

Mateusz FORTUŃSKI*, Tomasz JARMUDA*

MODELOWANIE SOLARNO-WIATROWYCH SYSTEMÓW HYBRYDOWYCH ZASILAJĄCYCH GOSPODARSTWA DOMOWE NA OBSZARZE POLSKI

Publikacja ma charakter naukowo-techniczny i dotyczy modelowania solarno-wiatrowych systemów hybrydowych zasilających gospodarstwa domowe na obszarze Polski z wykorzystaniem odnawialnych źródeł energii. Wśród najpopularniejszych energetycznych technologii alternatywnych, znajdują się moduły fotowoltaiczne i turbiny wiatrowe. Połączenie ich w ramach systemu hybrydowego może przynieść duże korzyści z uwagi na ich komplementarność. Celem artykułu jest przedstawienie najważniejszych aspektów działania systemów hybrydowych zasilających gospodarstwa domowe i porównanie wytwarzania energii elektrycznej za ich pomocą w celu zaspokojenia zapotrzebowania na energię z jej wytwarzaniem przy wykorzystaniu pojedynczego odnawialnego źródła. Artykuł kończą podsumowanie i wnioski.

SŁOWA KLUCZOWE: system hybrydowy, system solarno-wiatrowy, moduł fotowoltaiczny, turbina wiatrowa, energia odnawialna.

1. WSTĘP

Najważniejszym elementem ziemskiego bilansu energetycznego jest energia promieniowania słonecznego, która dociera do planety w postaci fal elektromagnetycznych z zakresu światła widzialnego. Po dotarciu do ziemskiego ekosystemu energia słoneczna ulega przemianom na inne formy energii – między innymi na energię kinetyczną wiatru. Ilość energii Słońca docierającej do Ziemi wielokrotnie przewyższa zapotrzebowanie cywilizacji ludzkiej na energię. W związku z tym powstały technologie, które umożliwiają wykorzystanie tej energii w różnych formach. Do najpopularniejszych technologii energetycznych można zaliczyć moduły fotowoltaiczne i turbiny wiatrowe [7, 8].

Moduły fotowoltaiczne to urządzenia umożliwiające przemianę energii promieniowania elektromagnetycznego na energię elektryczną prądu stałego. Technologia powstała pod koniec XIX wieku i od tego czasu była stale rozwijana. Istnieje wiele rodzajów ogniw fotowoltaicznych, których nazwy pochodzą od nazw pierwiastków chemicznych z których są zbudowane. W dzisiejszych czasach najpopularniejsze są ogniwa krzemowe. Ogniwa słoneczne składają się

* Politechnika Poznańska

z dwóch warstw – warstwy wolnych elektronów (n) oraz warstwy dziur elektrowych (p). Efekt fotowoltaiczny polega na powstaniu różnicy potencjałów i zjawiska przepływu ładunku elektrycznego wskutek wystawienia materiału na działanie promieniowania elektromagnetycznego z zakresu fal widzialnych (światła). Zjawisko jest ściśle związane z efektem fotoelektrycznym, w którym również następuje zamiana energii promieniowania słonecznego na energię elektryczną wskutek wybitcia elektronów. Ponieważ po pewnym czasie pomiędzy warstwami p i n stworzy się warstwa zaporowa uniemożliwiająca bezpośredni przepływ elektronów z warstwy n do warstwy p , wolne elektrony wybite wskutek pochłonięcia fotonu wędrują z warstwy n do warstwy p poprzez zewnętrzny obwód zawierający odbiornik [7, 8, 18].

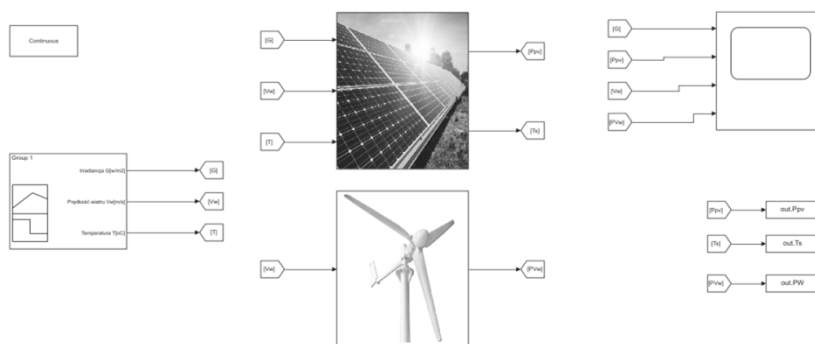
Turbiny wiatrowe umożliwiają przemianę energii kinetycznej wiatru na energię elektryczną prądu przemiennego. Energia wiatru była wykorzystywana przez ludzką od początków rozwoju cywilizacji. Pierwsza instalacja wytwarzająca energię elektryczną powstała w połowie XX wieku. W skład turbiny wiatrowej wchodzi wirnik z łopatkami zamieniający energię ruchu mas powietrza na energię ruchu obrotowego wału siłowni wiatrowej, przekładnia oraz synchroniczna maszyna indukcyjna konwertująca energię ruchu obrotowego na energię elektryczną prądu przemiennego [7, 11].

Rosnący problem szkodliwego wpływu cywilizacji ludzkiej na środowisko naturalne spowodował znaczny wzrost zainteresowania wytwarzania energii za pomocą alternatywnych źródeł energii. Rosnące ceny wytwarzania energii elektrycznej przy wykorzystaniu konwencjonalnych źródeł energii wpływając na ceny zasilania gospodarstwa domowego z sieci elektroenergetycznej przyczyniły się do zwiększenia liczby odnawialnych instalacji energetycznych zasilających gospodarstwa domowe. Większość z nich to instalacje połączone z siecią elektroenergetyczną (instalacje ON-GRID) z uwagi na małe korzyści wynikające z lokalnego magazynowania energii elektrycznej. Instalacje fotowoltaiczne cieszą się znacznie większą popularnością w kontekście zasilania gospodarstw domowych w porównaniu z turbinami wiatrowymi. Połączenie źródeł wytwórczych natomiast może wpłynąć korzystnie na działanie systemu hybrydowego, ze względu na wzajemne kompensowanie obu źródeł wyprodukowaną energią elektryczną [14].

Na podstawie przeglądu literatury w bazach czasopism: IEE, ELSEVIER, WILEY, SPRINGER [1, 2, 4, 5, 8, 9, 11, 12, 14, 15, 16, 18, 19, 20, 21] stwierdzono, że analizowane zagadnienia w obszarze odnawialnych źródeł energii są aktualne.

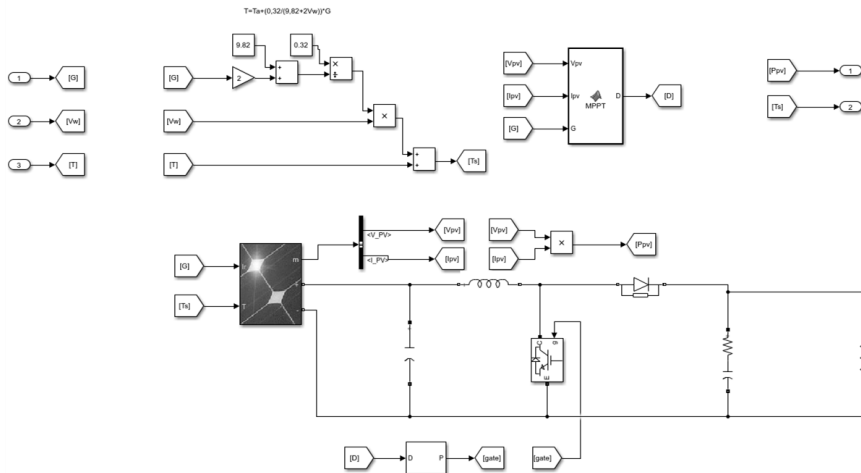
2. MODELOWANIE SOLARNO-WIATROWEGO SYSTEMU ZASILANIA

Do przeprowadzenia analizy działania odnawialnego systemu zasilania wykorzystać można oprogramowanie MATLAB z dodatkiem SIMULINK. Poniższy rysunek przedstawia model solarno-wiatrowego systemu odnawialnego opracowany w środowisku SIMULINK. Model przedstawiony na rysunku 1 wykorzystuje dane irradiancji, prędkości wiatru oraz temperatury otoczenia do symulacji działania modułów fotowoltaicznych oraz turbin wiatrowych wchodzących w skład systemu odnawialnego.



Rys. 1. Model odnawialnego systemu zasilania zaprojektowany w środowisku MATLAB & SIMULINK

Sekcja solarna może zostać wykonana przy wykorzystaniu bloku *PV ARRAY* przedstawionego na rysunku 2. Dane wejściowe w postaci irradiancji, prędkości wiatru oraz temperatury umożliwiają obliczenie mocy generowanej przez instalację fotowoltaiczną z uwzględnieniem wpływu temperatury modułu PV. Nieuwzględnienie wpływu temperatury modułu PV na jego pracę wiąże się z powstaniem błędu obliczeniowego na poziomie około 5% ilości energii elektrycznej wyprodukowanej przez moduł PV w okresie 1 roku [3]. Z uwagi na to zaleca się uwzględnienie wpływu temperatury modułu PV na jego pracę. Ważnym elementem układu jest konwerter BOOST umożliwiający zmianę napięcia modułu PV, który jest sterowany za pomocą algorytmu P&O (ang. *Perturbation and Observe*) poszukującego punkt mocy maksymalnej pracy modułu fotowoltaicznego. Algorytm P&O to metoda zaburzania i obserwacji, polegająca na wymuszonych zmianach napięcia pracy modułu PV i obserwacji zmian mocy tego modułu PV [5, 6, 8, 18]. Na rysunku 2 przedstawiono model sekcji solarnej zaprojektowany w środowisku MATLAB & SIMULINK.



Rys. 2. Model sekcji solarnej zaprojektowany w środowisku MATLAB & SIMULINK

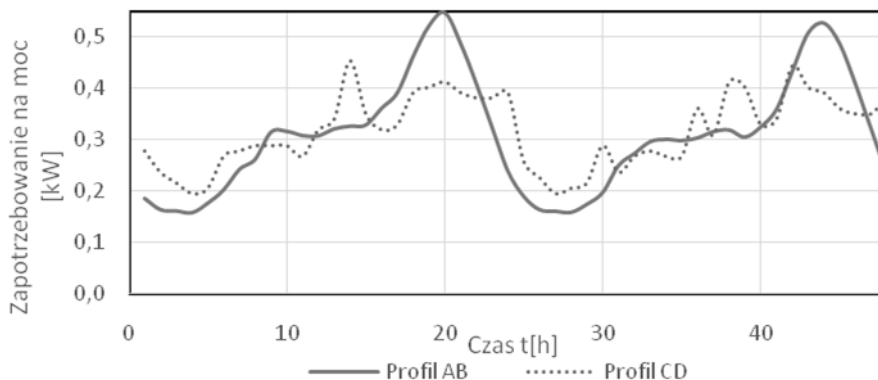
Sekcja wiatrowa systemu hybrydowego może zostać wykonana przy pomocy charakterystyki mocy turbiny wiatrowej. Taka realizacja symulacji działania turbiny wiatrowej niesie ze sobą pominięcie stanów dynamicznych turbiny, których wpływ na obliczenia uzysków energii elektrycznej często uznaje się za mało istotny. Dane wejściowe prędkości wiatru umożliwiają określenie chwilowej mocy elektrycznej generowanej przez instalację wiatrową. Na rysunku 3 przedstawiono blok *Function (Fcn)* przeznaczony do modelowania charakterystyki mocy turbiny wiatrowej [11, 17].



Rys. 3. Blok *Function (Fcn)* przeznaczony do modelowania charakterystyki mocy turbiny wiatrowej

Bardzo ważnym aspektem przeprowadzania symulacji działania odnawialnych systemów zasilania jest dokładność danych wejściowych irradiancji i temperatury. Wykorzystanie danych irradiancji uśrednianych z krokiem 1 godziny niesie ze sobą powstanie błędu obliczeniowego na poziomie około 1% w skali roku. Zwiększenie dokładności danych nie powoduje dużego spadku błędu obliczeniowego, dlatego bardzo często w danych wejściowych do przeprowadzanych symulacji stosowane jest uśrednianie co 1 godzinę. W przypadku danych prędkości wiatru natomiast uśrednianie ma znacznie większe znaczenie. Uśrednianie co 10 minut lub co 15 minut uznaje się za dokładne, ponieważ generują powstanie błędu obliczeniowego w skali całego roku na poziomie około 3% [3]. Uśrednianie co 30 i 60 minut natomiast zwiększają błąd obliczeniowy do około 6%.

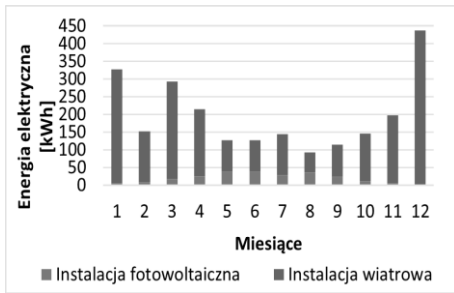
Do przeprowadzenia symulacji istotne są również dane zapotrzebowania gospodarstwa domowego na moc elektryczną, które pozwolą dokonać bilansów energii elektrycznej wytwarzanej przez system zasilania oraz zużywanej przez gospodarstwo domowe. Na rysunku 4 przedstawiono dobowe przebiegi mocy dla profili obciążenia (AB i CD) dla 7 i 8 Marca 2017 roku wyznaczone na podstawie charakterystyki obciążeń bezwzględnych od firmy ENERGA-OPERATOR.



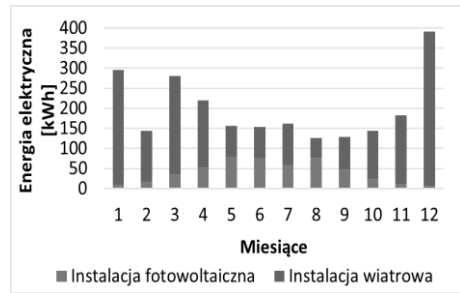
Rys. 4. Dobowe przebiegi mocy dla profili obciążenia (AB i CD) dla 7 i 8 marca 2017 roku

3. WPŁYW UDZIAŁU MOCY POSZCZEGÓLNYCH SEKCJI SYSTEMU HYBRYDOWEGO NA JEGO PRACĘ

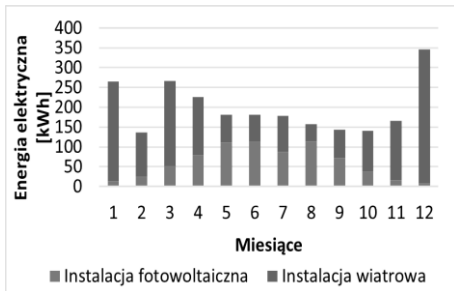
Ważnym aspektem działania solarno-wiatrowych systemów hybrydowych jest udział mocy poszczególnych sekcji instalacji. W celu określenia najbardziej korzystnych wariantów solarno-wiatrowych systemów hybrydowych przeprowadzono badanie miesięcznych uzysków energii instalacji w zależności od mocy poszczególnych sekcji. Na rysunku 5 zawarto wykresy ilości energii elektrycznej wyprodukowanej w okresie poszczególnych miesięcy przez system hybrydowy o określonych udziałach mocy sekcji solarnej i wiatrowej systemu hybrydowego [2, 4, 9, 12].



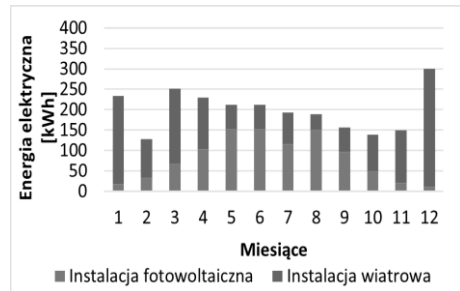
a)



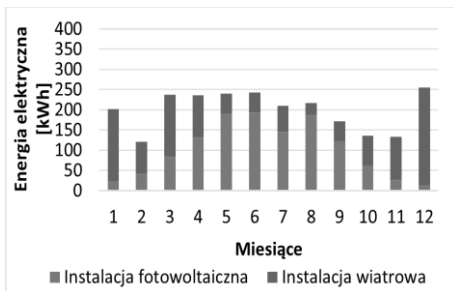
b)



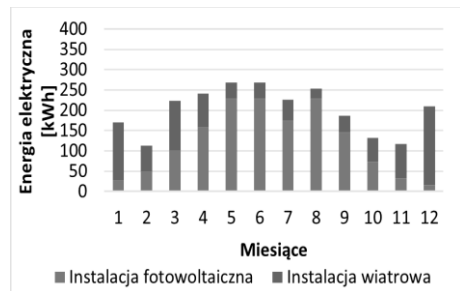
c)



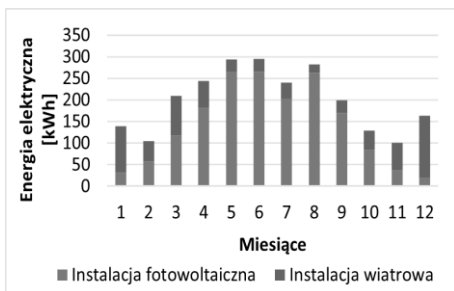
d)



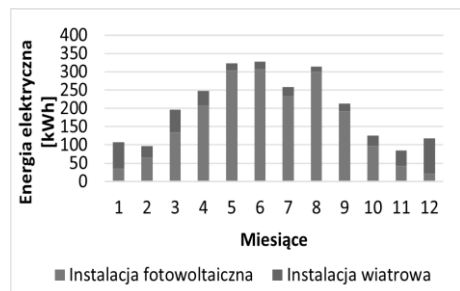
e)



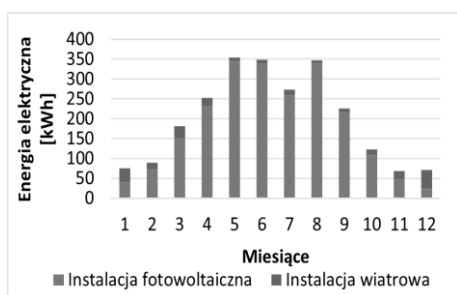
f)



g)



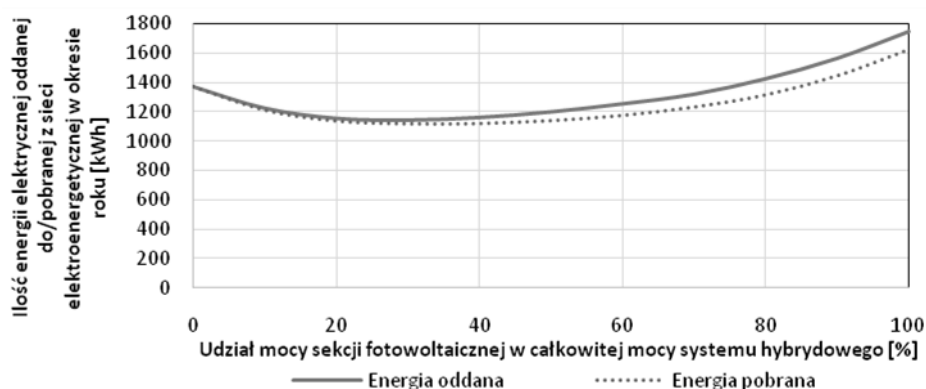
h)



i)

Rys. 5. Ilość energii elektrycznej wyprodukowanej przez system hybrydowy w okresie roku dla sekcji solarnej o mocy: a) 10%, b) 20%, c) 30%, d) 40%, e) 50%, f) 60%, g) 70%, h) 80% i i) 90% mocy systemu hybrydowego

Na podstawie przeprowadzonych symulacji stwierdzono, że wariant o udziale mocy sekcji fotowoltaicznej na poziomie od 30% do 40% charakteryzuje się największą ilością energii oddawanej do sieci i najmniejszą ilością energii pobieranej z sieci w ciągu roku (rysunek 6). Ponadto stwierdzono, że połączenie solarnych i wiatrowych źródeł wytwórczych przynosi znaczne korzyści względem instalacji odnawialnych pracujących samodzielnie. Wynika to ze zmniejszenia różnic pomiędzy ilością energii wytwarzaną w poszczególnych miesiącach co przyczynia się do zmniejszenia czasu w ciągu roku, w którym energia elektryczna musi być pobierana z sieci oraz zwiększenia czasu w ciągu roku, w którym energia jest do sieci oddawana [4, 9, 15, 16, 17, 20]. Na rysunku 6 przedstawiono całkowitą ilość energii elektrycznej oddanej do sieci elektroenergetycznej i energii z niej pobranej w okresie roku w zależności od udziału mocy sekcji fotowoltaicznej w całkowitej mocy systemu hybrydowego.



Rys. 6. Całkowita ilość energii elektrycznej oddanej do sieci elektroenergetycznej i energii z niej pobranej w okresie roku w zależności od udziału mocy sekcji fotowoltaicznej w całkowitej mocy systemu hybrydowego

4. WPŁYW LOKALIZACJI SYSTEMU HYBRYDOWEGO NA JEGO PRACĘ

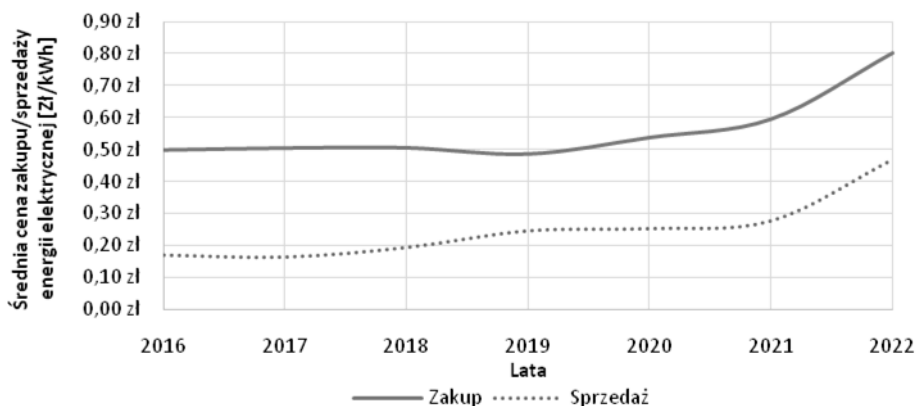
Badania wpływu lokalizacji odnawialnego systemu zasilania wykazały, że w przypadku instalacji fotowoltaicznych pracujących w Polsce lokalizacja nie ma szczególnego wpływu na uzyski energii w okresie roku. Ilość energii produkowanej przez turbiny wiatrowe natomiast jest silnie zależna od warunków wietrzności lokalizacji, w której znajduje się odnawialne źródło energii. W tabeli 1 zawarto wyniki uzysków energii poszczególnych sekcji systemu hybrydowego dla kilku lokalizacji w Polsce. Wśród lokalizacji, dla których przeprowadzono symulacje znalazły się lokalizacje o dobrych warunkach wietrzności (Gdynia i Warszawa) oraz słabych warunkach wietrzności (Piła i Zakopane). Zauważono, że lokalizacje o lepszych warunkach wietrzności charakteryzują znacznie większe ilości energii wyprodukowanych przez systemy hybrydowe [9, 13].

Tabela 1. Wyniki miesięcznych uzysków energii dla poszczególnych lokalizacji pracy solarno-wiatrowych systemów hybrydowych (E_{pv} – energia elektryczna z sekcji solarnej, E_w – energia elektryczna z sekcji wiatrowej).

Miesiąc	GDĄSK		PIŁA		WARSZAWA		ZAKOPANE	
	E_{pv} [kWh]	E_w [kWh]	E_{pv} [kWh]	E_w [kWh]	E_{pv} [kWh]	E_w [kWh]	E_{pv} [kWh]	E_w [kWh]
1	18,42	268,93	21,22	28,37	19,12	188,45	36,44	20,82
2	46,88	110,39	49,13	9,41	45,04	77,83	71,59	8,16
3	89,64	177,19	96,97	22,29	100,82	107,57	118,59	5,60
4	160,60	182,60	169,29	24,41	162,86	191,17	151,18	10,75
5	206,28	93,00	200,17	12,34	172,12	64,88	138,06	2,13
6	208,25	48,67	190,75	8,96	218,97	39,28	151,23	2,12
7	205,09	85,70	198,81	16,81	216,48	74,01	196,73	1,76
8	202,70	66,69	200,89	20,32	213,21	62,47	161,71	1,91
9	112,45	78,26	125,32	15,85	112,75	89,44	93,81	5,04
10	67,66	46,91	68,52	16,50	75,24	107,13	67,28	1,61
11	20,99	180,95	23,91	15,45	28,22	114,28	43,22	9,09
12	17,26	170,91	18,76	14,61	23,21	93,17	30,46	9,17
	SUMA	2866,40	SUMA	1569,05	SUMA	2597,72	SUMA	1338,47

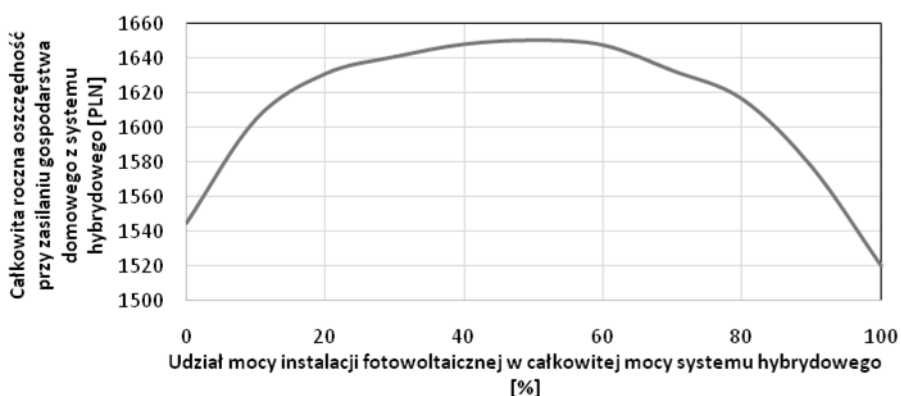
5. ASPEKTY EKONOMICZNE SOLARNO-WIATROWYCH INSTALACJI HYBRYDOWYCH

W celu określenia opłacalności ekonomicznej solarno-wiatrowych układów hybrydowych, oprócz kosztów instalacji, ważne są również ceny zakupu oraz sprzedaży energii elektrycznej. Na rysunku 7 przedstawiono średnią cenę zakupu oraz sprzedaży energii w latach 2016-2022. Gwałtowny wzrost cen energii świadczyć może o zwiększeniu opłacalności inwestycji w odnawialne źródła energii w przyszłości [10, 21].



Rys. 7. Zmiany średniej ceny zakupu i sprzedaży energii elektrycznej do sieci w latach 2016-2022 [3, 10, 21]

Systemy hybrydowe o udziale sekcji solarnej na poziomie od 40% do 60% mocy systemu charakteryzują się największą całkowitą roczną oszczędnością przy zasilaniu gospodarstwa domowego (rysunek 8). Ponadto na podstawie rozeznania rynku OZE stwierdzono, że koszty inwestycyjne w przypadku instalacji solarnych są mniejsze niż w przypadku instalacji wiatrowych, co powoduje wydłużenie okresu zwrotu turbin wiatrowych względem modułów fotowoltaicznych. Na rysunku 8 przedstawiono całkowitą roczną oszczędność przy zasilaniu gospodarstwa domowego z systemu hybrydowego w zależności od udziału mocy instalacji fotowoltaicznej w całkowitej mocy systemu hybrydowego.



Rys. 8. Całkowita roczna oszczędność przy zasilaniu gospodarstwa domowego z systemu hybrydowego w zależności od udziału mocy instalacji fotowoltaicznej w całkowitej mocy systemu hybrydowego [3]

6. EKOLOGICZNY ASPEKT ZASILANIA GOSPODARSTW DOMOWYCH Z ODNAWIALNYCH ŹRÓDEŁ ENERGII

Ważnym aspektem wytwarzania energii elektrycznej w dzisiejszych czasach jest ekologiczność tego procesu. Odnawialne źródła energii należą do rozwiązań przyjaznych środowisku względem konwencjonalnych instalacji wytwarzających energię elektryczną. W Polsce większość energii elektrycznej dostarczanej do odbiorców (73,8%) pochodzi z elektrowni zasilanych węglem kamiennym i brunatnym. Na podstawie danych dotyczących średnich emisji spalin i gazów cieplarnianych w procesach wytwarzania energii elektrycznej w Polsce oszacowano potencjalną redukcję emisji CO₂ przy zwiększeniu udziału liczby gospodarstw domowych zasilanych z odnawialnych źródeł energii (tabela 2). Zaobserwowano, że znaczne zwiększenie popularności systemów odnawialnych zasilających gospodarstwa domowe nie przyczyni się w znaczny sposób do redukcji emisji zanieczyszczeń w skali całego kraju [19]. W tabeli 2 przedstawiono wpływ udziału liczby gospodarstw domowych posiadających systemy hybrydowe typu solarno-wiatrowego na zmniejszenie emisji CO₂ w Polsce w okresie 1 roku.

Tabela 2. Wpływ udziału liczby gospodarstw domowych posiadających systemy hybrydowe typu solarno-wiatrowego na zmniejszenie emisji CO₂ w Polsce w okresie 1 roku [3].

Udział liczby gospodarstw domowych z hybrydowymi systemami zasilania [%]	Prognozowana redukcja emisji CO ₂ [%]
1	0,09
5	0,47
10	0,93
15	1,40
20	1,86
25	2,33
30	2,79
45	4,19
50	4,65

7. PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonych w środowisku MATLAB & SIMULINK badań stwierdzono, że źródła solarne charakteryzują się największą produkcją energii elektrycznej w okresie letnim. Turbiny wiatrowe natomiast najwięcej energii produkują w okresie zimowym. W związku z tym duże korzyści, pod względem ciągłości zasilania odbiorników, przynosi połączenie źródeł wytwórczych ze względu na ich komplementarność. Badania wykazały, że niemożliwe jest zapewnienie ciągłego zasilania przez solarno-wiatrowe odnawialne systemy hybrydowe

bez wykorzystania magazynów energii. Przeprowadzone symulacje wykazały, że nawet przewymiarowanie systemu zasilania nie gwarantuje całkowitego wyeliminowania dłuższych okresów, w których ilość energii produkowanej jest mniejsza od zapotrzebowania. W związku z tym magazyny energii są kluczowym elementem odnawialnych systemów zasilania. Na podstawie analiz stwierdzono, że system hybrydowy typu solarno-wiatrowego wykazuje się najmniejszą ilością czasu w okresie roku, w którym energia musi być pobierana z magazynu energii w przypadku, gdy udział mocy sekcji fotowoltaicznej w całkowitej mocy systemu hybrydowego wynosi około 40%.

Podsumowując, energia odnawialna może zostać z powodzeniem wykorzystana do zasilania gospodarstw domowych w ramach systemów hybrydowych połączonych z siecią elektroenergetyczną. Współpraca źródeł solarnych i wiatrowych może zminimalizować, choć w pewnym stopniu, stochastyczno-deterministyczny charakter zmian warunków meteorologicznych, mających istotny wpływ na działanie instalacji hybrydowej względem źródeł pracujących autonomicznie. Ponadto, systemy hybrydowe są opłacalne ekonomicznie, lecz ich opłacalność jest nieco mniejsza od instalacji fotowoltaicznych pracujących samodzielnie. W związku z wyższą ceną instalacji wiatrowych względem generatorów solarnych, popularność systemów hybrydowych jest niska, lecz zmiany w sposobie rozliczania prosumentów oraz spadek cen instalacji wiatrowych wynikający z postępu technologicznego mogą spowodować pojawienie się większej ilości instalacji typu solarno-wiatrowego, zasilających gospodarstwa domowe w Polsce.

LITERATURA

- [1] Bayramov, S.; Prokazov, I.; Kondrashev, S.; Kowalik, J., Household Electricity Generation as a Way of Energy Independence of States—Social Context of Energy Management, *Energies* 2021, 14, 3407.
- [2] Campos R., do Nascimento L., Rüther R., The complementary nature between wind and photovoltaic generation in Brazil and the role of energy storage in utility-scale hybrid power plants, *Energy Conversion and Management Volume* 221, 1 October 2020.
- [3] Fortuński M., Aspekty techniczne, ekonomiczne i ekologiczne zasilania budynków wolnostojących ze źródeł hybrydowych, Praca magisterska, Politechnika Poznańska, Poznań 2022.
- [4] Gil G., Chowdhury J., Balta-Ozkan N., Hu Y., Varga L., Hart P., Optimising renewable energy integration in new housing developments with low carbon technologies, *Renewable Energy, Volume* 169, May 2021.
- [5] Gobichettipalayam Shanmugam, K., Sakthivel, T.S., Gaftar, Modeling and simulation of single- and double-diode PV solar cell model for renewable energy power solution, *Environ Sci Pollut Res* 29, 4414–4430 (2022).

- [6] Hao D., Qi L., Tirab A., Ahmed A., Azam A., Luo D., Pan Y., Zutao Z., Yan J., Solar energy harvesting technologies for PV self-powered applications: A comprehensive review, *Renewable Energy* Volume 188, April 2022.
- [7] Jastrzębska G., *Energia ze źródeł odnawialnych i jej wykorzystanie*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2017.
- [8] Jastrzębska G., *Ogniwa słoneczne. Budowa, technologia i zastosowanie*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2014.
- [9] Liu L., Wang Z., Wang Y., Wang J., Chang R., He G., Tang W., Gao Z., Li Z., Liu C., Zhao L., Qin D., Li S., Optimizing wind/solar combinations at finer scales to mitigate renewable energy variability in China, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 132, 2020.
- [10] Lowe R., Drummond P., Solar, wind and logistic substitution in global energy supply to 2050 – Barriers and implications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 153, January 2022.
- [11] Lubośny Z., *Farmy wiatrowe w systemie elektroenergetycznym*, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2016 Warszawa.
- [12] Mehrjerdi H., Modeling and optimization of an island water-energy nexus powered by a hybrid solar-wind renewable system, *Energy*, Volume 197, 15 April 2020.
- [13] Miao, C., Teng, K., Wang, Y., Jiang, L., Technoeconomic Analysis on a Hybrid Power System for the UK Household Using Renewable Energy: A Case Study, *Energies* 2020, 13, 3231.
- [14] Mikulik J., *Hybrydowa mikroinstalacja OZE zasilająca gospodarstwo domowe*, Wydawnictwa AGH, Kraków 2018.
- [15] Naeem A., Ul Hassan N., Arshad N., Design of Solar-Wind Hybrid Power System by using Solar-Wind Complementarity, 2020 4th International Conference on Green Energy and Applications (ICGEA), 2020.
- [16] Omar A. Al-Shahri, Firas B. Ismail, M.A. Hannan, M.S. Hossain Lipu, Ali Q. Al Shetwi, R.A. Begum, Nizar F.O. Al-Muhsen, Ebrahim Soujeri, Solar photovoltaic energy optimization methods, challenges and issues: A comprehensive review, *Journal of Cleaner Production*, Volume 284, 2021.
- [17] Pellegrini M., Guzzini A., Cesare S., Experimental measurements of the performance of a micro-wind turbine located in an urban area, *Energy Reports*, Volume 7, November 2021.
- [18] Pluta Z., *Podstawy teoretyczne fototermicznej konwersji energii słonecznej*, Warszawa 2006.
- [19] Razmjoo A., Kaigutha L., Vaziri Rad M.A., Marzband M., Davarpanah A., Denai M., A Technical analysis investigating energy sustainability utilizing reliable renewable energy sources to reduce CO2 emissions in a high potential area, *Renewable Energy* Volume 164, February 2021.
- [20] Zhang W., Maleki A., Birjandi A., Nazari M., Mohammadi O., Discrete optimization algorithm for optimal design of a solar/wind/battery hybrid energy conversion scheme, *International Journal of Low-Carbon Technologies*, Volume 16, Issue 2, May 2021.
- [21] Zhong J., Hu X., Yüksel S., Dinçer H., Ubay G., Analyzing the Investments Strategies for Renewable Energies Based on Multi-Criteria Decision Model, *IEEE Access*, vol. 8.

**MODELING OF SOLAR-WIND HYBRID SYSTEMS
SUPPLYING HOUSEHOLDS IN POLAND**

The publication is of a scientific and technical nature and concerns the modeling of solar-wind hybrid systems supplying households in Poland with the use of renewable energy sources. Among the most popular alternative energy technologies are photovoltaic modules and wind turbines. Combining them within a hybrid system can bring great benefits due to their complementarity. The aim of the article is to present the most important aspects of the operation of hybrid systems supplying households and to compare the generation of electricity by means of them in order to meet the demand for energy with its production using a single renewable source. The article ends with a summary and conclusions.

KEYWORDS: hybrid system, solar-wind system, photovoltaic module, wind turbine, renewable energy.

(Received: 27.09.2022, revised: 17.11.2022)