

OGRANICZENIE ZAPOTRZEBOWANIA ENERGII ZWIĄZANEJ Z EKSPLOATACJĄ JEDNORODZINNYCH BUDYNKÓW MIESZKALNYCH JAKO PROBLEM OPTYMALIZACJI WIELOKRYTERIALNEJ

Antoni STACHOWICZ ¹, Małgorzata FEDORCZAK-CISAK ²

STRESZCZENIE

W pracy sformułowano problem minimalizacji zapotrzebowania na energię konieczną do ogrzewania i chłodzenia jednorodzinnych budynków mieszkalnych. Zadanie sformułowano jako problem optymalizacji wielokryterialnej i wielopoziomowej. Rozpatrywany jest budynek o podstawie prostokątnej. Kryteria optymalizacji to: minimum zapotrzebowania na energię do ogrzewania i minimum zapotrzebowania na energię do chłodzenia. Zmienne decyzyjne to: izolacyjność termiczna przegród zewnętrznych pełnych oraz okien, stopień przeszklenia poszczególnych ścian, proporcje wymiarów podstawy (przy stałej powierzchni rzutu $A_p = 169 \text{ m}^2$).

WPROWADZENIE

Problemy ograniczenia zapotrzebowania na energię do eksploatacji budynków mieszkalnych, w naszej strefie klimatycznej, najczęściej formułowane są jako problemy ograniczenia zapotrzebowania na energię do ogrzewania pomieszczeń w okresie grzewczym. Jest to uzasadnione zarówno tym, że w okresie zimowym ogrzewanie jest niezbędne dla egzystencji mieszkańców, jak i tym, że zużycie energii na ten cel stanowi dominujący składnik całkowitego zużycia energii związanego z eksploatacją budynku.

Poprawa izolacyjności termicznej przegród zewnętrznych, zarówno ścian, stropów jak i okien, wprowadzenie wentylacji mechanicznej z zastosowaniem rekuperatora i podgrzewania powietrza za jego czerpnięą, (rozwiązania stosowane w budynkach niskoenergetycznych), prowadzą do istotnego zmniejszenia zapotrzebowania na energię do ogrzewania. Powoduje to dużą zmianę w ilości zużywanej energii i w proporcjach pomiędzy składnikami tego zużycia. Równocześnie powiększanie powierzchni okien na ścianie południowej, a często też na ścianach wschodniej i zachodniej, dla zwiększenia efektywnego wykorzystania promieniowania słonecznego w bilansie energetycznym budynku w okresie grzewczym powoduje, że coraz większego znaczenia nabiera problem przegrzewania pomieszczeń w okresie letnim i ich chłodzenia w celu zapewnienia odpowiedniego komfortu mieszkań. Ponieważ postulaty zmniejszenia energii na ogrzewanie oraz na chłodzenie prowadzą do różnych rozwiązań projektowych koniecznym może się okazać poszukiwanie rozwiązania kompromisowego.

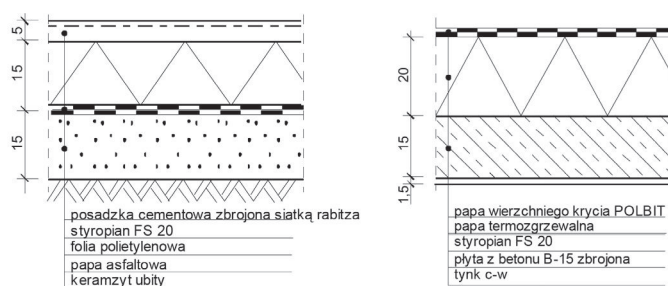
Dla oceny wagi tego problemu sformułowano zadanie optymalizacji dwukryterialnej i dwupoziomowej.

2. OGÓLNE SFORMUŁOWANIE PROBLEMU OPTYMALIZACJI

2.1. ZAŁOŻENIA

Przedmiotem analizy jest budynek parterowy o rzucie prostokątnym, o orientacji osi S-N. Powierzchnia rzutu podstawy budynku wynosi 169 m^2 , wysokość kondygnacji – 3 m .

Warstwa konstrukcyjna ścian zewnętrznych to cegła silikatowa o grubości 25 cm . Ściany ocieplone są styropianem, którego grubość jest wyznaczana w zadaniach optymalizacyjnych. Współczynnik przenikania ciepła U dla podłogi na gruncie wynosi $0,19 \text{ [W/m}^2\text{K]}$. Warstwy stropodachu pełnego przedstawiono na rys.1.



Rys.1. Warstwy stropodachu pełnego i podłogi na gruncie.

Obliczenia bilansu energetycznego dla budynku wykonano w oparciu o normową metodę „dokładną” [1]. Wartości promieniowania słonecznego na płaszczyzny pionowe przyjęto na podstawie normowych średnich sum promieniowania dla Warszawy [1]. Straty ciepła na podgrzanie powietrza wentylacyjnego, zyski bytowe przyjęto wg [1].

Antoni STACHOWICZ ¹, Małgorzata FEDORCZAK-CISAK ²

^{1), 2)} Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika, Kraków
e-mail: mporanna@wp.pl

2.2 ZMIENNE DECYZYJNE

- Dyskretna zmienna decyzyjne v_i - typ okna
- Ciągłe zmienne decyzyjne u_i

Tablica 1 Zbiór zmiennych decyzyjnych ciągłych

| | |
|----------|--|
| u_{1i} | współczynnik przeszklenia ścian zewnętrznych ($i = 1,2,3,4$) |
| u_2 | opór cieplny ścian zewnętrznych |
| u_3 | współczynnik kształtu podstawy budynku |
| u_4 | opór cieplny ścian zewnętrznych |

2.3 ZBIÓR OGRANICZEŃ G

Wszystkie wartości zmiennej dyskretnej \mathbf{v} są wartościami dopuszczalnymi.

Natomiast na wszystkie zmienne decyzyjne ciągłe zostały nałożone ograniczenia. Zbiór \mathbf{G} obejmuje:

- $g_{1i} = \{g_{1i \min}, g_{1i \max}\}$ – ograniczenia wartości współczynnika przeszklenia przegrody, (1)
- $g_2 = \{g_{2 \min}, g_{2 \max}\}$ – ograniczenia wartości oporu cieplnego ściany zewnętrznej.
- $g_3 = \{g_{3 \min}, g_{3 \max}\}$ – ograniczenia wartości współczynnika kształtu.
- $g_4 = \{g_{4 \min}, g_{4 \max}\}$ – ograniczenia wartości oporu cieplnego stropodachu.

2.4. KRYTERIA OPTIMALIZACJI F_i

Zadanie optymalizacyjne sformułowano z uwagi na dwa kryteria :

- F_1 minimum energii do ogrzewania w sezonie zimowym,
- F_2 minimum energii do chłodzenia. w sezonie letnim.

2.5. Zadanie optymalizacji dwupoziomowej i dwukryterialnej.

Zadanie optymalizacji zapisać można:

$$F_i(\mathbf{v}^*, \mathbf{u}^*) = \min_{\mathbf{v} \in \mathbf{V}} F_i [\min_{\mathbf{u} \in \mathbf{U}} F_i(\mathbf{v}, \mathbf{u}^*)] \quad (2)$$

gdzie: \mathbf{V} – zbiór wartości zmiennej dyskretnej,

\mathbf{U} - zbiór dopuszczalnych wartości zmiennych ciągłych.

Zadania poziomu optymalizacji to zadania programowania nieliniowego z ograniczeniami. Rozwiązywano je wykorzystując program CAMOS [2]. Zadania optymalizacji jednokryterialnej wyznaczano za pomocą metody kombinowanej: metody losowej i zmiennych tolerancji. Rozwiązania preferowane są rozwiązaniami w sensie Pareto. Do rozwiązania tych zadań przyjęto metodę kryterium globalnego.

3. ZADANIA POZIOMU OPTIMALIZACJI

3.1. FUNKCJE CELU

F_1 – Zapotrzebowanie na energię do ogrzewania w sezonie grzewczym [kWh/a_g]

$$F_1(\mathbf{u}, \mathbf{v}) = Q_s + Q_d + Q_p + Q_o + Q_v - \eta(Q_{zo} + Q_{zb}) \quad (3)$$

gdzie:

- Q_s – straty ciepła przez ściany zewnętrzne [kWh/a_g],
- Q_d – straty ciepła przez stropodach [kWh/a_g],
- Q_p – straty ciepła przez podłogę na gruncie [kWh/a_g],
- Q_o – straty ciepła przez przegrody przezroczyste [kWh/a_g],
- Q_v – straty ciepła na podgrzanie powietrza wentylacyjnego [kWh/a_g],
- Q_{zo} – słoneczne zyski cieplne przez okna [kWh/a_g],
- Q_{zb} – bytowe zyski cieplne [kWh/a_g].

F_2 – Zapotrzebowanie na energię do chłodzenia w sezonie letnim [kWh/a_{ch}]

$$F_2(\mathbf{u}, \mathbf{v}) = -(Q_s + Q_d + Q_p + Q_o + Q_v - \eta(Q_{zo} + Q_{zb})) \quad (4)$$

opis j.w.

3.2. Wartości zmiennej dyskretnej v_i

Tablica 2. Parametry cieplne okien oraz współczynnik TR.

| v_i | Opis okna: | Opór cieplny okna R_0 | współczynnik przepuszczania promieniowania słonecznego TR |
|-------|--|-----------------------------------|---|
| | | [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$] | [-] |
| v_1 | - podwójne | 0,45 | 0,70 |
| v_2 | - potrójne z szyba zespoloną jednokomorową z jedną powłoką niskoemisyjną | 0,55 | 0,64 |
| v_3 | - specjalne | 0,77 | 0,50 |
| v_4 | - Thermo ^{PLUS} | 1,08 | 0,42 |

3.3. OGRANICZENIA DLA ZMIENNYCH CIĄGŁYCH

Wartości dolnych ograniczeń dla zmiennych u_2 i u_4 odpowiadają aktualnym warunkom normatywnym dla izolacyjności przegród zewnętrznych. Wartości górnych ograniczeń oporów cieplnych przegród odpowiadają rozwiązaniom stosowanym w budynkach pasywnych. Dla pozostałych zmiennych ograniczenia przyjęto z uwagi na funkcje użytkowe. Wartości ograniczeń podano w Tabl 3, 4

Tablica 3. Ograniczenia na współczynnik przeszklenia r_i (u_{1i}) [-].

| g_{1i} [-] | | |
|--------------|----------------|----------------|
| $g_{1,1}$ | $g_{1,1 \min}$ | $g_{1,1 \max}$ |
| $g_{1,1}$ | 0,30 | 0,60 |
| $g_{1,2}$ | 0,20 | 0,30 |
| $g_{1,3}$ | 0,10 | 0,20 |
| $g_{1,4}$ | 0,20 | 0,30 |

Tablica 4. Ograniczenia dla zmiennych u_1, u_2, u_3 .

| g_2 [m^2K/W] | | g_3 [-] | | g_4 [m^2K/W] | |
|--------------------|--------------|--------------|--------------|--------------------|--------------|
| $g_{2\ min}$ | $g_{2\ max}$ | $g_{3\ min}$ | $g_{3\ max}$ | $g_{4\ min}$ | $g_{4\ max}$ |
| 3,33 | 10,00 | 1,00 | 1,414 | 3,33 | 10,00 |

4. Wyniki rozwiązań poziomu optymalizacji (dla ustalonych wartości zmiennej v_i)

Tablica 5. Wyniki dla zmiennej dyskretnej v_1

| | min F1 [kWh/a] | | min F2 [kWh/a] | | min (F1F2) [kWh/a] | |
|-------------------|----------------|-------------|----------------|-------------|--------------------|--------------------|
| Fukcje celu | | | | | | |
| F1 | 10220 | | 14970 | | 10186 | |
| F2 | 5528 | | 4518 | | 5078 | |
| Zmienne decyzyjne | | | | | | |
| r1 | 0,3 | x_{11min} | 0,3 | x_{11min} | 0,3 | x_{11min} |
| r2 | 0,2 | x_{12min} | 0,2 | x_{12min} | 0,2 | x_{12min} |
| r3 | 0,1 | x_{13min} | 0,1 | x_{13min} | 0,1 | x_{13min} |
| r4 | 0,2 | x_{14min} | 0,2 | x_{14min} | 0,2 | x_{14min} |
| Rs | 10 | x_{2max} | 33,3 | x_{2min} | 9,5 | $\approx x_{2max}$ |
| ξ | 1,20 | | 1,0 | x_{3min} | 1,0 | x_{3min} |
| Rd | 10 | x_{4max} | 3,33 | x_{4min} | 9,8 | $\approx x_{4max}$ |

Tablica 6. Wyniki dla zmiennej dyskretnej v_2

| | min F1 [kWh/a] | | min F2 [kWh/a] | | min (F1F2) [kWh/a] | |
|-------------------|----------------|-------------|----------------|-------------|--------------------|--------------------|
| Fukcje celu | | | | | | |
| F1 | 9279 | | 14171 | | 9423 | |
| F2 | 7195 | | 4165 | | 4729 | |
| Zmienne decyzyjne | | | | | | |
| r1 | 0,6 | x_{11max} | 0,3 | x_{11min} | 0,3 | x_{11min} |
| r2 | 0,2 | x_{12min} | 0,2 | x_{12min} | 0,2 | x_{12min} |
| r3 | 0,1 | x_{13min} | 0,1 | x_{13min} | 0,1 | x_{13min} |
| r4 | 0,2 | x_{14min} | 0,2 | x_{14min} | 0,2 | x_{14min} |
| Rs | 10 | x_{2max} | 3,33 | x_{2min} | 9,4 | $\approx x_{2max}$ |
| ξ | 1,25 | | 1,00 | x_{3min} | 1,1 | |
| Rd | 10 | x_{4max} | 3,33 | x_{4min} | 9,9 | $\approx x_{4max}$ |

Tablica 7. Wyniki dla zmiennej dyskretnej v_3

| | min F1 [kWh/a] | | min F2 [kWh/a] | | min (F1F2) [kWh/a] | |
|-------------------|----------------|-------------|----------------|-------------|--------------------|--------------------|
| Fukcje celu | | | | | | |
| F1 | 8499 | | 13633 | | 8840 | |
| F2 | 5886 | | 3188 | | 3756 | |
| Zmienne decyzyjne | | | | | | |
| r1 | 0,6 | x_{11max} | 0,3 | x_{11min} | 0,3 | x_{11min} |
| r2 | 0,2 | x_{12min} | 0,2 | x_{12min} | 0,2 | x_{12min} |
| r3 | 0,1 | x_{13min} | 0,1 | x_{13min} | 0,1 | x_{13min} |
| r4 | 0,2 | x_{14min} | 0,2 | x_{14min} | 0,2 | x_{14min} |
| Rs | 10 | x_{2max} | 3,33 | x_{2min} | 9,3 | $\approx x_{2max}$ |
| ξ | 1,35 | x_{3max} | 1,00 | x_{3min} | 1,1 | |
| Rd | 10 | x_{4max} | 3,33 | x_{4min} | 9,8 | $\approx x_{4max}$ |

Tablica 8. Wyniki dla zmiennej dyskretnej v_4

| | min F1 [kWh/a] | | min F2 [kWh/a] | | min (F1F2) [kWh/a] | |
|-------------------|----------------|-------------|----------------|-------------|--------------------|--------------------|
| Fukcje celu | | | | | | |
| F1 | 7716 | | 11871 | | 8264 | |
| F2 | 5230 | | 2840 | | 3230 | |
| Zmienne decyzyjne | | | | | | |
| r1 | 0,6 | x_{11max} | 0,3 | x_{11min} | 0,3 | x_{11min} |
| r2 | 0,2 | x_{12min} | 0,2 | x_{12min} | 0,2 | x_{12min} |
| r3 | 0,1 | x_{13min} | 0,1 | x_{13min} | 0,1 | x_{13min} |
| r4 | 0,2 | x_{14min} | 0,2 | x_{14min} | 0,2 | x_{14min} |
| Rs | 10 | x_{2max} | 3,33 | x_{2min} | 9,6 | $\approx x_{2max}$ |
| ξ | 1,414 | x_{3max} | 1,00 | x_{3min} | 1,1 | x_{3min} |
| Rd | 10 | x_{4max} | 3,33 | x_{4min} | 9,9 | $\approx x_{4max}$ |

5. WARTOŚCI DLA ZMIENNEJ v_2 PRZY TEMPERATURZE WEWNĘTRZNEJ $24^\circ C$

Tablica 9. Wyniki dla zmiennej dyskretnej v_4 dla temperatury wewnętrznej $24^\circ C$

| | min F1 [kWh/a] | | min F2 [kWh/a] | | min (F1F2) [kWh/a] | |
|-------------------|----------------|-------------|----------------|-------------|--------------------|--------------------|
| Fukcje celu | | | | | | |
| F1 | 8499 | | 13633 | | 8840 | |
| F2 | 5886 | | 3188 | | 3756 | |
| Zmienne decyzyjne | | | | | | |
| r1 | 0,6 | x_{11max} | 0,3 | x_{11min} | 0,3 | x_{11min} |
| r2 | 0,2 | x_{12min} | 0,2 | x_{12min} | 0,2 | x_{12min} |
| r3 | 0,1 | x_{13min} | 0,1 | x_{13min} | 0,1 | x_{13min} |
| r4 | 0,2 | x_{14min} | 0,2 | x_{14min} | 0,2 | x_{14min} |
| Rs | 10 | x_{2max} | 3,33 | x_{2min} | 5,5 | $\approx x_{2max}$ |
| ξ | 1,30 | | 1,00 | x_{3min} | 1,1 | |
| Rd | 10 | x_{4max} | 3,33 | x_{4min} | 4,3 | $\approx x_{4max}$ |

6. Poziom koordynacji

Tablica 10. Porównanie wyników w zbiorze wartości zmiennej v

| | min F1 [kWh/a] | min F2 [kWh/a] | min (F1F2) [kWh/a] |
|-------------|-------------------|-------------------|-----------------------|
| v_1 | | | |
| F_1 | 10220 | 14970 | 10186 |
| F_2 | 5528 | 4518 | 5078 |
| $F_1 + F_2$ | 15748,0 | 19488,0 | 15264,0 |
| v_2 | | | |
| F_1 | 9279 | 14171 | 9423 |
| F_2 | 7195 | 4165 | 4729 |
| $F_1 + F_2$ | 16474,0 | 18336,0 | 14152,0 |
| v_3 | | | |
| F_1 | 8499 | 13633 | 8840 |
| F_2 | 5886 | 3188 | 3756 |
| $F_1 + F_2$ | 14385,0 | 16821,0 | 12596,0 |
| v_3 | | | |
| F_1 | 7716 | 11871 | 8264 |
| F_2 | 5230 | 2840 | 3230 |
| $F_1 + F_2$ | 12946,0 | 14711,0 | 11494,0 |

4. UWAGI KOŃCOWE

1^o Przedstawione wyniki potwierdzają, że problem ewentualnego przegrzewania budynków w okresie letnim powinien być przedmiotem analizy na etapie projektowania budynków.

Nadmiar energii cieplnej w okresie letnim może osiągać nawet 70% energii niezbędnej do ogrzewania.

2^o Bardziej efektywnym okazuje się optymalizacja przegród zewnętrznych z uwagi na minimalizowanie energii na ogrzewanie aniżeli na minimalizowanie przegrzewania budynku (Por. sumy energii w tablicy 10).

3^o Problem nadmiaru energii w okresie letnim wiąże się także z określeniem dopuszczalnej temperatury pomieszczeń. Jeżeli przyjmiemy za taką temperaturę 24°C to z wyżej wspomnianych 79% nadmiar energii spada do ~47% (tablica 9).

5^o Należy także podkreślić, że w przypadku domów jednorodzinnych istnieją możliwości „bezenergetycznego” zmniejszenia w lecie przegrzewania pomieszczeń. Można tu wymienić najprostsze rozwiązania takie jak powiększenie okapu (zasłona pozioma), czy posadzenie drzew liściastych przy elewacji południowej i zachodniej (zasłona pionowa).

Bibliografia

1. PN-B-02025:2001 Obliczanie sezonowego zapotrzebowania na ciepło do ogrzewania budynków mieszkalnych i zamieszkania zbiorowego.
2. Osyczka A., „Computer Aided Multicriterion Optimization System (CAMOS)”. International Software Publisher, Kraków, 1992