

Dariusz HEIM¹
Dominika KNERA²
Anna WIEPRZKOWICZ³

WIELOASPEKTOWY SPOSÓB BADANIA EFEKTYWNOŚCI ŚCIANY ZEWNĘTRZNEJ ZERO- ENERGETYCZNEGO BUDYNKU BIUROWEGO

W pracy podano sposób badania i oceny efektywności energetycznej budynków na przykładzie wybranych pomieszczeń obiektu biurowego użytkowanego w polskich warunkach klimatycznych. Pomieszczenia dostosowano do standardu zero-energetycznego. Źródłem zasilania są zintegrowane z nimi urządzenia energetyki odnawialnej. Przeprowadzono pomiary dynamiki cieplnej ściany zewnętrznej oraz energii elektrycznej produkowanej przez panele fotowoltaiczne zainstalowane na zewnętrznej powierzchni ściany. Zaproponowano metodę bilansowania strumieni energii na granicy pomieszczenia, czyli przegród ograniczających kubaturę o kontrolowanych parametrach środowiska wewnętrznego. Dokonano analizy wyników biorąc pod uwagę periodyczny charakter zmian poszczególnych wielkości, długości okresów nieciągłości oraz uzyskane wartości ekstremalne. Na podstawie wyników z analizowanego okresu stwierdzono, że uzyskanie standardu obiektu autonomicznego jest niezwykle trudne, natomiast możliwe jest spełnienie kryteriów obiektu niemal zero-energetycznego.

Słowa kluczowe: budynek nZEB, efektywność energetyczna, odnawialne źródła energii, pomiary in-situ, wymiana ciepła

1. Wprowadzenie

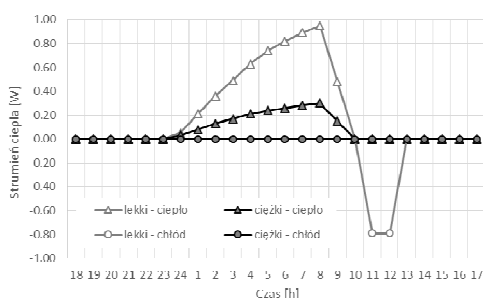
Określanie efektywności energetycznej budynków może być dokonywane metodami obliczeniowymi lub pomiarowymi. W obu przypadkach na końcowy wynik ma wpływ wiele zmiennych, w tym np. zmienne środowiskowe, których predykcja obarczona jest dużą niepewnością. Oczywiście jest, że chwilowa

¹ Autor do korespondencji / corresponding author: Dariusz Heim, Politechnika Łódzka, Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska, ul. Wólczańska 213, 90-924 Łódź; tel. +48 42 631-39-20; dariusz.heim@p.lodz.pl

² Dominika Knera, Politechnika Łódzka, Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska, ul. Wólczańska 213, 90-924 Łódź; tel. +48 42 631-39-20; dominika.knera@p.lodz.pl

³ Anna Wieprzkowicz, Politechnika Łódzka, Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska, ul. Wólczańska 213, 90-924 Łódź; tel. +48 42 631-39-20; anna.wieprzkowicz@p.lodz.pl

zmiana parametrów środowiska zewnętrznego nie ma charakteru powtarzalnego i dopiero dokonane przybliżenia powodują, że możliwe jest określanie pewnych trendów. Nieregularne zmiany dotyczą także środowiska wewnętrznego zależnego od nieprzewidywalnego zachowania użytkowników. Jeżeli założymy, że strumienie energii, dodatnie i ujemne, w zadanym obszarze bilansowania istotnie się różnią, wtedy problem efektów chwilowych ma mniejsze znaczenie, zaś bilansowanie energii w dłuższych okresach obarczone jest niewielkim błędem [1]. W przypadku zbliżonych wartości obu strumieni większego znaczenia nabiera bilansowanie energii w krótszych interwałach czasowych. W fizyce budowli jest to zjawisko charakterystyczne np. dla okresów przejściowych, gdy zmiana zapotrzebowania z ciepła na chłód może nastąpić w ciągu 1 doby w zależności od pojemności cieplnej budynku. Podobną sytuację obserwujemy w przypadku budynków o niemal zerowym zapotrzebowaniu na energię. Na rysunku 1 pokazano przykładowy, teoretyczny przebieg strumienia ciepła dostarczanego przez idealny (bez wewnętrznych strat) system klimatyzacji do budynku o wysokiej efektywności energetycznej.

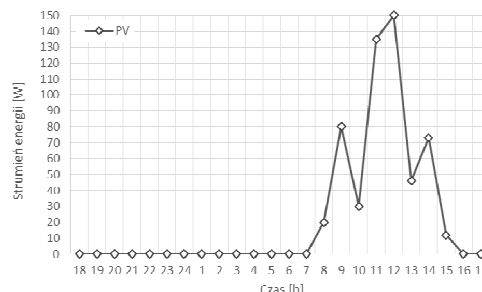


Rys. 1. Obliczeniowy, chwilowy strumień ciepła dostarczany w wybranym dniu przez system techniczny HVAC budynku energooszczędnego (przykład)

Fig. 1. Calculated heat flux for selected days provided by HVAC system in low energy building (an example)

Podobnie nierównomiernym, zależnym od chwilowego dostępu energii promieniowania słonecznego charakteryzuje się podstawowy system zasilania budynku w energię odnawialną z paneli fotowoltaicznych (rys. 2). Zmienność ta wynika nie tylko z różnych warunków zachmurzenia, długości dnia etc., lecz również z charakterystyki prądowo napięciowej samego ogniwa jak i parametrów decydujących o uzyskaniu wymaganej różnicy potencjałów.

Celem pracy było określenie możliwości zbadania efektywności energetycznej zaawansowanych systemów energetycznych budynków z uwzględnieniem dynamiki zmian i efektów chwilowych. Na opracowanym w ramach projektu GPEE [2] stanowisku badawczym przeprowadzono szereg pomiarów, których wyniki i sformułowane wnioski zamieszczono w poniższej pracy.



Rys. 2. Obliczeniowy, chwilowy strumień energii elektrycznej produkowanej w wybranym dniu przez pionowe fasady PV (przykład)

Fig. 2. Calculated electricity flux produced by PV facades for selected days (an example)

2. Bilans energetyczny budynków niemal zero-energetycznych

2.1. Definicja budynku nZEB

Prawidłowe określenie standardu budownictwa niskoenergetycznego jest niezwykle istotne dla potrzeb tworzenia nowych wymagań podstawowych jak i ram oraz zasad systemu wspierania tego typu budownictwa. W ostatnich latach pojawiło się wiele opracowań, w których autorzy podejmowali próbę ogólnego zdefiniowania budynku zero- lub niemal zero-energetycznego. Do ciekawszych prac z tego obszaru należą m.in. publikacje Kolokotsa i inni (2011) [3] oraz Kurnitski i inni (2014) [4]. Natomiast w obszarze budynków biurowych pewne rozwiązania zostały przedstawione przez Pikas E. i inni (2014) [5]. Jak wynika z ilości prac badawczych prowadzonych w ww. obszarze temat końcowej definicji pozostaje nadal otwarty.

Bez względu na rodzaj obiektu, którego ma dotyczyć definicja zależna ona będzie od przyjętych założeń oraz uwarunkowań lokalnych. Do podstawowych założeń należą:

- granice obszarów bilansowania;
- współczynniki wagowe;
- zasady bilansowania;
- uwarunkowania wewnętrzne;
- sposób oceny i weryfikacji.

Natomiast wśród uwarunkowań lokalnych wymienić należy te wynikające z warunków:

- klimatycznych;
- ekonomicznych;
- politycznych.

W celu zbilansowania poszczególnych strumieni np. ciepła i energii elektrycznej oraz porównania ich ze sobą, niezbędne jest uzyskanie wspólnego punk-

tu odniesienia czyli rodzaju energii poddawanej bilansowaniu. Poza decyzją dotyczącą formy energii wpływ na ostateczny wynik będzie miał długość przyjętego okresu analiz. W budynkach autonomicznych, czyli odłączonych od sieci elektroenergetycznej, okres powinien być jak najkrótszy, zaś w przypadku braku wewnętrznych magazynów energii wręcz dobowy. Najprostsze systemy akumulatorowe są w stanie podtrzymać działanie systemu przez okres kilku dni gorszych warunków pogodowych, jednak nigdy nie będą one działały jako magazyn sezonowy. W tej sytuacji możliwe jest dodatkowe dostosowanie zapotrzebowania w zależności od przewidywanej dostępności energii ze źródeł odnawialnych.

Czynnikiem mającym wpływ na ostateczny bilans energetyczny budynku jest oczekiwany poziom jakości środowiska wewnętrznego, w tym komfortu cieplnego. Wszystkie obiekty zero- lub prawie zero-energetyczne powinny zapewniać użytkownikom możliwie wysokie parametry komfortu na przestrzeni całego roku [6]. W rzeczywistych warunkach użytkowania nie jest jednak możliwe uzyskanie takich samych uwarunkowań wewnętrznych i zewnętrznych przez co w każdym z przypadków konieczna jest weryfikacja w warunkach rzeczywistych. Najczęściej dotyczy ona następujących aspektów: uwarunkowań klimatycznych, sposobu użytkowania, spełnienia kryteriów jakości środowiska wewnętrznego, uzyskanych efektów energetycznych. Monitoring energetyczny obiektów jest niezbędny również w celu wyeliminowania pewnych nieprawidłowości lub korekty błędnych założeń projektowych oraz posiada dodatkową wartość edukacyjną dla jego użytkowników.

2.2. Bilans energetyczny budynku nZEB

Założono, że składowymi bilansu energetycznego budynku jest zapotrzebowanie na ciepło/chłód (energia końcowa), energia elektryczna na potrzeby napędu wentylacji mechanicznej oraz do oświetlenia sztucznego, możemy założyć, że w celu uzyskania standardu zero-energetycznego konieczne jest zrównoważenie zapotrzebowania produkcją energii elektrycznej na miejscu, równanie 1.

$$Q_{HC} + Q_{EV} + Q_{EL} = Q_{RES} \quad (1)$$

gdzie: Q_{HC} – energia do ogrzewania/chłodzenia z uwzględnieniem strat i zysków ciepła;

Q_{EV} – energia elektryczna do napędu centrali wentylacyjnej;

Q_{EL} – energia elektryczna do oświetlenia z uwzględnieniem światła dziennego;

Q_{RES} – energia ze źródeł odnawialnych produkowana na miejscu.

Składowa Q_{HC} wynika z chwilowych bilansów ciepła z uwzględnieniem strat na drodze przenikania, wentylacji oraz zysków ciepła od wewnętrznych oraz od promieniowania słonecznego. Składowe Q_{EV} i Q_{EL} to energia pomocni-

cza odpowiednio do napędu centrali wentylacyjnej oraz oświetlenia wbudowanego, przy czym zakłada się, że oba systemy pracują przy zmiennym obciążeniu. Centrala wentylacyjna sterowana jest parametrem określonym przez obecność użytkowników, zaś oświetlenie elektryczne dodatkowo możliwością wykorzystania światła dziennego. W rozważaniach pominięto energię pomocniczą do napędu urządzeń wyposażenia biurowego, typu, komputery, monitory, drukarki etc. Składowe równania po lewej stronie powinny zostać zbilansowane w cyklu rocznym poprzez energię elektryczną wyprodukowaną na miejscu przez systemy zintegrowane z budynkiem. Zakłada się, że będą to fasadowe systemy fotowoltaiczne.

3. Monitoring strumieni energii

3.1. Założenia sposobu użytkowania pomieszczenia biurowego

Biorąc pod uwagę specyfikę pomieszczeń biurowych przyjęto, że jest ono użytkowane w okresie od godziny 8 do 16, w którym założono:

- spełnienie wymagań komfortu termicznego z uwzględnieniem zysków ciepła lecz bez zewnętrznych źródeł energii, ciepła i chłodu ($Q_{HC}=0$);
- zapewnienie wymaganej jakości powietrza wewnętrznego poprzez kontrolowany napływ świeżego powietrza dostarczanego przez lokalną jednostkę nawiewno-wywiewną z odzyskiem ciepła ($Q_{EV}>0$);
- zapewnienie wymaganego oświetlenia na płaszczyźnie roboczej poprzez zastosowanie oświetlenia uzupełniającego ($Q_{EL}>0$).

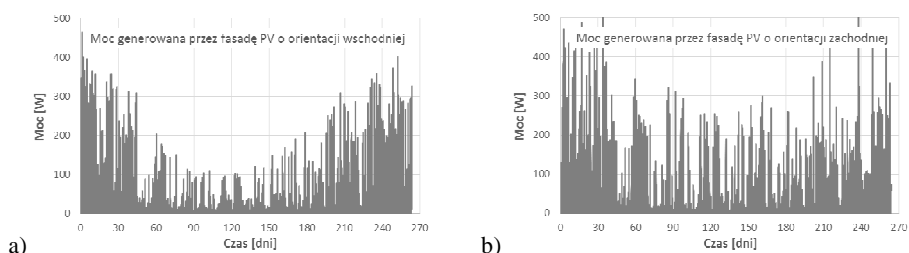
Przyjęto, że źródłem energii elektrycznej dla pomieszczenia są panele PV pokrywające w całości część pełną eksperymentalnej fasady. Na podstawie wcześniejszych analiz teoretycznych wykonanych za pomocą metod numerycznych [7] stwierdzono, że przyjęty i zrealizowany model fasady eksperymentalnej daje największą nadprodukcję energii elektrycznej po uwzględnieniu potrzeb oświetleniowych pomieszczenia. Tym samym możliwe jest efektywne zmagazynowanie nadmiaru energii i wykorzystanie na inne potrzeby pomieszczenia, w tym np. zasilanie systemu wentylacji mechanicznej.

Na podstawie przyjętego schematu pracy instalacji wentylacyjnej oraz uwzględniając uśrednioną godzinową moc źródeł światła elektrycznego otrzymano średnie, chwilowe zapotrzebowanie na moc elektryczną pomieszczenia na poziomie 20,1 W.

3.2. Monitoring energii ze źródeł odnawialnych

Produkcja energii elektrycznej monitorowana była zgodnie ze schematem przyjętym w pracy [8]. Wyniki przedstawione w dalszej części pracy dotyczą pomiarów po stronie prądu stałego i opracowane zostały na podstawie danych chwilowych próbkowanych z krokiem 5 minutowym. Na rysunku 3a przedstawiono wartości mocy w okresie od 18 sierpnia 2015 do 20 maja 2016 roku uży-

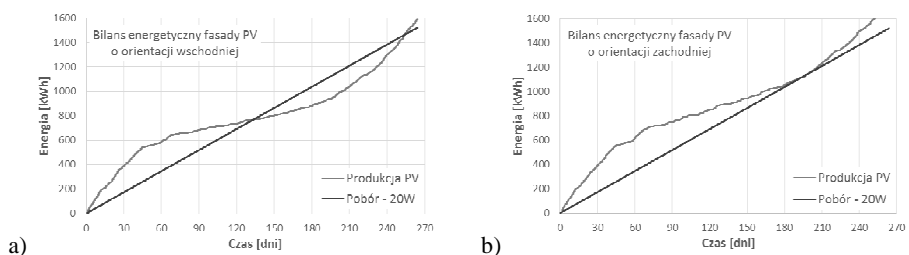
skane dla fasady wschodniej, zaś na rysunku 3b fasady zachodniej. W obu przypadkach charakter uzyskanych wyników jest podobny, aczkolwiek zdecydowanie wyższe, chwilowe wartości mocy uzyskano w przypadku orientacji zachodniej. Można stwierdzić iż, dla orientacji wschodniej okres jesienno-zimowy charakteryzuje się zdecydowanie niższymi (4-5 krotnie) wartościami mocy elektrycznej. Natomiast w przypadku orientacji zachodniej wartości są jedynie 2-krotnie niższe.



Rys. 3. Chwilowa moc elektryczna generowana przez fasadę PV o orientacji a) wschodniej oraz b) zachodniej

Fig. 3. Electrical power produced by a) east and b) west oriented PV facade

W celu oszacowania rzeczywistego potencjału energetycznego wykonano analizę energii zakumulowanej w systemie po stronie wschodniej (rys. 4a) i zachodniej (rys. 4b). Jednocześnie pokazano linię trendu zapotrzebowania na energię pomocniczą w systemach wentylacji i oświetlenia przy założeniu stałej mocy elektrycznej na poziomie 20W. Obie fasady PV bilansują zapotrzebowanie na energię w analizowanym okresie.



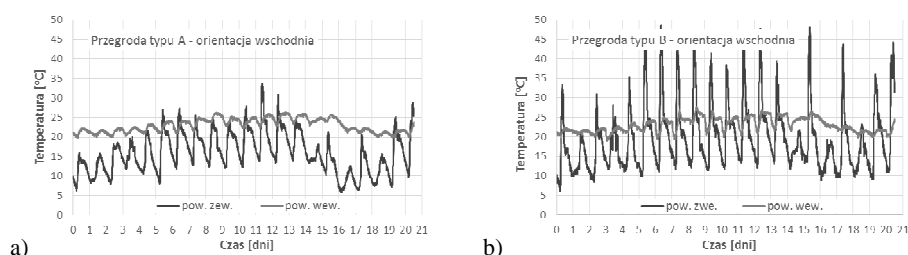
Rys. 4. Zakumulowana produkcja energii w okresie od 18 sierpnia 2015 do 20 maja 2016 r. przez fasadę a) wschodnią oraz b) zachodnią

Fig. 4. Accumulated electricity produced by a) east and b) west oriented PV facade

4. Monitoring przenikalności cieplnej

Kolejnym elementem decydującym o zapotrzebowaniu na energię do ogrzewania/chłodzenia budynku są straty ciepła do podgrzania powietrza wenty-

lacyjnego oraz straty ciepła na drodze przenikania. Przy zastosowaniu systemu odzysku ciepła w połączeniu z wentylacją mechaniczną oraz założeniu koherentności wielkości strumienia powietrza wentylacyjnego z zyskami ciepła dominującym stają się straty ciepła na drodze przenikania. W przedmiotowym badaniu dokonano pomiaru temperatur obu powierzchni ściany wschodniej (rys. 5) oraz określono ekstremalne wartości strumienia ciepła. Pomimo tej samej wartości współczynnika przenikania ciepła zaobserwowano istotną zmianę strumienia ciepła przenikającego przez obie ściany (tab. 1).



Rys. 5. Temperatura powierzchni wewnętrznej i zewnętrznej dla dwóch rozwiązań technicznych ściany zewnętrznej a) modyfikowanej MFZ oraz b) tradycyjnej

Fig. 5. Internal and external surface temperature for two types of external wall a) modified by PCM and b) traditional

Tabela 1. Strumienie ciepła uzyskane dla dwóch typów ściany

Table 1. Heat fluxes determined for two types of wall

Parametr	Typ A	Typ B
q_{\min} [W/m^2]	- 1,91	- 5,32
q_{\max} [W/m^2]	3,56	3,10
q_{sr} [W/m^2]	1,48	0,69

5. Wnioski

Na podstawie wyników badań eksperymentalnych z uwzględnieniem przyjętych założeń stwierdzono, że:

- możliwe jest uzyskanie zerowego bilansu energetycznego (energia końcowa i pomocnicza) pomieszczenia biurowego przy założeniu magazynowania energii elektrycznej na poziomie <10% rocznej produkcji;
- możliwe jest istotne (o 50%) ograniczenie zmian strumienia ciepła przez przegrodę zewnętrzną jedynie poprzez zwiększenie pojemności cieplnej izolacji.

Niniejsza praca została sfinansowana ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju w ramach projektu pt.: „Promowanie zrównoważonego podejścia do efektywności energetycznej w budownictwie jako narzędzia ochrony klimatu w miastach Niemiec i Polski: opracowanie technologii fasady dla potrzeb budynków o zerowej emisji” (GPPE).

Literatura

- [1] Heim D., Knera D., Machniewicz A. Wybrane aspekty efektywności energetycznej ścian zewnętrznych obiektów biurowych, Wybrane zagadnienia budownictwa energooszczędnego, s.31-42, Płock, 2014.
- [2] Heim D., Zbiciński I., Barecka M., Knera D., Machniewicz A., Szczepańska-Rosiak E. New facade developed for sustainable, zero-energy office building – theoretical assumptions and numerical analysis. 40th IAHS World Congress on Housing "Sustainable Housing Construction", 2014.
- [3] Kolokotsa D., Rovas D., Kosmatopoulos E., Kalaitzakis K. A roadmap towards intelligent net zero- and positive-energy buildings, Solar Energy 85, pp. 3067-3084, 2011.
- [4] Kurnitski J., Buso T., Corgnati S.P., Derjanecz A., Litiu A. nZEB definitions in Europe, REHVA Journal – March 2014.
- [5] Pikas E., Thalfeldt M., Kurnitski J., Cost optimal and nearly zero energy building solutions for office buildings, Energy and Buildings, Volume 74, pp. 30-42, May – 2014.
- [6] Heim D., Budynki biurowe o niemal zerowym zapotrzebowaniu na energię, Budownictwo energooszczędne w Polsce - stan i perspektywy. Bydgoszcz 2015, s. 21-32.
- [7] Heim D., Knera D., Szczepańska-Rosiak E. Functionality of an active external wall - optimal glazing/BIPV ratio taking into account total indoor illuminance, Proceedings of BS2015: 14th Conference of International Building Performance Simulation Association, Hyderabad, India, Dec. 7-9, 2015.
- [8] Knera D., Heim D. Application of a BIPV to cover net energy use of the adjacent office room, Management of Environmental Quality (article in press).

MULTI-ASPECT ASSUMPTION FOR ENERGY PERFORMANCE EXAMINATION OF EXTERNAL WALL IN ZERO-ENERGY OFFICE BUILDING

Summary

The method of building energy performance assessment was presented and discussed. As an example of the building part under Polish climatic conditions two experimental rooms were developed and constructed. The measurement results obtained for two facades, oriented east and west, were analysed and discussed. The following physical parameters were measured in-situ: electricity produced by PV panels and thermal dynamic of external partition. Based on the monitoring results authors proposed the method to determine the energy efficiency of such system to obtained nearly zero energy standard.

Keywords: energy performance, renewable energy sources, in-situ measurements, heat transfer, energy production

DOI:10.7862/rb.2016.265

Przesłano do redakcji: 10.07.2016 r.

Przyjęto do druku: 20.12.2016 r.