BUDOWNICTWO
CZASOPISMO TECHNICZNE
TECHNICAL TRANSACTIONS
CIVIL ENGINEERING
WYDAWNICTWO POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ
1-B/2009
ZESZYT 5
ROK 106
ISSUE 5
YEAR 106

ANTONI STACHOWICZ, MAŁGORZATA FEDORCZAK-CISAK*

OCENA WPŁYWU ZASTOSOWANIA ROLET TERMOIZOLACYJNYCH NA BILANS ENERGETYCZNY BUDYNKU I BIERNE WYKORZYSTANIE ENERGII SŁONECZNEJ

THE ESTIMATION OF INFLUENCE OF USE THERMAL ROLLER BLIND ON BUILDING ENERGY BALANCE AND PASSIVE USAGE OF THE SOLAR ENERGY

Streszczenie

W niniejszym artykule problem oceny efektywności zastosowania rolet termoizolacyjnych, racjonalnego doboru stopnia przeszklenia ścian budynku oraz właściwości termicznych okien sformułowano jako dwukryterialne i dwupoziomowe zadanie ekstremalne. Minimalizowano koszt przegród zewnętrznych oraz zużycie energii na ogrzewanie. Wyznaczono rozwiązanie kompromisowe metodą kryterium globalnego. Podano wyniki dla okien bez żaluzji i z żaluzjami.

Słowa kluczowe: *budownictwo energooszczędne, rolety, optymalizacja wielokryterialna*

Abstract

In the article is framed the problem: efficiency of use the thermoinsulation shutters, choice size of glazing external walls and choice thermal characteristics of windows. That problems are framed as a two-criteria optimization problems. In work are framed two inverse criterions: minimum building cost including cost of materials and erection external partitions and minimum seasonal demand of heating energy. Compromise solution determined by global criterion method. Solutions are presented for windows with shutters and without them.

Keywords: *energysaving building, shutter, multicriteria optimization*

* Prof. dr hab. inż. Antoni Stachowicz, dr inż. Małgorzata Fedorczak-Cisak, Instytut Materiałów i Konstrukcji Budowlanych, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

1. Wstęp

Żaluzje termoizolacyjne, stosowane szeroko za granicą i to w różnych strefach klimatycznych, w Polsce są stosunkowo mało popularne. Potrzeba popularyzacji ich zastosowania, także ze względu na bilans energetyczny budynków i zmniejszenie zapotrzebowania na energię do ogrzewania, jest i w naszych warunkach klimatycznych w pełni uzasadniona.

Do oceny efektywności zastosowania rolet termoizolacyjnych, przy optymalnym doborze stopnia przeszklenia ścian oraz właściwości termicznych okien, a także oporu termicznego ścian sformułowano zadania optymalizacji dwupoziomowej i dwukryterialnej. Ocenę efektywności przeprowadzono przez porównanie rozwiązań optymalnych, stosując okien z żaluzjami i bez nich. Do oceny wyłącznie samych żaluzji rozwiązano zadanie dla okien bez żaluzji o współczynnikach *p* przeszklenia analogicznych do optymalnych dla okien z żaluzjami.

Ocenę przeprowadzono na przykładzie mieszkalnego budynku parterowego o rzucie kwadratowym i polu powierzchni rzutu 169 m^2.

2. Sformułowanie zadania

Zadanie sformułowano jako problem optymalizacji wielopoziomowej i wielokryterialnej

$$\mathbf{K}(\mathbf{w}^*, \mathbf{x}^*) = \min_{\mathbf{w}} \mathbf{K}_i(\mathbf{w}, \mathbf{x}^*[\min_{\mathbf{x}\in\mathbf{Q}} \mathbf{K}_i(\mathbf{w}, \mathbf{x})]) \tag{1}$$

gdzie:

$\mathbf{K}_i = \{K_1, K_2\}$ – wektorowa funkcja celu,
$\mathbf{K}_1(\mathbf{w}, \mathbf{x})$ – koszt realizacji przegród zewnętrznych budynku [zł],
$\mathbf{K}_2(\mathbf{w}, \mathbf{x})$ – zapotrzebowanie na energię do ogrzewania [kWh/a],
$\mathbf{W} = \{w_i\}$, $i = 1, 2$ – zbiór zmiennych decyzyjnych dyskretnych,
$\mathbf{X} = \{x_j\}$, $j = 1, \ldots, 5$ – zbiór zmiennych decyzyjnych ciągłych,
$\mathbf{G} = \{g_i(x)\}$, $i = 1, ..., 5$ – zbiór ograniczeń,
$\mathbf{Q} = \{\mathbf{x};\ g_i(x) \geq 0\}$ – zbiór dopuszczalnych wartości zmiennych decyzyjnych **x**.

Wszystkie wartości zmiennych **w** uwzględniane w zadaniach są, oczywiście, wartościami dopuszczalnymi.

Zmienne decyzyjne podano w tablicach 1 i 2. W wypadku zmiennej w_2 ograniczono się jedynie do dwu wartości granicznych, ponieważ są to wartości optymalne ze względu – odpowiednio – na koszt (dolne w_{21}) lub energię (górne w_{22}) [1].

Tabela 1

Zmienne decyzyjne dyskretne

Zmienne	Cecha		
w_1	obecność żaluzji	w_{11} (bez rolet)	w_{12} (z roletami)
w_2	jakość okien	w_{21} (R = 0,45 m^{2}K/W; TR = 0,70)	w_{22} (R = 0,77 m^{2}K/W; TR = 0,50)

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Tabela 2

Zmienne decyzyjne ciągłe

u_i ↓	Opis	Symbol	Jednostka
x_{1-4}	współczynnik przeszklenia ścian	r_i (i = 1, …, 4)	[–]
x_5	opór cieplny ścian zewnętrznych	R_s	[m^{2}K/W]

Ograniczenia dla zmiennych ciągłych podano w tabelach 3 i 4.

Tabela 3

Ograniczenia na opór cieplny ściany zewnętrznej
***Rs* (u_2) [m^{2}K/W]**

g_5[m^{2}K/W]	
$g_{5\ min.}$	$g_{5\ max}$
3,33	10,0

Dla dachu i podłogi na gruncie przyjęto następujące współczynniki U: stropodach 0,16 W/m^{2}K, podłoga 0,19 W/m^{2}K.

Tabela 4

Ograniczenia dla współczynnika przeszklenia r_i (g_{1-4})

g_1 [–]		g_2 [–]		g_3 [–]		g_4 [–]	
$r_{1\ min.}$	$r_{1\ max}$	$r_{2\ min.}$	$r_{2\ max}$	$r_{3\ min.}$	$r_{3\ max}$	$r_{4\ min.}$	$r_{4\ max}$
0,135	0,60	0,135	0,28	0,135	0,28	0,135	0,28

3. Rolety termoizolacyjne i sposób ich uwzględnienia w bilansie energetycznym

Założono, że okna wyposażone są w rolety termoizolacyjne zamykane automatycznie od momentu zachodu słońca, a otwierane po wschodzie słońca. Godziny zachodu i wschodu przyjęto na podstawie danych dla Warszawy.

Rolety jako materiał termoizolacyjny zawierają piankę poliuretananową o grubości 4 cm w obudowie aluminiowej. Przyjęto, zgodnie z prospektem producenta, opór cieplny rolet z uwzględnieniem warstwy powietrza pomiędzy roletą i szybą (5 mm) R = 2,21 m^{2}K/W. Obliczenia bilansu cieplnego dla budynku przeprowadzono z zastosowaniem metody dokładnej [3]. Wschody i zachody słońca w poszczególnych miesiącach 2007 r. oraz procentowy czas trwania dnia i nocy zestawiono w tab. 5.

Założono średnią miesięczną temperaturę w nocy o 2 stopnie niższą od normowej, natomiast średnią dzienną wyliczono tak, aby temperatura dobowa (uwzględniając procentowy udział dnia i nocy) była zgodna z normową.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

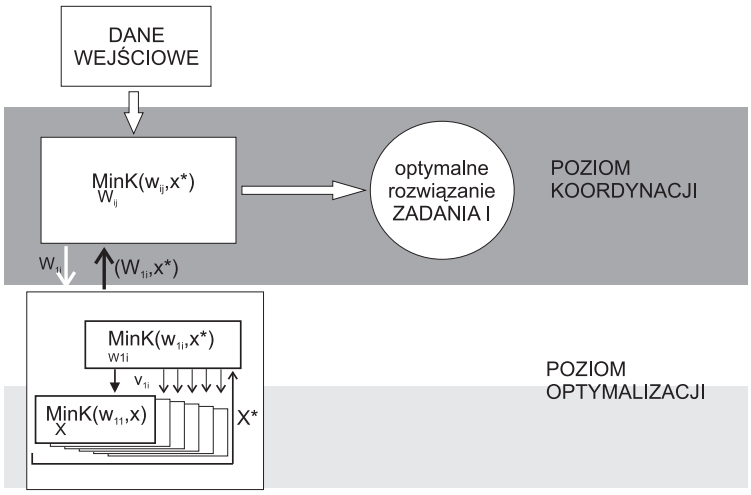
Tabela 5

Określenie procentowego udziału dnia i nocy w ciągu doby

Miesiąc:	Wschód słońca	Zachód słońca	Przyjęto: dzień [%]	Przyjęto: noc [%]
Styczeń	7,45’	15,29’	30,28	69,72
Luty	7,20’	16,19’	37,50	62,50
Marzec	6,27’	17,12’	44,79	55,21
Kwiecień	5,22’	18,01’	52,71	47,29
Maj	4,06’	19,01’	62,15	37,85
Czerwiec	3,24’	19,44’	68,06	31,94
Lipiec	3,16’	20,01’	69,79	30,21
Sierpień	3,55’	19,28’	64,79	35,21
Wrzesień	4,41’	18,33’	57,78	42,22
Październik	5,38’	17,11’	48,13	51,88
Listopad	6,28’	16,11’	40,49	59,51
Grudzień	7,17’	15,30’	34,93	65,07

4. Sposób rozwiązania

Schemat rozwiązania pokazano na rys. 1. Na poziome górnym (koordynacj) rozwiązanie optymalne dla zmiennych dyskretnych wyznaczono metodą selektywnego przeszukiwania. Rozwiązywane zadania na poziomie dolnym (optymalizacji) to 18 zadań nieliniowego programowania z ograniczeniami. Zadania rozwiązano numerycznie, stosując program Camos [4]. Do obliczeń zadań optymalizacji jednokryterialnej (poziom



Rys. 1. Schemat rozwiązania zadania [1]
Fig. 1. The scheme of solution task [1]

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

dolny min. $\mathbf{K}_1$, min. $\mathbf{K}_2$) wykorzystano metodę kombinowaną złożoną z metody losowej i metody zmiennych tolerancji. Rozwiązanie zadania dwukryterialnego uzyskano przez zastosowanie metody kryterium globalnego.

5. Wyniki

Rozwiązania zadań poziomu optymalizacji przedstawiono w tab. 7–9, gdzie:

A – Wartości funkcji celu dla zadania optymalizacyjnego przy założeniu, że okna wyposażone są w rolety termoizolacyjne,

B – Wartości funkcji celu dla zadania optymalizacyjnego przy założeniu, że okna nie są wyposażone w rolety termoizolacyjne,

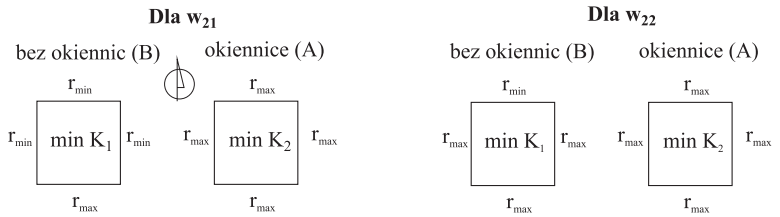
C – Wartości funkcji celu przy założeniu, że okna nie są wyposażone w rolety termoizolacyjne i zmienne x_{1-4} = stałe = x_{1-4} * (wartości zmiennych przyjęto jak dla zadania A).

Tabela 6

Optymalne wartości funkcji celu

	min. F_1			**min. F_2**			**min. (F_1;F_2)**		
Okna w_{21} (R = 0,45 m^{2}K/W; TR = 0,70)									
	optymalizacja		x_{1-4} (jak w A)	**optymalizacja**		x_{1-4} (jak w A)	**optymalizacja**		x_{1-4} (jak w A)
	A	**B**	**C**	**A**	**B**	**C**	**A**	**B**	**C**
F_1 [zł]	164 846	155 369	155 369	203 269	174 656	178 036	198 594	168 154	175 807
F_2 [kWh/a]	9457	11835	11835	2953	8387	9291	3138	8884	8843
Okna w_{22} (R = 0,77 m^{2}K/W; TR = 0,50)									
	optymalizacja		x_{1-4} (jak w A)	**optymalizacja**		x_{1-4} (jak w A)	**optymalizacja**		x_{1-4} (jak w A)
	A	**B**	**C**	**A**	**B**	**C**	**A**	**B**	**C**
F_1 [zł]	174 955	165 478	165 478	228 994	201 145	204 993	215 415	188 853	194 915
F_2 [kWh/a]	9825	11072	11072	4292	7345	7546	4852	7776	7598

Na rysunku 2 przedstawiono istotną zmianę wartości optymalnych dla poszczególnych ścian zmiennej x_1 (współczynnik przeszklenia r_i na poszczególnych elewacjach) w porównaniu z budynkiem, w którym nie zastosowano rolet.



Rys. 2. Optymalne wartości współczynnika przeszklenia z zastosowaniem rolet i bez nich dla okien o słabych i dobrych właściwościach termoizolacyjnych

Fig. 2. Optimum values coefficient r (widows witch shutter and without its)

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Tabela 7

Porównanie wyników w %

	min. F_1			min. F_2			min. (F_1;F_2)		
Okna w_{21} (R = 0,45 m^{2}K/W; TR = 0,70)									
	optymalizacja		x_{1-4} (jak w A)	**optymalizacja**		x_{1-4} (jak w A)	**optymalizacja**		x_{1-4} (jak w A)
	A	**B**	**C**	**A**	**B**	**C**	**A**	**B**	**C**
F_1 [zł]	100%	94%	94%	100%	86%	88%	100%	85%	89%
F_2 [kWh/a]	80%	100%	100%	32%	90%	100%	35%	100%	100%
Okna w_{22} (R = 0,77 m^{2}K/W; TR = 0,50)									
	optymalizacja		x_{1-4} (jak w A)	**optymalizacja**		x_{1-4} (jak w A)	**optymalizacja**		x_{1-4} (jak w A)
	A	**B**	**C**	**A**	**B**	**C**	**A**	**B**	**C**
F_1 [zł]	100%	95%	95%	100%	88%	90%	100%	88%	90%
F_2 [kWh/a]	89%	100%	100%	57%	97%	100%	64%	102%	100%

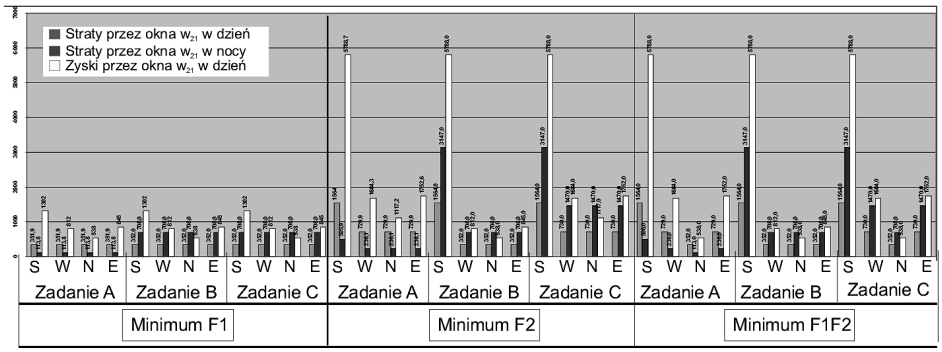
Tabela 8

Optymalne wartości zmiennych decyzyjnych ciągłych

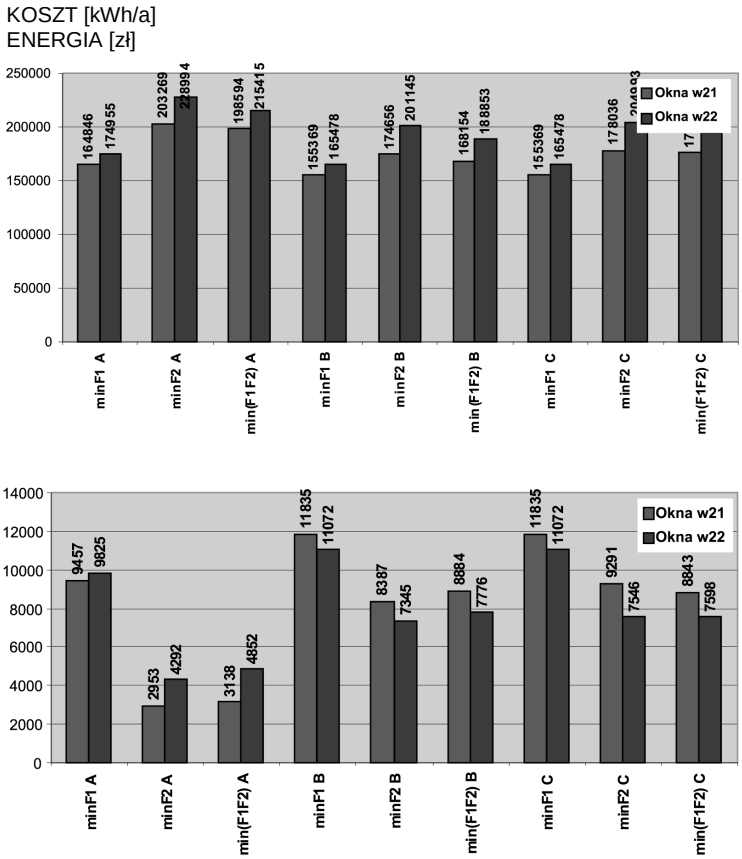
	min. F_1			min. F_2			min. (F_1;F_2)		
Okna w_{21} (R = 0,45 m^{2}K/W; TR = 0,70)									
Zmienna x_i	**optymalizacja**		x_{1-4} (jak w A)	**optymalizacja**		x_{1-4} (jak w A)	**optymalizacja**		x_{1-4} (jak w A)
	A	**B**	**C**	**A**	**B**	**C**	**A**	**B**	**C**
x_1 (r_1)	0,135	0,135	0,135	0,6*	0,6*	0,6*	0,6*	0,6*	0,6*
x_2 (r_2)	0,135	0,135	0,135	0,28*	0,135	0,28*	0,28*	0,135	0,28*
x_3 (r_3)	0,135	0,135	0,135	0,28*	0,135	0,28*	0,135	0,135	0,135
x_4 (r_4)	0,135	0,135	0,135	0,28*	0,135	0,28*	0,28	0,135	0,28*
x_5 (R_s)	3,33	3,33	3,33	10,0*	10,0*	10,0*	9,4*	6,8	9,4*
Okna w_{22} (R = 0,77 m^{2}K/W; TR = 0,50)									
Zmienna x_i	**optymalizacja**		x_{1-4} (jak w A)	**optymalizacja**		x_{1-4} (jak w A)	**optymalizacja**		x_{1-4} (jak w A)
	A	**B**	**C**	**A**	**B**	**C**	**A**	**B**	**C**
x_1 (r_1)	0,135	0,135	0,135	0,6*	0,6*	0,6*	0,6*	0,5	0,6*
x_2 (r_2)	0,135	0,135	0,135	0,28*	0,28*	0,28*	0,188	0,135	0,188
x_3 (r_3)	0,135	0,135	0,135	0,28*	0,135	0,28*	0,135	0,135	0,135
x_4 (r_4)	0,135	0,135	0,135	0,28*	0,28*	0,28*	0,28*	0,135	0,28*
x_5 (R_s)	3,33	3,33	3,33	10,0*	10,0*	10,0*	8,0	9,2*	8,0

$\underline{x}$ – dolna granica x* – górna granica

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ



Rys. 3. Bilans strat i zysków słonecznych przez okna rozdzielonych na noc i dzień dla w_{21}
Fig. 3. Balance of loss and gain from windows (night and day) for w_{21}



Rys. 4. Porównanie wartości funcji energii i kosztów dla okien w_{21} i w_{22} ze względu na minimum funkcji F_1, F_2 oraz min. (F_1; F_2) dla zadań A, B i C
Fig. 4. Comparison values functions: energy and costs to windows w_{21} and w_{22} (min. F_1, min. F_2 min. (F_1; F_2)) for windows witchout and witch shutter (tasks: A B C)

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ

Tabela 9

Ocena zmiany wskaźnika *E*

	Okna w_{21} (R = 0,45 m^{2}K/W; TR = 0,70)								
	min. F_1			**min. F_2**			**min. F_1F_2**		
	A	**B**	**C**	**A**	**B**	**C**	**A**	**B**	**C**
E [kWh/a]	18,7	23,3	23,3	5,8	16,5	18,3	6,2	17,5	17,5
	80%	100%	100%	32%	90%	100%	35%	100%	100%
	Okna w_{22} (R = 0,77 m^{2}K/W; TR = 0,50)								
	A	**B**	**C**	**A**	**B**	**C**	**A**	**B**	**C**
E [kWh/a]	19,4	21,8	21,8	8,5	14,5	14,9	9,6	15	15
	89%	100%	100%	57%	97%	100%	64%	100%	100%

6. Uwagi końcowe

1. Zastosowanie rolet daje istotne zmniejszenie sezonowego zapotrzebowania na energię do ogrzewania. Dla standardowego budynku energooszczędnego (min. K_1) 20% oszczędność energii uzyskać można za 6% wzrost kosztu izolacji przegród zewnętrznych (tab. 9), uzyskując wskaźnik zapotrzebowania na energię na poziomie E = 18,7 kWh/m^{3}a. Dla budynku niskoenergetycznego (min. K_2) za 12% wzrost kosztu izolacji przegród zewnętrznych można uzyskać 68% oszczędność energii (tab. 9) przy wskaźniku zapotrzebowania na energię E = 5,8 kWh/m^{3}a.
2. Z zastosowaniem rolet można, biorąc pod uwagę zużycie energii, praktycznie dowolnie projektować wielkość (dostosowując ją do potrzeb wynikających z formy i funkcji budynku). Zwiększanie powierzchni okien na elewacjach południowej, wschodniej i zachodniej zmniejsza zapotrzebowanie na energię do ogrzewania.
3. Przy wyborze typu przeszklenia decydujące znaczenie ma przepuszczalność promieniowania słonecznego. Dlatego też najkorzystniejsze wyniki uzyskano dla okien standardowych.

Literatura

[1] Fedorczak-Cisak M., *Ocena energetyczna budynków z wykorzystaniem optymalizacji wielokryterialnej i wielopoziomowej*, rozprawa doktorska, 2007.

[2] Stachowicz A., Fedorczak-Cisak M., *Efektywne bierne wykorzystanie energii słonecznej w jednorodzinnym budownictwie mieszkaniowym jako problem optymalizacji wielokryterialnej*, II Konferencja SOLINA 2008, Energia odnawialna.

[3] PN-B-02025:2001 Obliczanie sezonowego zapotrzebowania na ciepło do ogrzewania budynków mieszkalnych i zamieszkania zbiorowego.

[4] Osyczka A., *Computer Aided Multicriterion Optimization System* (*CAMOS*), International Software Publisher, Kraków 1992.

BIBLIOTEKA CYFROWA POLITECHNIKI KRAKOWSKIEJ