

KOMPLEKSSETE TEHNILISTE SÜSTEEMIDE OPTIMAALNE PROJEKTEERIMINE – TOODETE KONKURENTSIVÕIME TAGAMISE EELTINGIMUS

Rein Küttner, Martin Eerme, Kristo Karjust Jüri Majak, Meelis Pohlak
Tallinna Tehnikaülikooli masinaehituse instituut

SISSEJUHATUS

Raalprojekteerimise erinevate süsteemide (CAD/CAM/CAE süsteemide) kasutamine on muutunud ettevõtetes igapäevaseks praktikaks. Ka traditsioonilisel projekteerimisel kasutatakse üha enam arvutitel põhinevaid meetodeid, mis toetavad projekteerijat parimate ja vähem aega nõudvate lahendite leidmisel, integreerides erinevaid aspekte, nagu toote geomeetria, tehnoloogilised võimalused, ressursside olemasolu, toote maksumus, allhanke otstarbekus, ostutoodete kasutamine jms. Sealjuures iseloomustab arenguid üleminek üksiku toote projekteerimiselt sarnaste toodete pere projekteerimisele; ühe ettevõtte ja selle võimaluste ning ressursside arvestamiselt ettevõtete koostöövõrgule. Töötatakse välja ja evitatakse uusi tarkvara vahendeid, meetodika arendus pälvib üha enam teadlaste tähelepanu.

Projektlahendite otsimise ja optimeerimise (DSO – *Design search and optimization*) meetodika areng on kestnud ligi nelikümmend aastat ja käesoleval ajal on projekteerijate käsutuses mitmed võimsad

DSO-d toetavad süsteemid [Hopp, Spearman, 2001; Messac jt, 1996]. Üha olulisemaks saab vajadus kasutada otstarbekalt olemasolevaid vahendeid ja meetodeid, tagamaks ettevõtte konkurentsivõime.

Üldjuhul võib projektlahendite optimeerimist defineerida kui lahendite otsimist, mis annavad minimaalse (või maksimaalse) väärtuse etteantud sihifunktsioonidele ja rahuldavad etteantud piiranguid (tõkkeid) [Ravindran jt, 1987]. Sihifunktsioonideks on tavaliselt toote maksumus, tarneaeg, toote tasuvus ning mitmed toodete tehnilis-majanduslike omadusi kirjeldavad näitajad. Lahendeid piiravad tehnilised piirangud toodete parameetritele, tootmissüsteemist ja tehnoloogiast tulenevad piirangud, kasutada olevad ressursid jm. Optimeerimiseks kasutatavad seosed võivad sealjuures olla esitatud matemaatiliste avaldistena või saadud töömahukate simulatsioonidena arvutil või eksperimentidest/vaatlustest.

PROJEKTLAHENDITE MULTIDISTSIPLINAARSE OPTIMEERIMISE MEETODID

Multidistsiplinaarne optimeerimine (MDO) on valdkond, mis uurib optimaalse projekteerimise probleeme toodete projekteerimiseks, integreerides mitmeid erinevaid inseneriteaduse valdkondi (aspekte). Meetodeid kasutatakse näiteks autode, laevade, elektroonikatoodete, arvutustehnika jms projekteerimiseks. Kõige laialdasemalt on MDO kasutatud aga lennu- ja kosmosetehnika projekteerimisel [Keane, Nair, 2005]. MDO lähtub vajadusest projekteerida kogu toote elutsükkel, arvesta-

des toote projekteerimisel muuhulgas ka tehnoloogilisi aspekte, tootmise otstarbekat korraldust jms.

MDO-d võib iseloomustada järgmiselt [AIAA Technical..., 1991]:

MDO on projekteerimiseks kasutatav inim-masin keskkond,

- mida kasutatakse tehniliste süsteemide projekteerimiseks konfliktsete tehniliste ja majanduslike eesmärkide ning piirangute tingimustes;

- mis kasutab samaaegse projekteerimise meetodeid, võimaldades lühendada projekteerimise aega;
- mis baseerub erinevate aspektide analüüsil, simuleerimisel ja hindamisel ning erinevate valdkondade projekteerimismeeskondade koostööl;
- mis kasutab üldistatud projekteerimismeetodeid ja -vahendeid, integreerides analüüsi parimate lahendite valikuprotsessiga.

Optimaalsete projektlahendite leidmine eeldab enamikel juhtudel multikriteeriaalse optimeerimise meetodite kasutamist. Erinevad kriteeriumid – toote hind, kasum, töömaht, toote tehnilised näitajad jne – seovad erinevaid projekteerimisetappe ja on sealjuures enamasti vastuolulised. Arvestades seda, kasutatakse projekteerimisel multikriteeriaalseid optimeerimismeetodeid, nagu eesmärgile orienteeritud (*Goal Programming*) ja füüsikalise planeerimise (*Physical Programming*) meetodid koos erinevate Pareto optimaalsete lahendite leidmise meetoditega [Keane, Nair, 2005; Küttner, Karjust, 2006; Messac jt, 1996].

Tallinna Tehnikaülikooli (TTÜ) masinaehituse instituudi teadustöö eesmärgiks on, kasutades ja arendades optimeerimise meetodeid, võimaldada kiiret otstarbekate projektlahendite leidmist mehhanotehnika valdkonna toodetele. Üldiseks eesmärgiks on tõsta toodete ja nende valmistamisprotsesside konkurentsivõimet, integreerides üheks tervikuks toodete, nende valmistamistehnoloogia projekteerimise ning tootmisressursside planeerimise. Oluliseks probleemiks sealjuures on projekteerijale otstarbeka arvutitoe leidmine.

MDO keskkonna realiseerimisel on kirjandusest teada mitmed lähenemised [Keane, Nair, 2005; Küttner, 2002]:

- Järjestikune multidistsiplinaarne lähenemine.
- Täielikult integreeritud optimeerimine (ühe tasemega süsteemid). Siin domineerib püüd esitada kogu projekteerimise protsess ühe mudelina (kasutades *all-at-once* tüüpi mudeleid). Sobib lihtsamate ülesannete puhul ja ei pruugi olla realiseeritav keerukamate ülesannete lahendamisel.

- Täielikult integreeritud mitmetasemelised süsteemid (*multi-level optimization*), kus erinevate ülesannete lahendus koondatakse sõltumatutesse alamsüsteemidesse. Probleemiks on sealjuures erinevate ülesannete vahel andmevahetuse ja koordineerimise tagamine.
- Kahetasemelised süsteemid (*Bi-level Integrated System*) [Keane, Nair, 2005; AIAA Technical..., 1991]. Taoline arhitektuur sobib kõige enam projekteerimise organiseerimisele ettevõttes, kus koordinaatoriks on projekti juht ja erinevateks alamsüsteemideks erinevate erialade projekteerijatest koostatud meeskonnad.
- Evolutsioonilised süsteemid (*Co-evolutionary Genetic systems*). Põhinevad looduslikele (bioloogilistele) süsteemidele iseloomulike geneetiliste algoritmide kasutamisel.

Masinaehituse instituudis on uuringud orienteeritud põhiliselt kahetasemeliste süsteemide kasutamisele, mille alamsüsteemides rakendatakse erinevaid optimeerimise tehnikaid ja meetodeid.

TOODETE OPTIMAALNE PROJEKTEERIMINE

Masina- ja aparaadiehituslikud tooted koosnevad paljudest komponentidest (detailidest, koostudest), mis üldjuhul projekteeritakse eraldi. Toote projekteerimist võib esitada mitmetasemelise, erinevate komponentide projekteerimisega seotud hierarhilise protsessina. Sealjuures tuleb projekteerimisel arvestada komponentide vastastikuseid seoseid.

Näiteks teleskoopliigendtõstuki projekteerimisel (vt joonis 1a) tuli rakendada raalintegreeritud projekteerimisvahendeid, loomaks toodet, mis vastaks esitatavatele nõuetele ning lisaks sellele eristuks turul olevatest. Projekteeritud tõstuk erineb oma konkurentidest järgmiste tunnuste poolest:

- Transportpikkus on 5,60 m (peakonkurendil 7,88 m). Transportpikkuse vähendamine võimaldab sõita kitsastel teedel, vähenevad transportdikulud.
- Maksimaalse teleskoobi väljasirutuse (12 m) korral on tõstuki korvis lubatud koormus 230 kg (2 inimest + tööriistad), peamisel konkureerival tootel 80 kg.

- Tõstuki stabiilsus on tagatud standardset tugi-
jalgade toetusala suurendamata, mis suurendab
paindlikkust tööde teostamisel.
- Konstruktsiooni optimeerimisega on tõstuki
mass viidud alla 2500 kg.

Tõstuki projekteerimisel kasutati tootepere
ideoloogiat, mis võimaldab luua erineva modifi-
katsiooniga tooteid vastavalt tellija vajadustele või
siis turunõudmisele.

Optimaalse projekteerimise teise näitena võib tuua
komposiitmaterjalist valmistatud vanni (vt joonis
1b). See toode on keeruka geomeetriaga ja suhteli-
selt suur. Kuna tegu on suhteliselt kalli ja eksklu-
siivse tootega, on kvaliteet eriti oluline. Kvaliteedi
tagamiseks ja samas ka hinna mõistlikul tasemel
hoidmiseks tuleb toote projekteerimisel kasutada
keerukaid arvutusprogramme, mis on integreeritud
optimeerimise süsteemiga. Et kasutatavad materja-
lid on kallid, on mõistlik materjali kulu optimeeri-
da, tagades samal ajal toote vastupidavuse. Toote
keeruka kuju tõttu on mõistlik see valmistada eri
piirkondades erineva paksusega, st materjalikulu
lokaalselt varieerida. Kõlab küll lihtsalt, kuid see
kujutab endast keerukat (st ka arvutusmahukat)
ülesannet, sest kasutatavaid materjale on keeruline
modelleerida, tuleb arvestada ka valmistamise
protsesse jne. Joonisel 1b on näidatud optimeeri-

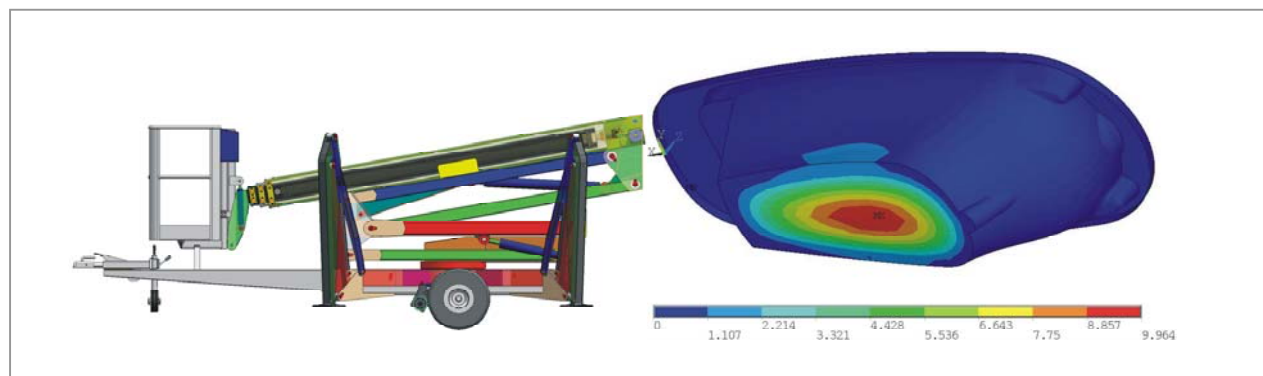
tud vann koormatud olekus. Erinevate värvitooni-
dega on tähistatud erinevad deformatsiooni vää-
rused.

Toodete projekteerimisel leiab üha enam ra-
kendust topoloogia optimeerimine, mis hõlmab
väga erinevaid valdkondi. Viimasel aastakümnel
on eriti aktuaalne topoloogia optimeerimise kasu-
tamine komposiitmaterjalist konstruktsioonide ja
suuremahuliste konstruktsioonide projekteerimisel
(materjali armatuuri optimaalne orientatsioon,
kihtide paksused ja järjekord) [Majak, Hannus,
2003].

Näitena võib tuua Euroopa suurima lennuki Air-
bus 380 projekteerimise [Bendsoe jt, 2006]. Topo-
loogia optimeerimise probleemi võib formuleerida
järgmiselt

$$\begin{aligned} \min_{u, \rho} I^T u \\ K(\rho)u = f, \\ \sum_{i=1}^n v_i \rho_i \leq M, \\ \rho_i \in [0,1], \quad i = 1, \dots, n. \end{aligned}$$

Võrratusena esitatud kitsendus on piirang kogu-
massile (M), kus muutujad ρ_i ja v_i on vastavalt
 i -nda elemendi tihedus ja ruumala. Kui ρ_i väärtus
on 1, siis vastav element kuulub optimaalse konst-



a)

b)

Joonis 1.

Optimeeritavate toodete näited: a) teleskooptõstik; b) komposiidist vann.

ruksiooni koosseisu, kui 0, siis mitte. Võrdusena antud kitsenduses on K jäikusmaatriks ning u ja f on vastavalt siirete ja koormuse vektorid.

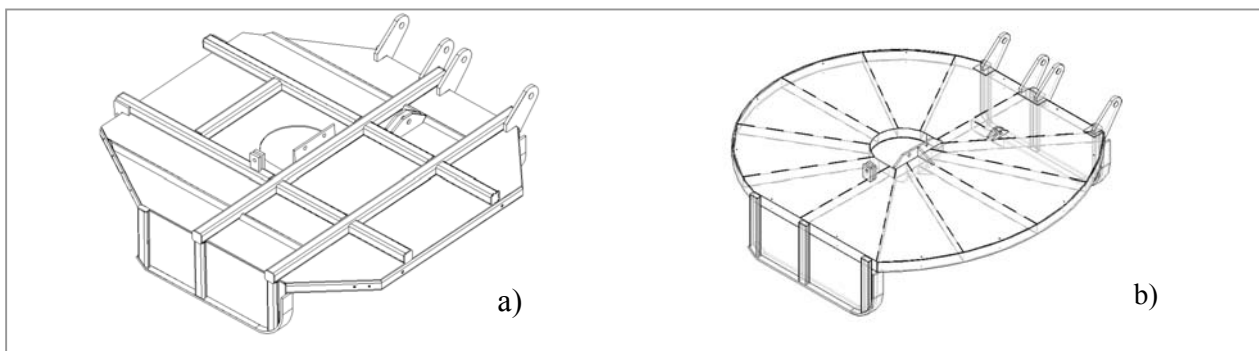
Topoloogia optimeerimise praktilise näitena on joonisel 2 toodud TTÜ masinaehituse instituudis projekteeritud kettniiduki tööorgani korpus [Eerme jt, 2004]. Eesmärgiks oli korpuse massi vähendamine, tagades liikurmasina (traktori) suurema stabiilsuse. Kettniiduk on mõeldud kasutamiseks võsalõikurina ja tasandusniidukina kraavikallastel ja teepeenardel kasvava võsa ning heina niitmiseks.

Korpus kujundati *sandwich* struktuurina. Selline lahend annab hea jäikuse ja massi ning hea tuge-

vuse ja massi suhte. Optimaalseks ribide asetuse määramiseks kasutati inseneriarvutuste programmi ANSYS topoloogia optimeerimise algoritme. Töö tulemusena vähenes korpuse mass 180 kg-lt 118 kg-ni (~35%).

TOOTEPERE OPTIMAALNE PLANEERIMINE

Tootepere projekteerimist võib käsitleda projekteerimisprotsessi hierarhia kõrgeima tasemega. Kooskõlas sellega tuleb esitada tootepere optimeerimise sihifunktsioonid (*analytical target cascading*) ja piirangud (*constraint based reasoning*). Näitena vaatleme tervisekapslite (joonis 3) tootepere optimeerimist AS WellSpa näitel [Küttner jt, 2006].



Joonis 2.

Kettniiduki korpuse topoloogia optimeerimise näide: a) esialgne versioon; b) optimeeritud versioon.



Joonis 3.

Tervisekapslite tootepere esindajad.

Tootepere optimaalsel planeerimisel määratakse pere üksikute toodete (derivaattoodete) valmistamise otstarbekad mahud ja toodete funktsioonide otstarbekas jaotus derivaattoodete vahel. Tootepere optimaalse planeerimise ülesande püstitus on järgmine [Küttner jt, 2006]: leida toodete pere $p_i, i = 1, \dots, n$ tootmismahud X_i ja toodete omaduste $F_{j,i}$ otstarbekas jaotus erinevate derivaattoodete vahel, mis tagab

MAKSIMAALSE kasumi tootepere tootmisest,
MINIMAALSE tarne (valmistamise) aja

ja rahuldab tõkkeid, nagu:

- minimaalsed ja maksimaalsed müüginahud antud ajaperioodil;
- piirangud töökohtade/seadmete koormusele;
- piirangud materjalide ja ostutoodete (komponentide) tarnemahtudele.

Lahendusnäide on esitatud tabelis 1. Nimetatud ja ka järgnevate optimeerimisülesannete näidete lahendamiseks arvutil on kasutatud kombineeritud täisarvulise ja lineaarse planeerimise (*Excel Solver*) ja mittelineaarse planeerimise vahendeid.

Tabel 1

Tervisekapslite tootepere optimaalse planeerimise näide

| Derivaattooted | p_1 | p_2 | p_3 | p_4 | |
|----------------------|-------|-------|-------|-------|------------------------|
| X_1, X_2, X_3, X_4 | 42 | 0 | 44 | 10 | Tootmismahud |
| $F_{1,i}$ | 1 | 0 | 1 | 0 | Täiendav tooteomadus-1 |
| $F_{2,i}$ | 0 | 0 | 0 | 0 | Täiendav tooteomadus-2 |
| $F_{3,i}$ | 1 | 0 | 1 | 0 | Täiendav tooteomadus-3 |
| $F_{4,i}$ | 0 | 0 | 0 | 0 | Täiendav tooteomadus-4 |

TEHNOLOOGIA

OPTIMAALNE PROJEKTEERIMINE

Tehnoloogia optimaalset projekteerimist võib vaadelda kahel tasandil:

- optimaalse töötlemismarsruudi planeerimine;
- operatsioonide optimaalne projekteerimine.

Tehnoloogia optimaalne projekteerimine tooteperele kasutab sihifunktsioonidena maksimaalset kasumit, püüdes samaaegselt hoida kulutused tootmisele (aeg, maksumus) minimaalsed. Tõketeks on vajadus toota antud parameetritega tooteid, tagada töökohtade lubatud koormus, materjalide, töövahendite jms kasutatavus. Marsruut tehnoloogia planeerimisel lähtutakse nn "tüüp marsruudist" tooteperele, mis sisaldab operatsioonide võimaliku järjestuse ja kasutuse (joonis 4).

Ülesande püstitus on järgmine [Küttner jt, 2006]: Leida vastuvõetavad tehnoloogiad (operatsioonide järjestus) tooteperele, mis annavad

MAKSIMAALSE kasumi,
MINIMAALSE töötlemisaja

ja rahuldavad järgmisi tingimusi:

- igale seadmele ja/või töökohale lubatav koormus,
- piirangud materjalide/komponentide kasutatavusele,
- nõuetele vastavate toodete/detalide valmistamine.

Optimaalse marsruudi näide tervisekapslite tooteperele on esitatud tabelis 2.

Mehaanilise töötlemise operatsioonide kasutamise kontrolliks on töötatud välja närvivõrkude kasutu-

sel põhinevad mudelid (vt allpool ASENDUS-MUDELID PROJEKTLAHENDITE VÄLJUNDSÖLTUVUSTE MODELLEERIMISEKS).

Operatsioonide optimeerimise alal on instituudis pikaajalised kogemused. Sellele on lisandunud uued kasutusvaldkonnad, näiteks lehtmaterjali sammvormimise operatsiooni optimeerimine, kus püstitus on järgmine [Pohlak jt, 2004]:

Leida operatsiooni parameetrid p_z , R ja α , mis annavad maksimaalse tootlikkuse (minimaalse aja):

$$T = T(L, p_z, R, f, \alpha) \rightarrow \min$$

ja rahuldavad järgmisi tingimusi:

$$FD(R, p_z, \alpha) \leq [FD],$$

$$Ra(R, p_z, \alpha) \leq [Ra],$$

$$\alpha_{\min} \leq \alpha \leq \alpha_{\max},$$

$$R_{\min} \leq R \leq R_{\max},$$

$$p_{z\min} \leq p_z \leq p_{z\max},$$

$$t(\alpha) \geq [t],$$

$$f \leq [f],$$

kus T on valmistusaeg, L – vormimise tööraja pikkus, p_z – vertikaalne sammusügavus, R – vormiva tööriista raadius, α – vormitava geomeetria kalle vertikaali suhtes, FD – tasapinnaliste pindade tasapinnalisuse hälve, Ra – pinnakvaliteet, t – seina

paksus pärast vormimist, f – ettenihe (vormiva tööriista liikumise kiirus).

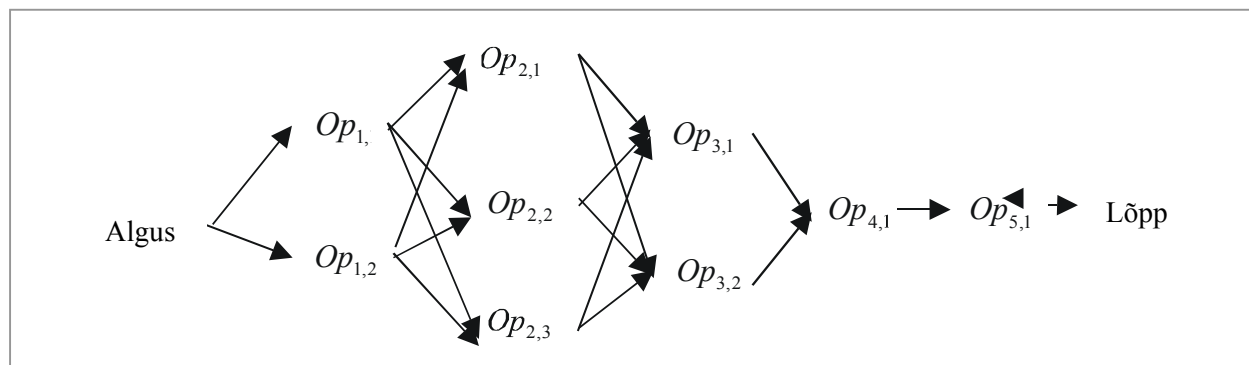
TOOTMISRESSURSSIDE OPTIMAALNE PLANEERIMINE

Tootmisressursside optimaalsel planeerimisel jaotatakse (aasta, kvartali) tootmisprogramm lühematele perioodidele (kuu, nädal, päev jne), määrates igale perioodile otstarbekad tootmis- ja müügimahtud, laoseisud jms. Ülesannet nimetatakse tootmise agregaatplaneerimiseks. Selle püstitus on järgmine:

Leida tootmise plaan, mis tagab maksimaalse kasumi ja minimaalse töötlemise aja, arvestades piiranguid tootmisressurssidele, turunõudlusi ja nendest tulenevaid piiranguid müügimahtudele, jms ning rahuldab tõkkeid:

- nõudlus toodetele igas ajavahemikus;
- töökohtade/seadmete koormus igas ajavahemikus;
- tootmis- ja müügimahtude ning laoseisude omavaheline kooskõla;
- nõutav toodete varu suurus.

Lihtsustatud tootmisplaani näide tervisekapslite tooteperele on esitatud tabelis 3.



Joonis 4.

Tootepere üldistatud (tüüp)marsruut ($Op_{1,1}$ ja $Op_{1,2}$ esitab alternatiivseid vaakumvormimise tehnoloogiaid; $Op_{2,1}$, $Op_{2,2}$, $Op_{2,3}$ – erinevaid lõikamise tehnoloogiaid; $Op_{3,1}$, $Op_{3,2}$ – korpuse tugendamise variante ja $Op_{4,1}$, $Op_{5,1}$ – koostamist).

Tabel 2

Ostarbekas marsruut tehnoloogia tervisekapslite tooteperele (joonis 3)

| | | | | | | | | |
|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Op _{1,1} | Op _{1,2} | Op _{2,1} | Op _{2,2} | Op _{2,3} | Op _{3,1} | Op _{3,2} | Op _{4,1} | Op _{5,1} |
| 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 |

Tabel 3

Optimaalse tootmisplaani näide

| | <i>Period t=1</i> | | | | <i>Period t=i</i> | | | | <i>Period t=tl</i> | | | |
|----------------|-------------------|-------|-------|-------|-------------------|-------|-------|-------|--------------------|-------|-------|-------|
| Derivaattooted | p_1 | p_2 | p_3 | p_4 | p_1 | p_2 | p_3 | p_4 | p_1 | p_2 | p_3 | p_4 |
| Tootmismahud | 14 | 0 | 14 | 2 | 14 | 0 | 16 | 4 | 14 | 0 | 14 | 4 |
| Müüginmahud | 15 | 1 | 16 | 4 | 16 | 1 | 16 | 4 | 15 | 1 | 16 | 4 |
| Lao jäägid | 3 | 2 | 2 | 0 | 1 | 1 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Lao algseis | 4 | 3 | 4 | 2 | - | - | - | - | - | - | - | - |

ASENDUSMUDELID PROJEKTLAHENDITE VÄLJUNDSÕLTUVUSTE MODELLEERIMISEKS

Projektlahendite multidistsiplinaarse optimeerimise rakendatavuse üheks olulisemaks kriteeriumiks on kulutused optimeerimisele. Sealjuures on projekteerimise keerukuse vähendamise üheks võimaluseks väljundsoltuvuste modelleerimisel asendusmodelite (surrogaatmodelite) kasutamine (RSM – *Response Surface Methods*), asendades mahukaid simulatsioone (näiteks tugevusarvutusi lõplike elementide meetodil). RSM on defineeritud kui kogum meetodeid, mis võimaldavad vähendada optimeerimisprotsessi keerukust, lahendada piiratud arvutiressursside puhul keerukaid projekteerimisülesandeid. RSM kasutamine eeldab tehisintellekti meetodite rakendamist ja ostarbekalt valitud õpetava kogumi kasutamist.

On pakutud erinevaid soovitusi [Keane, Nair, 2005] õpetava kogumi valikuks – juhuslik valik, katsete planeerimine, sh täis- ja osafaktoriaalne

plaan, tsentraalne komposiitplaan, mitmesugused ortogonaalsed katseplaanid (Plackett ja Burmani, Box-Benkeni ja Taguchi skeemid) jt [Keane, Nair, 2005]. Projektlahendite modelleerimisel tuleb sageli arvestada projektlahendite muutumispirkonna ebaregulaarsust (mittesidusust), piirkonnas kehtivaid piiranguid jm.

Peamiseks probleemiks sealjuures on kulutused, mis on seotud nii õpetava, kui ka surrogaatmodeli kvaliteeti hindava testkogumi realiseerimisega. Projektpiirkonna surrogaatmodelite kirjeldamiseks on kasutusel erinevaid meetodeid [Keane, Nair, 2005]. Põhiliselt kasutatakse lineaarse, ruut- või kõrgemat järku polünoomi parameetrite hindamist regressioonanalüüsi abil.

Näide asendusmodelitest lehtmaterjali sammvormimise protsessi kirjeldamiseks on järgmine [Pohlak jt, 2004]:

$$t = 0,163 + 0,638\alpha ,$$

$$FD = 0,259 - 0,00284R + 0,16p_z + 0,157\alpha - 0,024R\alpha - 0,204p_z\alpha ,$$

$$Ra = 1,2 + 0,0932R - 0,478p_z - 0,319\alpha - 0,17Rp_z - 0,145R\alpha + 4,15p_z\alpha ,$$

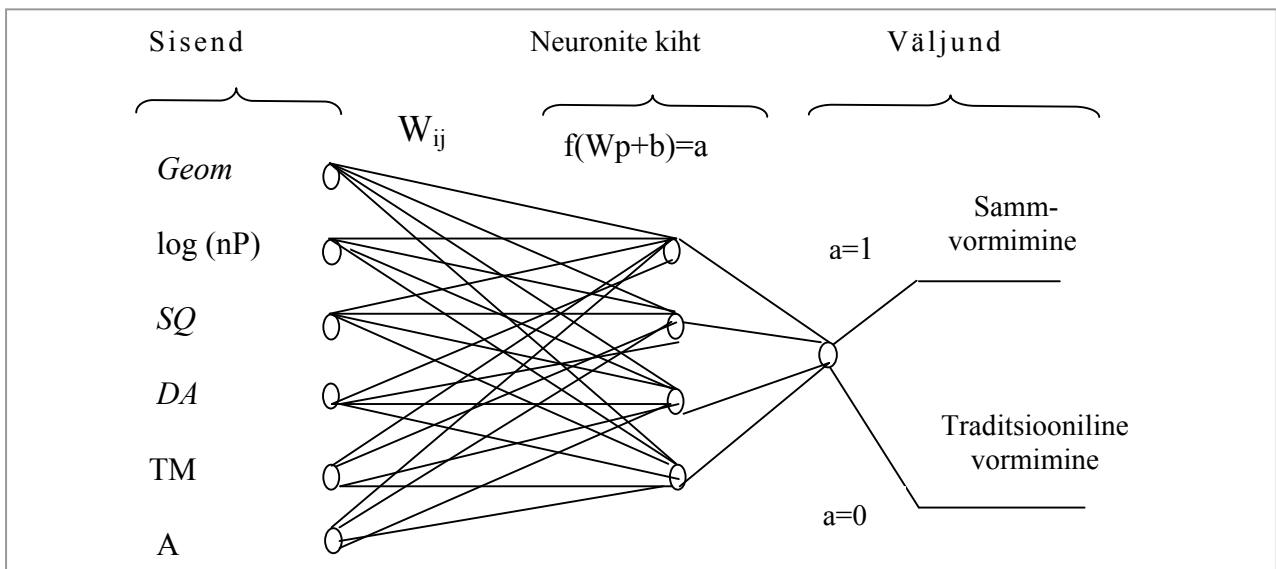
$$FMD = 6,47 - 0,0466R + 3,25p_z - 1,47\alpha - 3,72p_z\alpha ,$$

kus t on seina paksus pärast vormimist, α – külgselina tõusnurk radiaanides, FD – tasapinnaliste pindade tasapinnalisuse hälve, R – vormiva tööriista raadius, p_z – vertikaalne sammusügavus, Ra – pinnakvaliteet, FMD – kujuhälve.

Oluline on hinnata teooria sobivust vaadeldavate ülesannete klassidele ja hinnata tulemuste usaldusväärsust, sh ka saadud mudelite tundlikkust tingimuste muutusele ja vigadele. Üheks projekteerimisele iseloomulikuks probleemiks meetodi valikul on vajadus kasutada projekteerimispiirkonna kirjeldamiseks samaaegselt nii nn “klassifitseerimise mudeleid” (oma olemuselt diskreetsete suuruste, nagu materjalid, erinevad tehnoloogiad, töövahendid jms, mõju hindamiseks ja/või valikuks) kui ka arvutus- või regressioonmudeleid (pidevate suuruste mõju hindamiseks). Mitmete “uute”, sh näiteks närvivõrkude kasutamisel põhinevate meetodite eeliseks on võimalus õpetada mõlemat tüüpi mudeleid [Haykin, 1999].

Närvivõrkude lihtsa kasutusnäitena on toodud lehtmaterjali sammvormimise ja traditsioonilise vormimise tehnoloogia valiku ühetasemelise närvivõrgu mudel (piisav antud näite puhul). Mudeli sisendparameetrid: detaili geometria X_1 – $Geom$; detailide partii suurus, X_2 – $\log(nP)$; nõutav pinna kvaliteet, X_3 – SQ ; mõõdu täpsus, X_4 – DA ; tarne aeg, X_5 – TM ja detaili külgselina kaldenurk, X_6 – α . Mudeli signaalgraafi näide on toodud joonisel 5.

Valdavalt lähtutakse RSM kasutamisel seisukohast, et puuduvad eelnevad teadmised piirkonnas kehtivate mudelite/sõltuvuste kohta. Tehniliste süsteemide projekteerimise valdkonnas ei saa aga nii väita, sest enamikel juhtudel on olemas teadmised uuritavatest nähtusest või protsessidest ja taoliste teadmiste kasutamine võib oluliselt tõsta modelleerimise efektiivsust, vähendada töömahtu.



Joonis 5. Sammvormimise valiku mudel (kahetasemeline närvivõrk).

KOKKUVÖTE, PROJEKTI EESMÄRGID JA LAHENDATAVAD ÜLESANDED

Tehniliste süsteemide optimeerimise meetodite arenguid iseloomustab püüe integreerida ühtsesse süsteemi üha rohkem ülesandeid. Sellega kaasneb projekteerimisülesannete keerukuse ning lahendite kvaliteedi kasv. Valdakonna taolisi arenguid võib käsitleda kui uut paradigmat projekteerimise meetodika ja arvutipõhiste vahendite arengus. Põhiliseks eesmärgiks on sealjuures luua arvutipõhine projekteerimiskeskond, mis võimaldab kõige otstarbekamal viisil toetada inseneri tööd, tagamaks majanduslikult ja tehniliselt optimaalsete lahenduste leidmise antud tootmisvõimaluste juures. Kirjeldatava töö eesmärgiks on uusima oskusteabe siirde ja meetodite edasiarendus, tagamaks masina ja aparaadiehituse toodete rahvusvahelise konkurentsivõime, sh tootmise kasumi suurendamise ja tarneaegade lühenemise.

VIITED

AIAA Technical Committee on Multidisciplinary Design Optimization (MDO). 1991. White Paper on Current State of the Art.

Bendsoe, M., Kocvara, M., Lund, E., Stingl, M., Stolpe, M., Stegmann, J. 2006. Optimal structural design with composites: free material and laminate design. ESCM 2006 Proc. CD, Budapest.

Eerme, M., Enok, M., Roosimölder, L., Küttner, R. 2004. Design of sandwich support structures. Proc. Eston. Acad. Sci. Eng., 10, 4, 300-307.

Haykin, S. 1999. Neural Networks, a comprehensive foundation. Prentice Hall, Inc. USA, 842.

Hopp, W. J., Spearman, M. L. 2001. Factory Physics. Foundation of Manufacturing Management. McGraw Hill Publishing Companies, Inc., 698.

Keane, A. J., Nair, P. B. 2005. Computational Approaches for Aerospace Design. John Wiley & Sons, Ltd, West Sussex, England, 582 pp.

Küttner, R. 2002. A framework of collaborative product and production development system. Proc.

Kuna eeldame meetodika rakendusi esmajoones piiratud võimalustega VKE jaoks, on oluline keskkonna loomine, mis integreerib otstarbekalt inseneride teadmised ja oskused arvuti ning matemaatiliste meetodite ja tarkvara võimalustega.

Uusi teooriaid ja vahendeid on kontrollitud ettevõtete praktilistel näidetest, lahendades integreeritult järgmisi projekteerimisülesandeid [Küttner jt, 2006]:

- sarnaste toodete tooteperede optimaalne planeerimine;
- tooteperede valmistamise optimaalsete tehnoloogiate valik (sh ka töövahendite projekteerimine/valik);
- tootmise ressursside optimaalne planeerimine.

of the 3rd Int. Conf. on Industrial Engineering – New Challenges to SME. April 2002, Tallinn, Estonia. TTU, 34-37.

Küttner, R., Karjust, K. 2006. Coordination of the complex engineering product and manufacturing process optimization tasks. Proc. Eston. Acad. Sci. Eng., 12, 3-1, 163-176.

Küttner, R., Karjust, K., Pohlak, M. 2006. Integrated optimal planning of product family and manufacturing technology of its components. Advances in Manufacturing Technology - XX: 4th Int. Conf. on Manufacturing Research, ICMR2006, Liverpool, UK. Liverpool, Liverpool John Moores University, 55-60.

Majak, J., Hannus, S. 2003. Orientational design of anisotropic materials using Hill and Tsai Wu strength criteria. Mechanics of Composite Materials, 39, 6, 509-520.

Messac, A., Gupta, S. M., Akbulut, B. 1996. Linear physical programming: a new approach to multiple objective optimization. Trans. Operational Res., 8, Oct, 39-59.

Pohlak, M., Küttner, R., Majak, J. 2004. Modelling and optimal design of the incremental forming process. Proc. Eston. Acad. Sci. Eng., 10, 4, 261-269.

Ravindran, A., Phillips, D., Solberg, J. 1987. Operation Research Principles and Practice, 2. edition. John Wiley&Sons, NY, 637 pp.