny széleken történő fűrészelésnél, hangsúlyozva, hogy ezeket az erőket figyelembe kell venni a vágási modellekben [35]. Drótfűrészelésre dinamikus modellt fejlesztettek ki, amely a vágóerők és a folyamatparaméterek elemzésével optimalizálja a pontosságot és a stabilitást, és előnyös a félvezetők és a rideg anyagok megmunkálására [36].

A dinamikus vágóerők előrejelző modelljei és a rezgéseket használó intelligens felügyeleti rendszerek javították a hibák felismerését és a folyamat optimalizálását [37]. A vágóerő mérésére szolgáló gépvázak

szerkezeti elemzése javította a pontosságot és a stabilitást [38]. A fogászati dugattyús fűrészekkel és hangalapú felügyeleti eszközökkel kapcsolatos tanulmányok optimalizálták a vágási teljesítményt és a folyamatszabályozást [39, 40]. A fűrészlap rezonanciájának dinamikus szabályozása stabilizálta a vágást, míg az ismétlődéselemzés javította a hibák felismerését a GFRP kompozit marásnál [41, 42]. A fémforgácsolásból származó szerszámmállapot-felügyeleti stratégiákat a faalapú anyagok megmunkálására adaptálták, növelve a hatékonyságot és a szerszám élettartamát [43]. A korábbi tanulmányok alapján látható, hogy a fűrészelési folyamatokat és a keletkező vágóerők vizsgálatát elsősorban körfűrészeken, szalagfűrészeken és drótfűrészeken vizsgálták. A kéziszerszámok és az itt elemzett fűrészelési folyamatok mélyreható vizsgálata hiányzott a korábbi tanulmányokból.

2. SUMMARY

This review aims to provide a comprehensive overview of the development of cutting force modeling in sawing, focusing on woodworking processes. The article describes different modeling approaches, including empirical, analytical, numerical, and machine learning-based methods, their advantages, and applicability to different materials, tools, and cutting conditions. Previous results emphasize that cutting force modeling should consider the density, moisture content, grain orientation, tool geometry, and material. Modern methods like machine learning and computer simulations allow for fine-tuning processes and reducing energy consumption while improving machining accuracy. The article points out that many studies have focused on circular, band, and wire saws, but a detailed study of jigsaws has been lacking in the literature.

3. IRODALOM

- [1] R. Curti, B. Marcon, L. Denaud, M. Togni, R. Furfieri, G. Goli, Generalized cutting force model for peripheral milling of wood, based on the effect of density, uncut chip cross section, grain orientation and tool helix angle, *European Journal of Wood and Wood Products* 79 (3) (2021) 667–678. <https://doi.org/10.1007/S00107-021-01667-5>.
- [2] M. Torkghashghaei, W. Shaffer, R. Georges, B. Ugolino, R. E. Hernández, C. Blais, Effect of variable engineered micro-geometry of the cutting edges of circular saws on the surface quality of SPF boards, *European Journal of Wood and Wood Products* 81 (5) (2023) 1261–1276. <https://doi.org/10.1007/s00107-023-01961-4>.
- [3] A. Jaquemod, K. Güzel, H.-C. Möhring, Influence of Minimum Quantity Lubrication on Tool Temperature and Wear in Wood Machining, Springer Nature Switzerland, 2023, Ch. Environmentally Neutral Production, p. 717–726. https://doi.org/10.1007/978-3-031-47394-4_70.

- [4] F. Schreiner, M. Beller, J. Pohle, B. Thorenz, F. Döpper, Life Cycle Assessment (LCA) of a Circular Saw Blade for Wood Processing, Springer Nature Switzerland, 2025, Ch. Life Cycle Thinking, p. 155–164.
https://doi.org/10.1007/978-3-031-77429-4_18.
- [5] Y. Huang, D. Chuchala, D. Buck, K. A. Orłowski, M. Fredriksson, M. Svensson, Analysis of the relationship between cutting forces and local structural properties of scots pine wood aided by computed tomography, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 135 (9–10) (2024) 4975–4987.
<https://doi.org/10.1007/s00170-024-14797-w>.
- [6] W. Huang, H. Chen, Q. Jin, J. Shi, X. Guo, B. Na, Prediction of milling performance of thermally modified wood based on machine learning, *European Journal of Wood and Wood Products* 83 (2) (2025).
<https://doi.org/10.1007/s00107-025-02224-0>.
- [7] A. Naylor, P. Hackney, N. Perera, E. Clahr, A predictive model for the cutting force in wood machining developed using mechanical properties, *Bio-resources* 7 (3) (2012) 2883–2894.
<https://doi.org/10.15376/BIORES.7.3.2883-2894>.
- [8] Z. Han, H. Jin, H. Fu, Cutting force prediction models of metal machining processes: A review, in: 2015 International Conference on Estimation, Detection and Information Fusion (ICEDIF), 2015, pp. 323–328.
<https://doi.org/10.1109/ICEDIF.2015.7280216>.
- [9] J. Ni, L. Li, M. S. H. Al-Furjan, J. Xu, X. Yang, Establishment and verification of a dynamic cutting force model for metal bandsawing, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 90 (9) (2017) 2703–2712.
<https://doi.org/10.1007/S00170-016-9568-2>.
- [10] M. Conward, J. Samuel, A microstructure-based mechanistic model for bone sawing: Part 1—cutting force predictions, *Journal of Manufacturing Science and Engineering-transactions of The Asme* 143 (12) (2021) 1–19.
<https://doi.org/10.1115/1.4051236>.
- [11] R. Mishra, M. Conward, J. Samuel, A microstructure-based mechanistic model for bone sawing: Part 2—acoustic energy rate predictions, *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 143 (12) (2021) 121010.
<https://doi.org/10.1115/1.4051237>.
- [12] P. Li, Z. Chang, Numerical modeling of the effect of cutting-edge radius on cutting force and stress concentration during machining, *Micromachines* 13 (2022) 211. <https://doi.org/10.3390/mi13020211>.
- [13] J. Kang, J. Zhang, Z. Duan, H. Zhang, Modeling for prediction of sawing force based on the maximum undeformed chip distribution in the granite sawing, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 124 (1–2) (2022) 111–126.
<https://doi.org/10.1007/s00170-022-10479-7>.
- [14] P. Ni, Y. Wang (CA), D. Tan, Y. Zhang, Z. Chen, Z. Wang, C. Yi, L. Shao, Y. Lu, Research on optimization method of stainless steel sawing process parameters based on multi-tooth sawing force prediction model, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 128 (9) (2023) 4513–4533.
<https://doi.org/10.1007/s00170-023-12051-3>.
- [15] M. Yu, B. Wang, P. Ji, B. Li, L. Zhang, Q. Zhang, Simulation analysis of the circular sawing process of medium density fiberboard (MDF) based on the johnson–cook model, *European Journal of Wood and Wood Products* 82 (2) (2023) 447–459.
<https://doi.org/10.1007/s00107-023-02007-5>.
- [16] Z. Xu, X. Chen, Z. Lai, H. Huang, Mechanical model of diamond wire sawing for curved surfaces, *International Journal of Mechanical Sciences* (2024).
<https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2024.109379>.
- [17] L. Hlášková, K. Orłowski, Z. Kopecký, M. Jedinák, Sawing processes as a way of determining fracture toughness and shear yield stresses of wood, *Bio-resources* 10 (3) (2015) 5381–5394.
<https://doi.org/10.15376/BIORES.10.3.5381-5394>.
- [18] L. Hlášková, Z. Kopecký, V. Novák, Influence of wood modification on cutting force, specific cutting resistance and fracture parameters during the sawing process using circular sawing machine, *European Journal of Wood and Wood Products* 78 (6) (2020) 1173–1182.
<https://doi.org/10.1007/S00107-020-01581-2>.
- [19] Y. Luo, Y. Ren, Y. Ren, Z. Zhou, X. Huang, T. Song, Prediction of single-tooth sawing force based on tooth profile parameters, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 86 (1) (2016) 641–650.
<https://doi.org/10.1007/S00170-015-8201-0>.
- [20] J. Ni, L. Li, M. S. H. Al-Furjan, J. Xu, X. Yang, Establishment and verification of a dynamic cutting force model for metal bandsawing, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 90 (2017) 2703–2712.
<https://doi.org/10.1007/s00170-016-9568-2>.
- [21] P. Pichler, M. Leitner, F. Grün, C. Guster, Evaluation of wood material models for the numerical assessment of cutting forces in chipping processes, *Wood Science and Technology* 52 (1) (2018) 281–294. <https://doi.org/10.1007/S00226-017-0962-1>.
- [22] K. Orłowski, T. Ochrymiuk, L. Hlaskova, D. Chuchala, Z. Kopecky, Revisiting the estimation of cutting power with different energetic methods while sawing soft and hard woods on the circular sawing machine: a central european case, *Wood Science and Technology* 54 (2) (2020) 457–477.
<https://doi.org/10.1007/S00226-020-01162-9>.
- [23] X. Xu, Research on cutting force based on thermal-mechanical coupling precision modeling, *Scientific Journal of Technology* 4 (5) (2022) 25–31.
<https://doi.org/10.54691/sjt.v4i5.754>.

- [24] R. Yu, S. Li, Z. Zou, L. Liang, Mathematical modeling and experimental study of cutting force for cutting hard and brittle materials in fixed abrasive trepanning drill, *Micromachines* 14 (6) (2023) 1270. <https://doi.org/10.3390/mi14061270>.
- [25] N. Vorkapic, N. Slavkovic, B. Kokotovic, S. Zivanovic, Z. Dimic, Implementation of a cutting forces model through virtual simulation of machining process, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 135 (2024) 3085–3099. <https://doi.org/10.1007/s00170-024-14681-7>.
- [26] K. Wang, J. Zhang, H. Zhang, An analytical dynamic force model for sawing force prediction considering the material removal mode, *Journal of Manufacturing Processes* (2023). <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.10.034>.
- [27] W. Wang, J. Zhang, T. Bai, H. Zhang, J. Kang, An analytical force model in sawing brittle and heterogeneous material considering the interactions of grit-granite, *Journal of Manufacturing Processes* (2024). <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.05.044>.
- [28] M. Derbas, A. Jaquemod, S. Frömel-Frybort, K. Güzel, H.-C. Moehring, M. Riegler, A machine learning approach to predict properties of wood products during milling, *Forest Products Journal* 74 (S2) (2024) 1–8. <https://doi.org/10.13073/fpj-d-24-00012>.
- [29] V. Nasir, J. Cool, Cutting power and surface quality in sawing kiln-dried, green, and frozen hem-fir wood, *Wood Science and Technology* 55 (2) (2021) 505–519. <https://doi.org/10.1007/S00226-020-01259-1>.
- [30] J. Krilek, J. Melichercik, T. Kuvik, J. Kováč, A. Gendek, M. Aniszewska, J. Mareček, Analysis of cutting forces in cross-sawing of wood: A study of sintered carbide and high-speed steel blades, *Forests* (2023). <https://doi.org/10.3390/f14071395>.
- [31] W. Xu, S. Yuan, Q. Li, X. Gao, W. An, L. Wang, Unveiling the cutting force of multiphase fibers and particle reinforced polymer matrix composites based on multiphase microstructure: An experimental and theoretical study, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 182 (2024) 108199. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2024.108199>.
- [32] V. Meulenbergh, M. Ekevad, M. Svensson, O. Broman, Minor cutting edge force contribution in wood bandsawing, *Journal of Wood Science* 68 (1) (2022). <https://doi.org/10.1186/s10086-022-02023-8>.
- [33] P. McDonald, Investigation of cutting force and surface quality in frozen wood sawing under varying influencing factors to improve the energy- and resource efficiency of sawing processes, in: *Manufacturing Driving Circular Economy*, Springer eBooks, 2023, pp. 166–174. https://doi.org/10.1007/978-3-031-28839-5_19.
- [34] V. Nasir, J. Cool, A review on wood machining: characterization, optimization, and monitoring of the sawing process, *Wood Material Science and Engineering* 15 (1) (2020) 1–16. <https://doi.org/10.1080/17480272.2018.1465465>.
- [35] K. Orłowski, D. Chuchala, M. Szczepański, W. Migda, W. Wojnicz, J. Sandak, Lateral forces determine dimensional accuracy of the narrow-kerf sawing of wood, *Dental science reports* 12 (1) (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-04129-3>.
- [36] Z. Lai, H. Huang, Z. Hu, X. J. Liao, Dynamic model and machining mechanism of wire sawing, *Journal of Materials Processing Technology* 311 (2022) 117820–117820. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2022.117820>.
- [37] V. Nasir, J. Cool, Intelligent wood machining monitoring using vibration signals combined with self-organizing maps for automatic feature selection, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 108 (5) (2020) 1811–1825. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05505-5>.
- [38] A. Sharma, S. Thapa, B. Goel, R. Kumar, T. Singh, Structural analysis and optimization of machine structure for the measurement of cutting force for wood, *Alexandria Engineering Journal* 64 (2023) 833–846. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.09.030>.
- [39] D. Yu, F. Zou, W. Zhang, Q. An, P. Nie, Measurement and prediction of sawing characteristics using dental reciprocating saws: A pilot study on fresh bovine scapula, *Lubricants* (2023). <https://doi.org/10.3390/lubricants11100441>.
- [40] S. Svrzić, M. Djurković, A. Vukićević, Z. Nikolić, V. Mihailović, A. Dedić, Sound classification and power consumption to sound intensity relation as a tool for wood machining monitoring, *European Journal of Wood and Wood Products* 82 (6) (2024) 1953–1962. <https://doi.org/10.1007/s00107-024-02139-2>.
- [41] M. A. Blokhin, I. I. Dymchakov, A. P. Shein, D. D. Emel'yanov, Dynamic control of the resonant frequency of the blade of the saw module performing a circular flat rotational-translational motion, *Journal of Machinery Manufacture and Reliability* 53 (7) (2024) 799–806. <https://doi.org/10.1134/s1052618824700572>.
- [42] K. Kecik, K. Cieciclag, The effect of cutting parameters on defect detection based on recurrence analysis of cutting force signals obtained from GFRP composite milling, *Measurement* 239 (2025) 115406. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.115406>.
- [43] Y.-t. Chen, J.-h. Tian, X.-l. Guo, B. Na, Tool condition monitoring strategies from metal cutting: insights for optimizing wood-based material processing, *European Journal of Wood and Wood Products* 83 (1) (2025). <https://doi.org/10.1007/s00107-024-02198-5>.

LINEÁRIS VÁGÓERŐ MODELL ALKALMAZÁSA SZÚRÓFŰRÉSZEKNÉL

APPLICATION OF LINEAR CUTTING FORCE MODEL IN JIGSAWS

Apáti Sándor*, Dr. Hegedűs György**

ABSTRACT

This paper presents a new linear model that allows for accurate prediction of cutting forces and battery runtime for jigsaws. The electromechanical model is based on Lagrangian equations of the second kind and an energy-based approach, taking into account mechanical and electrical dynamics, as well as the oscillatory motion of the sliding mechanism. The simplified linear model with an optimized damping factor, validated with experimental data in the MATLAB Simscape environment, showed an extremely low relative error compared to real measurements, while providing excellent computational efficiency. The results highlight the industrial applicability of the model in improving energy efficiency, extending battery life, and optimizing performance. The methodology can also be applied to other systems characterized by cyclic force effects, where accurate simulation and performance estimation are critical.

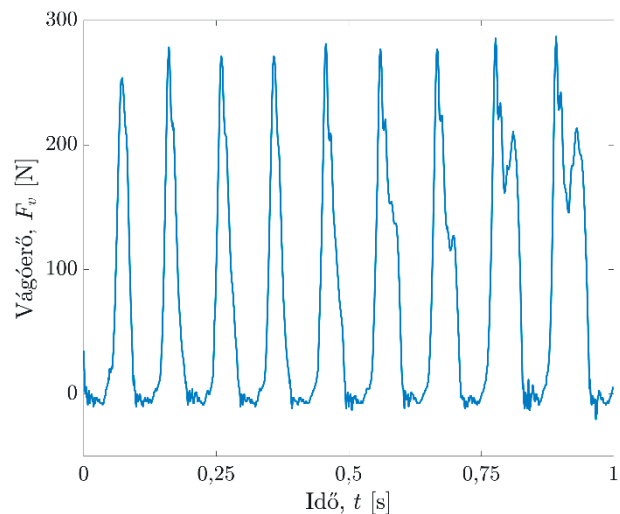
1. BEVEZETÉS

Az elektromechanikus modellezés során a Simscape lehetővé teszi az elektromos és mechanikai alkatrészek modellbe való integrálását, biztosítva a rendszer dinamikájának pontos ábrázolását. A Simscape beépített könyvtárai motorokat, lengéscsillapítókat, rugókat és különféle elektromos elemeket, például ellenállásokat, induktivitásokat és kondenzátorokat használhatnak az elektromechanikus rendszerek modellezésekor. Ezek az elemek paramétrezhetők olyan fizikai tulajdonságok alapján, mint az elektromotoros erő (EMF), az ellenállás, a tehetetlenség és a csillapítás. Az elektromos és mechanikai elemek speciális blokkon keresztül összekapcsolhatók, lehetővé téve a mechanikai rendszerek pontos szimulációját [1], [2]. A Simscape lehetővé teszi a rendszer reakcióinak vizsgálatát, például az áramfelvétel, a feszültség, a fordulatszám és a nyomaték időfüggő változásait különböző terhelési feltételek mellett. Az olyan optimalizálási lehetőségek, mint a szimuláció, finomhangolhatják a paramétereket, hogy azok megfeleljenek a valós körülményeknek. A Simulink-kel való közvetlen integráció lehetőséget biztosít vezérlési algoritmusok és logikák beépítésére,

lehetővé téve nemcsak a rendszer fizikai dinamikájának szimulációját, hanem vezérlési stratégiáit is. A Simscape modellek közvetlenül kapcsolhatók a Simulink környezethez, a fizikai modelleket vezérlési logikával kombinálják és további rugalmasságot biztosítanak a rendszerfejlesztésben és tesztelésben.

2. VÁGÓERŐ MÉRÉSE

Az 1. ábra a tényleges szűrőfűrészen mért forgácsolóerő-idő diagramot mutatja, amely a szűrőfűrész oszcilláló mozgása során fellépő erőváltozásokat tükrözi, reprezentálva a szerszám és a munkadarab közötti dinamikus kölcsönhatásokat [3] – [5]. Szimulációs célból a forgácsolóerő-idő adatokat forgácsolóerő-szögelfordulás függvénné kell alakítani.



1. ábra Vágóerő az idő függvényében

Ez az átalakítás lehetővé teszi, hogy a vágóerőt a fűrészlap szöghelyzetén alapuló periodikus függvényként ábrázoljuk, pontosan tükrözve a szűrőfűrész előre- és hátrameneti ciklusait. A forgácsoló erő-szögelfordulás függvénynek a vágóerő-idő függvényből való származtatásához egyetlen időintervallum a 0 és 2π közötti tartomány volt rendelve, amely a kulisszás mechanizmus szöghelyzete alapján a teljes mozgási ciklust jelenti. A forgácsolóerőt $F_v(\varphi_k)$ -ként jelöljük, ahol φ_k a hajtókar szögelfordulása. Mivel a

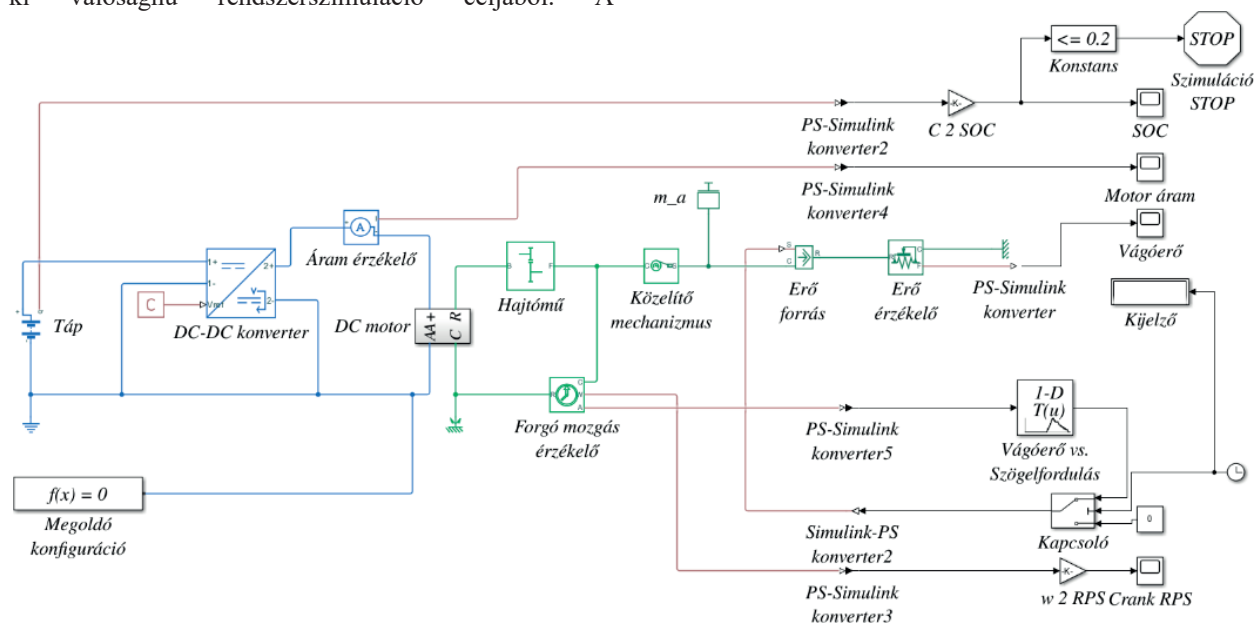
* PhD hallgató, Miskolci Egyetem, Szerszámgépek Intézeti Tanszéke

** egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Szerszámgépek Intézeti Tanszéke

fűrészlap a billentőmechanizmus miatt csak a felfelé irányuló mozgás során vág, a $0 - \pi$ szögtartományban a forgácsolóerő nullának számít. Az 1. ábrán látható, hogy ezekben az időintervallumokban a dinamikus hatások miatt bizonyos erőhatások lépnek fel, de ezeket figyelmen kívül hagyjuk és nullára állítjuk az adatfeldolgozás során.

2.1. Valós vágóerő Simscape modellje

A 2. ábra a szűrőfűrész valós vágóerő modelljét mutatja be, amelyet *Simscape* környezetben fejlesztettek ki valósághű rendszerszimuláció céljából. A



2. ábra A valós vágóerő Simscape modellje

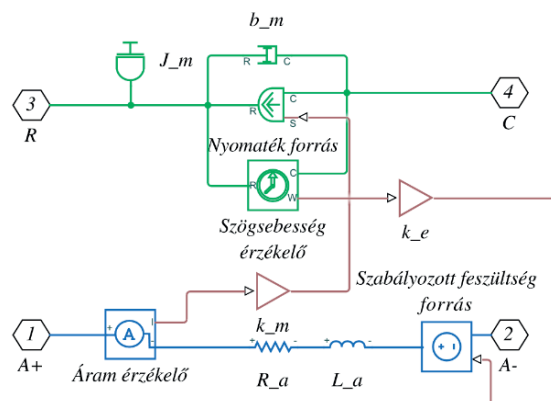
Ezt a forgó mozgást egy fogaskerék-mechanizmus továbbítja a kulisszas mechanizmushoz, létrehozva a fűrészlap oszcilláló mozgását. Az m_a blokk a váltakozó tömeget jelenti, amely a forgácsolóerőt generáló elem (Erő forrás) és egy erőérzékelőn keresztül kapcsolódik az álló környezethez. Az Erő forrás blokk bemenetét egy 1-D Lookup Table (Vágóerő vs. Szögelfordulás) állítja elő. Ez a blokk kiszámítja a pillanatnyi vágóerő értéket a hajtókar szöghelyzetéből. Az áramérzékelő a motor áramát méri, a forgó mozgásérzékelő a forgattyús mechanizmus szöghelyzetét és sebességét, az erőérzékelő pedig a vágás során fellépő erőket méri. Ezek az adatok lehetővé teszik a rendszer viselkedésének részletes elemzését és a forgácsolóerő dinamikájának pontos szimulációját.

2.2. A DC motor Simscape modellje

A 3. ábrán látható *Simscape* egyenáramú motormodell a szűrőfűrész hajtómotorját reprezentálja, ami döntő fontosságú az elektromechanikus rendszer működésének szimulálásához. A modell az elektromos és mechanikai paraméterek pontos konfigurációjára épül, hogy pontosan lemásolja a valódi motort. A modellben a motor

modellkapcsolatok színekkel vannak ellátva, hogy jelezzék a fizikai jelek és kölcsönhatások típusait. A kék vonalak az elektromos jeleket és az energiaáramlást, a világoszöld vonalak a forgó mechanikai mozgást, a sötétzöld vonalak translációs mechanikai hatásokat, a barna vonalak pedig az általános *Simscape* adatáramlást jelölik. A fekete kapcsolatok absztrakt *Simulink* adatfolyamot jelentenek. Ezek a színek segítenek a különböző fizikai tartományok közötti kapcsolatok gyors azonosításában. A modell központi eleme egy egyenáramú (DC) motor, amely az elektromos energiát forgó mozgássá alakítja.

elektromos tulajdonságait az R_a ellenállási paraméterek, az L_a induktivitás és az elektromotoros erő (EMF) határozzák meg.

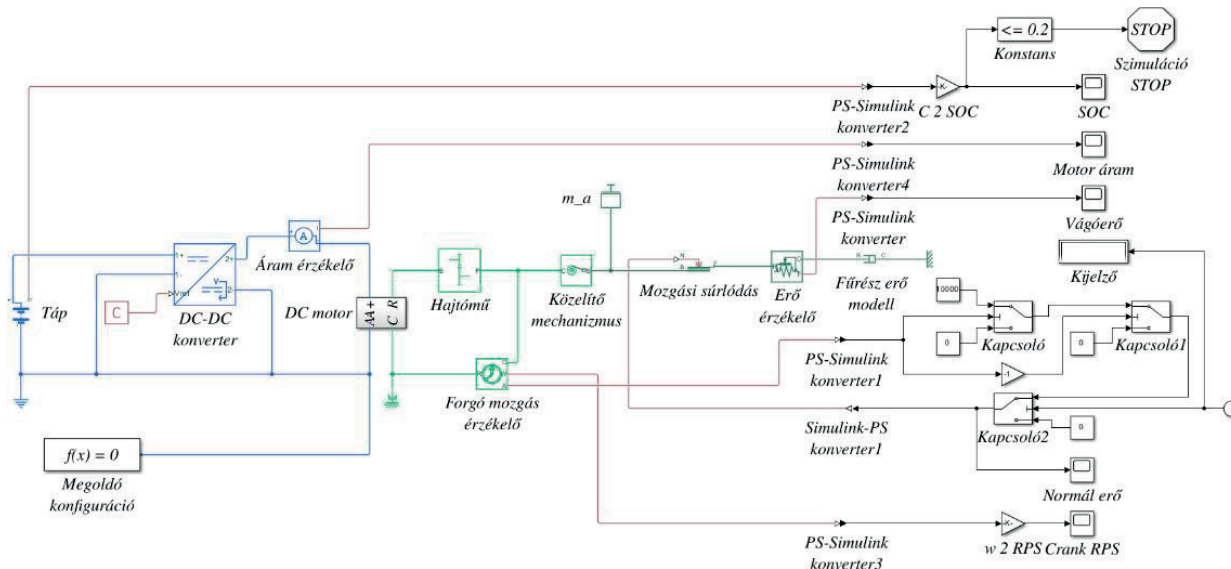


3. ábra A DC motor blokk diagramja

Az EMF egyenlet arányos a motor fordulatszámaival, lehetővé téve a modell számára, hogy figyelembe vegye a feszültség és az áram változásait a különböző motorsebességeknél. Ezt hatást a modell Szabályozott feszültség forrás blokkja hozza létre. A motor feszültség

bemenete a valós rendszerhez hasonló módon csatlakozik a *Simscape* áramkörbe, lehetővé téve az áramfelvétel és a kimeneti nyomaték ingadozásának pontos ábrázolását. A mechanikai részben a J_m rotor tehetetlenségét és a b_m csillapítását is megadjuk, amelyek befolyásolják a motor reakcióidejét és dinamikus viselkedését. A J_m tehetetlenségi blokk a motor forgó tehetetlenségi hatását írja le, míg a csillapító b_m a mechanikai ellenállást

energiavesztéseket. Ezek a paraméterek biztosítják, hogy a motor reálisan reagáljon a rendszer terhelési változásaira. A nyomatékforrás blokk a motor által generált armatúraáramtól függő nyomatékot állítja elő. A modell célja a fűrészelési folyamat pontos ábrázolása, miközben lehetővé teszi a gyorsabb elemzést egyszerűsített számításokkal, amelyek még mindig reális eredményeket adnak.



modellezi, amely tükrözi a mozgás során bekövetkező

4. ábra A linearizált vágóerő Simscape modellje

2.3. Lineáris vágóerő Simscape modellje

A modell tartalmaz egy linearizált vágóerő-modellt, amely a vágóerőt a penge sebességének és ellenállásának függvényében számítja ki. Ennek az egyszerűsített viselkedésnek a modellezéséért a *Fűrész erő modell* (valójában egy lineáris lengéscsillapító) komponens felel, míg a *Mozgási sűrűlódás* blokk úgy hajtja végre a csillapító műveletet, hogy a megfelelő időben csatlakoztatja az álló környezethez. Ezek az elemek biztosítják a rendszerdinamika valósághű szimulációját, miközben növelik a számítási hatékonyságot. A logikai kapcsolók (*Kapcsoló* blokkok) a rendszer működésének vezérlésére szolgálnak, normál erőt biztosítva a sűrűlódó blokkra a megfelelő forgattyús szögtartományban (4. ábra). A rendszer kulcsfontosságú elemei egy áramerősségérzékelő (*Áram érzékelő*), amely méri a motor áramfelvételét, és egy forgási mozgásérzékelő (*Forgó mozgás érzékelő*), amely követi a forgattyús mechanizmus forgó mozgását. Ezek az érzékelők fontos adatokat szolgáltatnak a vágási folyamat elemzéséhez, mely a fűrészelési folyamat során fellépő dinamikus hatásokat elemzi, miközben lineáris közelítéssel hatékonyan csökkenti a számításigényt. Ez a modell lehetővé teszi az energiafogyasztás és a vágási hatékonyság pontos elemzését is. Rugalmasságának és optimalizálási képességeinek köszönhetően a modell ideális eszköz a szűrőfűrés működésének elemzéséhez, különösen az energiahatékonyság javítása, a vágás

minősége és a rendszer stabilitása szempontjából. Mint ilyen, releváns eredményeket nyújt kutatási célokra és ipari alkalmazásokhoz is. A szűrőfűrész elektromechanikus modelljének szimulációs paramétereit az 1. táblázat mutatja be.

1. táblázat A szimulációs modell paramétereit

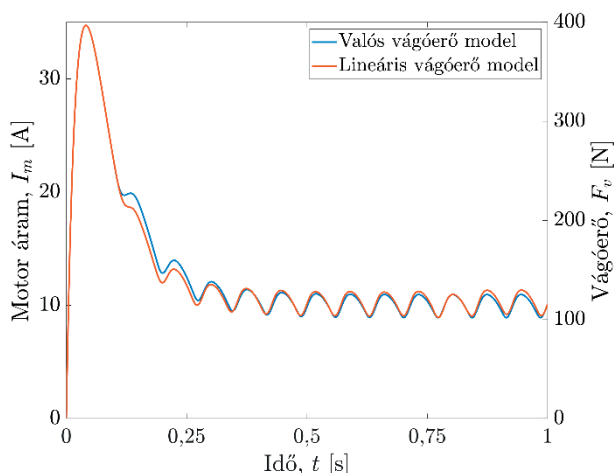
Paraméterek	Adat	Mértékegység
R_a	0,176	Ω
R_b	0,0	Ω
L_a	3,21e-3	H
k_e	7,383e-3	Vs/rad
k_{mk}	6/56	-
J_m	24,1e-6	kgm ²
k_m	5,632e-3	N m/A
J_k	24,0e-6	kgm ²
m_a	0,239	kg
e_k	0,010	m
b	3,4274e-6	Nms/rad
v_{in}	18	V

3. SZIMULÁCIÓS EREDMÉNYEK

Az 5. ábra bal oldali függőleges tengelye a motoráram változását ábrázolja a valós és lineáris forgácsolóerő-modellek esetén. Az ábrán látható motoráram diagram a valós motoráram időfüggvényt ($I_{mr}(t)$) és a lineáris modell által generált motoráram időfüggvényt ($I_{ml}(t)$)

mutatja. A valós forgácsolóerő-áramgörbe a mért adatokból származik, míg a lineáris modell csillapítási tényezőjét úgy optimalizáltuk, hogy minimalizálja a négyzetes hibák integrálját.

A folyamat a szimulált hűtési (simulated annealing) algoritmust használta a csillapítási tényező (k_{Fc}) finomításához, biztosítva, hogy a lineáris áramgörbe szorosan illeszkedjen a valós áramgörbéhez. A motoráram diagram elemzése azt mutatja, hogy a lineáris modell szorosan követi a valós modell dinamikáját, az 5. ábrán megfigyelhető eltérések minimálisak, ami azt mutatja, hogy a lineáris modell megfelelően reprezentálja a valós vágási folyamat erőhatásait.



5. ábra A linearizált vágóerő Simscape modellje

Az optimális csillapítási tényezővel szimulált futásidők 3,7%-os relatív eltérést eredményeztek egymáshoz viszonyítva, így a lineáris modell megbízhatóan közelíti a valós viselkedést. Az 5. ábra a forgácsolóerő időfüggő változását szemlélteti valós és lineáris modelleknél egyaránt. Az ábra görbéi a valós mért forgácsolóerőt ($F_{real}(t)$) a szűrőfűrész működése során végzett közvetlen mérésekből és a szimulált forgácsolóerőt ($F_{linear}(t)$) ábrázolják a lineáris forgácsolóerő modell segítségével.

A lineáris modell paramétereit közül a csillapítási tényezőt optimalizáltuk a folyamat során, hogy minimalizáljuk a valós és szimulált forgácsoló erők közötti eltéréseket. Szimulált hűtési algoritmust alkalmaztunk a csillapítási tényező optimalizálására, biztosítva, hogy a lineáris modell szorosan kövesse a valós forgácsolóerőt.

A vágóerő-idő diagram elemzése azt mutatja, hogy a lineáris modell közelíti a valós forgácsolóerő viselkedését, bizonyos eltérésekkel, különösen az erőcsúcsok azonban elhanyagolhatóak a modell egyszerűségéhez képest, és az általános egyetértés erős, ami igazolja a lineáris modell alkalmazhatóságát a valóságban. szimulációk. Az optimalizált lineáris modell hatékonyan rögzíti a vágási folyamat erőhatásait és dinamikáját, megbízható becslést adva az akkumulátor üzemidejére a valós forgatókönyvekhez hasonló körülmények között.

3. ÖSSZEFOGLALÁS

A modell- és szimulációs eredmények pontosan tükrözik a szűrőfűrész működésének alapvető dinamikus jellemzőit, és világosan ábrázolják a valós és lineáris modellek közötti kapcsolatot. Az elektromechanikus modell valós adatokat használ és szimulálja a vágási folyamatot az egyenáramú motor és a kulisszas mechanizmus működésén keresztül. A *Simscape* modellezőkörnyezet által biztosított fizikai elemek a *Simulink*-kel való integrációval kombinálva lehetővé teszik az elektromos és mechanikai tulajdonságok részletes ábrázolását, fokozva a valósághűséget.

4. SUMMARY

The model and simulation results presented accurately reflect the basic dynamic characteristics of the jigsaw operation and clearly illustrate the relationship between real and linear models. The established electromechanical model uses real data and simulates the cutting process through the operation of the DC motor and the backlash mechanism. The physical elements provided by the *Simscape* modeling environment, combined with the integration with *Simulink*, allow detailed representation of electrical and mechanical properties, enhancing realism.

5. IRODALOM

- [1] S. Lin, J. Ma, J. Li, S. Li, M. Wang, Y. Hu, J. Wen: *A novel inertial impact piezoelectric actuator with adjustable angle vibrators*, International Journal of Mechanical Sciences 244 (2023) 108071. doi:10.1016/j.ijmecsci.2022.108071.
- [2] Y. Hu, Y. Hu, S. Lin, J. Ma, S. Li, J. Li, J. Wen: *Theoretical modeling and dynamic characteristics analysis of piezoelectric inertial actuator*, International Journal of Mechanical Sciences 225 (2022) 107363. doi:10.1016/j.ijmecsci.2022.107363
- [3] K. Kecik, K. Ciciela: *The effect of cutting parameters on defect detection based on recurrence analysis of cutting force signals obtained from GRFP composite milling*, Measurement 239 (2025) 115406. doi:10.1016/j.measurement.2024.115406.
- [4] B. Zhang, C. Zhao, B. Wen: *Dynamic cutting force measurement test and prediction of time series model for machine tools*, Journal of Northeastern University (Natural Science) 40 (4) (2019) 521–526. doi:10.12068/j.issn.1005-3026.2019.04.013.
- [5] J. Ni, L. Li, M. S. H. Al-Furjan, J. Xu, X. Yang: *Establishment and verification of a dynamic cutting force model for metal bandsawing*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology 90 (2016) 2703-2712 doi:10.1007/s00170-016-9568-2

EGY TELEFONTÖLTŐ ÉLETCIKLUSA – AVAGY ÉLET AZ ÉLET UTÁN (ESETTANULMÁNY)

LIFE CYCLE OF A PHONE CHARGER – LIFE AFTER LIFE (CASE STUDY)

Dr. Bihari Zoltán

ABSTRACT

The pace of technological development in the 21st century is very rapid. Every day, newer and more advanced devices appear in our daily lives. Our everyday objects have a short life cycle, they break down or we simply get bored of them. The theory of planned obsolescence is changing in line with this approach. The basic idea of consumers society is to buy, use and then throw the product away. This article argues against this philosophy by presenting an example how a product can be simply reconstructed.

1. BEVEZETÉS

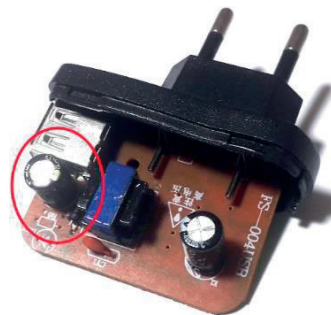
A technológiai fejlődés a XXI. században rohamos gyorsasággal zajlik. Nap mint nap jelennek meg újabbnál újabb, fejlettebb eszközök mindennapjainkban. Különösen a fiatalok fogékonyak arra, hogy a legmodernebb elektronikai berendezéseket használják, legyen az mobiltelefon vagy más informatikai készülék. Az utóbbi években ha megnézzük ezen berendezések elterjedését az eladási számok tükrében, láthatjuk azt a monoton növekedést, amely alapján egyelőre megjósolni sem lehet, hogy mikorra várható a progresszív jelleg depresszív irányba fordulása. Csak annyit tudhatunk, hogy ez előbb-utóbb szükségszerűen bekövetkezik. Serge Latouche, a Párizsi Egyetem közgazdász professzorának nyilatkozata alapján ez igazolható, miszerint „Bárki, aki azt hiszi, hogy véges méretű világunkban létezhet végtelen növekedés, az vagy bolond, vagy közgazdász...” [1].

„A tervezett elavulás története” című videóanyag egyértelműen rámutat arra, hogy a profit érdekében meghasonlík a világ mérnök társadalma önmagával, hiszen olyan terméket tervez és gyárt, amely rövid élelciklusát követően környezeti károkat fog okozni, ezzel közvetlenül az emberiség életére tör, fennmaradásának esélyét rontva.

A fogyasztói társadalom nem önmagától jött létre, hanem a marketingesek által történt tudatos, tömeges személyiségformálás eredménye, miszerint vásárolj, használd, ezután pedig dobd el.

Ez az esettanulmány egy rövid példán keresztül igyekszik bemutatni azt az ellenállást, amelyet ezen szemlélet ellen fejthetünk ki, ha a rendelkezésre álló technológiáinkat az ökológiai lábnyomunk csökkentésére fordítjuk. A továbbiakban bemutatott példa egy mindannyiunk által használt telefонтöltő lesz. Ez a kis eszköz nélkülözhetetlen segítőtársunk a mindennapi életünk során. Amennyiben meghibásodik, eldobjuk, és vásárolunk másikat, hiszen javítására a „nem gazdaságos” bélyeget ragasztják a gyártók azzal, hogy roncsolásmentesen az esetek döntő többségében nem bontható a burkolat.

Az említett készülék 2,5 évig működött kifogástalanul heti két alkalommal, 2-6 óra terjedelemben. Ekkor a töltési feszültsége 5V-ról leesett 0,5-0,8 V-ra. A hiba feltárásához a burkolatot össze kellett törni. A vizsgálat kimutatta, hogy az elektronikai részben a működési rendellenességet egy 680 μ F elektrolit kondenzátor okozta. Ennek piaci ára csupán 190 Ft.



1. ábra. Hibaanalízis

Ha a cserét saját magunk el tudjuk végezni, akkor a javításnak elvileg nincs is más költsége. Elvileg, hiszen a dizájnös burkolatot össze kellett törnünk, amelyet kereskedelmi forgalomból nem tudunk pótolni. A gondolatmenet ezen fázisában a termék élelciklusa be is fejeződött. Kedvező esetben nem a kommunális hulladék közé kerül a termék, hanem a megfelelő gyűjtőhelyre. Ehhez egy kis statisztikai adat, miszerint világszerte évente körülbelül 57,4 millió tonna elektronikai hulladék keletkezik, melynek csupán 17,4%-át hasznosítják újra megfelelően. A fennmaradó rész nagy hányada hulladéklerakókba kerül, ahol mérgező anyagokat,

* egyetemi docens, Miskolci Egyetem Gép- és Terméktervezési Intézet

mint például ólmot és higanyt bocsátanak ki a környezetbe [2].

A felvetett probléma jól láthatóan globális, de ha azt várjuk, hogy majd a megoldás is globális lesz, akkor tétlenek maradunk egy életen keresztül. A szemléletváltást véleményem szerint kicsiben, az otthoni háztartásunkban, családi környezetben kell elkezdeni, példát mutatni gyermekeinknek egy új, fenntartható gazdaság létrehozására.

2. GEOMETRIAI REKONSTRUKCIÓ

A cikk további részében a korábban említett teleföntöltő burkolatának újratervezése, rekonstrukciója kerül bemutatásra, egyszerű, elérhető eszközök segítségével. [3]

2.1. 3D scannelés

Korunk gondolkodásmódját áthatja az automatizálás, gépesítés, műszeres vizsgálat. Nem csoda, ha a geometriai rekonstrukció kapcsán a 3D scannelési technológia jut eszünkbe. Azonban ismerni kell ennek a módszernek a korlátait, pontosságát, erőforrás igényét. Míg az FDM 3D nyomtatók árai az utóbbi évek során annyira alacsonyak lettek, hogy bármely érdeklődő számára elérhetővé vált ez a technológia, a 3D scannerek lényegesen magasabb áron vásárolhatók meg. A bérscannelés költsége a posztprocesszálassal együtt máris nem teszi rentábilissá a vállalkozásunkat. Arról nem is beszélve, hogy a scannelendő darab nem létezik, hiszen darabokra tört a szerelés során. Csak a csatlakozó alkatrész geometriája ismert, amely alapján az eredeti geometria teljes pontossággal nem állítható elő.

2.2. Fényképezési technológia

Mivel a hiányzó burkolati elem csak részben írható le egyszerű geometriai formákkal, hiszen a designerek alkalmaztak szabadfelületeket is a termék megtervezésekor, koncentráljunk erre a területre. Az alábbi ábra egy fényképfelvételt mutat a csatlakozó elem geometriájáról. A felvétel szándékosan nagyon „mostoha” körülmények között készült egy nem túl korszerű mobiltelefonnal, nem megfelelő fényviszonyok mellett. A felvételen jól kivehető, hogy a felső oldalon az alkatrész éles árnyékot vet, amely hibaként jelentkezhet a végeredmény vonatkozásában.

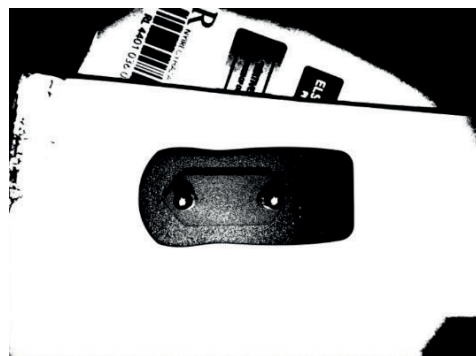


2. ábra. Fényképfelvétel a csatlakozó elemről

Egyetlen feltétel teljesülését tűztük ki csupán a felvétel készítésekor, hogy az alkatrész és a háttér között erős legyen a kontraszt. Eltekintettünk attól is, hogy a vakuhasználat következtében a felület meglehetősen csillog. Az volt a cél, hogy megvizsgáljuk azt, a hétköznapi életünkben elérhető legrosszabb esetet figyelembe véve lehet-e megfelelő minőségű eredményt elérni.

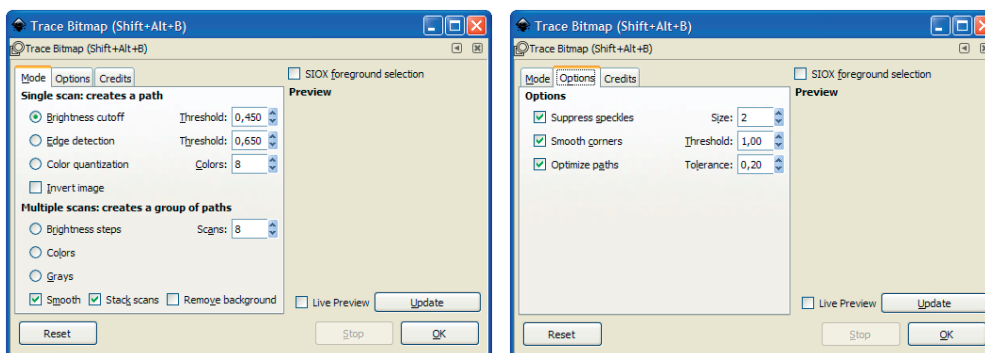
2.3. Vektorizálás

A kapott eredmény nem más, mint a bmp, vagy jpg formátumú 16 millió színárnyalatú bitmap kép. Az internetről ingyenesen letölthető, és szabadon felhasználható Windows és Linux platformon is futó egyik alkalmazás az Inkscape szoftver. A rekonstrukciós folyamat további lépéseit ezzel fogjuk elvégezni. A szoftver sok más funkció mellett alkalmas arra, hogy a fényképeken posztprocesszási folyamatokat végezzünk. Első lépésként vektorizáljuk a képet. Ezzel meglepően sok információvész el, hiszen egy fekete-fehér „folthalmaz” jön létre.



3. ábra. Vektorizált kép

A folyamat során érdemes a szoftver adta beállításokkal részletesen megismerkedni, hiszen a végeredmény minőségét, valamint a szükséges adatok kinyerésének esélyeit ezen paraméterek nagy mértékben befolyásolhatják.



4. ábra. Vektorizálás beállításai Inkscape programnál

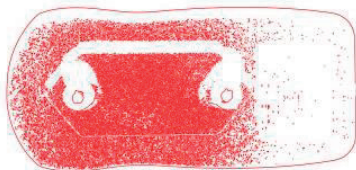
2.4. Kitöltés és körvonal

A továbbiakban vektorizált képet kell úgy módosítani, hogy a szükséges körvonalak megfelelő pontossággal kirajzolódjanak, valamint a képet kitöltő fekete területek eltűnjenek. A körvonal kirajzolásához tetszőleges színt választhatunk. A megfelelő kontraszt érdekében az önkényesen felvett RGB-255,0,0-100 kódra esett a választás, amely a piros színt jelöli.



5. ábra. Körvonalak megjelenítése

Meg kell jegyezni, hogy minél jobban csillogott az eredeti fényképfelvétel, annál nagyobb lesz a piros rész a képen. Fontos tudni azonban, hogy ez nem feltétlenül fogja károsan befolyásolni a végső eredményt. A következő lépés a kitöltés nem láthatóvá tétele szoftveresen. Ez néhány kattintással elérhető.



6. ábra. Kitöltés kikapcsolása

Az Inkscape szoftverrel, adott minőségű fényképfelvétel felhasználásával erre a végeredményre juthatunk (6. ábra). Értékelve a kapott információkat, jól látható, hogy a kontúr rendelkezésre áll, sőt folytonos, amely a 3D modell készítés szempontjából a továbbiakban fontos lehet. Az is szembeötlő, hogy nagyon sok a „zaj” a káros tükröződések miatt. Néhány szöghiba is látható, amely a fénykép készítés során bekövetkező tökéletlen beállítás miatt szinte elkerülhetetlen. Problémát jelenthet a 3D scannelési technológiához képest az is, hogy a geometria jelenleg ismeretlen méretű, szinte

biztosra vehető, hogy a befoglaló méretek nem felelnek meg a gyártandó burkolat méreteinek. Megfelelő nagyításban az is jól kivehető, hogy a körvonal geometriája nem folytonos, hanem apró egyenesekkel határolt. Ez, ha a gyártási folyamat pontosságát tekintjük, nem feltétlenül lesz észrevehető a nyomtatott alkatrészben.

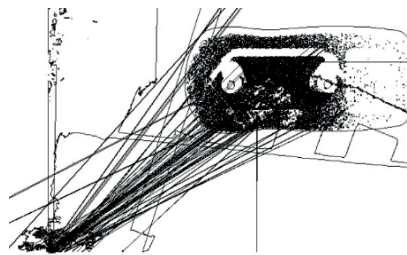
Az Inkscape program lehetőséget ad arra, hogy az elkészült darabot más, CAD rendszerek által importálható formátumba elmentsük. A legismertebb és talán legelterjedtebb formátumok a dxf, a dwg vagy a hpgl.

3. ALKATRÉSZ TERVEZÉS CAD RENDSZERBEN

A további munkát tetszőleges 3D-s CAD rendszerben fogjuk elvégezni, hiszen a nyomtatható formátum létrehozásához a teljes 3D geometriát meg kell tervezni.

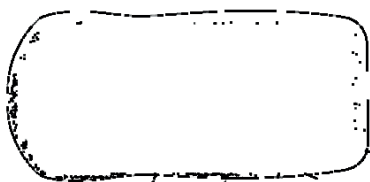
3.1. Rekonstrukciós lépések 2D-ben

A korábban közölt formátumok közül, önkényesen a dxf-et választva, a CAD rendszer 2D-s munkafelületén megjeleníthető a kimentett vektoros vonalhalmaz.



7. ábra. Beolvasott dxf formátum

A látvány elsőre talán megrendítő és sokkoló lehet, de fontos annak tisztázása, hogy egy vektoros képet használunk, amelynek az egyes elemei külön-külön kezelhetők, tehát akár törölhetők is. A számítógép erőforrásaival történő megfelelő gazdálkodás miatt javasolt a fölösleges vonalak, valamint a visszaverődés okozta zaj törlését elvégezni. Ez pár egérgattintással megtörténhet, és az alábbi ábra szerinti eredményhez juthatunk.

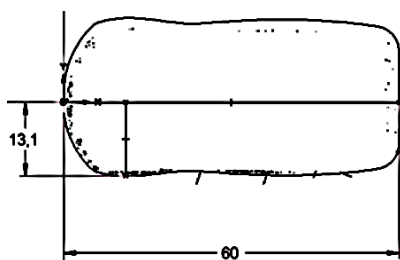


8. ábra. Részben „zajmentesített” vonalhalmaz

A kapott geometriát egyszerűen a másolás-beillesztés parancskombinációval a 3D-s CAD rendszerben egy önkényesen választott referencia síkra sketch-ként átmásolhatjuk. Itt kell megoldani a geometriai anomáliákat, amelyek közül jó esély van valamennyi fennállására:

- Szöghiba;
- Mérethiba;
- Pozíció hiba;
- Szimmetria hiba.

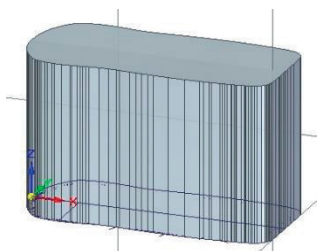
A szöghiba kijavítása illetve csökkentése nem jelent problémát, ha feltételezzük azt, hogy a 8. ábra szerinti körvonal jobb oldala sík felület volt. A mérethiba, illetve a meglévő geometriához tartozó méret korrigálásához vissza kell nyúlni a korábban befényképezett alkatrészhez, és a befoglaló méreteit rögzíteni kell. Ezek ismeretében a szoftver lehetőségeit kihasználva, a „Move”, valamint a „Scale” ikonok használatával a méret és a pozíció hiba is kiküszöbölhető.



9. ábra. Módosított geometria

3.2. Rekonstrukciós lépések 2D-ben

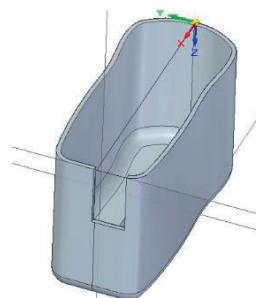
Az elkészült vázlat, amely egyenes vonalak halmaza, zárt görbét alkot, tehát a kihúzás parancsal akár 3D-s solid modell megépíthető belőle.



10. ábra. 3D-s modell (1. változat)

Az eredmény szempontjából kritikusán szemlélve a modellt az látható, hogy a felület valóban zárt, de korántsem folytonos. A felső felület lekerekítését így jó eséllyel nem fogja tudni a szoftver elkészíteni. Ezért javasolt a vázlat lépéshez visszatérve a korábbi

zárt vonalhalmazra egy spline-t illeszteni, amelyet tetszőlegesen sok felvett kontrollponttal definiálhatunk. Az így kapott görbe már nemcsak zárt, de többrendben folytonos is lesz, amely lehetőséget biztosít a végleges modell elkészítéséhez.



11. ábra. 3D-s modell (2. változat)

Ekkor már nem hagyható figyelmen kívül a hagyományos tolómérővel felvett geometriai információk használata sem. A vékonyfalúság funkcióval a belső üreg, a kivágás funkcióval az USB nyílás kialakítható (11. ábra).

4. ÖSSZEGZÉS

A kész modellt egy hobbi célú 3D nyomtatóval kinyomtatva szinte tökéletes, de mindenképpen használható és esztétikus burkolatot hoztunk létre.



12. ábra. Elkészült burkolat

Értékelve a feladathoz kapcsolódó teljes tevékenységet megállapítható, hogy a befektetett ráfordítás korántsem rentábilis, ha csak rövidtávon gondolkodunk. Azonban ha távlatokban tekintünk a saját és gyermekeink jövőjére, mindenképpen követendő példát adhattunk arra, hogyan őrizzük meg minél hosszabb távon Földünk „egészségét” azzal, hogy használati eszközeink élettartamát meghosszabbítjuk, csökkentve a saját ökológiai lábnyomunkat.

6. IRODALOM

- [1] A tervezett elavulás története, www.youtube.com/watch?v=tlcmWnRISnU, 2013.
- [2] DrivingEco, Elektronikai hulladék újrahasznosítása, www.drivingeco.com, 2021.
- [3] Dömötör Csaba: Alkatrész rekonstrukciós megoldások tapasztalatai 3D nyomtatással, GÉP 74(4), 57-60 (2023)

FENNTARTHATÓ DRÓNGYÁRTÁS: A GENERATÍV TERVEZÉS, AZ ADDITÍV GYÁRTÁS ÉS A KÖRFORGÁSOS GAZDASÁG INTEGRÁCIÓJA

SUSTAINABLE DRONE MANUFACTURING: INTEGRATION OF GENERATIVE DESIGN, ADDITIVE MANUFACTURING, AND CIRCULAR ECONOMY

Eszter Borsodi^{}, Winnie Atieno Onyango^{**}, Dr. Ágnes Takács^{***}*

ABSTRACT

The rise of unmanned aerial vehicles in multiple sectors and the stricter environmental regulations initiate a growing need for sustainable design and manufacturing approaches in the drone industry.

The mass of components can be reduced using generative design, while the mechanical properties can be preserved or even improved. This optimization is useful in drones, where flight duration and payload capacity are important parameters. Generative design supported by additive manufacturing reduces raw material consumption, which is a key principle in the circular economy.

The aim of the paper is to explore how advanced technologies combined with circular principles can contribute to a more resource-conscious, sustainable future in drone manufacturing. These areas complement and enhance each other and together can form a powerful manufacturing solution that redefines engineering design while lowering environmental impact.

1. INTRODUCTION

As the technology advances, the use of drones (unmanned, remotely or autonomously controlled aerial vehicles) is further increasing. Nowadays, drones are used for many tasks, from precision agriculture to military operations [1]. In commerce, drones are revolutionizing traditional logistics systems: in 2024, the number of drone deliveries was 5 million, but this number is predicted to reach 808 million by 2034 [2]. As the usage of drones increases, the associated environmental issues are also on the rise.

According to the European Union's Circular Economy Action Plan, „up to 80% of products' environmental impacts are determined at the design phase” [3]. This emphasises that product design plays a crucial role in

reducing resource use and creating a more sustainable future.

The aim of this paper is to explore the synergies between generative design, additive manufacturing, and circular product design principles in the context of drone manufacturing and to provide a conceptual framework.

First, generative design and additive manufacturing are defined, followed by the description of product design guidelines in circular economy, discussing in detail the advanced materials in the field of drones. Then, we analyse the synergies and possible integration of generative design and additive manufacturing with circular design principles in drone manufacturing. Finally, the current limitations and challenges are presented, pointing the way towards future research and innovation opportunities.

2. GENERATIVE DESIGN AND ADDITIVE MANUFACTURING

Generative design is an algorithmic design method that generates a large number of design solutions based on given input data as instructions and rules: constraints, loads, and performance goals, which are usually maximising strength or minimising weight. The steps of the generative design process are shown in Figure 1 [4].

Generative design is a genetic algorithm-driven process; genetic algorithms work similarly to selection and genetics observed in nature [5].

Generative design results in lightweight, organically structured parts with excellent mechanical properties. One of the most important goals in aerial vehicle design is to reduce mass. Lighter drone components improve flight performance, reduce power consumption, and thus extend battery life. Reducing energy consumption not only reduces operating costs but also supports sustainability. Generative design also promotes material efficiency by concentrating material only at structurally necessary points, reducing the raw material usage.

^{*} PhD student, University of Miskolc, Faculty of Mechanical Engineering and Informatics, Institute of Machine and Product Design

^{**} PhD student, University of Miskolc, Faculty of Materials Science and Engineering, Institute of Energy, Ceramics- and Polymer Technology

^{***} Associate professor, University of Miskolc, Faculty of Mechanical Engineering and Informatics, Institute of Machine and Product Design

Due to their unique geometry and complexity, parts created with generative design are typically made using additive manufacturing technologies. In traditional subtractive manufacturing, such as turning, material is removed from a solid mass to achieve the desired final shape. In contrast, additive manufacturing (AM) is a waste-saving production method, because it creates objects by combining material layer by layer [6].

The term *3D printing* refers to the process of building an object layer by layer. Additive manufacturing and 3D printing are often used interchangeably, but additive manufacturing refers to industrial applications and is a more complex process that includes postprocessing. There are different AM technologies; Figure 2 shows the core part of the fused deposition modelling (FDM) technology compared to subtractive manufacturing [7].

Because it enables the rapid and cost-effective production of unique parts, additive manufacturing is often used to reconstruct machine components thus produce replacement parts.[8].

The surface of the printed parts is staircase-like due to the layered structure, which results in poorer surface

quality than if it had been made using subtractive technology [9]. Because of this, after the component is built up layer by layer, if necessary, post-processes can be performed to improve the surface quality. For example, in the case of FDM technology, this can be achieved by ironing post-processing, which can significantly reduce surface roughness [10].

The layered structure also weakens the mechanical properties, because the interlayer bonding is much weaker than the material structure within the layer. Since the new layer is placed on top of the previous, already solidified layer, the bond will not be as strong as in a homogeneous material. The mechanical properties of 3D printed objects are direction-dependent, they behave as a block of material within the layer, the bond along the layers is weaker, so they can separate from each other more easily. On the other hand, microscopic voids, defects and poorly adhered parts can form between the layers. These act as stress accumulation sites and promote the formation of cracks, and they appear quickly especially under dynamic loads.

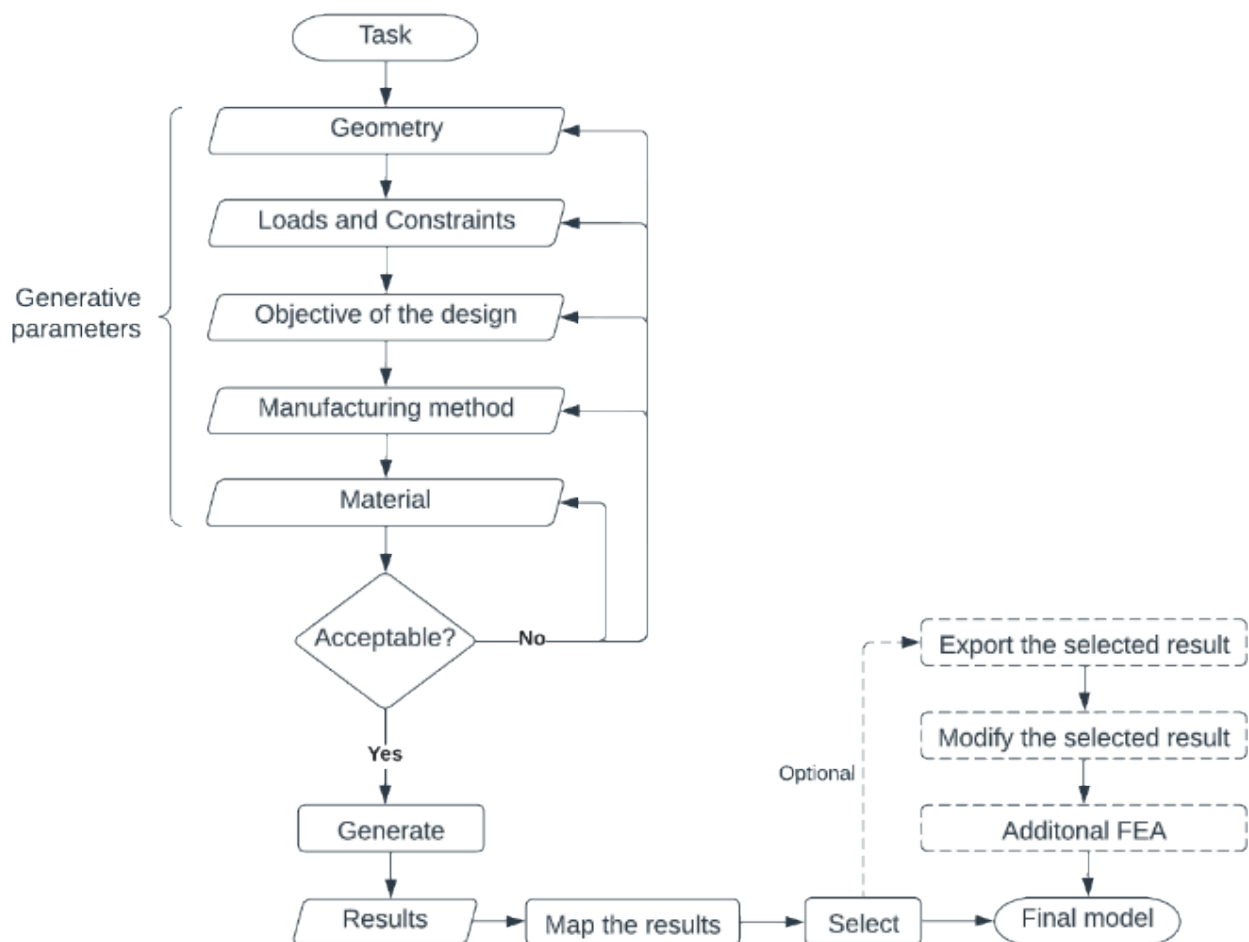


Figure 1. The process of generative design [4]

To solve these problems, it is very important to set the correct printing parameters and examine how they influence the mechanical properties.

The manufacturing challenges can be critical in industrial applications, for instance in the case of 3D printed gears they can affect the reliability and performance of the gears [11]. This draws attention to the fact that additive manufacturing has limits, and the production technology and material of the part must be selected with great care, in accordance with the application.

3. CIRCULAR PRINCIPLES

The circular economy (CE) differs from the traditional linear model of economy. The main goals of the circular economy are to reduce the use of primary raw materials and the loss of resources. The circular economy is a system-based model, called „circular”, because it preserves the value integrated into products by keeping them in a closed loop for as long as possible.

Value preservation can be achieved through reuse, repurposing, repair and maintenance, recycling, refurbishment, remanufacturing and recovery.

3.1. Circular design principles

When applying the principles of the circular mindset to drone manufacturing, it requires drastic changes throughout the life cycle of the product, such as how materials are chosen, the design process, production methods, utilization, and management after the servicing life of the product.

Considering this, product design guidelines aligned with the goals of the circular economy can be summarised as follows:

Product life extension related principles:

- Creating durable products,
- Designing modular products,
- Designing products that are easy to maintain and repair,
- Designing products that can be easily upgraded,
- Designing products that can be easily disassembled and reassembled.

Material related principles:

- Incorporating recycled and/or recyclable materials,
- Designing for easy material recovery,
- Minimising material use with not completely filled internal areas,
- Minimising material use with proper geometry,
- Minimising material consumption by using advanced materials with improved mechanical properties.

In addition, the choice of manufacturing technology is also an important aspect. Circular guidelines require the use of energy-efficient and low-waste production technologies, and generative design combined with additive manufacturing fits well into these sustainable engineering principles.

3.2. Business model related principles

The circular economy model forces manufacturers to take responsibility for their products throughout the entire product life cycles. Manufacturers can support this by:

- Operating a service network,
- Creating repair manuals and tutorials for consumers,
- Producing spare parts,
- Operating return logistics systems,
- Ensuring the integration of waste into the secondary raw material stream.

3.3. Sustainable materials in drone manufacturing

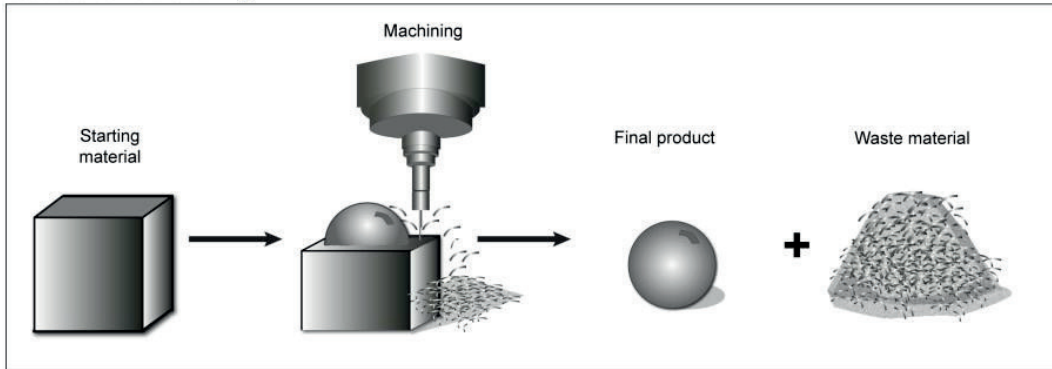
Carbon fiber composites are now widely used in drone manufacturing due to their remarkable stiffness, durability, and strength-to-weight ratio.

However, the production of conventional carbon fibre requires a lot of resources and is challenging to recycle, which causes problems for the environment and the economy. Recent efforts have shifted toward utilising Recycled Carbon Fiber Composites (rCFCs) to enhance sustainability in drone design and production [12].

The RECICOM project is one of the most prominent efforts in this field. Its goal is to develop hydrothermal recycling methods for recovering high-quality carbon fibres from thermoset composite waste [12]. The mechanical qualities of the fibres can be preserved for use in new components by using this technique to separate the resin and fibres under controlled heat and pressure. Examples of non-structural and semi-structural drone components that can be repurposed from these recycled fibres include arms, landing gear, and housing panels. Their performance is sometimes comparable to that of virgin carbon fibres when used in non-woven or short-fiber mat formats [12]. Because they can retain 80 – 90 % of their initial mechanical strength, rCFCs are a good substitute for other materials. rCFCs not only provide advantages for the environment, but they are also cost saving alternatives. This is especially beneficial for drone producers who want to scale sustainably or who work under strict financial limits.

There are still difficulties, especially when it comes to preserving fibre alignment, scaling up recycling procedures, and guaranteeing matrix bonding homogeneity.

Subtractive manufacturing



Additive manufacturing

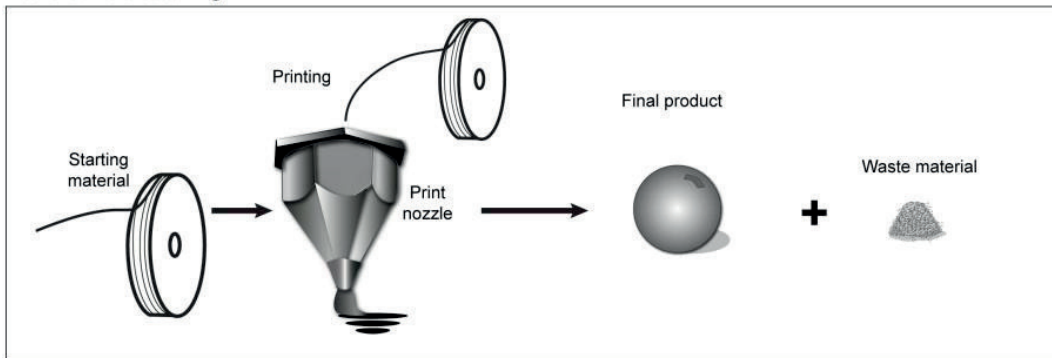


Figure 2. Subtractive and additive manufacturing [7]

However, these problems are progressively being lessened thanks to developments in preprocessing, automated layout, and material handling.

By encouraging material recovery, lifecycle extension, and a decrease in embodied energy, the incorporation of rCFCs into UAV production is in line with the concepts of the circular economy.

With a focus on incorporating recycled materials to lessen environmental effect, improve material efficiency, and advance sustainability, circular economy principles have progressively influenced drone manufacturing processes over the past five years.

Roboze, producer of industrial 3D printers, has a circular economy initiative: recycling broken or unused 3D printed parts into affordable filaments [13]. These types of initiatives support circular drone manufacturing at both ends of the raw material-production-use-waste cycle. On the one hand, it provides an opportunity to recycle the material of worn drone components, and on the other hand, it allows drone parts to be manufactured from recycled materials.

One major issue with drone systems is electronic waste. In 2024, a study presented vitrimer-based PCBs (vPCBs), which are recyclable, repairable, and physically and electrically stable [14]. The environmental impact of

e-waste in drones can be reduced by using this type of PCB.

Bio-based and/or bio-waste-containing materials could be potential materials for sustainable drone production. Bio-based materials offer improved sustainability metrics due to their biodegradability. Furthermore, enriching bio-based polymers with nature-derived materials can even enhance mechanical properties, as demonstrated in a study, where a PLA matrix material containing hemp powder was produced for 3D printing: 3D printed specimens made of PLA/hemp composite showed a higher elastic modulus than pure PLA samples [15].

A peer review by Kordos et al. claims that the study tackles issues with UAV recycling, including the processing of complicated electronics and carbon fibre composites [16]. For smaller drones, it advises using biodegradable parts and switching to materials that are simpler to disassemble and recycle.

Vedrtam et al. conducted a comprehensive life cycle assessment study that examines the environmental and energy impacts of several drone materials [17]. According to the findings, thermoplastic matrices and modular designs are thought to be crucial components for improving recyclability and reducing embodied energy.

4. SYNERGY BETWEEN GENERATIVE DESIGN, ADDITIVE MANUFACTURING AND CIRCULARITY IN DRONE MANUFACTURING

The combination of generative design, additive manufacturing, and circular economy principles offer a highly compelling opportunity for more environmentally friendly and efficient drone manufacturing by creating a sustainable design for manufacturing system. Each of these areas has an impact on sustainability on its own but

pairing them maximises the sustainability outcome. This systems-based approach reduces the environmental impacts of drone products throughout their entire life cycle, thereby achieving the goals of the circular economy model.

Figure 3 illustrates the interactions between the three investigated areas. The overlapping areas in the diagram highlight the synergistic benefits of the integration.

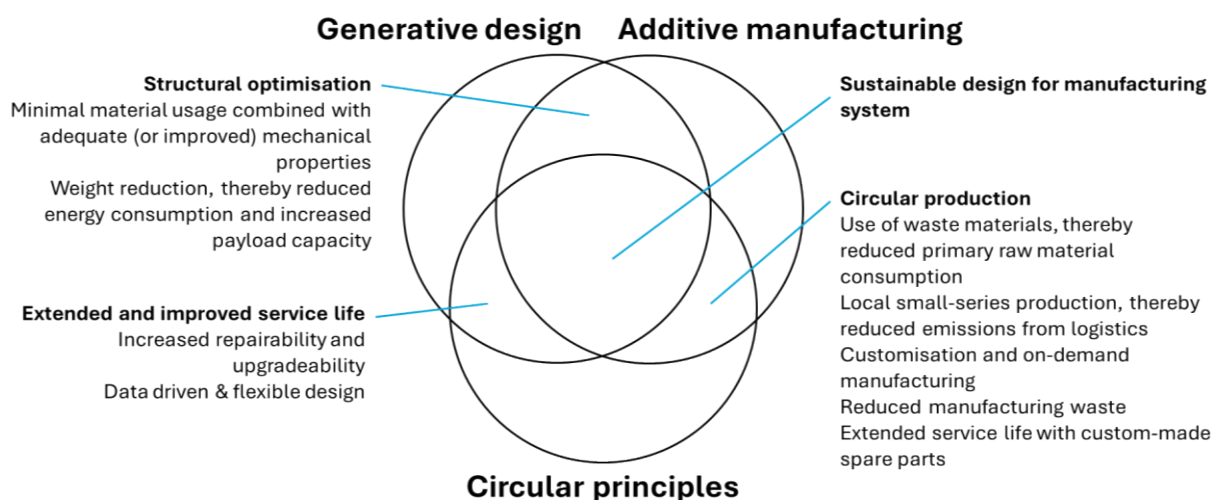


Figure 3. Intersections of generative design, additive manufacturing, and circular principles in drone production

Additive manufacturing can realize structurally optimized, weight-reduced, generatively designed parts with minimal material use and waste generation, increasing material efficiency. Weight reduction is not only carried out through structural optimization, but also through the possibility of creating hollow structures. Lightweight components designed with these considerations help reduce the energy consumption of drones, which can increase flight time and payload capacity.

Additive manufacturing also supports circular production, with the possibility of small-series, local production, thereby reduced environmental pollution from transportation. Additive manufacturing is a low-waste technology, that reduces manufacturing waste. The use of recycled materials can reduce the consumption of primary raw materials. This combination preserves the value stored in the material on both sides of the production cycle. Finally, service life extension can be achieved with additively manufactured custom-made spare parts.

Integrating circular principles into the generative design process could be a future goal and research direction. This can be accomplished, for example, by incorporating life cycle data or assembly/disassembly considerations into the design process.

5. SUMMARY

The emergence of drones in more and more industries makes it necessary to investigate their sustainability. The framework presented in this article can help to produce more environmentally friendly drone components.

The integration of generative design, additive manufacturing, and circular principles enables sustainable drone production and even the realization of a closed-loop, design for manufacturing system.

A continuation of the research could be the design and testing of drone components that fit this framework.

6. ACKNOWLEDGEMENT

SUPPORTED BY THE UNIVERSITY RESEARCH SCHOLARSHIP PROGRAM OF THE MINISTRY FOR CULTURE AND INNOVATION FROM THE SOURCE OF THE NATIONAL RESEARCH, DEVELOPMENT AND INNOVATION FUND.



Acknowledgement to the CIRCLETECH project (101079354) funded by the Horizon Europe programme of the European Commission.

7. REFERENCES

- [1] S. A. H. Mohsan, N. Q. H. Othman, Y. Li, M. H. Alsharif, and M. A. Khan, "Unmanned aerial vehicles (UAVs): practical aspects, applications, open challenges, security issues, and future trends," *Intell Serv Robot*, vol. 16, no. 1, pp. 109–137, Mar. 2023, [doi: 10.1007/s11370-022-00452-4](https://doi.org/10.1007/s11370-022-00452-4).
- [2] PwC Drone Powered Solutions, "Drone Deliveries: Taking Retail and Logistics to New Heights," 2024. Accessed: Apr. 10, 2025. [Online]. Available: https://cee.pwc.com/pdf/nf/PwC_DPS_Global_Drone_Deliveries_Report.pdf
- [3] European Commission, *A new Circular Economy Action Plan*. Brussels, 2020.
- [4] E. Borsodi and Á. Takács, "Generative Design: an overview and its relationship to Artificial Intelligence," *Design of Machines and Structures*, vol. 12, no. 2, pp. 50–55, Nov. 2024, [doi: 10.32972/dms.2022.013](https://doi.org/10.32972/dms.2022.013).
- [5] K. Szabó, "A brief overview of genetic algorithms," *Design of Machines and Structures*, vol. 13, no. 2, pp. 113–120, Nov. 2023, [doi: 10.32972/dms.2023.021](https://doi.org/10.32972/dms.2023.021).
- [6] L. Zhou *et al.*, "Additive Manufacturing: A Comprehensive Review," *Sensors*, vol. 24, no. 9, p. 2668, Apr. 2024, [doi: 10.3390/s24092668](https://doi.org/10.3390/s24092668).
- [7] United States Government Accountability Office, "Department of Defense's Needs to Systematically Track Department-wide 3D Printing Efforts," Oct. 2015. Accessed: May 05, 2025. [Online]. Available: <https://www.gao.gov/assets/gao-16-56.pdf>
- [8] Cs. Dömötör, "Reconstruction of simple parts using FDM technology," *Design of Machines and Structures*, vol. 13, no. 2, pp. 13–21, Nov. 2023, [doi: 10.32972/dms.2023.013](https://doi.org/10.32972/dms.2023.013).
- [9] P. Ficzer, "Surface Anisotropy on 3D Printed Parts," *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, vol. 68, no. 3, pp. 272–277, Jul. 2024, [doi: 10.3311/PPme.37770](https://doi.org/10.3311/PPme.37770).
- [10] H. Alzyod, J. Takacs, and P. Ficzer, "Improving surface smoothness in FDM parts through ironing post-processing," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 43, no. 11–12, pp. 671–681, Jun. 2024, [doi: 10.1177/07316844231173059](https://doi.org/10.1177/07316844231173059).
- [11] K. Shaaya and F. Sarka, "Manufacturing issues with 3D-printed gears mechanical properties," *Design of Machines and Structures*, vol. 14, no. 2, pp. 74–83, Nov. 2024, [doi: 10.32972/dms.2024.016](https://doi.org/10.32972/dms.2024.016).
- [12] Titania Ensayos y Proyectos Industriales S.L., "Titania drives the full recyclability of composite materials in the aeronautics sector with the RECICOM project," *Official webpage of the company*, May 09, 2023. Accessed: May 05, 2025. [Online]. Available: <https://titania.aero/en/titania-drives-the-full-recyclability-of-composite-materials-in-the-aeronautics-sector-with-the-recicom-project>
- [13] H. Everett, "Roboze launches circular economy program for waste material and 3D printed parts," *3D Printing Industry*, Oct. 20, 2021. Accessed: May 05, 2025. [Online]. Available: <https://3dprintingindustry.com/news/roboze-launches-circular-economy-program-for-waste-material-and-3d-printed-parts-198091/>
- [14] Z. Zhang *et al.*, "Recyclable vitrimer-based printed circuit boards for sustainable electronics," *Nat Sustain*, vol. 7, no. 5, pp. 616–627, Apr. 2024, [doi: 10.1038/s41893-024-01333-7](https://doi.org/10.1038/s41893-024-01333-7).
- [15] B. Coppola, E. Garofalo, L. Di Maio, P. Scarfato, and L. Incarnato, "Investigation on the use of PLA/hemp composites for the fused deposition modelling (FDM) 3D printing," 2018, p. 020086. [doi: 10.1063/1.5045948](https://doi.org/10.1063/1.5045948).
- [16] A. Kordos, M. Kmiotek, W. Żyłka, and T. Muszyński, "The Problem of Recycling of Unmanned Aerial Vehicles," *Advances in Science and Technology Research Journal*, vol. 18, no. 7, pp. 277–288, Nov. 2024, [doi: 10.12913/22998624/193478](https://doi.org/10.12913/22998624/193478).
- [17] A. Vedrtam, H. Negi, and K. Kalauni, "Materials and Energy-Centric Life Cycle Assessment for Drones: A Review," *Journal of Composites Science*, vol. 9, no. 4, p. 169, Mar. 2025, [doi: 10.3390/jcs9040169](https://doi.org/10.3390/jcs9040169).

PET PALACKOK ERGONÓMIÁJA

ERGONOMICS OF PET BOTTLES

Dr. Dömötör Csaba*

ABSTRACT

The article analyzes the basic functions of standard-sized PET bottles from an ergonomic perspective. Accordingly, it analyzes the storage, closing, opening, sealing, emptying, stability, gripping and information transfer functions from the user's perspective. It shows good and bad practices.

1. A PET, MINT ALAPANYAG

A polietilén-tereftalát (PET) az egyik legelterjedtebb polikondenzációs műanyag, amit 1941-ben szabadalmaztattak. Nathaniel Wyeth, a Dupont mérnöke csak 1967-ben kezdte el vizsgálni a szénsavas italok műanyag palackokban történő tárolásának lehetőségét, majd 1973-ban megkapta a palackok szabadalmát.

Kiváló kémiai és mechanikai tulajdonságai miatt napjainkban is a PET az italos palackok legelterjedtebb alapanyaga. Ebből a szempontból a legfontosabb ismérvei a kiemelkedő hőformázhatóság, nagy ütésállóság, kiváló átlátszóság, jó hidegállóság, méretstabilitás, kiváló mechanikai tulajdonságok, kémiai ellenállóképesség. Mindezen tulajdonságok teszik alkalmassá élelmiszersomagolásra. Jelen cikk kifejezetten a normál méretű, legfeljebb 2 literes termékek ergonómiáját vizsgálja vásárlói szemszögből (1. ábra), hiszen a 3-20L közötti űrtartalmú tárolóedények jóval szűkebb felhasználói kört érintenek.



1. ábra Normál méretű PET palackok [5].

2. ALAPFUNKCIÓK

Egy italos palack legfontosabb feladata a folyékony élelmiszer hosszú ideig történő megbízható, higiénikus és szivárgásmentes **tárolása**.

Ehhez szorosan kapcsolódnak a **zárás** és **tömítés**, mint alapfunkciók. A tárolt ital problémamentes hozzáférhetőségének feltétele az egyszerű **nyitás** és **ürítés**. A használat során szintén fontos szempontok a

stabilitás, valamint a biztos **megfogás**, míg a termék értékesítéséhez, fogyasztásához és újrahasznosításához elengedhetetlen egy széleskörű **információátadás**, ami a PET palack falán vagy a rárogzított címkéken történhet.

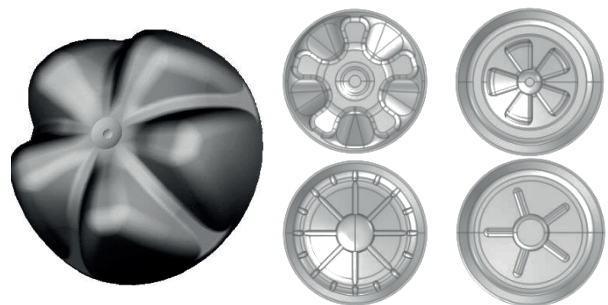
Mindezen funkciók megvalósításának fontos, felhasználóközpontú ergonómiai szempontjai is vannak. A legújabb Európai Unió szabályozások miatt a PET csomagolásokon az elmúlt időszakban több módosítást is végre kellett hajtaniuk a gyártóknak, ami elsősorban a zárókupak, valamint a feliratok kialakítását érintette.

A cikk következő fejezetei ergonómiai szempontok szerint vizsgálják a PET palackok ezen egymással összefüggő funkcióit.

3. TÁROLÁS, STABILITÁS

Egy palack legfontosabb és megkerülhetetlen feladata a tárolás. Ennek legelső ergonómiai szempontja a tárolható folyadék **menyisége**, hiszen felbontás után, a levegővel érintkezve az italok többsége gyorsabban veszít a minőségéből, mint bontatlanul. Fogyasztói szempontból – 1 személy esetén – meg kell különböztetni az egyszeri (2dl-5dl) és a többszöri (5dl-2l) fogyasztásra szánt kiszerveket. A kisebb palackok emellett alkalmasabbak kell legyenek a **kézi hordozásra**, míg a nagyobbak a **stabil tárolást** kell jobban támogatassák.

A tervezés során ergonómiai és esztétikai követelményeket is figyelembe kell venni, hogy a palack a fogyasztó számára praktikumot, használhatóságot és esztétikai vonzerőt is biztosítson. Tároláskor elsődleges szempont a merevség [11], de ergonómiai szempontból lényeges, hogy a talpára helyezett palack a legtöbb közel vízszintes felületen stabilan megálljon.



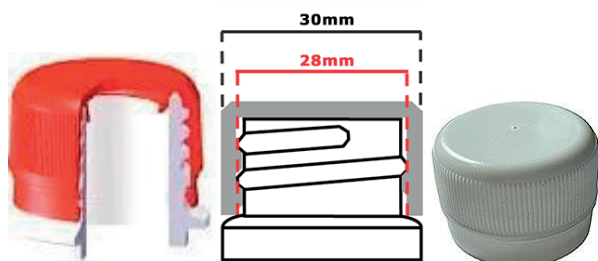
2. ábra Hagyományos palack alapok.[3][11]

Erre legelterjedtebb megoldás a palackok alján kialakított 5...8 ágú csillag keresztmetszetű domborítás (2. ábra). Ezzel az alsó merevítést is szolgáló, több-

* egyetemi docens, Miskolci Egyetem Gép- és Terméktervezési Intézet

pontos alátámasztást biztosító geometriával a palack még puha felületen (pl fűvön, kavicsos, homokon) is stabil tud maradni, sőt alkalmas arra, hogy a talajban önmagának alakítson ki egy billenésmentes alátámasztó felületet.

Szintén a tároláshoz kapcsolódó elvárás az élelmiszer-biztonsági és **higiéniai** követelmények betartása és ellenőrizhetősége. Ennek jó alapot biztosít a polietiléntereftalát alapanyag átlátszósága, hiszen könnyen szemrevételezhető a palack tartalmának tisztasága.



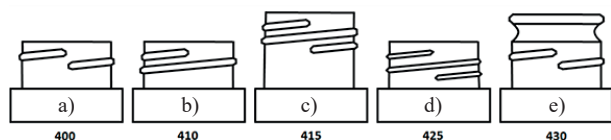
3. ábra Hagyományos palack alap.[3]

Szintén a higiéniát szolgálja a zárókupak kialakítása, ami körbevéve a palack száját tökéletesen elzárja a szennyeződésektől a kiöntőnyílást. (3. ábra)

4. ZÁRÁS, TÖMÍTÉS, NYITÁS

A kupak kialakítása számos ergonomiai alapelvnek és jogi szabályozásnak is meg kell feleljen. A már említett higiéniai elvárásokhoz kapcsolódik a kupak alján lévő **garanciagyűrű**, ami az első nyitáskor leválik a kupakról. Ez egyértelműen jelzi a fogyasztó számára, hogy az adott termék már nincs a gyártó által garantált steril állapotban.

Az Európai Unió 2019/904-es számú irányelve szerint 2024 nyaratól azonban a garanciagyűrű már nem válhat le teljesen a kupakról. Az EU ezzel a döntésével több újrahasznosítást és kevesebb műanyag csomagolási hulladék-kibocsátást szeretett volna elérni. Ha a kupak nyitást követően is a flakon nyakához rögzített, akkor azokat jó eséllyel flakonokkal együtt összegyűjtik újrahasznosítás céljából, így elkerülhető a gondatlanul eldobott kupakok által okozott környezetterhelés. A szabályozás számos feltételt megfogalmazott az új kupakokkal szemben, így azoknak kompatibilisnek kell maradniuk a meglévő előforma-kialakításokkal, szájnyílásokkal, menettípusokkal és töltőrendszerekkel.



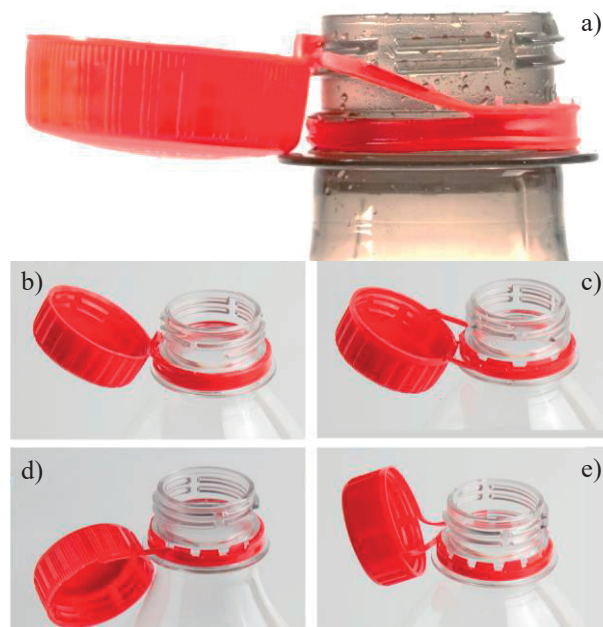
4. ábra Hagyományos PET menettípusok.[3]

a) 1 menetfordulatú; b) 1,5 menetfordulatú;
c) 2 menetfordulatú magas nyakú kivitel;
d) 2 menetfordulatú keskeny menettel; e) peremes végződésű

A végfelhasználó kényelmét sem szabad csökkenteni, vagyis a fogyasztóra gyakorolt hatást a lehető legalacsonyabb szinten kell tartani. A kupakoknak a

termék teljes életciklusa alatt egészen az újrahasznosításig a flakonhoz kell kapcsolódnia. A kupakok funkcionalitása 15 alkalommal történő nyitás és zárás után sem változhat. A kupak és a flakon közötti kapcsolatnak legalább 25 N húzóerőt kell kibírnia. [10]

Az elválaszthatatlan kupakra több megoldás is született, amikből néhányat a 5. ábra szemléltet.



5. ábra Elválaszthatatlan kupakmegoldások [10]

További higiéniai szempont a **tömítés**, ami a nagy széndioxid tartalmú italok rázkódása során kialakuló magas belső nyomás esetén is el kell lássa funkcióját, vagyis a palack tartalma nem szivároghat ki. Ez a tömítőképeség a palack nyílásánál kiképzett menetes kötés meghúzásának hatására alakul ki a nyílás felső pereme és a kupak belső felülete között. (3. ábra)

A kupak csak akkor tekinthető megfelelően lezártnak, ha a tartályban lévő folyadék nem szivárog ki és a tartályon kívüli anyagok sem tudnak bejutni. Ezenkívül a végfelhasználónak képesnek kell lennie arra, hogy ésszerű erőfeszítéssel kinyissa a palackot. Egy normál 28mm-es kupakkal ellátott üdítő PET palack átlagos **meghúzási nyomatéka** gyártótól függően általában 2-3 Nm, míg a nyitási nyomatéka 1-2 Nm körül van.

A mérések szerint a lezárás után 24 órával mért nyitási nyomatékigény a gyárban alkalmazott valós meghúzási nyomaték 40-60%-a lesz [8, 9]. Ezeket az értékeket azonban befolyásolja az eltelt idő, valamint a kötésre ható hőhatások is. Egy 1999-es kutatásban megvizsgálták az idő hatását a kupak eltávolítási nyomatékára és megállapították, hogy bármely zárási nyomatéknál a nyitási nyomaték az első 10 napban nőtt, majd lassan csökkent [7].

A tapasztalatok szerint a 28mm-es kupakoknál általában használt 2-3 Nm zárási nyomaték mindig biztosítja, hogy a palack megfelelően zárva maradjon, de

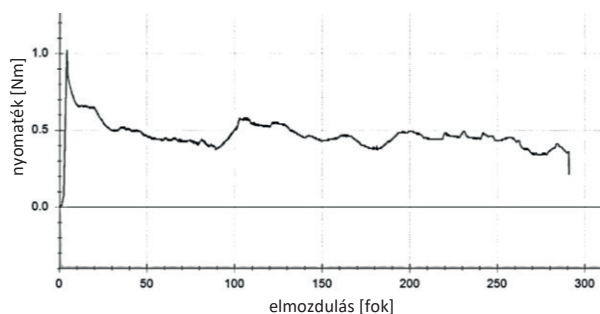
ugyanakkor az eltelt időtől függetlenül könnyen nyitható is legyen a fogyasztók számára.

Az 1. táblázat a Kinex Cappers palackkupakoló, töltő és tesztelő gépeket gyártó amerikai vállalat által közzétett zárási és nyitási nyomatókat tartalmazza különböző kupakméretek esetén.

1. táblázat PET palackok átlagos zárási és nyitási nyomatókai [8]

Kupak mérete [mm]	Zárási nyomatók [Nm]		Nyitási nyomatók [Nm]	
	min	max	min	max
10	0,45	0,90	0,23	0,45
13	0,56	1,02	0,28	0,51
15	0,56	1,02	0,28	0,51
18	0,79	1,13	0,40	0,56
20	0,90	1,36	0,45	0,68
22	1,02	1,58	0,51	0,79
24	1,13	2,03	0,56	1,02
28	1,36	2,37	0,68	1,19
33	1,69	2,82	0,85	1,41
38	1,92	2,94	0,96	1,47
43	1,92	3,05	0,96	1,53
48	2,15	3,39	1,07	1,69
53	2,37	4,07	1,19	2,03
58	2,60	4,52	1,30	2,26
63	2,71	4,86	1,36	2,43
70	3,16	5,65	1,58	2,82
83	3,62	6,78	1,81	3,39
89	4,52	7,91	2,26	3,95
110	5,08	7,91	2,54	3,95

Ergonómiai szempontból az első nyitás a legfontosabb, aminek egy konkrét mérésből származó, de általánosan is jellemző nyomatógörbéjét a 6. ábra szemlélteti. Záráskor a fogyasztók erőnlététől függetlenül képesek a megfelelő tömítettséghez szükséges minimális zárási nyomató alkalmazására.



6. ábra Nyitási nyomatógörbe [8]

A nyitási és zárási nyomatók eléréséhez szükséges fogási szorítóerő-igény minimalizálása szintén ergonómiai szempont. Ennek érdekében a kupakok külső

oldalfalán csúszásgátló barázdákat kell kialakítani, ami tovább javítja a termék kezelhetőségét. Alapvető elvárás, hogy az akár nagy szorítóerővel elforgatott kupakok ne okozhassanak sérülést a felhasználó ujjain vagy tenyerén.

5. MEGFOGÁS, ÜRÍTÉS

A kisebb palackokat jóval gyakrabban használják közvetlenül ivásra, míg a felhasználók a nagyobbakból inkább pohárba töltik a folyadékot. Ezt az eltérő használati szokást a palackok tervezésekor is figyelembe kell venni.

A kisebb palackokat egykezes használatra kell tervezni, hiszen akár sportolás közben is **stabil fogást** kell biztosítani. A palack dereka valójában egy ergonomikusan kialakított markolat kell legyen, ami akár még az ujjakat is leköveti, így tökéletesen illeszkedik a kézbe. De a legegyszerűbb megoldás a palacktest keskenyítése, valamint a hossz tengelyre merőleges csúszásgátló bordák elhelyezése a külső felületen, ahogyan az az 1. ábra bal felén bemutatott termékeken is megfigyelhető.

Kis méretű palackoknál kevésbé jelentősek az **oldalfal merevítési** feladatok, viszont ahogy nő a palackméret, úgy egyre nagyobb hangsúlyt kell fektetni az egykezes kiöntéskor a tárolt folyadék tömegéből származó hajlító erőhatásokra. Ez a környezetvédelmi vagy éppen egyszerűen költséghatékonysági szempontok miatti alapanyagmegtakarítás során tömegcsökkentett flakonokra fokozottan igaz. A 2 literes palackok mérete már túl nagy ahhoz, hogy egy kézzel kezeljük és a gyenge palackfalak miatt a helyzet egyre rosszabb. Mivel a fogyasztónak szinte össze kell szorítania a falakat ahhoz, hogy szilárdan tarthassa a terméket, gyakran akaratlanul is kipréseli a folyadékot, amikor kinyitja az üveget és megpróbálja az üdítőt kitölteni. [2]

Emiatt a felbontott palack kezelése a szerkezeti tervezés része. Egy 1,5...2 literes palack műanyag falának vastagságát nem szabad mérnöki számítások nélkül meghatározni. Egy flakon merevségét ugyanis nemcsak a gyártás során levegőnyomással hőformázott előgyártmány tömegéből adódó oldalfalvastagság határozza meg. Komoly anyagmegtakarítás és oldalfal merevség-növelés érhető el megfelelő **palackforma** tervezésével. Az oldalfal merevsége szintén bordázatokkal növelhető a legkönnyebben, de sok gyártó választ egyedi formát vagy mintázatot (pl. kristálminta, vízceppalak, stb.), amelyek szintén jól működnek, jól felismerhető termék-megjelenést, valamint esztétikai élményt is biztosítanak.

Az ürítés funkcióhoz tartozik a palack **szájméretének** meghatározása is. Közvetlenül a flakonból iváskor előnyösebb a szűkebb szájméret, míg kitöltéskor a szélesebb nyílás könnyíti meg a fogyasztó dolgát, hiszen azon könnyebben tud „levegőt venni” a palack és így elkerülhetők a csapkodó kitöltésből vagy a flakon behorpadásából származó kellemetlenségek.

6. INFORMÁCIÓÁTADÁS

A italos flakonok, mint élelmiszersomagolások, több előírásnak is meg kell feleljenek információátadás szempontjából. Ergonómiai szempontból itt kiemelt szerepe van a feliratok és grafikai jelek fontosság szerinti méretosztályainak és tipográfiájának. Ezek közül elsődleges a termék **megnevezése** (pl. márkanev) és **besorolása** (pl. szénsavas üdítőital) valamint **menyisége**. Továbbá meg kell jelenjen az **összetevők** felsorolása mennyiség szerinti sorrendben, **allergén anyagok** kiemelése, átlagos **táptérték** táblázat, **minőségmegőrzési** és **tárolási** információk, gyártó és/vagy **forgalmazó** neve, **vonalkód**, **visszaváltás** jelzése, **újrahasznosítási kategóriák** jelei, **egyéb** kötelező jelzések.

Jelen cikkben a visszaváltási jelzés ergonómiáját emelem ki. Magyarországon 2025. január 1-től hatályos 450/2023. (X. 4.) Kormányrendelet szabályozza a visszaváltási díjas termékek forgalmazását [12], aminek jelölésrendszeréről a MOHU MOL Hulladékgazdálkodási Zrt részletes útmutatót is közzétett [13]. Ebben a könnyű felismerhetőségért egyértelműen rögzítésre kerültek a pozíció és méretelőírások. Ergonómiai szempontból kifejezetten jó választás, hogy ezt az új jelzést a vonalkód mellé kell a gyártóknak elhelyezni, hiszen a vonalkódra úgyis szükség van a visszaváltáskor.



7. ábra Visszaváltási jelzés a vonalkód mellett

7. ÖSSZEFOGLALÁS

A cikk a hagyományos méretű PET palackok alapfunkcióit vizsgálta ergonómiai szempontok szerint. Ennek megfelelően felhasználói szemszögből elemezte a tárolás, zárás, nyitás, tömítés, ürítés, stabilitás, megfogás és információátadás funkciókat, rávilágítva a jó és rossz gyakorlatokra.

8. IRODALOM

- [1] Cepriá-Bernal, J., Pérez-González, A., Mora, M.C., Sancho-Bru, J.L.: **Grip force and force sharing in two different manipulation tasks with bottles.** Ergonomics 60(7), 957-966, 2017, Taylor&Francis <https://doi.org/10.1080/00140139.2016.1235233>
- [2] Anton Steeman: **Ergonomics in Bottle Design,** Best In Packaging, 21 July 2013 <https://bestinpackaging.wordpress.com/2013/07/21/ergonomics-in-bottle-design/>

- [3] Demirel, B., Daver, F.: **The effects on the properties of PET bottles of changes to bottle-base geometry.** Journal of Applied Polymer Science (2009) Volume 114, Issue 6, pp.:3811-3818. <https://doi.org/10.1002/app.30990>
- [4] Soldo, M., Rašović, N., Vučina, A.: **Ergonomic Design of the PET Bottle for Maximum Usability.** In: Salopek Čubrić, I., Čubrić, G., Jambrošić, K., Jurčević Lulić, T., Sumpor, D. (eds) Proceedings of the 9th International Ergonomics Conference. ERGONOMICS 2022. Lecture Notes in Networks and Systems, vol.701. Springer, 2023 https://doi.org/10.1007/978-3-031-33986-8_33
- [5] Allianz Verpackung und Umwelt: **Packaging and Sustainability, Polyethylene Terephthalate** <https://www.avu-online.de/en/polyethylene-terephthalate-pet/>
- [6] Gillian Garside-Wight: **History of the world in 52 packs | 18. PET bottles,** PackagingNews, 22 Dec. 2015, <https://www.packagingnews.co.uk/features/comment/history-of-the-world-in-52-packs-18-pet-bottles-22-12-2015>
- [7] Ching-Sung Lai, Gerald Greenway: **The effect of time on cap removal Torque.** Packaging Technology & Engineering. 1999 June 99, p 34, 3p
- [8] Kinex Cappers: **Torque guidelines - Cap Application Torque Specifications** <https://www.kinexcappers.com/faq/torque-guidelines.htm>
- [9] Kinex Cappers: **About Cap Sizes & Neck Finishes,** 25 July 2016 <https://www.kinexcappers.com/blog/about-cap-sizes-neck-finishes/>
- [10] Transpack: **Az elválaszthatatlan kupak,** 2024/V., 2024 október 23. <https://transpack.hu/2024/10/23/csomagolas-rogzített-kupak-mindennapjaink-resze/>
- [11] Ge-Zhang, S.; Song, M.; Huang, Z.; Li, M.; Mu, L. Comparison and Optimization: **Research on the Structure of the PET Bottle Bottom Based on the Finite Element Method.** Polymers 2022, 14, 3174. <https://doi.org/10.3390/polym14153174>
- [12] **450/2023. (X.4.) Kormányrendelet** a visszaváltási díj megállapításának és alkalmazásának, valamint a visszaváltási díjas termék forgalmazásának részletes szabályairól <https://njt.hu/jogszabaly/2023-450-20-22>
- [13] REpont | MOHU – Dokumentumtár – Hasznos információk – **Kötelező visszaváltási díjas termékek jelölési útmutatója,** V6-2024-11 <https://repont.hu/hu/dokumentumtar>

FÉMRLŐ MŰANYAGRA ÁTTERVEZÉS - AZ ADATBÁZIS ALAPÚ MEGKÖZELÍTÉS MEGVALÓSÍTÁSÁNAK HÁTTERE

REDESIGN FROM METAL TO PLASTIC - THE BACKGROUND OF IMPLEMENTING A DATABASE- BASED APPROACH

Kalmár Krisztián*

ABSTRACT

The expectations and regulations of the present era, along with the increasingly stringent legal environment, make it necessary to develop new methods that can be cost-effective for machinery manufacturers in their efforts to reduce weight by replacing metal parts with plastic. During the redesign process, several iterative steps are required to arrive at the right part, along with the design of the tool. This time-consuming process aims to be replaced by a database-based approach, which relies on computational and measurement results. In this article, we summarize the measurement and calculation results related to the data collection required for building the database.

ABSZTRAKT

A jelen kor elvárásai, előírásai, és az egyre szigorodó jogi környezet szükségessé teszi olyan új módszerek fejlesztését, amely költséghatékony tud lenni a gépipari gyártók számára abban a törekvésükben, hogy tömeget tudjanak csökkenteni fém alkatrészek műanyaggal történő kiváltásával. Az áttervezés során számos iterációs lépésen keresztül lehet eljutni a megfelelő darab, ezzel együtt szerszám kialakításig. Ezt a hosszadalmas folyamatot kívánjuk kiváltani egy adatbázis alapú megközelítéssel, amely számítási és mérési eredményeken alapul. Jelen cikkben az adatbázishoz felépítéséhez szükséges adatok felvételével kapcsolatos mérési és számítási eredményeket foglaljuk össze.

1. BEVEZETÉS

Az utóbbi néhány évben az ipar felé támasztott igények megváltoztak. A járműgyártásban ezek az új igények főként a tömeg csökkentése felé történő elmozdulást jelentik, mivel a környezetvédelmi előírások folyamatosan szigorodnak, csökkenteni kell a károsanyagok kibocsátását. Mivel a jogi, politikai környezet adott, például a 2019/631 számú EU-s

szabályozás előírja, hogy 2035-ig 100%-kal kell csökkenteni a személygépjárművek CO₂ kibocsátást [1], meg kell találni azokat az eljárásokat, amelyek alkalmazásával a járműgyártók meg tudnak felelni a kor követelményeinek. Ezek az igények nem csak a járműgyártókat érintik, hanem a beszállítói rétegre is nyomást fejtenek ki, így közvetve ugyan, de a beszállítói oldal is érdekelt abban, hogy olyan technológiákat alkalmazzon, olyan fejlesztéseket végezzen, amelyek felhasználásával elérhetővé válik a tömeg csökkentése az elvárt műszaki tartalom mellett.

Számos lehetőség áll rendelkezésre a tömeg csökkentésére. Ilyen lehetséges eljárás, hogy a korábban alkalmazott anyagokat egy különféle szempontok szerint jól megválasztott másik anyaggal helyettesítik.

Számos esetben könnyűfémek alkalmazása megfelelő lehet, például az acélt lehet helyettesíteni alumíniummal vagy magnéziummal, de emellett az alkalmazási körnek vannak olyan szegmensei, amelyek lehetőséget biztosítanak arra, hogy műszaki műanyagok épüljenek be fémek helyett.

Jelen cikk célja, hogy ez utóbbi eset a lehetőségeit vizsgáljuk meg, és létre tudjunk hozni egy olyan módszertant, amelyet alkalmazva a fém alkatrészt műanyagra tudjuk cserélni a lehető legkevesebb áttervezési lépés során.

A műszaki műanyagok alkalmazása az ipar számára több szempontból is kívánatos. A műanyagok fröccsöntése során sokkal nagyobb gyártási pontosság érhető el, továbbá lényegesen kevesebb utólagos megmunkálási lépés az öntött fémekhez képest, ezek által a gyártási folyamat is rövidebbé válhat. A fröccsöntéssel nagyon magas ismételhetőség érhető el, amely tulajdonság előnyös a selejtarány csökkentése szempontjából, ezzel együtt a gyártási költség is csökken.

A műszaki műanyagok rugalmasan tervezhetők, mivel széles skálán változtatható összetételük, ennek okán pedig a szilárdsági és egyéb tulajdonságok elérésének lehetősége adódik. Lehetőség van különböző szálerősítő anyagok használatára, amelyek segítségével az adott műanyag szilárdsága tovább növelhető. Mivel a festék fröccsöntéshez adagolható, nem kell gyártás után festeni,

*Trimetrik Kft. mérnökség vezető

így a költségek és gyártási sebesség szempontjából ugyancsak előnyös. A sorozatgyártás során a költségek minimalizálása a profitabilitás miatt különösen hangsúlyos kérdés. Műanyagok alkalmazása a költségek szempontjából lényegesen kedvezőbb, mint a fémek alkalmazása [1]

A korszerű műszaki műanyagok felveszik a versenyt a fémek szilárdságával, ezzel együtt tömegük a sűrűség különbség miatt jóval elmarad a fém alkatrészekhez képest, és nem utolsósorban a geometriai tervezés során sokkal nagyobb a szabadság, így komplexebb alkatrészek gyárthatók. A geometriai tervezés szabadságának köszönhetően bizonyos funkciók össze is vonhatók egy alkatrészbe a korábbi megoldáshoz képest. A környezetvédelem kifejezetten fontos, és annak ellenére, hogy a műanyagokról klasszikusan az az elterjedt nézőpont, hogy terhelik a környezetet, nagyrészt újrahasznosítható, csaknem az eredeti anyag tulajdonságai érhetők el az újra feldolgozást követően.

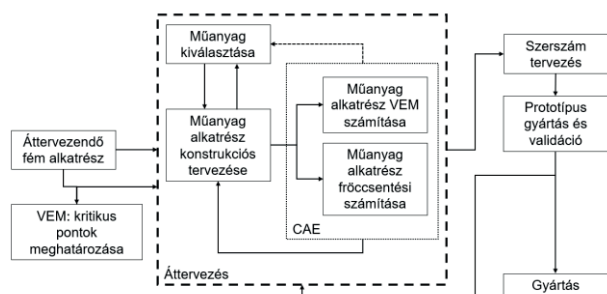
2. ÁTTERVEZÉSI LÉPÉSEK

2.1. Jelenleg alkalmazott módszertan

Az áttevezési projektek első lépése mindig az, hogy meg kell vizsgálni a gyártott alkatrészeket, és ki kell választani azokat, amelyeket jó eséllyel át lehet alakítani műanyagra, majd döntést kell hozni arról, hogy melyek azok a termékek, amelyekkel a leginkább érdemes foglalkozni. A kiválasztás szempontjai között olyan feltételek szerepelnek, mint az igénybevétel, környezeti tényezők hatásai (pl.: UV besugárzás, hőmérséklet stb.)

Az áttevezési folyamatok geometriai tervezése időigényes folyamat, mivel egy már létező, és rendelkezésre álló térfogatba kell betervezni egy alkatrészt, amelynek előírt kapcsolópontjai és funkciói vannak, és alapvetően fémből készült.

Az alábbi sematikus ábra mutatja a jelenleg alkalmazott folyamatot (1. ábra). A konstrukciós pontba visszacsatolások száma projektenként eltérő, viszont egyértelmű függést mutat a kidolgozandó geometria és funkciók komplexitásával.



1. ábra Áttevezési folyamat sematikus ábrázolása

A geometriai tervezés során több végelelemes analízist szükséges végezni. A szimulációs munka

segítségével lehetőség van digitális térben vizsgálni azokat a terhelési eseteket, amelyeknek ellen kell állnia a terméknek, habár a validációs tesztelés el nem hagyható. A szimulációs környezetben egy-egy design variáns anélkül meg tudunk vizsgálni, hogy azt le kellene gyártani, amihez szükséges szerszámozási költségek társulnak. A modellezés során viszonylag egyszerűen figyelembe lehet venni az anyag tulajdonságainak változását, így ugyanarra a geometriára egyszerre több adat is elérhetővé válik, azaz a különféle műanyagokkal elvégzett számítások támogatást tudnak adni arra vonatkozóan, hogy mi legyen az anyag, amivel dolgozni kívánunk az adott projekt keretében.

Mivel a műanyag termékeket fröccsöntjük, nem elég tudnunk azt, hogy az adott geometriai variáns szilárdsági szempontból kielégítő-e, hanem az önthetőségi szempontokat is figyelembe kell venni. Sok esetben nem csak az alap műanyagra vonatkozó öntéstechnológiát kell szem előtt tartani, hanem az esetleges szálerősítő anyag jellemzőit is figyelni kell. Ezeket a jellemzőket szimulációkkal lehet kezelni, így relatíve rövid idő alatt el lehet dönteni egy adott alkatrészről, hogy azt ki lehet-e önteni megfelelően vagy szükséges valamilyen design módosítás ahhoz, hogy elkészüljön a termék.

Ha a fröccsöntési szimuláció eredménye azt mutatja tehát, hogy nem megfelelő a geometriai kialakítás, akkor egy újabb tervezési lépést kell beiktatni, és egy újabb VEM számítás is szükséges. Ezt egészen addig a pontig kell ismételni, amíg el nem érjük a kívánt szilárdsági jellemzőket, és önthető is a kialakítás.

Ezt követően már létre lehet hozni a szerszámot, amely segítségével le lehet gyártani a prototípust, illetve a prototípuson el lehet végezni a validációs méréseket.

Kedvezőtlen esetben a validációs vizsgálatok nem hoznak megfelelőséget, így egy újabb iteráció sorozatra lesz szükség, hogy azokat a korábban figyelembe nem vett jellemzőknek is meg tudjon felelni az alkatrész, amelyeket a validációs vizsgálatok mutattak ki.

2.2. Adatbázis alapú tervezési módszertan

A projekt során arra kívánunk választ találni, hogy hogyan lehet a leggyorsabban fémről műanyagra áttérni. A cél, hogy az elvégzett vizsgálatok eredményeit fel tudjuk használni az ipari megbízásaink során, azért, hogy lényegesen gyorsabban tudjunk áttevezési feladatokat teljesíteni, ezáltal hatékonyabb támogatást tudjunk biztosítani partnereinknek.

A cél adott, azonban nem világos, hogy mely területekre kell fókuszálni a fröccsöntési próbadarabok legyártása során. Az eddigi tapasztalatok során több csoportra oszthatók azok a darabok, amelyek áttevezésre szorultak, illetve meg is valósultak.

Ebben a szakaszban egy, a saját tapasztalatainkra épített csoportosítást mutatunk be, amelyek alapján a kitűzött célunkat a legjobban meg tudjuk valósítani, és tudunk támogatást nyújtani a megrendelőinknek.

Egyszerű geometriájú alkatrészek, alacsony terhelés

Egyszerű geometriának azokat tekintjük, amelyek viszonylag kevés geometriai jellemzővel írhatók le, például valamilyen sík felületű elemek (egyszerű fedelek) vagy éppen egyszerű hengeres testek.

Az alacsony terhelések pedig az adott anyagra jellemző termikus és szilárdsági mérőszámok (szakítószilárdság, fátörési határ, kúszás stb.) értékéhez képest lényegesen kisebbek, azaz a komplex VEM-es szilárdsági számítások elvégzése nélkül is egyértelműen belátható az, hogy megfelelő lehet az alkatrész fém helyett műanyagból is.

Ezeket az alkatrészeket adatbázis alkalmazása nélkül a tervezőmérnökök át tudják alakítani műanyag alapanyagra úgy, hogy azok egyenértékűek legyenek funkcionális tekintetben a korábban alkalmazott fémekkel, de tömegük lényegesen elmaradjon azokétól.

Ilyen alkatrészek lehetnek például:

- lineáris mozgást megvalósító csúszkák,
- rögzítő elemek, amelyek terhelése elhanyagolható,
- különféle sínek, megvezető elemek,
- stb.

Esztétikai elemek

Az áttervezendő esztétikai elemek gyakran terhelés nélküli, csupán külső megjelenés szempontjából releváns alkatrészek, így szilárdsági számítás nem kell végezni rájuk. Azonban meg kell mutatni a jelenlétüket, illetve fontos, és kiemelő, hogy ezen alkatrészek esetén viszont más szempontok kapnak kiemelt figyelmet. Ilyen szempont a külső megjelenés, azaz beszívódások, vetemedés és egyéb öntési pontatlanság meg nem engedhető.

Közepes bonyolultságú elemek, közepes terhelés mellett

Olyan alkatrészek tartoznak ebbe a kategóriába, amelyek ugyan elszenvednek bizonyos külső terheléseket üzemelésük során, de azok az adott alkatrész maximális terhelhetősége alatt van. Ilyen terhelés lehet például valamilyen csavar előfeszítő erő vagy valamilyen perselyeken keresztül átadódó járulékos terhelés.

A geometria bonyolultsága közepes, ami azt jelenti, hogy alapvető mechanikai funkcióval rendelkeznek, de nem összetett felületek írják le.

Ilyen elemek lehetnek például:

- fedelek,
- kis erővel terhelt leszorító elemek,
- mozgató, mechanikus kapcsoló karok,
- stb.

Komplex geometria és komplex terhelés

Ez a csoport speciálisnak tekinthető több szempontból is. Egyrészt gyakran az áttervezés során nem elégséges egy alkatrészt műanyagra áttervezni, hanem az áttervezés során különféle funkciókat össze is kell vonni, aminek hatására a probléma bonyolultabbá válik. Másrészt pedig gyakran nem különálló darab áttervezéséről van szó,

hanem egy kisebb rendszert kell átalakítani úgy fémből műanyagra, hogy azok jelentős terheket is képesek legyenek elviselni, továbbá a rendelkezésre álló beépítési környezet is sokkal korlátozottabb, mint a többi kategória esetén.

Ezeket a speciális alkatrészeket nincsen lehetőség katalógus alapján tervezni, ugyanis az egyes kismértékű változtatások is hatalmas mértékben tértek el a szilárdsági számítások elemzése során.

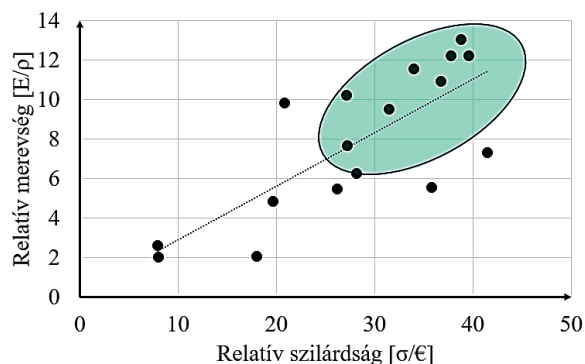
Ezek alapján könnyen belátható, hogy az adatbázist a közepes bonyolultságú, közepes terhelésű alkatrészekre érdemes felépíteni.

3. ANYAG ÉS MÓDSZER

3.1. Alkalmazott anyagok

A kutatáshoz ki lett választva számos anyagminőség, amelyeket mind szimulációs, mind pedig kísérleti úton vizsgálni kívántunk. Az ipari kutatási részhez pedig kiválasztottunk egy olyan anyagot, amely minden szempontból megfelel a céloknak.

A kiválasztás során figyelembe lett véve a szilárdság, a bekerülési költség stb., és ezek alapján egy 50% üvegszálerősítést tartalmazó PA minőség felelt meg leginkább a próbatestek gyártásához.



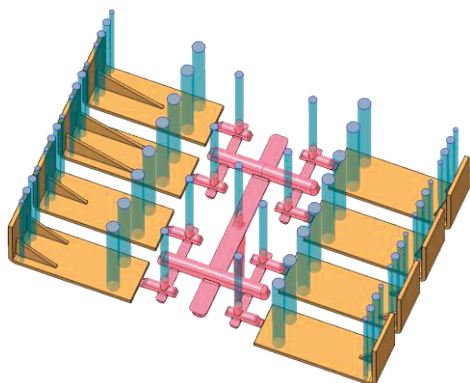
2. ábra Relatív mérőszámok összefüggése

A 2. ábra a relatív mérőszámok függvényében mutatja, hogy mely anyagok közül érdemes választani, ha a célunk egy kedvező szilárdságú, áru, merevségű anyag megválasztása. A jellemzőket a [2-12] katalógusokból vettük.

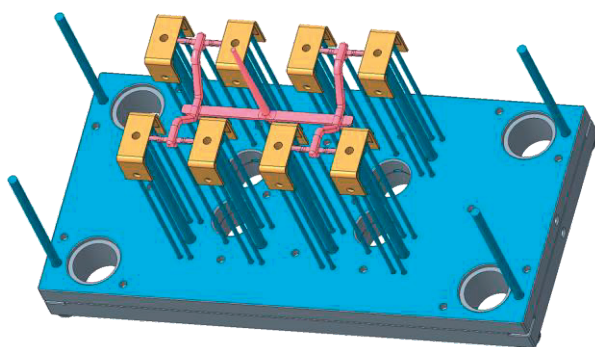
3.1. Próbatestes vizsgálatok

A próbatestek tervezése során különös hangsúlyt fektettünk arra, hogy a geometriák segítségével a lehető legszélesebb körben tudjuk lefedni a várható tervezési nehézségeket. A fröccsöntés során bordázással van lehetőség növelni a termékek merevségét, így a különféle nem szabványos próbatestek vizsgálatánál is figyelembe vettük azokat.

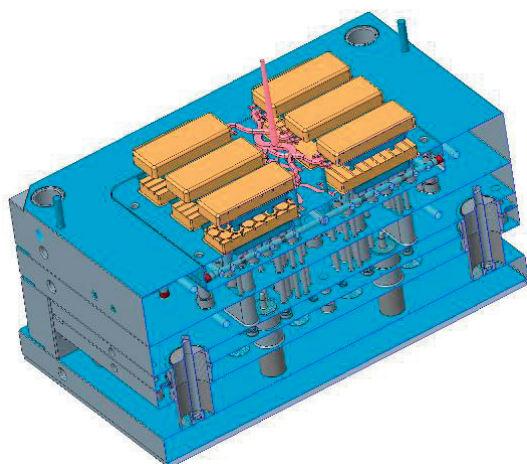
Elsődlegesen VEM számításokat végeztünk a három próbatest geometrián. Ezt követően elvégeztük a fröccsöntési szimulációkat, majd le is gyártottuk a próbatesteket, és fizikai vizsgálatok útján elemeztük a darabokat. A három próbatest típus az L-alakú húzás+hajlítás jellegű terhelések vizsgálatára alkalmas, a csavardóm próbák esetén a kialakítás jellegét tudjuk vizsgálni, míg a doboz alkatrészek esetén a hajlítás és ejtés (ütődés) jellegű behatásokat lehet vizsgálni.



3. ábra L-alakú próbatest kialakítások



4. ábra Csavardóm próbatest kialakítások



5. ábra Doboz próbatest kialakítások

A 3-5. ábrák a CAD szerszámozásban látható próbatest kialakításokat mutatják.

A fizikai kísérletekhez kiválasztott anyagok (PA, PAGF15, PAGF50 és POM) felhasználásával végeztük

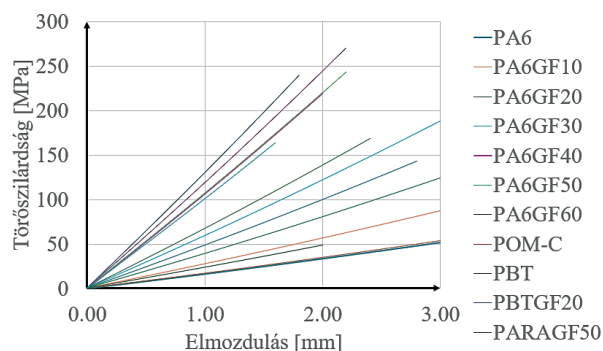
el a kívánt vizsgálatokat. CT vizsgálatok segítségével a fröccsöntési hibákat elemeztük.

4. EREDMÉNYEK

4.1. Vizsgálatok eredményei

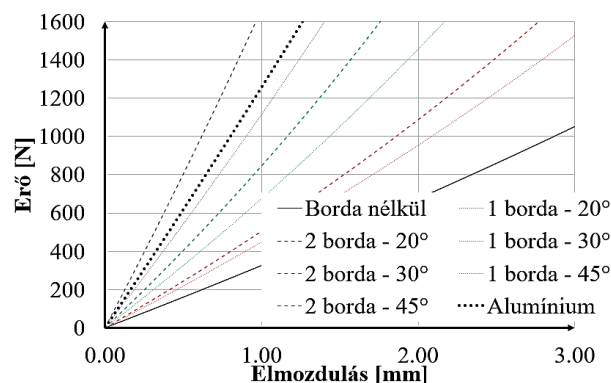
A korlátozott terjedelem miatt az L alakú próbatestes vizsgálatok eredményeit ismertetjük.

Elsőként egy egyszerűsített VEM modell segítségével elvégeztük a szükséges számításokat azért, hogy meglássuk, melyik bordázás, hogyan hat az egyes anyagok felhasználása mellett.



6. ábra VEM eredmények különféle anyagokra (borda nélküli eset)

Az alapvető cél, hogy fémeket tudjunk kiváltani, ezért a következő, egyenértékű alumíniumot feltételező esettel összehasonlításban a PAGF50 minőségű műanyag bordázási lehetőségein keresztül mutatjuk be a lehetőségeket, hatásokat. Látható, hogy a bordák kiosztásával, kialakításával tudjuk befolyásolni az eredményt, így különösen fontos az áttekintés során ismernünk a terhelési viszonyokat.



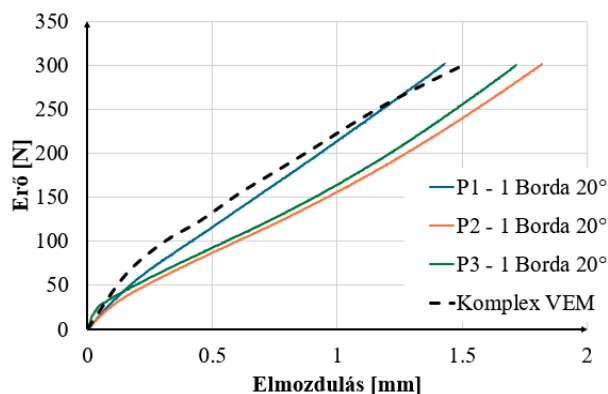
7. ábra Bordázás hatása

A 8. ábrán látható az egyik, mérőgéphez befogott próbatest a tönkremenetel előtti pillanatban. A mérőgépből nyert eredményeket a VEM számításokkal összehasonlítva a 9. ábra mutatja. Ez az összehasonlítás rámutat arra, hogy a numerikus számítások kellően pontos eredményeket biztosítanak arra, hogy a jövőben

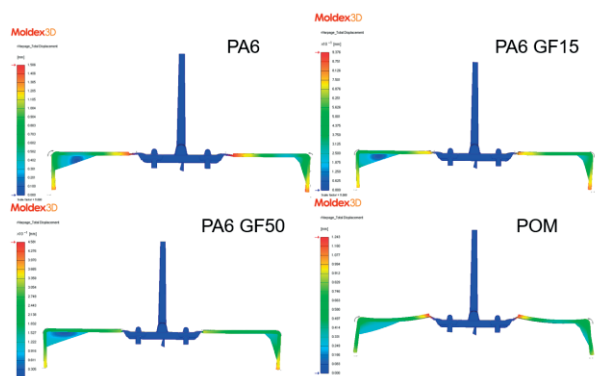
tudjuk bővíteni az adatbázisunkat. A 10. ábrán a fröccsöntési szimulációk teljes deformációját mutatjuk.



8. ábra Fizikai vizsgálat



9. ábra Szimuláció és mérés összehasonlítása



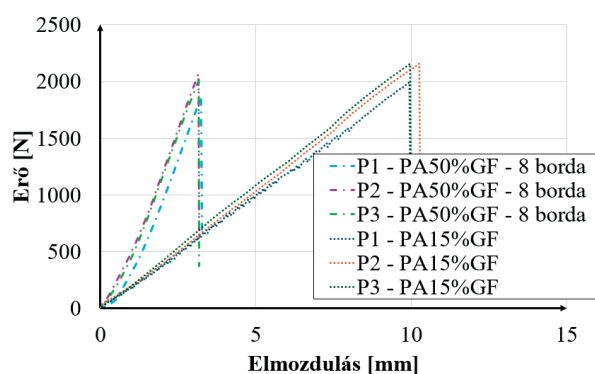
10. ábra Fröccsöntési szimuláció – teljes deformáció

4.2. Kísérleti eredmények összefoglalása

A többi próbatest esetén is elvégeztük a szükséges számításokat, mind a szilárdságit, mind pedig a fröccsöntést. A legyártott próbákat ezután egyesével fizikai vizsgálatok segítségével elemeztük.

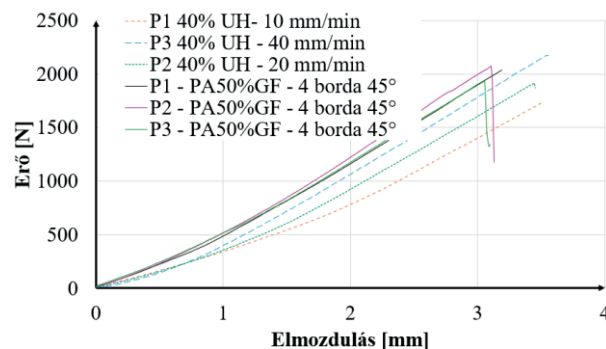
A próbák közül a leginkább fontosnak tartott néhány eset bemutatása látható a következőkben. A 11. ábrán ugyanaz a csavardóm kialakítású próbatesten, de eltérő üvegszál erősítés mellett végzett kísérletek eredménye látható. A vizsgálat célja, hogy megtudjuk, milyen kialakítás mellett mekkora terhelés kell a csavar műanyagból történő kiszakadásához.

Egyértelmű összefüggés látható az erősítő töltet jelenlétének mennyisége és a nyúlás között. A nagyobb töltetmennyiség sokkal merevebbé teszi a PA-t, így sokkal kedvezőbb módon viselkedik az alkatrész azonos terhelés mellett.



11. ábra Üvegszáltartalom hatása

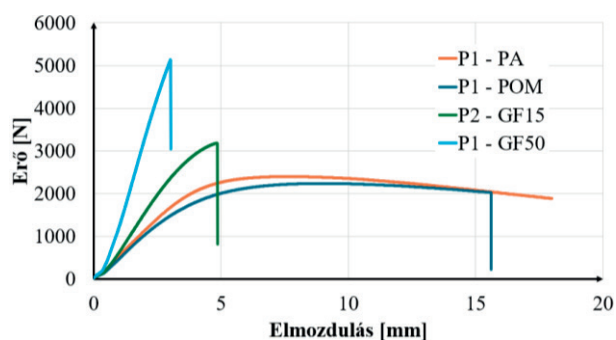
Mivel a környezetvédelem kiemelten kezelt kérdés, így újra is hasznosítottunk (UH) anyagot. Az UH típusú anyag 40%-ban újrahasznosított PAGF50-et tartalmaz. Ugyanazon próbatest kialakítással végezve, különféle terhelési sebességeket nézve meggyőző eredményeket kaptunk. A normál anyaggal a 10 mm/min sebesség hasonlítható össze, ahol is azt látni, hogy az UH jelű anyagú próba ~75%-os terhelhetőséget mutat (12. ábra).



12. ábra UH anyag viselkedése (csavardóm)

A doboz szerű alkatrészeket 3 pontos hajlítás szerű vizsgálattal elemeztük. Ebben az esetben a különféle bordázások hajlításnak való ellenállását vizsgáltuk.

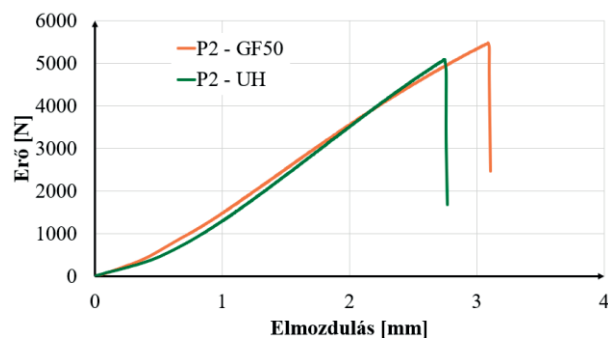
A négy vizsgált anyag esetén a következőt tapasztaltuk (13. ábra).



13. ábra Eltérő anyagok hajlítása - borda nélkül (doboz)

A töltet nélküli PA és a POM anyagok hasonlóan képesek nagy alakváltozást elszenvedni, míg a két üvegszálerősítéssel rendelkező PA minőség lényegesen nagyobb erőt tud felvenni.

A 14. ábrán a doboz jellegű próba esetén is elvégeztük az UH-s minőség ellenőrzését. Ebben az esetben kedvezőbb eredményeket kaptunk, azaz egyszerű hajlítási igénybevétel esetén közel azonos lehet az UH-s minőség, mint a teljesen új anyag alkalmazásával készített.



14. ábra UH anyag viselkedése (doboz)

5. ÖSSZEFOGLALÁS

A cikkben bemutattuk a jelenleg alkalmazott áttervezési folyamatot, és azt, hogy mi milyen kísérletek felhasználásával készítettük el azt az adatbázist, amit fel tudunk használni a jövőben a további áttervezési folyamatokban, azaz milyen irányú, milyen bordákat és milyen anyagot alkalmazzunk egyes, jól definiálható terheléssel rendelkező alkatrészek esetén. Az L-alakú próbákon részletesebben, a másik két próba esetén viszont az UH-s eredmények ismertetésével kívánunk betekintést engedni a fejlesztési munkába.

SUMMARY

In the article, we presented the currently applied redesign process and how we created the database that can be used in future redesign processes, including what types of ribs and materials to apply for parts with well-defined loads. For the L-shaped tests, we will provide more detailed information, while for the other two tests, we aim to give insights into the development work by presenting the results from the reused material's tests, as well.

6. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A bemutatott kutató munka a Magyar Multi Program keretein belül az Európai Unió támogatásával, az Európai Regionális és Strukturális Alapok társfinanszírozásával valósult meg.

Projekt azonosító száma: GINOP_PLUSZ-1.1.2-21-2022-00040

7. IRODALOM

- [1] B. Ildefonso et al.(2023) State-of-the-art Analysis on Alternative Materials for the Automotive Industry, Transportation Research Procedia 72, pp. 1560-1567
- [2] <https://www.campusplastics.com/campus/en/datasheet/ALTECH+PA66+A+1000310>
- [3] <https://www.campusplastics.com/campus/en/datasheet/CELANEX%C2%AE+2300+GV330/Celanese/163/77419d83>
- [4] https://www.dic-global.com/pdf/products/pps/en/FZ-1140-D5_TDS_EN_201610.pdf
- [5] <https://www.picoplast.nl/uploads/c3006bce7a9da366c44e3bf837b8253fGrivory%20GV%205H%20nat%20-%20MDS%20-%20EN.pdf>
- [6] <https://www.campusplastics.com/campus/en/datasheet/Grivory+GV-6H+EF+black+9915/EMS-GRIVORY+%7C+a+unit+of+EMS-CHEMIE+AG/61/5adeca97>
- [7] <https://www.picoplast.nl/uploads/913468fced561847bfbb07ef80af8161Grivory%20HTV%203H1%20black%209205%20-%20MDS%20-%20EN.pdf>
- [8] <https://www.campusplastics.com/campus/en/datasheet/Grivory+HTV-4H1+black+9205/EMS-GRIVORY+%7C+a+unit+of+EMS-CHEMIE+AG/61/5ce928bc>
- [9] <https://www.campusplastics.com/campus/en/datasheet/Grivory+HTV-5H1+black+9205/EMS-GRIVORY+%7C+a+unit+of+EMS-CHEMIE+AG/61/bd11ffb8>
- [10] <https://www.campusplastics.com/campus/en/datasheet/HOSTAFORM+C+9021/Celanese/163/59b16839>
- [11] <https://catalog.ulprospector.com/datasheet.aspx?I=42041&FMT=PDF&E=2131>
- [12] <https://resmart.com/ixefr-1022-9008-black.html>

DEMONSTRÁCIÓS CÉLÚ ELEKTROPNEUMATIKUS BERENDEZÉS FEJLESZTÉSE

DEVELOPMENT OF AN ELECTROPNEUMATIC DEVICE FOR DEMONSTRATION

Bálint Lévai*, Pálma Kapitány**

ABSTRACT

At the University of Miskolc, in Robert Bosch Department of Mechatronics students deal with the design and construction of electro-pneumatic systems in their studies. During the informative lectures and open days, visitors could look at the laboratory work. However, during external lectures and informative days, a need arises to develop a mobile demonstration device that is suitable for controlling more than one cylinder and includes a function to set up a process. Naturally, safety was an important aspect to create this demonstration device. This paper deals with electrical and control design of an interactive electropneumatic equipment.

1. INTRODUCTION

Many solutions have been developed to showcase pneumatic systems for students at secondary schools or higher levels of education [1]-[4]. Most of these systems are equipped with a PLC or a microcontroller for processing and usually paired with ordinary and relay logic elements. This paper discusses the development of such a device. Initially, a previously PLC-controlled platform was available with three pneumatic cylinders as actuators. *Figure 1.* shows the front view of the demonstration board, which includes three 5/2 monostable pneumatic valves with solenoid control.

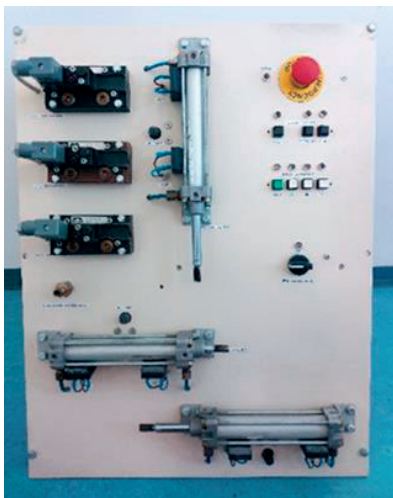


Figure 1. Front view of original platform

The electrical circuit contains an emergency push button and a main switch to turn the system on or off. To control the actuators three buttons are placed to select different modes, another three for programming sequences and one for starting them. All the mentioned buttons and switches have LEDs connected to them to indicate activation.

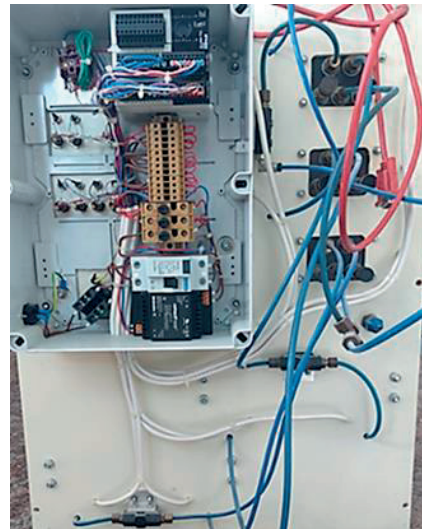


Figure 2. Back view of original platform

Figure 2. presents the back view of the original platform which utilizes a 230VAC Tracon TFF2 25A safety circuit breaker, a Mitsubishi Melsec FX2ND-16EYR-T-DS programmable logic controller, a Weidmüller 992889-0024 24W power supply with 24VDC output voltage, three slow-blow fuses, a terminal block for connecting wires of the solenoid valves, and the PLC's I/O pins. The LEDs are soldered in row with current-limiting resistors and connected to the PLC and the same terminal block. Lastly, this picture also shows the pneumatic and electrical wiring.

Based on the design decision, the PLC unit will be removed, and the entire electrical and pneumatic wiring system, along with AC safety elements, will be replaced to ensure safe operation. The initial DC power supply has passed our test, therefore it will remain in the circuit. Similarly, the original pneumatic valves and cylinders are not replaced from this construction. The output velocity of the actuators is controlled by pneumatic throttle valves

* Student specialised in mechatronics, University of Miskolc, Robert Bosch Department of Mechatronics

** Assistant lecturer, University of Miskolc, Robert Bosch Department of Mechatronics

individually as shown in *Figure 3.*, which illustrates the pneumatic circuit of the three cylinders with throttle valves and mufflers.

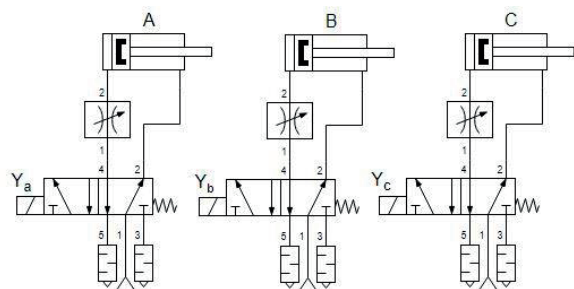


Figure 3. Pneumatic circuit the platform

Since the output velocity is controlled by a single throttle valve on the original board design the phenomenon of stick-slip cannot be avoided. To solve this issue, we plan to improve the design of the pneumatic circuit with flow control valves containing throttle and check valves in parallel on the exhaust side of the cylinders.

2. ELECTRONICS OF THE CONTROLL SYSTEM

In the renewed control system, an Arduino Uno development platform with an ATmega328 microcontroller is utilized. This presents a challenge, as the solenoid valves require 24 VDC to operate, whereas the Arduino Uno prototyping platform operates 5 VDC, making direct control infeasible. In the new design, we have included relays with optocouplers to ensure galvanic isolation, thereby providing a means to control the solenoid valves. With this configuration, both the sensor signals indicating cylinder position and the control signals for the solenoid valves can be managed by the microcontroller for each cylinder, and the associated indicator LEDs also. *Figure 4.* presents the test circuit of the renewed control box as a breadboard model.

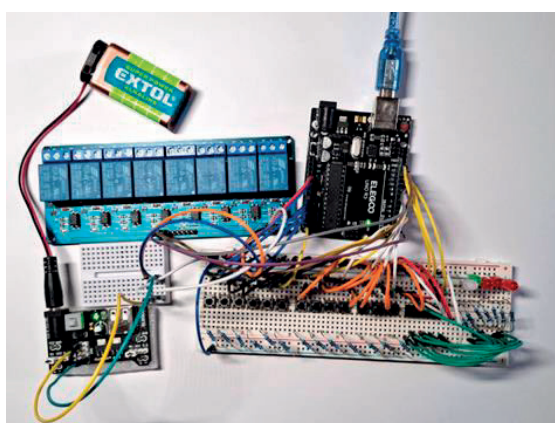


Figure 4. Test circuit of control box

Beginning from the left side of the breadboard there are six buttons to simulate the reed relays, representing each cylinder's current position. The subsequent four

buttons correspond to the Start and A, B, C buttons from the original board. The final three buttons in the row allow the user to select Manual, Learning, or Automatic operating modes. Positioned after the buttons, a 74HC595 shift register is placed which serves as additional digital output pins for the Arduino Uno development platform. The shift register is used exclusively to control the LEDs associated with the last five mentioned buttons.

In *Figure 4.*, there is a 9 VDC battery with a breadboard power supply shield which provides galvanically separated power for the controller relays that switch the solenoid valves. As previously mentioned, this relay module can grant the option to control the cylinders with the ATmega328 microcontroller. By measuring the maximum operational current drawn from the power supply shield and from the development platform, we concluded that there is no necessity for galvanic isolation between the relay controlling panel and the microcontroller. At the state where all three relays and LEDs operate, we have measured 197,6 mA drawn from the power supply shield and 21,52 mA from the prototyping platform. These measurements confirm that the microcontroller can single-handedly manage the relay module, as the total current drawn does not exceed the operational current limit of the Arduino Uno platform (500 mA from the 5 VDC output pin). Based on the design decision, the 24 VDC voltage from the originally used power supply will be connected to the solenoid valves and to an LM2596 DC-DC converter, which steps down the supply voltage to 9 VDC to provide power for the microcontroller through its V(in) pin. The development platform produces 5 VDC supply with its AMS1117 integrated circuit, which powers all elements of logic-control in the system.

3. THE SOURCE CODE'S INNER WORKING

Figure 5. shows the main structure of the program code which will be running on ATmega328 microcontroller.

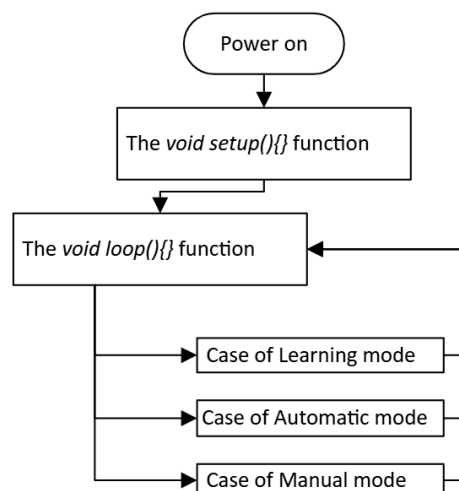


Figure 5. The flowchart of program's main structure

When the system powers up, the program declares all variables and arrays after which the void setup function is the first function to run. It initialises all inputs/outputs of the device and also clears the two state-monitoring arrays to avoid usage of any unknown data that may have occurred during declaration. The first array is used to keep track of each button's and mode's status at runtime. The second array stores the current position of each actuator at runtime to ensure that each instruction completes before the upcoming one. To achieve this, we have included the six buttons (which act as the reed relays) in a pin change interrupt service routine and mapped each button to an index of the second array. This works differently from the regular interruption method because the buttons are not monitored separately but rather by ports.

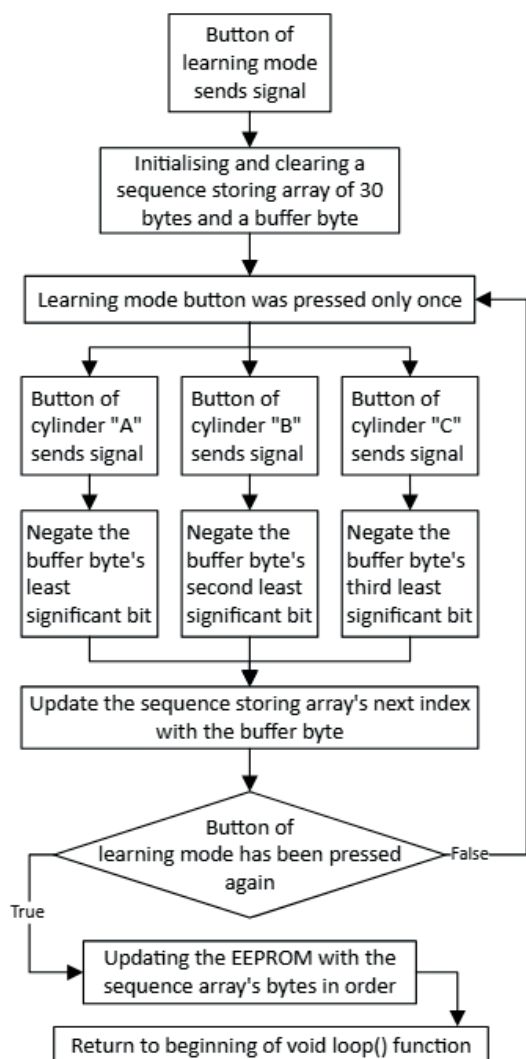


Figure 6. The flowchart of Learning mode

When one of the sensors sends a signal, this routine interrupts the main flow of the program and runs a function that changes the value in the second array at the interrupting sensor's index. The program does not continue and will not extend or retract the actuators until

both sensors' mapped values are different for the same cylinder. This procedure ensures that the cylinders must be in the extended or in the retracted position when the main program is running.

To enter the system's Learning mode, one must press the button assigned to it as it can be seen in Figure 6. This initialises and clears a buffer byte and an array of thirty bytes which will store the sequence programmed by the user. When the user presses the Learning mode button again, the recording stops, and the microcontroller's EEPROM is updated with the data from the sequence storing array. This way, the system can execute the last programmed sequence even after powering it down.

The reason behind the thirty-byte size of the sequence storing array is that we aimed to implement a wear levelling algorithm to increase the EEPROM's lifespan. (As stated in the microcontroller's datasheet, a cell of EEPROM memory can only withstand 100 000 write/erase cycles.) The plan was to use a different chunk of 256 bytes from the entire accessible memory (1024 kilobytes) each time the system powers up. Then, we would have divided the present chunk into four 32-byte sized arrays in which 2 bytes would have stored the start and end of a sequence. We have also been working on a better method but it has not yet been implemented in the latest version of the source code, therefore it remains as one of the future improvements of the system.

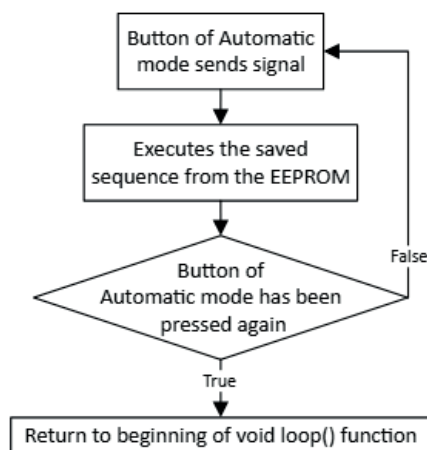


Figure 7. The flowchart of Automatic mode

As it can be seen in Figure 7. in case of the Automatic mode if the button assigned to this mode is pressed once it causes the system to execute the last saved sequence indefinitely until the mode's button is pressed once more. This method reads the last saved series of instructions directly from the EEPROM memory, allowing the device to execute them immediately after powering on the system. The button assigned to this mode is included in a different pin change interrupt service routine hence the user could not exit this mode otherwise. This service routine runs a function similar to the one that monitors the three actuators' position. When the current process is interrupted the function negates the value mapped to the mode's button in the first array.

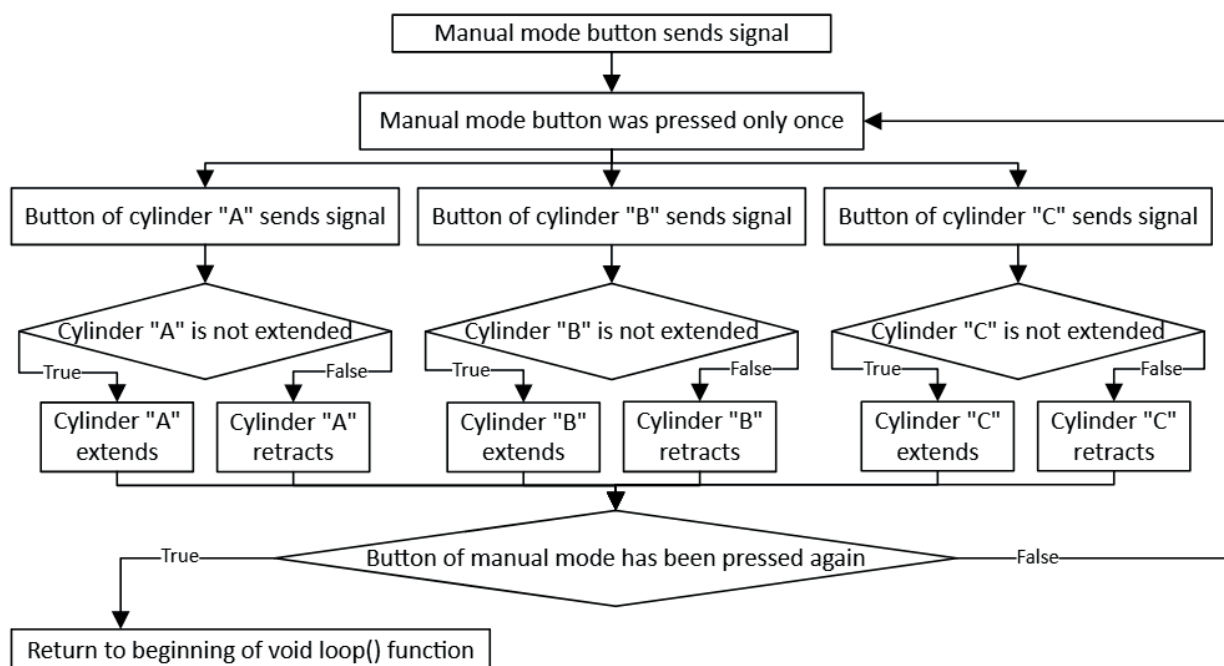


Figure 8. The flowchart of Manual mode

The negation of status values and mapping to discrete pins or buttons are done by a separate function which also manages button debouncing. The debouncing feature uses the `millis()` function from the standard Arduino library to measure time between button presses. If the button press is too brief, the program will not register it as an intended button press. Furthermore, if the button is pressed for an excessively long period, it will only be registered as a single press.

Figure 8. displays the Manual mode of the system. This mode grants the user direct control over the actuators and this makes it the device's most interactive mode. As seen in Figure 8., the cylinders are toggled between two states via the respective button of each actuator. The feature of not allowing the next instruction to happen while one is already in progress is also taken into consideration with this mode. Therefore, the rate at which each instruction occurs is entirely dependent on the user and further adjustable with the built-in throttle valves. The method of leaving this mode is identical to the ones before: the user has to press the Manual mode's button once more.

4. CONCLUSION

In conclusion the primary purpose of this electropneumatic demonstration device is to introduce the basics of what a more complex system can achieve, while ensuring a safe and user-friendly environment. The device is portable, uses three pneumatic cylinders, and is controlled by a beginner-friendly development platform. Although the project is not yet finished and improvements are still required, it serves as a functioning prototype.

5. REFERENCES

- [1] P. Tuleja: Educational procedures for training students in the field of pneumatic systems, *Acta Mechatronica – International Scientific Journal about Mechatronics*, Vol. 9. No. 4. (2024), pp. 39-42. DOI:10.22306/am.v9i4.130
- [2] T. Phetchakan, S. Howimanporn, S. Chookaew: Design of a Pneumatics System Learning Material with AR Technology for Vocational Education Students, the 31st International Conference on Computers in Education, Matsue, (2023), pp. 523-527
- [3] P. Tuleja, P. Mamontov: Application of industrial pneumatic components in the educational process, *Technical Sciences and Technologies*, (2018) DOI:10.25140/2411-5363-2018-3(13)-68-73
- [4] D. R. Rosa, J. Crespo, R. Barber, S. Garrido: Adaptive control of a pneumatic system for educational practices, *the 8th International Technology, Education and Development Conference*, Valencia, (2014)

SÖVÉNYVÁGÓ BLDC MOTORJÁNAK DINAMIKAI MODELLJE

DINAMIC MODEL OF THE BLDC MOTOR USED IN HEDGE TRIMMERS

Siktár Bálint*, Dr. Hegedűs György**, Dr. Kakuk József***

ABSTRACT

Hedge trimmers are electric power tools, there are both alternating (AC) and direct current (DC) powered products available on the market. The DC motor variants have two subtypes, conventional DC motors, where the commutation happens using brushes, and brushless DC (BLDC) motors, where the commutation happens using electric commutation instead of commutation with brushes. This paper aims to introduce the grounds of the dynamic model of a BLDC motor.

1. BEVEZETÉS

A kefenélküli (*Brushless*) egyenáramú motorok két fő komponensből állnak, ezek a forgórész (rotor) és az állórész (stator) [1]. A BLDC motorok lehetnek egy, kettő vagy háromfázisú kivitelűek is. Az állórészen található a réz tekercselések, ezekből általában 3 db vagy a 3 egészszámu többszöröse található. A forgórészben található a motor tengelye, e tengely segítségével hasznosítható a motor teljesítménye. A tengelyre vannak préselve az állórész lamellái, a lamellákban található a BLDC motor permanens mágnesei. A forgórész pólus párjainak száma kettő és nyolc között változhat.

A BLDC motorok lehetnek belső vagy külső forgórésűek. Külső forgórész esetén a forgórész az állórész körül helyezkedik el, ebben az esetben a forgórész gyűrű alakú. Belső forgórész esetén a forgórész az állórész belsejében található.

Az akkumulátoros kéziszerszámokban a kezdetekben DC motorokat használtak. Ennek oka, hogy alkalmazásuk alacsonyabb költséget jelent, a vezérlő elektronika sem szükséges, hogy komplex legyen, illetve egyes alkalmazások megoldhatók még észszerű méretű kefések DC motorokkal. Napjainkban egyre gyakrabban kerülnek BLDC motorok beépítésre akkumulátoros szerszámokba, ennek több oka van. A BLDC motor bár költségesebb, de élettartam tekintetében csak a forgórész csapágynak élettartama szab korlátot. Bár a BLDC motorok vezérlése összetettebb feladat – tekintettel a három fázis megfelelő működtetéséhez szükséges fázisonkénti 2 MOSFET-re – a vezérléssel pontosabb működés érhető el. A BLDC motorok nagy előnye még a

hagyományos DC motorokkal szemben az azonos teljesítmény biztosításához szükséges kisebb méret [1]. E tulajdonságaik miatt napjainkban szinte kizárólag BLDC motorokat használnak az akkumulátoros kézi szerszámokban.

A BLDC motor viselkedésének megfelelő szintű elemzéséhez szükség van a BLDC motor dinamikai viselkedését leíró egyenletek meghatározására, előállítására.

2. BLDC motor dinamikai egyenletrendszerének származtatása

A BLDC motor dinamikai viselkedése az

$$\begin{bmatrix} u_{as} \\ u_{bs} \\ u_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

egyenletrendszerrel írható le [2], ahol az u_{as} , u_{bs} és u_{cs} [V] az állórész tekercseinek fázisfeszültségei, R_s az állórész fázisonkénti ellenállása [Ω], i_a , i_b és i_c [A] az állórész fázisainak áramerősségei, L_{aa} , L_{bb} , L_{cc} a tekercsek öninduktivitásai [H], $L_{ab}=L_{ba}$, $L_{ac}=L_{ca}$ és $L_{bc}=L_{cb}$ az a , b és c fázis közötti kölcsönös induktivitások [H], az e_a , e_b és e_c pedig a fázisonkénti elektromotoros erők [V]. A rotor üreges kialakítása miatt – a hagyományos DC rotor hornyos kialakításával szemben – a rotor induktivitását konstansnak lehet venni a rotor szögének függvényében, így kapjuk az

$$L_{aa} = L_{bb} = L_{cc} = L, \quad (2)$$

és

$$L_{ab} = L_{ba} = L_{ac} = L_{ca} = L_{bc} = L_{cb} = L_k \quad (3)$$

összefüggéseket.

* PhD hallgató, Miskolci Egyetem Szerszámgépészeti és Mechatronikai Intézet

** Egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Szerszámgépészeti és Mechatronikai Intézet

*** Egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Szerszámgépészeti és Mechatronikai Intézet

A (2) és (3) összefüggések (1) egyenletbe történő behelyettesítését követően kapjuk az

$$\begin{bmatrix} u_{as} \\ u_{bs} \\ u_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L & L_k & L_k \\ L_k & L & L_k \\ L_k & L_k & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

permanens mágnesű kefenélküli DC motor modelljének egyenletét. Új változóként szükséges bevezetni az u_{a0} , u_{b0} , u_{c0} és u_{n0} feszültségeket, melyek a DC összeköttetés középső pontjának nulla referenciapotenciáljához vonatkoztatott háromfázisú és semleges feszültségek. A fázisfeszültségek az új változók felhasználásával az

$$u_{as} = u_{a0} - u_{n0} \quad (5)$$

$$u_{bs} = u_{b0} - u_{n0} \quad (6)$$

$$u_{cs} = u_{c0} - u_{n0} \quad (7)$$

összefüggésekkel származtathatók. A stator állórészének áramaira az

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (8)$$

kényszeregyenlet használható fel. A (8) kényszeregyenlet alapján a kölcsönös induktivitásokra az

$$i_b L_k + i_c L_k = -i_a L_k \quad (9)$$

kapcsolat írható fel, mellyel a modell induktivitásai egyszerűsíthetők. Az egyszerűsítés után (4) összefüggés az

$$\begin{bmatrix} u_{as} \\ u_{bs} \\ u_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L - L_k & 0 & 0 \\ 0 & L - L_k & 0 \\ 0 & 0 & L - L_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (10)$$

alakot veszi fel. Az e_a , e_b és e_c elektromotoros erőkről kijelenthető, hogy karakterisztikájuk trapéz hullám alakú, ez alapján változásuk a

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = \omega_m \lambda_m \begin{bmatrix} f_{as}(\varphi_r) \\ f_{bs}(\varphi_r) \\ f_{cs}(\varphi_r) \end{bmatrix} \quad (11)$$

összefüggéssel írható fel, ahol ω_m a rotor szögsebessége [rad/s], λ_m a kapcsolt fluxus [Wb], φ_r a rotor pozíciójának [rad] jelölésére szolgál. A (11) egyenletben jelölt $f_{as}(\varphi_r)$, $f_{bs}(\varphi_r)$ és $f_{cs}(\varphi_r)$ függvények alakja megegyezik a függvények alakjával, szélsőértékeik ± 1 . A létrejött elektromotoros erők nem rendelkeznek éles átmenetekkel a trapéz alakú természetükből adódóan. Az elektromotoros erők a kapcsolt fluxus deriváltjaiból adódnak, a kapcsolt fluxus pedig folytonos függvény. A peremhatás (*fringing*) miatt a fluxussűrűség függvény sima, hirtelen átmenetek nélküli lesz. Newton törvénye alapján az elektromágneses nyomaték az

$$M_{em} = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\omega_m} \quad (12)$$

alakban írható le. A tehetetlenségi nyomaték a

$$J = J_m + J_l \quad (13)$$

összefüggéssel jellemezhető, ahol J_m a rotor tehetetlenségi nyomatékát [kgm²], J_l a terhelésből adódó tehetetlenségi nyomatékot [kgm²] jelöli. Az egyszerű mozgó rendszer a

$$J \frac{d\omega_m}{dt} + b\omega_m = M_{em} - M_l \quad (14)$$

formulával jellemezhető, ahol a b a motor légellenállási tényezője [Nms], M_l pedig a terhelő nyomaték [Nm]. A rotor pozíciója és a szögsebesség között a

$$\frac{d\varphi_r}{dt} = \frac{p}{2} \omega_m \quad (15)$$

kapcsolat áll fenn, ahol p a pólusok számát jelöli. A b súrlódási légellenállási tényező gyakran alacsony, ezért figyelmen kívül hagyható a rendszer vizsgálata közben. A (15) egyenletben összefoglaltak a rotor helyzetének (φ_r) változását írják le, mely 2π periódusonként ismétlődik. A semleges pont potenciálját a nulla potenciálhoz viszonyítva (v_{n0}) figyelembe kell venni azért, hogy a rendszer feszültségének kiegyensúlyozatlanságának megelőzése és a hajtás teljesítményének szimulálása megvalósulhasson. Ezt úgy érjük el, hogy (8) összefüggést behelyettesítjük (10) egyenletbe, majd összeadjuk a mátrix egyenletrendszer egyenleteit, kapjuk a

$$v_{a0} + v_{b0} + v_{c0} - 3v_{n0} = R_s (i_a + i_b + i_c) + (L - L_k)(p i_a + p i_b + p i_c) + (e_a + e_b + e_c) \quad (16)$$

egyenletet.

Behelyettesítve a (8) összefüggést a (14) egyenletbe a

$$v_{a0} + v_{b0} + v_{c0} - 3v_{n0} = (e_a + e_b + e_c) \quad (17)$$

összefüggés adódik, melyet rendezve kapjuk a

$$v_{n0} = \frac{(e_a + e_b + e_c) - (v_{a0} + v_{b0} + v_{c0})}{3} \quad (18)$$

formulát. A (10), (14) és (15) differenciálegyenletek definiálják a dinamikai modellt az i_a , i_b , i_c , ω_m stacionárius és φ_r instacionárius változók függvényében. A rendszer állapotter alakja az

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{C}\mathbf{e} \quad (19)$$

egyenlettel írható le, ahol

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L-L_k} & 0 & 0 & -\frac{\lambda_m}{J}f_{as}(\varphi_r) & 0 \\ 0 & -\frac{R_s}{L-L_k} & 0 & -\frac{\lambda_m}{J}f_{bs}(\varphi_r) & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R_s}{L-L_k} & -\frac{\lambda_m}{J}f_{cs}(\varphi_r) & 0 \\ \frac{\lambda_m}{J}f_{as}(\varphi_r) & \frac{\lambda_m}{J}f_{bs}(\varphi_r) & \frac{\lambda_m}{J}f_{cs}(\varphi_r) & -\frac{b}{J} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{P}{2} & 0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L-L_k} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L-L_k} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L-L_k} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L-L_k} & 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L-L_k} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L-L_k} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L-L_k} \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$\mathbf{x} = [i_a \ i_b \ i_c \ \omega_m \ \varphi_r]^T \quad (23)$$

$$\mathbf{u} = [u_{as} \ u_{bs} \ u_{cs} \ M_l]^T \quad (24)$$

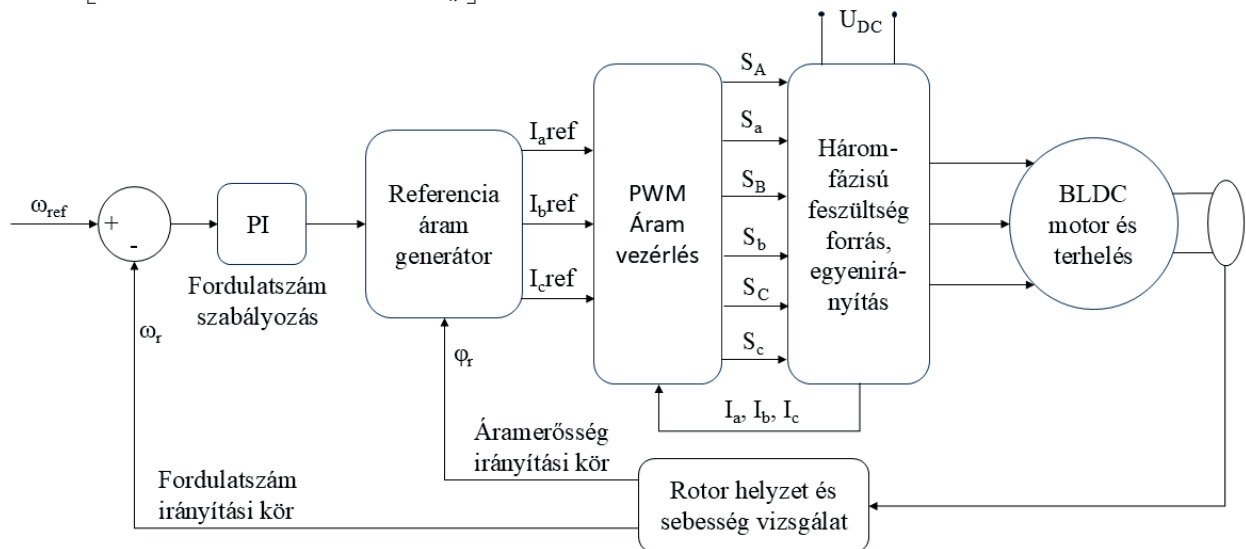
$$\mathbf{e} = [e_a \ e_b \ e_c]^T \quad (25)$$

3. BLDC motor vezérlésének blokkdiagramja

Az 1. ábrán egy zárt irányítású BLDC motor blokk diagramja [3] látható [3]. Az ábrán jelölve van 2 vezérlési kör is, az egyik a fordulatszám szabályozásért, a másik az áramfogyasztás irányításáért felelős. Az ábrán láthatók a korábban már ismerttetett konstansok, illetve változók. Megfigyelhető, hogy a vezérlés folyamatosan felügyeli a BLDC motor három fázisának áramfelvételét és ez alapján változtatja a PWM (*Pulse Width Modulation* – impulzus szélesség moduláció) kitöltési tényezőjét, szintén egy zárt vezérlési körben megvalósítva.

A PWM-mel történő vezérlés esetén a BLDC motor három jellemzője alapján történhet a vezérlés, ezek a nyomaték, a fordulatszám, illetve a rotor pozíciója [4].

Nyomaték alapú vezérlés esetén a fázisáramokat egy ekvivalens egyenáramú (DC-link) áramértékké alakítják. Ezt az értéket kivonják egy referenciaértékből, amelyet a nyomaték referenciaértékéből számítanak.

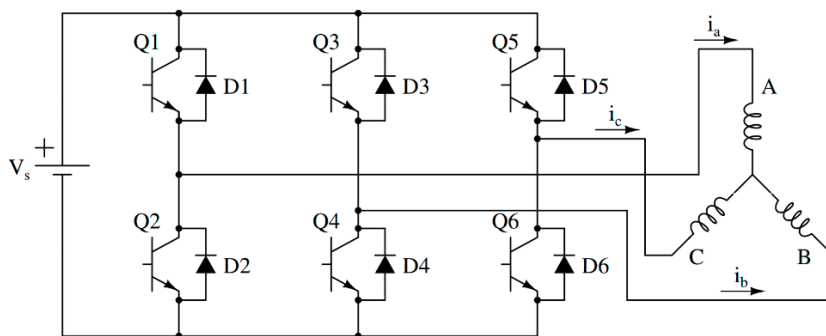


1. ábra A BLDC motor zárt irányítási blokk diagramja [3]

Az áramhibát egy áramvezérlőhöz továbbítják, amelynek kimenetét egy trapéz hullámformával hasonlítják össze. Az összehasonlító kimenete egy magas vagy alacsony szintű jel, amely az inverter számára vágójelként szolgál. A fordulatszám alapú vezérlés esetén az áramvezérlő ugyanaz, mint korábban, de egy PI-szabályozót is hozzáadtak. A sebességszabályozó paramétereit hasonló elvek alapján határozzák meg, mint az áramvezérlő paramétereit. A pozíciószabályozó esetén is egy PI-szabályozó kerül beépítésre, viszont ez nem lehet túl nagy sebességű, mert ha túllövés következik be, az egyetlen módja a referencia szöghez való közelítésnek a rotor fordított irányú mozgása lenne. Mivel a BLDC

motor nem támogatja a visszafordítást, a szabályozót szándékosan lassúra tervezték a túllövés elkerülése érdekében.

A BLDC motor egyenirányítása napjainkban MOSFET-ek alkalmazásával történik [5]. A MOSFET mozaikszó jelentése *Metal Oxid Semiconductor Field Effect Transistor*, vagyis fém-oxid-félvezető térvezérlésű tranzisztor. A BLDC motor egyszerűsített villamos kapcsolása a 0. ábrán látható, itt MOSFET-ek helyett BJT-k (*bipolar junction transistor* – bipoláris csomópont tranzisztor) vannak elhelyezve.



2. ábra A BLDC motor egyszerűsített kapcsolása [4]

A BLDC motorok vezérlése a PWM vezérlésen kívül történhet még hiszterézis sáv alapú szabályozással (*hysteresis band control*) vagy változó egyenáramú közbensőköri feszültségvezérléssel. A hiszterézis sáv alapú szabályozás azt jelenti, hogy a szabályozott változó értékét egy meghatározott tartományon (hiszterézis sávon) belül tartják a referenciaérték körül. Ennek a módszernek az alkalmazása esetén a motort kikapcsolják, ha a sebesség egy bizonyos szinttel meghaladja a referencia sebességet, és újra bekapcsolják, amikor a sebesség egy bizonyos szint alá csökken a referenciaértékhez képest. A változó egyenáramú közbensőköri feszültségvezérlés esetében egy változtatható egyenfeszültségű tápegységet használnak a rákapcsolt feszültség szabályozására. Ez a módszer bizonyos előnyöket kínálhat a korábban említett két módszerhez képest. A lineáris jellegű szabályozás olcsóbb, mint az impulzus jellegű vezérlés (PWM), azonban alacsony feszültség és nagy áram esetén a veszteségek jelentősek lehetnek.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A publikációban ismertetésre került a BLDC motorok késziszerszámokban történő alkalmazásának háttere, ismertetésre került továbbá, hogyan hasonlíthatók össze a BLDC és hagyományos DC motorok. A tanulmányban levezetésre került a BLDC motor dinamikai modellje, bemutatásra került a BLDC motor vezérlésére képes zárt irányítási blokk diagram. Ismertetésre került, milyen vezérlési stratégiák érhetőek el a BLDC motor PWM-mel történő vezérlése esetén.

5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A C2263193 számú projekt a kulturális és innovációs minisztérium nemzeti kutatási fejlesztési és innovációs alapból nyújtott támogatásával, a KDP-2023 pályázati program finanszírozásában valósult meg.

6. IRODALOM

- [1] P. Yedamale, *Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals*, Microchip Technology Inc., 2004
- [2] S. Rambabu, *Modeling and control of a brushless DC motor*, National Institute of Technology, India, 2007
- [3] M. Poovizhi, M. Senthil Kumaran, P. Ragul, L. Irene Priyadarshini, R. Logambal, *Investigation of mathematical modelling of brushless dc motor (BLDC) drives by using matlab-simulink*, 2017 International Conference on Power and Embedded Drive Control (ICPEDC) <https://doi.org/10.1109/ICPEDC.2017.8081083>
- [4] S. Baldursson, *BLDC Motor Modelling and Control – A MATLAB/Simulink Implementation*, Svédország, 2005
- [5] W. Brown, *Brushless DC Motor Control Made Easy*, Microchip Technology Inc., 2002

WINDBOX - ÚJ PIACKÉPES TERMÉK KIFEJLESZTÉSE A MAGYAR FÉMIPARI KFT-NÉL

WINDBOX - DEVELOPMENT OF A NEW MARKETABLE PRODUCT AT MAGYAR FÉMIPARI KFT

Kovács Attila*

ABSTRACT

Technological innovation and the growing demand for renewable energy sources create new challenges and opportunities in many industries. Between 2017 and 2019, Magyar Fémipari Kft. focused on developing a new product that would enable the storage and use of energy generated by the wind of vehicles. The aim of the WindBox project was to create a mobile, wind-powered device that is suitable for both industrial and transportation use, especially in the maintenance industry and transportation.

1. BEVEZETÉS

A technológiai innováció és a megújuló energiaforrások iránti növekvő kereslet számos iparágban új kihívásokat és lehetőségeket teremt. A Magyar Fémipari Kft. 2017 és 2019 között egy új termék kifejlesztésére fókuszált, amely a járművek menetszele által generált energia tárolását és felhasználását tette lehetővé. A WindBox projekt célja egy olyan mobil, szélenergiát hasznosító eszköz létrehozása volt, amely ipari és közlekedési felhasználásra egyaránt alkalmas, különösen a karbantartóipar és a szállítmányozás területén.

2. A PROJEKT CÉLKITŰZÉSEI

A WindBox fejlesztésének elsődleges célja egy olyan hordozható energiátároló és -ellátó rendszer létrehozása volt, amely mozgó járművekre telepíthető, és a menetszélből nyert energiát hasznosítja elektromos kéziszerszámok és egyéb kis energiaigényű berendezések töltésére. A projekt során kiemelt figyelmet fordítottunk az alábbi területekre:

- **Megújuló energiaforrások alkalmazása:**
A szélenergia hatékony felhasználása mozgó járműveken.
- **Piackutatás és célcsoport-meghatározás:**
Az ipari és közlekedési szektor szükségleteinek felmérése.

- **Tervezés és prototípus-fejlesztés:**

A légellenállás, aerodinamikai hatások és energiaátalakítás optimalizálása.

- **Tesztelés és validáció:**

A szélenergia-termelés, tárolás és áramátalakítás gyakorlati vizsgálata.

2. TECHNOLÓGIAI FEJLESZTÉSEK

2.1. Terméknév és Márkaépítés

A névadási folyamat során olyan elnevezéseket kerestünk, amelyek tükrözik a termék funkcióját és könnyen beépülnek a köznyelvbe. A végleges elnevezés, a *WindBox*, rövid, lényegre törő és utal a termék kompakt kialakítására.

2.2. Célcsoport és Felhasználási Területek

A piackutatás során megállapítottuk, hogy az ipari karbantartó cégek és fuvarozók jelentős része akkumulátoros kéziszerszámokat használ. A *WindBox* megoldást kínál arra, hogy menet közben is biztosított legyen az energiaellátás, ezáltal csökkentve a munka leállásából fakadó költségeket. További célcsoportként az autós utazók és kamionosok is azonosításra kerültek, akik kis energiaigényű eszközeiket – például laptopokat, televíziókat vagy kávéfőzőket – tölthetik a rendszer segítségével.

2.3. Aerodinamikai és Mechanikai Tervezés

A *WindBox* fejlesztése során a fő kihívást az optimális aerodinamikai kialakítás jelentette. A szélenergia maximális kihasználásához a turbinalapátokat és a generátorokat úgy kellett elhelyezni, hogy minimalizálják a jármű légellenállását. A tervezés fő szempontjai:

- A turbinalapátok méretének és szögének optimalizálása a maximális energiaátalakítás érdekében.
- A generátorok és inverterek beépítése egy kompakt, időjárásálló házba.
- A járművekre szerelhető, könnyen telepíthető és leszerelhető rögzítési mechanizmus kialakítása.

* ügyvezető, Magyar Fémipari Kft.

2.4. Elektromos Rendszer és Energiatárolás

A generátorok által termelt egyenáramot inverter alakítja át a hagyományos hálózati feszültségre, amely a felhasználói igényeknek megfelelő csatlakozókon keresztül érhető el. Az energiát akkumulátorok tárolják, biztosítva a folyamatos áramellátást még akkor is, ha a jármű áll. A fejlesztés során különböző akkumulátortípusokat teszteltek, figyelembe véve azok energiátároló kapacitását, hőmérsékleti érzékenységét és töltési ciklusait.

3. TESZTELÉSI FOLYAMATOK

A *WindBox* prototípusának tesztelése laboratóriumi és valós környezetben is zajlott. A tesztek során az alábbi paramétereket vizsgáltuk:

- **Energiatermelési hatékonyság:**
Különböző sebességeknél (30–100 km/h) mérték az energiaátalakítás hatékonyságát.
- **Terheléssel tesztelt:**
Elektromos kéziszerszámok és egyéb fogyasztók csatlakoztatásával ellenőrizték a rendszer stabilitását.
- **Aerodinamikai hatások:**
A *WindBox* légellenállásának vizsgálata a járművek menetdinamikájára gyakorolt hatás szempontjából. A tesztek eredményei alapján a rendszer 40 km/h sebességnél kezdte meg az energiatermelést, és 60 km/h-nál már folyamatosan képes volt 12V 5W teljesítmény biztosítására. További optimalizálásokkal ez az érték növelhető.

4. INNOVÁCIÓS ÉS SZABÁLYOZÁSI KIHÍVÁSOK

A *WindBox* fejlesztése során számos technológiai és jogszabályi kihívással kellett szembenéznünk:

- **Közlekedésbiztonsági előírások:**
A termék rögzítésének és súlyának oly módon kellett megfelelnie a szabályozásoknak, hogy ne veszélyeztesse a jármű stabilitását.
- **Lopásvédelem:**
Speciális zármechanizmusokat fejlesztettünk ki az eszköz eltulajdonításának megakadályozására.
- **Szélergia-hasznosítás hatékonysága:**
A jármű sebességétől és az időjárási viszonyoktól függően az energiatermelés ingadozó lehet, amelyet fejlett feszültség szabályzókkal és akkumulátoros tárolással stabilizáltak.

5. PIACI KILÁTÁSOK ÉS JÖVŐBELI FEJLESZTÉSEK

A *WindBox* jelentős lehetőségeket rejt a megújuló energia és a mobil energiaellátás területén. A termék bevezetése során fontos szerepet kap a célcsoportok edukációja és az ipari partnerekkel történő együttműködés.

A jövőbeni fejlesztések az alábbi irányokat célozzák:

- **Hatékonyság növelése:**
Fejlettebb aerodinamikai elemek és generátorok beépítése.
- **Digitális vezérlés:**
Okos vezérlőrendszerek és applikációk integrálása a felhasználói élmény fokozása érdekében.
- **Nemzetközi piacra lépés:**
Az európai és amerikai piacokon való terjeszkedés, különös tekintettel a logisztikai és kempingfelszereléseket használó szegmensekre.

6. ÖSSZEGZÉS

A *WindBox* projekt innovatív megoldást kínál a járművek menetszelének energiatermelés céljára történő felhasználására. A termékfejlesztés során számos mérnöki és piaci kihívást sikerült leküzdeni, és egy olyan rendszer született, amely jelentős előnyöket kínál az ipari, logisztikai és közlekedési szektor számára. A fejlesztés eredményei megalapozzák a további innovációkat, és új lehetőségeket teremtenek a fenntartható energiafelhasználás területén.

7. SUMMARY

The *WindBox* project offers an innovative solution for harnessing the wind from vehicles for energy production. During the product development, several engineering and market challenges were overcome and a system was created that offers significant benefits for the industrial, logistics and transport sectors. The results of the development will lay the foundation for further innovations and create new opportunities in the field of sustainable energy use.

JEGYZET

JEGYZET

CONTENTS

<i>1. Sándor Apáti, Dr. György Hegedűs:</i> CUTTING FORCE MODELING IN SAWING – A BRIEF OVERVIEW	5	<i>6. Krisztián Kalmár:</i> REDESIGN FROM METAL TO PLASTIC - THE BACKGROUND OF IMPLEMENTING A DATABASE-BASED APPROACH	27
<i>2. Sándor Apáti, Dr. György Hegedűs:</i> APPLICATION OF LINEAR CUTTING FORCE MODEL IN JIGSAWS	9	<i>7. Bálint Lévai, Pálma Kapitány:</i> DEVELOPMENT OF AN ELECTROPNEUMATIC DEVICE FOR DEMONSTRATION	33
<i>3. Dr. Zoltán Bihari:</i> LIFE CYCLE OF A PHONE CHARGER – LIFE AFTER LIFE (CASE STUDY)	13	<i>8. Bálint Siktár, Dr. György Hegedűs, Dr. József Kakuk:</i> DINAMIC MODEL OF THE BLDC MOTOR USED IN HEDGE TRIMMERS	37
<i>4. Eszter Borsodi, Winnie Atieno Onyango, Dr. Ágnes Takács:</i> SUSTAINABLE DRONE MANUFACTURING: INTEGRATION OF GENERATIVE DESIGN, ADDITIVE MANUFACTURING, AND CIRCULAR ECONOMY	17	<i>9. Attila Kovács:</i> WINDBOX - DEVELOPMENT OF A NEW MARKETABLE PRODUCT AT MAGYAR FÉMIPARI KFT	41
<i>5. Dr. Csaba Dömötör:</i> ERGONOMICS OF PET BOTTLES	23		

GÉP

The technical, business, investment, sales, research and development, market information journal of
THE SCIENTIFIC ASSOCIATION FOR MECHANICAL ENGINEERING

President of Editorial Board:

Dr. Gabriella Vadászné Bognár

General Editor:

Dr. Csaba Dömötör

Deputy editors-in-chief:

József Vesza

Deputy:

Dr. György Ábrahám

Dr. István Barkóczy

Dr. Lajos Borbás

Dr. Árpád Czifra

Dr. József Danyi

Dr. Gusztáv Fekete

Dr. Péter Horák

Dr. Sándor Horváth

Dr. Béla Illés

Dr. Endre Jánosi

Dr. Károly Jármay

Dr. József Kakuk

Dr. Gábor Kalácska

Dr. Márk Lelkes

Dr. János Kanócz

Dr. László Könözy

Dr. Tamás Mankovits

Dr. Márton Máté

Dr. Ferenc Orbán

Dr. Gyula Patkó

Dr. Attila Piro

Dr. László Soltész

Dr. István Szabó

Dr. Szabolcs Szávai

Dr. János Száva

Dr. Ferenc Szigeti

Dr. Imre Timár

Dr. Zoltán Weltsch

DEAR READER,

The journal GÉP, managed by the Scientific Association for Mechanical Engineering operate a new approach to scientific journal publishing print volumes and an online platform. GÉP is a scientific journal published several times a year, which publishes original scientific publications, research results, summaries in the history of technology, conference proceedings and, as a special issue, full conference proceedings in the fields of basic and applied engineering science.

The primary language of the journal is Hungarian, but scientific articles are also published in Hungarian and English. In recent decades, the number of journals published in Hungarian has fallen to a fraction of the number published in English. We aim to cultivate the Hungarian technical language and, in the case of native Hungarian speakers, to provide the opportunity to publish technical articles in Hungarian for the cultivation of science in Hungarian. We consider it our duty that GÉP serves the cultivation of engineering science in Hungarian, the continuous improvement and development of the Hungarian professional language.

The Editorial Board will continue to provide a forum for research and development in the field of mechanical engineering.

Dr. Gabriella Vadászné Bognár
chairman of the editorial board

Managing Editor: Dr. Csaba Dömötör • Editor's address: H-3515 Miskolc, Egyetemváros

Phone: +36-46/565-111 (12-90) • e-mail: mail@gepujsag.hu

Published by the Scientific Society of Mechanical Engineering, 1147 Budapest, Czobor u. 68., Postal address: 1371, Bp, Pf. 433

Phone: +36-1/202-0656, Fax: +36-1/202-0252, E-mail: mail@gteportal.eu, Web: www.gteportal.eu

Web: http://www.gepujsag.hu • Kereskedelmi és Hitelbank: 10200830-32310236-00000000

Publisher: Dr. Bárdos Krisztina, Managing Director

Gazdász Nyomda Kft. 3534 Miskolc, Szervezet u. 67. Phone: +36-30/9-450-270 • e-mail: mail@gepujsag.hu

Distributed to subscribers by Magyar Posta Zrt, Postal address: 1900 Budapest

Subscription: subscription can be ordered at any Hungarian post office, from postmen, from the link: www.posta.hu WEBSHOP

https://www.posta.hu/ugyfelszolgalat/webform/hirlap, via e-mail: hirlapelofizetes@posta.hu, by phone: +36-1/767-8262,

or mail to: MP Zrt. 1900 Budapest. Subscription: subscription can be ordered from overseas and to overseas at Batthyány Kultur-Press Kft., H-1013 Budapest, Attila út 2/A/III/14. • T: +36 1 201 88 91, +36 1 212 53 03, E-mail: batthyany@kultur-press.hu

Domestic subscription prices are: HUF 1,260 a single copy and HUF 2,520 a double copy.

INDEX: 25 343 • ISSN 0016-8572 (Printed) • ISSN 3057-9473 (Online)

The published articles have been reviewed. • The publication is supported by the National Cultural Fund of Hungary



MISKOLCI EGYETEM GÉPÉSZMÉRNÖKI KARÁN FOLYÓ
MÉRNÖKKÉPZÉSÉRT KÖZHASZNÚ ALAPÍTVÁNY

ADÓSZÁM: 18425453-1-05

WWW.GEIK.UNI-MISKOLC.HU/ADO1 | GEIK@UNI-MISKOLC.HU
FACEBOOK.COM/GEPEZSMERNOKI.MISKOLCIEGYETEM | INSTAGRAM.COM/GEIK_MISKOLC



MISKOLCI
EGYETEM
UNIVERSITY OF MISKOLC



"MISKOLCI EGYETEM GÉPÉSZMÉRNÖKI KARÁN FOLYÓ MÉRNÖKKÉPZÉSÉRT"
közhasznú alapítvány

Az Alapítvány célja: A Miskolci Egyetem Gépészmérnöki és Informatikai Karán folyó mérnökképzés, továbbképzés, doktori képzés sokoldalú támogatása, az oktatás-kutatás feltételeinek javítása, a nemzetközi kapcsolatok erősítése, az oktatói-kutatói kar továbbképzése, magas színvonalú tudományos kutatási tevékenység ösztönzése.

Az Alapítványt bármely hazai és külföldi, természetes-, vagy jogi személy, illetve jogi személyiséggel nem rendelkező szervezet pénzbeli vagy természetbeni adománnyal támogathatja. Az Alapítvány fogadni képes a személyi jövedelemadó 1%-ának felajánlásából származó felajánlásokat is.

MISKOLCI EGYETEM



Gépészmérnöki és Informatikai Kar

Miskolc - Egyetemváros H - 3515
Tel.: (46) 565-131
E-mail: geik@uni-miskolc.hu

Az Alapítvány céljainak megvalósítása során nagy segítséget jelentene, ha akár egyénileg, akár az intézménye, vállalata által a fentiekben megjelölt bármelyik módon támogatni tudná az Alapítványt. Ezirányú szándéka esetén kérjük, keresse fel a Gépészmérnöki és Informatikai Kar Dékáni Hivatalát, megjelölve a támogatás formáját és mértékét. Amennyiben szükségesnek tartja, természetesen megjelölheti az adománya alapcélokhoz kapcsolódó felhasználási módját is. Az Alapítvány az adományozónak igazolást állít ki. A személyi jövedelemadó 1%-ának felajánlása esetén bevallásában kérjük, jelölje meg az alapítvány nevét és adószámát.

Adószám: 18425453-1-05

Bankszámlaszám: 11600006-00000000-06877963

A Miskolci Egyetem Gépészmérnöki és Informatikai Kara érdekében tett szíves támogatását előre is köszönjük.

Prof. Dr. Siménfalvi Zoltán dékán
az Alapítvány Kuratóriumának elnöke

IPAR NAPJAI Nemzetközi ipari szakkiállítás

Társrendezvény: AUTOMOTIVE HUNGARY Nemzetközi járműipari beszállítói szakkiállítás

Látogasson el Ön is Magyarország legnagyobb üzleti rendezvényére, mely várja az ipari szegmens szereplőit! Tekintse meg a széles kiállítói kínálatot, a cégek innovációit, vegyen részt a szakmai programokon!

Helyszín: HUNGEXPO Budapest Kongresszusi és Kiállítási Központ

Látogatók részére
előzetes online regisztráció
a díjmentes belépésért:



www.iparnapjai.hu/gte

Bővebb információ: www.iparnapjai.hu

IPAR NAPJAI

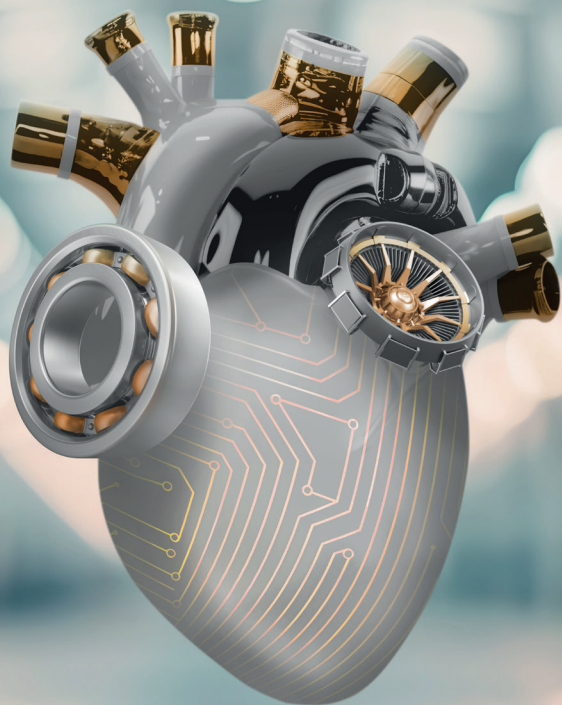
12. Nemzetközi ipari szakkiállítás



2025. május 13-16.



Szenvedélytől vezérelve.



AUTOMOTIVE HUNGARY Nemzetközi járműipari beszállítói szakkiállítás

Társrendezvény: IPAR NAPJAI Nemzetközi ipari szakkiállítás

Látogasson el Ön is Magyarország legnagyobb üzleti rendezvényére, mely várja az ipari szegmens szereplőit! Tekintse meg a széles kiállítói kínálatot, a cégek innovációit, vegyen részt a szakmai programokon!

Helyszín: HUNGEXPO Budapest Kongresszusi és Kiállítási Központ

Látogatók részére
előzetes online regisztráció
a díjmentes belépésért:



www.automotivexpo.hu/gte

Bővebb információ: www.automotivexpo.hu

AUTOMOTIVE HUNGARY

13. Nemzetközi járműipari beszállítói
szakkiállítás



2025. május 13-16.



Az evolúció útján.

