

Monika CHMIELEWSKA¹
Krystian CIEŚLAK²

ANALIZA ROZWIĄZAŃ SYSTEMU FOTOWOLTAICZNEGO ZINTEGROWANEGO Z BUDYNKIEM NA PRZYKŁADZIE DOMU JEDNORODZINNEGO

Koncepcja systemów fotowoltaicznych stanowiących integralną część budynku określana jako Building Integrated Photovoltaics (BIPV) zakłada dostosowanie modułów PV do różnorodnych aplikacji w budynku, głównie jako elementów będących alternatywą dla tradycyjnych materiałów budowlanych w obrębie dachów i elewacji, np. pokryć dachowych, szklanych systemów elewacyjnych i dachowych, przeszkleń ścian.

Opracowanie porusza zagadnienie wykorzystania energii promieniowania słonecznego do produkcji energii elektrycznej w instalacji fotowoltaicznej zintegrowanej z budynkiem oraz obejmuje analizę uzysków energii w kontekście spełniania zapotrzebowania budynku na energię elektryczną.

W celu określenia efektywności systemów BIPV przy użyciu programu PVsyst 6.43 wykonane zostały projekty instalacji ścian kurtynowych wykorzystujących różne typy modułów fotowoltaicznych oraz świetlików dachowych. Założono powierzchnię przeznaczoną na cele instalacji fotowoltaicznej, dla wszystkich przypadków przyjęto rozwiązanie on-grid. Przy wykorzystaniu programu PVsyst wykonana została analiza uzysków energii elektrycznej ze wszystkich instalacji w ciągu roku. Otrzymane wyniki odniesiono do zapotrzebowania budynku, co pozwoliło na oszacowanie względnego, procentowego pokrycia zapotrzebowania przez technologie BIPV. Niestety, nie we wszystkich przypadkach założona powierzchnia modułów pozwoliła na całkowite pokrycie zapotrzebowania budynku na energię elektryczną. Najbardziej korzystne dla projektowanego budynku rozwiązanie pozwala wyprodukować wystarczającą ilość energii, aby zaspokoić potrzeby energetyczne.

Słowa kluczowe: BIPV, ogniwa słoneczne, ogniwa monokrystaliczne, ogniwa polikrystaliczne, system fotowoltaiczny, zapotrzebowanie na energię, budownictwo energooszczędne

¹ Monika Chmielewska, Politechnika Lubelska, ul. Grodzickiego 70, 20-256 Lublin; tel. 663436533; moniika.chmielewska@gmail.com

² Autor do korespondencji / corresponding author: Krystian Cieślak, Politechnika Lubelska, Wydział Inżynierii Środowiska, Instytut Inżynierii Odnawialnych Źródeł Energii, ul. Nadbystrzycka 40B, 20-618 Lublin; 81 5384654; k.cieslak@pollub.pl

1. Wprowadzenie

Obecnie, systemy fotowoltaiczne można sklasyfikować według trzech różnych kryteriów: współpracy systemu z siecią elektroenergetyczną, miejsca i sposobu instalacji generatora fotowoltaicznego oraz przeznaczenia wytwarzanej energii. Uwzględniając miejsce i sposób instalacji generatora fotowoltaicznego można wyróżnić między innymi systemy PV zintegrowane z budynkiem – BIPV (*ang. Building Integrated Photovoltaics*). Jest to idea wprowadzenia rozwiązań z zakresu fotowoltaiki w budynkach poprzez zastępowanie tradycyjnych materiałów budowlanych elementami fotowoltaicznymi i dostosowanie modułów do różnorodnych aplikacji w budynku. Koncepcja BIPV mimo pojawienia się na rynku już pod koniec ubiegłego wieku, nie jest jeszcze powszechnie stosowana i wciąż znajduje się w początkowej fazie rozwoju.

2. Charakterystyka koncepcji

Ze wszystkich elementów systemu fotowoltaicznego moduły PV są najbardziej widoczne. Ich wygląd i sposób zainstalowania może w integralny sposób wpływać na architekturę. Obecnie w systemach BIPV często stosowane są ogniwa częściowo transparentne, zwłaszcza w przypadku fasad i świetlików dachowych. Stopień transparentności materiałów można kształtować na różnym poziomie, a rezultat uzależniony będzie od rodzaju ogniwa i ich układu - zupełnie inaczej wyglądają rozsunięte ogniwa krystaliczne, a inaczej częściowo przezroczyste materiały cienkowarstwowe [1, 2].

2.1. Rozwiązania konstrukcyjne

Teoretycznie miejscem przeznaczonym do instalacji systemu BIPV może być każda powierzchnia budynku odpowiednio wystawiona na bezpośrednie działanie promieniowania słonecznego, jednak w praktyce niektóre fragmenty budynku nadają się do tego szczególnie. Są to:

- dachy – płaskie i pochylone,
- ściany – elewacje i przeszklenia (okna) pionowe, nachylone, zakrzywione,
- struktury o specjalnej funkcji, najczęściej zacieniającej – zadaszenia, markizy, a także zabezpieczającej – balustrady [3].

Systemy prawdziwie zintegrowane ze strukturą dachu, tzn. o funkcji pokrycia dachowego, mają mniejszy ciężar, nie są tak widoczne i bardzo dobrze komponują się z architekturą budynku. W przypadku dachów spadzistych platformę nośną dla instalacji może stanowić od razu odpowiednio nachylona konstrukcja dachu [3]. Poza montażem modułów o typowym prostokątnym kształcie stosuje się również dachówki z ogniwami PV. Wielką zaletą tej metody jest prostota instalacji, ze względu na podobieństwo do tradycyjnych dachówek. Jednakże

system połączeń elektrycznych jest dość złożony, bowiem dachówki fotowoltaiczne zawierają najczęściej jedynie dwa ogniwa monokrystaliczne [3,4].

Jednym z zastosowań systemów BIPV są także świetliki dachowe, czyli przeszklone konstrukcje, pełniące przede wszystkim funkcję doświetlenia pomieszczeń. Do aplikacji w takiej formie stosowane są materiały częściowo transparentne, które przepuszczając światło dzienne pozwalają kontrolować oświetlenie wnętrza. Budynki są wówczas projektowane w postaci szkieletowej struktury stalowej lub drewnianej, a konwencjonalne szklane wypełnienie zastępowane jest szkłem z ogniwami fotowoltaicznymi [3,4].

Przykładem elementów zacieniających mogą być między innymi niewielkie zewnętrzne daszki, wykonywane zarówno jako półprzezroczyste jak i całkowicie nieprzeźierne. Konstrukcja zapewnia dobrą wentylację tylnej strony nagrzewających się modułów, co skutecznie podwyższa ich efektywność energetyczną.

Zewnętrzne ściany budynku wykorzystywane są do celów instalacji PV zdecydowanie rzadziej niż płaszczyzny dachowe. Ponieważ moduły w systemach fasadowych ustawione są zwykle pionowo, spodziewany uzysk energii jest mniejszy od optymalnego. Wada ta jest kompensowana możliwością pełnienia przez moduły funkcji typowych dla przegrody zewnętrznej oraz wielkością dostępnej powierzchni.

Zintegrowanie systemów fotowoltaicznych ze ścianami kurtynowymi jest jednym z najczęstszych zastosowań BIPV. Ściany kurtynowe są rodzajem ścian osłonowych, wykonanym jako wypełniona szkłem konstrukcja ramownicowa metalowa. Stosowane są przeszklenia całej powierzchni ściany zewnętrznej, jednak rozwiązania takie muszą spełniać warunki ochrony termicznej i zapewniać odpowiedni komfort użytkownika [4,5].

2.2. Zalety i wady rozwiązania

Niewątpliwą zaletą systemów fotowoltaicznych zintegrowanych z budynkiem jest ich szerokie zastosowanie i dużo możliwości aplikacji na obiekcie. Posiadają również szereg dodatkowych funkcji poza produkcją energii słonecznej - estetyczne, izolacji termicznej, a także izolacyjności akustycznej. Stanowią alternatywę dla tradycyjnych materiałów budowlanych, przez co pozwalają na ograniczanie kosztów instalacji poprzez oszczędność już na etapie budowy. Zastosowanie zintegrowanych z budynkiem systemów fotowoltaicznych pozwala na oszczędność zużywanej wewnątrz obiektu energii, poprzez zwiększanie lub zmniejszanie ilości dopływającego w ciągu dnia światła czy zabezpieczenie powierzchni dachu [6,7].

Niestety, systemy fotowoltaiczne zintegrowane z budynkiem posiadają również wady. Głównymi utrudnieniami są między innymi wysoka cena niektórych rozwiązań i brak standaryzacji wielkości modułów. Jednakże zdecydowanie najważniejsza jest konieczność uwzględnienia instalacji systemu i sposobu jego integracji na etapie projektowania, bowiem często zastępują one materiały mają-

ce istotny wpływ na nośność budynku. Przyczynia się to również do większych wymagań technicznych elementów systemów BIPV. Z powodu miejsca instalacji modułów na powierzchniach o nieoptymalnym nachyleniu, np. na fasadach, uzyski energii są znacznie mniejsze niż w przypadku tradycyjnych instalacji.

3. Metodyka i analiza wyników

Do celów symulacji i analizy uzysków energii z systemu zintegrowanego z budynkiem została zaprojektowana instalacja fotowoltaiczna dla budynku jednorodzinnego w Warszawie. Powierzchnia ściany pionowej, która może zostać przeznaczona na instalację wynosi 26 m^2 , powierzchnia południowej połaci dachowej wynosi 45 m^2 . Kąt nachylenia dachu to 30° . Przyjęto, że w najbliższej okolicy projektowanego budynku nie znajdują się elementy, które w znaczący sposób wpływałyby na zacinienie instalacji. Dane meteorologiczne dla określonej lokalizacji zostały określone w oparciu o bazę danych programu. Przyjęto rozwiązanie systemu podłączonego do sieci. Aby porównać uzyski energii w przypadku zastosowania różnych typów rozwiązań, wykonano symulacje w oparciu o posiadane dane techniczne szkła fotowoltaicznego. Projekt instalacji wykonano przy użyciu programu PVsyst 6.43.

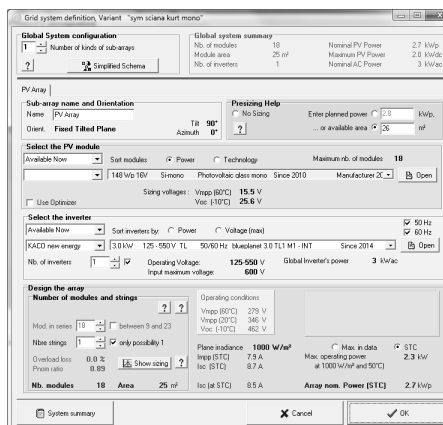
Zapotrzebowanie na energię elektryczną dla projektowanego budynku zostało obliczone w oparciu o przyjęte założenia:

- ilość osób: 3,
 - oświetlenie w pomieszczeniach: diody LED, o poborze mocy do 10W,
 - urządzenia w klasie energetycznej najwyższej możliwej dla danego typu.
- Korzystając z kart katalogowych standardowego osprzętu i uwzględniając małe sprzęty AGD oraz sporadycznie użytkowane urządzenia określono roczne zapotrzebowanie na energię elektryczną na 3500 kWh.

Dobór modułów i inwertera w programie PVsyst 6.43 został poprzedzony przez dobór kąta nachylenia instalacji. Jako ścianę, na której umieszczona zostanie instalacja fotowoltaiczna w formie ściany kurtynowej przyjęto ścianę południową, o azymucie 0° . Dla instalacji w obrębie dachu przyjęto taki sam azymut i kąt równy nachyleniu połaci.

Dla każdego z symulowanych rozwiązań przeprowadzone zostały kolejne kroki takie jak dobór modułów, inwertera oraz sposobu połączenia modułów. W oparciu o karty katalogowe szyb fotowoltaicznych firmy Onyx Solar [2] uzupełniona została baza modułów. Po wybraniu stosowanych w danym rozwiązaniu modułów i odczytaniu ocenianej mocy systemu został dobrany odpowiedni inwerter. Przykładowe okno doboru elementów systemu PV przedstawia Rys. 1.

Po zakończeniu doboru elementów systemu możliwe było przeprowadzenie symulacji uzysków energii dla każdego z rozwiązań. Odczytany prognozowany uzysk energii dla kolejnych miesięcy przedstawiono w formie tabeli, a następnie wykresu w celu porównania efektywności wybranych do analizy rozwiązań.



Rys. 1. Przykładowe okno doboru modułów, inwertera i sposobu połączenia w programie PVsyst 6.43

Fig. 1. Print screen from a PVsyst software showing selection of the PV installation elements.

3.1. Ściana kurtynowa z ogniwami z amorficznego krzemu

Jako pierwszy przypadek rozpatrzone zostało rozwiązanie ściany kurtynowej z ogniwami z amorficznego krzemu. Szyby fotowoltaiczne zastępują tradycyjne przeszklenie ściany w pokoju dziennym projektowanego domu. Przyjęte zostało 8 szyb fotowoltaicznych firmy Onyx Solar o mocy 189 W, o wymiarach 1245 x 2456 mm. Teoretyczna moc projektowanej instalacji PV wynosi 1,51 kW. Planowany roczny uzysk energii z instalacji został ustalony na poziomie 1066 kWh.

3.2. Ściana kurtynowa z ogniwami z monokrystalicznego krzemu

W kolejnej opcji rozpatrzone 18 szyb fotowoltaicznych firmy Onyx Solar o wymiarach 1650 x 850 mm i mocy 147,6 W. Teoretyczna moc projektowanej instalacji PV wynosi 2,66 kW. Planowany roczny uzysk energii z instalacji wynosi 1742 kWh.

3.3. Ściana kurtynowa z ogniwami z polikrystalicznego krzemu

Przyjęte zostało 36 szyb fotowoltaicznych firmy Onyx Solar o wymiarach 1475 x 480 mm i mocy 62,3 W. Teoretyczna moc projektowanej instalacji PV wynosi 2,3 kW. Planowany roczny uzysk energii z instalacji według symulacji wynosi 1,66 kWh.

3.4. Świetliki dachowe z ogniwami z polikrystalicznego krzemu

Dla przyjętych w poprzednim rozwiązaniu szyb fotowoltaicznych o mocy 62,3 W dokonano również symulacji dla przypadku umieszczenia ich w obrębie połączenia dachowej jako świetlików. Pod instalację przyjęta została cała powierzchnia południowej połaci dachowej. Przyjęto 63 szyby firmy Onyx Solar o wymiarach 1475 x 480 mm i mocy 62,3 W. Teoretyczna moc projektowanej instalacji PV wyniesie 4 kW, a planowany roczny uzysk energii z instalacji 4243 kWh.

3.5. Ściana kurtynowa i świetliki dachowe z ogniwami z amorficznego krzemu

Przyjęte zostały szyby fotowoltaiczne firmy Onyx Solar o wymiarach 1475 x 480 mm i mocy 62,3 W. Ilość możliwych do zamontowania szyb wynosi 36. Teoretyczna moc projektowanej instalacji PV wynosi 2,3 kW. Planowany roczny uzysk energii z instalacji wynosi 1,66 kWh.

3.6. System BAPV na dachu budynku

W celu porównania uzysku energii z systemów BIPV z tradycyjnym rozwiązaniem BAPV został zaprojektowany system PV na dachu budynku. Nachylenie dachu 30°, powierzchnia połaci południowej 50 m². Do symulacji przyjęto moduły polikrystaliczne SV60P-250 firmy Selfa, o mocy 250W. Teoretyczna moc planowanej instalacji, przy wykorzystaniu dostępnej powierzchni dachu: 7,5 kW, natomiast planowany roczny uzysk energii z instalacji wynosi 8,07 kW.

Tabela 1. Zestawienie miesięcznych uzysków energii w kWh dla poszczególnych rozwiązań

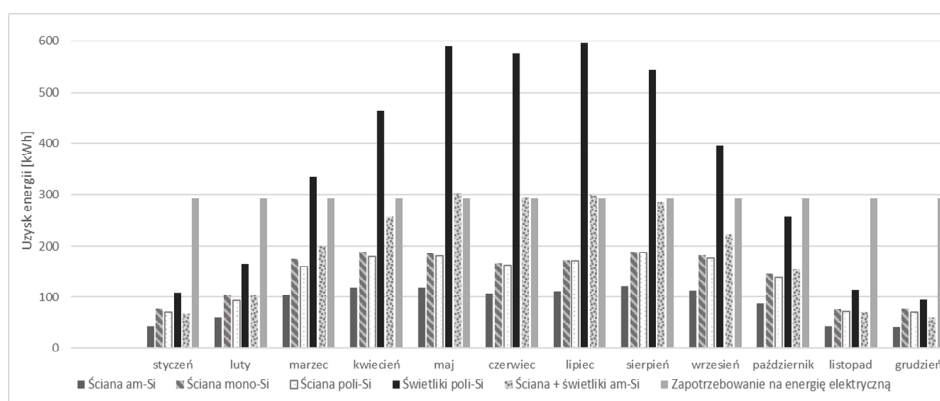
Table 1. Comparison of monthly energy yields for proposed BIPV solutions

Miesiąc	Ściana am-Si	Ściana mono-Si	Ściana poli-Si	Świetliki poli-Si	Ściana + świetliki am-Si
	Uzysk energii [kWh]				
styczeń	42,6	78,7	70,3	109,0	67,4
luty	59,9	104,2	93,4	165,7	102,7
marzec	104,7	174,6	159,3	335,2	199,6
kwiecień	118,0	188,9	179,6	465,3	257,5
maj	118,1	185,7	180,5	589,8	302,9
czerwiec	107,1	166,4	162,6	577,0	293,1
lipiec	111,2	172,0	171,4	595,1	299,4
sierpień	120,5	188,8	187,7	545,0	284,9
wrzesień	113,2	182,4	176,8	395,5	224,3
październik	87,5	146,0	139,3	256,7	154,1
listopad	42,6	76,3	70,7	113,8	69,9
grudzień	40,6	77,8	70,5	94,5	59,8
Σ	1066	1741,8	1662,1	4242,6	2315,5

4. Analiza wyników

Prognozowane uzyski dla zaproponowanych rozwiązań w celu analizy porównawczej przedstawiono na wspólnym wykresie wraz z miesięcznym zapotrzebowaniem na energię elektryczną.

Poniższe wyniki pokazują, że największy uzysk energii możliwy jest w przypadku zastosowania świetlików dachowych polikrystalicznych, nieprzeziernych. Wówczas od marca do września instalacja będzie w stanie pokryć zapotrzebowanie w całości, a w najkorzystniejszych miesiącach uzysk energii może być nawet dwukrotnie większy od zapotrzebowania.



Rys. 2. Porównanie miesięcznych uzysków energii dla poszczególnych rozwiązań zintegrowanych z budynkiem i zapotrzebowania na energię elektryczną

Fig. 2. Comparison of monthly energy yields for each of BIPV solutions and electricity demand

Najmniej korzystnym rozwiązaniem jest ściana kurtynowa z ogniwami wykonanymi z amorficznego krzemu o przezierności 30%. Jest ona w stanie wyprodukować rocznie jedynie 30% całkowitej potrzebnej energii.

W przypadku zastosowania zarówno ściany kurtynowej jak i świetlików dachowych z amorficznego krzemu w miesiącach letnich możliwe jest całkowite pokrycie zapotrzebowania na energię elektryczną. W skali roku pokrycie sięgać może około 65%.

Porównywalne wielkości są możliwe do uzyskania przy zastosowaniu ogniw mono- i polikrystalicznych. Instalacja jest wówczas w stanie pokryć około 50% zapotrzebowania w skali roku.

5. Wnioski

Zastosowanie systemów fotowoltaicznych zintegrowanych z budynkiem może stanowić alternatywę dla tradycyjnych instalacji dachowych, bowiem od-

powiednie rozwiązanie pozwala na uzyskanie wystarczającej ilości energii, aby pokryć zapotrzebowanie budynku. Jednakże wielkość uzysków energii z instalacji fotowoltaicznej zależy od jej lokalizacji, kąta nachylenia względem podłoża oraz zastosowanej technologii. Wydajność systemu spada wraz ze wzrostem przejrzystości szyb. Z analizy wyników symulacji wynika, że instalacja zintegrowana z budynkiem w formie ściany kurtynowej jest w stanie pokryć do 50% zapotrzebowania w ciągu roku. Znacznie korzystniejsze są rozwiązania w formie świetlików dachowych z racji optymalnego nachylenia względem podłoża.

Literatura

- [1] Debbarma M, Sudhakar K., Baredar P.: Comparison of BIPV and BIPVT: A review. *Resource-Efficient Technologies*, 3, 2017, s. 263.
- [2] Muszyńska-Łanowy M.: Ekologia dla oczu. Estetyka powłoki BIPV, *Świat Szkła*, nr 7, 2015, s.26-34.
- [3] Muszyńska-Łanowy M.: BIPV - fotowoltaika zintegrowana z budynkiem, *Fotowoltaika w architekturze. Świat Szkła*, lipiec 2011, s.14-25.
- [4] Shukla A. K., Sudhakar K., Baredar P.: A comprehensive review on design of building integrated photovoltaic system. *Energy and Buildings*, 128, 2016, s. 99.
- [5] Pietruszko Stanisław M., *Fotowoltaika zintegrowana z budownictwem (BIPV)*, VI Forum Operatorów Systemów i Odbiorców Energii i Paliw „Bezpieczeństwo energetyczne a nowe kierunki wytwarzania i wykorzystania energii w Warszawie, Warszawa 2014.
- [6] Shukla A. K., Sudhakar K., Baredar P.: Recent advancement in BIPV product technologies: A review. *Energy and Buildings*, 140, 2017, 188.
- [7] Solar Energy International, *Photovoltaics: Design and Installation Manual*, 2004.

ANALYSIS OF BIPV SOLUTIONS IN A SINGLE-FAMILY HOUSE

Summary

The conception of photovoltaic systems as an integral part of the building known as Building Integrated Photovoltaics (BIPV) is based on the adaptation of the PV modules with different building elements. It became an alternative to traditional building materials within the roof and facades, glass facade systems and curtain walls.

The article raises a question concerning usage of the solar energy for electricity production in photovoltaic systems integrated with the building such as glass facades, skylights or curtain walls. The article also includes an analysis of the energy production by BIPV technologies installed on the building situated in Warsaw. An analysis of produced electricity during the year for given solutions such as curtain walls and skylights with different types of solar cells was performed using PVsyst 6.43 software. The results are been compared to the electric energy consumption of the building, what enabled to evaluate the percentage of energy consumption coverage by BIPV solutions. Unfortunately, due to insufficient number of modules or localization of the PV array, not all of the presented solutions allowed to cover the building's electricity consumption.

Keywords: BIPV, solar cells, monocrystalline cells, polycrystalline cells, PV array, consumption of the energy, energy-efficient construction

Przesłano do redakcji: 24.05.2016 r.

Przyjęto do druku: 31.01.2018 r.