

**METAMODELING TECHNIQUE FOR SUBSONIC
AERODYNAMIC SHAPE OPTIMIZATION****METAMODELĒŠANAS METODIKA ZEMSKAŅAS
AERODINAMISKĀS FORMAS OPTIMIZĀCIJAI**

Alexander Janushevskis, *Head of Laboratory, Dr.sc.ing.*

Machine and Mechanism Dynamics Research Laboratory

Riga Technical University

Address: 6 Ezermalas Street, Riga, LV-1006, Latvia

Phone: +371 67089396, Fax: +371 67089746

E - mail: janush@latnet.lv

Janis Auzins, *Leading Researcher, Dr.sc.ing.*

Machine and Mechanism Dynamics Research Laboratory

Riga Technical University

Address: 6 Ezermalas Street, Riga, LV-1006, Latvia

Phone: +371 67089396, Fax: +371 67089746

E - mail: auzinsjp@latnet.lv

Janis Janushevskis, *Postgraduate Student, M.sc.dat.*

Riga Technical University, Institute of Mechanics

Address: 6 Ezermalas Street, Riga, LV-1006, Latvia

Phone: +371 67089396, Fax: +371 67089746

E - mail: janush@one.lv

Janis Viba, *Professor, Dr.habil.sc.ing.*

Riga Technical University, Institute of Mechanics

Address: 6 Ezermalas Street, Riga, LV-1006, Latvia

Phone: +371 67089473, Fax: +371 67089746

E - mail: janis.viba@rtu.lv

Atslēgas vārdi: formas optimizācija, metamodelis, aerodinamika

1. Ievads

Energoresursu izmaksu nepārtrauktais pieaugums nosaka nepieciešamību, projektējot visdažādākos objektus, veikt rūpīgu to aerodinamisko formu optimizāciju. Formas optimizācija ir aktuāla arī uzdevumos, kas saistīti ar objektu stiprības, ilgzitūības, svara un citu raksturojumu

uzlabošanu dažādās mašīnbūves jomās. Tai ir veltīti daudzi darbi un pētījumi. Neskatoties uz formas optimizācijas uzdevuma acīmredzamo vienkāršību idejiskā (idejas) līmenī, praktiska tā realizācija ir saistīta ar ļoti lieliem resursu patēriņiem un līdz ar to bieži tiek veikta nepilnīgi vai vispār netiek veikta, paļaujoties tikai uz inženiera intuīciju.

Tomēr inženierpraksē arvien plašāk tiek izmantotas skaitliskās fluīdu dinamikas (CFD) [1, 2] metodes, kas bāzējas uz masas, momenta un enerģijas saglabāšanās likumiem un ir realizētas atbilstošos algoritmos datoru programmu veidā. Skaitliskās diskretizācijas procedūras ietver galīgo starpību, galīgo tilpumu, galīgo elementu (GE), kā arī spektrālās un beztīkla metodes. Plūsmas uzdevuma vispārīgā gadījumā [2] ir jārisina Reinoldsa vidinātos Navjē-Stoksa vienādojumus, kas apraksta cietu ķermeņu patvaļīgu kustību 3D saspiežamās plūsmās. Lai paaugstinātu turbulences apraksta adekvātumu, tiek izmantoti turbulenci aprakstoši papildus vienādojumi lielu Reinoldsa skaitļu plūsmas gadījumā. Izplatītākie ir turbulences disipācijas ātruma ($k-\epsilon$), turbulences frekvences ($k-\omega$) un bīdes spriegumu transporta (SST-Shear Stress Transport) vienādojumi [3]. Pēdējie tiek uzskatīti par precīzākiem un faktiski ietver sevī abus iepriekšējos, proti, sienīņu tuvumā tiek izmantoti ($k-\epsilon$), bet tālu prom no sienas ($k-\omega$) vienādojumi, pie tam tie atļauj realizēt automātisku pārslēgšanos no sienu funkcijām uz mazo Reinoldsa skaitļu metodēm. Augstākminētajās spektrālajās metodēs tāpat tiek diskretizēti Navjē-Stoksa vienādojumi iegūstot algebrisku vienādojumu sistēmu. Pēdējā laikā tiek lietotas tādas jaunas metodes [2] kā gāzes šūnu automātiskā režģa (lattice gas cellular automata), režģa - Bolcmaņa (lattice - Boltzman) metode un disipatīvo daļiņu metode, kas balstās nevis uz Navjē-Stoksa vienādojumiem, bet gan uz vienkāršotiem kinētiskajiem modeļiem, kas ievēro mikroskopisko un mezoskopisko procesu fiziku tādējādi, ka makroskopiski vidinātās īpašības pakļaujas makroskopiskajiem Navjē-Stoksa vienādojumiem. Risināšanas algoritmi tiek nemitīgi pilnveidoti un uzlaboti, tā piemēram darbā [4], Runge Kutas ar nesaišu gludināšanu un multitīkla izmantošanas vietā tiek lietota simetriskā Gausa Zeideļa shēma (Lower Upper Symmetric Gauss-Seidel) vienādojumu risināšanai. Strukturētu tīklu gadījumā plaši tiek lietota adaptīvā tīklošana, kas ļauj iekonomēt elementu skaitu, nesamazinot aprēķinu precizitāti. Adaptācija tiek realizēta, izvērtējot lokālās plūsmas kopējo spiediena gradientu.

Tādējādi katrā aerodinamisko formu optimizācijas uzdevuma solī ir jārisina pietiekoši sarežģīta vienādojumu sistēma, kas parasti ir ļoti darbietilpīgs process. Tāpēc lidaparātu projektēšanai kā piemērotākās formas optimizācijas metodes tiek izmantotas nepārtrauktā reducētā sekvenciālā kvadrātiskās programmēšanas (SQP), gradientu [4, 5], ģenētisko algoritmu u.c. metodes [6]. Lai optimizāciju veiktu ar pieņemamu laika patēriņu, tiek izmantoti daudzprocesoru datoru klasteri ar milzīgu jaudu. Tai pat laikā dažādu sistēmu optimizācijā sekmīgi tiek lietota metamodelēšanas pieeja [7, 8], kas būtiski smazina kopējo darbietilpību.

Formas optimizācijā it sevišķi aerodinamikā ir uzkrāta milzīga pieredze [1, 2, 9] un eksistē sekojošas pamatpieejas, kad optimizējamā objekta formu parasti uzdod, izmantojot 1) tīklojuma mezgla punktus [10, 11] vai 2) diskrētus atbalsta punktus, kuri tiek lietoti tai vai citai aproksimācijai, piemēram, ar Bezjē (Bézier) līknēm [12, 13] vai gabaliem polinomiālām funkcijām - nevienmērīgajiem racionālajiem B splainiem (NURBS) [3]. Pirmā pieeja, atšķirībā no otrās, tiek saukta par CAD neatkarīgu formas parametrizāciju. Tas, kāda aproksimācija tiek lietota inženierpraksē, ir atkarīgs no izmantojamās ģeometriskās modelēšanas (CAD) programmatūras. Bezjē līkņu trūkums ir tai apstākļi, ka aproksimējošā līkne neiet cauri vairumam no atbalsta punktiem. NURBS ir vieglāk vadāmi un nodrošina otrās kārtas nepārtrauktību ģeometrijai, kas ir būtiski plūdeni aerodinamisku formu iegūšanai. Šai darbā tiek piedāvāta metamodelēšanas metodika aerodinamisku objektu formas optimizācijai, izmantojot NURBS. Objekta formas uzdošanai tiek izmantota 3 dimensiju (3D) mehānisko sistēmu komerciālā CAD programma SolidWorks, bet kā fluīdu dinamikas aprēķinu programmatūra kalpo CosmosFloworks (turpmāk Floworks).

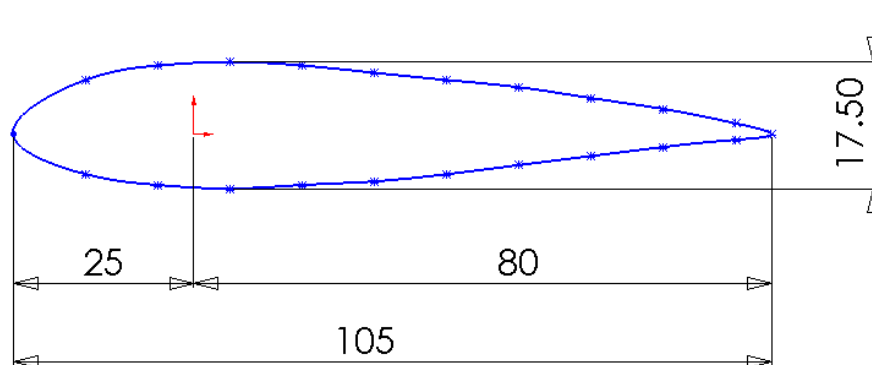
2. Metamodelēšanas metodika aerodinamisku sistēmu optimizācijai

Formas optimizācijas pamatā ir objekta matemātiskais modelis. Sarežģītu modeļu gadījumos, lai nodrošinātu optimizācijas iespējas, parasti tiek lietota atbildes virsmas metode [8], kas paredz globālo otrās kārtas polinomiālo aproksimāciju lietošanu, vai neironu tīklu pieeja, kas prasa zināmu inženiera pieredzi un izveicību atbilstoša tīkla radīšanai. Visbiežāk metamodelu būvēšanai tiek izmantotas polinomiālas funkcijas vai arī lietoti stohastiskie Kriging [14] modeļi, radiālās bāzes funkcijas [15] vai adaptīvās regresijas splaini [16]. Polinomiālie modeļi izceļas ar to būvēšanas vienkāršību un aprēķināšanas ātrumu, kas ir būtiski globālās optimizācijas uzdevuma risināšanas gadījumā, uz ko parasti reducējas formas optimizācija. Šai darbā zemskaņas ātruma aerodinamiskās formas optimizācijai izmantosim lokālās aproksimācijas metodi, kas realizēta RTU izstrādātajā programmā EDAOpt [7, 17]. Pilnā modeļa aerodinamisko aprēķinu veikšanai izmantosim programmas Floworks 2005 versiju. Izstrādāto inženiermetodiku izklāstīsim, risinot konkrētu uzdevumu.

2.1. Solis 1 – Objekta ģeometriskā un aprēķinu modeļa izveide

Modernās 3D ģeometriskās modelēšanas programmatūras brīvas formas līkņu attēlošanai izmanto gabaliem polinomiālas funkcijas – dažāda veida splainus [18]. Daudzās CAD programmās, t.sk. programmā SolidWorks, tiek izmantoti NURBS. Kā aprēķina objekts ir izvēlēts zemskaņas aerodinamiskā tuneļa [19] testēšanai paredzētais spārns, kura šķērsriezums pa spārna garumu nemainās un ir redzams 1. attēlā, bet atbalsta punktu koordinātas dotas 1. tabulā.

Koordinātu Oxy sākuma punkts O atrodas uz spārna hordas, ar kuru sakrīt x ass. Atbalsta punktu numerācija sākas uz priekšējās šķautnes un secīgi turpinās, apejot spārna augšpusi līdz aizmugurējai šķautnei un atpakaļ pa spārna apakšu līdz priekšējai šķautnei.



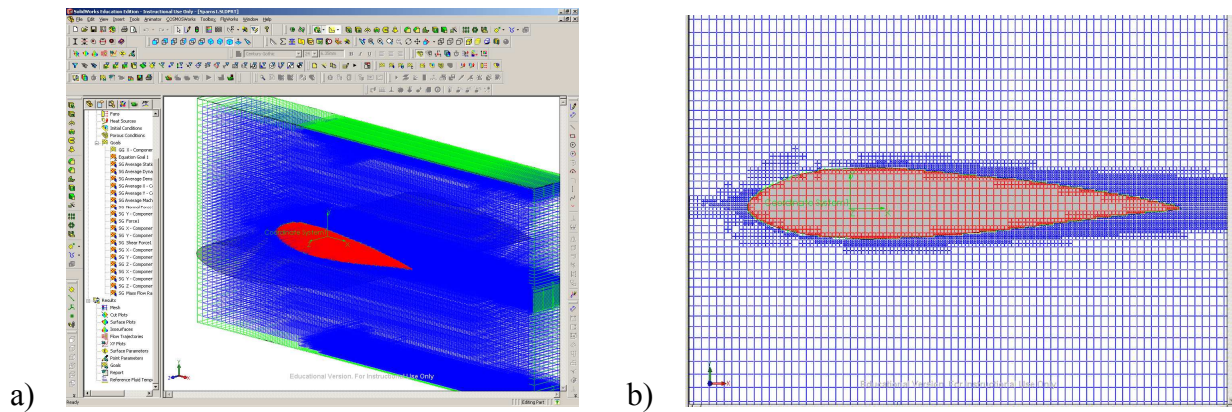
1. attēls. Aprēķinu objekta šķērsriezuma ģeometrija fiksēta ar NURBS

1. tabula. Spārna šķērsriezuma atbalsta punktu koordinātas

Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
x_i [mm]	-25	-15	-5	5	15	25	35	45	55	65	75
y_i [mm]	0	7.5	9.5	10	9.5	8.5	7.5	6.5	5	3.5	2

Nr.	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
x_i [mm]	80	75	65	55	45	35	25	15	5	-5	-15
y_i [mm]	0	-0.75	-1.75	-3	-4.25	-5.5	-6.5	-7.0	-7.5	-7	-5.5

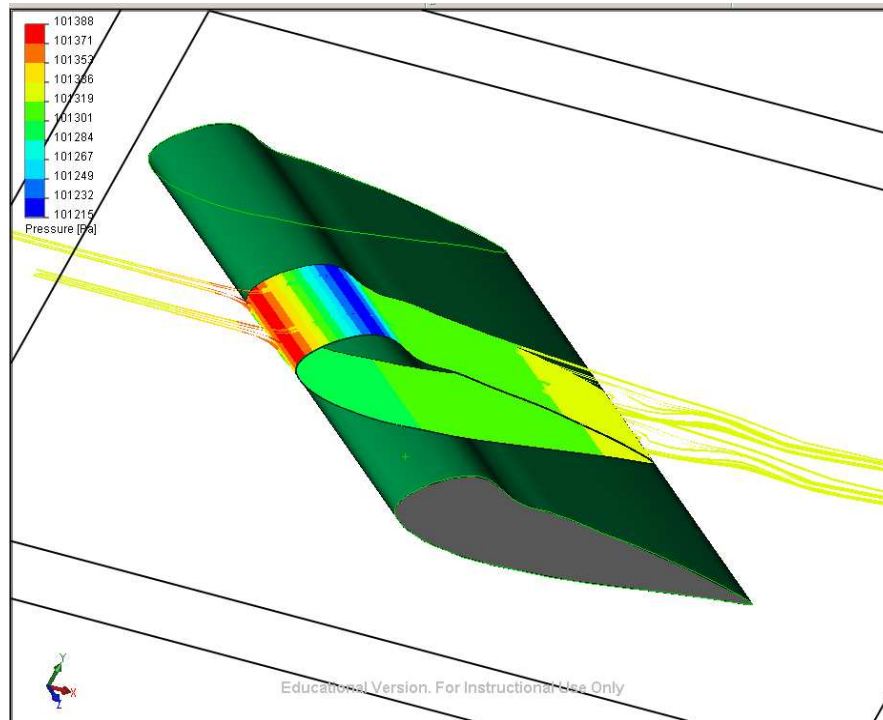
Aprēķina modelis tiek veidots Floworks vidē, pamatojoties uz objekta ģeometrisko modeli. Tā kā spārna profils pa tā garumu nemainās, tad aprēķina apgabals tiek veidots izmantojot objekta simetriju tā, lai minimizētu aprēķinu darbietilpību. Veicot virkni sākotnēju testa aprēķinu ar nolūku panākt stabilu Floworks rezultātu konvergenci, tika izvēlēti sekojoši aprēķina apgabala izmēri: x [-98; 195], y [-75; 82] un z [-15; 15] (skat. 2.a. attēlu). Tiek rēķināts ārējās plūsmas uzdevums, pieņemot, ka cietā ķermeņa sienas ir gludas un ir spēkā adiabatiskais termodinamiskais process, ar sekojošiem apkārtējās vides noteikumiem: $V_{g,pl.}=10$ m/s; $p=101325$ Pa; $T=293.2$ K. Programma analizē stacionāru plūsmas uzdevumu un pieļauj lamināru un turbulentu plūsmu tipus. Kā var redzēt 2. attēlā, tad tīklojums ir nestrukturēts, proti, elementi ir paralēlskaldņi, kuri gaisa plūsmas un cietā ķermeņa saskares virsmas tuvumā ir papildus smalcināti. Tīklojuma uzlabošanas līmenis ir 5.



2. attēls. a) Objekta tīklojums telpā un b) Tīklojums tā šķērs griezuma plaknē

Gaisa plūsmas ātrums ir konstants un incidences leņķis visos aprēķinos ir 0. Bez tam tiek pieņemts, ka objekts ir nekustīgs un tiek rēķinātas horizontālā un vertikālā aerodinamiskā spēka komponentes. Spārna frontālās pretestības spēks F_x un cēlējspēks F_y tika izvēlēti kā Floworks globālie aprēķina mērķi (Global Goals) un vienlaicīgi nozīmēti kā aprēķinu konverģences kritēriji.

Optimālās formas meklēšanai tiek variētas atbalsta punktu Nr. 2 un Nr. 3 (skat. 1. tabulu) koordinātas y_i , kas tālāk figurē kā optimizācijas parametri, proti, X_1 – spārna profila augstuma y_i vērtība punktā Nr. 2 ar koordinātu $x_2 = -15$ mm, X_2 – spārna profila augstuma y_i vērtība punktā Nr. 3 ar koordinātu $x_3 = -5$ mm.



3. attēls. Gaisa plūsmas trajektorijas un spiediena izovirsmas

3. attēlā redzams tipisks aprēķinu apgabalā iegūtais spiediena sadalījums uz noteiktas formas pētāmā objekta telpiskā modeļa virsmas un gaisa plūsmas trajektorijas.







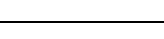





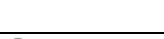



GE skaits konkrētajam uzdevumam var sasniegt līdz 750 tūkstošiem un nepieciešamais iterāciju skaits variē no dažiem simtiem līdz dažiem tūkstošiem un var pat pārsniegt 10000 iterāciju atkarībā no risināmā uzdevuma parametriem. Līdz ar to viens aprēķins uz 3.2 GHz Intel Pentium 4 datora var ilgt pat vairāk par desmit stundām. Šādos gadījumos nācās aprobežoties tikai ar viena konverģences kritērija F_x apmierināšanu.

2.2. Solis 2 – Eksperimentu plānošana un skaitliskie eksperimenti

Tā kā apskatāmā tipa uzdevumos skaitlisko eksperimentu darbietilpīgums ir ievērojams, tad būtiski ir izvēlēties tādus plānus, kas ar minimālu eksperimentu skaitu nodrošinātu iespēju uzbūvēt kvalitatīvu un adekvātu metamodeli. Šādos apstākļos jāizmanto atbilstoša eksperimentu plānošanas programmatūra. Šī metodika paredz izmantot RTU izstrādāto programmu EDAOpt, kas ļauj ģenerēt lielu daudzumu dažādu plānu pie fiksēta eksperimentu skaita, kā arī papildus iegūt plānus sarežģītākās situācijās, kad lietotājam ir grūtības iepieš definēt kopējo eksperimentu skaitu, proti, programma atļauj izmantot oriģinālus sekvenciālos eksperimentu plānus [20, 21]. Mūsu gadījumā tika izvēlēts pēc V. Eglāja kritērija [20] optimizēts 16 eksperimentu plāns diviem mainīgajiem X_1 un X_2 (skat. 2. tabulu). Šīs tabulas otrajā kolonnā redzama objekta šķērsriezuma forma pie tekošajām atbalsta punktu koordinātu vērtībām.

Skaitliskie eksperimenti tiek veikti tā, kā tas ir aprakstīts punktā 2.1. Ar SolidWorks tiek uzbūvēti 16 objekta ģeometriskie modeļi. Katrs no tiem tiek neatkarīgi viens no otra diskretizēts ar Floworks un iegūts atbilstošs matemātiskais modelis, kura risināšanas rezultāti apkopoti 2. tabulas pēdējās divās kolonnās, kur treknrakstā izceltas dotajos eksperimentos iegūtās spēku maksimālās un minimālās vērtības. 2. tabulā dotās vērtības atbilst spēkiem, kas darbojas uz objektu tikai aprēķina apgabalā, respektīvi, lai iegūtu kopējo faktisko spēku, šīs spēku vērtības jāpalielina proporcionāli faktiskajam objekta virsmas laukumam.

2. tabula. Frontālā F_x un cēlējspēka F_y vērtības, kas sarēķinātas pilnajam modelim

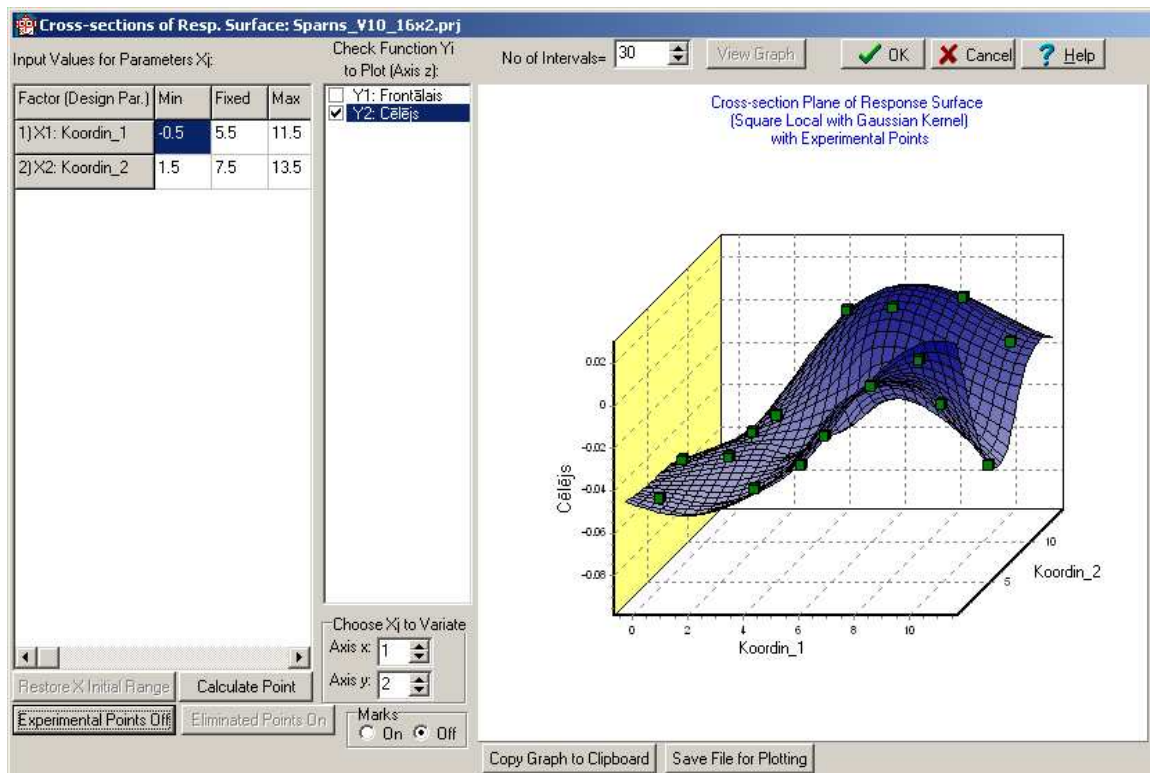
Nr	Šķērsriezuma forma	Iterāciju skaits	X_1 [mm]	X_2 [mm]	Frontālais spēks F_x [N]	Cēlējspēks F_y [N]
1)		407	9.1	7.9	0.04	-0.025
2)		452	8.3	13.5	0.015	0.004
3)		290	5.1	7.1	0.0039	-0.037
4)		7500	6.7	10.3	0.004	-0.011
5)		237	0.3	3.1	0.00375	-0.051
6)		208	1.9	6.3	0.00376	-0.044
7)		3023	10.7	11.1	0.047	-0.008
8)		1391	4.3	12.7	0.008	0.0009
9)		354	5.9	1.5	0.0052	-0.03
10)		243	3.5	3.9	0.0035	-0.05
11)		300	7.5	4.7	0.0053	-0.0048
12)		178	11.5	5.5	0.0094	-0.045
13)		395	2.7	9.5	0.0044	-0.036
14)		583	9.9	2.3	0.0081	0.0159
15)		516	-0.5	8.7	0.0056	-0.055
16)		209	1.1	11.9	0.011	-0.054

Tā kā metamodelis tiek izmantots optimizācijai, tad ir pietiekoši ērti operēt arī ar šo spēku relatīvajām vērtībām, proti, to vērtības atbilst aprēķina apgabala veidotai joslai, kā tas redzams 3. att. Bez tam jāatzīmē, ka uzrādītās spēku vērtības ir vidinātas pa 50 pēdējām iterācijām. 6. attēlā redzama tipiska aprēķinu konverģences aina. Kā konverģences kritēriji šeit ir izvēlēti F_y un F_x .

2.3. Solis 3 – Metamodeļu būvēšana objekta optimizācijai

Metamodeļu veidošanai tiek izmantota programma EDAOpt, kas ļauj būt globālās un lokālās polinomiālās aproksimācijas. Var tikt izmantoti polinomi līdz trešajai kārtai. Lokālajām aproksimācijām iespējams izmantot dažādas svāra funkcijas (Gaussian, Tricube, Uniform,

Triangle, Epanechnikov, Biweight, Triweight, Cosinus etc.). 4. attēlā ir parādīta objekta metamodeļa - cēlējspēka atbildes virsma, kas iegūta izmantojot EDAOpt pieejamo lokālo kvadrātisko aproksimāciju ar Gausa svāra funkciju. Uz atbildes virsmas ar kvadrātiņiem attēloti 16 eksperimentālie punkti, kas šajā gadījumā ļauj arī tīri vizuāli novērtēt aproksimācijas kvalitāti.



4. attēls. Cēlējspēka aproksimācija ar EDAOpt

Par iegūto aproksimāciju kvalitāti var spriest arī, analizējot virkni EDAOpt piedāvāto kvantitatīvo rādītāju: MaxError un MaxRelError - maksimālās absolūtā un relatīvā aproksimācijas kļūdas tekošajai aproksimācijai; Sigma0 un Sigma0% - absolūtā un relatīvā aproksimācijas vidējā normalizētā (ievērots aproksimācijas brīvības pakāpju skaits) kvadrātiskā novirze, kas sarēķināta neatfiltrētajos punktos; Sigma un Sigma% - absolūtā un relatīvā (procentos attiecībā pret vidējo kvadrātisko novirzi no vidējās vērtības eksperimentālajos punktos) aproksimācijas vidējā kvadrātiskā novirze, kas sarēķināta neatfiltrētajos punktos; SigmaCross un SigmaCross% - absolūtā un relatīvā (procentos attiecībā pret vidējo kvadrātisko novirzi no vidējās vērtības eksperimentālajos punktos) vidējā kvadrātiskā novirze krosvalidācijai. Galvenā uzmanība ir jāpievērš rādītājam SigmaCross, kas ir jo mazāks, jo labāka ir aproksimācija. Nepieciešamības gadījumā var veikt izsitienu filtrēšanu.

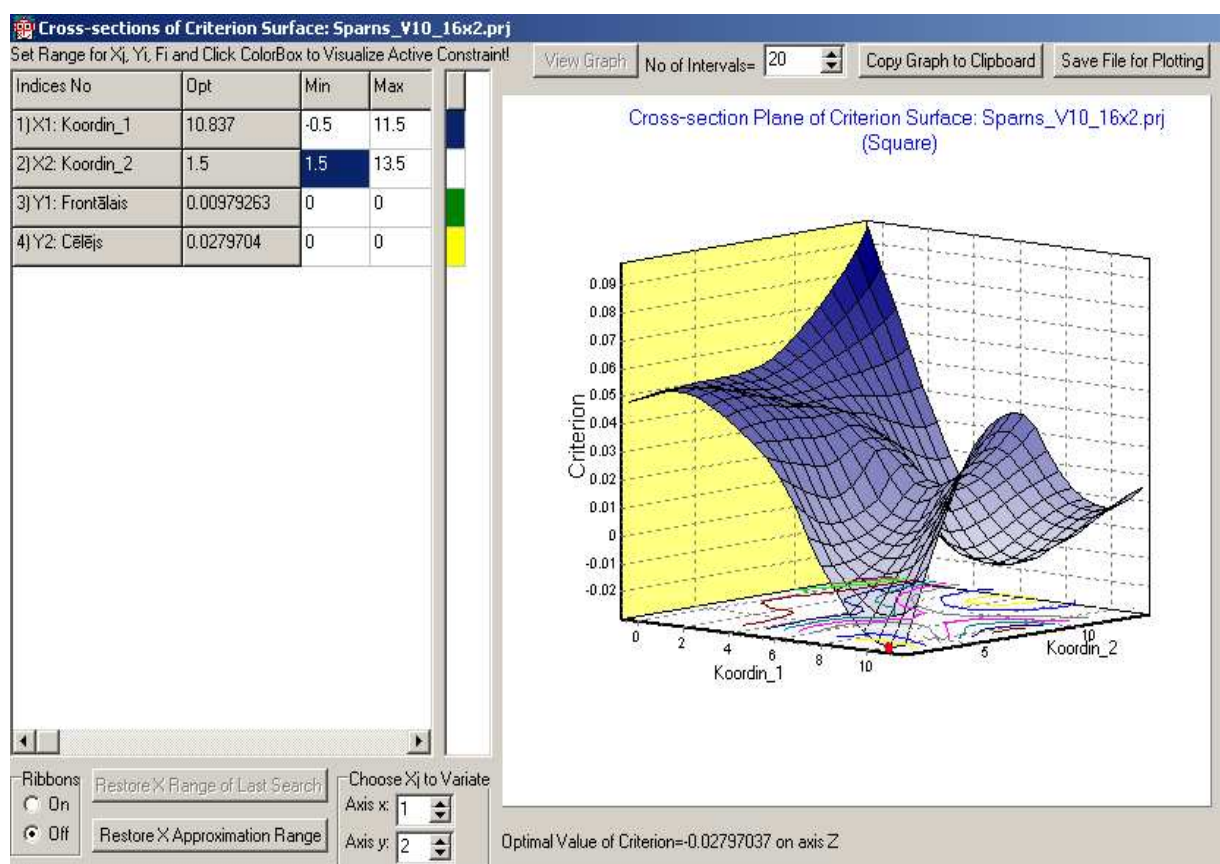
Līdzīgi var iegūt F_x un visus citus interesējošā objekta metamodeļus. Tā kā EDAOpt programmā ir integrēta arī optimizācijas daļa, metamodeļu izteiksmes analītisku formulu veidā lietotājam atklātā veidā pat nav nepieciešamas un tādējādi ir izlēgts potenciālo iespējamo kļūdu papildus avots.

2.4. Solis 4 – Optimizācijas uzdevumu risināšana un optimuma punktu analīze

Izmantojot metamodeļus, pieļaujama kritērija un ierobežojumu skaitļošanas skaits var būt ievērojams un sasniegt simtiem tūkstošu un pat miljoniem reižu, jo to sarēķināšana prasa daudzkārt mazāku laiku nekā kritērija aprēķins pilnajam modelim. Līdz ar to ir iespējama

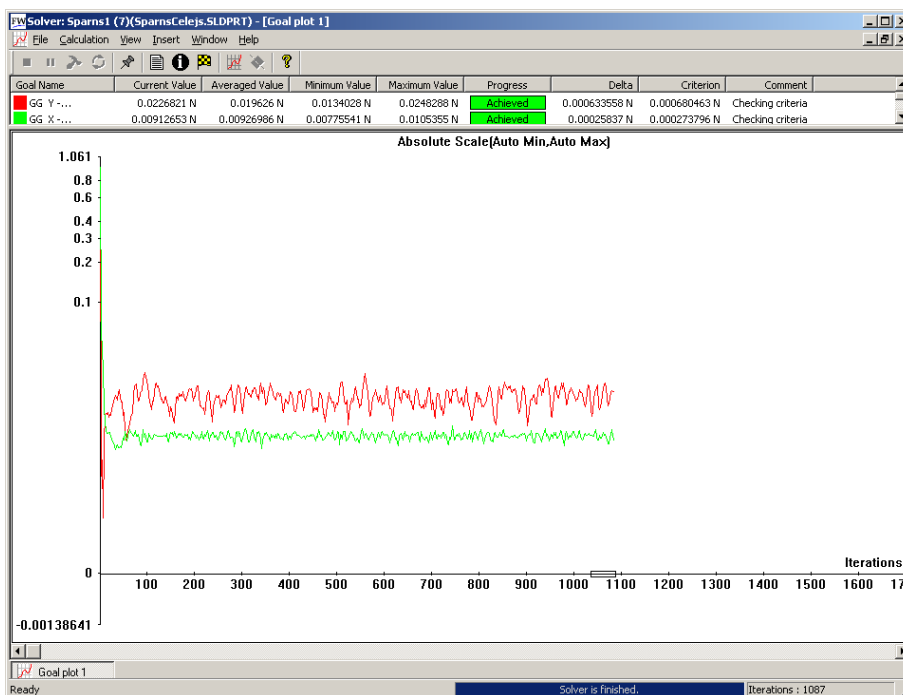
globālo ekstrēmumu atrašana. Lietotājs var formulēt dažādus optimizācijas uzdevumus un ātri iegūt atrisinājumus.

I. UZDEVUMS. Ar EDAOpt minimizēsim $-F_y$ un iegūsim maksimālo objekta cēlējspēku, variējot parametrus sekojošās robežās $-0.5 \leq X_1 \leq 11.5$ un $1.5 \leq X_2 \leq 13.5$. 5. attēlā parādīts EDAOpt logs ar praktiski momentāli atrasto optimumu $F_y(10.84, 1.5) = 0.028$ (sarkanais punkts) uz atbilstošā kritērija virsmas. Zem kritērija virsmas redzamas atbilstošās funkcijas līmeņu līnijas.

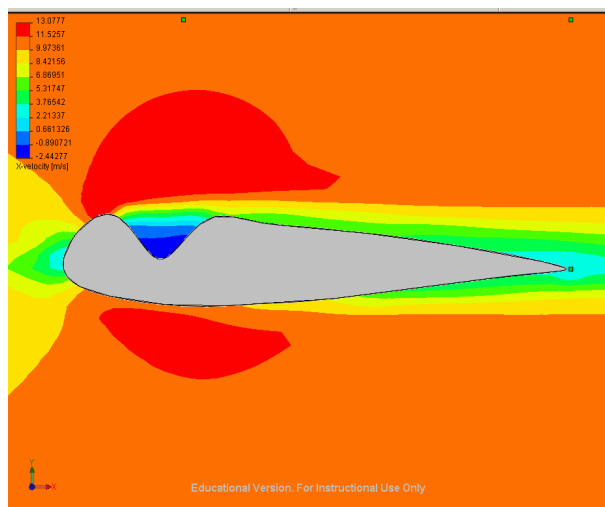


5. attēls. Ar EDAOpt pēc kritērija: $\max F_y$ jeb $\min(-F_y)$ atrastais optimums

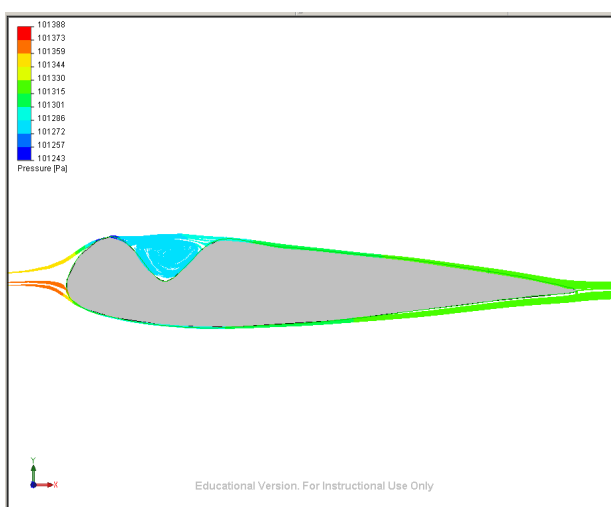
Rezultātu validācijai iegūtajā optimuma punktā $X_1 = 10.837$ mm un $X_2 = 1.5$ mm veicam papildus aprēķinu, izmantojot jau pilno modeli. 6. attēlā redzama Floworks aprēķinu konverģences gaita, bet attēlos 7 un 8 attiecīgi iegūtās formas spārns ar gaisa plūsmas ātrumu spārna hordas virzienā un gaisa plūsmas trajektorijām.



6. attēls. Pēc ~1100 iterācijām ar Floworks iegūts: $F_y=0.02$; $F_x=0.009$



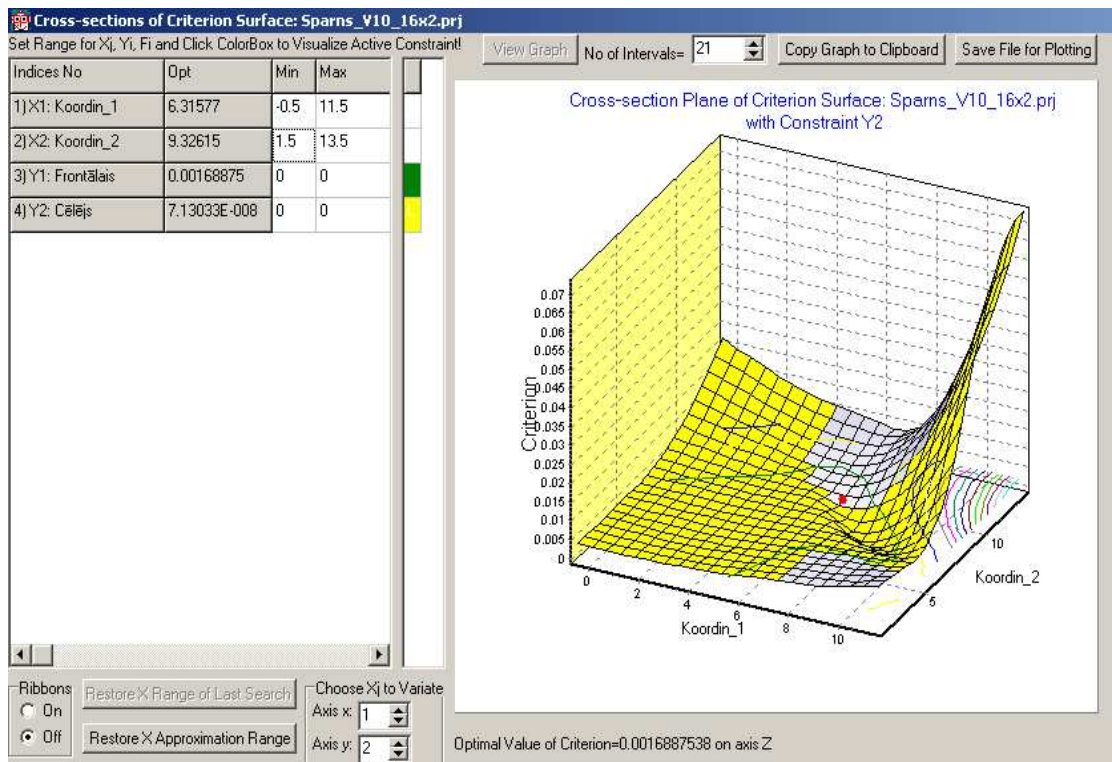
7. attēls. Gaisa plūsmas ātrums V_x



8. attēls. Gaisa plūsmas trajektorijas

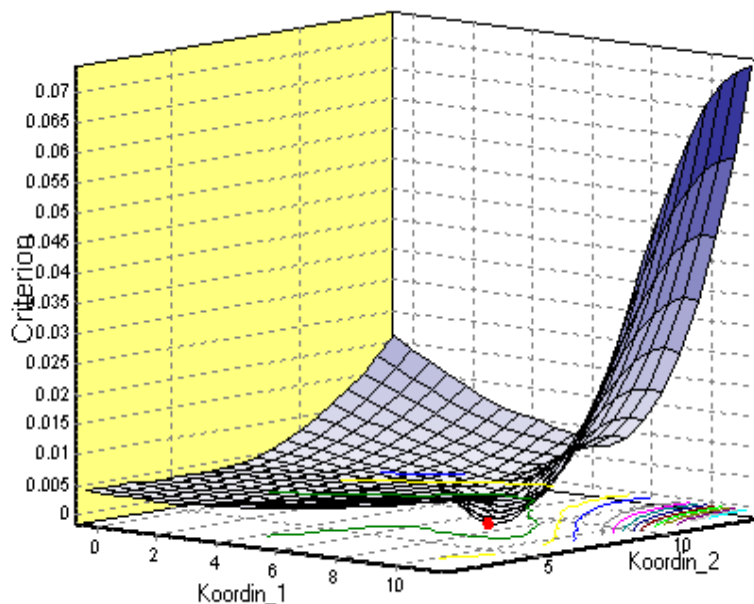
Frontālā spēka iegūtā vērtība ar metamodeli ir 0.00979 N, kamēr ar pilno modeli tā vidinātā vērtība 50 iterācijās ir 0.00927 N, pie kam, kā redzams 6. attēlā, šo iterāciju laikā tas fluktuē diapazonā no 0.00776 N līdz 0.0105 N. Līdz ar to metamodeļa dotais rezultāts iekļaujas ar pilno modeli iegūto rezultātu izkliedes diapazonā, kas ir labs rādītājs. Cēlējspēka iegūtā vērtība ar metamodeli ir 0.028 N, kamēr ar pilno modeli tā vidinātā vērtība ir 0.02, bet maksimālā 0.025. Ar metamodeli iegūtā vērtība dod kļūdu ~12% attiecībā pret pilnā modeļa doto maksimālo vērtību, kas inženieraprēķinu praksē ir pilnīgi pieņemami.

II. UZDEVUMS. Minimizēsim F_x , variējot parametrus sekojošās robežās $-0.5 \leq X_1 \leq 11.5$ un $1.5 \leq X_2 \leq 13.5$ pie ierobežojuma, ka objekta cēlējspēks nedrīkst būt negatīvs, t.i., $F_y > 0$. 9. attēlā parādīts EDAOpt logs ar dažās sekundēs atrasto optimumu (sarkanais punkts) uz atbilstošās atbildes virsmas.



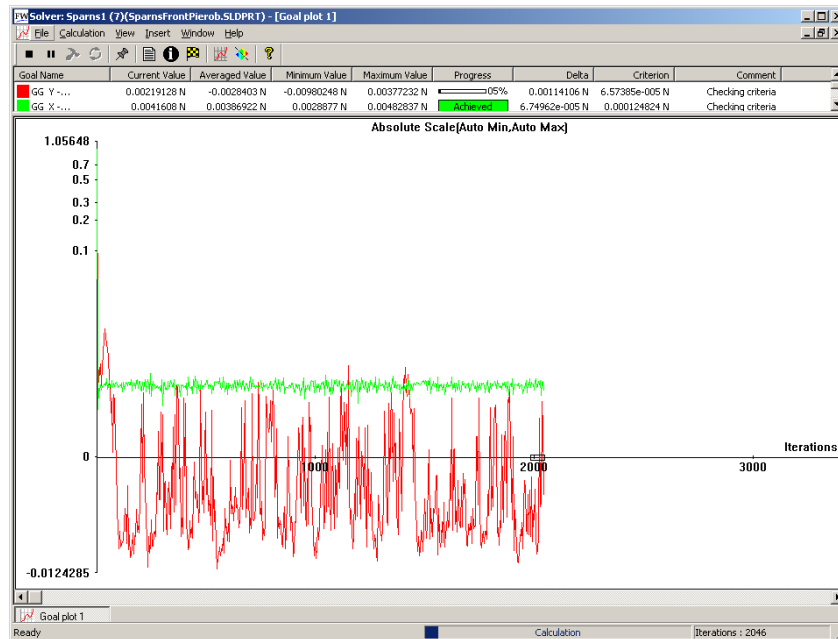
9. attēls. Ar EDAOpt atrastais optimums pēc kritērija: min F_x pie ierobežojuma $F_y > 0$

Zem atbildes virsmas redzamas kritērija funkcijas līmeņu līnijas, bet dzeltenajā krāsā iekrāsotais atbildes virsmas apgabals norāda uz to apgabalu, kur ir aktīvs ierobežojums $F_y > 0$. Atrastais optimums ir pietuvojies aktīvajam ierobežojumam. 10. attēlā redzams optimuma punkts uz kritērija virsmas F_x , ja optimizāciju veic, neievērojot ierobežojumu.



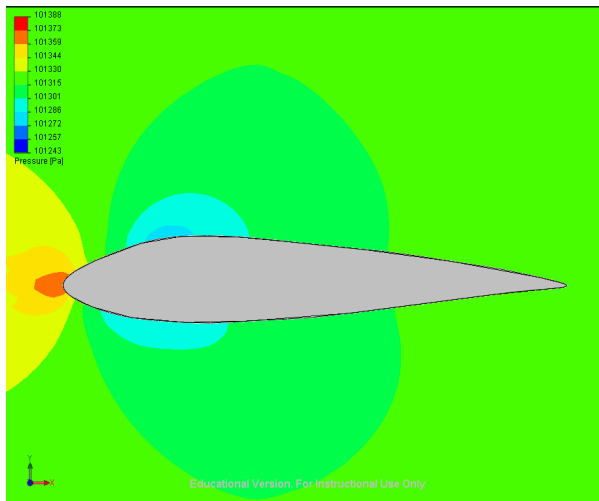
10. attēls. Optimums pēc kritērija min F_x bez ierobežojuma ievērošanas
Ar Floworks veikto aprēķinu konverģence pilnajam modelim, kura parametri atbilst otrajā uzdevumā iegūtajam optimumam, redzama 11. attēlā. Kamēr F_x konverģē, tikmēr F_y plašās

robežās oscilē ap nulles vērtību. Acīmredzami šī optimuma detalizētai izvērtēšanai jāveic jūtības analīze. Lai izšķirtos par dotās formas pielietojumu, ir nepieciešami papildus fizikāli eksperimenti gaisa tunelī.

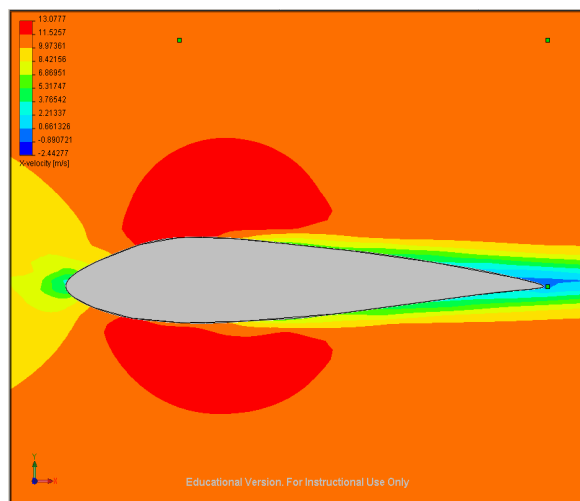


11. attēls Pēc ~2000 iterācijām iegūts: $F_y = -0.0028$; $F_x = 0.0038$

Objektam ar otrajā uzdevumā atrasto formu 12. un 13. attēlā parādīti ar Floworks iegūtais spiediena sadalījums un plūsmas ātruma vērtības x virzienā.



12. attēls. Spiediena sadalījums




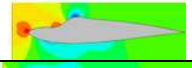
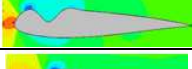

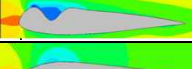

13. attēls. Gaisa plūsmas ātrums V_x

Jāatzīmē, ka optimizācijas uzdevuma nostādni var ļoti viegli modificēt un praktiski momentāli (dotajam uzdevumam dažas sekundes) iegūt rezultātus.

3. Iegūtie rezultāti un to analīze

Iegūtie rezultāti apkopoti 3. tabulā, kuras apzīmējumi ir līdzīgi 2. tabulas apzīmējumiem, taču otrajā kolonnā bez šķērsriezuma formām ir parādīti arī aprēķinātie spiedienu sadalījumi. Pirmajās 5 rindās atkārtoti tie ar Floworks veiktie eksperimenti, kuros iegūtas ekstremālas spēku vērtības, kā arī sākotnējai formai atbilstošie rezultāti. Tālāk tabulā apkopoti rezultāti, kas iegūti ar Floworks, risinot uzdevumu pilnajam modelim, ar EDAOpt atrastajos optimuma punktos.

3. tabula. Frontālā F_x un cēlējspēka F_y vērtības pilnajam modelim ekstremumu punktos

Nr	Šķērsriezuma forma un spiediena sadalījums	Iterāciju skaits	X_1 [mm]	X_2 [mm]	Frontālais spēks F_x [N]	Cēlējspēks F_y [N]
7		3023	10.7	11.1	0.047	-0.008
10		243	3.5	3.9	0.0035	-0.05
14		583	9.9	2.3	0.0081	0.0159
15		516	-0.5	8.7	0.0056	-0.055
	sākotnējā	1883	7.5	9.5	0.0045	0.0041
I.		583	10.8	1.5	0.009	0.019
II.		2000	6.32	9.33	0.0038	-0.0028

Risinot pirmo optimizācijas uzdevumu, ir atrasta tāda forma, kas paaugstina objekta cēlējspēku gandrīz 5 reizes salīdzinot ar sākotnējās formas objektu. Tiesa, 2 reizes pieaug arī frontālās pretestības spēks. Veicot šādu daudzu pētnieku analizēta objekta optimizāciju, ir izdevies atrast rezultātu, kas pēc autoru domām nav triviāls un sākotnēji acīmredzams. Risinot otro optimizācijas uzdevumu, ir izdevies atrast tādu objekta formu, kas par 16% samazina frontālo pretestības spēku, bet vienlaicīgi samazina cēlējspēku. Faktiski, kā tas redzams no 11. attēla, ir iegūta forma, pie kuras notiek cēlējspēka pulsācijas, kuru fizikālās dabas noteikšanai jāveic padziļināti pētījumi, ieskaitot eksperimentus vēja tunelī. Nepieciešamības gadījumā var uzlikt stingrāku ierobežojumu uz F_y un iegūt jaunu risinājumu. Taču tas nav šī darba pamatmērķis un šie darbi var būt veicami turpmāk.

Objekta izvēli noteica iespēja ērti veikt turpmāk paredzētos eksperimentus vēja tunelī. Kā izpētes objekts var kalpot principā arī jebkurš cits, kuram nepieciešama aerodinamiskās formas optimizācija. Darba pamatmērķis bija pārlicināties par metamodelu izmantošanas iespēju aerodinamisku objektu formas optimizācijai.

Risināmais idealizētais testa piemērs nav tiešā veidā saistāms ar spārna projektēšanu, bet gan drīzāk ar izmantojamās CFD ierobežotajām iespējām, taču principā metodika varētu būt nodrīzīga, izmantojot arī citus klasiskos spārnu optimizācijas paņēmienus, piemēram, izmantojot spārna bāzes šķērsriezumu kopu [5], kad kā atbalsta formas kalpo iepriekš labi izpētīti un standartizēti profili ar zināmām īpašībām un optimizētas faktiski tiek novirzes no šiem bāzes šķērsriezumiem. Visbeidzot jānorāda, ka piedāvājamā metodika izmantojama arī citas konfigurācijas objektiem, kas būtiski atšķirīgi no spārna.

4. Secinājumi un turpmāko pētījumu virzieni

Metamodeļu izveide, izmantojot lokālās aproksimāciju metodes, kas balstās uz neliela skaita ļoti darbietilpīgu eksperimentu, proti, pilnā matemātiskā modeļa aprēķinu un/vai naturālo eksperimentu veikšanu, ir daudzsološs paņēmieni, lai nodrošinātu iespēju objekta optimālo formu iegūšanai.

Visdarbietilpīgākās no mašīnlaika viedokļa ir metodikas 2. solī paredzētās operācijas, kas norāda uz to, cik rūpīgi jāizvēlas fizikālās problēmas risināšanai visatbilstošākā CFD programmatūra.

Tā kā CFD izmanto aptuvenas skaitliskās metodes, tad vienmēr ir jāveic to validācija. Vispirms CFD jātestē uz uzdevumiem ar zināmiem atrisinājumiem. Tīklojuma uzlabojuma testu laikā risinājumam jākonverģē. Nestacionāru plūsmu gadījumā ir ļoti vēlama līdzības testi aerodinamiskajā tunelī. Jāminimizē robežnoteikumu ietekme uz atrisinājumu, variējot aprēķina apgabala izmērus un visbeidzot, jāveic iegūtās sistēmas jūtības analīze.

Par metodikas faktisko efektivitāti jāpārlicinās, veicot vēja tuneļa testus un rezultātu validāciju, kas turpmāk arī tiek plānots. Jautājums par metodikas pielietojuma iespējām virsmaņas plūsmu gadījumā šai darbā nav pētīts un ir atklāts. Iegūtie sākotnējie rezultāti liecina, ka izstrādātā metodika ir sekmīgi izmantojama zemskaņas aerodinamisku objektu formas optimizācijai un neapstrīdami dod lielu resursu ietaupījumu.

Pateicība

Šis darbs ir daļēji atbalstīts un veikts LZP granta projekta Nr. 05.1668 un LR Izglītības un Zinātnes ministrijas projekta Nr. 6970 „Dažu tehnisku objektu formas un parametru optimizācija mijiedarbībā ar gaisa plūsmu” ietvaros.

Literatūra

1. Blazek J. Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications. Elsevier. 2001.
2. Kundu P. K., Cohen I. M. Fluid Mechanics. Second Edition. Academic Press. Elsevier Science. 2002.
3. Kafyeke F. Aircraft Design: Aerodynamic Integration Issues. // In: Proceedings of ECCOMAS 2004, P.Neittaammäki, T.Rossi, S.Krotov, E.Oñate, J.Périaux, D.Knörzer eds. Jyväskylä, Finland, 2004 – 12 pages, CD-ROM.
4. Kroll N., Gauger N. R, Brezillon J., Becker K., Schulz V. Ongoing Activities in Shape Optimization within the German project MEGADESIGN. // In: Proceedings of ECCOMAS 2004, P.Neittaammäki, T.Rossi, S.Krotov, E.Oñate, J.Périaux, D.Knörzer eds. Jyväskylä, Finland, 2004 –19 pages, CD-ROM.
5. Vanderplaats, G. N. Numerical Optimization Techniques for Engineering Design. 3rd ed. Vanderplaats Research & Development, Inc. - Colorado Springs, 2001.
6. Janushevskis A., Akinfiev T., Auzins J. and Boyko A.. A comparative analysis of global search procedures // In: Proc. Estonian Acad. Sci. Eng., 2004, Vol.10, No.4 – p. 235-250.
7. Auzins, J., Janushevskis A., Rikards R. Software Tools for Experimental Design, Metamodelling and Optimization // In: Book of Abstracts. 5th Euromech Solid Mechanics Conference ESMC 5, 17 - 22.08.2003 - Thessaloniki, 2003 - p. 182.

8. Myers R. H., Montgomery D. C. Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Design Experiments, 2nd ed. Wiley - New York, 2002.
9. Houghton E.L.; Carpenter P.W. Aerodynamics for Engineering Students. 5th ed. Butterworth-Heinemann - London, 2003.
10. Mohammadi, B., Pironeau, O. Shape Optimization in Fluid Mechanics. // In: Annu. Rev. Fluid Mech. 2004, 36: p.11.1-11.25
11. Thomas H. L., Zhou M., Brennan J., Schneider D. A Commercial Software Approach to Integrated Topology, Shape and Sizing Optimization // In: Proceedings of 2nd European Conference on Computational Mechanics. ECCM – 2001, 11 pp., CD-ROM. - Cracow.
12. Desideri J. A., Janka A. Multilevel Shape Parametrization for Aerodynamic Optimization – Application to Drag and noise Reduction of Transonic/Supersonic Business Jet. // In: Proceedings of ECCOMAS 2004, P.Neittammäki, T.Rossi, S.Krotov, E.Oñate, J.Périaux, D.Knörzer eds. Jyväskylä - Finland, 2004 –14 pages, CD-ROM.
13. Pinelli D., Sacco G., Lanari C., Desideri J. A., Janka A. Multipoint Aerodynamic Optimization of a Transonic Business Jet Wing. // In: Proceedings of ECCOMAS 2004, P.Neittammäki, T.Rossi, S.Krotov, E.Oñate, J.Périaux, D.Knörzer eds. Jyväskylä - Finland, 2004 –8 pages, CD-ROM.
14. Simpson T.W., Peplinski J.D., Koch P.N., Allen J.K. Metamodels for Computer-based Engineering Design: Survey and Recommendations // In: Engineering with Computers, No.17. -2001 - p. 129-150.
15. Dyn N., Levin D., Rippa S. Numerical Procedures for Surface Fitting of Scattered Data by Radial Basis Functions // In: SIAM Journal of Scientific and Statistical Computing – 1986, 7(2): - p. 639-659.
16. Friedman J.H. Multivariate Adaptive Regression Splines // In: The Annals of Statistics, 19 (1) -1998, - p. 1- 67.
17. Auzins J., Janushevskis A., Rikards R. Software Tool EDAOpt for Optimization of Complex Systems // In: Book of Abstracts. XXXI International Conference “Advanced Problems in Mechanics” (APM 2003), - St. Petersburg, 2003, - p. 24 - 25.
18. Hsu T. R., Sinha D. K. CAD: An Integrated Approach. West Publishing Company. 1992.
19. Armfield Subsonic Wind Tunnel C2-10. Armfield Ltd. Hampshire, 2005.
20. Auzins J. Direct Optimization of Experimental Designs. AIAA Paper 2004-4578 CD-ROM Number 17, 10th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference, - Albany, NY, 28 Aug.-2 Sep. 2004 - pp.17.
21. Auzins, J., Janushevskis, A., Kalnins, K., Rikards, R. Sequential Metamodeling Techniques for Structural Optimization. // In: Collection of International Conference on CAE and Computational Technologies for Industry. 5-8 October 2005, Lecce, Italy, p.15-16, 2005.

Januševskis A., Auziņš J., Januševskis J., Vība J. Metamodelēšanas metodika zemskaņas aerodinamiskās formas optimizācijai

Tiek piedāvāta inženiermetodika zemskaņas aerodinamisko objektu formas optimizācijai, izmantojot metamodeļus lokālu polinomiālu aproksimāciju veidā. Metodika paredz standarta komerciālās CAD un CFD programmatūras, kā arī autoru izstrādātās programmas EDAOpt eksperimentu plānošanai, metamodeļu būvēšanai un optimizācijai

izmantošanu. Metodikas pielietojums tiek demonstrēts, risinot zemskaņas spārna šķērsriezuma formas optimizācijas testa uzdevumu. Izstrādātā metodika ļauj būtiski samazināt nepieciešamos skaitļošanas resursus.

Janushevskis A., Auzins J., Janushevskis J., Vība J. Metamodeling Technique for Subsonic Aerodynamic Shape Optimization

It is proposed an engineer oriented method for the optimization of subsonic aerodynamic shape by using the metamodeling technique. The method is based on using the commercial CAD and CFD software as well as the original code EDAOpt developed by authors for design of experiments, approximation and optimization. The method is demonstrated by the solution of a test problem for an airfoil subsonic shape optimization. The developed method essentially decreases necessary computational resources.

Янушевскис А., Аузиньш Я., Янушевскис Я., Виба Я. Методика метамоделирования для оптимизации дозвуковой аэродинамической формы

Предложена инженерная методика для оптимизации формы дозвуковых аэродинамических объектов, использующая метамоделю в виде локальных полиномиальных аппроксимаций. Методика предусматривает применение стандартных коммерческих CAD и CFD пакетов программ, а также оригинальной разработанной авторами программы EDAOpt для планирования экспериментов, аппроксимации и оптимизации. Применение методики демонстрируется, решая тестовый пример оптимизации формы поперечного сечения крыла. Разработанная методика существенно снижает необходимые вычислительные ресурсы.