

GENERATYVINIO ALGORITMO SUKŪRIMAS IR TAIKYMAS PROJEKTUOJANT
SPRAGUOTAS PLIENINES KONSTRUKCIJASVytautas Pliadis¹, Tatjana Grigorjeva²

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

El. paštas: ¹vytautas.pliadis@gmail.com; ²tatjana.grigorjeva@vgtu.lt

Santrauka. Patrauklių ir konstrukcinių požiūriu racionalių architektūrinių formų projektavimas yra sudėtingas procesas, susidedantis iš nuoseklių projektavimo etapų ir galutinio racionalaus sprendinio parinkimo. Palengvinti ir pagreitinoti šį procesą leidžia šiuolaikinių informacinių technologijų, paremtų parametrinių pastatų informaciniu modeliavimu, taikymas. Pastatų informaciniai modeliai (*BIM*) kuriami naudojant parametrines sąsajas. Parametrinių sąsajų struktūra – tai įvairūs generatyviniai algoritmai, priemonė, kuri leidžia simuliuoti tam tikros konstrukcijos evoliuciją, artėjant prie geriausio užduoties sprendimo. Straipsnyje pateiktas plieninės strypinės spraguotos konstrukcijos modelio generatyvinio algoritmo sukūrimo procesas bei modeliavimo rezultatai.

Reikšminiai žodžiai: architektūra, parametrinė architektūra, konstrukcijos, *BIM*, generatyviniai algoritmai.

Įvadas

Patrauklių ir racionalių architektūrinių formų projektavimas ir konstravimas yra sudėtingas procesas, reikalaujantis gilaus supratimo apie sąryšį tarp konstrukcijos geometrijos ir jos funkcionavimo esant atitinkamoms apkrovoms. Sudėtingų geometrinių formų kūrimas paprastai susideda iš nuoseklių statinio architektūros ir konstrukcijų projektavimo etapų bei galutinio racionalaus sprendinio parinkimo. Tokio dvilypio projektavimo sprendiniai dažnai nevisiškai atitinka estetinius ar konstrukcinius erdvinės sistemos kriterijus, todėl būtina integruoti į projektavimo procesą būdus, leisiančius sklandžiai kontroliuoti tiek architektūrinę formą, tiek konstrukcijos elgseną.

Prieš kelis dešimtmečius atsiradusios kompiuterinės projektavimo priemonės *CAD* (*Computer Aided Design*) iš esmės pakeitė architektūros ir konstrukcijų projektavimo praktiką ir sukėlė tikrą revoliuciją statybų industrijoje. 1963 m. buvo sukurta pirmoji programa, turinti grafinę vartotojo sąsają *Sketchpad*. Informacija į kompiuterį buvo suvedama tiesiai į monitorių lazeriniu pieštuku. *Sketchpad* technologija paremta *x-y* koordinačių atvaizdavimo sistema. Ši programa turėjo pagrindines funkcijas, kurios ir dabar plačiai naudojamos *CAD* programiniuose paketuose: geometrinių elementų redagavimas (kopijavimas, ištrynimasis, pratęsimas, nukirpimas), automatinis pagrindinių geometrinių figūrų (apskritimų, stačiakampių) braižymas, redaguojamų geometrinių elementų grupių sudarymas ir t. t. (Blackwel 2003). Didėjant susidomėjimui *CAD* technologijomis, atsirado kompanijų, kurios kūrė ir to-

bulino kompiuterines projektavimo priemones. 1982 m. atsirado plačiai naudojama *AutoCAD* programa (Popov, Grigorjeva 2010).

Statybos pramonėje kompiuterinės projektavimo priemonės iš pradžių buvo naudojamos braižant skaitmeninę *2D* (dviejų dimensijų) geometriją, tačiau pingant ir tobulėjant kompiuteriams, *CAD* priemonėmis imta kurti *3D* geometriją ir išmaniusius *3D* modelius, kuriems buvo priskirta papildoma informacija (elementų specifikacijos, aprašai ir t. t.). Šių modelių tipas nusakomas terminu *BIM* (*Building Information Model*) – pastato informacinis modelis (Kolarevic 2005).

BIM – tai šiuolaikinė pažangi pastatų projektavimo ir jo dokumentacijos valdymo metodologija, grindžiama modelio kūrimu ir visos su pastatu susijusios informacijos rinkimu. *BIM* technologija suteikia galimybę projektavimo ir statybos proceso dalyviams dirbti su kompiuteriniu pastato modeliu kaip su realiu objektu. *BIM* technologija, paremta programine įranga, padidina architektų ir konstruktorių darbo našumą bei kūrybingumą. Pastato informacinis modelis labai praverčia projektinės dokumentacijos rengimo ar konstrukcijų montavimo etapuose. Projektuojant dažnai reikia atlikti įvairius architektūrinius-konstrukcinius pakeitimus, pavyzdžiui, pakeisti pastato pagrindinius geometrinius matmenis, kolonos ar sijos skerspį, jos projektinę padėtį. Tuomet išryškėja pagrindinis *CAD* ir *BIM* programų privalumas – parametriškumas. Parametrinės jungtys ir sukurti asociatyvūs ryšiai tarp konstrukcijos elementų suteikia galimybę greitai ir nesudėtingai atlikti įvairiausių modelio pakeitimus (Eastman 2008).

Buvo įprasta manyti, jog pastato architektūrinės idėjos kyla architektui, pasitelkus estetinį skonį ir intuityją, tačiau skaitmeninė revoliucija pakeitė tokį požiūrį. Šiandien architektūra tampa geometrinių formų ir erdvių virtualiu tyrinėjimu. Architektūra yra ne pats pastatas, o jį apibrėžianti ir generuojanti sistema, kurios kūrimas yra skaičiais, algoritmais ir geometriniais metodais grįstas loginis procesas (Zellner 1999).

Kartu su kompiuterinių technologijų atsiradimu ir sparčiu jų tobulėjimu atsiveria naujos galimybės architektūros ir konstrukcijų projektavimo srityje. Šiandien itin svarbu, kokiais metodais yra kuriama architektūra. Žymūs architektai Zaha Hadid, Normanas Fosteris ir kiti sulaukė tarptautinio pripažinimo daugiausia dėl inovatyvaus požiūrio į informacinių technologijų panaudojimą architektūros projektavimo srityje. Parametrinė architektūra yra daugelyje garsių užsienio universitetų dėstoma disciplina. Todėl ir Lietuvoje būtina domėtis naujais projektavimo metodais, juos vystyti ir pritaikyti tiek akademinėje, tiek praktinėje veikloje.

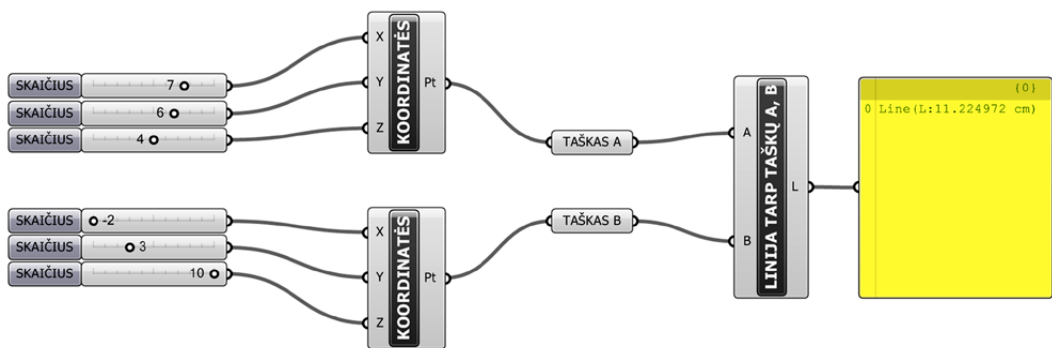
Generatyvinių algoritmų sukūrimas *Grasshopper* programos aplinkoje

Pastatų informaciniai modeliai (*BIM*) kuriami panaudojant parametrines sąsajas. Tačiau norint kūrybiškai panaudoti kompiuterines technologijas ir susikurti parametrinį pas-

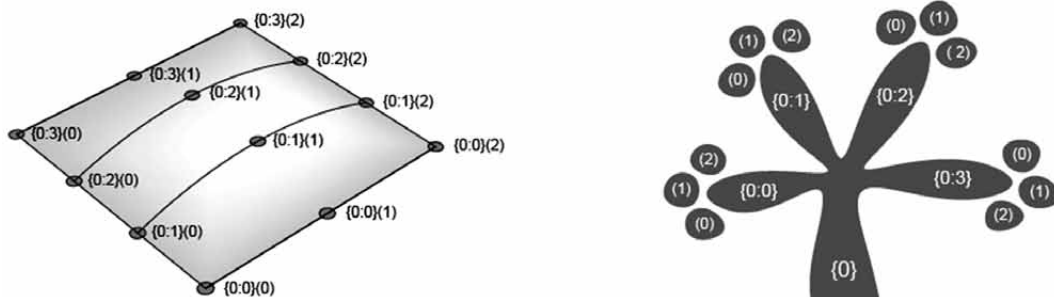
tato modelį, nesuvaržytą jokių išankstinių šablonų, būtina įžengti į programavimo lygmenį. Tokio programavimo pavyzdys – generatyviniai algoritmai. Generatyviniai algoritmai – tai loginių procesų seka, kurios pradžioje aprašomi pagrindiniai struktūros (urbanistinio karkaso, pastato formos, konstrukcijos geometrijos ar pan.) parametrai, juos transformuojančios bei reguliuojančios taisyklės. Galutinis algoritmo rezultatas – apskaičiuota unikali, geriausiai nustatytus kriterijus atitinkanti struktūra.

Šiuo metu yra keletas pasaulyje populiarių generatyvinių algoritmų kūrimo programinių paketų. Tai *Processing*, *Paracloud Gem* ir *Grasshopper*. Valdymo paprastumu ir plačiu galimybių diapazonu išsiskiria programa *Grasshopper*. Šioje programoje kiekvienas loginis veiksmas atliekamas *komponentais*. Šie *komponentai* sujungiami „laidais“, kuriais perduodamas informacijos sąrašas. Sujungiant į eilę keletą komponentų, sukuriama loginė seka – algoritmas (1 pav.). *Grasshopper* palaiko daugiamatę duomenų struktūrą, kuri vadinama *medžiu*. Duomenų *medis* yra sudarytas iš *šakų*, o *šakos* gali išsiskaidyti į dar mažesnes *šakas* (2 pav.).

Grasshopper programą galima susieti su *BIM* programomis, išoriniais įrenginiais, sensoriais, algoritmui priskiriant audiovizualinius duomenis, valdyti žingsninius variklius ir t. t.



1 pav. Linijos tarp dviejų taškų kūrimo algoritmas *Grasshopper* programoje
Fig. 1. A line between two points creating an algorithm using *Grasshopper* software



2 pav. Duomenų struktūros *medis* *Grasshopper* programoje
Fig. 2. The tree of data structure in *Grasshopper* software

Plieninės spraguotos konstrukcijos modelio generatyvinio algoritmo sukūrimas

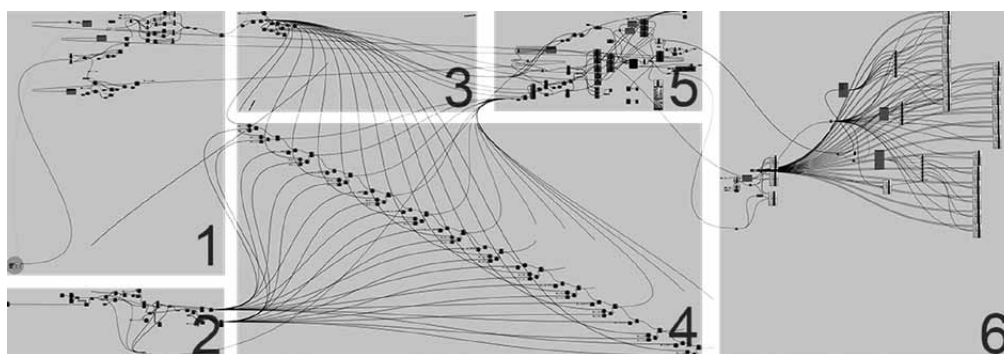
Plieninė spraguota konstrukcija taikant generatyvinį algoritmą generuojama iš pagrindinės arkinės apybrėžos kreivės.

Strypinės spraguotos konstrukcijos algoritmas *Grasshopper* aplinkoje susideda iš nuoseklių etapų (3 pav.). Pirmame sukuriama pagrindinės kreivės formavimo algoritmas. Dviejų taškų koordinatės lemia pagrindinės kreivės pradžią ir pabaigą. Sukuriamas tarptračio parametras, kuris yra lygus atstumui tarp šių taškų. Antrame etape sukuriama konstrukcijos strypų skaičiaus parametras, kuris sudalina pagrindinę kreivę lygiomis dalimis į pageidautiną atkarpų skaičių – tai viršutinė konstrukcijos juosta. Trečiame etape sukuriama viršutinės juostos kiekvieno strypo krypties vektoriai, kartu su veikiančių apkrovų vektoriais sudaroma apskrita įrašų schema (4 pav.). Remiantis grafinės statikos metodu ketvirtame etape gaunami konstrukcijos apatinės juostos

krypties vektoriai, suformuojama apatinė juosta, o priskyrus konstrukcijos aukščio parametram sugeneruojami visi kiti konstrukcijos strypai (Van Mele *et al.* 2012).

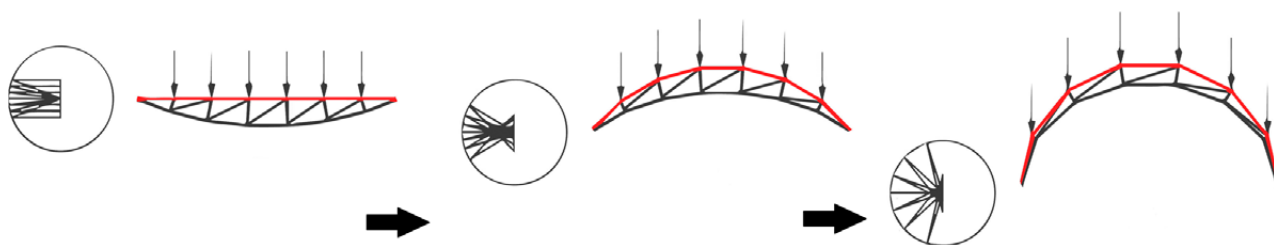
Penktame etape visi strypinės spraguotos konstrukcijos elementai sutelkiami į struktūrinės analizės bloką, jame suformuojama konstrukcijos skaičiuotinė schema. Baigtinių elementų metodu apskaičiuojamas konstrukcijos įlinkis, strypų įrašos. Šeštame etape duomenų išvedimo algoritmas visą naudojamą informaciją sinchronizuoja su *Microsoft Excel* programa, kurioje, keičiantis konstrukcijos geometrijai, automatiškai pildomos strypų įrašų reikšmių lentelės, braižomi konstrukcijos įlinkio, įrašų pokyčio grafikai.

Panaudojant sukurtą generatyvinį algoritmą formuojama spraguota strypinė konstrukcija (4 pav.). Konstrukcija sugeneruota iš arkos (konstrukcijos išgaubtumo parametras kinta nuo 0 iki 9,5 m per 40 iteraciją, atstumas tarp juostų nekinta). Konstrukcijos strypų profiliai – TRON 101×4 (vamzdiniai, 10,1 cm skersmens, 4 mm storio). Konstrukcijai panaudotas S275 markės plienas. Elementų numeracija pateikta 5 pav.



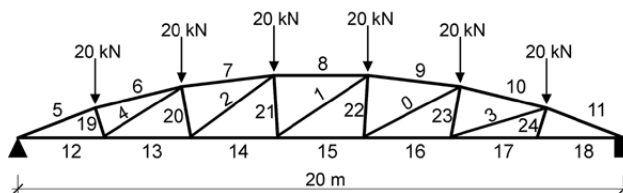
3 pav. Strypinės spraguotos konstrukcijos generavimas

Fig. 3. The generation of the rod gap structure



4 pav. Konstrukcijos kūrimo schema

Fig. 4. Scheme for structure creation



5 pav. Spraguotos konstrukcijos strypų numeracija

Fig. 5. The numbers of the elements of the rod gap structure

Spraguotos konstrukcijos modeliavimo rezultatai

Taikant generatyvinį algoritmą per keletą minučių sukurta 40 unikalų skaičiuojamųjų schemų modifikacijų, atlikti skaičiavimai, užpildytos įrašų reikšmių lentelės ir nubraižyti įrašų pokyčių grafikai.

Plieninės strypinės spraguotos konstrukcijos modeliavimo rezultatai pateikti 1–5 lentelėse. 1 lentelėje pateiktas konstrukcijos apatinės juostos pradinio įsvirio ir įlinkio kitimas 1, 10, 20, 30 ir 40 iteracijų metu. 2 lentelėje pateiktos konstrukcijos viršutinės juostos strypų ašinių jėgų reikšmės 1, 10, 20, 30 ir 40 iteracijų metu. 3 lentelėje pateiktos konstrukcijos apatinės juostos strypų ašinių jėgų reikšmės 1, 10, 20, 30 ir 40 iteracijų metu. 4 ir 5 lentelėse pateiktos konstrukcijos spyrių ašinių jėgų reikšmės 1, 10, 20, 30 ir 40 iteracijų metu.

Rezultatai parodė, kad keičiant konstrukcijos išgaubtumą nuo 0,00 iki 9,51 m, jos įlinkis sumažėja nuo 24,26 mm iki 15,47 mm (36 %). Nuo 1 iki 6 iteracijos matomas įlinkio reikšmės padidėjimas nuo 24,26 mm iki 45,17 mm. Nuo 6 iki 30 iteracijos įlinkis sumažėja iki 4,95 mm, vėliau padidėja iki galutinės 15,47 mm reikšmės.

Konstrukcijos viršutinės juostos visi strypai yra gniuždomi. Kraštiniuose 5,6 ir 10, 11 strypuose ašinė jėga per pirmąsias 7 iteracijas padidėja vidutiniškai iki 212 kN, o per likusias iteracijas sumažėja apie 95 %.

Viduriniuose 7, 8 ir 9 strypuose ašinės jėgos sumažėjimas yra apie 60 %.

Apatinės juostos strypai iki 10 iteracijos yra tempiami. Nuo 10 iki 30 iteracijos ašinės jėgos keičia ženklą, strypuose atsiranda gniuždymo jėgos. Per paskutines 10 iteracijų apatinės juostos strypuose vėl atsiranda tempimas (išskyrus kraštinius 12 ir 18 strypus). Ašinės jėgos reikšmė vidutiniškai 85 % mažesnė palyginus su pradine reikšme.

Konstrukcijos spyriai 0 ir 3 yra tempiami. Ašinės jėgos reikšmė juose padidėja 97 %. 1, 2 ir 4 strypai iki 5 iteracijos yra tempiami, vėliau ašinė jėga keičia ženklą ir gniuždymo jėgos padidėja 1 strypu 64 %, 2 ir 4 – 99 %. Konstrukcijos 19 strypas nuo 1 iki 8 iteracijos yra gniuždomas, nuo 9 iki 14 jame atsiranda tempimas, paskui iki 40 iteracijos strypas yra gniuždomas. Ašinės jėgos reikšmė sumažėja apie 50 %. 20 ir 21 strypai nuo 1 iki 8 iteracijos yra gniuždomi, nuo 9 iki 12 juose atsiranda nedidelių tempimo jėgų, nuo 13 iki 29 tempimo jėgas keičia gniuždymo, o nuo

1 lentelė. Konstrukcijos apatinės juostos pradinio įsvirio ir įlinkio kitimas 1, 10, 20, 30 ir 40 iteracijų metu

Table 1. Variation in the initial deflection of the bottom chord of the structure under 1, 10, 20, 30 and 40 iterations

Iteracija	Parametras	Konstrukcijos išgaubtumas, m	Įlinkis, mm
1	0	0,00	24,26
10	2,25	2,20	21,10
20	4,75	4,65	4,84
30	7,25	7,08	4,95
40	9,75	9,51	15,47

2 lentelė. Konstrukcijos viršutinės juostos strypų ašinių jėgų reikšmės 1, 10, 20, 30 ir 40 iteracijų metu

Table 2. Variation in the forces of the elements of the top chord of the structure under 1, 10, 20, 30 and 40 iterations

Viršutinės juostos strypų ašinės jėgos, kN							
Iteracija	5	6	7	8	9	10	11
1	7,21	-0,19	-4,16	-5,54	-4,29	-0,56	7,53
10	-167,12	-159,69	-159,73	-159,68	-160,97	-163,54	-167,38
20	-59,20	-47,43	-52,74	-55,69	-57,95	-59,34	-59,33
30	-29,01	-14,17	-34,50	-42,72	-46,19	-44,02	-29,10
40	-8,24	4,67	-50,20	-65,00	-70,13	-62,06	-8,36

3 lentelė. Konstrukcijos apatinės juostos strypų ašinių jėgų reikšmės 1, 10, 20, 30 ir 40 iteracijų metu

Table 3. Variation in the forces of the elements of the top chord of the structure under 1, 10, 20, 30 and 40 iterations

B variantas	Apatinės juostos strypų ašinės jėgos, kN						
Iteracija	12	13	14	15	16	17	18
1	0,21	174,85	175,02	174,95	174,77	173,29	173,90
10	-5,16	-14,34	-13,44	-13,47	-14,66	-16,84	-18,04
20	-13,99	-33,99	-28,29	-28,24	-33,95	-45,69	-46,84
30	-33,00	-14,73	-1,06	-0,94	-14,18	-46,05	-48,41
40	-70,23	18,94	43,32	43,41	20,99	-50,12	-59,35

4 lentelė. Konstrukcijos 0–4 spyrių ašinių jėgų reikšmės 1, 10, 20, 30 ir 40 iteracijų metu

Table 4. Variation in the forces of the structure having 0–4 elements under 1, 10, 20, 30 and 40 iterations

Spyrių ašinės jėgos, kN					
Iteracija	4	2	1	0	3
1	0,21	0,16	0,37	0,63	2,31
10	-5,16	-1,92	-0,38	1,16	1,86
20	-13,99	-6,63	-0,25	5,94	11,29
30	-33,00	-13,89	-0,18	13,24	30,46
40	-70,23	-22,38	-0,13	21,98	66,96

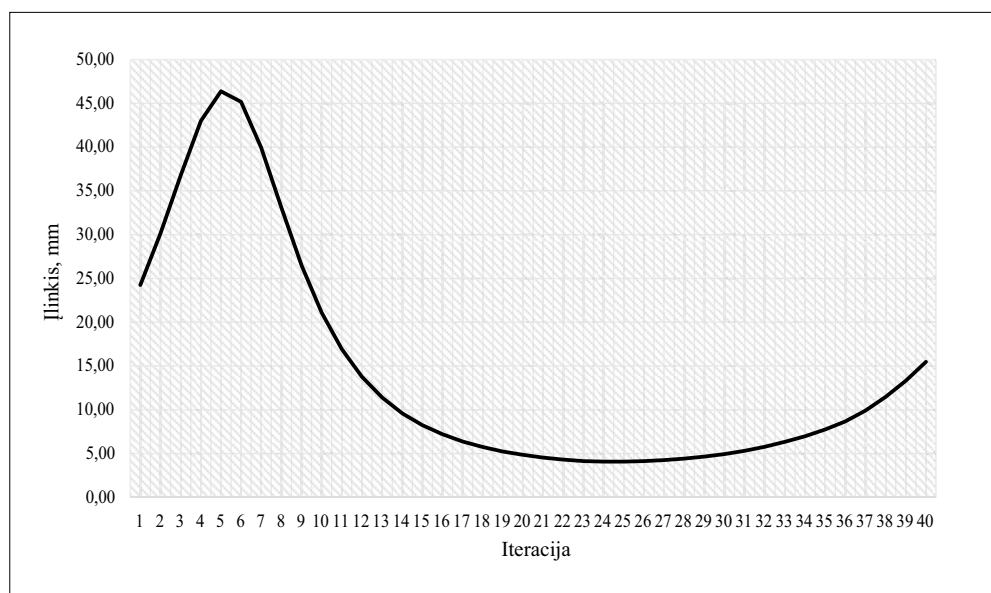
5 lentelė. Konstrukcijos 19–24 spyrių ašinių jėgų reikšmės 1, 10, 20, 30 ir 40 iteracijų metu

Table 5. Variation in the forces of the structure having 19–24 elements under 1, 10, 20, 30 and 40 iterations

Spyrių ašinės jėgos, kN						
Iteracija	19	20	21	22	23	24
1	-21,60	-20,93	-20,69	-20,79	-21,26	-21,97
10	2,02	-	0,69	-0,23	-0,53	-0,14
20	-2,95	-1,51	-3,36	-6,08	-8,28	-8,80
30	-5,39	2,46	0,42	-4,49	-9,81	-16,65
40	-9,56	15,82	15,04	9,50	0,70	-26,37

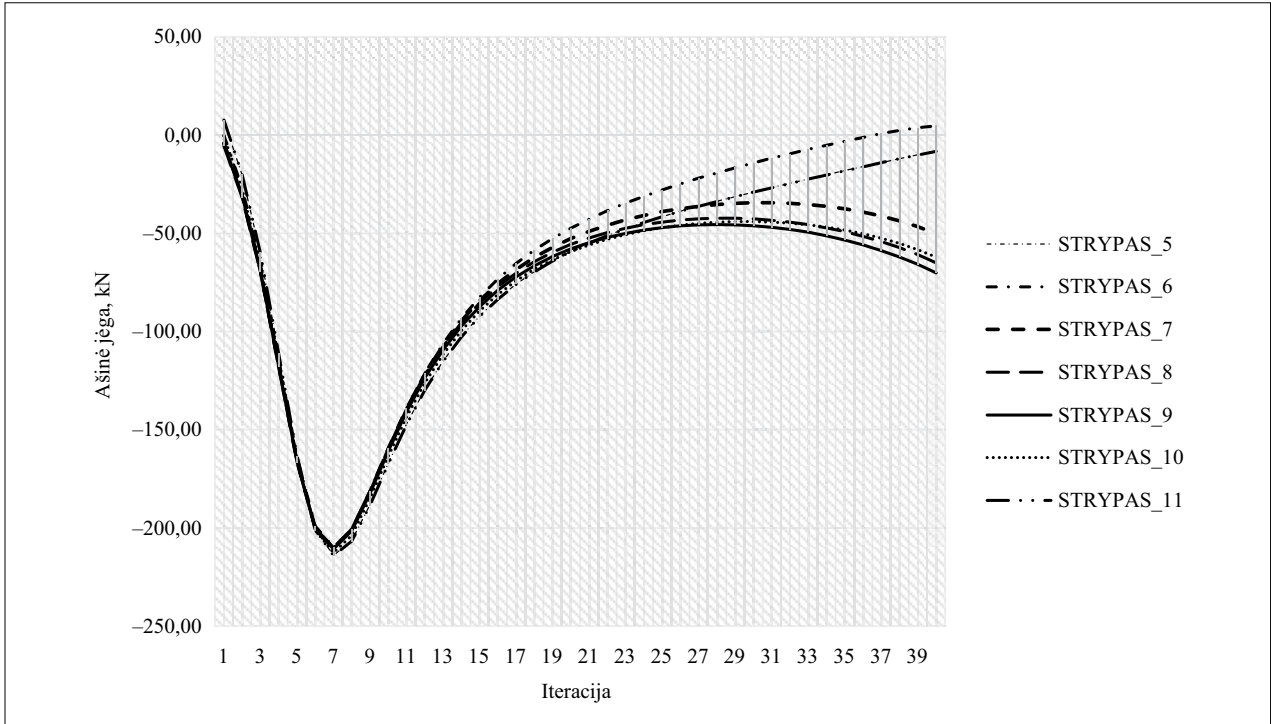
30 iki 40 tempimo jėgos reikšmė padidėja iki vidutiniškai 15,5 kN. 22 ir 23 strypuose gniuždymo jėgos tolygiai mažėja nuo 1 iki 30 iteracijos. Po 30 iteracijos atsiranda tempimo jėgos, kurios absoliutinė reikšmė 22 strypė padidėja iki 9,5 ir 23 strypė iki 0,7. 24 strypas yra gniuždomas, ašinė jėga jame ties 40 iteracija nežymiai padidėja (19 %).

6 pav. pateiktas konstrukcijos maksimalaus įlinkio pokyčio grafikas. 7 pav. – konstrukcijos viršutinės juostos strypų ašinių jėgų pokyčio grafikas. 8 pav. pateiktas konstrukcijos apatinės juostos strypų ašinių jėgų pokyčio grafikas, o 9 ir 10 pav. konstrukcijos spyrių ašinių jėgų pokyčio grafikas.

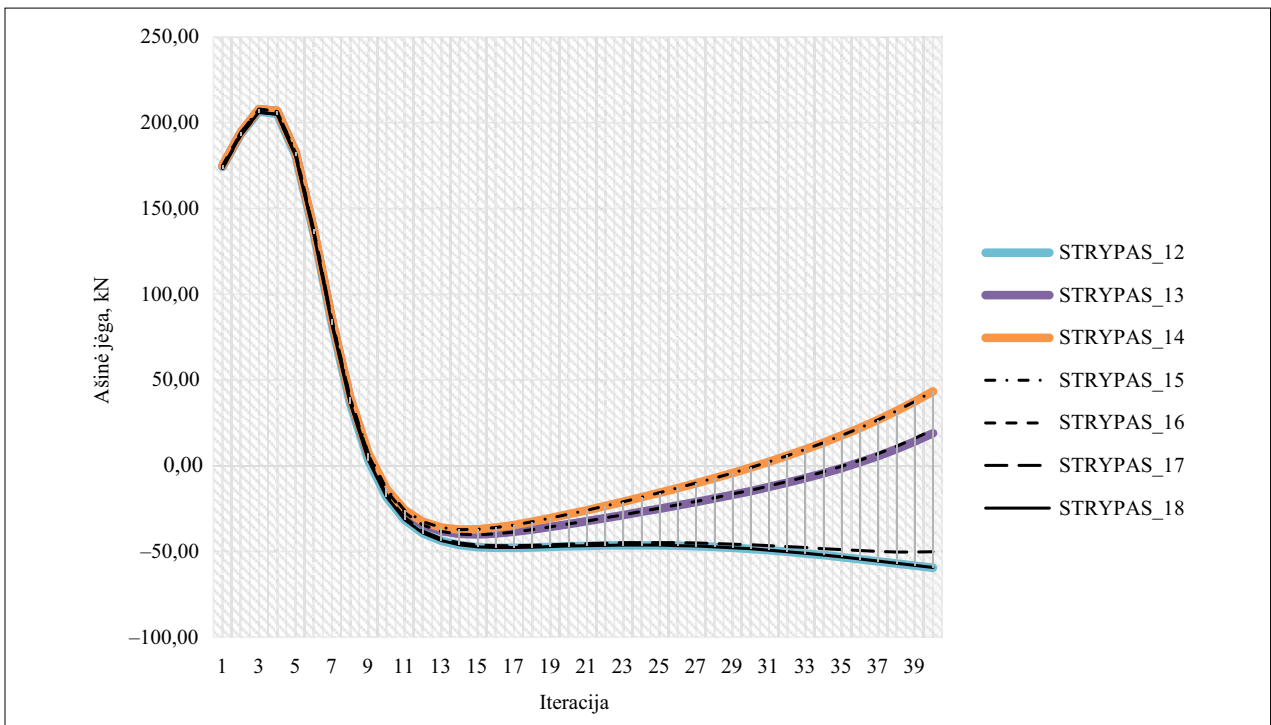


6 pav. Konstrukcijos maksimalaus įlinkio pokyčio grafikas

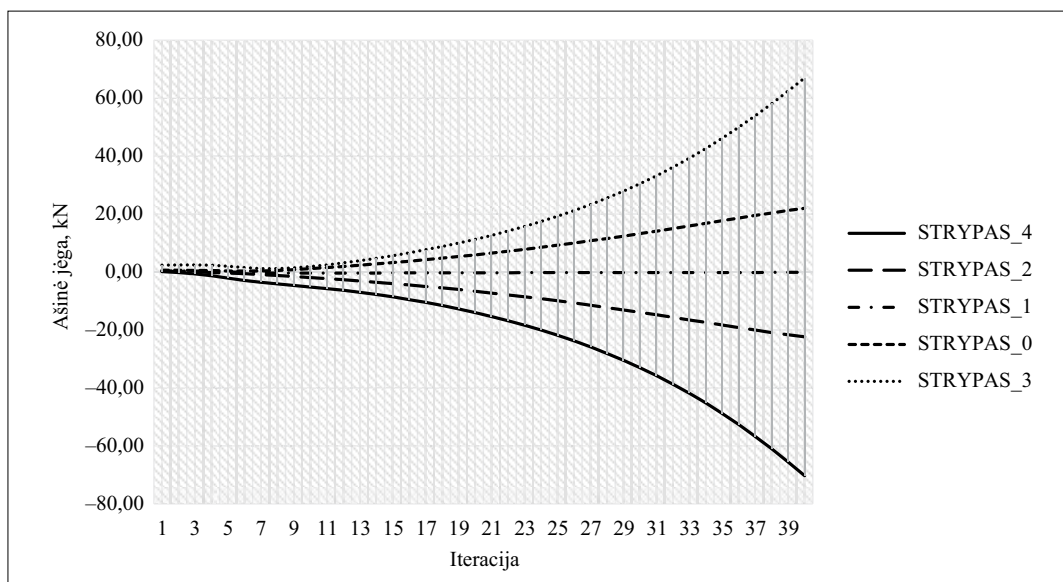
Fig. 6. Graph of the maximal deflection of the structure



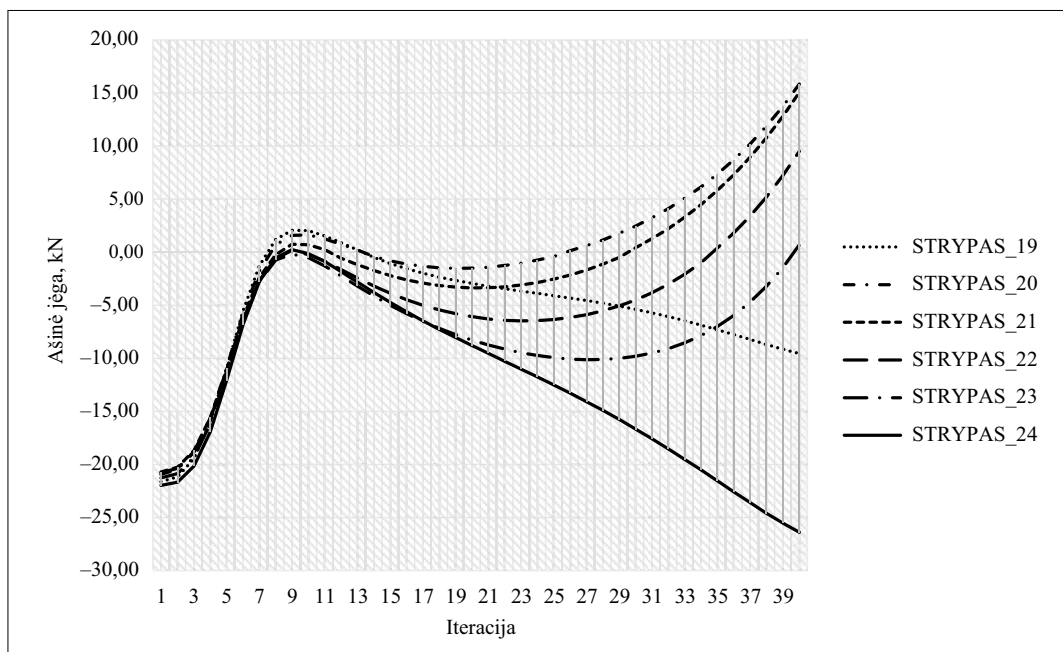
7 pav. Konstrukcijos viršutinės juostos strypų ašinių jėgų pokyčio grafikas
Fig. 7. Graph of variation in the forces of the top chord of the structure



8 pav. Konstrukcijos apatinės juostos strypų ašinių jėgų pokyčio grafikas
Fig. 8. Graph of variation in the forces of the bottom chord of the structure



9 pav. Konstruktijos 0–4 strypų ašinių jėgų pokyčio grafikas
 Fig. 9. Graph of variation in the forces of the structure having 0–4 elements



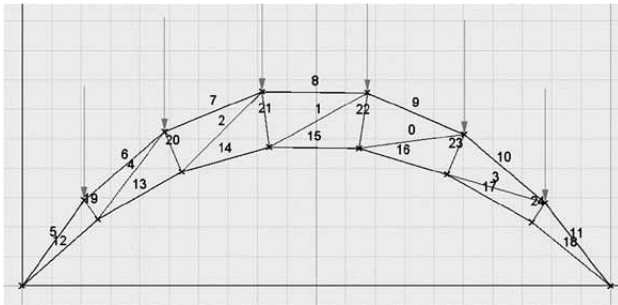
10 pav. Konstruktijos 19–24 strypų ašinių jėgų pokyčio grafikas
 Fig. 10. Graph of variation in the forces of the structure having 19–24 elements

Optimalios geometrinės formos paieška

Grasshopper programoje galima sukurti tokį algoritmą, kad sprendinys būtų optimali konstrukcijos geometrinė forma, t. y. iš tūkstančių įmanomų konstrukcijos geometrijų būtų išrinktas geriausias variantas, atitinkantis pasirinktus optimalumo kriterijus. Pirmame etape būtina apibrėžti tokias prielaidas:

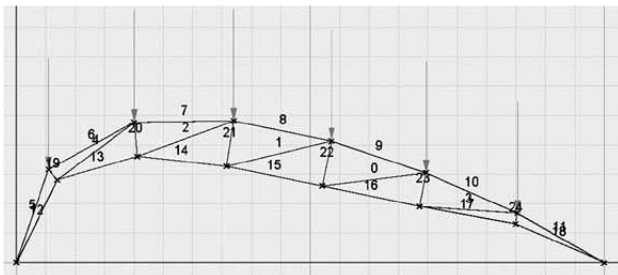
- konstrukcija yra plokščia;
- konstrukcijos aukštis (atstumas tarp viršutinės ir apatinės juostų) nekinta;
- konstrukcijos geometrija generuojama iš kreivės, kurią formuoja du kontroliniai taškai, kurie gali judėti x ir y koordinatėjų kryptimis (nuo 0 iki 10 m);
- strypų profiliuotai nekinta.

11 pav. pateikta optimizuotos konstrukcijos schema esant mažiausiam įlinkiui. 12 pav. pateikta optimalios konstrukcijos schema esant leistinam ribiniam įlinkiui ir mažiausiai konstrukcijos masei.



11 pav. Optimalios konstrukcijos geometrijos (pagal minimalų įlinkį) schema

Fig. 11. Scheme for the optimal geometry of the construction (according to the lowest deflection)



12 pav. Optimalios konstrukcijos geometrijos (pagal leistiną ribinį įlinkį esant mažiausiai konstrukcijos masei) schema

Fig. 12. Scheme for the optimal geometry of the construction (according to the permissible deflection and lowest mass)

Išvados

1. Sukurtas erdvinės plieninės spraguotos konstrukcijos generatyvinis algoritmas, kuris susideda iš šešių etapų. Algoritmo duomenų išvedimo bloke visa reikalinga informacija sinchronizuojama su *Microsoft Excel* programa, kurioje, keičiantis konstrukcijos geometrijai, automatiškai pildomos strypų įrašų reikšmių lentelės, braižomi grafikai.
2. Rezultatai parodė, kad keičiant konstrukcijos išgaubtumą nuo 0,00 m iki 9,51 m jos įlinkis sumažėja apie 36 %. Konstrukcijos viršutinės juostos kraštinuose strypuose ašinė jėga sumažėja apie 95 %. Viduriniuose strypuose ašinės jėgos sumažėjimas yra apie 60 %. Apatinės juostos ašinės jėgos reikšmė vidutiniškai 85 % mažesnė palyginti su pradine reikšme. Konstrukcijos spyriuose yra tiek tempimo, tiek gniuždymo ašinės jėgos. Ašinės jėgos reikšmė juose vidutiniškai sumažėja apie 50 %.
3. Panaudojant generatyvinius algoritmus, galima optimizuoti ne tik konstrukcijos profiliuočius, tačiau ir pačią geometriją, parenkant įvairius optimalumo kriterijus.

Literatūra

- Blackwel, A. K. R. 2003. Sketchpad: A man-machine graphical communication system, in *Technical Report, of Computer Laboratory of University of Cambridge* Nr. 574: 149 p.
- Eastman, C. 2008. *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers, and Contractors*. John Wiley & Sons, Inc. 490 p. <http://dx.doi.org/10.1002/9780470261309>
- Kolarevic, B. 2005. *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing*. Taylor Francis. 320 p.
- Popov, V.; Grigorjeva, T. 2010. Statybinių konstrukcijų integruotas automatizuotas projektavimas, *Statybinės konstrukcijos ir technologijos* [Engineering structures and technologies] 2(1): 31–37.
- Van Mele, T.; Lachauer, L.; Rippmann, M.; Block, P. 2012. Geometry-based understanding of structures, *Journal of the International Association of Shell and Spatial Structures* 53(4): 285–295.
- Zellner, P. 1999. *Hybrid Space: Generative Form and Digital Architectur*. Rizzoli. 192 p.

CREATION AND APPLICATION OF A GENERATIVE ALGORITHM FOR DESIGNING ROD GAP STEEL STRUCTURES

V. Pliadis, T. Grigorjeva

Abstract

Designing an attractive and structurally rational architectural form is a complex process that consists of the consequent stages of design and selection of the final rational solution. The application of modern information technology based on building information modelling assists with facilitating and speeding up the introduced process. Building Information Models (BIM) is developed using a parametric interface the structure of which is based on a generative algorithm – a tool for replicating the evolution of a particular structure thus finding the best solution. The paper presents the process of creating and applying the generative algorithm for the interactive model of the rod gap structure and displays the results of the carried out analysis.

Keywords: architecture, parametric architecture, structures, BIM, generative algorithm.