

Stigmergično optimiranje ploskovnih konstrukcij

Klemen Oblak¹, Peter Korošec², Jurij Šilc², Franc Kosel³

¹ Domel d.d., Otoki 21, 4228 Železniki, Slovenija

² Institut Jožef Stefan, Odsek za računalniške sisteme, Jamova c. 39, 1000 Ljubljana, Slovenija

³ Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, Aškerčeva c. 25, 1000 Ljubljana, Slovenija

E-pošta: klemen.oblak@siol.net

Povzetek. V prispevku je predstavljena metoda večparametrške numerične optimizacije ploskovnih konstrukcij konstantne debeline, izdelanih iz linearno elastičnega homogenega materiala. Optimizacijski algoritem je zasnovan na osnovi stigmerije, ki postaja vse bolj priljubljena pri kombinatorični optimizaciji in v zadnjem času tudi v večparametrski optimizaciji. Kriterij optimizacije je funkcija, ki na podlagi frekvenčno odzivnega spektra v poljubnem rangu, podaja togost ploskovnega sklopa. Izvedena je še verifikacija na realnem industrijskem problemu optimizacije togosti ohišja elektromotorja.

Ključne besede: stigmergija, optimiranje, večnivojski pristop, tenkostenska konstrukcija, togost

Stigmergic Optimization of Plane Constructions

Extended abstract. The paper presents a method of multi-parameter numeric optimization of plane constructions of a constant thickness made of a linearly elastic homogeneous material. The optimization algorithm is based on stigmergy which is becoming increasingly popular in combinatorial optimization and lately also in multi-parameter optimization. The optimization criteria is a function built on the basis of a frequency spectrum of an arbitrary range determining stiffness of the plane structure. The method was verified on a real industrial optimization problem of an electro-motor casing.

Key words: stigmergy, optimization, multi-level approach, plane construction, stiffness

1 Uvod

Pri snovanju tenkostenskih konstrukcijskih elementov zelo pogosto naletimo na problem, kako oblikovati čim lažjo ploskovno konstrukcijo ob sočasni zahtevi po čim večji togosti. Ena od možnosti je, da konstrukciji dodajamo material na ustrezna področja in jo s tem ojačamo, vendar v tem primeru bistveno podaljšamo čas izdelave, povečamo porabo materiala in zahtevnost izdelave. Druga možnost pa je, da ojačamo konstrukcijo le s spremembo njene oblike. Ob predpostavki, da mora biti volumen novo oblikovane konstrukcije enak prejšnjemu, ne porabimo več materiala, in če jo oblikujemo tako, da ne spremenimo proizvodnega postopka, tudi slednjega ne podražimo, saj ostane čas izdelave enak. Tak pristop je pomemben predvsem za nizkocenovne konstrukcije z

vlekom pločevine, ki se jih proizvaja masovno. Primer take optimizacije je podan v nadaljevanju na ohišju elektromotorja, ki ga izdeluje podjetje Domel iz Železnikov.

2 Kriterij optimiranja

Kriterij optimiranja večparametrsko določenega objekta je funkcija, ki ta objekt ovrednoti z neko numerično vrednostjo. Formalno je večparametrski numerični optimizacijski problem $N = (P, D, \Omega, f_c, S, extr)$ definiran z množico parametrov $P = \{p_1, \dots, p_n\}$, imenovano tudi prostor rešitev; množico zveznih domen $D = D_1, \dots, D_n$ parametrov, kjer je parameter p_i vzet iz zvezne domene $D_i, i = 1, \dots, n$; končno množico omejitvev Ω , ki so definirane nad parametri P ; kriterijsko funkcijo $f_c : D_1 \times \dots \times D_n \rightarrow \mathbb{R}$; množico dopustnih rešitev $S = \{\mathbf{s} = (p_1, \dots, p_n) | p_i \in D_i \wedge p_i, \text{ ki zadoščajo omejitvam } \Omega, \text{ za } i = 1, \dots, n\}$ in ekstremom $extr$, ki je lahko min ali max. S imenujemo prostor dopustnih rešitev in vsak element množice S je kandidat za končno rešitev. Da rešimo numerični optimizacijski problem, moramo najti takšno rešitev $\mathbf{s}^* \in S$, da nam kriterijska funkcija f_c vrne $extr$ vrednost. Torej, če $\forall \mathbf{s} \in S$ velja $f_c(\mathbf{s}^*) \geq f_c(\mathbf{s})$, kadar iščemo minimum, oziroma $f_c(\mathbf{s}^*) \leq f_c(\mathbf{s})$, kadar iščemo maksimum, je rešitev \mathbf{s}^* globalno optimalna rešitev problema N .

Množica parametrov $P = \{p_1, \dots, p_n\}$ nam podaja določene segmente konstrukcije, ki jih lahko geometrijsko spreminjamo v območju omejitvev Ω . Tako je lahko parameter p_i radij zaokrožitve na nekem območju, radij izvrtine, naklon ploskve, velikost izbočitve v določenem

delu in podobno. S parametri torej podamo spremembe osnovne geometrije konstrukcije, ki jo nato ovrednotimo s kriterijsko funkcijo tako, da geometrijo obravnavamo kot mehanski del, izpostavljen zunanjim vplivom.

Pri determinističnih obremenitvah je kriterijska funkcija relativno preprosta. Navadno optimiramo take primere na osnovi minimizacije povesa ali napetosti, maksimalne elastičnosti in podobno [1,2,3]. Teže je določiti kriterijsko funkcijo za dinamično obremenjene sklope, kjer so obremenitve stohastične. Vprašanje je torej, kako določiti togost ploskovne konstrukcije, kjer ne poznamo zunanjih obremenitev.

Če si zamislimo neko poljubno oblikovano ravninsko ploščo, lahko zapišemo njeno potencialno energijo kot:

$$W_p - \frac{1}{2} \int_V \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} dV - \frac{1}{2} \int_V (\sigma_{xx} \varepsilon_{xx} + \sigma_{yy} \varepsilon_{yy} + \tau_{xy} \gamma_{xy}) dV.$$

Če upoštevamo, da sta napetostni in deformacijski tenzor, kjer zanemarimo Poissonov strižni modul ($\nu \approx 0$), naslednja:

$$\begin{aligned} \sigma_{ij} &= \{\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \tau_{xy}\}^T \\ &= -zE \left\{ \frac{\partial^2 w(x, y)}{\partial x^2}, \frac{\partial^2 w(x, y)}{\partial y^2}, \frac{\partial^2 w(x, y)}{\partial x \partial y} \right\}^T \end{aligned}$$

in

$$\begin{aligned} \varepsilon_{ij} &= \{\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \gamma_{xy}\}^T \\ &= -z \left\{ \frac{\partial^2 w(x, y)}{\partial x^2}, \frac{\partial^2 w(x, y)}{\partial y^2}, 2 \frac{\partial^2 w(x, y)}{\partial x \partial y} \right\}^T, \end{aligned}$$

lahko zapišemo:

$$\begin{aligned} W_p &= \frac{E}{2} \int_V z^2 \left(\frac{\partial^2 w(x, y)}{\partial x^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 w(x, y)}{\partial y^2} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial^2 w(x, y)}{\partial x \partial y} \right)^2 dV \\ &= \frac{1}{2E} \int_V \sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2 + 2\tau_{xy}^2 dV. \end{aligned}$$

Vidimo, da je v tem primeru potencialna energija kar integral kvadratov napetosti po volumnu.

Definirajmo še kinetično energijo nihanja plošče:

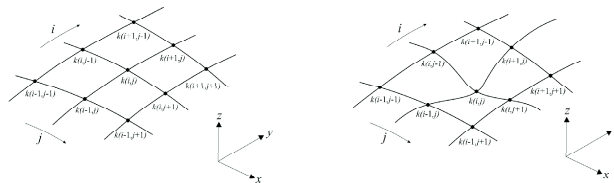
$$W_k = \frac{1}{2} \int_V \rho z \left(\frac{\partial w(x, y)}{\partial t} \right)^2 dV = \frac{\rho \omega^2}{2} \int_V z w^2(x, y) dV.$$

Tu smo drugi odvod pomika po času aproksimirali s produktom kvadrata pomika in lastne frekvence ω . Postopamo po Reileigh-Ritzovi metodi [4]. Za konservativne sisteme je maksimalna potencialna energija enaka maksimalni kinetični energiji ($W_p = W_k$), iz česar sledi izraz za lastno frekvenco

$$\omega = \sqrt{\frac{W_p}{W_k}},$$

ki je v našem primeru lahko že kriterijska funkcija f_c .

Če upoštevamo numerični prostorski primer neke lupinske strukture (slika 1), je treba kriterijsko funkcijo še diskretizirati. Ob predpostavki, da je modul elastičnosti E ves čas konstanten, lahko tega izločimo, saj ne vpliva na rezultat. Napetosti v smeri osi x , y in z pa lahko zamenjamo z glavnimi napetostmi.



Slika 1. Variacija površin Figure 1. Variation of areas

Pomik $w(x, y)$ v smeri osi z se prenese v prostor in se zgodi na splošno v vseh treh koordinatnih oseh. Tako je kriterijska funkcija enaka:

$$f_c(p_1, \dots, p_n) = \prod_{l=m_1}^{m_2} \frac{\sum_{k=1}^n \sigma_{lk}^2}{\sum_{k=1}^n u_{xk}^2 + \sum_{k=1}^n u_{yk}^2 + \sum_{k=1}^n u_{zk}^2}.$$

Tu teče indeks l od m_1 do m_2 , ki sta spodnja in zgornja vrednost zaporedne lastne frekvence, za katere definiramo kriterijsko funkcijo, in sta poljubni. Veljati mora $m_1 \leq m_2$. Indeks k označuje vozlišča mreže, s katero diskretiziramo konstrukcijo (slika 1).

3 Večnivojsko optimiranje na osnovi stigmergije

Stigmergija je način komuniciranja v spreminjajočih se sistemih, kjer posamezni deli sistema medsebojno komunicirajo prek spreminjanja lokalnega okolja. Beseda je sestavljena iz grških besed stigma, kar pomeni spodbuda, in ergon, kar pomeni delati. Prvi jo je vpeljal francoski entomolog Pierre-Paul Grassé kot rezultat opazovanja vrste termitov. Po njegovi definiciji pomeni “spodbujanje dela s produktom dela” [5].

Dober primer stigmergije opazimo v mravljišču, kjer mravlje komunicirajo druga z drugo z odlaganjem feromona na svojih poteh. To je tudi osnovna zamisel pri optimizaciji s kolonijo mravelj, ki postaja čedalje bolj priljubljena v kombinatorični optimizaciji [6] in v zadnjem času tudi v večparametrski optimizaciji [7,8].

Ker se je optimizacija po vzoru stigmergije že izkazala za uspešno pri večparametrski optimizaciji [9], smo se odločili, da jo uporabimo pri našem problemu. V nadaljevanju bomo to metodo tudi na kratko predstavili.

3.1 Predstavitev problema

Zaradi narave stigmergične optimizacije moramo zvezni večparametrski optimizacijski problem najprej pretvoriti v diskretno obliko. Natančneje, če je območje parametra p_i med L_i in U_i ter je diskretizacijski korak Δ_i , ima diskretna oblika parametra p_i

$$p_i = \frac{U_i - L_i}{\Delta_i} + 1$$

diskretnih vrednosti. Vse diskretne vrednosti parametrov prevedemo v povezan, usmerjen, neutezen, acikličen in

urejen preiskovalni graf. Definiramo ga kot $\mathcal{G} = (V, E)$ z množico vozlišč

$$V = \prod_{d=1}^D V_d, \quad V_d = \{v_{d,1}, \dots, v_{d,n_d}\}$$

in množico povezav med točkami

$$E = \prod_{d=1}^D E_d, \quad E_d = \{(v_{d-1,i}, v_{d,j}) \mid v_{d-1,i} \in V_{d-1} \wedge v_{d,j} \in V_d\},$$

kjer je D dolžina najdaljše poti v preiskovalnem grafu, ki je enaka številu parametrov in n_d število diskretnih vrednosti parametra p_d . Vsako vozlišče na razdalji $d - 1$ je povezano z vsemi vozlišči na razdalji d . S takšnim preiskovalnim grafom pokrijemo ves prostor rešitev diskretnega večparametrskega optimizacijskega problema. Pot, ki se začne v vozlišču *start* ($d = 0$) in nadaljuje po preiskovalnem grafu do končnega vozlišča ($d = D$), ima vedno dolžino D . Ta pot vsebuje D vozlišč in vsako vozlišče pripada enemu izmed parametrov. Torej pomeni eno izmed rešitev večparametrške funkcije. Tako lahko dobimo katerokoli rešitev iz prostora rešitev diskretnega problema. Učinkovitost poti je ovrednotena z rezultatom, ki ga za vrednosti parametrov na tej poti vrne kriterijska funkcija. Tako preveden problem imenujemo problem iskanja najcenejše poti. Tu je za iskanje rešitev zelo primeren optimizacijski pristop, ki temelji na stigmergiji pri mravljah. Naslednje, kar moramo storiti, je, določiti attribute vsakemu vozlišču. V našem primeru ima vsako vozlišče dva attribute: prvi, ki je konstanta, pomeni diskretno vrednost parametra, drugi, ki je spremenljivka, pa količino feromona ϕ .

3.2 Večnivojski pristop

Odločili smo se za večnivojski pristop in njegovo sposobnost reševanja optimizacijskih problemov. Ta pristop je preprost in vsebuje v svoji najosnovnejši obliki rekurzivno krčenje za ustvarjanje hierarhije približkov originalnega problema [10]. Začetno rešitev poiščemo na nivoju najbolj skrčenega problema ter nato na vsakem nivoju ponavljamo optimizacijo in drobljenje. Kot splošna strategija reševanja se večnivojski pristop uporablja že vrsto let na različni področjih, npr. pri optimizaciji razdeljevanja mreže pri vzporedni analizi s končnimi elementi [11]. Večnivojski pristop sestavljata dve glavni fazi: krčenje in drobljenje. V našem primeru se bomo osredotočili na krčenje in drobljenje grafa, sicer pa bi bila lahko uporabljena tudi drugačna matematična struktura.

Krčenje je združevanje dveh ali več sosednjih vozlišč v eno vozlišče. To storimo v L ponovitvah, ki jih imenujemo nivoji, $\ell = 0, 1, \dots, L$. Privzemimo krčenje z nivoja ℓ na nivo $\ell + 1$ na razdalji d . Pri tem je

$$V_d^\ell = \{v_{d,1}^\ell, \dots, v_{d,n_d}^\ell\}$$

množica vozlišč na nivoju ℓ in razdalji d preiskovalnega grafa \mathcal{G} , kjer je $1 \leq d \leq D$. Če je n_d^ℓ število vozlišč na razdalji d na začetnem nivoju krčenja, potem velja za vsak nivo ℓ enakost

$$n_d^{\ell+1} = \frac{n_d^\ell}{s_d^\ell},$$

kjer je s_d^ℓ število vozlišč na nivoju ℓ , ki so združena v eno vozlišče na nivoju $\ell + 1$. V_d^ℓ smo razdelili v $n_d^{\ell+1}$ podmnožic, kjer velja

$$V_d^\ell = \prod_{k=1}^{n_d^{\ell+1}} V_{d,k}^\ell, \quad \forall i, j \in \{1, \dots, n_d^{\ell+1}\} \wedge i \neq j : V_{d,i}^\ell \cap V_{d,j}^\ell = \emptyset.$$

Množica $V_d^{\ell+1}$ je množica vozlišč na razdalji d na nivoju $\ell + 1$, kjer je vsako njeno vozlišče $v_{d,k}^{\ell+1}$, $1 \leq k \leq n_d^{\ell+1}$ izbrano po nekem vnaprej določenem načelu iz množice $V_{d,k}^\ell$. Na primer, naključna izbira, najbolj levo/desno/srednje vozlišče v podmnožici itd.

Zaradi preprostega krčenja je tudi samo *drobljenje* preprosto. Pri drobljenju z nivoja ℓ na nivo $\ell - 1$ na razdalji d se spremenljivi attribute vozlišč (količina feromona), ki so rezultat optimiranja na nivoju ℓ , prenesejo na nivo $\ell - 1$. Torej je vsakemu vozlišču iz podmnožice $V_{d,k}^{\ell-1}$ dodeljena enaka vrednost spremenljivega attribute, ki ustreza vozlišču $v_{d,k}^\ell$, izbranemu pri krčenju z nivoja $\ell - 1$ na nivo ℓ ; medtem ostajajo konstantni attribute nespremenjeni.

3.3 Tehnika preiskovanja

Osnovna zamisel je naslednja: najprej prevedemo večparametrski problem v preiskovalni graf in nato uporabimo tehniko preiskovanja, s katero poiščemo v konstruiranem grafu najcenejšo pot; ta vsebuje optimirane vrednosti parametrov. V našem primeru smo uporabili preiskovanje na podlagi stigmergije [7,8], ki se zgleduje po optimizaciji s kolonijo mravelj. Preiskovanje je sestavljeno iz treh glavnih faz: gradnje preiskovalnega grafa, globalnega preiskovanja in lokalnega preiskovanja.

Ko prevedemo množico parametrov P problema N v preiskovalni graf \mathcal{G} , enakomerno porazdelimo po vseh njegovih vozliščih začetno količino feromona ϕ^0 .

V koloniji je več mravelj, ki sočasno začno preiskovanje iz vozlišča *start*. Verjetnost, s katero izbirajo naslednje vozlišče, je odvisna od količine feromona v vozliščih. Mravlje uporabljajo verjetnostno pravilo, s katerim določijo, katero vozlišče bo naslednje izbrano. Natančneje, mravlja μ se v koraku d premakne iz vozlišča $v_{d-1,i} \in \{v_{d-1,1}, \dots, v_{d-1,n_{d-1}}\}$ v vozlišče $v_{d,j} \in \{v_{d,1}, \dots, v_{d,n_d}\}$ z verjetnostjo podano z:

$$\text{prob}_{i,j,\mu}(d) = \frac{\phi_{d,j}}{\sum_{k=1}^{n_d} \phi_{d,k}},$$

kjer je $\phi_{d,k}$ količina feromona v vozlišču $v_{d,k}$. Mravlje ponavljajo takšne premike, dokler ne dosežejo končnega

vozljišča. Nato se vrednosti parametrov, ki jih obhodi vsaka mravlja na svoji poti, ovrednotijo s kriterijsko funkcijo. Potem se mravlja vrne v začetno vozljišče in na svoji poti odlaga v vozljišča feromon glede na rezultat ovrednotenja: boljši ko je rezultat, več feromona odloži v vozljišča. Ko se vse mravlje vrnejo v začetno vozljišče, se izvede t. i. demonska akcija, ki v tem primeru pomeni, da se na trenutno najboljšo pot odloži dodatna količina feromona, manjša količina pa tudi v sosednja vozljišča. Nadalje se zgodi, da feromon v vozljiščih tudi izhlapeva, tj. količina feromona se v vsakem vozljišču $v_{d,k}$ preiskovalnega grafa \mathcal{G} zmanjša za vnaprej določen odstotek ρ , in sicer:

$$\phi_{d,k} \leftarrow (1 - \rho)\phi_{d,k}.$$

Celoten postopek se ponavlja, dokler ni izpolnjen pogoj za končanje (npr. vnaprej določeno število ponovitev).

Lokalno preiskovanje je nujen del algoritma, ki deluje po vzoru mravelj [12]. Z uporabo lokalnega preiskovanja je ponavadi mogoče izboljšati bodisi konvergenco bodisi trenutno najboljšo rešitev. Ker je globalna preiskovalna tehnika bolj usmerjena v iskanje najboljšega področja v prostoru rešitev, uporabimo še lokalno preiskovanje, s katerim izboljšamo najboljše rešitve. Uporabili smo algoritem po načelu najbolj strmega sestopa.

3.4 Algoritem

Večnivojski pristop in opisano preiskovanje smo združili v enovit algoritem, ki smo ga poimenovali *večnivojsko preiskovanje po vzoru stigmergije*.

```

 $\mathcal{G}[0] = \text{SearchGraphConstruction}(P)$ 
for  $\ell = 0$  to  $L - 1$  do
   $\mathcal{G}[\ell + 1] = \text{Coarsening}(\mathcal{G}[\ell])$ 
end for
PheromoneInitialization( $\mathcal{G}[\ell]$ )
for  $\ell = L$  down to 0 do
  while not current level ending condition met do
    for all ants do
      path = FindPath( $\mathcal{G}[\ell]$ )
      Evaluate(path)
    end for
    UpdatePheromone(all ants paths vertices)
    DaemonAction(best path)
    EvaporatePheromone(all vertices)
  end while
  if  $\ell > 0$  then
     $\mathcal{G}[\ell - 1] = \text{Refinement}(\mathcal{G}[\ell])$ 
  end if
end for
LocalSearch(best solution)

```

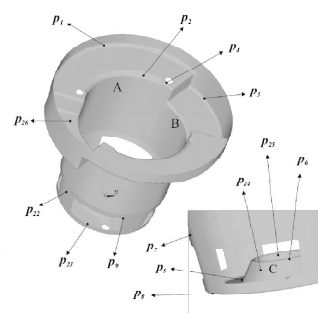
Optimizacijski algoritem je bil sprogramiran v jeziku Borland® Delphi™, kriterijska funkcija pa se je računala s programskim paketom ANSYS®. Poskusi so bili narejeni na računalniku s procesorjem AMD Opteron™ in operacijskim sistemom Microsoft® Windows® XP Professional.

4 Optimiranje ohišja suhe sesalne enote

Ohišje je sestavni del suhe sesalne enote, ki je vgrajena v sesalnikih za prah. Suha ji pravimo zato, ker za filtriranje

ne uporablja vode. Sesalna enota je v osnovi radialni turbokompresor [13], ki ustvarja tlačno razliko, tako da se lahko izvaja proces sesanja nezaželenih delcev skozi filtre v vrečo sesalnika. Ohišje kot njen sestavni del povezuje posamezne elemente in podslope, ki so: pokrov, vodilnik zraka, stator in statorsko navitje ter spodnji ležaj. Ker so razen na pokrov in stator vezani še preostali deli sesalne enote, ima ohišje pomemben vpliv na togost konstrukcije.

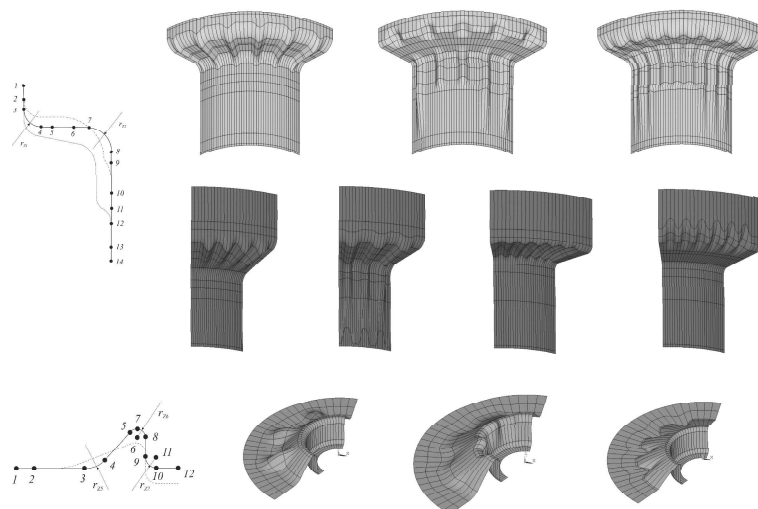
Ohišje je v osnovi rotacijsko simetrična lupinska konstrukcija, katere material je jeklo, primerno za preoblikovanje z globokim vlekrom. Za ta postopek, ki zajema enajst različnih faz, je pomembno, da se premeri z višino večajo ali ostanejo enaki. To je eno od pravil, ki jih ne smemo kršiti pri optimiranju geometrije ohišja. Naloga optimiranja je ohraniti togost ohišja pri uporabi tanjše pločevine. S tem se prihrani pri materialu in posledično pri ceni konstrukcije.



Slika 2. Parametri ohišja, površine za rebrenje (A, B, C) in kontaktne elemente
Figure 2. Parameters of a casing, areas for ribbing (A, B, C), and contact elements

4.1 Parametrično modeliranje

Model ohišja vsebuje 26 parametrov, ki vplivajo na spremembe geometrije (slika 2). Ti so: radij na vrhu (p_1), radij ob boku (p_2), radiji pri utoru za ščetke (p_3), odmik izvrtine za pritrditev difuzorja (p_4), radij zaokrožitve pri začetku utora za ležaj (p_5), radij na vrhu utora za ležaj (p_6), radij pri zračnih kanalih na vrhu (p_7), radij pri zračnih kanalih spodaj (p_8), zaokrožitev zračnih kanalov (p_9), kot nagiba (p_{22}), kot razpona zračnih kanalov (p_{23}), naklon utora za ležaj (p_{24}), višina utora za ležaj (p_{25}) in naklon utora za ščetke (p_{26}), ki jih imenujemo klasični parametri. Poleg klasičnih parametrov jih je še 12 (p_{10} do p_{21}), ki določajo oblike ojačitvenih reber na površinah A, B in C. Rebra so bistvenega pomena za izboljšanje togosti. Če si zamislimo prerez površine v aksialni smeri (slika 3, levo) ene izmed omenjenih površin, potem deluje potek risanja geometrije tako, da se najprej tvorijo točke, skozi katere se potegnjejo krivulje tako, da zadostijo vsem omejitvam. Na primer, rebra ne smejo biti preveč izbočena ali vbočena, da ne bi prišlo do pretрга pločevine



Slika 3. Rebra modela A (desno zgoraj), B (desno v sredini) in C (desno spodaj); $k(i, j)$ -ti potek tvorjenja točk in krivulje reber modelov A in B (levo zgoraj) in modela C (levo spodaj)
 Figure 3. Ribs of model A (top right), B (center right), and C (bottom right); $k(i, j)$ -th forming of points and curve of ribs model A and B(left up) and model C (right bottom)

pri izdelavi z globokim vlekem, prav tako ne smejo nastati na mestu krčnega naseda statorja in podobno. Potem se krivulje iterativno prenesejo v prostor in čeznje se napnejo površine.

Za opis reber na vsaki od površin A, B in C so dovolj štirje parametri, ki podajajo model odmika točk (slika 3, levo), velikost, število in položaj reber, ki je ekvidistančen glede na posamezno rebro. Kombinacij je zelo veliko, nekaj primerov za rebra A, B in C je prikazanih na sliki 3. Poleg parametrov za opis reber vplivajo na obliko reber tudi nekateri klasični parametri. Spremembe radija (p_1) ali (p_2) se odražajo tudi na obliki reber A, spremembe višine utora za ležaj (p_{25}) in naklon utora (p_{24}) se odražajo na rebrih C in podobno.

4.2 Kontaktni deli ohišja in robni pogoji

H kontaktnim delom ohišja sodijo sestavni deli suhe sesalne enote, ki so v neposrednem stiku z ohišjem, in sicer so to pokrov ohišja, stator elektromotorja, ležaj in difuzor. Pokrov s krčnim nasedom nalega na vrh ohišja in mu s tem dodaja togost; zaradi manjše debeline od ohišja je bolj deformabilen in zato privzet kot deformabilno telo. Stator je nakrčen v ohišje in mu prav tako dodaja togost, je pa v primerjavi z ohišjem dovolj trden, tako da je zaradi hitrejšega izračuna definiran kot togo telo. Ležaj je podobno kot stator togo telo, ki je vstavljen v spodnji del ohišja. Difuzor ali vodilnik zraka se privijači v ohišje s štirimi vijaki. Nanj je pritrjen rotor, kar povzroča vzbujanje nihanja med samim obratovanjem. Zato je na mestu difuzorja dodan robni pogoj v smislu ničelnih pomikov.

S tem je definirano vse, kar je potrebno za izračun. Rezultati so se ovrednotili po prej navedeni kriterijski

funkciji $f_c(p_1, \dots, p_{26})$, za lastne frekvence od $m_1 = 1$ do $m_2 = 8$.

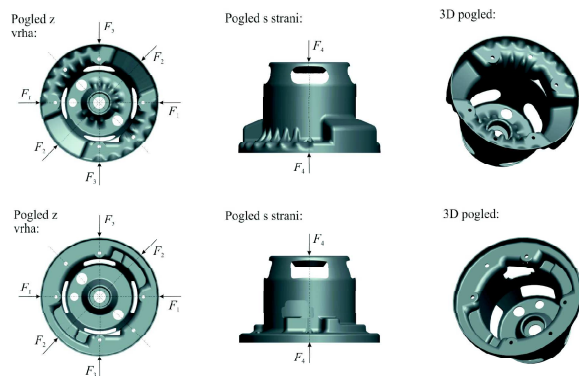
4.3 Rezultati in verifikacija

Rezultati optimiranja so bili dokaj presenetljivi (slika 4, zgoraj). Pričakovati je bilo, da bodo rebra nastajala po vsej površini, vendar se je izkazalo drugače. Izrazitejša so bila na prehodu iz vertikalnega v horizontalni del (rebra A), na mestu krčnega naseda statorja pa jih ni bilo, kar je posledica prednapetja le-tega. Tudi v prostoru za ščetke (rebra B) ni bilo izrazitih reber, kar nakazuje, da je že sam uter nekakšno rebro. Je pa zato dodan nagib utora, ki ga prej ni bilo.

Optimirano ohišje se je eksperimentalno testiralo v Laboratoriju za nelinearno mehaniko, na Fakulteti za strojništvo v Ljubljani, z uporabo naprave Schenk. Z obremenitvami na različnih mestih ohišja brez kontaktnih elementov so se kontrolirali ustrezni pomiki (slika 4). V prvem obremenitvenem primeru (sila F_1) je bilo optimirano ohišje nekoliko slabše, saj je dosegalo približno 12% večje pomike. Razlog je lahko, da nagubane površine zaradi reber vplivajo na slabšo togost v tej smeri obremenjevanja. Prijemališče sile F_2 je bilo zarotirano za 90° glede na prvi obremenitveni primer. Tu je bilo optimirano ohišje boljše za skoraj 10%, kar je verjetno posledica nagiba površine utora za ščetke. V tretjem obremenitvenem primeru (sila F_3), kjer se je stiskalo ohišje v vertikalni smeri, se je optimirano ohišje deformiralo skoraj za polovico manj, kar je izjemen rezultat. Zanimivo je, da je krivulja sile v odvisnosti od pomika za optimirano ohišje na začetku nelinearna, kar je posledica vpliva reber. Pri tem je treba poudariti, da v ohišje niso bili vstavljeni

kontaktni elementi, ki sicer vplivajo na togost.

Poleg obremenjevanja na različnih pozicijah se je meril tudi frekvenčni spekter ohišja, ki ga ne objavljamo. Omeniti je vredno le, da je spekter optimiranega ohišja višji, kar pomeni, da smo mu zvišali lastne frekvence.



Slika 4. Optimirano (zgoraj) in obstoječe (spodaj) ohišje ter različni obremenitveni primeri
Figure 4. Optimized (up) and existent (bottom) casing and different loading cases

5 Sklep

Najpomembnejši dosežek optimiranja je, da bo stena novega ohišja elektromotorja izdelana iz 0,8 mm debele pločevine enake togosti, kot jo ima obstoječe ohišje, ki se izdeluje iz pločevine z debelino 1 mm. Torej je rezultat optimiranja geometrije ohišja elektromotorja tako manjša poraba materiala, kot tudi manjša poraba energije za preoblikovanje z manjšimi silami, kar posledično pomeni nižjo ceno izdelka.

Pri izbrani kriterijski funkciji v optimizacijskem procesu niso bile upoštevane aerodinamične in druge mehanske obremenitve, ki so sicer med delovanjem sesalne enote prisotne. Za nadaljnje optimiranje bo treba sesalno enoto obravnavati kot obremenitveni kolektiv ohišje-propeler, kar pomeni, da bo treba pri določitvi kriterijske funkcije upoštevati tudi dejstvo, da naj bo aerodinamični izkoristek čim večji in akustični efekti čim manjši. To pa vodi na področje večkriterijske optimizacije in bo predmet nadaljnjih raziskav.

Prav tako se lahko na podoben način optimira pokrov ohišja, ki je zaradi gladke oblike eden poglavitnih virov hrupa zaradi vzbujanja. V tem primeru bi morali v kriterijsko funkcijo uvesti tudi zvočne karakteristike.

6 Literatura

[1] F. Kosel, J. Chen, Geometrical Optimization of the Elastostatic Stability Problem of Thin Annular Plate Subjected to Two Locally Acting Loads, *Z. angew. Math. Mech.* 74, 1994, pp. T305–308.

[2] R. Dražumerič, F. Kosel, Optimization of geometry for lateral buckling process of a cantilever beam in the elastic region, *Thin-walled struct.* 43, 2005, pp. 515–529.

[3] B. Taljat, F. Kosel, Optimization of notched tube in elastoplastic domain, *Stroj. vestn.* 39, 1993, pp. 53–56.

[4] M. Tawfik, Different Finite Element Models for Plate Free Vibration: A Comparative Study, *Proc. 8th International Conference on Production Engineering Design and Control*, 2004.

[5] P.-P. Grassé, La Reconstruction du nid et les Coordinations Inter-Individuelles chez *Bellicositermes natalensis* et *Cubitermes* sp. La théorie de la Stigmergie: Essai d'interprétation du Comportement des Termites Constructeurs, *Insect. Soc.* 6, 1959, pp. 41–80.

[6] M. Dorigo, T. Stützle, T. *Ant Colony Optimization*, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 2004.

[7] P. Korošec, Stigmergy as an Approach to Metaheuristic Optimization, Doctoral Dissertation, Jožef Stefan International Postgraduate School, Ljubljana, Slovenia, 2006.

[8] P. Korošec, J. Šilc, The multilevel ant stigmergy algorithm for numerical optimization, *Facta Univ. Ser. Electr. Energ.* 19, 2006, pp. 247–260.

[9] T. Tušar, P. Korošec, G. papa, B. Filipič, J. Šilc, A comparative study of stochastic optimization methods in electric motor design, *Appl. Intell.* 26, 2007, pp. 101–111.

[10] C. Walshaw, Multilevel refinement for combinatorial optimisation problems, *Ann. Oper. Res.* 131, 2004, pp. 325–372.

[11] P. Korošec, J. Šilc, B. Robič, Solving the mesh-partitioning problem with an ant-colony algorithm, *Parall. Comput.* 30, 2004, pp. 785–801.

[12] L.M. Gambardella, M. Dorigo, An ant colony system hybridized with a new local search for the sequential ordering problem, *INFORMS J. Comput.* 12, 2000, pp. 237–255.

[13] M. Popovič, *Kompresorji in ventilatorji. II. del, Turbokompresorji (kompresorji, pihala in ventilatorji)*, VTŠ, Maribor, 1970.

Klemen Oblak je zaposlen v podjetju Domel in je mladi raziskovalec na Fakulteti za strojništvo Univerze v Ljubljani. Raziskovalno se ukvarja z numeričnimi simulacijami in optimizacijami v mehaniki trdih teles in fluidov na področju turbopihal.

Peter Korošec je raziskovalec na Institutu Jožef Stefan v Ljubljani. Njegovo raziskovalno področje je uporaba metahevrstičnih optimizacijskih metod pri numeričnem in kombinatoričnem optimiranju.

Jurij Šilc je višji znanstveni sodelavec na Odseku za računalniške sisteme Instituta Jožef Stefan v Ljubljani. Raziskovalno se ukvarja računalniškimi sistemi in strukturami ter metahevrstičnim optimiranjem.

Franč Kosel je redni profesor na Fakulteti za strojništvo Univerze v Ljubljani. Njegova raziskovalna dejavnost sodi v nelinearno mehaniko, mehaniko elementov in konstrukcij izdelanih iz gradiva z oblikovnim spominom, reševanje problemov elasto-mehanike, plastomehanike, termomehanike, aeromehanike, mikromehanike gradiv in statične stabilnosti enoosnih in dvoosnih konstrukcijskih elementov in konstrukcij.