

Wyznaczanie optymalnej struktury elektrowni hybrydowej ze źródłami typu wiatrowo-solarnego

Streszczenie. W pracy przedstawiony został algorytm doboru struktury elektrowni hybrydowej typu wiatrowo-solarnego. Opisano wybrane elementy struktury zaproponowanej elektrowni. Przedstawiono proces implementacji algorytmu, w tym wykorzystanie kryteriów optymalizacyjnych, które bezpośrednio wpływają na proces doboru paneli fotowoltaicznych i turbin wiatrowych tworzących układ hybrydowy, do zadanego profilu obciążenia. W optymalizacji wykorzystano algorytm genetyczny.

Abstract. The paper presents the algorithm of selecting the structure of a hybrid wind-solar power plant. The implementation process was presented, including the use of optimization criteria, which directly affect the process of selection of photovoltaic panels and wind turbines, forming a hybrid system, for the set parameters. A universal genetic algorithm has been used to optimize the system. **(Determining the optimal hybrid power plant structure with wind-solar type sources.)**

Słowa kluczowe: turbiny wiatrowe, elektrownie wiatrowe, optymalizacja, elektrownie hybrydowe.

Keywords: wind turbines, PV farms, optimization, hybrid power plants.

Wstęp

Źródła energii charakteryzujące się niską emisją zanieczyszczeń do środowiska naturalnego są coraz częściej wykorzystywane do pokrywania zapotrzebowania w sieci elektroenergetycznej. Elementy sieci w postaci farm fotowoltaicznych, turbin wiatrowych i magazynów energii są coraz bardziej istotne ze względu na rosnące ograniczenia związane z wykorzystaniem konwencjonalnych źródeł energii. W wyniku wzrostu udziału OZE w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym, sterowanie ilością generowanej energii jest utrudnione. Jest to spowodowane stochastycznym charakterem pracy tych układów, co wiąże się z niestabilną pracą i niską sprawnością produkcji [1-6]. Z tego względu trudno jest przewidywać ilość generowanej energii, tym samym prognozy są mało precyzyjne. Aktualnie prowadzone są badania, które mają na celu umożliwienie zwiększenia efektywności produkcji i znaczącego ograniczenia wpływu warunków atmosferycznych na parametry wyjściowe źródeł odnawialnych [5]. Prace te dotyczą układów hybrydowych, składających się z kilku rodzajów źródeł (np. paneli fotowoltaicznych i turbin wiatrowych), często także zawierających magazyny energii. Moc wyjściowa struktur ze źródłami hybrydowymi jest mniej zależna od pory dnia i nocy lub pory roku, w porównaniu z układem wykorzystującym jeden typ źródła odnawialnego. Produkcja energii z paneli fotowoltaicznych osiąga najwyższe wyniki dla okresu letniego, natomiast dla turbin wiatrowych najwyższe wartości generowanej energii przypadają na okres zimowy. Jednakże współpraca tych układów powinna przebiegać zgodnie ze ściśle przyjętym algorytmem, który pozwoli na optymalne wykorzystanie zdolności wytwórczych obu tych struktur [1].

Na tej podstawie zajęto się zagadnieniem poprawnego podziału generowanej energii z poszczególnych źródeł w zależności od zapotrzebowania wybranego odbiornika (obiektu przemysłowego, klientów indywidualnych). Dla tak przedstawionego problemu dotyczącego optymalizacji struktury generacyjnego układu hybrydowego wykorzystano uniwersalny algorytm genetyczny (metody deterministyczne nie są wystarczające do poprawnego wyznaczenia szukanych wartości). Wyniki symulacji zostały przedstawione w formie tabel i wykresów w rozdziale z przykładem obliczeniowym. Założono, że w układzie nie będzie magazynu energii ze względu na znaczny wzrost kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych.

Dobór struktury elektrowni hybrydowych

Sposoby wytwarzania energii elektrycznej z konwencjonalnych źródeł energii są powszechnie wykorzystywane do produkcji energii elektrycznej. Nowoczesne rozwiązania tego typu zostały już zoptymalizowane i dopracowane do takiego poziomu, że trudno jest zwiększyć ich efektywność wytwarzania energii. Inaczej jest w przypadku coraz częściej stosowanych w systemach energetycznych źródeł odnawialnych, wykorzystywanych także w procesach regulacyjnych sieci elektroenergetycznej. Ich charakterystyki pozwalają na opracowywanie nowych struktur umożliwiających zwiększenie ich sprawności [1] oraz łączenie ich w układy hybrydowe, przez co istnieje możliwość lepszego dopasowania profilu generacyjnego do odbiorczego. Ze względu na stosunkowo niski koszt budowy i eksploatacji, najpopularniejszymi układami, nad którymi prowadzone są obecnie badania, są układy hybrydowe składające się z grupy paneli fotowoltaicznych oraz turbin wiatrowych. Ponadto układy te są bezpieczne i przyjazne dla środowiska naturalnego, co jest coraz częściej brane pod uwagę ze względu na obowiązujące przepisy ustawodawstwa europejskiego i polskiego. Instalowanie źródeł odnawialnych o niewielkich mocach w wybranych lokalizacjach jest ułatwione pod względem prawnym w porównaniu do źródeł konwencjonalnych i gwarantuje usytuowanie generatorów energii w niewielkiej odległości od odbiorcy.

Obecnie trwają ciągłe prace nad wykorzystaniem źródeł odnawialnych przez prężnie rozwijający się rynek samochodów elektrycznych. Wiąże się to z integracją pojazdów elektrycznych z siecią elektroenergetyczną poprzez stacje ładowania wykorzystujące OZE [1,3,4,7-21].

Z tych samych względów prowadzone są badania pozwalające określić aspekty techniczno-ekonomiczne układów hybrydowych, co jest zadaniem złożonym, wymagającym przyjęcia odpowiednich licznych założeń. Do tego celu wykorzystywane są metody optymalizacji, umożliwiające otrzymanie wyników w zakresie wybranych kryteriów np. dotyczących kosztów budowy i eksploatacji.

W realnych warunkach przemysłowych nieodzowne są również względy ekonomiczne inwestycji. W tym celu szacowana jest ilość energii, którą elektrownia hybrydowa będzie w stanie wytworzyć w wybranym okresie czasu (najczęściej jednego roku). Do przeprowadzenia analiz dotyczących przewidywanej produkcji energii wykorzystywane są historyczne wartości prędkości wiatru.

Uwzględnienie zmian prędkości wiatru jest najczęściej realizowane poprzez rozkład gęstości prawdopodobieństwa Weibulla, który przy zerowej wartości współczynnika przesunięcia zapisywany jest w postaci [1,22]:

$$(1) \quad p(v_w) = \frac{k}{c} \left(\frac{v_w}{c} \right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{v_w}{c} \right)^k}$$

gdzie: $p(v_w)$ – prawdopodobieństwo wystąpienia prędkości wiatru v_w w okresie jednego roku, k – współczynnik kształtu, c – współczynnik skali.

Rozkład ten jest często wykorzystywany w energetyce wiatrowej. Umożliwia on określenie spodziewanej ilości generowanej energii elektrycznej z siłowni wiatrowej. Ilość tej energii jest ściśle powiązana z określonym typem zastosowanej turbiny. Wzór określający spodziewaną wartość uzysku energetycznego przedstawia zależność [1,22]:

$$(2) \quad A_{TW} = \int_0^T P_{TW}(v_w) dt_{TW}$$

gdzie: T - rozpatrywany okres pracy turbiny, $P_{TW}(v_w)$ - moc turbiny wiatrowej w danej chwili t (prędkość wiatru jest równa v_w).

Rozkład prawdopodobieństwa Weibulla jest również wykorzystywany do obliczania średniej mocy turbin [1,22]:

$$(3) \quad \bar{P} = \int_0^{\infty} P(v_w) p(v_w) dv_w$$

gdzie: $P(v_w)$ – moc turbiny dla prędkości wiatru v_w zgodnie z krzywą mocy turbiny, $p(v_w)$ – prawdopodobieństwo wystąpienia prędkości wiatru v_w w okresie jednego roku.

Energia elektryczna wytwarzana przez panele fotowoltaiczne [1,3,17] jest uzależniona od wielu czynników, z których do najważniejszych należą: technologia wykonania modułu (monokrystaliczne, polikrystaliczne, CdTe, CIGS itd.), gęstość mocy promieniowania słonecznego w ciągu roku na danym obszarze, temperatura otoczenia (temperatura ogniw), proces starzenia, uszkodzenia, zabrudzenia i zaciemnienia występujące podczas eksploatacji [6].

Czynniki te mogą wpływać w sposób stochastyczny na ilość wyprodukowanej energii w ciągu doby w zależności od rozpatrywanego okresu (wiosna, lato, jesień, zima). Podstawowym parametrem pozwalającym oszacować potencjalną ilość wyprodukowanej energii jest pomiar gęstości mocy promieniowania (irradiancji). Zbiór danych w postaci próbek czasowych z odpowiadającymi im wartościami irradiancji pozwala na określenie spodziewanej generacji z modułu PV. W tym celu można wykorzystać zależność:

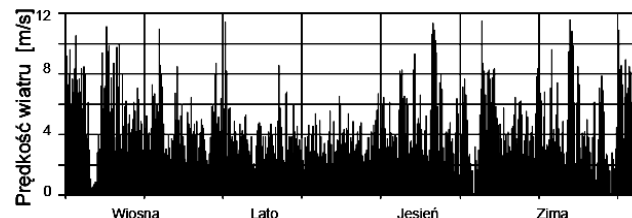
$$(4) \quad A_{PV} = \int_0^T P_{PV}(G_r) dt_{PV}$$

gdzie: $P_{PV}(G_r)$ – moc modułów PV w danej chwili t przy gęstości pomiarowej G_r .

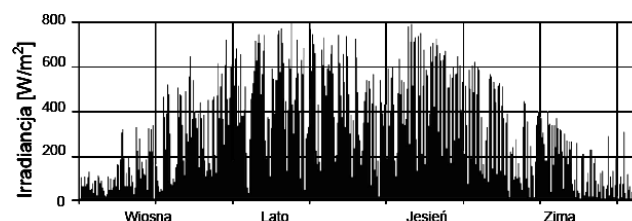
Implementacja algorytmu optymalizującego

Działanie algorytmu optymalizującego zostało przedstawione na przykładzie analizy doboru liczby źródeł wytwórczych wiatrowo-solarnych na potrzeby pokrycia zapotrzebowania na energię elektryczną obiektu przemysłowego o zadanym profilu obciążenia. W tym celu została opracowana autorska aplikacja w języku C# w środowisku programistycznym MS Visual Studio .NET.

Do obliczeń wykorzystano dane zawierające parametry elektryczne rozważanych komponentów (charakterystyki paneli fotowoltaicznych i turbin wiatrowych), które mogą być wykorzystywane do pokrycia założonego zapotrzebowania na energię przez obiekt. W obliczeniach wykorzystywano pomiary uśrednionej wartości gęstości natężenia promieniowania słonecznego i prędkości wiatru dla okresów 1-godzinnych w ciągu roku. Zmiany prędkości wiatru przedstawiono na rysunku 1, a wartości irradiancji pokazano odpowiednio na rysunku 2.



Rys. 1. Histogram prędkości wiatru wykorzystany w optymalizacji



Rys. 2. Histogram irradiancji wykorzystany w optymalizacji

Do analizy wykorzystano profil obciążenia, który przedstawiono w tabeli 2. Okres zapotrzebowania został podzielony na 4 przedziały czasowe, dla których przyjęto stałe obciążenia. Wybrany profil zapotrzebowania przedstawia zapotrzebowanie na energię w ciągu doby przez wybrany obiekt przemysłowy.

Tabela 1 Przyjęty profil obciążenia

Obciążenie [MW]	Okres doby
2	00:00 – 06:00
3	06:00 – 12:00
3	12:00 – 18:00
1	18:00 – 24:00

Ze względu na charakter zadania, do optymalizacji zaproponowanej struktury elektrowni wykorzystany został algorytm genetyczny. W algorytmie stworzono populację 40 osobników, w których przechowywano informację na temat liczby generatorów i ich typów. Dane te zakodowano za pomocą genotypu składającego się z 8 genów (bitów) na każdą zmienną, których przykład został przedstawiony w tabeli 2. W obliczeniach wykorzystano selekcję metodą ruletki bez powtórzeń, mutację z prawdopodobieństwem 1% oraz krzyżowanie z prawdopodobieństwem 90%. Liczba pokoleń w przyjętym algorytmie wynosi 60. Ponadto wprowadzono granice poszukiwań, które wynoszą odpowiednio od 1 do 10000 sztuk dla paneli fotowoltaicznych oraz od 1 do 150 sztuk dla turbin wiatrowych.

Tabela 2 Struktura przykładowego osobnika (A – liczba modułów, B – liczba turbin, C – numer ID modułu, D – numer ID turbiny)

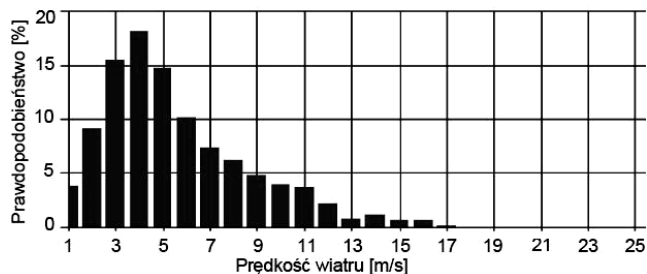
11010101	10111101	00001110	000010101
A	B	C	D

Funkcję celu opisano na podstawie zależności przedstawionej w postaci równania 5:

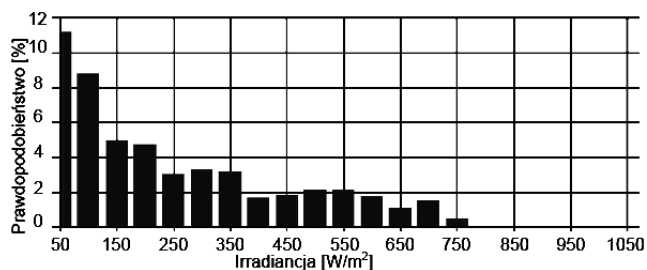
$$(5) \quad F_c(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^N (P_G(t_i) - P_{ODB}(t_i))^2$$

gdzie: \mathbf{x} – zbiór zmiennych decyzyjnych, $P_G(t)$ – moc generowana przez rozpatrywaną elektrownię hybrydową w czasie t , $P_{ODB}(t)$ – moc odbierana przez rozpatrywany odbiornik w czasie t .

Wykorzystany w analizie rozkład prawdopodobieństwa prędkości wiatru i irradancji zostały przedstawione na rys. 3 i rys. 4.



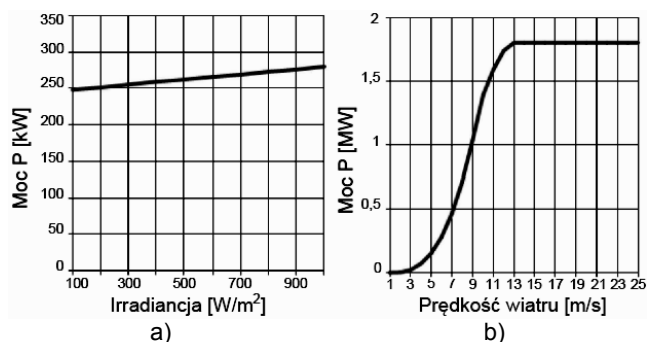
Rys. 3. Rozkład prawdopodobieństwa prędkości wiatru zastosowany w optymalizacji



Rys. 4. Rozkład prawdopodobieństwa irradancji zastosowany w optymalizacji

Tabela 3. Zestawienie parametrów wybranych komponentów elektrowni wiatrowo-solarnej

	Panel fotowoltaiczny	Turbina wiatrowa
Model	LX-280M	V90-1.8
Liczba [szt.]	5132	4
Procentowy podział mocy zainstalowanej [%]	31,4	68,6
Producent	Luxor Solar GmbH	Vestas Wind Sytems A/S
Moc znamionowa [kW]	0,28	1800
Koszt jednostkowy [PLN/szt.]	700,00	1 927 086,00



Rys. 5. Krzywe mocy zaproponowanych generatorów: a) panel fotowoltaiczny LX-280M; b) Turbina wiatrowa Vestas V90-1.8 [23,24]

W wyniku działania algorytmu optymalizacyjnego zostały wybrane następujące typy i liczby poszczególnych generatorów tworzących rozpatrywaną elektrownię. Wyniki zostały przedstawione w tabeli 3. Krzywe mocy zaproponowanych generatorów zostały przedstawione na rys. 5.

Ponadto algorytm pozwolił na wyznaczenie całkowitej produkcji energii elektrycznej wynoszącej odpowiednio 17915 MWh. W wynikach uwzględniono również nadwyżkę produkcji na poziomie 6722 MWh oraz niedobór produkcji energii wynoszący 8517 MWh.

Wnioski

W artykule zajęto się problematyką optymalizacji struktury elektrowni hybrydowych ze źródłami typu solarne i wiatrowe w aspekcie dopasowania profilu generacyjnego do zapotrzebowania – krzywej obciążenia. Rozwiązanie tego typu zadań syntezy jest konieczne w związku ze zwiększającym się obciążeniem sieci elektroenergetycznej oraz decentralizacją źródeł wytwórczych w postaci rozproszonych źródeł odnawialnych.

Celem pracy było poszukiwanie takiej konfiguracji systemu hybrydowego, który pozwala na dopasowanie profilu generacyjnego układu hybrydowego do zadanego profilu obciążenia przemysłowego. Optymalna struktura układu umożliwia zwiększenie zdolności pokrywania lokalnego zapotrzebowania na energię w porównaniu z układami generacyjnymi zbudowanymi tylko z jednego typu źródeł odnawialnych. Nie oznacza to pełnego dopasowania profili generacyjnego i obciążenia, a jedynie zminimalizowanie niedoborów oraz okresów z nadprodukcją w analizowanym okresie.

W pracy do określenia rozdziału mocy pomiędzy turbinami wiatrowymi i panelami fotowoltaicznymi w zaproponowanej strukturze hybrydowej, wykorzystano historyczne dane meteorologiczne. W tym celu wykorzystano algorytm genetyczny jako metodę optymalizacji i wyboru najlepszego rozwiązania przy zadanych parametrach. W wyniku działania algorytmu w pracy została wybrana optymalna konfiguracja składająca się z współpracujących ze sobą 4 turbin wiatrowych i 5132 paneli fotowoltaicznych w celu pokrycia zadanego obciążenia. Otrzymany podział produkcji wynoszący odpowiednio 31,4% dla PV i 68,6% dla TW wynika z przyjętej lokalizacji elektrowni oraz wydajności wykorzystanych źródeł (wydajność turbin wiatrowych jest 2-3 razy większa niż generatorów PV).

Z przeprowadzonej symulacji wynika, że źródła odnawialne pracujące w układach hybrydowych charakteryzują się stabilniejszą pracą w porównaniu z układem wykorzystującym jeden typ źródła OZE i pozwalają na efektywniejsze pokrywanie zapotrzebowania w sieci elektroenergetycznej. Przy opracowywaniu koncepcji współpracy dwóch różnych źródeł odnawialnych należy wziąć pod uwagę: charakterystyki ich pracy, dane meteorologiczne, profil obciążenia i warunki lokalizacyjne, które w decydujący sposób wpływają na ich pracę. Nie jest możliwe idealne dopasowanie profilu generacyjnego układu solarno-wiatrowego do obciążenia. W związku z tym coraz częściej w układach hybrydowych stosowane są dodatkowe lokalne magazyny energii – głównie elektrochemiczne.

Autorzy: mgr inż. Jacek Kamiński, Digital Customer Experience, Capgemini Software Solutions, ul. Kolorowa 6, 60-320 Poznań, e-mail: jacek.kaminski@capgemini.com; mgr inż. Robert Pietracho, Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, ul. Piotrowo 3A, 60-965 Poznań, Poland, e-mail: robert.pietracho@put.poznan.pl.

LITERATURA

- [1] L. Kasprzyk, A. Tomczewski, K. Bednarek, A. Bugała, "Minimisation of the LCOE for the hybrid power supply system with the lead-acid battery," Proceedings of the International Conference Energy, Environment and Material Systems Poland, vol. 19, 01030, 13-15 September, 2017.
- [2] J. Alemany, L. Kasprzyk, F. Magnago, "Effects of binary variables in mixed integer linear programming based unit commitment in large-scale electricity markets," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 160, pp. 429-438, 2018.
- [3] A. Bugała, K. Bednarek, L. Kasprzyk, A. Tomczewski, "Statistical analysis of the electric energy production from photovoltaic conversion using mobile and fixed constructions," Proceedings of the International Conference Energy, Environment and Material Systems Poland, vol. 19, 01002, 13-15 September, 2017.
- [4] P. I. Kurytnik, T. Drózd, S. Kuciński, "Badania zaburzeń elektromagnetycznych na przyłączach energetycznych odnawialnych źródeł energii," *Prz. Elektrotechniczny*, vol. 05, pp. 252-256, 2014.
- [5] J. Alemany, F. Magnago, P. Lombardi, B. Arendarski, P. Komarnicki, "Multiobjective Optimization Model for Wind Power Allocation," *Math. Probl. Eng.*, vol. 2017, 1876934, 2017.
- [6] G. Trzmiel, "Determination of a mathematical model of the thin-film photovoltaic panel (CIS) based on measurement data," *Eksploat. Niezawodn.*, vol. 19/4, pp. 516-521, 2017.
- [7] D. Burzyński, L. Kasprzyk, "Modelling and simulation of lead-acid battery pack powering electric vehicle," Proceedings of the Energy and Fuels Conference Poland, vol. 14, 01041, 21-23 September, 2016.
- [8] L. Kasprzyk, R. Pietracho, K. Bednarek, "Analysis of the impact of electric vehicles on the power grid," Proceedings of the 10th Conference on Interdisciplinary Problems in Environmental Protection and Engineering EKO-DOK 2018 Poland, vol. 44, 00065, 16-18 April 2018.
- [9] K. Bednarek, L. Kasprzyk, "Symulacja pracy akumulatorów kwasowo-ołowiowych," *Prz. Elektrotechniczny*, vol. 92/12, pp. 61-64, 2016.
- [10] D. Burzyński, L. Kasprzyk, "Wybrane metody modelowania pracy ogniw elektrochemicznych," *Prz. Elektrotechniczny*, vol. 93/12, pp. 75-78, 2017.
- [11] L. Kasprzyk, K. Bednarek, "Dobór hybrydowego zasobnika energii do pojazdu elektrycznego," *Prz. Elektrotechniczny*, vol. 91/12, pp. 129-132, 2015.
- [12] L. Kasprzyk, K. Bednarek, "Elektromagnetyzm a zagrożenia gromadzenia energii," *Prz. Elektrotechniczny*, vol. 90/12, pp. 221-224, 2014.
- [13] L. Kasprzyk, "Analysis of energy recovery possibilities from motor vehicles," *Prz. Elektrotechniczny*, vol. 90/4, pp. 235-238, 2014.
- [14] K. Bednarek, L. Kasprzyk, "Suppression of higher harmonic components introduction to the networks and improvement of the conditions of electric supply of electrical equipment," *Prz. Elektrotechniczny*, vol. 88/12, pp. 236-239, 2018.
- [15] K. Bednarek, R. Nawrowski, A. Tomczewski, "Electromagnetic Compatibility in the Neighborhood of High-Current Lines," in *Electromagnetic Fields in Electrical Engineering*, vol. 22, A. Krawczyk and S. Wiak, Eds. Amsterdam, Berlin, Oxford, Tokyo, Washington, 2002, pp. 363-368.
- [16] J. Rymaszewski, M. Lebioda, E. Korzeniewska, "Simulation of the loss of superconductivity in a three-dimensional model of the metal-superconductor connection," *Prz. Elektrotechniczny*, vol. 88/12B, pp. 183-186, 2012.
- [17] E. Korzeniewska, A. Szczęśny, "Parasitic parameters of thin film structures created on flexible substrates in PVD process," *Microelectron. Eng.*, vol. 193, pp. 62-64, 2018.
- [18] A. Dobrzycki, L. Kasprzyk, K. Skórcz, A. Tomczewski, "Modele propagacji sygnałów wysokiej częstotliwości w optymalizacji wewnętrznych sieci radiowych," *Prz. Elektrotechniczny*, vol. 91/6, pp. 250-253, 2013.
- [19] P. Komarnicki, P. Lombardi, Z. Styczyński, "Economics of Electric Energy Storage Systems," in *Electric Energy Storage Systems*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2017, pp. 181-194.
- [20] B. Jakubiec, "Multiphase permanent magnet synchronous motor drive for electric vehicle," *Prz. Elektrotechniczny*, vol. 91/12, pp. 125-128, 2015.
- [21] L. Kasprzyk, J. Jajczyk, "The use of coupled temperature and electromagnetic fields in optimization problems," 6th International Conference on Heat Transfer, Thermal Engineering and Environment Greece, pp. 226-23, 20-22 August, 2008.
- [22] S. Mikulski, A. Tomczewski, "Ocena metod wyznaczania współczynników rozkładu Weibulla w zagrożeniach energetyki wiatrowej," *Electrical Engineering Poznan University of Technology Academic Journals Poland*, vol. 87, 18-19 April 2016.
- [23] Polycrystalline photovoltaic module LX-280M. Available online: https://eu.krannich-solar.com/fileadmin/content/data_sheets/solar_modules/italy/Luxor_EcoLine60mono_280-300W_EN_1640_992_35_1000.pdf (accessed: 10.09.2019).
- [24] Wind turbine Vestas V90-1.8. Available online: <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/971-vestas-v90-1.8> (accessed: 10.09.2019).