

Małgorzata MINKOWSKA^{*}
Politechnika Szczecińska

OPTIMALIZACJA UKŁADU KONSTRUKCYJNEGO HALI WIDOWISKO-SPORTOWEJ

Streszczenie. Przedstawiono optymalizację kratownicy przestrzennej o wymiarach 38x76 m. Minimalizowano dwie funkcje celu: masę słupów podporowych $f_1(x)$ oraz masę kratownicy $f_2(x)$. Zmiennymi decyzyjnymi są odległość międzywęzłowa a , odległość międzywarstwowa h oraz grubość ścianek słupów g . Analizie poddano łącznie 11 konstrukcji. Uzyskano dwa dyskretne zbiory ocen rozwiązań (dla 2 wariantów). Ze względu na małą liczebność zbiorów niezdominowanych, rozwiązanie preferowane wyłoniono w drodze dyskusji wyników.

OPTIMIZATION OF SPECTACLE HALL CONSTRUCTION SYSTEM

Summary. The optimization of spatial truss with dimension 38x76 m has been presented. There have been two objective functions to minimize: mass of supporting columns $f_1(x)$ and mass of truss $f_2(x)$. Decision variables are distance between truss nodes a , distance between upper and lower layer h and thickness of column elements g . Eleven constructions have been analysed. Two discreet evaluation sets of solutions (for two variants) have been obtained. Because of small dimensions of nondominated sets, the preferred solutions have been picked up by verbal evaluations of results.

1. Wprowadzenie

Struktury przestrzenne mają zastosowanie jako przekrycia obiektów o dużych rozpiętościach, np. hal sportowych, widowiskowych, targowych, wystawowych, hangarowych, dworcowych i innych. Zaletą tych przekryć jest nie tylko możliwość stosowania znacznych rozpiętości, ale także możliwość prefabrykacji, łatwy montaż i ewentualnie demontaż.

W pracy przedstawiona jest próba optymalizacji kratownicy przestrzennej, stanowiącej przekrycie hali widowiskowo-sportowej o wymiarach 38 x 76 m. Schemat omawianej konstrukcji przedstawiono na rysunku 1.

^{*} Opiekun naukowy: Dr hab. inż. Witold. M. Paczkowski, prof. PSz.

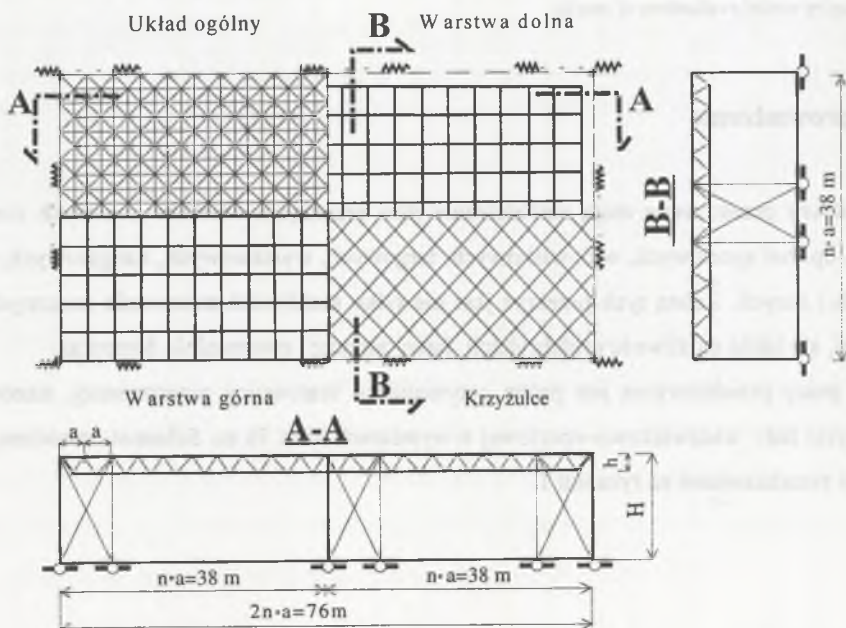
2. Obiekt optymalizacji

Obiektem optymalizacji jest kratownica przestrzenna o ortogonalnym układzie prętów w warstwach. Konstrukcja oparta jest przegubowo w węzłach warstwy górnej na sześciu słupach (rozieszczonych symetrycznie na dłuższych krawędziach przekrycia). Odległość między słupami wynosi 38 m.

Na kratownicę działają następujące obciążenia:

- ciężar własny przekrycia (0.19 do 0.22 kN/m²),
- ciężar pokrycia dachowego, zależny od odległości między węzłami kraty (od 0.35 do 0.41 kN/m²),
- obciążenie technologiczne (0.5 kN/m²),
- obciążenie śniegiem – druga strefa obciążenia śniegiem (0.56 kN/m²),
- obciążenie wiatrem (druga strefa wiatrowa – $p_k=0.35$ kN/m²).

W obliczeniach uwzględniono oddziaływanie wiatru na ściany i dach hali. Pokrycie dachowe stanowi blacha trapezowa ocieplona wełną mineralną i zabezpieczona potrójną warstwą papy. Blachę trapezową przyjęto zgodnie z katalogiem Huty Florian [4].



Rys. 1. Układ prętów kratownicy przestrzennej i jej podparcia

Fig. 1. Scheme of spatial truss and its support

Przyjęto, że pręty kratownic wykonane będą z rur ze stali R35 o wytrzymałości obliczeniowej $f_d=210$ MPa. Typoszereg, składający się z trzynastu przekrojów, został uporządkowany według rosnącego pola powierzchni, przy jednoczesnym zachowaniu wzrastającej wartości siły krytycznej, na podstawie analiz zawartych w pracach [1, 2]. Katalog przekrojów prętów przedstawiono na rysunku 2 i w tabeli 1.

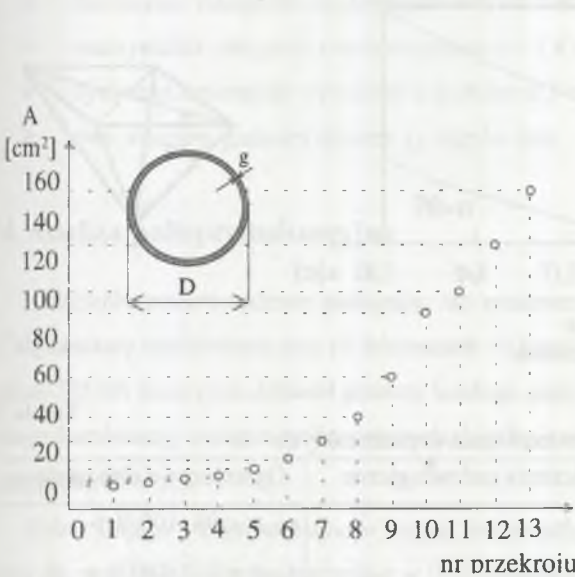


Tabela 1
Typoszereg przekrojów kratownicy

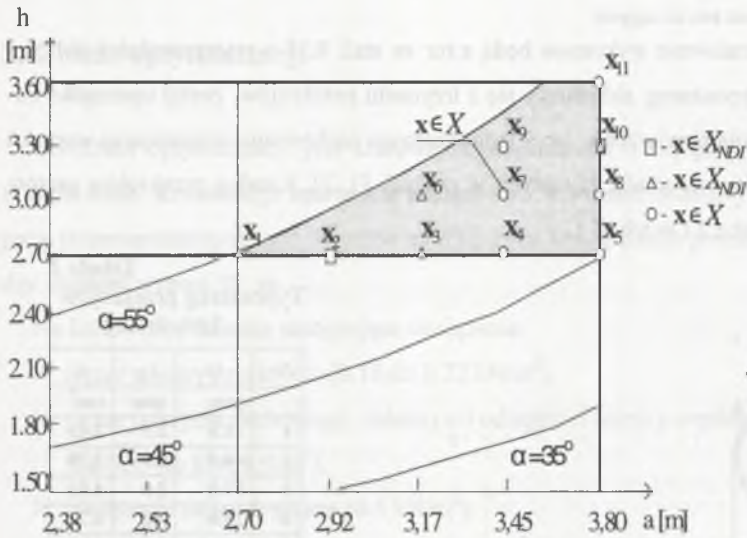
Nr	D	g	A
	mm	mm	cm ²
1	31.8	2.9	2.63
2	44.5	2.9	3.79
3	57.0	2.9	4.93
4	70.0	3.2	6.72
5	101.6	3.6	11.1
6	133.0	4.0	16.2
7	159.0	5.0	24.2
8	193.7	6.3	37.1
9	244.5	8.0	59.4
10	244.5	11.0	80.7
11	273.0	12.5	102
12	273.0	16.0	129
13	323.9	16.0	155

Rys.2. Typoszereg przekrojów kratownicy
Fig.2. The catalogue of cross-sections of truss elements

3. Sformułowanie zadania polioptymalizacji

Przedstawione zadanie rozwiązano ze względu na minimalizację dwóch funkcji celu: masy słupów podporowych $f_1(\mathbf{x})$ oraz masy kratownicy $f_2(\mathbf{x})$. Wektor funkcji celu $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ ma postać $\mathbf{f}(\mathbf{x}) = [f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x})]^T$.

Parametrami zadania są: wysokość słupów, kombinacje obciążeń obliczeniowych, rozstaw słupów, gatunek stali, typ przekroju prętów oraz katalog przekrojów prętów kratownicy. Obszar rozwiązań dopuszczalnych zadania stanowi dyskretny zbiór punktów, opisany zmiennymi a, h i g_h (rys.3).



Rys. 3. Obszar ocen rozwiązań dopuszczalnych
 Fig. 3. The domain of evaluation of feasible solutions

Tabela 2

Obszar ocen rozwiązań dopuszczalnych

Ograniczenia projektowe	Ograniczenia technologiczne	Ograniczenia obliczeniowe
$N_i^t \leq A_i \cdot f_d$	$A_i \in T$	$z\% \in < 98, 100 \% >$
$N_i^c \leq \varphi_i \cdot A_i \cdot f_d$	$g \in < 2.9, 16.0 >$	$z_m \in < 0.0, 0.01 \% >$
$\lambda_i^c = \frac{\mu \cdot l}{i_i} \leq 250, i = 1, \dots, l$	$D \in < 31.8, 323.9 >$	$V \leq 8$
$K_V \cdot \delta_{VS} = P_{VS}$	$g_h \in < 2.9, 16.0 >$	
$\delta_z \leq \frac{1.02L}{250} = 15.5 \text{ cm}$	$D_h \in < 273.0, 323.9 >$	
	$\alpha \in < 35^\circ, 55^\circ >$	

gdzie: N_i^t, N_i^c – siła rozciągająca (t) i ściskająca (c) w i -tym przęcie, φ_i – parametr niestateczności, λ_i^c, i_i – smukłość oraz promień bezwładności i -tego pręta, K_V – macierz sztywności ustroju w v -tej iteracji projektowania, P_{VS} – wektor obciążenia w v -tej iteracji od s -tej kombinacji obciążeń, δ_z – maksymalne pionowe przemieszczenie węzła kratownicy, $z\%$ – procent prętów nie zmieniających przekroju w dwóch kolejnych iteracjach, z_m – dopuszczalny procent zmiany masy kratownicy w dwóch kolejnych iteracjach, T – typoszereg przekrojów prętów kratownicy

Obszar rozwiązań dopuszczalnych X określono, stosując następujące ograniczenia (tabela 2):

- minimalny kąt nachylenia krzyżulców do płaszczyzny warstw $\alpha = 35^\circ$,
- maksymalny kąt nachylenia krzyżulców do płaszczyzny warstw $\alpha = 55^\circ$,
- minimalna wysokość $h = 2.7$ m (ze względu na sztywność przekrycia),
- maksymalna wysokość $h = 3.6$ (względny estetyczne),
- minimalna odległość międzywęzłowa $a = 2.7$ m,
- maksymalna odległość międzywęzłowa $a = 3.8$ m,
- dyskretna zmienność wysokości z krokiem 0.3 m,
- dwa warianty grubości ścianek g_h słupów hali,

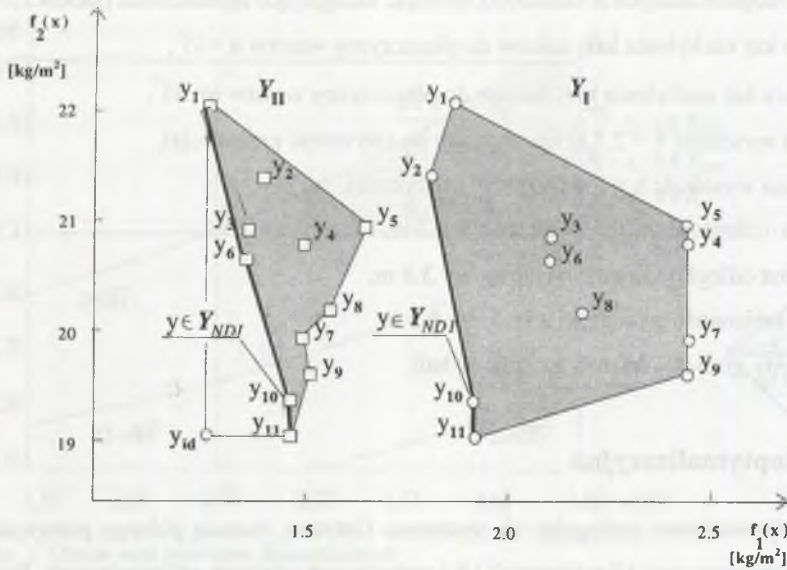
4. Analiza polioptymalizacyjna

Obliczenia przeprowadzono posługując się systemem Optytrus, metodą pełnego przeglądu. Całą strukturę analizowano przy 10 schematach i 9 kombinacjach obciążeń obliczeniowych. Program TRUSS iteracyjnie dobierał przekrój każdego pręta kratownicy na najniekorzystniejszą dla niego kombinację obciążeń obliczeniowych. Liczbę iteracji projektowania ograniczono w tym przypadku do $V \leq 8$.

Dobór słupów przeprowadzono w dwóch wariantach; w I wariantcie przyjęto ten sam przekrój dla wszystkich słupów, natomiast w II średnica jest jednakowa, a różna grubość płaszcza dla słupów środkowych i skrajnych (tab. 1).

Zbiory ocen niezdominowanych Y_{NDI} i Y_{NDII} wariantów I i II, przedstawione na rysunku 4, są równoliczne, tj. zawierają po trzy i cztery elementy. Do zbioru Y_{NDI} należą oceny y_2, y_{10}, y_{11} odpowiadające kolejno rozwiązaniom x_2, x_{10}, x_{11} . Zbiór Y_{NDII} zawiera następujące oceny y_1, y_6, y_{10}, y_{11} , które odpowiadają rozwiązaniom x_1, x_6, x_{10}, x_{11} . Minimum masy słupów uzyskano dla rozwiązania x_2 w wariantcie I, natomiast dla rozwiązania x_1 w wariantcie II. Minimum masy kraty otrzymano dla rozwiązania x_{11} w obu przypadkach.

Masa słupów w wariantcie I jest wyższa o 26% od masy słupów w wariantcie II, dlatego przy wyborze rozwiązania preferowanego wzięto pod uwagę wariant II. Obliczono odległości geometryczne, w sensie euklidesowym, od oceny idealnej y_{id} do każdej z ocen niezdominowanych. Jako preferowane otrzymano rozwiązanie x_{11} , którego odległość oceny jest najmniejsza od oceny idealnej.



Rys. 4. Obszar ocen rozwiązań dopuszczalnych

Fig. 4. The domain of evaluation of feasible solutions

Tabela 3

Przekroje słupów podporowych

Rozwiązanie	I		II			
	D_h [mm]	g_h [mm]	słupy skrajne		słupy środkowe	
			D [mm]	g_h [mm]	D_h [mm]	g [mm]
x_1	273	16.0	273.0	8.0	273	16.0
x_2	323.9	12.5	323.9	8.0	323.9	12.5
x_3	273.0	17.5	273.0	8.0	273.0	17.5
x_4	273.0	20.0	273.0	8.0	273.0	20.0
x_5	323.9	16.0	323.9	8.0	323.9	16.0
x_6	273.0	17.5	273.0	8.0	273.0	17.5
x_7	273.0	20.0	273.0	8.0	273.0	20.0
x_8	323.9	14.2	323.9	8.0	323.9	14.2
x_9	273.0	20.0	273.0	8.0	273.0	20.0
x_{10}	323.9	12.5	323.9	8.0	323.9	12.5
x_{11}	323.9	12.5	323.9	8.0	323.9	12.5

5. Uwagi końcowe

Analizie poddano łącznie 11 konstrukcji. Uzyskane wyniki pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków:

- dla rozważanej rozpiętości i podparcia kratownicy (38x76 m), ze względu na graniczne ugięcie[5], należy przyjmować min. wysokość kraty równą 2.7 m;
- przyjęty typoszereg przekrojów wg formuły [2] $A_{k+1} = A_k \cdot \left(\frac{A_{\max}}{A_{\min}} \right)^{\frac{1}{t-1}}$, gdzie t jest liczebnością katalogu przekrojów, zapewni równomierne wykorzystanie naprężeń;
- masa kratownicy osiąga minimalną wartość dla rozwiązania x_{11} , tj. dla najmniejszej liczby podziałów $n=10$ ($a=3.8$ m) i największej wysokości ($h=3.6$ m);
- masa słupów podporowych osiąga minimum w wariancie pierwszym dla rozwiązania x_2 ($n=26$, $a=2.92$, $h=2.7$), natomiast w wariancie drugim dla rozwiązania x_1 ($n=28$, $a=2.7$, $h=2.7$);
- jako preferowane otrzymano rozwiązanie x_{11} , dla którego odległość międzywęzłowa jest równa 3.8 m, a wysokość 3.6 m.

LITERATURA

1. Paczkowski W. M.: Wybrane Problemy Dyskretnej Optymalizacji Ewolucyjnej, PNPS Szczecin 1999.
2. Badower A., Paczkowski W.M., Jendo S.: Polyoptimal catalogue of rolled profiles for a given class of spatial trusses. Computer Assisted Mechanics and Engineering Sciences, vol 7, no. 1 2000, p101–116.
3. Büttner O., Stenker H.: Lekkie budowle metalowe, Arkady, Warszawa 1975.
4. Bogucki W., Żybartowicz M.: Tablice do projektowania konstrukcji metalowych, wyd. 5, Arkady, Warszawa 1984, wyd. 6, Akady, Warszawa 1996.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Tadeusz Chmielewski

Abstract

The optimization of spatial truss with dimension 38x76 m has been presented. There have been two objective functions to minimize: mass of supporting columns $f_1(\mathbf{x})$ and mass of truss $f_2(\mathbf{x})$. Decision variables are :distance between truss nodes a, distance between upper and lower layer h and thickness of column elements g. Eleven constructions have been analysed. Two discreet evaluation sets of solutions (for two variants) have been obtained. Because of small dimensions of nondominated sets, the preferred solutions have been picked up by verbal evaluations of results.

Construction	Columns		Truss		Total
	f_1 (t)	f_2 (t)	f_1 (t)	f_2 (t)	
1	111	10.8	2715	52	2826
2	252	11.7	1512	47	1769
3	272	8.2	2715	49	2764
4	111	20.0	2715	74	2986
5	272	10.1	2715	50	2838
6	272	12.0	2715	51	2838