

Modelowanie ogrzewania

Analiza strategii sterowania ogrzewaniem (tryb ciągły vs. oszczędny)

Alicja Markiewicz, 338220

15 lutego 2026

Spis treści

1	Charakterystyka problemu	2
1.1	Cel projektu	2
1.2	Badane strategie sterowania	2
1.3	Metryki oceny	2
2	Model fizyczny	2
2.1	Równanie przewodnictwa ciepła	2
2.2	Warunki brzegowe	3
2.3	Model grzejnika i termostatu	3
3	Metody numeryczne	3
3.1	Dyskretyzacja	3
3.2	Analiza stabilności	3
3.3	Parametry symulacji	3
4	Wyniki symulacji	4
4.1	Scenariusz 1: Chłodno (Jesień/Wiosna)	4
4.2	Scenariusz 2: Zimno (Zima łagodna)	4
4.3	Scenariusz 3: Bardzo zimno (Zima mroźna)	5
5	Analiza wyników	6
5.1	Tabela wyników	6
5.2	Wnioski z tabeli	7

1 Charakterystyka problemu

1.1 Cel projektu

Celem projektu jest odpowiedź na pytanie: **czy okresowe wyłączanie grzejników w godzinach nieobecności domowników przynosi wymierne korzyści energetyczne** oraz jak wpływa to na komfort cieplny (czas powrotu do temperatury zadanej).

1.2 Badane strategie sterowania

W symulacji porównałam dwa scenariusze ogrzewania dla tego samego mieszkania:

1. **Strategia ciągła (komfort):** Temperatura zadana $T_{set} = 21^\circ\text{C}$ jest utrzymywana przez całą dobę.
2. **Strategia oszczędna (na wyjście):**
 - W godzinach **08:00 – 16:00** (nieobecność): obniżenie temperatury zadanej do $T_{away} = 15^\circ\text{C}$ (lub całkowite wyłączenie grzejników).
 - W pozostałych godzinach: utrzymywanie temperatury komfortowej $T_{home} = 21^\circ\text{C}$.

1.3 Metryki oceny

Do oceny skuteczności obu strategii przyjęłam następujące wskaźniki:

- **Całkowite zużycie energii** (E_{total} [kWh]) – suma energii wyemitowanej przez wszystkie grzejniki w ciągu doby.
- **Średnia temperatura w mieszkaniu** ($\bar{T}(t)$) – wskaźnik ogólnego komfortu cieplnego.
- **Czas powrotu do komfortu** – czas liczony od godziny 16:00, po którym średnia temperatura w pokojach ponownie osiąga 21°C .

2 Model fizyczny

2.1 Równanie przewodnictwa ciepła

Ewolucję temperatury $u(x, t)$ opisuje równanie dyfuzji z członem źródłowym:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \alpha \Delta u + f(x, u), \quad (1)$$

gdzie $f(x, u)$ reprezentuje ciepło dostarczane przez grzejniki.

W instrukcji projektowej (Wzór 7) zaproponowano model uwzględniający zmianę gęstości powietrza w zależności od temperatury (z prawa gazu doskonałego), co prowadzi do postaci nieliniowej:

$$f_{teor}(x, u) = u \cdot \frac{P \cdot r}{p \cdot V \cdot c} \cdot \mathbf{1}_{grzejnik}. \quad (2)$$

W niniejszej symulacji zastosowano jednak **przybliżenie stałej gęstości powietrza** (zgodne z Wzorem 5 w instrukcji). Dla zakresu temperatur mieszkaniowych ($15^\circ\text{C} – 25^\circ\text{C}$) zmiana gęstości jest pomijalna, a uproszczenie to pozwala na bezpośrednie zastosowanie bilansu energii:

$$f_{sym}(x) = \frac{P}{\rho \cdot c_p \cdot V} \cdot \mathbf{1}_{pokj}. \quad (3)$$

Podejście to jest zgodne z zasadą zachowania energii i stabilniejsze numerycznie.

2.2 Warunki brzegowe

Symulacja uwzględnia specyfikę geometryczną mieszkania o powierzchni 80 m^2 ($10 \text{ m} \times 8 \text{ m}$):

- **Okna i drzwi balkonowe:** Warunek Dirichleta. Temperatura na powierzchni okna jest równa temperaturze zewnętrznej $T_{zew}(t)$.
- **Ściany zewnętrzne:** Warunek Robina (prawo stygnięcia Newtona). Strumień ciepła jest proporcjonalny do różnicy temperatur (współczynnik strat $\beta_{wall} = 0.08$).
- **Ściany wewnętrzne:** Przyjęto, że ściany działowe nie generują strat ciepła (sąsiedzi ogrzewają swoje mieszkania podobnie), co modelowane jest brakiem przepływu (warunek Neumann'a).

2.3 Model grzejnika i termostatu

Grzejniki działają w modelu uproszczonym (well-mixed). Jeśli średnia temperatura w danym pokoju spadnie poniżej T_{set} , grzejnik dostarcza moc $P_{max} = 2000 \text{ W}$, która jest natychmiastowo rozpraszana w objętości pokoju.

3 Metody numeryczne

3.1 Dyskretyzacja

Zastosowałam metodę różnic skończonych (FDM) na siatce regularnej o wymiarach 50×40 węzłów.

- Krok przestrzenny: $h = \Delta x = \Delta y = 0.2 \text{ m}$.
- Krok czasowy: $\Delta t = 30 \text{ s}$.

Do całkowania w czasie użyłam jawnego schematu Eulera (FTCS).

3.2 Analiza stabilności

Dla jawnego schematu różnicowego warunkiem stabilności jest liczba Couranta-Friedrichsa-Lewy'ego (CFL): $\lambda \leq 0.25$. Dla przyjętych parametrów:

$$\lambda = \frac{\alpha \Delta t}{h^2} = \frac{1.0 \cdot 10^{-4} \cdot 30}{0.2^2} = \frac{0.003}{0.04} = 0.075$$

Wartość 0.075 jest znacznie mniejsza od wartości granicznej 0.25, co gwarantuje numeryczną stabilność symulacji.

3.3 Parametry symulacji

Zestawienie stałych fizycznych i parametrów technicznych użytych w kodzie:

Tabela 1: Parametry modelu (na podstawie pliku `constants.py`)

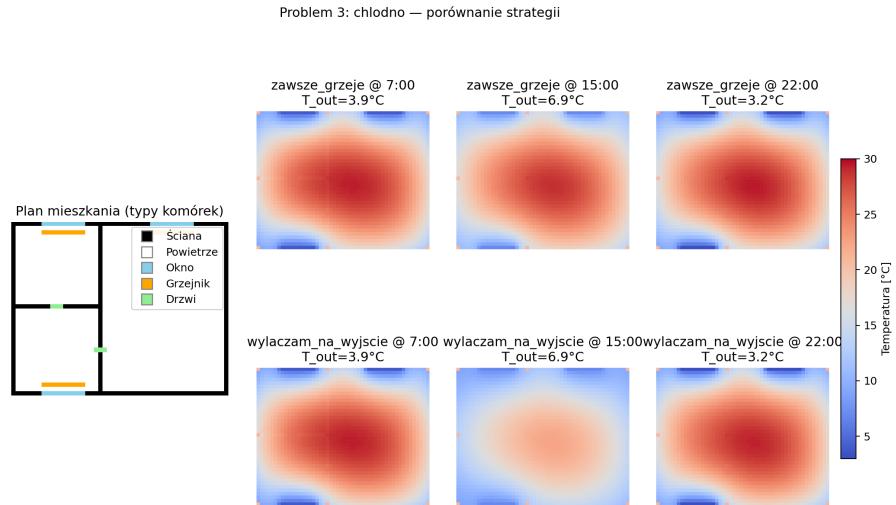
Symbol	Nazwa parametru	Wartość	Jednostka
α	Dyfuzyjność cieplna	0.0001	m^2/s
P_{max}	Moc grzejnika	2000	W
ρ	Gęstość powietrza	1.293	kg/m^3
c_p	Ciepło właściwe	1005	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
H	Wysokość pomieszczenia	2.5	m
h	Krok siatki	0.2	m
Δt	Krok czasu	30	s

4 Wyniki symulacji

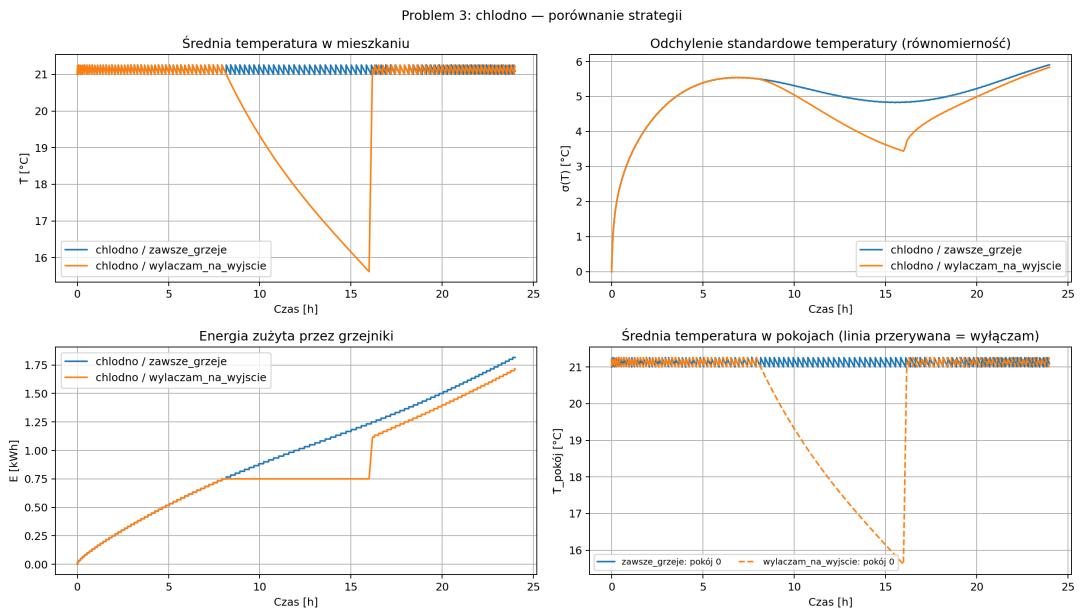
Symulacje przeprowadziłam dla trzech scenariuszy pogodowych, różniących się średnią temperaturą zewnętrzną.

4.1 Scenariusz 1: Chłodno (Jesień/Wiosna)

W tym scenariuszu temperatura zewnętrzna oscyluje wokół kilku stopni powyżej zera.



Rysunek 1: Rozkład temperatury w mieszkaniu dla profilu „chłodno”.

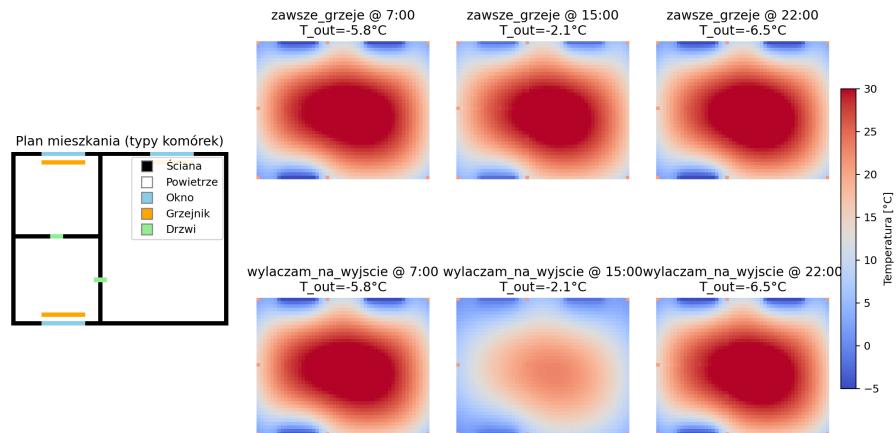


Rysunek 2: Przebiegi czasowe temperatury i energii dla profilu „chłodno”.

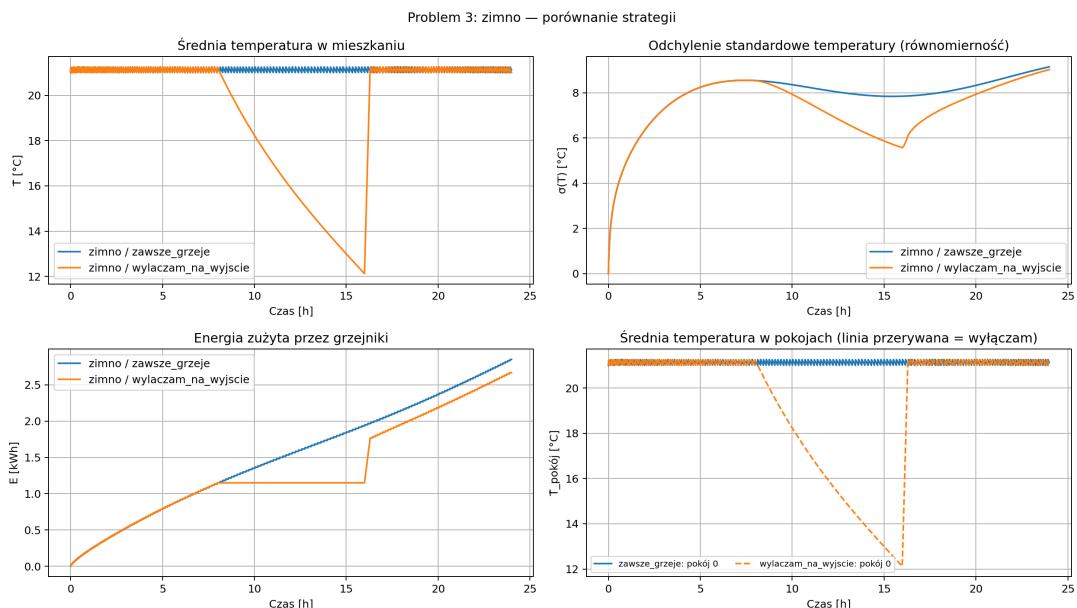
4.2 Scenariusz 2: Zimno (Zima łagodna)

Temperatura zewnętrzna spada poniżej zera w nocy.

Problem 3: zimno — porównanie strategii



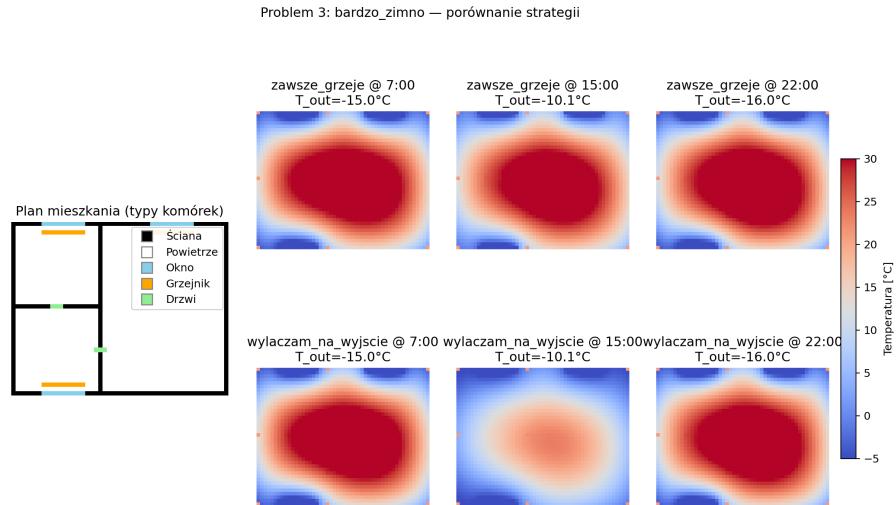
Rysunek 3: Rozkład temperatury w mieszkaniu dla profilu „zimno”.



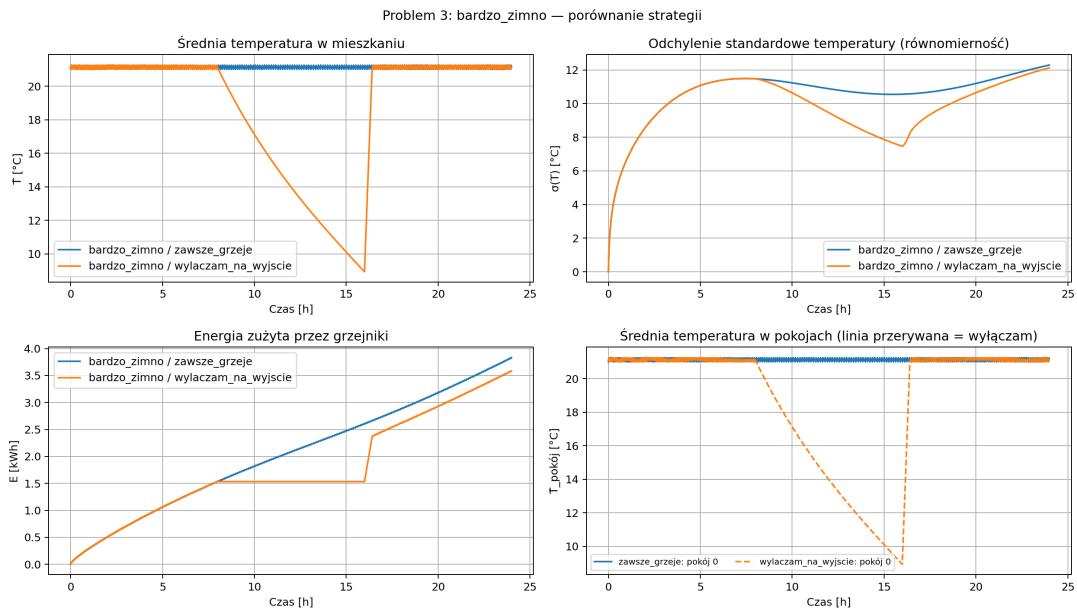
Rysunek 4: Przebiegi czasowe temperatury i energii dla profilu „zimno”.

4.3 Scenariusz 3: Bardzo zimno (Zima mroźna)

Ekstremalne warunki, temperatura zewnętrzna wynosi około -20°C .



Rysunek 5: Rozkład temperatury w mieszkaniu dla profilu „bardzo zimno”.



Rysunek 6: Przebiegi czasowe temperatury i energii dla profilu „bardzo zimno”.

5 Analiza wyników

5.1 Tabela wyników

Tabela 2 przedstawia całkowite dobowe zużycie energii (E_{total}) oraz czas powrotu do komfortu termicznego po godzinie 16:00, uzyskane z symulacji komputerowej.

Tabela 2: Zestawienie zużycia energii i komfortu dla trzech scenariuszy pogodowych

Scenariusz (Pogoda)	Energia (Ciągła)	Energia (Oszczędna)	Oszczędność (%)	Czas powrotu (do 21°C)
Chłodno	1.82	1.72	5.5	0.17 h (ok. 10 min)
Zimno	2.85	2.67	6.3	0.29 h (ok. 17 min)
Bardzo zimno	3.83	3.58	6.5	0.40 h (ok. 24 min)

5.2 Wnioski z tabeli

Analiza danych liczbowych prowadzi do następujących wniosków:

- Stabilny zysk energetyczny – niezależnie od pogody, strategia wyłączania ogrzewania na czas nieobecności (8:00–16:00) przynosi stałą oszczędność energii na poziomie ok. 6%.
- Wysoki komfort – system grzewczy jest bardzo wydajny. Nawet w scenariuszu „Bardzo zimno”, powrót do temperatury komfortowej zajmuje tylko 24 minuty (0.40 h). Oznacza to, że strategia oszczędna nie wpływa negatywnie na odczuwalny komfort domowników po powrocie z pracy.
- Rekomendacja – biorąc pod uwagę szybki czas dogrzewania i wymierne oszczędności, zaleca się stosowanie strategii oszczędnej (wyłączania grzejników) w każdym badanym wariancie pogodowym.

Nota o użyciu narzędzi

AI pomagało mi przy uporządkowaniu struktury tegoż (i poprawieniu słownictwa) dokumentu, jak i plików w projekcie.