

PRÓBY OPTIMALIZACJI PARAMETRÓW ENERGETYCZNYCH OKIEN. CZEŚĆ 2 – DOTYCHCZAS WYKONANE PRÓBY OPTIMALIZACJI I AUTORSKI PLAN EKSPERYMENTU

THE TRIALS OF OPTIMIZATION OF THERMAL PARAMETERS OF THE WINDOWS. PART 2 – THE CARRIED OUT TRIALS OF OPTIMIZATION AND ORIGINAL EXPERIMENT'S PLAN

Joanna Borowska

Politechnika Białostocka
Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska
Zakład Podstaw Budownictwa i Fizyki Budowli
ul. Wiejska 45 A
15-351 Białystok
e-mail: j.borowska@doktoranci.pb.edu.pl

Abstract: The paper presents trials of optimization of both energetic and technical parameters of windows that were carried out and described in the literature. In addition, the author presented her original plan of the experiment, an ultimate goal of which is the optimization of thermal parameters of windows. As a result of the calculations, there is a possibility of combining different variants of the energy balance for the fragment of the outer wall with a window.

Keywords: the windows, the energy balance, optimization.

Wprowadzenie

Wiek XXI skłania naukowców i badaczy do szukania takich rozwiązań architektoniczno – budowlanych, by maksymalnie zredukować koszty, jakie są ponoszone na zapotrzebowanie budynków na energię. Takich zabiegów można szukać zarówno na etapie projektowania budynku, jak i termomodernizacji budynków już istniejących. W związku z tym, że lepiej zapobiegać niż leczyć – bardziej opłacalne może okazać się takie zaprojektowanie przegród budynku, by racjonalizować koszty jeszcze zanim zostanie on wzniesiony. W tym celu należy dobrać odpowiednie wymiary przegród i otworów oraz materiały do ich wykonania tak, by osiągnąć jak najkorzystniejsze parametry izolacyjności [1]. Aby tego dokonać, trzeba zoptymalizować parametry badanych elementów budynku, czego wynikiem będą wiarygodne obliczenia pokazujące jak powinny być ukształtowane i wykonane przegrody.

Optymalizacja parametrów okien polega na określeniu bilansu energetycznego dla wycinka przegrody wraz z otworem okiennym, czyli zsumowaniu zysków i strat dla takiego przypadku. Najlepiej, jeśli bilans energetyczny wyjdzie dodatni, wówczas zyski przewyższą straty i wycinek przegrody będzie więcej energii dawał dla budynku niż z niego pozyskiwał. W przeciwnym wypadku dokonana optymalizacja będzie bezsensowna, gdyż po to należy dobrać odpowiednie wskaźniki i

współczynniki oraz zakresy ich zmienności, by uzyskać dodatnią wartość bilansu cieplnego.

Kilkoro badaczy podjęło się tegoż wyzwania – próbowało zoptymalizować parametry stolarki okiennej, jednakże nie wszyscy dokonali tego poprawnie. Niekiedy naukowcy osiągnęli inne cele, niż założone w badaniach, innym razem próbowali wyliczyć wskaźniki ekonomiczne, a posługiwali się w swoich manuskryptach określeniem optymalizacji parametrów energetycznych stolarki budowlanej. Zdarzało się też tak, że w przeprowadzonych badaniach autor nie zwrócił uwagi na wszystkie niezbędne zmienne i odwołał się tylko do kilku wybranych.

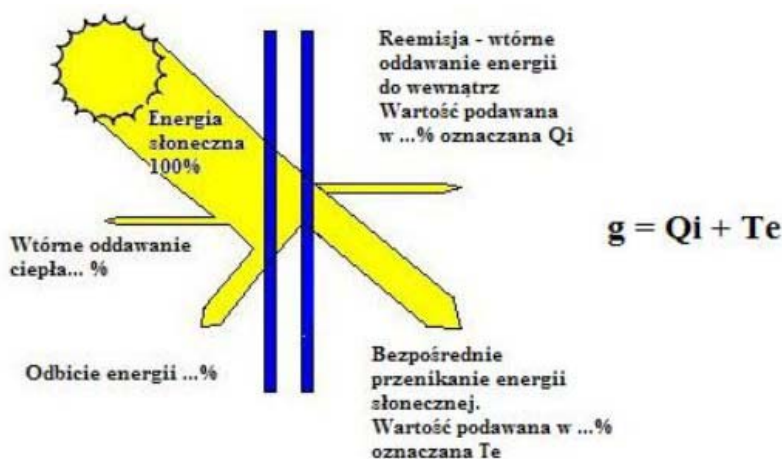
To wszystko sprawiło, że zaistniała potrzeba opisanie wcześniej podjętych prób optymalizowania parametrów stolarki okiennej, a także przeprowadzenia badań po raz kolejny, nieco rzetelniej niż te, które zostały już dokonane. Autorka w niniejszym artykule postara się przedstawić odnalezione przez nią, wcześniej opisane w artykułach naukowych próby zoptymalizowania parametrów stolarki okiennej, a także jako konkluzję zaprezentuje autorski plan eksperymentu, którego wynikiem będzie optymalizacja parametrów energetycznych stolarki okiennej w budynkach jednorodzinnych mieszkalnych przy wykorzystaniu wszystkich niezbędnych wymaganych zmiennych w zakresach dopuszczonych przez obowiązujące normy.

Podjęte próby optymalizacji parametrów okien

W artykułach naukowych można odnaleźć kilka pozycji noszących nazwę optymalizacji parametrów stolarki okiennej. Opisane zostaną od najstarszych (czyli tych, które ukazały się najwcześniej) do najnowszych.

Pierwszą publikacją, do której warto się odnieść jest artykuł pt. „Określenie optymalnego udziału powierzchni przegrody przezroczystej w całkowitej powierzchni przegrody budowlanej” [2]. Artykuł publikowano w czasopiśmie „Polska Energetyka Słoneczna”, a jego nadrzędnym celem było zoptymalizowanie wymiarów okien w budynku jednorodzinny mieszkalny. Warto dodać, że autorzy uwzględnili niemal wszystkie parametry energetyczne odpowiednie dla przegród przezroczystych. Obliczenia zostały wykonane dla zmiennych wartości parametrów takich jak: współczynnik przenikania ciepła dla okien U_w oraz współczynnika przenikania ciepła dla ściany U . Jako konkluzję do manuskryptu, autorzy wyrazili potrzebę wykonania kolejnych obliczeń uzależnionych od wskaźników termicznych okien, a także usytuowania budynku względem stron świata.

Kolejnym źródłem, do jakiego należy się odnieść, jest artykuł o temacie: „Optymalizacja parametrów energetycznych okien” [3]. Jest to przykład na to, że tytuł publikacji nie do końca jest zgodny z tym, czego ona dotyczy. Autor uważa bowiem, że głównym aspektem, jakim trzeba kierować się wybierając okna jest kwestia kosztów. Opisana przez niego optymalizacja polega na wykonaniu bilansu energetycznego oddzielnie dla każdej elewacji budynku. Jako zmienne niezależne badacz podaje kolejno: współczynnik przenikania ciepła U , współczynnik transmitancji g , a także parametry klimatyczne. Na rys. 1. zostało pokazane, co oznacza współczynnik transmitancji. Warto wspomnieć, że nie całe promieniowanie padające na szybę jest przez nią przepuszczane do środka. Współczynnik przepuszczalności promieniowania słonecznego (współczynnik transmitancji) jest to suma bezpośrednio przenikających promieni słonecznych do wnętrza budynku oraz reemisji, czyli wtórnego oddawania energii przez szybę do wewnątrz. Wartość ta wyrażona jest w %. Dla zysków cieplnych lepiej jest, by ta wartość była jak najwyższa, jednak jest ona w dużej mierze uzależniona od współczynnika przenikania ciepła U_g , czyli dla części szklonej okna.



Rys.1. Rozkład promieniowania słonecznego padającego na szybę [4].

Wracając do artykułu L. Dudy [3], autor wybiera okno optymalne, czyli takie, dla którego wyliczenia zsumowanych kosztów zakupu elementu oraz jego eksploatacji (mianem eksploatacji zostają nazwane zyski ciepła dostarczone do wnętrza budynku przez szybę minus straty energii przez całe okno i tę sumę ostatecznie należy wymnożyć razy cenę energii) podzielonych przez czas kredytowania, są jak najniższe. Dodatkowo badacz w swoich rachunkach bierze pod uwagę wpływ rolet zewnętrznych. Otrzymane wyniki w tym aspekcie zdają się być zaskakujące, gdyż nawet dla okien nowoczesnych, charakteryzujących się bardzo niskim współczynnikiem przenikania ciepła U , zamontowanie rolet zewnętrznych pozwala zaoszczędzić ponad 10% ciepła uciekającego przez okno.

Optymalizacja parametrów termicznych okien, jaką przedstawił L. Duda [3], odpowiada standardom poprawnie wykonanej optymalizacji. Prawidłowo zostały dobrane warunki brzegowe, pod uwagę zostały wzięte niezbędne ograniczenia i parametry wpływające na izolacyjność cieplną stolarki. Jedyne, co budzi wątpliwości, to fakt czy autor optymalizował parametry ekonomiczne, czy też jak napisał w tytule artykułu – energetyczne okien. Podsumował on swoją publikację następująco: „(...) Okno, dla którego suma ta (bilans ekonomiczny – przyp. J. Borowska) będzie najmniejsza, jest optymalne”, zatem obiekcje mogą mieć słuszne podstawy.

Kolejną publikacją, a raczej cyklem publikacji odnoszących się do optymalizacji parametrów energetycznych

okien są trzy artykuły W. Matusiaka, jakie ukazały się w czasopiśmie „Twój Filar”. Tytuł podstawowy monografii to „Optymalizacja energetyczna okien nowych i wymienianych”. Autor już na samym początku pierwszej publikacji [5] definiuje podstawowy parametr, jaki ma zasadniczy wpływ na bilans energetyczny stolarki okiennej – jest to współczynnik przenikania ciepła dla okna U_w . Jest on opisany wzorem (1):

$$U_w = \frac{A_g \cdot U_g + A_f \cdot U_f + l_g \cdot \psi_g}{A_g + A_f} \quad (1)$$

gdzie:

U_w - średni współczynnik przenikania ciepła okna, wyrażony w $W/m^2 \cdot K$,

U_f - współczynnik przenikania ciepła ramy, wyrażony w $W/m^2 \cdot K$,

U_g - średni współczynnik przenikania ciepła szyby, wyrażony w $W/m^2 \cdot K$,

ψ_g - liniowy współczynnik przenikania ciepła mostka cieplnego na styku szyby z ramą okna wyrażony w $W/m \cdot K$, przyjęty wg normy PN-EN ISO 14683:2008,

A_f - pole powierzchni ramy o współczynniku U_f , wyrażone w m^2 ,

A_g - pole powierzchni szyby, wyrażone w m^2 ,

l_g - długość liniowego mostka cieplnego na styku szyby z ramą, wyrażona w m.

Opisana w pierwszej części [5] optymalizacja odnosi się jedynie do oszacowania wspomnianego wcześniej współczynnika U_w dla paru wybranych okien, a także porównania ich kosztów. Konkluzja artykułu jest następująca: „(...) z przedstawionych powyżej okien, najlepiej jest zoptymalizowane okno na parterze(...)”.

Zdaje się, że w tym konkretnym przypadku miano „optymalizacja” jest niewłaściwe, ponieważ nie da się zoptymalizować okna, można jedynie próbować zoptymalizować parametry, które je charakteryzują.

W drugiej części publikacji [6] autor sprawdza czy wykorzystanie opisanych wcześniej okien jest opłacalne. Jednakże w tym przypadku zmienione zostaje podejście do obliczeń. Współczynnik przenikania ciepła U_w dla okna jest liczony z uwzględnieniem wpływu nie tylko szyby i ramy, ale również i ramki. Rezultaty obliczeń zostały porównane z wyliczeniami dla okna referencyjnego. Sama optymalizacja zaś dotyczyła wyliczenia wskaźnika SPBT (*Simple Pay Back Time*), czyli prostego czasu zwrotu nakładów finansowych poniesionych na wymianę i eksploatację stolarki okiennej. Podobnie jak w części 1 cyklu artykułów – również i w tym przypadku została przeprowadzona analiza pod względem ekonomicznym, zatem i tu tytuł artykułu nie pokrywa się z treściami, które są w nim zawarte.

Trzecia z publikacji „Optymalizacja energetyczna okien nowych i wymienianych” [7] posiada podtytuł „Bilans energetyczny okien w sezonie grzewczym”. W tym przypadku kluczowy wpływ na rezultaty obliczeń wywierały strefy klimatyczne, w których autor umieszczał analizowany budynek. Ma to o tyle duże znaczenie, iż usytuowanie budynku w różnych miejscach na mapie Polski i w różnej orientacji względem stron świata, daje

inne składowe natężenia promieniowania słonecznego padającego na przegrody przeszklone, a w rezultacie różne zyski solarne.

Na mapce (rys. 2) pokazano jak rozkłada się natężenie promieniowania słonecznego w Polsce. Zaś poniżej przedstawiony został wzór (2), dzięki któremu można obliczyć zyski cieplne od promieniowania słonecznego:

$$Q_{sol,H} = \sum_i C_i \cdot A_i \cdot I_i \cdot F_{sh} \cdot F_{sh,gl} \cdot g_{gl} \quad (2)$$

gdzie:

C_i - udział pola powierzchni płaszczyzny szklonej do całkowitego pola powierzchni okna, jest zależny od wielkości i konstrukcji okna, a jego wartość średnia to 0,7,

A_i - pole powierzchni okna lub drzwi balkonowych w świetle otworu w przegrodzie, wyrażone w m^2 ,

I_i - wartość energii promieniowania słonecznego w rozpatrywanym miesiącu na płaszczyznę, w której usytuowane jest okno o powierzchni A_i , wg danych dotyczących najbliższego punktu pomiarów promieniowania słonecznego, wyrażone w $kWh/(m^2 \cdot m-c)$,

F_{sh} - czynnik redukcyjny ze względu na zacielenie od przegród zewnętrznych,

$F_{sh,gl}$ - czynniki redukcyjne ze względu na zacielenie dla ruchomych urządzeń zacieleniających,

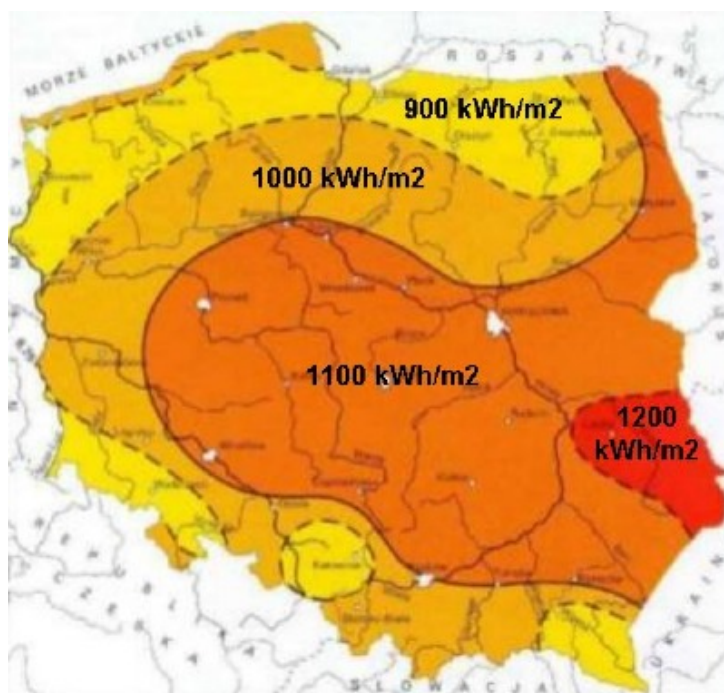
g_{gl} - to całkowita przepuszczalność energii promieniowania słonecznego dla przezroczystej części okna, drzwi balkonowych lub powierzchni oszklonej.

Podsumowując trzecią, ostatnią z publikacji W. Matusiaka [7] odnośnie optymalizacji parametrów energetycznych okien, można stwierdzić, że w tym konkretnym przypadku badacz właściwie nadał tytuł swojej publikacji. Jego artykuł opisuje model matematyczny noszący znamiona optymalizacji, wyniki obliczeń były sumą zysków i strat energii przez okno, zatem został wzięty pod uwagę jakiś bilans energetyczny dla stolarki okiennej. Ale warto się zastanowić, czy oby na pewno autor uwzględnił w swoich obliczeniach wszystkie wymagane zmienne. Co prawda analizie zostały poddane współczynniki przenikania ciepła U dla poszczególnych części okna i współczynnik transmitancji g , lecz są również inne parametry, jakie powinny zostać zdefiniowane i poddane badaniu.

Kolejną publikacją, której nie można pominąć, jest artykuł wydany w *Materiałach Budowlanych* o tytule: „Optymalizacja wymiany okien z uwzględnieniem efektu solarnego” [9]. Autor już na samym początku swojej wypowiedzi odwołuje się do procedury optymalizacyjnej, którą można odnaleźć w Rozporządzeniu Ministra Infrastruktury z 17 marca 2009 r. w sprawie szczegółowego zakresu i form audytu energetycznego oraz części audytu remontowego, wzorów kart audytu, a także algorytmu oceny opłacalności przedsięwzięcia termomodernizacyjnego [10]. W owym dokumencie są omówione procedury pozwalające sprawdzić, czy określone działania przyniosą efekty korzystne pod względem ekonomicznym. Zaproponowana w tym

rozporządzeniu metoda odnosi się wyboru rozwiązania termomodernizacyjnego, które jest optymalne. Skutkuje to wprowadzaniem do budynku pewnych ulepszeń,

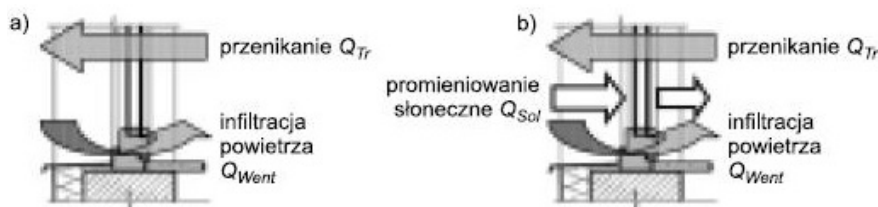
takich jak: między innymi wymiana stolarki na nową oraz docieplanie przegród.



Rys. 2. Rozkład natężenia promieniowania słonecznego na terenie Polski [8].

Publikacja jednakże nie dotyczy optymalizacji parametrów energetycznych okien. Autor przedstawia dwa warianty bilansu energetycznego okna, pierwszy – wykorzystywany w aktualnej procedurze optymalizacyjnej, a także drugi – czyli pierwszy poddany modyfikacji (rys. 3). Oba stanowiska dotyczą uzyskania konkretnych efektów ekonomicznych, jednak wariant udoskonalony dodatkowo opiera się na zyskach ciepła od Słońca. Opisany przez autora przykład optymalizacji

odnosi się do obliczeń prostego czasu zwrotu nakładów finansowych SPBT i niestety nie uwzględnia wymaganych zmiennych jakimi są parametry cieplne stolarki okiennej. Pomimo, że zyski słoneczne zostały uwzględnione, to żadne inne ważne wskaźniki niezbędne do zagwarantowania ochrony cieplnej okien nie zostały poddane obliczeniom. Podsumowując, można zaryzykować stwierdzenie, że jest to kolejny przykład optymalizacji kosztów wymiany okien.



Rys. 3. Bilans energetyczny przeszklenia [9]; wariant a) wykorzystywany w aktualnej procedurze optymalizacyjnej; b) zmodyfikowany.

Ostatnim artykułem, który zostanie omówiony jest publikacja wydana w Zeszytach Naukowych Politechniki Rzeszowskiej o tytule „Określenie optymalnego udziału okien w budynku mieszkalnym” [11]. Autorzy wyliczają tutaj energochłonność budynku mieszkalnego przy zmieniającym się udziale okien w stosunku do

udziału przegród pełnych. Jako nowość, została podjęta próba optymalizacji powierzchni okien w zależności od usytuowania budynku względem stron świata. Niestety parametry energetyczne stolarki okiennej nie zostały poddawane zmianie, a co za tym idzie publikacja

dotyczy optymalizacji parametrów technicznych, a nie energetycznych okien.

Autorski plan eksperymentu

Wcześniej opisane próby optymalizacji parametrów energetycznych stolarki okiennej w budynkach mieszkalnych skłoniły autorkę do podjęcia próby stworzenia autorskiego planu eksperymentu, który jeszcze dokładniej i jeszcze właściwiej mógłby rozwiązać ten problem. Zdaniem autorki, optymalizacja polega na określeniu bilansu energetycznego i doborze takich parametrów technicznych i energetycznych stolarki okiennej, przy których będą minimalne straty ciepła przy maksymalnych zyskach ciepła (pod warunkiem zapewnienia wszystkich dodatkowych wymagań – wentylacji, oświetlenia dziennego itp.).

Celem badania jest opracowanie modelu matematycznego bilansu energetycznego, opisującego przenoszenie ciepła przez stolarkę okienną w budynkach mieszkalnych, oraz optymalizacja parametrów tej stolarki według kryterium energetycznego.

Bilans energetyczny stanowić będzie suma zysków i strat ciepła dla badanej przegrody z uwzględnieniem czy ciepło przepływa przez okno, czy przez ścianę. Zmienna zależna jest wielkością informatywną, gdyż dostarcza nam niezbędnych informacji dla jakich parametrów termicznych okien bilans cieplny przegrody zostanie zrównoważony. Otrzymany wynik będzie również nosił miano statystycznie efektywnego.

Założono, że parametrami zmiennymi (zmiennymi niezależnymi) w badaniu będą:

$X_1 = A_o$ – powierzchnia okna, wyrażona w m^2 ,

$X_2 = U_f$ – współczynnik przenikania ciepła ramy, wyrażony w $W/m^2 \cdot K$,

$X_3 = U_g$ – średni współczynnik przenikania ciepła szyby, wyrażony w $W/m^2 \cdot K$,

$X_4 = C$ – udział pola powierzchni płaszczyzny szklonej do całkowitego pola powierzchni okna, jest zależny od wielkości i konstrukcji okna,

$X_5 = g_{gl}$ – całkowita przepuszczalność energii promieniowania słonecznego dla przezroczystej części okna, drzwi balkonowych lub powierzchni oszklonej.

Założono odpowiednie warunki brzegowe dla zmiennych, a także założono wielkości stałe. Do zbioru wielkości stałych zalicza się wielkości, jakie mogą mieć wpływ na funkcję obiektu, jednakże nie są one obszarem zainteresowań badacza. Wielkości te mają określone wartości, które są stałe w czasie realizacji badania. Do wielkości stałych zalicza się:

C_1 – współczynnik redukcji różnicy temperatur $b_{n,1}$ – dla przegród pomiędzy przestrzenią ogrzewaną a środowiskiem nieogrzewanym, wg metodologii,

C_2 – liniowy współczynnik przenikania ciepła mostka cieplnego dla okna $y_o=0,10$ W/mK ,

C_3 – liniowy współczynnik przenikania ciepła mostka cieplnego dla ściany $y_s=0,45$ W/mK ,

$C_4 = \Theta_{int}$ 20°C – temperatura wewnętrzna okresu ogrzewania,

$C_5 = I$ – średnie miesięczne natężenie promieniowania słonecznego,

$C_6 = t_M$ – liczba godzin grzewczych w danym miesiącu.

Na rys. 4. została pokazana tzw. czarna skrzynka planowanego eksperymentu, w której mamy zaznaczony wpływ wielkości zmiennych niezależnych, wielkości stałych oraz zakłócających, a także widzimy, że wszystko to składa się na zmienną zależną (wyjściową) Z.



Rys. 4. Czarna skrzynka planowanego eksperymentu.

Uwzględniając założony cel badania oraz wybraną postać funkcji, wybrano plan kompozycyjny symetryczny B5. Plan ten należy do grupy planów statystycznych, zdeterminowanych, poliselekcyjnych. W planie B5 liczba układów planu wynosi 26. Plan składa

się z parametrów: +1 - dla maksymalnej wartości zmiennej, 0 - dla średniej wartości zmiennej, -1 - dla minimalnej wartości zmiennej.

Po obliczeniu wartości rzeczywistych czynników, zostaną one umieszczone w odpowiednich rubrykach

planu eksperymentalnego B5. Dopiero tak przygotowany plan eksperymentu stanowi podstawy wykonania pomiarów funkcji obiektu Z. Każdy układ, czyli wiersz planu, to inny zbiór wartości czynników X1, X2, X3, X4, X5, dla których wykonuje się obliczenia funkcji Z.

Podsumowanie

1. Podjęto wiele prób optymalizacji parametrów stolarki okiennej, jednak nie zawsze zostały one wykonane prawidłowo. We wszystkich wspomnianych w pracy publikacjach celem było zoptymalizowanie parametrów energetycznych okien. Jednakże nie każdy artykuł tego dotyczył i nie we wszystkich publikacjach został wzięty pod uwagę komplet wymaganych parametrów.

2. Jeśli w manuskrypcie są opisane wyliczenia odnośnie SPBT (prostego czasu zwrotu nakładów finansowych), to wówczas taka publikacja odnosi się do optymalizacji kosztów i nosić powinna miano ekonomicznej, a nie energetycznej.

3. Pełna i prawidłowa optymalizacja parametrów energetycznych okien będzie wykonana wówczas, gdy do gamy zmiennych zaliczymy zarówno: powierzchnię okna jak i współczynniki przenikania ciepła dla szkła i ramy, a także współczynniki transmitancji i udziału powierzchni przeszklonej w całej powierzchni okna.

4. Pełna optymalizacja parametrów energetycznych pozwala na określenie bilansu energetycznego, który jest sumą zysków ciepła przez stolarkę okienną, a także strat ciepła przez okna i ścianę.

5. Przykład optymalizacji parametrów energetycznych okien przy wykorzystaniu planu kompozycyjnego poliselekcyjnego B5 pozwala na wyliczenie bilansu energetycznego przy wykorzystaniu kilkudziesięciu kombinacji wartości zmiennych niezależnych w określonych zakresach zmienności.

6. Opracowanie modelu matematycznego liczącego różne warianty bilansu energetycznego dla jednego budynku przy różnych wariantach orientacji budynku względem stron świata jest przykładem prawidłowo przeprowadzonej optymalizacji parametrów energetycznych.

Literatura

1. Kasperkiewicz, K., Jakość energetyczna okien – wymagania, metody oceny i aktualne możliwości techniczne, *Materiały Budowlane*, 2006, 8, s. 53-56.
2. Pomorski, M., Pietrowicz, S., Określanie optymalnego udziału powierzchni przegrody przezroczystej w całkowitej powierzchni przegrody budowlanej, *Polska Energetyka Słoneczna*, 2010, 2-4, s. 12-16.
3. Duda, L., Optymalizacja parametrów energetycznych okien, *Profiokno*, 2011, 2, s. 10-11.
4. <http://oknotest.pl> (dostęp 6.07.2016).
5. Matusiak, W., Optymalizacja energetyczna okien nowych i wymienianych, Część 1, *Twój Filar*, 2011, 2, s. 10-11.
6. Matusiak, W., Optymalizacja energetyczna okien nowych i wymienianych, Część 2, Szyby, profile, ramki dystansowe, *Twój Filar*, 2011, 4, s. 12-14.
7. Matusiak, W., Optymalizacja energetyczna okien nowych i wymienianych, Część 3, Bilans energetyczny okien w sezonie grzewczym, *Twój Filar*, 2012, 1, s. 15-18.
8. <http://www.fotowoltaika.net> (dostęp 6.07.2016).
9. Święcicki, A., Optymalizacja wymiany okien z uwzględnieniem efektu solarnego, *Materiały Budowlane*, 2014, 12, s. 55-57.
10. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z 17 marca 2009 r. w sprawie szczegółowego zakresu i form audytu energetycznego oraz części audytu remontowego, wzorów kart audytu, a także algorytmu oceny opłacalności przedsięwzięcia termomodernizacyjnego.
11. Zając, B., Pomorski, M., Określanie optymalnego udziału okien w budynku mieszkalnym, *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej*, 2015, 3, s. 269-276.