

dr inż. Adam Świącicki¹⁾

Optymalizacja wymiany okien z uwzględnieniem efektu solarnego

Optimization of window replacement taking into consideration the solar effect

DOI: dx.doi.org/10.15199/33.2014.12.18

Streszczenie. Zgodnie z procedurą optymalizacyjną przegród przezroczystych, zaproponowaną w rozporządzeniu w sprawie formy i zakresu audytu energetycznego i remontowego, oszczędności z tytułu termomodernizacji tego typu przegród wynikają z redukcji strumienia ciepła na drodze przewodzenia oraz eliminacji niepożądanego strumienia powietrza infiltracyjnego. W rzeczywistości efekt energetyczny jest wypadkową wymienionych składowych oraz zysków słonecznych przez powierzchnie przezroczyste. W artykule przedstawiono modyfikację obowiązujących zasad optymalizacji przegród przezroczystych o dotychczas pomijany człon „solarny”, z jednoczesną oceną zabiegu na podstawie analizy konkretnego przykładu.

Słowa kluczowe: termomodernizacja okien, optymalizacja przegród przezroczystych, zyski słoneczne.

Wykorzystanie nowoczesnych, energooszczędnych technologii wznoszenia, termomodernizacji i zarządzania budynkiem nie może się obyć bez dogłębnej analizy techniczno-ekonomicznej.

W przypadku termomodernizacji zastosowanie procedur optymalizacyjnych pozwala zaprojektować najkorzystniejszy zakres prac w kontekście oczekiwanych efektów energetycznych, ekonomicznych i ekologicznych. W Polsce wyznacznikiem planowania działań termomodernizacyjnych jest rozporządzenie w sprawie formy i zakresu audytu energetycznego i remontowego, określające tok postępowania oraz szczegółową procedurę analizy różnego typu usprawnień. Procedura optymalizacyjna poszczególnych zabiegów bazuje na statycznej metodzie analizy efektywności ekonomicznej, z wykorzystaniem wskaźnika SPBT (*Simply Pay Back Time*) definiującego okres, po jakim zwraca się inwestycja, traktując wartość nabywczą pieniądza jako stałą w czasie [1]:

$$SPBT = \frac{N}{\Delta O_r} \quad [\text{lata}]$$

gdzie:

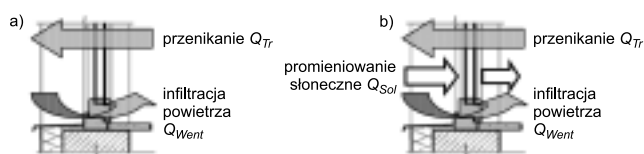
N – koszt robót związanych z realizacją inwestycji [zł];
 ΔO_r – roczna oszczędność kosztów energii wynikająca z realizacji inwestycji [zł/rok].

Najmniejsza wartość SPBT spośród rozpatrywanych wariantów realizacji danego przedsięwzięcia wskazuje optymalne rozwiązanie. Proponowana w rozporządzeniu formuła optymalizacji przedsięwzięć modernizacji przegród przezroczystych uwzględnia bilans energetyczny komponentu, którego składowe przedstawiono na rysunku 1.

Sprowadzenie ogólnej postaci bilansu energetycznego przegrrody przezroczystej do sumy strat ciepła na drodze

Abstract. According to the procedure of transparent partitioning optimization, proposed in the regulation on the form and scope of the energy and renovation audit, savings due to thermomodernisation of this type of partitioning occur due to the reduction of heat flow by conduction and elimination of unwanted flow of infiltration air. In reality, however, the energy effect is a result of the above components and solar gains through transparent surfaces. This paper presents a modification of the existing rules of optimization of transparent partitions by previously overlooked „Solar” segment, with simultaneous evaluation of such procedure on the basis of a specific example.

Keywords: thermomodernisation of windows, transparent partitions optimization, solar gains.



Rys. 1. Bilans energetyczny przeszklenia; wariant: a) wykorzystany w aktualnej procedurze optymalizacyjnej [2]; b) zmodyfikowany

przenikania oraz ciepła koniecznego do podgrzania powietrza infiltrującego przez rozpatrywany komponent (jeśli składnik wentylacyjny w ogóle występuje) znajduje odzwierciedlenie w opisie wskaźnika SPBT [2]:

$$SPBT = \frac{N_{Ok} + N_W}{\Delta O_{rOk} + \Delta O_{rW}} \quad [\text{lata}]$$

gdzie:

N_{Ok} – koszt robót związanych z wymianą przegrrody przezroczystej [zł];
 N_W – koszt robót związanych z modernizacją wentylacji [zł];
 ΔO_{rOk} – roczna oszczędność kosztów energii wynikająca z wymiany przegrrody przezroczystej [zł/rok];
 ΔO_{rW} – roczna oszczędność kosztów energii wynikająca z modernizacji wentylacji [zł/rok].

Z punktu widzenia proponowanej modyfikacji obowiązującej procedury istotny jest człon wyrażający roczną oszczędność kosztów energii. W obecnej postaci formuły optymalizacyjnej efekt finansowy wynika z redukcji strumienia ciepła traconego przez przenikanie przez całkowitą powierzchnię przegrrody przezroczystej oraz eliminacji niepożądanego strumienia powietrza wentylacyjnego [2] zgodnie z zależnością:

$$\Delta O_{rOk} + \Delta O_{rW} = (x_0 \cdot Q_0 \cdot O_{0z} - x_1 \cdot Q_1 \cdot O_{1z}) + 12 \cdot (y_0 \cdot q_0 \cdot O_{0m} - y_1 \cdot q_1 \cdot O_{1m}) + 12 \cdot (Ab_0 - Ab_1) \quad [\text{zł/rok}]$$

gdzie:

x_0, x_1 – udział n -tego źródła w zapotrzebowaniu na ciepło przed i po wykonaniu ulepszenia termomodernizacyjnego;
 Q_0, Q_1 – roczne zapotrzebowanie na ciepło na pokrycie strat ciepła przez przenikanie oraz infiltrację (lub wentylację) przed i po wykonaniu przedsięwzięcia termomodernizacyjnego [GJ/rok];

¹⁾ Politechnika Białostocka, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska; e-mail: a.swiecicki@pb.edu.pl

O_{0z}, O_{1z} – opłata zmienna za jednostkę energii przed i po wykonaniu termomodernizacji w przypadku n -tego źródła [zł/GJ];
 Y_0, Y_1 – udział n -tego źródła w zapotrzebowaniu na moc cieplną przed i po wykonaniu termomodernizacji;
 q_0, q_1 – zapotrzebowanie na moc cieplną na pokrycie strat ciepła przez przenikanie przed i po wykonaniu termomodernizacji [MW];
 O_{0m}, O_{1m} – stała opłata miesięczna za jednostkę mocy przed i po wykonaniu termomodernizacji dla n -tego źródła [zł/(MW·m·c)];
 Ab_0, Ab_1 – miesięczna opłata abonamentowa przed i po wykonaniu termomodernizacji [zł/m·c].

Roczne zapotrzebowanie na ciepło Q przegrody przezroczystej zdefiniowane jest jako suma energii cieplnej traczonej przez przenikanie Q_{Tr} oraz ciepła koniecznego do podgrzewania powietrza wentylacyjnego Q_{Went} :

$$Q = Q_{Tr} + Q_{Went} \text{ [GJ/rok]}$$

Modyfikacja obecnej formuły optymalizacji przegród przezroczystych

Bilans energetyczny przegrody przezroczystej kształtowany jest w rzeczywistości również przez składową solarne zysków energii cieplnej (rysunek 1b). Jest to rekompensata za dodatkowe straty energii generowane wskutek wprowadzenia w obudowę budynku komponentów przezroczystych o zazwyczaj gorszych właściwościach termoizolacyjnych niż przegrody pełne. Zapotrzebowanie na ciepło pokrywające zbilansowane straty energii przez przegrody przezroczyste można przedstawić zależnością:

$$Q = Q_{Tr} + Q_{Went} - Q_{Sol} \text{ [GJ/rok]}$$

gdzie:

Q_{Sol} – składowa solarne zysków energii cieplnej [GJ/rok].

Ilość darmowej energii cieplnej, która może być zaabsorbowana na potrzeby ogrzewania budynku w trakcie sezonu grzewczego, opisuje zależność:

$$Q_{Sol} = \eta_{H,gn} \cdot \sum_j I_{Sj} \cdot \sum_n A_{Snj}$$

gdzie:

$\eta_{H,gn}$ – współczynnik efektywności wykorzystania zysków;

I_{Sj} – energia całkowitego promieniowania słonecznego w trakcie sezonu grzewczego na jednostkę n -tej powierzchni o j -tej orientacji [J/m²];

A_{Sn} – n -ta efektywna powierzchnia zbierająca j -tej orientacji [m²].

Efektywna powierzchnia zbierająca jest przelicznikiem promieniowania słonecznego operującego na zewnętrznej, nieosłoniętej powierzchni obudowy budynku, na energię cieplną transmitowaną do jego strefy wewnętrznej, wg zależności [3]:

$$A_s = A \cdot Z \cdot C \cdot g \cdot k_0$$

gdzie:

A – powierzchnia brutto elementu zbierającego, np. powierzchnia okna w świetle ościeży [m²];

Z – współczynnik zacielenia elementu zbierającego;

C – współczynnik ramy wyrażający udział powierzchni przezroczystej w całkowitej powierzchni elementu zbierającego, np. powierzchnia szyby/powierzchni okna;

g – współczynnik transmisji (przepuszczania) promieniowania słonecznego;

k_0 – współczynnik adaptacyjny I_s w przypadku nachylenia przeszklenia względem poziomu $\neq 90^\circ$.

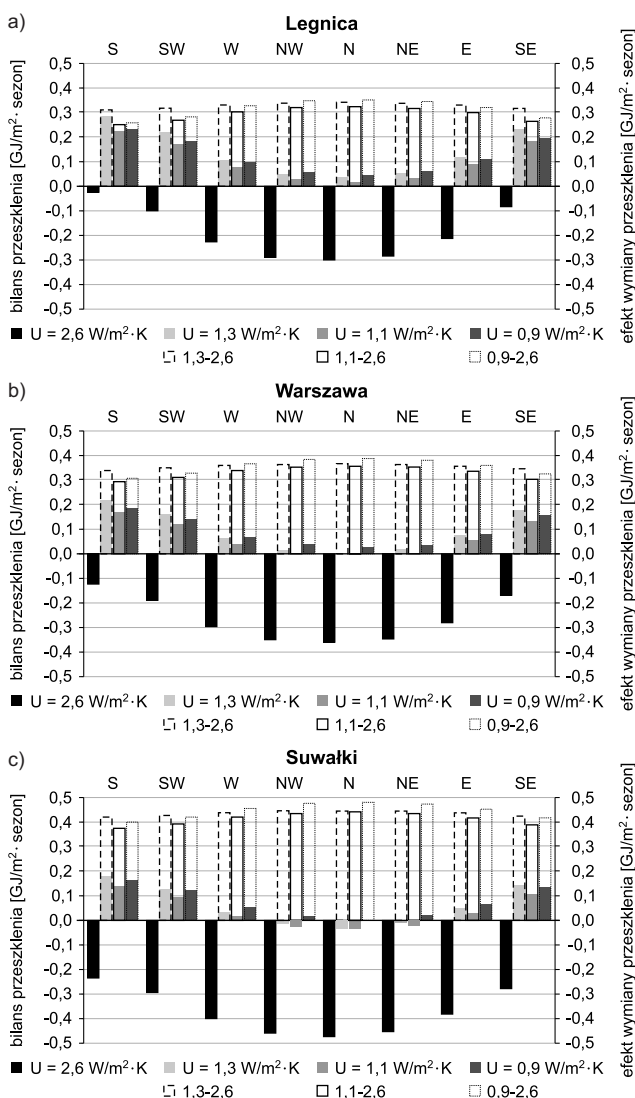
Duży wpływ na efekty termomodernizacji ma lokalizacja decydująca o: cenach energii; kosztach realizacji zabiegu; warunkach klimatycznych (temperatura powietrza zewnętrznego i długość sezonu grzewczego); nasłonecznieniu. Wielkość zysków energii cieplnej od promieniowania słonecznego zależy od:

- lokalizacji obiektu na mapie solarnej Polski;
- orientacji i pochylenia powierzchni przezroczystej;
- zacielenia (inne obiekty lub elementy konstrukcji własnej);

– konstrukcji elementu przezroczystego.

Porównując ilość całkowitego promieniowania słonecznego dla przykładowych stacji aktywności, np. Legnica, Warszawy oraz Suwałk, łatwo zauważyć występujące różnice w nasłonecznieniu, które dla przywołanych lokalizacji dochodzą do 15% w ciągu roku (Warszawa – Suwałki) oraz ok. 10% w sezonie grzewczym (Suwałki – Warszawa) [5]. Różnice mogą rzutować na wynik optymalizacji przegród przezroczystych, a co za tym idzie sugerują bezcelowość wprowadzenia reprezentatywnej wartości nasłonecznienia dla całego obszaru Polski.

Zyski słoneczne wpływają korzystnie na bilans energetyczny przegród przezroczystych. Proporcja stałej składowej strat ciepła do zmiennego czynnika solarne zależy od orientacji przegrody względem stron świata. Ekspozycje południowe poddawane są oddziaływaniu promieniowania bezpośredniego i rozproszonego, a północne – jedynie rozproszonego. Bilans energetyczny przeszklenia jest zatem zdecydowanie korzystniejszy w przypadku orientacji południowej (rysunek 2 – słupki w odcieniach szarości).



Rys. 2. Bilans przeszklenia oraz efekt energetyczny jego termomodernizacji (z pominięciem infiltracji) w przypadku wybranych lokalizacji: a) Legnica; b) Warszawa; c) Suwałki [3, 4, 5]

W przypadku wymiany przeszklenia istotna jest uzyskiwana oszczędność energii będąca różnicą w bilansie energetycznym stanu istniejącego i po termomodernizacji, a ta okazuje się największa w przypadku elewacji północnej (rysunek 2 – słupki białe przy U wyjściowym 2,60 W/m²·K). Różnica zysków słonecznych stanu wyjściowego i zoptymalizowanego przeszklenia przyjmuje wartość minimalną, co przy stałej, niezależnej od ekspozycji redukcji strat ciepła, przekłada się na maksimum efektu energetycznego. O efektywności energetycznej różnie zorientowanych powierzchni przeszklonych decyduje przepuszczalność promieniowania słonecznego, która spada ze wzrostem izolacyjności cieplnej. Przybliżone kryterium dodatniego bilansu uwzględniającego straty przez przenikanie i zyski słoneczne przedstawia wzór:

$$\frac{U}{g \cdot C} \leq \frac{\eta_{H,gn} \cdot Z \cdot k_0 \cdot I_{Sj}}{24 \cdot S_d}$$

gdzie: parametry charakteryzujące element przezroczysty przeciwstawiono czynnikiem niezależnym (lokalizacyjnym).

Przykład optymalizacji

Efekt uwzględnienia czynnika solarnego w procedurze optymalizacyjnej przegród przezroczystych ilustruje zestawienie wyników optymalizacji zabiegu wymiany stolarki okiennej ($U = 2,60$ W/(m²·K) przeprowadzonej w dwóch wariantach: zgodnie z obowiązującą procedurą oraz po jej rozszerzeniu o człon solarny (S/WBiłŚ/2/2013). Symulacja dotyczy budynku zlokalizowanego w: Legnicy; Warszawie oraz Suwałkach, czyli w II, III oraz V strefie klimatycznej (tabela 1). Przyjęto wewnętrzną temperaturę obliczeniową 20 °C oraz powierzchnię jednostkową okien 1 m².

Tabela 1. Charakterystyka klimatu rozpatrywanych lokalizacji budynków [2, 5]

Lokalizacja budynków	θ_e [°C]	Sezon grzewczy [dni]	Stopniodni S_d [K·dzień]	I_{Ssr}^* [Wh/m ²]
Legnica	-18	227	3467,7	327 693
Warszawa	-20	222	3686,0	314 136
Suwałki	-24	252	4434,7	346 157

*) I_{Ssr} – uśredniona wartość I_{Sj}

Adekwatnie do lokalizacji zróżnicowano koszty energii cieplnej, przyjmując ogrzewanie gazem w grupie taryfowej W-3.6 [6]:

- Legnica – $O_z = 53,37$ zł/GJ; $Ab = 47,44$ zł/m-c;
- Warszawa – $O_z = 50,03$ zł/GJ; $Ab = 56,25$ zł/m-c;
- Suwałki – $O_z = 50,03$ zł/GJ; $Ab = 56,25$ zł/m-c.

W przykładzie rozważono zastąpienie starych, dwuszybowych okien drewnianych nowoczesną stolarką okienną. Charakterystykę przyjętych okien zestawiono w tabeli 2.

Wprowadzenie czynnika solarnego skutkuje zmianą optymalnego wariantu realizacji zabiegu. Jako najlepsze rozwiązanie procedura wskazała okna o współczynniku przenikania ciepła $U = 0,90$ W/m²·K o SPBT odpowiednio 17,26 lat (Legnica), 17,32 lat (Warszawa) oraz 14,40 lat (Suwałki). Po jej modyfikacji o efekt solarny, niezależnie od orientacji i lokalizacji, optimum przypada dla okien o $U = 1,30$ W/m²·K. Zaobserwowano ogólne wydłużenie okresu zwrotu inwestycji. Najmniejszy przyrost SPBT odnotowano w przypadku Suwałk (średnio 1,27 lat), przez Warszawę (średnio 2,03 lat), a największy dla Legnicy (średnio 2,09 lat). W każdym z roz-

Tabela 2. Parametry stolarki okiennej [2, 3]

Parametr	Współczynnik U [W/(m ² ·K)] analizowanych okien			
	2,60 (stare)	1,30	1,10	0,90
g [-]	0,75	0,67	0,55	0,50
C [-]	0,70			
V_{norm} [m ³ /h/m ²]	5,00			
c_r [-]	1,20	1,00	1,00	1,00
c_m [-]	1,35	1,00	1,00	1,00
c_w [-]	1,00	1,00	1,00	1,00
N_{Ok} [zł/m ²]	–	700	750	800

Nakłady N_{Ok} uwzględniają koszt stały wymiany okien w wysokości 100 zł/m²; V_{norm} – strumień powietrza infiltracyjnego; c_r i c_m – współczynniki korekcyjne warunkowane stanem stolarki i sposobem doprowadzenia powietrza wentylacyjnego; c_w – współczynnik oddający stopień ekspozycji budynku na działanie wiatru [2]

patrywanych wariantów termomodernizacji rozkład SPBT przy poszczególnych orientacjach wykazał najkrótszy okres zwrotu dla płaszczyzn zwróconych na północ. Przy wariantcie wymiany przeszklenia na okna o $U = 1,30$ W/m²·K czas zwrotu wyniósł 19,00 (Legnica), 19,04 (Warszawa) oraz 15,51 lat (Suwałki). W przypadku ekspozycji południowej uzyskano SPBT odpowiednio 19,9 (Legnica), 19,81 (Warszawa) oraz 15,92 (Suwałki).

Podsumowanie

Wprowadzenie efektu solarnego do formuły optymalizacyjnej przegród przezroczystych może odbijać się na technicznych aspektach realizacji tego przedsięwzięcia i powodować zmianę najkorzystniejszych parametrów przeszklenia użytego do modernizacji. Skutkuje również ogólnym, nieznacznym wzrostem uzyskanego SPBT względem opcji pomijającej zyski słoneczne. Zgodnie z rozporządzeniem wykonawczym do ustawy „Termo”, mechanizm konstrukcji wariantów termomodernizacji polega na uszeregowaniu zoptymalizowanego zakresu zaproponowanych przedsięwzięć w porządku rosnącego SPBT i dodawaniu do najbardziej opłacalnego kolejnych ulepszeń. Przy małych różnicach w okresach zwrotu poszczególnych ulepszeń już niewielka zmiana SPBT któregośkolwiek z nich może skutkować przetasowaniem kolejności, a tym samym i zakresu poszczególnych wariantów termomodernizacji.

Literatura

- [1] H. Manteuffel-Szoego, Wybrane zagadnienia ekonomiki budownictwa, Warszawa: SGGW, 2006.
- [2] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z 17 marca 2009 r. w sprawie szczegółowego zakresu i formy audytu energetycznego oraz części audytu remontowego, wzorów kart audytów, a także algorytmu oceny opłacalności przedsięwzięcia termomodernizacyjnego.
- [3] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Rozwoju z 3 czerwca 2014 r. w sprawie metodologii obliczeń charakterystyki energetycznej budynku i lokalu mieszkalnego lub części budynku stanowiącej samodzielną całość techn.-użytk. oraz sposobu sporządzania i wzorów świadectw ich charakterystyki energetycznej.
- [4] PN-EN ISO 13790:2009 Energetyczne właściwości użytkowe budynków – Obliczenia zużycia energii do ogrzewania i chłodzenia.
- [5] http://www.mir.gov.pl/budownictwo/rynek_budowlany_i_teknika/efektywnosc_energetyczna_budynkow/typowe_lata_meteorologiczne/strony/start.aspx – strona MliR.
- [6] Stawki za paliwo gazowe: Legnica, Warszawa oraz Suwałki.

Otrzymano 29.07.2014 r.