

OCENA WIELOKRYTERIOWA WYBRANYCH ZABIEGÓW TERMOMODERNIZACYJNYCH NA PRZYKŁADZIE BUDYNKU JEDNORODZINNEGO

H. Jędrzejuk, A. Wieczorkiewicz

Instytut Techniki Ciepłej, Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa, Politechnika Warszawska,
Warszawa, Polska

STRESZCZENIE

Do oceny efektywności ekonomicznej zabiegów termomodernizacyjnych stosowana jest powszechnie metoda prostego czasu zwrotu. W artykule porównano różne metody oceny efektywności ekonomicznej i energetycznej. Do wyboru najlepszego rozwiązania zastosowano optymalizację wielokryterialną. Jako kryteria przyjęto wskaźniki ekonomiczne i energetyczne.

STAN ISTNIEJĄCY

Analizie poddano budynek jednorodzinny zlokalizowany w Łodzi (III strefa klimatyczna, stacja meteorologiczna nr 12 465 0), który wybudowano w 1997 r. Budynek ten ma trzy kondygnacje, w tym dwie mieszkalne oraz poddasze nieużytkowe (rys. 1).



Rys. 1. Widok elewacji południowo-zachodniej
(Wieczorkiewicz A., 2014)

Mury zewnętrzne wykonano z bloczków betonu kornikowego na zaprawie cementowo-wapiennej o grubości 26,5 cm, natomiast stropy wykonano z płyt DZ-3 o grubości 24 cm. Okna są drewniane z szybami zespolonymi.

Wymaganą temperaturę w pomieszczeniach zapewnia instalacja ogrzewania wodnego z obiegiem wymuszonym. Źródłem ciepła jest kocioł gazowy z otwartą komorą spalania. Pomieszczenia wentylowane są grawitacyjnie.

OCENA OCHRONY CIEPLNEJ BUDYNKU ORAZ STANU INSTALACJI GRZEWCZYCH

Oceny izolacyjności termicznej przegród dokonano zgodnie z PN-EN ISO 6946:2008 oraz PN-EN ISO 10077-1:2007. Uzyskane wartości współczynników przenikania ciepła zastawiono w tab. 1, w której to zamieszczono również obecnie obowiązujące maksymalne wartości.

Tab. 1. Izolacyjność termiczna wybranych przegród

Rodzaj przegrody	Współczynnik przenikania ciepła	Maksymalna wartość	
		PN-B-02020	Rozporz. (2013) ^{*)}
[-]	[W/(m ² K)]	[W/(m ² K)]	
Okna	1,90	2,60	1,30
Okna połaciowe	1,90	-	1,50
Ściana zewnętrzna	0,25	0,55	0,25
Dach	0,40	0,30	0,20
Podłoga na gruncie	0,55	-	1,50
Strop nad nieogrzewaną piwnicą	0,50	0,60	0,25

^{*)} Podane w ostatniej kolumnie wartości obowiązują od 01.01.2014 r. do 31.12.2016 r.

Uwaga: obecnie stosowana jest trochę inna metoda wyznaczania izolacyjności termicznej przegród budo-wlanych niż w 1997 r.

W większości przypadków izolacyjność termiczna przegród zewnętrznych budynku była lepsza od wymagań obowiązujących w 1997 r.

Zapotrzebowanie na energię użyteczną, końcową i pierwotną do ogrzewania, wentylacji oraz przygotowania c.w.u. zostało wyznaczone zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Infrastruktury z dnia 6 listopada 2008 r. w sprawie metodologii obliczania charakterystyki energetycznej budynku stanowiącej samodzielną całość techniczno-użytkową oraz sposobu sporządzania i wzorów świadectw ich charakterystyki energetycznej.

Budynek został podzielony na dwie strefy o regulowanej temperaturze: mieszkalną (pomieszczenia: 20°C oraz 24°C) i garaż (8°C).

Przeprowadzono obliczenia, które pozwoliły na określenie bilansu cieplnego budynku. W tab. 2 podano udziały procentowe składników strat ciepła, natomiast w tabeli 3 wartości wskaźników oceny energetycznej (Wieczorkiewicz, 2014).

Tab. 2. Bilans strat ciepła (Wieczorkiewicz, 2014)

Opis	Udział [%]
Ciepło niezbędne do podgrzania powietrza wentylacyjnego	38,61
Przenikanie ciepła przez okna	16,72
Przenikanie ciepła przez ściany zewnętrzne (strefa I)	12,94
Przenikanie ciepła przez ściany zewnętrzne (strefa II)	8,51
Przenikanie ciepła przez strop poddasza	7,08
Przenikanie ciepła przez podłogę na gruncie	5,91
Przenikanie ciepła przez drzwi i bramy wjazdowe	3,47
Przenikanie ciepła przez schody poddasza	2,78
Przenikanie ciepła przez ściany strefy II do gruntu	2,07
Przenikanie ciepła przez strop pod tarasem	1,68
Przenikanie ciepła przez ścianę wewnętrzną poddasza	0,25

Największym składnikiem w stratach jest ciepło niezbędne do podgrzania powietrza wentylacyjnego (tab. 2). Wynika to ze stosunkowo dobrej izolacyjności termicznej przegród oraz niewystarczającej szczelności stolarki okiennej i drzwiowej. Wśród strat na drodze przenikania znacząca jest wymiana ciepła przez okna, ściany zewnętrzne, strop między kondygnacją ogrzewaną a poddaszem oraz podłogę na gruncie.

Tab. 3. Wskaźniki oceny energetycznej (Wieczorkiewicz, 2014)

Opis	Wartość
Wypadkowy współczynnik przenikania ciepła budynku, [W/(m ² K)]: $U_B = \frac{H_{Tr}}{A}$	0,55
Wskaźnik sezonowego zapotrzebowania na ciepło użyteczne do ogrzewania (EU), [kWh/(m ² rok)]	88,0
Wskaźnik sezonowego zapotrzebowania na energię końcową do ogrzewania (EK), [kWh/(m ² rok)]	107,7

Wskaźnik sezonowego zapotrzebowania na nieodnawialną energię pierwotną do ogrzewania i przygotowania c.w.u. (EP), [kWh/(m ² rok)]	135,5
--	-------

Wypadkowy współczynnik przenikania ciepła przez przenikanie budynku świadczy o średniej jakości izolacyjności przegród zewnętrznych, jednakże izolacyjność termiczną obudowy stref ogrzewanych (I oraz II) poprawia fakt, że budynek jest ostatnim segmentem w zabudowie szeregowej (rys. 1). Wskaźniki rocznego zapotrzebowania na energię użyteczną, końcową i pierwotną (tab. 3) nie wskazują na potrzebę racjonalizacji użytkowania energii do ogrzewania.

Stan instalacji przygotowania ciepłej wody użytkowej oceniono jako dobry. Niemniej jednak decydent poprosił o ocenę możliwych do uzyskania efektów działań termomodernizacyjnych.

ZAKRES TERMOMODERNIZACJI

Zakres termomodernizacji określono po dokonaniu analizy bilansu cieplnego oraz wskaźników oceny energetycznej, a także uzgodnieniach z inwestorem. Spośród szeregu standardowych zabiegów termomodernizacyjnych w dalszej analizie uwzględniono:

- wymianę stolarki okiennej,
- poprawę izolacyjności termicznej ścian zewnętrznych w I strefie o regulowanej temperaturze,
- poprawę izolacyjności termicznej ścian zewnętrznych w II strefie o regulowanej temperaturze,
- poprawę izolacyjności termicznej stropu nad ostatnią ogrzewaną kondygnacją,
- wymianę źródła ciepła.

Ponadto ograniczono całkowity koszt inwestycyjny zabiegów termomodernizacyjnych do 20 000 zł.

Ze względu na konstrukcję budynku oraz rozmieszczenie pomieszczeń wykluczono możliwość zastosowania wentylacji mechanicznej z odzyskiem ciepła.

OPTIMALIZACJA WIELOKRYTERIALNA

Kryteria

Do oceny rozwiązań przyjęto kryteria ekonomiczne:

- prosty czas zwrotu inwestycji (SPBT)

$$f_1(\mathbf{x}) = \text{SPBT}(\mathbf{x}) = \frac{J_0}{C_0} \quad (1)$$

- zaktualizowana wartość inwestycji netto (NPV)

$$f_2(\mathbf{x}) = \text{NPV}(\mathbf{x}) = \sum_{t=0}^N \frac{CF_t}{(1-r)^t} \quad (2)$$

- zdyskontowany czas zwrotu nakładów inwestycyjnych (DPBT) oraz efektywności energetycznej

$$f_3(\mathbf{x}) = \text{DPBT}(\mathbf{x}) = \frac{J_0}{\sum_{i=0}^N \frac{CF_t}{(1-r)^t}} \quad (3)$$

- wskaźnik rocznego zapotrzebowania na energię końcową do ogrzewania (EK)

$$f_4(\mathbf{x}) = \text{EK}(\mathbf{x}) = \frac{Q_K(\mathbf{x})}{A_f} \quad (4)$$

- wskaźnik rocznego zapotrzebowania na energię pierwotną do ogrzewania i przygotowania c.w.u. (EP)

$$f_5(\mathbf{x}) = \text{EP}(\mathbf{x}) = \frac{Q_P(\mathbf{x})}{A_f} \quad (5)$$

W przypadku drugiego kryterium (NPV) poszukiwane jest nieujemne maksimum funkcji. We wszystkich pozostałych przypadkach poszukiwane są minima funkcji celu.

Zmienne decyzyjne

Wektor zmiennych decyzyjnych przyjmuje postać:

$$\mathbf{x} = \{x_1; x_2; x_3; x_4; x_5\}$$

Zmienne decyzyjne są dyskretne i zostały zdefiniowane w poszczególnych rodzajach zabiegów termomodernizacyjnych, i tak w przypadku:

- wymiany stolarki okiennej, poprzez współczynnik przenikania ciepła nowych okien:

$$x_1 = \{1,30; 0,90; 0,73\}, [W/(m^2K)]$$

- poprawy izolacyjności termicznej ścian zewnętrznych I strefy, poprzez grubość dodatkowej warstwy izolacji termicznej:

$$x_2 = \{0,06; 0,08; 0,10; 0,12\}, [m]$$

- poprawy izolacyjności termicznej ścian zewnętrznych II strefy, poprzez grubość dodatkowej warstwy izolacji termicznej:

$$x_3 = \{0,06; 0,08; 0,10; 0,12\}, [m]$$

- poprawy izolacyjności termicznej stropu nad ostatnią ogrzewaną kondygnacją poprzez grubość dodatkowej warstwy izolacji termicznej:

$$x_4 = \{0,15; 0,20; 0,25\}, [m]$$

- wymiany źródła ciepła poprzez przyjęcie rodzaju źródła ciepła:

$x_5 = \{$ kocioł gazowy z zamkniętą komorą spalania;
kocioł gazowy z otwartą komorą spalania+
kominek 10% Q_h ;
kocioł gazowy z otwartą komorą spalania+
kominek 20% Q_h $\}$.

Metoda rozwiązania

Zadanie optymalizacji wielokryterialnej podzielono na dwa podzadania.

W pierwszym kroku, dla każdej z pięciu zmiennych decyzyjnych, wybrano te wartości, dla których pierwsza funkcja celu (SPBT, tj. prosty czas zwrotu) przyjmuje wartości najmniejsze. Wyniki obliczeń zestawiono w tabelach 4 – 8.

Tab. 4. Wymiana okien - prosty czas zwrotu (SPBT), (Wieczorkiewicz, 2014)

Zmienna decyzyjna x_1	Prosty czas zwrotu (SBPT)
[W/(m ² K)]	[lat]
1,30	38,1
0,90	52,4
0,73	39,4

Tab. 5. Poprawa izolacyjności termicznej ścian zewnętrznych I strefy (Wieczorkiewicz, 2014)

Zmienna decyzyjna x_2	Prosty czas zwrotu (SBPT)
[m]	[lat]
0,06	20,52
0,08	19,74
0,10	19,35
0,12	19,92

Tab. 6. Poprawa izolacyjności termicznej ścian zewnętrznych II strefy (Wieczorkiewicz, 2014)

Zmienna decyzyjna x_3	Prosty czas zwrotu (SBPT)
[m]	[lat]
0,06	22,01
0,08	21,69
0,10	21,79
0,12	23,11

Tab. 7. Poprawa izolacyjności termicznej stropu nad ostatnią ogrzewaną kondygnacją (Wieczorkiewicz, 2014)

Zmienna decyzyjna x_4	Prosty czas zwrotu (SBPT)
[m]	[lat]
0,15	3,88
0,20	4,36
0,25	4,90

Tab. 8. Wymiana źródła ciepła (Wieczorkiewicz, 2014)

Zmienna decyzyjna x_5	(SBPT)
[W/(m ² K)]	[lat]
kocioł gazowy z zamkniętą komorą spalania	13,25
istniejący kocioł gazowy + kominek 10% Q _h	27,47
istniejący kocioł gazowy + kominek 20% Q_h	13,73

W drugim kroku, w uzgodnieniu z inwestorem, określono sześć różnych wariantów zabiegów termomodernizacyjnych, tak aby łączny koszt inwestycji nie przekroczył 20 000zł. Dla tak zdefiniowanych nowych zmiennych decyzyjnych, tj. poszczególnych wariantów, wyznaczono wartości funkcji celu. Następnie określono zbiór rozwiązań niezdominowanych. Maksymalne wartości funkcji celu w zbiorze rozwiązań niezdominowanych posłużyły do określenia wartości kryteriów w znormalizowanej przestrzeni funkcji celów:

$$f_i^*(z) = \frac{f_i(z)}{f_i^{\max}(z)} \quad (6)$$

W każdym z rozpatrywanych przypadków rozwiązanie preferowane wyznaczano metodą funkcji metrycznej, jako najbliższej położone od punktu idealnego w bezwymiarowej przestrzeni funkcji celów. Punkt idealny (Id) wyznaczają minimalne wartości kryteriów w bezwymiarowej przestrzeni funkcji celów. Na tej podstawie, wspólnie z inwestorem wybrano warianty termomodernizacji. Zestawiono je w tab. 9.

W dalszej kolejności rozważono różne zadania optymalizacji dwu- oraz trójkryterialnej. Wartości kryteriów dla rozwiązań niezdominowanych w bezwymiarowej przestrzeni funkcji celów zestawiono w tabelach 10 – 12.

Inwestor po zapoznaniu się z wynikami analizy pierwszego kroku (tylko na podstawie wartości prostego czasu zwrotu) oraz na podstawie własnych preferencji i doświadczenia zdecydował się na pierwszy wariant zabiegów termomodernizacyjnych (z_1).

Tab. 9. Koszty, uzyskane roczne oszczędności, wskaźniki ekonomiczne i energetyczne (Wieczorkiewicz, 2014)

z	Wariant przedsięwzięcia termomodernizacyjnego	Koszt inwestycji [zł]	Roczne oszczędności [zł]	SPBT [lat]	NPV [zł]	DPBT [lat]	EK $\left[\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{rok}}\right]$	EP $\left[\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{rok}}\right]$
z_1	Poprawa izolacyjności termicznej stropu poddasza, zmiana źródła ciepła oraz montaż dodatkowego źródła ciepła (WYBÓR INWESTORA)	19019,04	1371,68	13,87	-4906,49	21,16	111,38	97,11
	Zmiana źródła ciepła, poprawa izolacyjności termicznej strefy II oraz poprawa izolacyjności termicznej stropu poddasza	14215,38	1229,26	11,56	-1568,05	16,13	93,62	107,24
z_3	Poprawa izolacyjności termicznej stropu poddasza, poprawa izolacyjności termicznej strefy I oraz poprawa izolacyjności termicznej strefy II	19042,24	1428,65	13,33	-4343,58	19,89	89,46	102,66
	Wymiana stolarki okiennej, poprawa izolacyjności termicznej strefy II oraz poprawa izolacyjności termicznej stropu poddasza	17086,48	930,78	18,36	-7509,92	35,60	99,85	114,10
z_5	Montaż dodatkowego źródła ciepła, poprawa izolacyjności termicznej strefy II oraz poprawa izolacyjności termicznej stropu poddasza	12945,48	1003,70	12,90	-2618,72	18,92	118,35	105,76
	Zmiana źródła ciepła + montaż dodatkowego źródła ciepła	17269,90	999,98	17,27	-6981,41	31,25	121,12	105,05

Tab. 10. Zbiór kompromisów, rozwiązanie preferowane oraz punkt idealny w bezwymiarowej przestrzeni funkcji celów (kryteria: EK, EP), (Wieczorkiewicz, 2014)

z	Wariant przedsięwzięcia termomodernizacyjnego	EK [$\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\text{rok}}$]	EP [$\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\text{rok}}$]	Odległość od punktu idealnego
z1	Poprawa izolacyjności termicznej stropu poddasza + zmiana źródła ciepła + montaż dodatkowego źródła ciepła	1,00	0,95	0,20
z3 (Pref.)	Poprawa izolacyjności termicznej stropu poddasza, poprawa izolacyjności termicznej strefy I oraz oprawa izolacyjności termicznej strefy II (rozwiązanie preferowane)	0,80	1,00	0,05
	Punkt idealny (Id)	0,80	0,95	

Tab. 11. Zbiór kompromisów, rozwiązanie preferowane oraz punkt idealny w bezwymiarowej przestrzeni funkcji celów (kryteria: SPBT, EK), (Wieczorkiewicz, 2014)

z	Wariant przedsięwzięcia termomodernizacyjnego	SPBT [lat]	EK [$\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\text{rok}}$]	Odległość od punktu idealnego
z2 (Pref.)	Zmiana źródła ciepła, poprawa izolacyjności termicznej strefy II oraz poprawa izolacyjności termicznej stropu poddasza (rozwiązanie preferowane)	0,87	1,00	0,04
z3	Ocieplenie stropu poddasza, poprawa izolacyjności termicznej strefy I oraz poprawa izolacyjności termicznej strefy II	1,00	0,96	0,13
	Punkt idealny (Id)	0,87	0,96	

Tab. 12. Zbiór kompromisów, rozwiązanie preferowane oraz punkt idealny w bezwymiarowej przestrzeni funkcji celów (kryteria: SBPT, EK, EP), (Wieczorkiewicz, 2014)

z	Wariant przedsięwzięcia termomodernizacyjnego	SPBT [lat]	EK [$\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\text{rok}}$]	EP [$\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2\text{rok}}$]	Odległość od punktu idealnego
z1	Poprawa izolacyjności termicznej stropu poddasza, zmiana źródła ciepła oraz montaż dodatkowego źródła ciepła	1,00	0,94	0,91	0,25
z2 (Pref.)	Zmiana źródła ciepła, poprawa izolacyjności termicznej strefy II oraz poprawa izolacyjności termicznej stropu poddasza (rozwiązanie preferowane)	0,83	0,79	1,00	0,10
z3	Poprawa izolacyjności termicznej stropu poddasza, poprawa izolacyjności termicznej strefy I oraz poprawa izolacyjności termicznej strefy II	0,96	0,76	0,96	0,14
z5	Montaż dodatkowego źródła ciepła, poprawa izolacyjności termicznej strefy II oraz poprawa izolacyjności termicznej stropu poddasza	0,93	1,00	0,99	0,27
	Punkt idealny (Id)	0,83	0,76	0,91	

WNIOSKI

Wszystkie inwestycje spełniają wymagania decydenta, ponieważ koszt każdego wariantu inwestycji jest niższy niż 20 000zł (tab.12).

Kryteria ekonomiczne (SPBT, NPV, DPBT) są kooperacyjne, co oznacza, że rozwiązanie najlepsze względem jednej funkcji celu jest również najlepsze w pozostałych przypadkach. Ponadto tak samo porządkują warianty rozwiązań, (tab. 12).

Kryteria energetyczne (EK, EP) są konfliktowe, zatem celowa jest optymalizacja uwzględniająca te dwa kryteria (tab.10). W tym przypadku do zbioru kompromisów należą dwa warianty, tj. pierwszy (z₁) oraz trzeci (z₃).

Rozwiązaniem preferowanym jest wariant z₃ uwzględniający:

- poprawę izolacyjności termicznej stropu nad ostatnią kondygnacją ogrzewaną (dodatkowa warstwa izolacji termicznej z wełny mineralnej o grubości 0,15 m),

- poprawę izolacyjności termicznej ścian zewnętrznych strefy I (dodatkowa warstwa izolacji termicznej z płyt ze styropianu o grubości 0,12 m),
- poprawę izolacyjności termicznej ścian zewnętrznych strefy II (dodatkowa warstwa izolacji termicznej z płyt ze styropianu o grubości 0,08 m).

Inwestor stwierdził, że dla niego istotne są kryteria opisujące efektywność inwestycji (np. SBPT) oraz nakłady ponoszone na eksploatację. Nakłady te w pewien sposób można uzależnić od wskaźnika sezonowego zapotrzebowania na energię końcową do ogrzewania (EK). W zadaniu optymalizacji dwukryterialnej SPBT-EK określono, że do zbioru kompromisów należą dwa warianty działań (z_2 i z_3).

W tym przypadku rozwiązaniem preferowanym jest wariant nr z_2 uwzględniający:

- wymianę źródła ciepła na kocioł gazowy z zamkniętą komorą spalania,
- poprawę izolacyjności termicznej ścian zewnętrznych strefy II (dodatkowa warstwa izolacji termicznej z płyt ze styropianu o grubości 0,08 m),
- poprawę izolacyjności termicznej stropu nad ostatnią kondygnacją ogrzewaną (dodatkowa warstwa izolacji termicznej z wełny mineralnej o grubości 0,15 m).

Zadanie optymalizacji trójkryterialnej rozwiązano poszukując minimum pierwszej (SPBT), czwartej (EK) oraz piątej funkcji celu (EP). Wyniki zamieszczono w tab. 12. Do zbioru kompromisów należą cztery warianty: z_1 , z_2 , z_3 oraz z_5 . Rozwiązaniem preferowanym jest ponownie wariant z_2 .

W rezultacie przeprowadzonej optymalizacji do realizacji zalecono drugi wariant zabiegów termomodernizacyjnych.

Tab. 13. Porównanie wybranych wskaźników

Opis	A	z_2	z_1
Roczne koszty eksploatacyjne [zł]	5713,61	4484,35	4341,93
Koszt inwestycyjny [zł]	-	14215,38	19019,04
SBPT [lat]	-	11,56	13,87
DPBT [lat]	-	16,13	21,16
EK [kWh/(m ² rok)]	119,28	93,62	111,38
EP [kWh/(m ² rok)]	135,47	107,24	97,11

W tab. 13 porównano stan istniejący (kolumna A), rozwiązanie preferowane (z_2) oraz wariant wybrany przez decydenta (z_1).

Wariant preferowany ma gorszy wskaźnik rocznego zapotrzebowania na nieodnawialną energię pierwotną do ogrzewania i przygotowania c.w.u. Wynika to z przyjętych, zgodnie z Rozporządzeniem (2008), wartości współczynników nakładu do wytworzenia energii z danego nośnika (np. w przypadku gazu jest to 1,1, a w przypadku biopaliwa 0,2).

Rozwiązanie preferowane charakteryzuje się nieznacznie wyższymi rocznymi kosztami eksploatacyjnymi od rozwiązania wybranego przez decydenta, tj.

o 142,42zł, co stanowi około 3,3% tych kosztów. Niemniej jednak koszt inwestycyjny jest niższy o 25,3%.

Istotna różnica na korzyść rozwiązania preferowanego (nr 2) zachodzi przy ocenie ekonomicznej. Zdyskontowany czas zwrotu nakładów inwestycyjnych jest o 23,8% krótszy. Również wskaźnik rocznego zapotrzebowania na energię końcową do ogrzewania jest korzystniejszy w wariantcie preferowanym (o 15,9%).

Jeżeli decydent wybierze do realizacji inne rozwiązanie niż preferowane, to oznacza, że nie sprecyzował swoich wymagań na etapie formułowania zadania optymalizacji wielokryterialnej.

Wariant z_4 , uwzględniający wymianę okien, w żadnym z rozważanych przypadków nie należał do zbioru rozwiązań niezdominowanych.

We wszystkich wariantach wartość bieżąca netto inwestycji (NPV) jest ujemna (tab. 5), co oznacza, że po uwzględnieniu dynamicznego rachunku ekonomicznego żadna rozważana inwestycja nie jest opłacalna. Jednakże takiego wyniku można było oczekiwać po dokonaniu analizy wskaźników oceny energetycznej. Budynek można zaliczyć do budynków średnioergochłonnych pod względem zapotrzebowania na energię do ogrzewania. Prosty czas zwrotu (SPBT) rozpatrywanych wariantów jest dłuższy niż 10 lat.

Można zatem jednoznacznie stwierdzić, że żaden rozważany wariant termomodernizacji nie ma ekonomicznego uzasadnienia.

SPIS SYMBOLI

A	Pole powierzchni obudowy zewnętrznej liczone według wymiarów zewnętrznych	m ²
A _f	pole powierzchni przestrzeni ogrzewanej	m ²
C ₀	roczne zyski pieniężne uzyskane w wyniku przeprowadzonej inwestycji	zł
CF _t	przepływ pieniężny obliczony na końcu roku t	zł
DPBT	zdyskontowany czas zwrotu nakładów inwestycyjnych	lat
EK	wskaźnik sezonowego zapotrzebowania na energię końcową do ogrzewania	kWh/(m ² rok)
EP	wskaźnik rocznego zapotrzebowania na nieodnawialną energię pierwotną do ogrzewania i przygotowania c.w.u.	kWh/(m ² rok)
EU	wskaźnik sezonowego zapotrzebowania na ciepło użyteczne do ogrzewania	kWh/(m ² rok)
$f_i(\mathbf{x})$	wartość i -tej funkcji celu	
$f_i^{\max}(\mathbf{x})$	maksymalna wartość i -tej funkcji celu w zbiorze rozwiązań niezdominowanych	

$f_i^*(\mathbf{x})$	znormalizowana wartość i -tej funkcji celu		PN-B-02020:1991 <i>Ochrona cieplna budynków – Wymagania i obliczenia</i> (wycofana: 09-12-1999)
H_{Tr}	współczynnik przenoszenia ciepła przez przenikanie	W/K	
J_0	nakłady inwestycyjne	zł	PN-EN ISO 6946:2008 <i>Komponenty budowlane i elementy budynku - Opór cieplny i współczynnik przenikania ciepła - Metoda obliczania</i>
N	całkowita liczba lat eksploatacji inwestycji (w przypadku działań termomodernizacyjnych przyjęto okres 15 lat)	lat	PN-EN ISO 10077-1:2007 <i>Cieplne właściwości użytkowe okien, drzwi i żaluzji - Obliczanie współczynnika przenikania ciepła - Część 1: Postanowienia ogólne</i>
NPV	zaktualizowana wartość inwestycji netto	zł	
Pref.	rozwiązanie preferowane		
Q_h	sezonowe zapotrzebowanie na ciepło użyteczne do ogrzewania	kWh/s.o.	Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 6 listopada 2008 r. w sprawie metodologii obliczania charakterystyki energetycznej budynku stanowiącej samodzielną całość techniczno-użytkową oraz sposobu sporządzania i wzorów świadectw ich charakterystyki energetycznej, Dz.U. 2008 nr 201 poz. 1240
Q_K	sezonowe zapotrzebowanie na energię końcową do ogrzewania	kWh/s.o.	
Q_P	sezonowe zapotrzebowanie na energię pierwotną do ogrzewania i przygotowania c.w.u.	kWh/s.o.	
r	stopa dyskontowa		
t	wybrany kolejny rok („t”) eksploatacji	rok	Rozporządzenie Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej z dnia 5 lipca 2013 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie, Dz.U. 2013 poz. 926
SPBT	prosty czas zwrotu inwestycji	lat	
U_B	wypadkowy współczynnik przenikania ciepła budynku	W/(m ² K)	
\mathbf{x}, \mathbf{y}	wektory zmiennych decyzyjnych		Wieczorkiewicz A., 2014, <i>Analiza celowości działań termomodernizacyjnych na przykładzie budynku jednorodzinnego średnioenergochłonnego</i> , Dyplomowa Praca Magisterska (promotor: H. Jędrzejuk), Wydział MEiL, Politechnika Warszawska, Warszawa

LITERATURA CYTOWANA

Marks W. (red.), 2001, *Optymalizacja w fizyce budowli*, Sekcja Fizyki Budowli KILiW PAN, AnnGraf s.c. Łódź, Łódź