

## Villamos gépek robusztus tervezése Adze-modeler segítségével

### Robust Design Optimization of Electrical Machines in Adze-modeler

OROSZ Tamás, GADÓ Krisztián

MONTANA Tudásmenedzsment Kft, 1111 Budapest, Lágymányosi utca 11

#### Abstract

*Robust design of electrical machines is a complex engineering task that requires the combined application of several engineering, numerical computation and optimisation methods. In order to design a robust machine and reduce the number of waste parts during production, it is essential to consider manufacturing tolerances from the initial, preliminary design stage. Tolerance analysis of a design can, in itself, increase the computational cost of a design optimisation process several times over. This task is supported by Adze-modeler, a finite element library supporting a wide range of mathematical, design of experiments and artificial intelligence methods, which is capable of publicising the parametric simulations created in it, i.e. saving them as digital twins.*

**Keywords:** robust design optimization, digital twins, finite element methods, electrical machines

#### Kivonat

*Villamos gépek robusztus tervezése összetett mérnöki feladat, amelynek a megoldásához többfajta mérnöki, numerikus térszámítási és optimalizálási módszer együttes alkalmazása szükséges. Robosztus gép kialakításához, illetve a gyártás során keletkező selejtszám csökkentéséhez, nélkülözhetetlen a gyártási toleranciák figyelembevétele, már a tervezés kezdeti, előzetes tervezési szakaszától kezdődően. Egy terv toleranciaanalízise, önmagában többszörösére képes emelni egy tervezési, optimalizálási folyamat számítási költségét. Ennek a feladatnak a támogatását célozza meg az Adze-modeler, a számos matematikai, design of experiments és mesterséges intelligenciás módszert támogató végeselem könyvtár, mely képes a benne létrehozott parametrikus szimuláció közzéadására, azaz digitális ikerként való elmentésére.*

**Kulcsszavak:** robusztus tervezés, optimalizálás, digital twins, végeselem módszer, villamos gépek

## BEVEZETÉS

Az optimalizálás és a numerikus szimuláció a mérnöki tervezés folyamatok alapvető részét képezik. A gyártásra kész villamos gép designja, több többcélú, robusztus tervezési optimalizálás részfeladat megoldását igényli, ahol számos fizikai területet kell egyszerre modellezni és optimalizálni [1-6]. Ahhoz, hogy robusztus, könnyen, kis selejtszámmal gyártható villamos gépet kapjunk, már a tervezési lánc elejétől figyelembe kell venni a gyártási toleranciákat, tűréseket.

Számos modern tervezőeszköz létezik a modell-alapú termékfejlesztési folyamatok támogatására, akár rendszer szintű szimulációkat is kínálva. Ezek a fejlesztési folyamatok a villamosgép-tervezés területén jellemzően egy, vagy többfajta végeselem alapú szoftver együttes alkalmazását igénylik (*tool-chain*), hogy a vizsgált gép mágneses, termikus és elektromos térbeli vizsgálatát elvégezhesék. Ennek a feladatnak a megoldására ipari környezetben jellemzően kereskedelmi szoftvereket használnak. Ezeknek a szoftvereknek a nagy előnye az akadémiai szoftverekkel szemben, hogy rendkívül jól támogatják

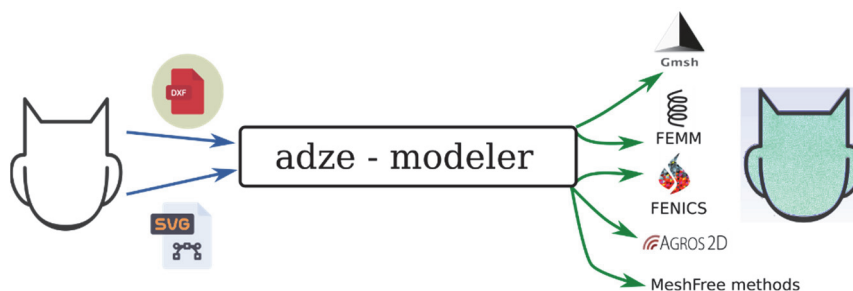
a modellezési feladatok gyors, automatizált megoldását (pl. Abaqus, CST Studio, ANSYS, Simcenter CAE), elérhető hozzájuk rendszer frissítés és többszintű szoftvertámogatás. Míg az akadémiai szoftverek között található rengeteg innovatív megoldásra épülő kód, (deal.II, MFEM, Elmer FEM, Agros Suite, FEniCS, FreeFem++, GetFEM++ vagy GetDP), amelyek a legújabb, magas rendű hp-adaptív megoldókkal rendelkeznek. Azonban, ezeknek a kódoknak a használata rendkívül nehézkes, sokszor komoly szaktudást igényel, vagy a komolyabb támogatás, karbantarthatóság hiánya miatt komoly kockázatot jelenthet a használata és nem feltétlenül van mögötte olyan elérhető szakmai háttér, amelynek a segítségével igénybe vehető az tervezési folyamatokat akadályozó problémák elhárítására.

Közös ezekben a numerikus térszámító szoftverekben, hogy nem kifejezetten a tolerancia analízis, vagy a korai, előtervezési szakasztól induló robusztus tervezéshez lettek eredetileg kifejlesztve. Hiszen ezekhez a számításokhoz nem csupán arra van szükség, hogy egy paraméterkészlettel definiált geometria esetén meghatározzunk egy adott mennyiséget, mint például a mágneses tér energiáját ( $w$ ), hanem az adott mennyiséget, például öt tervezési paraméter, ötszintű toleranciájának a hatásával, azaz  $(w + \Delta w)$ -t adjon vissza. Ennek a meghatározása komoly feladat, hiszen, ha a fenti példánál maradunk, egy öt szintű, öt változós tolerancia-mező figyelembevétele az összes lehetséges kombinációval:  $5^5 = 3125$  eset leszámolásával lenne lehetséges. Miközben egy modell számításigénye is nagy, például a lüktetőnyomaték kellő pontosságú meghatározása is 50 vagy több mint 100 futtatást igényel.

Ennek a feladatnak a megoldását, illetve a különböző akadémiai és kereskedelmi végeeselemes eszközök optimalizálási láncba illesztését tűzte ki célul a cikkben bemutatott és egy mintapéldán keresztül illusztrált, Python-könyvtár: az Adze-modeler projekt (<https://github.com/robust-design-stack/adze-modeler>).

## ADZE-MODELER

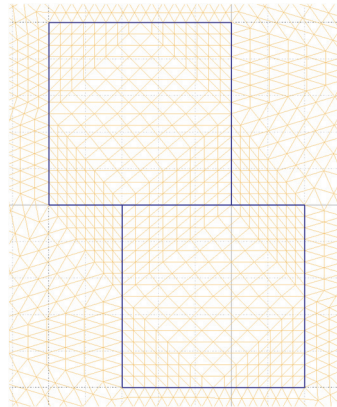
A projekt neve magyarul ácsbárdot jelent, hozzákapcsolva az eszközt a robusztus optimalizálás témaköréhez, maga a kód AGPL licenz alatt ingyenesen elérhető a github-on. A könyvtárnak több hasznos funkciója van, ezek közül a legszembetűnőbb és az egyik leghasznosabb, hogy egy adapter funkciót valósít meg (1. ábra). Ennek köszönhetően egy támogatott geometriai formátumú modell darab beolvasható (jelenleg dxf, svg) az Adze geometria osztályába. Innen, a modell osztályban leírt fizikai mezőhöz tartozó szimuláció pedig elkészíthető a kiválasztott programmal. Azaz a felhasználó egyetlen parancs módosításával képes például egy FEMM-ben megvalósított mágneses szimulációt Agros2D-be kiexportálni. Ennek a megoldásnak köszönhetően feloldható az ipari szereplők számára a tervezési folyamatot bénító vendor-lock-in probléma, továbbá időtálló formátumban elmenthetőek lesznek a modellek, így biztosítva az elkészített modellek reprodukálhatóságát egy bekapszulázott digitális ikerben (*digital twin*).



1. ábra. Az Adze-modeler egyik funkciója, hogy adapterként működik a különböző CAD formátumok és végeeselemes szoftverek között. Az ábrán látható Bezier-görbével definált geometriát képes

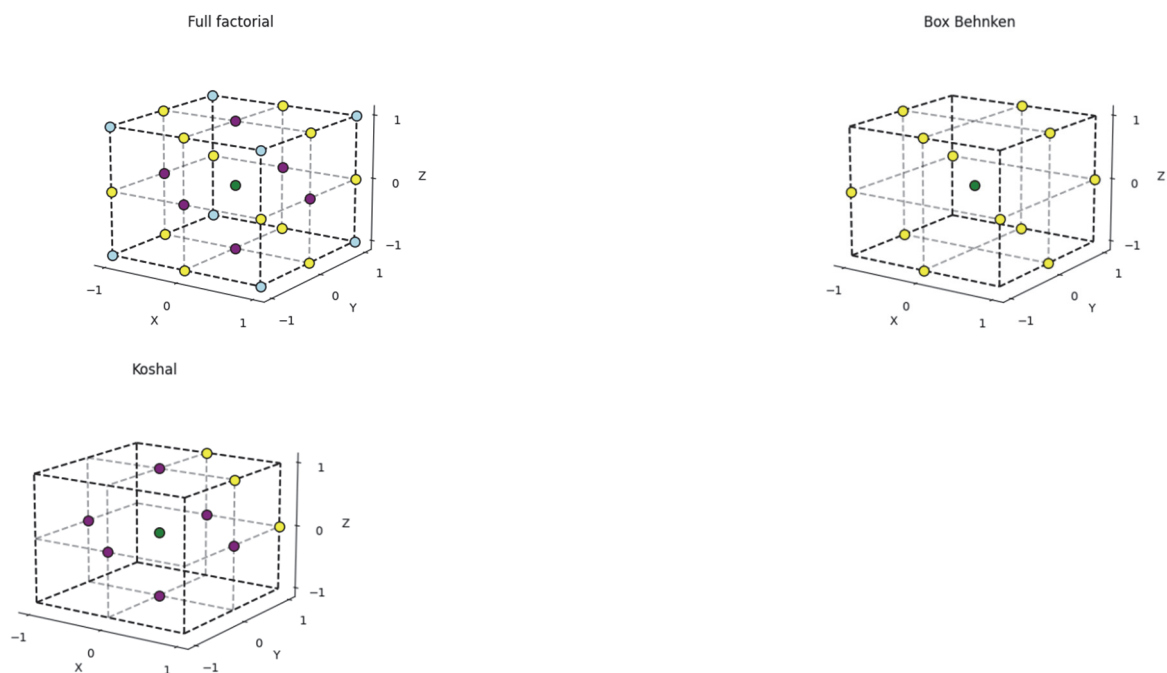
Az 1. ábrán látható képet azért választottuk, hogy bemutassuk a projekt alkalmazásának más, járulékos előnyeit is. Az egyik ilyen funkció a Bezier-görbék kezelése, amely nem lehetséges a legtöbb akadémiai, nyílt forráskódú végeeselem programban (pl.: Agros2d-ben vagy FEMM-ben). Az Adze tartalmaz egy beépített közelítő módszert, amelynek a segítségével a bezier-görbét a megadott pontossággal közelíti, a bezier-görbéket egyenes vonalakkal helyettesíti, rájuk képezve a megfelelő határfeltételeket. Másik ilyen funkció az átlapolódó élek és tartományok detektálása, kezelése. Az Adze képes arra, hogy az átlapolódó éveket detektálja és több éllel helyettesítse (2. ábra), majd a későbbiekben egyedi szabályok alapján kezelje. Ezek a funkciók jelentősen rövidítik az egyszeri modellből készült

optimalizálási lánc elkészítését. Illetve szükségtelessé teszik más, CAD programok és egyéb geometriai szerkesztők alkalmazását.



2. ábra. Két négyzet alakú geometria, amelyeknek egy közös átlapolódó éle van Agros2D-ben hálózva. Az Agros2d nem képes a két egymásra lapolódott geometria kezelésére, ebben az esetben a hálózó hibával leállna.

A geometriai szerkesztés, modellezés támogatásán túl, rengeteg beépített matematikai statisztikai eszközt is tartalmaz az eszköz (3.ábra), amivel jelentősen csökkenthető a toleranciaanalízis számításigénye.



3. ábra. Három paraméteres, háromszintes kísérlettervezési módszertannal választott mintapontok, az elvégzett analízisek leggazdaságosabb megválasztásához a beépített DOE módszerekkel.

A 3. ábrán látható módszerek alkalmazásakor, egy-egy számításra úgy tekintünk, mint egy kísérleti mintavételre, például a Box-Behnken módszertan alkalmazásával, egy három változós, három szintes analízisnél -- ahol a három szint a megadott értéket és annak a +/- toleranciával módosított értékét jelenti -- az összes lehetséges kombináció helyett (27), mindössze 13 kombinációt számolunk le. Az

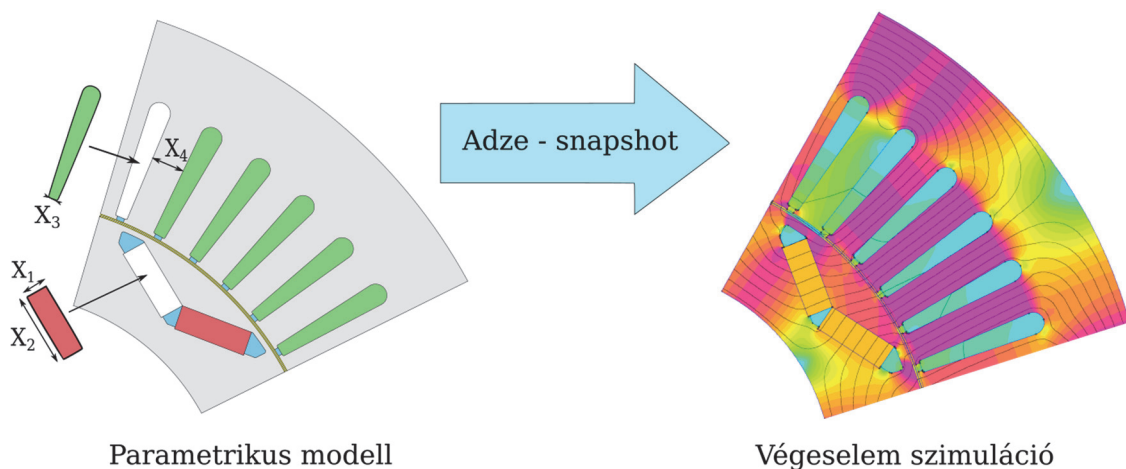
alkalmazott módszertan biztosítja, hogy minimális információvesztés mellett jelentős számítási igény csökkenést nyerünk. Minél magasabb szintű és minél mélyebb paraméteranalízist végzünk, annál jelentősebb lesz a megspórolt számítási igény csökkenés.

Az Adze-modeler úgy lett tervezve, hogy egyszerűen hívható legyen bármilyen evolúciós, genetikus kódokat, vagy mesterséges intelligenciát használó platformból, ilyen például az Ārtap (vagy a Distiller projekt), amelyen keresztül, függvényhívásként hívva az Adze modellt, több, mint 90%-kal csökkenthető ezeknek a feladatoknak a számítási igénye, a megfelelő mesterséges intelligencia módszerek feltanításával pedig a kellő pontosság is megtartható [8].

## ESETTANULMÁNY

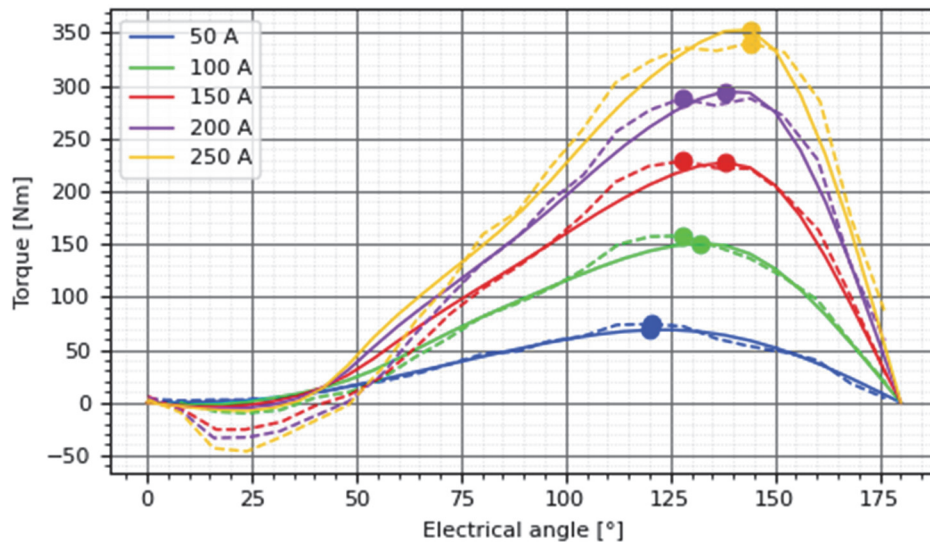
A következő fejezetben egy mintapéldán keresztül ábrázoljuk az Adze-modeler tervezést segítő képességeit. A mintapélda, a Toyota Prius 2004-es IPM motorjának a modellje, amelynek a mérési eredményeit több helyen publikálták [12-14]. Ennek a motornak a névleges teljesítménye  $P_n = 50$  kW,  $T_n = 400$  Nm, 230A-es névleges áramok mellett. A rotor és a sztátor modellezésénél M-19-es, laminált vasmag anyagot feltételeztünk, illetve N36Z50-es mágneseket használtunk a forgórészhez. A geometria méreteit [11] alapján választottuk meg.

A geometria elkészítéséhez a különböző részeket, így a forgó és állórészt, a forgórészhez tartozó mágneseket külön dxf és svg fájlokkal írtuk elő (4.ábra). Az ezekből a fájlokból beolvasott egyes geometriai objektum parametrizálását, már a beolvasott fájlokon végeztük el. A parametrizálás, illetve a modellezés gyorsításához, előre színezett geometriai elemeket definiálhatunk az általunk használt tetszőleges programban, ez lehet az AutoCAD, CATIA, NX vagy akár az ingyenes Inkscape, és a beolvasott modellben a szín megadásával hozzárendelhetünk egy paramétert vagy egy határfeltételt az adott élhez. Például a kék élt kiválasztjuk egy paranccsal és Dirichlet-határfeltételt állítunk be hozzá.



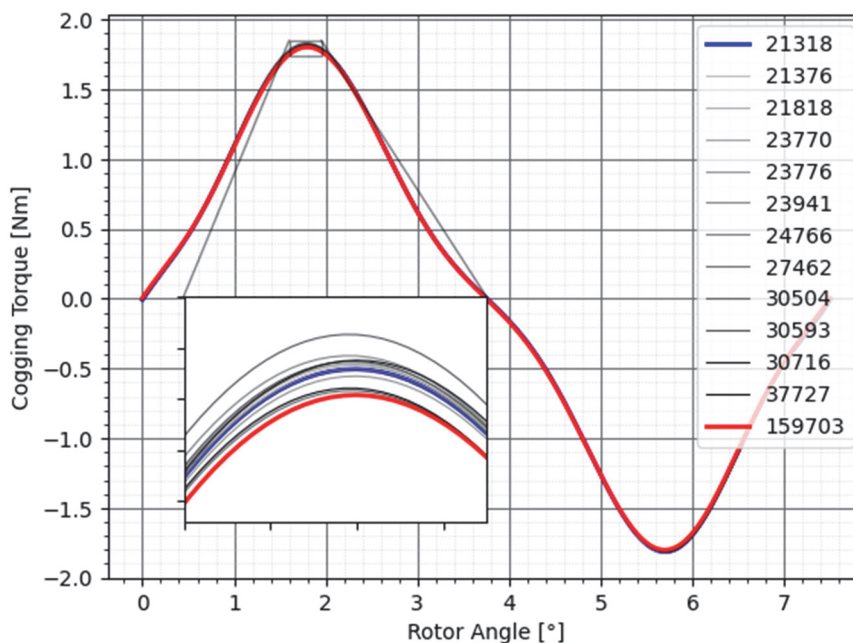
4. ábra. A Toyota Prius 2004-es modelljének a parametrizált modellje és az abból generált esethez tartozó mágneses fluxus eloszlása.

Az elkészített modell ellenőrzéséhez a [12] - ben publikált, mérési eredmények alapján kapott nyomattélgörbéket használtuk. Az 5.ábrán a szaggatott vonallal jelöltük a mérési eredményeket, míg a modellből kapott eredményeket a folytonos vonal jelöli.



5. ábra. A Toyota Prius 2004-es modelljének a nyomatékkarakterisztikái a kommutációs szög függvényében

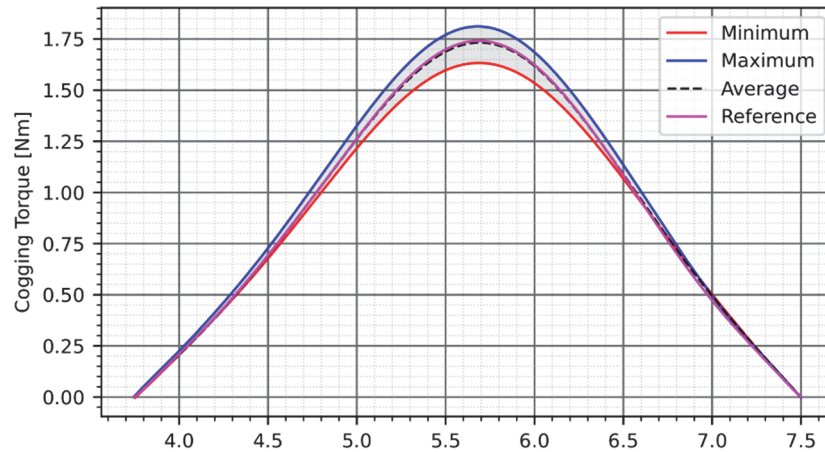
Ahhoz, hogy az alkalmazott végeselem háló érzékenységről egy átfogóbb képet kapjunk, a fognyomaték (cogging torque) érzékenységét vizsgáltuk [9] a hálózás függvényében. Az analízishez az egyes felületelemeken külön-külön változtattuk a hálóelemek méretét, az Adze-ban leírt modell segítségével, majd az így kapott modelleket FEMM-be exportáltuk.



6. ábra. A Toyota Prius 2004-es modelljének fognyomatéka a rotor szögelfordulásának a függvényében, illetve a hálózás hatása a kapott eredményekre.

Ezt az érzékenységvizsgálatot [15-17] azért végeztük el, hogy lássuk, hogy az alkalmazott végeselemhálóval mekkora különbségeket lehet kimutatni, ez az érték kb. 1%. A tolerancia analízis során a jelölt alkatrészek geometriai méreteit változtattuk,  $-0.05$   $0$   $0.05$  mm között (4.ábra), továbbá a mágnesek bezárt szögét  $-0.1$ , és  $+0.1$  ° -al. Annak ellenére, hogy az alkalmazott toleranciák elég kicsik, a 7.ábrán látható módon kb. 5%-os eltéréseket okoznak fognyomaték csúcserkének a számításában. Ez az eltérés

szignifikánsan nagyobb, mint az alkalmazott végelem-háló szelektivitása, így ezek a különbségek jól kimutathatóak. A fognyomaték, tőrésekre való érzékenységének a számításához az összes lehetséges esetet figyelembe vettük, ha a Box-Behnken, vagy más DOE módszer alkalmazásakor ennek az értéke kicsit kisebb lesz, kb 5-10%-al, ami még mindig elfogadható az alkalmazott végelem-módszer szelektivitását figyelembe véve, cserébe kevesebb, mint fele annyi számításra van szükség.



7. ábra. A Toyota Prius 2004-es modelljének fognyomatéka a rotor szögelfordulásának a függvényében, illetve az alkalmazott toleranciák hatása a számítási eredményekre, a referencia és a legrosszabb esetet figyelembe véve.

## KÖVETKEZTETÉSEK

A cikkben bemutatott nyílt forráskódú keretrendszer (*Adze-modeler*), lehetővé teszi, hogy az elkészített parametrikus modellünket egy optimalizálási láncba illesszük, kötöttségek nélkül, akár a legújabb optimalizálási módszereket használva. Az *Adze*-modellben leírt gépmodell függvényként hívható, amely a várt jellemzők mellett, annak a toleranciák okozta bizonytalanságát is visszaadja. Ahogy azt a cikkben bemutatott mintapéldán keresztül bemutattuk a Toyota Prius 2004-es modelljéből kiindulva.

## IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Y. Tenne and C.-K. Goh, *Computational intelligence in expensive optimization problems*, Springer, Science & Business Media, 2010.
- [2] A. Darwish, Bio-inspired computing: *Algorithms review, deep analysis, and the scope of applications*, Future Computing and Informatics Journal, vol. 3, no. 2, pp. 231–246, 2018.
- [3] M. Yilmaz and P. T. Krein, *Capabilities of finite element analysis and magnetic equivalent circuits for electrical machine analysis and design*, in 2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference, pp. 4027–4033, IEEE, 2008.
- [4] G. Lei, J. Zhu, and Y. Guo, *Multidisciplinary design optimization methods for electrical machines and drive systems*. Springer, 2016.
- [5] T. Orosz, A. Rassólkin, A. Kallaste, P. Arsénio, D. Pánek, J. Kaska, and P. Karban, *Robust design optimization and emerging technologies for electrical machines: Challenges and open problems*, Applied Sciences, vol. 10, no. 19, 2020.
- [6] G. Bramerdorfer, J. A. Tapia, J. J. Pyrhönen, and A. Cavagnino, *Modern electrical machine design optimization: Techniques, trends, and best practices*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 65, pp. 7672–7684, Oct 2018.
- [7] P. Karban, D. Pánek, T. Orosz, I. Petrášová, and I. Doležel, “Fem based robust design optimization with agros and artap,” *Computers & Mathematics with Applications*, pp. 1–16, 2020.

- [8] Bramerdorfer, Gerd. Computationally efficient tolerance analysis of the cogging torque of brushless PMSMs. *IEEE Transactions on Industry Applications* 53, no. 4 (2017): 3387-3393.
- [9] A. Nyitrai and T. Orosz, "Cogging torque analysis and optimization of axial flux permanent-magnet motors by 2d finite element analysis," *Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science*, 3001inpress 2021a.
- [10] A. Kallaste, A. Räsänen, T. Orosz, G. Demidova, K. Vladimir, V. Rjabtšikov, and T. Vaimann, "Implementation of digital twins for electrical energy conversion systems in selected case studies," *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences*, vol. 70, no. 1, pp. 19–39, 2021.
- [11] Kuptsov, V.; Fajri, P.; Trzynadlowski, A.; Zhang, G.; Magdaleno-Adame, S. Electromagnetic Analysis and Design Methodology for Permanent Magnet Motors Using MotorAnalysis-PM Software. *Machines* 2019, 7, 75. <https://doi.org/10.3390/machines7040075>
- [12] Hsu, J S, Ayers, C W, Coomer, C L, Wiles, R H, Burress, T A, Campbell, S L, Lowe, K T, and Michelhaugh, R T. *Report on Toyota/Prius Motor Torque Capability, Torque Property, No-Load Back EMF, and Mechanical Losses, Revised May 2007*. United States: N. p., 2007. Web. doi:10.2172/921782.
- [13] Hsu, J.S.; Nelson, S.C.; Jallouk, P.A.; Ayers, C.W.; Wiles, R.H.; Campbell, S.L.; Coomer, C.L.; Lowe, K.T.; Burress, T.A. Report on Toyota Prius Motor Thermal Management; Oak Ridge National Laboratory: Oak Ridge, TN, USA, 2005; ORNL/TM-2005/33.
- [14] Staunton, R.H.; Ayers, C.W.; Marlino, L.D.; Chiasson, J.N.; Burress, T.A. Evaluation of 2004 Toyota Prius Hybrid Electric Drive System; Oak Ridge National Laboratory: Oak Ridge, TN, USA, 2006; ORNL/TM-2006/423.
- [15] Bramerdorfer, Gerd. (2019). Tolerance Analysis for Electric Machine Design Optimization: Classification, Modeling and Evaluation, and Example. *IEEE Transactions on Magnetics*. 55. 1-9. 10.1109/TMAG.2019.2903029.
- [16] Yang, Yongxi & Bianchi, Nicola & Zhang, Chengning & Zhu, Xiaofeng & Liu, Haipeng & Zhang, Shuo. (2020). A Method for Evaluating the Worst-Case Cogging Torque Under Manufacturing Uncertainties. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. PP. 1-1. 10.1109/TEC.2020.2996098.
- [17] Sang-Baeck Yoon, In-Soung Jung, Dong-Seok Hyun, Jung-Pyo Hong and Young-Jung Kim, "Robust shape optimization of electromechanical devices," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 35, no. 3, pp. 1710-1713, May 1999, doi: 10.1109/20.767356.