

*Mariusz Cwiężek*

## **AUDYT ENERGETYCZNY WYBRANEGO OBSZARU MIASTA – METODA BILANSOWANIA POTRZEB CIEPLNYCH ORAZ WYZNACZANIA EFEKTÓW ENERGETYCZNYCH I EKOLOGICZNYCH WYNIKAJĄCYCH Z TERMOMODERNIZACJI**

### **Streszczenie**

Istnieje konflikt interesów między producentami i dostawcami energii, którzy dążą do ustalenia cen energii odpowiadających kosztom wytwarzania a konsumentami, którzy przeznaczają coraz większą część budżetu na zaopatrzenie w energię. Wzajemne relacje powodują rozpowszechnianie się procesu racjonalizacji zużycia energii, którego podstawą jest termomodernizacja struktur budowlanych.

W artykule przedstawiono metodę bilansowania potrzeb ciepłych, wyznaczenia efektów energetycznych i ekologicznych, wynikających z termomodernizacji wybranego obszaru miasta. W zaproponowanej metodzie założono wykorzystanie opracowanych kart inwentaryzacyjnych dla każdego budynku wchodzącego w skład wybranego, analizowanego obszaru. Inwentaryzacja poszczególnego budynku polegała na zebraniu istotnych danych, niezbędnych do wykonania bilansu potrzeb ciepłych, określenia obmiaru wszystkich elementów konstrukcyjnych, stanowiących źródło strat ciepła i oszczędności energii oraz służących do przeprowadzenia optymalizacji wyboru usprawnień termomodernizacyjnych.

Według obliczeń różnica między obliczonym zapotrzebowaniem na moc cieplną w stosunku do metody szczegółowej (PN-B-03406 Ogrzewnictwo – Obliczanie zapotrzebowania na ciepło pomieszczeń o kubaturze do 600 m<sup>3</sup>) wynosiła 1,4%, natomiast sezonowe zapotrzebowanie na ciepło różniło się o 10,1%, co w kontekście wykorzystania wyników bilansu w audycie energetycznym obszaru miasta jest dokładnością wystarczającą. Ponadto, w artykule zawarto przykładową optymalizację wyboru wariantu polegającego na dociepleniu przegród zewnętrznych i wymianie stolarki okiennej oraz sumaryczne przedstawienie efektów energetycznych i ekologicznych w wyniku termomodernizacji.

Wykorzystanie przedstawionej metody pozwala na uzyskanie dokładnych kosztów inwestycyjnych, efektów energetycznych, ekologicznych i ekonomicznych, co w konsekwencji umożliwia uzyskanie informacji o opłacalności inwestycji termomodernizacyjnej, tak pojedynczego budynku, jak i grupy budynków, stanowiących analizowany obszar miasta/gminy.

### **Energy auditing for chosen area of town – method of balancing of heat demand and determination of energy and ecological effects resulting from thermomodernisation**

#### **Abstract**

A conflict business interests exists between energy producers and suppliers, who aims at establishing energy prices corresponding to costs of generation, and consumers, who are devoting still increasing part of budget for energy provisions. Common relations cause dissemination of process rationale of energy use which basis is a thermomodernisation of building structures.

In the paper the method of balancing heat demands and determination of energy and ecological effects resulting from thermomodernisation of chosen town area was presented. In the proposed method use of cataloguing cards developed for each building laying on the chosen considered area was assumed. The cataloguing for a particular building involved acquisition of significant data, necessary for completed balance of heat demands, performing quantity surveys of all elements of construction giving input to the

sources of heat dissipation and energy savings, and used to conducting optimisation of choices of thermomodernising improvements.

According to calculations, the difference between calculated demand for heat energy in relation to detailed method (PN-B-03406 Heating – Calculations of heat demand for rooms up to 600 m<sup>3</sup>.) was 1,4% and seasonal demand for heat differed on 10,1%. And it does mean a sufficient accuracy in context of using the balance results in energy auditing of town area. Furthermore, within the paper an example was included of optimisation of variant choice of additional warming of existing outer heat barriers and replacement of windows, as well as energy and ecological effects being result of this thermomodernisation were presented.

Making use of the presented method enables to obtain exact capital costs, energy, ecological and economical effects. And this, as a consequence, enables obtaining an information on profitability of thermomodernising investments both for the case of single building and also for the group of buildings forming the considered area of a town/commune.

## WPROWADZENIE

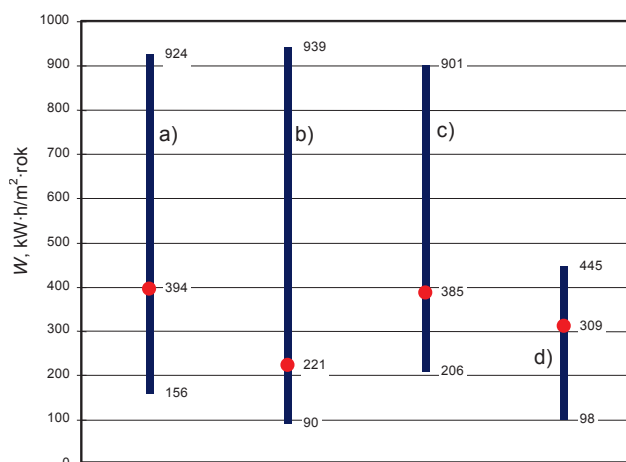
W metodach bilansowania zapotrzebowania na ciepło obszarów miast, tj. grup budynków stanowiących osiedle mieszkaniowe lub wybrany sektor miasta, grupy budynków użyteczności publicznej itp., są wykorzystywane informacje o kubaturze lub powierzchni ogrzewanej oraz wskaźnikach zapotrzebowania na energię, odpowiadających wiekowi budynków oraz standardowi ich wykonania. Podobnie metody szacowania efektów energetycznych, wynikających z procesu termomodernizacji danego obszaru miast/gmin, bazują na wykorzystywaniu wskaźników zapotrzebowania na moc i ciepło, odpowiadających wiekowi budynków. W stosowanych powszechnie metodach racjonalizacji zużycia energii, stan docelowy procesu termomodernizacji określa się na podstawie znajomości granicznych, kubaturowych wskaźników zużycia energii. W wynikach bilansu energetycznego, uzyskiwanych w sposób wskaźnikowy, nie uwzględnia się standardu i jakości wykonania przegród budowlanych, bez uwzględnienia zastosowanego zakresu termomodernizacji, a uzyskiwane tą drogą efekty energetyczne i w konsekwencji efekty ekologiczne, są uogólniane.

## 1. ANALIZA WSKAŹNIKÓW ZUŻYCIA ENERGII W BUDYNKACH

W celu zobrazowania różnic między szacunkowymi wskaźnikami zapotrzebowania na energię a wskaźnikami rzeczywistymi pochodzącymi z obliczeń, przeprowadzono analizę wyników audytów energetycznych 250 budynków, w tym budynków mieszkalnych jednorodzinnych, wielorodzinnych, budynków użyteczności publicznej (urzędów miast i gmin, starostw powiatowych i ośrodków zdrowia) oraz obiektów szkolnych (wolno stojących budynków szkół, przedszkoli, budynków szkolnych o rozbudowanej bryle).

Uzyskane rzeczywiste wskaźniki zużycia energii cieplnej pochodzą z audytów energetycznych wykonanych metodą szczegółową, zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Infrastruktury w sprawie szczegółowego zakresu i formy audytu energetycznego [6].

Analizę przeprowadzono dla budynków wybudowanych przed 1985 rokiem, dla których przeciętne, normatywne, roczne zużycie energii na ogrzewanie powinno wynosić od 240 do 380 kWh/m<sup>2</sup> ogrzewanej powierzchni użytkowej. Z rysunku 1 wynika, że w rzeczywistości istnieje jednak duża rozbieżność wskaźników zużycia energii w stosunku do wartości uśrednionych dla poszczególnych typów budynków.



**Rys. 1.** Wskaźniki rocznego zużycia energii cieplnej  $W$  dla różnego rodzaju budynków, wybudowanych przed 1985 rokiem: a – budynki mieszkalne jednorodzinne, b – budynki mieszkalne wielorodzinne, c – obiekty szkolne, d – budynki użyteczności publicznej, ● – wartość średnia

**Fig. 1.** Indicators of the year consumption of heat energy  $W$  for different kind of buildings, built before 1985: a – one-family dwelling buildings, b – multi-family dwelling buildings, c – school buildings, d – public buildings, ● – average value

Zastosowanie wskaźników zużycia energii umożliwia uzyskanie jedynie orientacyjnych wielkości zapotrzebowania na energię cieplną zespołu budynków i nie może stanowić podstawy do wyznaczania efektów energetycznych oraz analiz techniczno-ekonomicznych, dotyczących racjonalizacji zużycia energii.

## 2. INWENTARYZACJA TECHNICZNO-BUDOWLANA ZESPOŁU BUDYNKÓW

Sposób inwentaryzacji techniczno-budowlanej budynków, w proponowanej metodzie bilansowania potrzeb ciepłych, wyznaczania nakładów inwestycyjnych i wyznaczania efektów energetycznych i ekologicznych, wynikających z termomodernizacji zespołu budynków, polega na zebraniu istotnych danych dla każdego budynku, niezbędnych do:

- wykonania obliczeń sezonowego zapotrzebowania na energię cieplną,
- wyznaczenia obliczeniowej mocy cieplnej,
- wykonania obmiaru wszystkich elementów konstrukcyjnych budynku, stanowiących źródło strat ciepła i jednocześnie potencjał oszczędności energii.

W celu inwentaryzacji poszczególnych obiektów, składających się na analizowany obszar miasta, opracowano karty inwentaryzacyjne, które są przeznaczone dla pojedynczych budynków i skonstruowane w sposób umożliwiający ich wypełnienie przez zarządcę lub właściciela budynku.

### 3. METODA BILANSOWANIA POTRZEB CIEPLNYCH ZESPOŁU BUDYNKÓW

Bilans cieplny budynku w warunkach sezonu grzewczego obejmuje:

- straty ciepła spowodowane przenikaniem przez przegrody pełne,
- straty ciepła spowodowane przenikaniem przez przegrody szklone,
- zużycie ciepła na podgrzanie powietrza wentylacyjnego,
- straty ciepła spowodowane wypromieniowaniem z zewnętrznej powierzchni przegród,
- zyski ciepła wynikające z promieniowania słonecznego przez przegrody pełne,
- zyski ciepła wynikające z promieniowania słonecznego przez przegrody szklone,
- eksploatacyjne (bytowe) zyski ciepła (przygotowanie posiłków, zyski od ludzi, oświetlenia, napędów, zyski od ciepłej wody użytkowej),
- zyski ciepła spowodowane przez urządzenia grzewcze,
- akumulacja ciepła w przegrodach budynku i elementach jego wyposażenia.

Sezonowe zapotrzebowanie na ciepło do ogrzewania  $Q_h$  oblicza się jako różnicę strat ciepła oraz zysków ciepła spowodowanych słońcem i źródłami zewnętrznymi, z uwzględnieniem stopnia wykorzystania zysków ciepła

$$Q_h = \sum_m \dot{Q}_z + Q_w + Q_g + Q_a - \eta_z Q_{sw} + Q_i \quad (1)$$

gdzie:

- $m$  – numer kolejnego miesiąca w sezonie grzewczym,
- $Q_z$  – straty ciepła przez przegrody zewnętrzne, stykające się z powietrzem zewnętrznym, w  $m$ -tym miesiącu sezonu grzewczego,
- $Q_w$  – straty ciepła przez przegrody wewnętrzne, do pomieszczeń przyległych o różnej temperaturze wewnętrznej, w  $m$ -tym miesiącu sezonu grzewczego,
- $Q_g$  – straty ciepła przez podłogi do gruntu, w  $m$ -tym miesiącu sezonu grzewczego,
- $Q_a$  – zużycie ciepła na podgrzanie powietrza wentylacyjnego, w  $m$ -tym miesiącu sezonu grzewczego,
- $Q_{sw}$  – zyski ciepła słonecznego przez okna, w  $m$ -tym miesiącu sezonu grzewczego,
- $Q_i$  – wewnętrzne zyski ciepła, w  $m$ -tym miesiącu sezonu grzewczego,
- $\eta_z$  – współczynnik wykorzystania zysków.

We współczynniku wykorzystania zysków ciepła uwzględnia się akumulację ciepła i oblicza się go ze wzoru

$$\eta_z = 1 - e^{-\frac{1}{GLR}} \quad (2)$$

gdzie  $GLR$  – stosunek zysków do strat.

W proponowanej metodzie bilansowania potrzeb ciepłych zespołu budynków (wybranego obszaru miasta), wykorzystano sposób obliczania sezonowego zapotrzebowania na ciepło dla pojedynczego budynku w standardowym sezonie grzewczym, przy obliczeniowych wartościach temperatury powietrza wewnętrznego, według PN-82/B-02402, przy temperaturze obliczeniowej zewnętrznej, według PN-82/B-02403 i strumienia powietrza wentylacyjnego, według PN-83/B-03430.

W zastosowanej metodzie wykorzystuje się informacje zawarte w kartach inwentaryzacyjnych i opracowanie algorytmu obliczeniowego w celu wyznaczenia:

- strat ciepła spowodowanych przenikaniem przez ściany, stropy i stropodachy,
- strat ciepła spowodowanych przenikaniem przez okna i drzwi zewnętrzne,
- strat ciepła przez podłogi do gruntu,
- zapotrzebowania ciepła na podgrzanie powietrza wentylacyjnego,
- sezonowych zysków ciepła wynikających z promieniowania słonecznego i zysków bytowych.

Źródło wzorów do wyznaczenia poszczególnych składników bilansu ciepłego proponowaną metodą stanowią: Rozporządzenie Ministra Infrastruktury w sprawie szczegółowego zakresu i formy audytu energetycznego [6], norma PN-B-02025:2001 dotycząca obliczania sezonowego zapotrzebowania na ciepło do ogrzewania budynków mieszkalnych i zamieszkania zbiorowego [5], norma PN-B-03406:1994 dotycząca obliczania zapotrzebowania na ciepło pomieszczeń o kubaturze do 600 m<sup>3</sup> [4].

### 3.1. Sezonowe zapotrzebowanie na ciepło do ogrzewania grupy budynków (netto)

Sezonowe zapotrzebowanie na energię cieplną netto  $Q_0$ , (tj. bez uwzględnienia sprawności systemu grzewczego), obszaru miast/gmin, składającego się z  $n$  poszczególnych budynków, oblicza się ze wzoru

$$Q_0 = \sum_{i=1}^n Qp_{0,i} + Qok_{0,i} - \eta_{z,i} Qsw_{0,i} + Qi_{0,i}, \text{ GJ/rok} \quad (3)$$

gdzie:

indeks 0 – stan obliczeń (0 – stan istniejący, 1 – po termomodernizacji);

indeks  $i$  –  $i$ -ty budynek z grupy budynków (A, B, C itd.), składających się na analizowany obszar miasta;

$Qp_{0,i}$  – sezonowe zapotrzebowanie na ciepło na pokrycie strat przez przenikanie, GJ/rok;

$Qok_{0,i}$  – sezonowe zapotrzebowanie na ciepło przez przenikanie przez okna i/lub drzwi zewnętrzne oraz zapotrzebowanie na ciepło do podgrzania powietrza wentylacyjnego, GJ/rok;

- $Q_{sw_{0,i}}$  – sezonowe zyski ciepła wynikające z promieniowania słonecznego przez elementy przeszklone, GJ/rok;  
 $Q_{i_{0,i}}$  – sezonowe wewnętrzne (bytowe) zyski ciepła, GJ/rok;  
 $\eta_{z_{0,i}}$  – współczynnik wykorzystania zysków, obliczany ze wzoru (2), w którym stosunek zysków do strat  $GLR$  wyznacza się ze wzoru

$$GLR_{0,i} = \frac{Q_{sw_{0,i}} + Q_{i_{0,i}}}{Q_{p_{0,i}} + Q_{ok_{0,i}}} \quad (4)$$

### 3.2. Zapotrzebowanie na moc ciepłą grupy budynków

Łączną obliczeniową moc ciepłą grupy budynków  $q$  oblicza się ze wzoru

$$q_0 = \sum_{i=1}^n qp_{0,i} + qok_{0,i}, \text{ MW} \quad (5)$$

gdzie:

- indeks 0 – stan obliczeń (0 – stan istniejący, 1 – po termomodernizacji);  
 indeks  $i$  –  $i$ -ty budynek z grupy budynków (A, B, C itd.), składających się na analizowany obszar miasta;  
 $qp_{0,i}$  – zapotrzebowanie na moc ciepłą na pokrycie strat spowodowanych przenikaniem przez przegrody zewnętrzne lub przez przegrody między pomieszczeniem ogrzewanym i nieogrzewanym, MW;  
 $qok_{0,i}$  – zapotrzebowanie na moc ciepłą przez przenikanie i infiltrację powietrza przez okna i/lub drzwi zewnętrzne oraz zapotrzebowaniem na moc ciepłą na podgrzanie powietrza wentylacyjnego, MW.

### 3.3. Sezonowe zapotrzebowanie na ciepło do ogrzewania grupy budynków (brutto)

Całkowite zapotrzebowanie na energię ciepłą do ogrzewania budynku, z uwzględnieniem wpływu systemu grzewczego w rozpatrywanym budynku, jest nazywane zapotrzebowaniem na energię ciepłą brutto lub zapotrzebowaniem na energię pierwotną. W proponowanej metodzie, sezonowe zapotrzebowanie na energię ciepłą brutto  $Q_s$ , obszaru miast/gmin, składającego się z  $n$  poszczególnych budynków oblicza się ze wzoru

$$Q_{s_0} = \sum_{i=1}^n \left( \frac{Q_{0,i} wt_{0,i} wd_{0,i}}{\eta_{0,i}} \right), \text{ GJ/rok} \quad (6)$$

gdzie:

- indeks 0 – stan obliczeń (0 – stan istniejący, 1 – po termomodernizacji);

indeks  $i$  –  $i$ -ty budynek z grupy budynków (A, B, C itd.), składających się na analizowany obszar miasta;

$Q_{0,i}$  – sezonowe zapotrzebowanie na energię cieplną netto  $i$ -tego budynku, wyznaczone według wzoru (3), GJ/rok;

$wt_{0,i}$  – współczynnik eksploatacyjny systemu grzewczego  $i$ -tego budynku, uwzględniający przerwy w ogrzewaniu w okresie tygodnia, przyjmowany według Rozporządzenia Ministra Infrastruktury [6];

$wd_{0,i}$  – współczynnik eksploatacyjny systemu grzewczego  $i$ -tego budynku, uwzględniający przerwy w ogrzewaniu w okresie doby, przyjmowany według Rozporządzenia Ministra Infrastruktury [6];

$\eta_{0,i}$  – sprawność ogólna systemu grzewczego  $i$ -tego budynku, ze wzoru (7).

Sprawność systemu grzewczego jest parametrem, charakteryzującym rozwiązanie i stan techniczny systemu grzewczego, wpływającym bezpośrednio na zużycie energii pierwotnej w poszczególnym budynku analizowanego obszaru.

Sprawność ogólna systemu grzewczego jest iloczynem sprawności składowych i wyznacza się ją ze wzoru

$$\eta_{0,i} = \eta_{0,i_w} \eta_{0,i_p} \eta_{0,i_r} \eta_{0,i_e} \quad (7)$$

gdzie:

indeks 0 – stan obliczeń (0 – stan istniejący, 1 – po termomodernizacji);

indeks  $i$  –  $i$ -ty budynek z grupy budynków (A, B, C itd.), składających się na analizowany obszar miasta;

$\eta_w$  – sprawność wytwarzania ciepła określana zgodnie z Polskimi Normami dotyczącymi kotłów grzewczych wodnych niskotemperaturowych, gazowych oraz kotłów grzewczych stalowych o mocy grzewczej do 50 kW lub przyjmowana według Rozporządzenia Ministra Infrastruktury [6] lub z dokumentacji technicznej;

$\eta_p$  – sprawność przesyłania ciepła określana zgodnie z Polską Normą, dotyczącą izolacji cieplnej rurociągów, armatury i urządzeń lub przyjmowana według Rozporządzenia Ministra Infrastruktury [6] lub z dokumentacji technicznej;

$\eta_r$  – sprawność regulacji systemu grzewczego obliczana z wzoru (8) lub przyjmowana z dokumentacji technicznej;

$\eta_e$  – sprawność wykorzystania ciepła, przyjmowana według Rozporządzenia Ministra Infrastruktury [6] lub z dokumentacji technicznej.

Sprawność regulacji systemu grzewczego jest składową sprawnością ogólnej charakteryzującą system regulacji instalacji grzewczej. Na jej wartość mają wpływ następujące czynniki:

- rodzaj systemu regulacji,
- stan techniczny urządzeń regulacyjnych,
- pojemność hydrauliczna instalacji.

Sprawność regulacji systemu grzewczego danego budynku wyznaczyć można ze wzoru

$$\eta_{0,i,r} = 1 - \left( -\eta_{0,i,co} \right)^2 \cdot \sqrt{GLR_{0,i}} \quad (8)$$

gdzie:

indeks 0 – stan obliczeń (0 – stan istniejący, 1 – po termomodernizacji);

indeks  $i$  –  $i$ -ty budynek z grupy budynków (A, B, C itd.), składających się na analizowany obszar miasta;

$\eta_{co}$  – współczynnik regulacji wynoszący:

- co najmniej 0,75 dla systemów grzewczych z centralnym systemem regulacji, bez automatyki pogodowej i bez zaworów termostatycznych,
- co najmniej 0,85 dla systemów grzewczych z centralnym systemem regulacji, z automatyką pogodową lecz bez zaworów termostatycznych,
- nie więcej niż 0,95 dla systemów z elementami grzejnymi z zaworami termostatycznymi, o dużej bezwładności cieplnej,
- nie więcej niż 0,99 dla systemów z elementami grzejnymi z zaworami termostatycznymi, o znikomej bezwładności cieplnej,

$GLR$  – stosunek zysków do strat ciepła wyznaczony ze wzoru (4).

#### 4. METODA WYZNACZANIA EFEKTÓW ENERGETYCZNYCH ZESPOŁU BUDYNKÓW

Stosownie do metody bilansowania potrzeb ciepłych, metoda wyznaczania efektów energetycznych, wynikających z termomodernizacji, polega na wyznaczeniu jednostkowych strat mocy i energii cieplnej przez najistotniejsze składniki bilansu cieplnego poszczególnego budynku wchodzącego w skład analizowanej grupy budynków, dla stanu istniejącego i dla stanu docelowego (po termomodernizacji). Efekty energetyczne poszczególnych usprawnień termomodernizacyjnych stanowią różnicę między potrzebami cieplnymi stanów istniejącego i docelowego. Proponowana metoda służy do określenia stanu docelowego poszczególnych usprawnień termomodernizacyjnych w wyniku zastosowania analizy optymalizacyjnej. Jako kryterium wyboru optymalnego usprawnienia termomodernizacyjnego proponuje się zastosowanie wskaźnika czasu zwrotu nakładów *SPBT* (*Simple Pay Back Time*).

Za usprawnienie optymalne uznaje się takie, dla którego czas zwrotu nakładów, wyznaczany z wzoru (9), jest najkrótszy.



$$SPBT_i = \frac{N_i}{\Delta O_{r,i}}, \text{ lata} \quad (9)$$

gdzie:

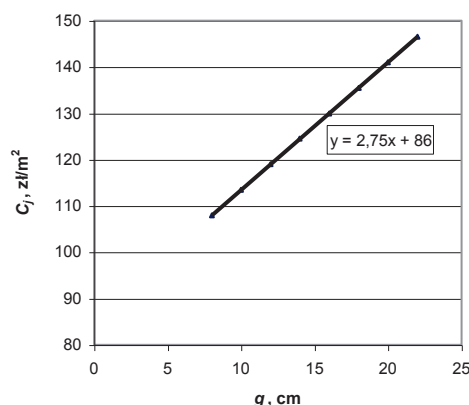
- $N_i$  – nakłady inwestycyjne na  $i$ -te przedsięwzięcie termomodernizacyjne, zł;  
 $\Delta O_{r,i}$  – roczne oszczędności, wynikające z wprowadzenia  $i$ -tego usprawnienia termomodernizacyjnego, zł/rok.

W proponowanej metodzie wyznaczania efektów energetycznych ujęto najistotniejsze, z uwagi na oszczędność energii, usprawnienia termomodernizacyjne:

- ocieplenie przegród zewnętrznych (ściany zewnętrzne, stropy, stropodachy),
- wymianę stolarki okiennej lub modernizację systemu wentylacji mechanicznej,
- modernizację systemu grzewczego.

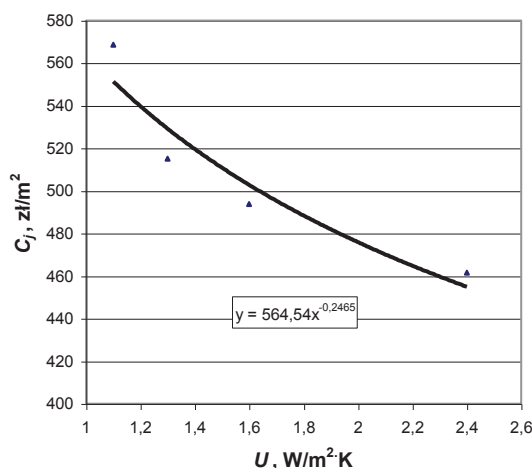
W celu wykonania analizy optymalizacyjnej wyboru usprawnień termomodernizacyjnych dla każdego przedsięwzięcia jest konieczna znajomość, między innymi zmienności nakładów inwestycyjnych w zależności od zmiany parametrów termoizolacyjnych, na przykład grubości warstwy materiału docieplającego, wartości współczynnika przenikania ciepła okien itp.

W proponowanej metodzie wyznaczania nakładów inwestycyjnych zakłada się wykorzystanie informacji zgromadzonych o każdym z budynków składających się na analizowany obszar. Informacje zebrane na kartach inwentaryzacyjnych stanowią podstawę do zbilansowania potrzeb cieplnych poszczególnego, pojedynczego obiektu oraz stanowią obmiar wielkości konstrukcyjnych budynku, będących przedmiotem prac termomodernizacyjnych. W proponowanej metodzie zakłada się także stworzenie baz danych z cenami jednostkowymi prac termomodernizacyjnych. Przekładowe zależności przedstawiono na rysunkach 2 i 3.



**Rys. 2.** Ceny jednostkowe  $C_j$  ocieplenia ścian zewnętrznych metodą bezspoinową styropianem frezowanym, ( $\lambda = 0,040 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ) w zależności od grubości materiału izolacyjnego  $g$

**Fig. 2.** Unit prices  $C_j$  of outer walls warming with the closed junction method with the use of milled foamed polystyrene, ( $\lambda = 0,040 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ) depending on the thickness of insulating material  $g$



**Rys. 3.** Zależność cen jednostkowych  $C_j$  wymiany stolarki okiennej od współczynnika przenikania ciepła okien  $U$   
**Fig. 3.** Relation of unit prices  $C_j$  of replacement of windows to an overall heat-transfer coefficient  $U$  for windows

Nakłady inwestycyjne poszczególnego przedsięwzięcia termomodernizacyjnego stanowią iloczyn powierzchni analizowanej przegrody i ceny jednostkowej, odpowiadającej grubości materiału izolacyjnego, w przypadku ocieplenia przegród budowlanych lub iloczynowi powierzchni okien i ceny jednostkowej w przypadku ich wymiany. Pozostałe nakłady inwestycyjne związane z montażem urządzeń wentylacji grawitacyjnej (nawiewników okiennych, wywiewników itp.), a w szczególności nakłady związane z modernizacją mechanicznej wentylacji nawiewno-wywiewnej należy ustalać indywidualnie dla poszczególnego obiektu wchodzącego w skład analizowanej grupy budynków.

W proponowanej metodzie założono rozpoczęcie optymalizacji wyboru grubości materiału termoizolacyjnego od grubości, przy której opór cieplny  $i$ -tej przegrody  $R$  osiągnie wartość nie mniejszą niż przedstawioną w tabelicy 1, w przypadku współfinansowania przedsięwzięć termomodernizacyjnych według Ustawy o wspieraniu przedsięwzięć termomodernizacyjnych [8]. W przypadku finansowania procesu termomodernizacji, bez uwzględniania ustawy [8], analizę optymalizacyjną należy rozpocząć od wyboru grubości materiału termoizolacyjnego, przy której analizowana przegroda zewnętrzna osiąga normatywne parametry ciepłochronności, określone w warunkach technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie [7]. W przypadkach analizy wyboru optymalnej grubości materiału izolacyjnego, gdy funkcja  $SPBT = f(g)$  ( $g$  – grubość materiału termoizolacyjnego) jest malejąca i nie osiąga minimum, maksymalną grubość docieplenia określają techniczne możliwości realizacji.

**Tablica 1.** Minimalny opór cieplny przegrody zewnętrznej po termomodernizacji w przypadku korzystania ze współfinansowania [8]

Rodzaj przegrody	Minimalna wartość oporu cieplnego przegrody $R_{min}$ , $m^2 \cdot K/W$
Ściana zewnętrzna	4,00
Stropodachy i stropy pod nieogrzewanym poddaszem lub przejazdem	4,50
Stropy nad nieogrzewanymi piwnicami i zamkniętymi przestrzeniami podpodłogowymi	2,00

W przypadku wyboru optymalnego rozwiązania wymiany stolarki okiennej lub drzwiowej, podobnie jak w przypadku termomodernizacji przegród zewnętrznych, sposób finansowania procesu termomodernizacji ma wpływ na wybór rozwiązania.

W przypadku współfinansowania przedsięwzięć termomodernizacyjnych według Ustawy o wspieraniu przedsięwzięć termomodernizacyjnych [8], okna wybrane w wyniku analizy optymalizacyjnej muszą charakteryzować się współczynnikami przenikania ciepła o wartości nie mniejszej niż przedstawiono w tablicy 2. W przypadku finansowania termomodernizacji poza ustawą [8], o wyborze optymalnego wariantu w zakresie wymiany stolarki okiennej lub modernizacji wentylacji powinno decydować wyłącznie kryterium ekonomiczne, co znaczy, że rekomendowany do realizacji wariant, spośród wszystkich analizowanych, powinien charakteryzować się najkrótszym czasem zwrotu nakładów.

**Tablica 2.** Maksymalna wartość współczynnika przenikania ciepła okien po termomodernizacji w przypadku korzystania ze współfinansowania [8]

Wyszczególnienie	Maksymalna wartość współczynnika przenikania ciepła okna $U_{max}$ , $W/m^2 \cdot K$
Okna w ścianach dla I, II, III strefy klimatycznej	1,90
Okna w dachach dla I, II, III strefy klimatycznej	1,80
Okna w ścianach lub dachach dla IV i V strefy klimatycznej	1,70

W celu wyznaczenia efektów energetycznych, wynikających z modernizacji systemu grzewczego, należy dostosować nakłady inwestycyjne do jednostkowych efektów powodujących zwiększenie sprawności cząstkowych systemu grzewczego. Po zebraniu danych, w karcie inwentaryzacyjnej, należy indywidualnie dla każdego budynku przeprowadzić analizę możliwości modernizacji systemu grzewczego. Modernizacja każdorazowo będzie zależeć od możliwości finansowych inwestora, jednakże jej minimalny zakres musi być dostosowany do zmniejszonego zapotrzebowania na energię, wynikającą z zastosowanych usprawnień termomodernizacyjnych.

Przykładowe prace zwiększające wartość składowych systemu grzewczego zestawiono w tablicy 3.

Tablica 3. Przykładowe prace powodujące zwiększenie sprawności systemu grzewczego

Składowa sprawność systemu grzewczego	Przykładowe prace termomodernizacyjne zwiększające wartość sprawności składowej systemu grzewczego
Sprawność wytwarzania $\eta_w$	- modernizacja kotłowni - modernizacja węzła cieplnego
Sprawność przesyłania $\eta_p$	- wymiana przewodów rozdzielających i pionów instalacji c.o. - izolacja przewodów rozdzielających instalacji w pomieszczeniach nieogrzewanych - wymiana grzejników - płukanie chemiczne instalacji c.o.
Sprawność regulacji $\eta_r$	- działania zmniejszające bezwładność cieplną instalacji - montaż termostatycznych zaworów grzejnikowych - montaż podpionowych zaworów regulacyjnych - montaż automatyki sterującej pracą źródła ciepła, w tym automatyki pogodowej - zmniejszenie pojemności wodnej instalacji
Sprawność wykorzystania $\eta_e$	- zmiana lokalizacji pierwotnie błędnie usytuowanych grzejników - usunięcie zbędnych, nieujętych w projektowaniu, osłon grzejników - montaż ekranów zagrzejnikowych

Poza wyznaczeniem czasu zwrotu nakładów  $SPBT_{co}$  poniesionych na modernizację systemu grzewczego, zgodnie z proponowaną metodą, wyznacza się wartość bieżącą netto  $NPV_{co}$  (*Net Present Value*), będącą wskaźnikiem opłacalności. Dodatnia wartość  $NPV_{co}$  jest ekonomicznym uzasadnieniem modernizacji systemu grzewczego w zaproponowanym zakresie. Sposób wyznaczenia  $NPV_{co}$  definiuje wzór

$$NPV_{co,A} = \sum_{t=1}^{15} \frac{1}{(1+i)^t} \Delta O_{r,co,A} - N_{co,A}, \text{ zł} \quad (10)$$

gdzie:

indeks  $A$  – oznaczenie budynku w grupie budynków, np. A, B, C itd.;

$i$  – stopa dyskonta;

$t$  – oznaczenie roku;

$N_{co,A}$  – nakłady inwestycyjne związane z modernizacją systemu grzewczego poszczególnego budynku, zł;

$\Delta O_{r,co,A}$  – roczna oszczędność kosztów energii wynikająca z modernizacji systemu grzewczego w budynku A, zł/rok, wyznaczona ze wzoru

$$\Delta O_{r,co,A} = \left( \frac{wt_{0,A} wd_{0,A}}{\eta_{0,A}} O_{z,0,A} - \frac{wt_{1,A} wd_{1,A}}{\eta_{1,A}} O_{z,1,A} \right) \cdot$$

$$\cdot Q_{0,A} + C_{m,0,A} - O_{m,1,A} \cdot \dot{g}_{0,A} \cdot 12 + (b_{0,A} - Ab_{1,A}) \cdot 12, \text{ zł/rok} \quad (11)$$

gdzie:

indeks 0 – stan obliczeń (0 – stan istniejący, 1 – po termomodernizacji);

indeks  $A$  – oznaczenie budynku w grupie budynków, np. A, B, C itd.;

indeks  $i$  –  $i$ -ty budynek z grupy budynków (A, B, C itd.), składających się na analizowany obszar miasta;

$O_z$  – opłata zmienna związana z dystrybucją i przesyłem jednostki energii wykorzystywanej do ogrzewania, odpowiadająca:

- opłacie za ciepło i zmiennej opłacie za usługi przesyłowe dla ogrzewania zdalaczynnego, zł/GJ,

- stawce opłaty zmiennej za przesłane paliwo zł/m<sup>3</sup>, przeliczonej na zł/GJ dla gazu,

- sumie stawek za energię czynną, systemową opłatę przesyłową i zmienny składnik stawki sieciowej, przeliczonej na zł/GJ dla energii elektrycznej,

- stawce opłaty zmiennej określonej według kalkulacji kosztów rodzajowych przeliczonej na zł/GJ dla własnego źródła zasilanego dowolnym paliwem;

$O_m$  – stała opłata miesięczna związana z dystrybucją i przesyłem energii wykorzystywanej do ogrzewania, odpowiadająca:

- opłacie za zamówioną moc cieplną i opłacie stałej za usługi przesyłowe, zł/(MW·miesiąc) dla ogrzewania zdalaczynnego,

- składnikowi stałemu wyznaczonemu na jednostkę mocy umownej w miesięcznym okresie rozliczeniowym przeliczonemu na zł/(MW·miesiąc) dla gazu,

- składnikowi stałemu stawki sieciowej zł/(kW·miesiąc), przeliczonemu na zł/(MW·miesiąc) dla energii elektrycznej,

- składnikowi miesięcznych kosztów stałych, określonymu zgodnie z kalkulacją kosztów rodzajowych, odniesionemu do mocy źródła, zł/(MW·miesiąc) dla własnego źródła zasilanego dowolnym paliwem;

$Ab$  – miesięczna opłata abonamentowa, zł/m-c;

$Q_{0,A}$  – sezonowe zapotrzebowanie na ciepło budynku A w stanie istniejącym, GJ/rok;

$q_{0,A}$  – obliczeniowa moc cieplna budynku A w stanie istniejącym, MW.

Sposób obliczania oszczędności kosztów energii, wynikających z modernizacji systemu grzewczego, ujmuje efekty pochodzące ze zwiększenia sprawności ogólnej systemu grzewczego i wpływ zmian cen jednostkowych ciepła, które mogą nastąpić w przypadku modernizacji źródła ciepła.

## 5. METODA WYZNACZANIA EFEKTÓW EKOLOGICZNYCH ZESPOŁU BUDYNKÓW

Istota proponowanej metody wyznaczania efektów ekologicznych polega na określeniu, dla każdego budynku z osobną, wchodzącego w skład analizowanego obszaru, zapotrzebowania na energię pierwotną i w konsekwencji rocznego zapotrzebowania na paliwo zużywane na cele grzewcze, dla stanu istniejącego i po termomodernizacji. Ilość paliwa zużywanego na cele grzewcze dla poszczególnego budynku wyznacza się z uogólnionego wzoru

$$B_{0,A} = \frac{Qs_{0,A}}{Wd_A}, \text{ Mg/rok, m}^3\text{/rok, } 10^6\text{m}^3\text{/rok} \quad (12)$$

gdzie:

indeks 0 – stan obliczeń (0 – stan istniejący, 1 – po termomodernizacji);

indeks  $A$  – oznaczenie budynku w grupie budynków, np. A, B, C itd.;

$Qs_{0,A}$  – sezonowe zapotrzebowanie na ciepło brutto (zapotrzebowanie na energię pierwotną), wyznaczone według [4];

$Wd_A$  – wartość opałowa paliwa stosowanego do zaopatrzenia w ciepło budynku  $A$ , dla paliw stałych GJ/Mg, dla paliw ciekłych GJ/m<sup>3</sup>, dla paliw gazowych GJ/10<sup>6</sup>m<sup>3</sup>/rok.

Sposób wyznaczania emisji poszczególnej substancji zanieczyszczającej jest uzależniony od rodzaju paliwa, jego własności i technologii spalania. Zgodnie z proponowaną metodą należy wyznaczać emisję następujących zanieczyszczeń: pyłu, dwutlenku siarki, tlenku węgla, dwutlenku azotu, benzo/a/pirenu oraz wynikowo emisji równoważnej (ekwiwalentnej) jako uśrednionej miary oddziaływania budynku z jego systemem grzewczym na środowisko. Emisja równoważna  $\bar{E}$  jest funkcją emisji poszczególnych substancji zanieczyszczających, a jej wartość obliczyć można ze wzoru

$$\bar{E}_{0,A} = 2,9 \cdot Ep_{0,A} + 0,5 \cdot Eco_{0,A} + 2,9 \cdot Eno_{20,A} + 1,0 \cdot Eso_{20,A}, \text{ kg/rok} \quad (13)$$

gdzie:

indeks 0 – stan obliczeń (0 – stan istniejący, 1 – po termomodernizacji);

indeks  $A$  – oznaczenie budynku w grupie budynków, np. A, B, C itd.;

$Ep$  – emisja pyłu, kg/rok;

$Eco$  – emisja tlenku węgla, kg/rok;

$Eno_2$  – emisja dwutlenku azotu, kg/rok;

$Eso_2$  – emisja dwutlenku siarki, kg/rok.

## 6. PRZYKŁAD ZASTOSOWANIA METODY BILANSOWANIA POTRZEB CIEPLNYCH I METODY WYZNACZANIA EFEKTÓW ENERGETYCZNYCH I EKOLOGICZNYCH

W celu zweryfikowania opracowanej metody bilansowania potrzeb ciepłych wykonano obliczenia sezonowego zapotrzebowania na ciepło i zapotrzebowania na moc cieplną według opracowanej metody i metodą szczegółową, zgodnie z [4, 5] i przy użyciu programu komputerowego Audytor 3.0.

Obliczenia wykonano dla budynku mieszkalnego wielorodzinnego. Dane charakterystyczne budynku przedstawiono w tabelicy 4.

Tablica 4. Dane charakterystyczne budynku

Wyszczególnienie	Wartość
Rok budowy	1955
Liczba kondygnacji	4
Liczba klatek schodowych	2
Liczba mieszkańców	60
Liczba mieszkań	24
Powierzchnia użytkowa, m <sup>2</sup>	981,0
Kubatura, m <sup>3</sup>	2655,0

Zbiorcze wyniki obliczeń i zestawienie porównawcze przedstawiono w tabelicy 5.

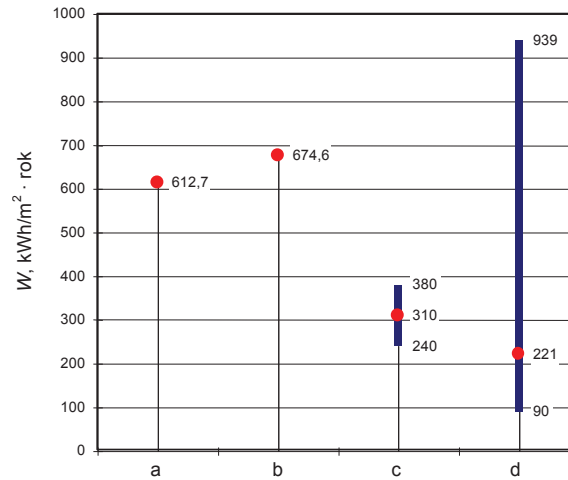
Tablica 5. Zestawienie wyników bilansu cieplnego

Wyszczególnienie	Jednostka	Metoda własna	Metoda szczegółowa	Różnica %
1	2	3	4	5
Sezonowe zapotrzebowanie na ciepło budynku netto	GJ/rok	708	779,5	10,1
Obliczeniowa moc cieplna budynku	kW	97,3	98,7	1,4
Wskaźnik zapotrzebowania na ciepło netto	kW·h/m <sup>3</sup> ·rok	87,2	96,0	10,1
	kWh/m <sup>2</sup> ·rok	612,7	674,6	10,1
Wskaźnik zapotrzebowania na moc cieplną	W/m <sup>3</sup>	43,1	43,8	1,6
	W/m <sup>2</sup>	303,1	307,5	1,5

Z zestawienia (tabl. 5), wynika, że wartości bilansu potrzeb ciepłych, uzyskane zaproponowaną metodą, są zbliżone do wyników pochodzących z obliczeń szczegółowych. Obliczeniowe zapotrzebowanie mocy w obu przypadkach jest niemal identyczne, natomiast różnica w wynikach sezonowego zapotrzebowania na ciepło wynosi 10,1%, co w konsekwencji wykorzystania sezonowego zapotrzebowania na ciepło w audycie energetycznym obszaru gminy/miasta jest różnicą nieistotną.

Na rysunku 4 przedstawiono analizę porównawczą uzyskanych wskaźników zapotrzebowania na ciepło netto analizowanego budynku mieszkalnego, wielorodzinnego, na tle średnich wskaźników dla budownictwa mieszkaniowego i wskaźników pochodzących z audytów energetycznych rzeczywistych budynków. Kolumna 3 na rysunku 4 obrazuje zakres wskaźników zużycia ciepła budynków mieszkalnych wybudowanych przed 1985 rokiem, wynikających z ich energochłonności, przy

dotrzymaniu ówczesnych wymagań prawnych, dotyczących ochrony ciepłej budynków. Rzeczywiste wartości wskaźników powierzchniowych zużycia ciepła, pochodzące z próbki 153 bilansów ciepłych budynków mieszkalnych, wielorodzinnych i wybudowanych przed 1985 rokiem, przedstawiono na rysunku 4 w kolumnie d.



**Rys. 4.** Analiza porównawcza sezonowych wskaźników  $W$  zapotrzebowania na ciepło w odniesieniu do powierzchni użytkowej: a – metoda proponowana, b – metoda szczegółowa, c – metoda wskaźnikowa, d – wyniki z próbki 153 audytów, ● – wartość średnia

**Fig. 4.** Analyses comparing seasonal indicators  $W$  of heat demand in relation to useful area: a – proposed method, b – detailed method, c – indicator method, d – results from a sample of 153 audits, ● – average value

Wyniki zestawione na rysunku 4 dowodzą, że posługiwanie się wskaźnikami zapotrzebowania na ciepło, uniemożliwia uzyskanie wiarygodnych wyników sezonowych potrzeb ciepłych, a przede wszystkim zafałszowuje wyniki opłacalności realizacji przedsięwzięć termomodernizacyjnych.

Zbiorcze wyniki obliczeń jako dane wyjściowe do weryfikacji metody wyznaczania efektów energetycznych i ekologicznych oraz przeprowadzenia analizy optymalizacyjnej, według zaproponowanej metody, przedstawiono w kolumnie 3 tabeli 5.

W tabeli 6 zestawiono elementy konstrukcyjne budynku, które na podstawie analizy stanu cieplochronności, przewidziano do termomodernizacji.

**Tablica 6.** Elementy konstrukcyjne budynku przewidziane do termomodernizacji

Rodzaj przegrody	Symbol przegrody	Powierzchnia m <sup>2</sup>	Współczynnik przenikania ciepła $U_0$ , W/m <sup>2</sup> ·K
Ściana zewnętrzna	Sz1	646,3	1,435
Stropodach	STD	263,7	0,996
Okna mieszkalne (skrzynkowe)	OK1	119,8	2,60
Okna na klatkach schodowych (pojedynczo szklone)	OK4	28,1	5,10



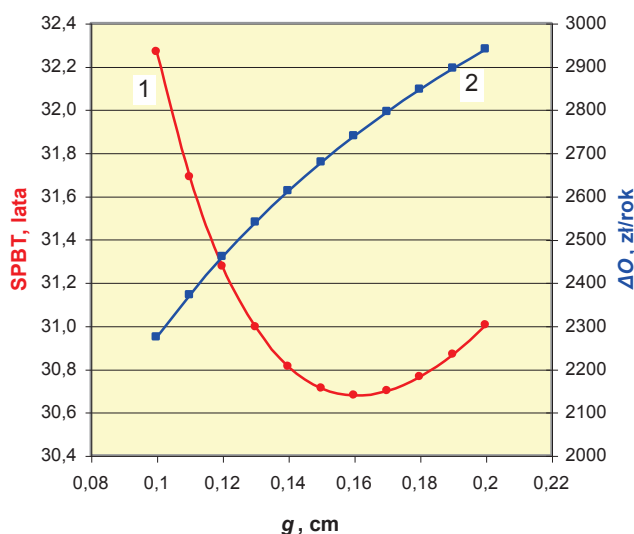
### 6.1. Optymalizacja wyboru wariantu polegającego na dociepleniu przegród zewnętrznych

Termomodernizację ścian zewnętrznych planuje się wykonać metodą bezspoinową z użyciem styropianu frezowanego o współczynniku przewodności cieplnej  $\lambda = 0,04 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ .

W optymalizacji zostaną wykorzystane zmiany nakładów inwestycyjnych w zależności od grubości materiału izolacyjnego, opisane zależnością  $C_j = 2,75g + 86$ .

Optymalizację wyboru grubości materiału izolacyjnego rozpoczęto od warstwy docieplającej wynoszącej 10 cm, dla której ściana termomodernizowana charakteryzuje się oporem cieplnym  $R = 4,06 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$ , czyli większym od wartości ustawowej (tabl. 1).

Na rysunku 5 przedstawiono zależność oszczędności kosztów energii i czasu zwrotu poniesionych nakładów od grubości materiału izolacyjnego.



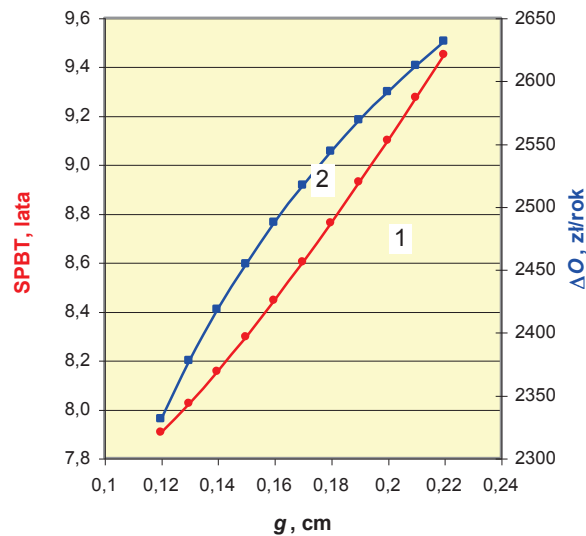
**Rys. 5.** Graficzna prezentacja optymalizacji wyboru usprawnienia polegającego na dociepleniu ścian zewnętrznych: SPBT – prosty czas zwrotu nakładów (1),  $\Delta O$  – roczna oszczędność kosztów (2),  $g$  – grubość materiału izolacyjnego

**Fig. 5.** Graphical presentation of choice optimisation of improvement consisting in additional warming of outer walls: SPBT – simple time of cost reimbursement (1),  $\Delta O$  – year cost saving (2),  $g$  – thickness of insulating material

Optymalną grubością izolacji jest 16 cm warstwa styropianu, dla której czas zwrotu nakładów jest najkrótszy i wynosi 30,7 lat.

W przypadku optymalizacji wyboru usprawnienia związanego z ociepleniem stropodachu STD zastosowano analogiczną metodę, jak w przypadku ocieplenia ścian zewnętrznych. Do ocieplenia stropodachu przewiduje się ułożenie styropianu typu PS-20 wraz z wykonaniem nowego pokrycia z papy termozgrzewalnej i obróbkami blacharskimi.

Zastosowana w analizie zależność nakładów inwestycyjnych od grubości materiału izolacyjnego  $C_j = 2,44g + 40,6$  ujmuje wszystkie składniki wyceny proponowanej technologii docieplenia.



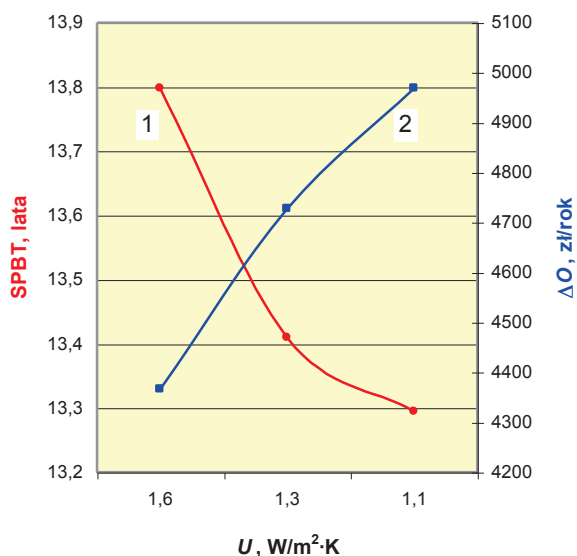
Rys. 6. Optymalizacja wyboru usprawnienia polegającego na ociepleniu stropodachu od zewnątrz styropianem z wykonaniem pokrycia papą termozgrzewalną i obróbkami blacharskimi; objaśnienia jak na rys. 5

Fig. 6. Choice optimisation of improvement, consisting in warming of ceiling-roof from the outer side with foamed polystyrene with covering of thermoweldable building paper and roof sheet works; explanations as for Fig. 5

Z rysunku 6 wynika, że w całym zakresie optymalizacji funkcja  $SPBT = f(g)$  jest rosnąca. Optymalną grubością izolacji jest pierwsza z analizowanych grubości, tj. warstwa styropianu grubości 12 cm, dla której czas zwrotu nakładów jest najkrótszy i wynosi 7,9 lat.

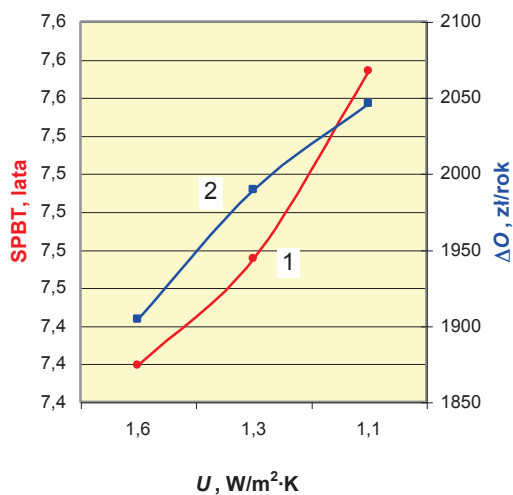
## 6.2. Optymalizacja wyboru wariantu polegającego na wymianie stolarki okiennej

W analizowanym budynku przewidziano do wymiany okna mieszkalne (OK1), skrzynkowe, podwójnie szklone o współczynniku  $U = 2,6 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ , a także okna na klatkach schodowych (OK4), pojedyncze o współczynniku  $U = 5,1 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ . Stolarkę okienną wymienia się w celu ograniczenia zużycia ciepła przez przenikanie i ograniczenie zużycia ciepła i mocy cieplnej na podgrzanie powietrza nadmiernie infiltrującego przez nieszczelności. Założono wymianę istniejących okien na okna PCV z mikrouchyłem oraz szybą zespoloną jednokomorową. Wyniki wyboru optymalnego rodzaju okien w mieszkaniach OK1 przedstawiono na rysunku 7, natomiast na rysunku 8 – optymalizację wyboru okien na klatkach schodowych.



Rys. 7. Optymalizacja wymiany okien OK1 o współczynniku przenikania ciepła  $U = 2,6 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ ; objaśnienia jak na rys. 5

Fig. 7. Optimisation of replacement of windows OK1 with an overall heat-transfer coefficient  $U = 2.6 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ ; explanations as for Fig. 5



Rys. 8. Optymalizacja wymiany okien OK4 o współczynniku przenikania ciepła  $U = 5,1 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ ; objaśnienia jak na rys. 5

Fig. 8. Optimisation of replacement of windows OK4 with an overall heat-transfer coefficient  $U = 5.1 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ ; explanations as for Fig. 5

W przypadku okien w mieszkaniach OK1 optymalnym rozwiązaniem, charakteryzującym się najkrótszym czasem zwrotu  $SPBT = 13,3$  lat, jest wymiana na okna

o współczynniku  $U = 1,1 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ , natomiast w przypadku okien OK4 usprawnieniem wskazanym jako optymalne są okna o współczynniku  $U = 1,6 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  ( $SPBT_{\min} = 7,4$  lat). Z rysunków 7 i 8 wynika, że o przebiegu zmienności funkcji  $SPBT = f(U)$  decydują parametry stolarki w stanie istniejącym, czyli potencjalne, możliwe do uzyskania efekty energetyczne.

### 6.3. Przykład wyznaczania efektów energetycznych, wynikających z modernizacji systemu grzewczego

W przykładowym budynku, na podstawie oceny istniejącego stanu, do modernizacji zakwalifikowano:

- wymianę grzejników, żeliwnych członowych na grzejniki stalowe konwektorowe,
- wymianę instalacji c.o. (piony i przewody rozprowadzające) na nową wykonaną z miedzi,
- montaż przygrzejnikowych zaworów termostatycznych,
- izolację przewodów rozprowadzających w piwnicach.

Uzyskane efekty jednostkowe w postaci zwiększenia sprawności cząstkowych zestawiono w tablicy 7.

Tablica 7. Efekty rzeczowe wynikające z modernizacji systemu grzewczego

Parametr uwzględniający wpływ modernizacji	Opis usprawnienia	Zmiana współczynnika
Sprawność wytwarzania	bez zmian	$\eta_w = 1,00$
Sprawność przesyłania	wymiana rurociągów, izolacja przewodów rozprowadzających	$\eta_p = 0,90 \rightarrow 0,95$
Sprawność wykorzystania	bez zmian	$\eta_e = 0,95$
Sprawność regulacji	wymiana grzejników, montaż zaworów termostatycznych z głowicami	$\eta_r = 0,78 \rightarrow 0,99$
Współczynnik uwzględniający przerwy w ogrzewaniu w okresie doby	osłabienie wynikające z zainstalowania zaworów termostatycznych z głowicami	$w_d = 1,00 \rightarrow 0,95$
Współczynnik uwzględniający przerwy w ogrzewaniu w okresie tygodnia	bez zmian	$w_t = 1,00$

Efekty energetyczne i parametry ekonomiczne modernizacji systemu grzewczego zestawiono w tablicy 8.

Tablica 8. Efekty energetyczne i ekonomiczne modernizacji systemu grzewczego

Wyszczególnienie	Jednostka	Wartość
Zmiana sprawności ogólnej systemu grzewczego $\eta_{co}$	–	$0,67 \rightarrow 0,89$
Roczna oszczędność ciepła, wynikająca z modernizacji systemu grzewczego $\Delta Q_{co}$	GJ/rok	300,03
Nakłady inwestycyjne związane z z modernizacją systemu grzewczego $N_{co}$	zł	45500,0
Roczna oszczędność kosztów ciepła, wynikająca z modernizacji systemu grzewczego $\Delta O_{r,co}$	zł/rok	7676,1
Czas zwrotu nakładów poniesionych na modernizację systemu grzewczego $SPBT_{co}$	lata	5,93
Wartość bieżąca netto $NPV_{co}$	zł	27416,4

#### 6.4. Sumaryczne efekty energetyczne i ekologiczne, wynikające z termomodernizacji analizowanego budynku

Zgodnie z proponowaną metodą, po dokonaniu wyboru optymalnych usprawnień docieplenia „skorupy” budynku i wskazaniu zakresu modernizacji systemu grzewczego, bilans cieplny budynku wykonano po termomodernizacji. W tablicy 9 zestawiono zbiorcze wyniki tego bilansu.

Tablica 9. Zbiorcze zestawienie wyników bilansu cieplnego budynku dla stanu po termomodernizacji

Wyszczególnienie	Jednostka	Wartość
Sezonowe zapotrzebowanie na ciepło budynku netto	GJ/rok	281,7
Obliczeniowa moc cieplna budynku	kW	36,9
Wskaźnik zapotrzebowania na ciepło netto	kWh/m <sup>3</sup> ·rok	34,7
	kWh/m <sup>2</sup> ·rok	243,8
Wskaźnik zapotrzebowania na moc cieplną	W/m <sup>3</sup>	16,3
	W/m <sup>2</sup>	114,8
Sprawność ogólna systemu grzewczego	–	0,889
Sezonowe zapotrzebowanie na ciepło budynku z uwzględnieniem sprawności systemu grzewczego i przerwami w ogrzewaniu (brutto)	GJ/rok	301,0
Wskaźnik zapotrzebowania ciepła brutto	kWh/m <sup>3</sup> ·rok	37,1
	kWh/m <sup>2</sup> ·rok	260,4

Z różnicy zapotrzebowania na ciepło w przypadku budynku w stanie istniejącym i po termomodernizacji wyznaczono efekty energetyczne, które wraz z parametrami ekonomicznymi, charakteryzującymi proces termomodernizacji, zestawiono w tablicy 10.

Tablica 10. Parametry energetyczno-ekonomiczne procesu termomodernizacji budynku

Wyszczególnienie	Jednostka	Wartość
Całkowite nakłady termomodernizacyjne $N$	zł	228 136,0
Roczna oszczędność energii pierwotnej (energia cieplna brutto) $\Delta Q$	GJ/rok	755,5
Zmniejszenie mocy cieplnej $\Delta q$	MW	0,0604
Roczna oszczędność kosztów ciepła $\Delta O$	zł/rok	24 479,4
Prosty czas zwrotu nakładów $SPBT$	lata	9,3
Wartość bieżąca netto $NPV$	zł	4 398,0

Zgodnie z proponowaną metodą wyznaczania efektów ekologicznych, dla stanu istniejącego i po termomodernizacji, określono emisję zanieczyszczeń. W przykładowym budynku, zasilanym w ciepło z systemu ciepłowniczego, emisja zanieczyszczeń jest generowana w źródle ciepła dostawcy. W obliczeniach przyjęto skuteczność odpylania urządzeń ochronnych  $\eta_{odp} = 99,5\%$  i skuteczność odsiarczania wynoszącą  $\eta_{odp} = 80\%$ . Zbiorcze wyniki emisji zanieczyszczeń dla stanu istniejącego i po termomodernizacji przedstawiono w tablicy 11.

**Tablica 11.** Roczna emisja zanieczyszczeń spowodowana ogrzewaniem budynku, dla stanu istniejącego i po termomodernizacji

Wyszczególnienie	Jednostka	Wartość
STAN ISTNIEJĄCY		
Pył całkowity	kg/rok	19,1
Dwutlenek siarki	kg/rok	109,5
Dwutlenek azotu	kg/rok	523,0
Tlenek węgla	kg/rok	24,0
Dwutlenek węgla	kg/rok	105 649
Benzo/a/piren	kg/rok	0,0005
Emisja równoważna (ekwiwalentna)	kg/rok	1693,4
STAN PO TERMOMODERNIZACJI		
Pył całkowity	kg/rok	5,4
Dwutlenek siarki	kg/rok	31,2
Dwutlenek azotu	kg/rok	149,0
Tlenek węgla	kg/rok	6,8
Dwutlenek węgla	kg/rok	30 096
Benzo/a/piren	kg/rok	0,0001
Emisja równoważna (ekwiwalentna)	kg/rok	482,4

Różnica w emisji poszczególnych substancji zanieczyszczających, między stanem istniejącym a po termomodernizacji, stanowi efekt ekologiczny. Uzyskane zbiorcze wyniki przedstawiono w tablicy 12.

**Tablica 12.** Efekty ekologiczne wynikające z termomodernizacji przykładowego budynku

Wyszczególnienie	Jednostka	Wartość
Pył całkowity	kg/rok	13,6
Dwutlenek siarki	kg/rok	78,3
Dwutlenek azotu	kg/rok	374,0
Tlenek węgla	kg/rok	17,2
Dwutlenek węgla	kg/rok	75 553
Benzo/a/piren	kg/rok	0,0003
Emisja równoważna (ekwiwalentna)	kg/rok	1211,0

Względne efekty ekologiczne dla wszystkich zanieczyszczeń są jednakowe, wynoszą 71,5% i są proporcjonalne do zmniejszenia energii pierwotnej zużywanej na cele grzewcze w analizowanym budynku.

## PODSUMOWANIE

1. Zastosowanie wskaźników zużycia energii do określenia wartości zapotrzebowania na energię ciepłą zespołu budynków umożliwia uzyskanie jedynie orientacyjnych wielkości i nie może stanowić podstawy analiz techniczno-ekonomicznych racjonalizacji zużycia energii. Wyznaczanie efektów energetycznych, wynikających z termomodernizacji analizowanego obszaru miasta z wykorzystaniem wskaźników zużycia energii jest obciążone dużym błędem, uniemożliwiającym podejmowanie decyzji inwestycyjnych. Wykorzystanie zaproponowanej metody pozwala na uży-

skanie dokładnych kosztów inwestycyjnych, efektów energetycznych, ekologicznych i ekonomicznych, co w konsekwencji umożliwi uzyskanie informacji o opłacalności inwestycji termomodernizacyjnej.

2. Wyniki obliczeń zapotrzebowania na ciepło, według opracowanej metody, są zbliżone do wyników uzyskanych metodą szczegółową. Różnica w obliczeniowym zapotrzebowaniu na moc cieplną wynosi 1,4%, natomiast sezonowe zapotrzebowanie na ciepło, wyznaczone obiema metodami, różni się o 10,1% i w kontekście wykorzystania wyników bilansu w audycie energetycznym obszaru miasta jest dokładnością wystarczającą.
3. Przedstawiona metoda wyboru usprawnień termomodernizacyjnych umożliwia zastosowanie warunków Ustawy termomodernizacyjnej, przez co możliwe staje się wykorzystanie audytu poszczególnego budynku, wchodzącego w skład analizowanego obszaru, w celu pozyskania preferencyjnego finansowania z Ustawy termomodernizacyjnej [8].

#### Literatura

1. PN-82/B-02402. Ogrzewnictwo – Temperatuty ogrzewanych pomieszczeń w budynkach.
2. PN-82/B-02403. Ogrzewnictwo – Temperatuty obliczeniowe zewnętrzne.
3. PN-83/B-03430. Wentylacja w budynkach mieszkalnych, zamieszkania zbiorowego i użyteczności publicznej – Wymagania.
4. PN-B-03406:1994. Ogrzewnictwo – Obliczanie zapotrzebowania na ciepło pomieszczeń o kubaturze do 600 m<sup>3</sup>.
5. PN-B-02025:2001. Obliczanie sezonowego zapotrzebowania na ciepło do ogrzewania budynków mieszkalnych i zamieszkania zbiorowego.
6. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 15 stycznia 2002 r. w sprawie szczegółowego zakresu i formy audytu energetycznego (Dz. U. 12/2002, poz. 114).
7. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz. U. 75/2002, poz. 690).
8. Ustawa o wspieraniu przedsięwzięć termomodernizacyjnych z dnia 18.12.1998 r. (Dz. U. 162, poz. 121) wraz ze zmianami wg Ustawy z dnia 21.06.2001 r. (Dz. U. 7, poz. 808).

**Recenzent:** doc. dr hab. inż. Krzysztof Stańczyk