

Večstopenjski postopek vrednotenja rešitev pri načrtovanju elektromotorja

A Multi-Step Evaluation Process in Electric Motor Design

Tea Tušar
tea.tusar@ijs.si
Institut "Jožef Stefan" in
Mednarodna podiplomska šola
Jožefa Stefana
Ljubljana, Slovenija

Peter Korošec
peter.korosec@ijs.si
Institut "Jožef Stefan"
Ljubljana, Slovenija

Bogdan Filipič
bogdan.filipic@ijs.si
Institut "Jožef Stefan" in
Mednarodna podiplomska šola
Jožefa Stefana
Ljubljana, Slovenija

POVZETEK

Pri načrtovanju elektromotorja je potrebno poiskati vrednosti optimizacijskih spremenljivk tako, da izdelek izpolnjuje tehnične zahteve in je njegova cena minimalna. V ta namen uporabljamo optimizacijske postopke z iterativnim vrednotenjem rešitev na osnovi numerične simulacije. Ti so računsko zahtevni, zato je glavni izziv načrtovanja, kako najti kakovostne rešitve v sprejemljivem času. V prispevku predstavljamo računalniško podprto načrtovanje sinhronskega elektromotorja za servovolanske sisteme, s poudarkom na prijemih za pohitritev optimizacijskega postopka. Med njimi je tudi posebej za ta problem razvit večstopenjski postopek vrednotenja rešitev, ki omogoča učinkovitost optimizacije in robustnost rešitev. S tem postopkom razviti elektromotor je boljši od prvotnega prototipa, dobljenega z enostavnejšim optimizacijskim postopkom, tako po tehničnih lastnostih kot stroškovno.

ABSTRACT

In the design of an electric motor, one has to find the values of the optimization variables such that the product satisfies the technical requirements and its price is minimal. For this purpose, we deploy optimization procedures with iterative evaluation of solutions based on numerical simulation. These are time-consuming, hence the key challenge of the design is how to find high-quality solutions in an acceptable time. In this paper, we present the computer-aided design of a synchronous electric motor for power steering systems, with an emphasis on measures for speeding up the optimization process. Among them, a multi-step solution evaluation procedure has been developed particularly for this problem. It enables the efficiency of optimization and the robustness of solutions. The resulting electric motor outperforms the original prototype obtained by a simpler optimization procedure both in technical characteristics and cost efficiency.

KLJUČNE BESEDE

načrtovanje, elektromotor, numerična simulacija, optimizacija, evolucijski algoritem, robustnost

KEYWORDS

design, electric motor, numerical simulation, optimization, evolutionary algorithm, robustness

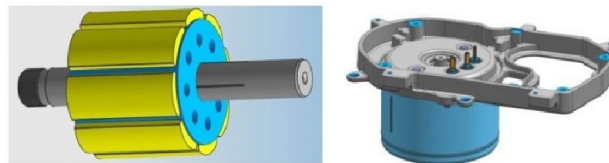
Permission to make digital or hard copies of part or all of this work for personal or classroom use is granted without fee provided that copies are not made or distributed for profit or commercial advantage and that copies bear this notice and the full citation on the first page. Copyrights for third-party components of this work must be honored. For all other uses, contact the owner/author(s).

Information Society 2023, 9–13 October 2023, Ljubljana, Slovenia

© 2023 Copyright held by the owner/author(s).

1 UVOD

Podjetje MAHLE Electric Drives Slovenija d.o.o. proizvaja zagajalnike in alternatorje za motorje z notranjim izgorovanjem, avtonomno napajane enosmerne električne pogonske sisteme in druge zahtevnejše komponente za avtomobilsko industrijo. Eden izmed pomembnejših izdelkov podjetja je sinhronski elektromotor s površinsko nameščenimi magneti, ki poganja avtomobilski servovolanski sistem (slika 1).



Slika 1: Elektromotor za servovolanske sisteme (Vir: arhiv Mahle Electric Drives Slovenija d.o.o.).

Razvoj takšnega elektromotorja zahteva določitev geometrije in materialnih lastnosti njegovih komponent tako, da bo izpolnjeval vse tehnične zahteve in bo njegova cena minimalna. Ker se pri vrednotenju načrtov elektromotorja uporablja numerični simulator po metodi končnih elementov, v katerega nimamo vpogleda (gre za t.i. problem črne škatle, ang. black box-problem), optimizacijski postopek terja iterativno vrednotenje številnih načrtov. Numerične simulacije so dolgotrajne, zato je glavni izziv razvoja elektromotorja optimizacijski postopek zastaviti tako, da bo lahko našel dobre rešitve v doglednem času.

V nadaljevanju prispevka opisujemo, kako smo se načrtovanja elektromotorja (2. razdelek) lotili na Inštitutu "Jožef Stefan" v sodelovanju s podjetjem MAHLE. Optimizacijski postopek smo pohitrili s tremi prijemi:

- uporabili smo optimizacijski algoritem s hitro izračunljivimi nadomestnimi modeli (3. razdelek);
- vrednotenje rešitev smo razdelili na več korakov in tako omogočili izločanje nedopustnih rešitev pred dolgotrajnimi simulacijami (4. razdelek);
- računsko najzahtevnejši korak vrednotenja rešitev smo poenostavili in paralelizirali (4. razdelek).

Metodologijo smo preizkusili na konkretnem tipu elektromotorja (5. razdelek). Tako optimiran načrt elektromotorja je dosegel 10 % nižjo ceno komponent v primerjavi z različico, ki jo je podjetje predhodno razvilo s preprostejšim optimizacijskim postopkom. V prihodnje nameravamo računalniško implementacijo postopka razširiti tako, da bo omogočala prosto izbiro optimizacijskega kriterija in omejitev ter bo uporabna za raznovrstne elektromotorje (6. razdelek).

2 NAČRTOVANJE ELEKTROMOTORJA

Pri načrtovanju elektromotorja moramo nastaviti vrednosti številnih parametrov, ki določajo njegovo geometrijo in materialne lastnosti njegovih komponent. To so na primer dimenzije zoba na statorju, število navojev tuljave, dimenzije magnetov ipd. Vsak parameter ima podano spodnjo in zgornjo mejo ter najmanjši smiselni korak znotraj teh meja. Cilj optimizacije načrtovanja je najti načrt elektromotorja, ki zadošča vsem tehničnim zahtevam in je obenem najcenejši.

Načrt elektromotorja lahko ocenimo na več načinov, z različno stopnjo zaupanja. Njegove lastnosti lahko najzanesljiveje preverimo, če na podlagi načrta izdelamo prototip elektromotorja in ga preizkusimo v praksi. Vendar to zahteva veliko dela, materiala in časa ter s tem povezane visoke stroške, ki ne dovoljujejo, da bi podjetje v fazi razvoja izdelalo večje število prototipov. Zato si pri reševanju tega problema pomagamo z računalniško podprtimi numeričnimi simulacijami, na osnovi katerih lahko izpeljemo ključne lastnosti elektromotorja. Računalniški programi, kot je Ansys Maxwell [1], omogočajo simulacijo elektromagnetnega polja elektromotorja z uporabo metode končnih elementov [2]. Ta deluje na podlagi mreže objekta; gostejša mreža omogoča večjo točnost simulacije, a je ta dolgotrajnejša. Zanesljivost numeričnih simulacij je tako deloma nastavljiva – odvisna je od računalniških zmogljivosti in časa, ki jih imamo na voljo.

Vendar zanesljivost simulacij znižujejo praktični vidiki izdelave elektromotorja, saj lahko ujemanje izdelanega elektromotorja z načrtom zagotovimo samo v okviru določenih toleranc. Na primer, če za velikost odprtine reže nastavimo vrednost 2 mm, lahko v proizvodnji zagotovimo le, da bo ta na intervalu [1.95 mm, 2.05 mm]. To pomeni, da je za načrt elektromotorja zelo pomembno, da je *robusten*, to je, da ob majhnih spremembah vrednosti parametrov znotraj toleranc lastnosti elektromotorjev ne odstopajo bistveno. Robustnost načrta je najlažje preveriti s simuliranjem številnih načrtov, ki se malo razlikujejo od izhodiščnega. Vendar to zahteva še več računske zahtevnih simulacij in podaljšuje trajanje optimizacijskega postopka.

3 OPTIMIZACIJSKI POSTOPEK

V optimizacijskem postopku skušamo čim učinkoviteje rešiti dani optimizacijski problem. Formalno (in brez škode za splošnost) lahko optimizacijski problem načrtovanja elektromotorja zapišemo v obliki

$$\begin{aligned} &\text{minimiziraj } f(x), \\ &\text{ob pogojih } g_i(x) \leq 0, \quad i = 1, \dots, k, \end{aligned} \quad (1)$$

kjer je $x = (x_1, \dots, x_n) \in X \subseteq \mathbb{R}^n$ rešitev iz n -dimenzionalnega prostora rešitev X , $f : X \rightarrow \mathbb{R}$ kriterijska funkcija, funkcije $g_i : X \rightarrow \mathbb{R}$, $i = 1, \dots, k$, pa so *stroge omejitve*. Rešitev problema (načrt elektromotorja) je *dopustna*, če zadošča vsem strogim omejitvam. Sicer pravimo, da je *nedopustna*.

Pri nedopustnih rešitvah ne moremo vedno izračunati vrednosti kriterija. Zato takrat kriterij f nadomestimo s funkcijo

$$f_g(x) = p + \sum_{i=1}^k \max\{g_i(x), 0\}, \quad (2)$$

kjer je p konstanta in $\max\{g_i(x), 0\}$ nenegativna kazen za kršitev stroge omejitve g_i (ko omejitev, ni kršena, kazen znaša 0). Konstanta p mora biti dovolj velika, da je vrednost kriterija f_g za katerokoli nedopustno rešitev vedno višja (slabša) od vrednosti kriterija f za katerokoli dopustno rešitev.

Poleg strogih omejitev imajo optimizacijski problemi v praksi pogosto tudi *šibke omejitve*. To so funkcije $h_i : X \rightarrow \mathbb{R}$, $i = 1, \dots, l$, za katere želimo, da velja $h_i(x) \leq 0$, ni pa to pogoj, da je rešitev dopustna. V optimizacijskem problemu jih upoštevamo tako, da jih vgradimo v kriterijsko funkcijo na naslednji način

$$f_h(x) = f(x) + \sum_{i=1}^l \max\{h_i(x), 0\}, \quad (3)$$

kjer je f prvotna kriterijska funkcija, $\max\{h_i(x), 0\}$ pa nenegativna kazen za kršitev šibke omejitve h_i . Ker seštevamo prvotno kriterijsko funkcijo in kazni za kršitev šibkih omejitev, moramo zagotoviti, da so njihove vrednosti primerljive. V ta namen jih je potrebno normalizirati oz. primerno utežiti.

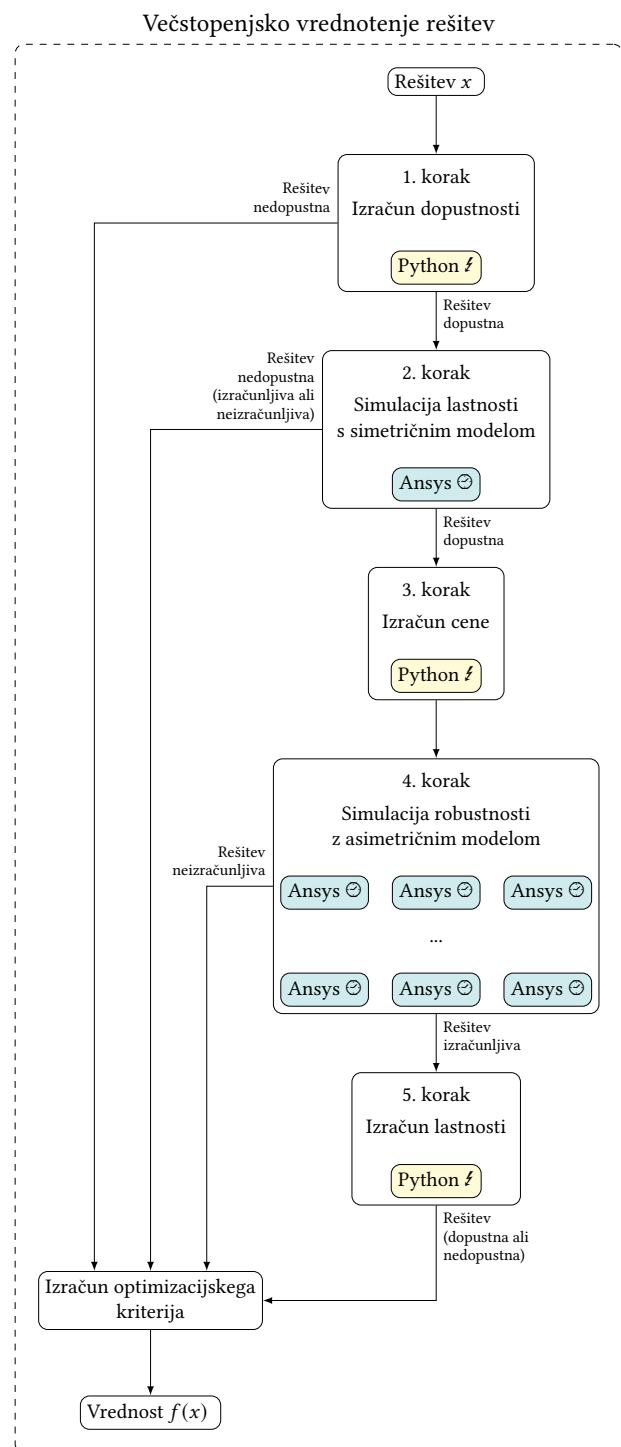
Pri problemu načrtovanja elektromotorja ne poznamo analitične oblike kriterijske funkcije in omejitev, zato za njegovo reševanje uporabimo algoritem, ki se dobro obnese na problemih črne škatle. To je evolucijska strategija s prilagajanjem kovariacijske matrike, oz. CMA-ES (ang. Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy) [5]. Natančneje, poslužujemo se različice algoritma CMA-ES imenovane lq-CMA-ES [3], ki vrednotenja z dolgotrajnimi simulacijami delno zamenja s hitro izračunljivimi linearno-kvadratičnimi nadomestnimi modeli. Uporaba nadomestnih modelov je pogosto uporabljen pristop pri reševanju problemov z računsko zahtevnim vrednotenjem rešitev.

Optimizacijski algoritem z nadomestnimi modeli lq-CMA-ES deluje v dveh fazah. Najprej na podlagi začetnih rešitev, ovrednotenih z numerično simulacijo, zgradi nadomestni model. Nato iterativno predlaga nove rešitve in jih, dokler so te dovolj podobne obstoječim, vrednoti z nadomestnim modelom ter tako prihrani na času. Ko pride do rešitev, ki jih nadomestni model ne opisuje več dovolj dobro, pa jih ovrednoti z numerično simulacijo in z njihovim rezultatom posodobi nadomestni model. To ponavlja, dokler ne izpolni zaustavitvenega pogoja.

4 VREDNOTENJE POSAMEZNEGA NAČRTA ELEKTROMOTORJA

Uporaba nadomestnih modelov zmanjša število izvedenih vrednotenj s simulacijami, a so te pri načrtovanju elektromotorja vseeno potrebne. Da bi vrednotenje posameznega načrta pohitrili, smo ga razdelili na pet korakov. Če se rešitev slabo izkaže po katerem od korakov, jo takoj zavrzemo in s tem prihranimo čas, ki bi ga sicer porabili za izvedbo preostalih korakov. Vrednotenje je orisano na sliki 2 in opisano v nadaljevanju.

- (1) V prvem koraku s hitro izračunljivo skripto, ki so jo pripravili domenski eksperti, preverimo zadoščanje nekaterim strogim omejitvam. To nam pomaga izločiti precejšnje število nedopustnih rešitev, med njimi tudi take, ki bi lahko zaradi slabo zasnovane geometrije povzročale težave pri izvedbi simulacije. Samo dopustne rešitve gredo v naslednji korak vrednotenja.
- (2) V drugem koraku izvedemo simulacijo, s katero pridobimo informacije o določenih pomembnih lastnostih elektromotorja. Ta uporablja poenostavljeno, simetrično formulacijo geometrije elektromotorja, zato je relativno hitra (za izbrani problem traja približno 1 minuto). Trajanje simulacije je sicer odvisno od posameznih rešitev. Pri načrtih, za katere je geometrija zaradi neposrečene kombinacije vrednosti parametrov nemogoča, simulator lahko po dolgem času ne vrne nobenega rezultata ali pa se (redko) celo zruši. Če rešitev ni izvedljiva ali ne zadošča strogim omejitvam, jo zavrzemo. Sicer nadaljujemo z naslednjim korakom.



Slika 2: Vrednotenje rešitev v petih korakih.

- (3) V tretjem koraku iz vseh dobljenih podatkov izračunamo ceno elektromotorja.
- (4) V četrtem koraku preverimo robustnost rešitve. Pri tem se simulacije izvajajo na celotni, asimetrični geometriji elektromotorja, zato so časovno bolj potratne. Pohitrimo jih z uporabo manj natančne mreže (predhodni poskusi so pokazali, da lahko nekaj zanesljivosti žrtvujemo za precejšnji prihranek časa; tako za izbrani problem ena simulacija traja 7 namesto 15 minut). Ker moramo za preverjanje

robustnosti ene rešitve izvesti več simulacij, ki so med seboj neodvisne, to izkoristimo za njihovo paralelizacijo. To izvedemo tako, da vse simulacije z asimetričnim modelom elektromotorja poženemo hkrati na računalniku z večjedrnim procesorjem in tako prihranimo veliko časa. Če preverjanje robustnosti mine brez težav, nadaljujemo z zadnjim korakom postopka.

- (5) V zadnjem, petem koraku izračunamo še dodatne lastnosti elektromotorja in preverimo dopustnost preostalih strogih omejitev.

Za vsako rešitev x po izvedbi opisanega postopka izračunamo vrednost optimizacijskega kriterija. Ta je odvisna od koraka, do katerega se je izvedlo vrednotenje rešitve, in njene kakovosti:

$$f(x) = \begin{cases} 300 + \sum_{i=1}^{k^1} \max\{g_i^1(x), 0\} & x \text{ nedopustna po 1. kor.} \\ 250 & x \text{ neizračunljiva v 2. kor.} \\ 200 + \sum_{i=1}^{k^2} \max\{g_i^2(x), 0\} & x \text{ nedopustna po 2. kor.} \\ 150 & x \text{ neizračunljiva v 4. kor.} \\ 100 + \sum_{i=1}^{k^5} \max\{g_i^5(x), 0\} & x \text{ nedopustna po 5. kor.} \\ c(x) + \sum_{i=1}^l \max\{h_i(x), 0\} & x \text{ dopustna} \end{cases} \quad (4)$$

Pri tem g^1 , g^2 in g^5 po vrsti predstavljajo stroge omejitve v 1., 2. in 5. koraku, c ceno rešitve in h_i njene šibke omejitve. Kazni za kršitev obeh vrst omejitev g_i in h_i so normalizirane tako, da njihova vsota nikoli ne preseže vrednosti 50. Na ta način poskrbimo, da so dopustne rešitve vedno ocenjene bolje od nedopustnih in je rešitev, ki je šla čez več korakov postopka vrednotenja, ocenjena bolje od tiste, ki se je slabo izkazala v katerem od prejšnjih korakov.

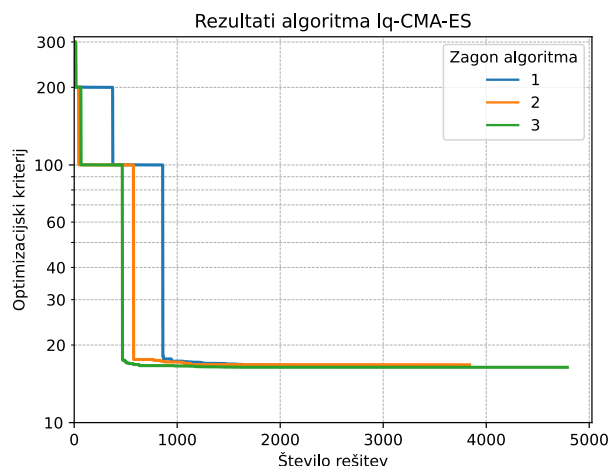
Opisani večstopenjski postopek vrednotenja rešitev s pohitritvami je glavna novost, ki smo jo v okviru sodelovanja med inštitutom in podjetjem uvedli v optimizacijo načrtovanja elektromotorja. Razvijalci v podjetju so že prej uporabljali optimizacijo z nadomestnimi modeli v okviru programskega orodja Ansys [1], vendar pa so v njej lahko upoštevali samo 2. in 3. korak vrednotenja. Začetnega preverjanja dopustnosti (1. koraka) ni bilo, zadnjih dveh korakov pa se ni dalo enostavno vključiti v optimizacijski postopek, zato sta se izvedla šele po zaključku optimizacije na izbranih (najboljših) rešitvah optimizacijskega problema.

5 NUMERIČNI POSKUSI IN REZULTATI

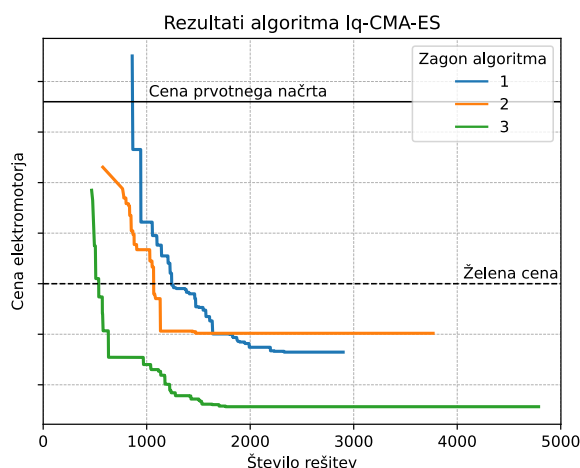
Optimizacijski postopek smo preizkusili na konkretnem primeru elektromotorja za servovolanske sisteme. Ta ima 13 optimizacijskih spremenljivk, od katerih je 12 'zveznih' in ena celoštevilska¹. Optimizacijski kriterij (za dopustne rešitve) sestavljata cena in vsota kršitev dveh šibkih omejitev, medtem ko je vseh strogih omejitev 10. Pri simulaciji robustnosti z asimetričnim modelom (4. korak) smo hkrati poganjali 15 simulacij.

V optimizacijskih izračunih smo uporabili knjižnico pycma, ki nudi implementacijo algoritma lq-CMA-ES v programskem jeziku Python [4]. Algoritmu smo posredovali informacijo o tem, da je ena od spremenljivk celoštevilska, ostale je obravnaval kot zvezne. Velikost začetnega koraka σ_0 smo nastavili na 0.2, dovoljeno število avtomatskih ponovnih zagonov algoritma pa na 5. Vrednosti preostalih parametrov algoritma so bile enake privzetim.

¹Tudi 'zvezne' spremenljivke so zaradi najmanjšega smiselne koraka v resnici diskretne, a jih obravnavamo kot zvezne s stališča algoritma (preden rešitev ovrednotimo, jo zaokrožimo na najbližjo diskretno vrednost).



Slika 3: Najnižja vrednost optimizacijskega kriterija tekom treh zagonov algoritma lq-CMA-ES.



Slika 4: Primerjava najnižje cene elektromotorja tekom treh zagonov algoritma lq-CMA-ES s ceno prvotnega optimiranega načrta in zeleno ceno. (Dejanske cene niso navedene zaradi varovanja poslovne skrivnosti.)

Zaradi časovnih omejitev smo uspeli izvesti samo tri zagone algoritma lq-CMA-ES, ki se razlikujejo v semenu generatorja ključnih števil. Njihovi rezultati so prikazani na slikah 3 in 4. Obe kažeta, kako se opazovana veličina zmanjšuje s časom (številom pregledanih rešitev – štejemo vsako vrednotenje rešitev, tudi če se je končalo že s prvim korakom). Na sliki 3 vidimo zmanjševanje optimizacijskega kriterija (vrednosti pod 100 pomenijo, da je algoritem našel dopustne rešitve), na sliki 4 pa pripadajoče (do takrat najboljše) cene elektromotorjev.

Vidimo, da so rezultati treh zagonov algoritma precej raznoliki. Pri tako zahtevnem problemu in majhnem številu vrednotenj je bilo to pričakovano. Vseeno pa za vse tri zagone velja, da potrebujejo manj kot 1000 pregledanih rešitev, da najdejo dopustne rešitve in hkrati izboljšajo najboljši načrt, najden s prvotnim optimizacijskim postopkom v podjetju. V vseh treh primerih je potrebnih manj kot 1500 vrednotenj, da algoritem najde rešitev s ceno, ki je boljša od zelene. Po približno 2500 vrednotenjih se cena elektromotorja neha bistveno izboljševati.

Kvantitativnega ovrednotenja doprinosa posameznih pohitritev nismo izvedli, vemo pa, da se je vrednotenje rešitev končalo po 1. koraku v 17,5 % primerov (8 min prihranka na rešitev) in po 2. koraku v 29,4 % primerov (7 min prihranka na rešitev).

Ker smo analizo robustnosti, ki se izvede v 4. koraku, precej poenostavili, da smo jo pohitрили in vključili v optimizacijo, smo preverili, če so rezultati 4. in 5. koraka skladni s tistimi, ki bi jih dobili z prvotno analizo. Zato smo nekaj izbranih (najboljših) rešitev podrobneje analizirali in njihove rezultate primerjali s tistimi, ki veljajo za prvotni optimirani načrt. Ugotovili smo, da dobimo kakovostne rešitve, ki niso le dopustne, ampak so za 10 % cenejše od prvotnega najboljšega načrta.

6 ZAKLJUČKI

Problem načrtovanja elektromotorja je zahteven praktičen optimizacijski problem, saj je mnogo načrtov nedopustnih, njihovo vrednotenje pa temelji na numeričnih simulacijah in je zato dolgotrajno. Da bi ga lahko uspešno reševali z uporabo optimizacijskih algoritmov, smo vrednotenje rešitev razdelili na pet korakov, s katerimi želimo čim prej izločiti nedopustne rešitve, da na njih ne tratimo časa. Poleg tega smo optimizacijski postopek pohitрили z uporabo algoritma s hitro izračunljivimi nadomestnimi modeli ter paralelizacijo in poenostavitvijo računsko najzahtevnejšega koraka vrednotenja rešitev.

Predlagani postopek smo preizkusili na konkretnem primeru elektromotorja za servovolanske sisteme, za katerega smo želeli minimizirati ceno in obenem zagotoviti, da bo zadoščal vsem tehničnim zahtevam. Primerjava tako dobljenih načrtov z najboljšim, ki so ga v podjetju prvotno našli s pomočjo enostavnejšega optimizacijskega postopka, je pokazala, da dosežemo dopustne rešitve, ki so cenovno za 10 % ugodnejše od obstoječih. Ob dejstvu, da se v celotnem obdobju proizvodnje takšnega izdelka proizvede več milijonov kosov, to za podjetje predstavlja bistven prihranek in močno izboljšuje njegovo konkurenčnost na trgu.

V prihodnje želimo implementacijo postopka razširiti tako, da bo omogočala enostavno izbiro optimizacijskega kriterija in omejitev ter dodajanje skript za preverjanje dopustnosti rešitev. Cilj je izdelati računalniško orodje, ki ga bodo inženirji lahko samostojno uporabljali pri optimizaciji raznovrstnih elektromotorjev brez poseganja v sam postopek ali optimizacijski algoritem.

ZAHVALA

Zahvaljujemo se podjetju MAHLE Electric Drives Slovenija d.o.o. za financiranje projekta razvoja elektromotorja in sodelovanje pri njegovi izvedbi. Naše temeljne raziskave evolucijskega računanja in večkriterijske optimizacije sofinancira Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije z raziskovalnima programoma št. P2-0098 in P2-0209 ter projekti št. J2-4460, N2-0239 in N2-0254.

LITERATURA

- [1] Ansys, Inc. 2023. Ansys Maxwell. <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-maxwell>. Dostopano 15. 8. 2023. (2023).
- [2] Klaus-Jürgen Bathe. 2007. Finite element method. *Wiley encyclopedia of computer science and engineering*, 1–12.
- [3] Nikolaus Hansen. 2019. A global surrogate assisted CMA-ES. V *Proceedings of the 2019 Genetic and Evolutionary Computation Conference*. ACM, New York, NY, USA, 664–672. doi: 10.1145/3321707.3321842.
- [4] Nikolaus Hansen, Youhei Akimoto in Petr Baudis. 2019. CMA-ES/pycma on Github. (Feb. 2019). doi: 10.5281/zenodo.2559634.
- [5] Nikolaus Hansen in Andreas Ostermeier. 1996. Adapting arbitrary normal mutation distributions in evolution strategies: the covariance matrix adaptation. V *Proceedings of 1996 IEEE International Conference on Evolutionary Computation*. IEEE, 312–317. doi: 10.1109/ICEC.1996.542381.