

Fotowoltaika – tendencje i prognozy

Krzysztof Piech, Paweł Dybowski, Jarosław Kozik, Edmund Ciesielka, Tomasz Siostrzonek, Waldemar Milej, Jakub Wójcik, Michał Rad, Tomasz Lerch, Tomasz Drabek

1. Wstęp

Badania i prace wdrożeniowe obejmujące obszary związane z pozyskiwaniem i przetwarzaniem energii elektrycznej generowanej przy wykorzystaniu promieniowania słonecznego są obecnie mocno promowane i cieszą się dużym zainteresowaniem zarówno ze strony konsumentów, jak i producentów. Na rynku dostępnych jest wiele typów ogniw fotowoltaicznych. Różnią się przede wszystkim materiałem i technologią wykonania. Z różnorodności tej wynikają również ich odmienne parametry techniczne, takie jak chociażby sprawność. Technologie związane z wytwarzaniem energii elektrycznej z ogniw fotowoltaicznych rozwijają się bardzo dynamicznie. Są coraz powszechniej wykorzystywane zarówno w przemyśle energetycznym, budowlanym, jak i wielu innych miejscach, gdzie nowoczesność i dążenie do energetycznej niezależności są bardzo istotne. W standardowych systemach energetycznych energia elektryczna jest wytwarzana w przeważającym stopniu w centralnych elektrowniach zawodowych. Do odbiorców dostarczana jest za pomocą linii przesyłowych wysokiego napięcia oraz sieci rozdzielczych niskiego i średniego napięcia. Energia elektryczna produkowana w elektrowniach zawodowych wykorzystujących paliwa kopalne nierzadko prowadzi do zanieczyszczenia środowiska naturalnego. Pozyskiwanie elektryczności z odnawialnych źródeł energii, takich jak Słońce, pozwala na znaczną redukcję zanieczyszczeń emitowanych do atmosfery. OZE są lokalnie dostępne i mają potencjalnie nieograniczone zasoby. Udoskonalane wciąż technologie, mające na celu zamianę energii słonecznej bezpośrednio w elektryczność, dają duże nadzieje na stabilną i zrównoważoną przyszłość energetyczną. Koszty produkcji ogniw fotowoltaicznych spadają przy równoczesnym wzroście ich sprawności. Istnieją dwie formy wykorzystania Słońca w produkcji energii, bezpośrednia i pośrednia. Pierwsza metoda wykorzystuje promieniowanie słoneczne w celu podgrzania wody i pośredniej produkcji energii elektrycznej. Metoda ta stosowana jest na dużą skalę w elektrowniach słonecznych. Druga metoda polega na bezpośredniej transformacji światła słonecznego w energię elektryczną przy użyciu przetworników fotoelektrycznych. Są to np. ogniwa fotowoltaiczne, które składają się z płytki z półprzewodnika, posiadającej złącze P-N (*positive – negative*). W chwili, gdy na ogniwo pada światło słoneczne, powstaje para nośników o przeciwnych ładunkach elektrycznych, elektron – dziura, które zostają następnie rozdzielone przez pole elektryczne. Rozdzielenie ładunków powoduje, iż w ogniwie powstaje napięcie. Po podłączeniu urządzenia pobierającego energię następuje przepływ prądu elektrycznego. Obecny trend obrazujący ceny paneli fotowoltaicznych charakteryzuje się tendencją spadkową,

Streszczenie: W artykule omówiono zagadnienia związane z możliwością wykorzystania maszyn elektrycznych w systemach zasilanych energią pochodzącą z generacji rozproszonej, z naciskiem na układy fotowoltaiczne. Przedstawiono stan obecny, jak również prognozy rozwoju rynków fotowoltaiki i trendów panujących na rynku maszyn elektrycznych. Scharakteryzowano generację rozproszoną, czym jest i jakie podaje się jej definicje. Kolejno opisano proces produkcji energii elektrycznej przy wykorzystaniu promieniowania słonecznego i ogniw PV. Pokrótko przedstawiono zasadę działania ogniw PV i wymieniono ich ewolucję w postaci kilku generacji różniących się od siebie wykorzystanymi do produkcji materiałami, jak również technologiami wykonania poszczególnych elementów całego modułu PV. Ponadto skupiono się na cechach i parametrach, jakimi powinny się odznaczać nowoczesne maszyny elektryczne, do których należą m.in.: funkcje sterowania, interfejsy komunikacyjne, filtry harmonicznych, szybkość reakcji na zmianę wartości zadanej lub obciążenia, panel operatorski, integracja funkcji bezpieczeństwa, wbudowane algorytmy sterowania, miniaturyzacja i zwiększanie odporności środowiskowej czy także ważna obecnie energooszczędność. W pracy przedstawiono analizę i prognozy zmian zachodzących zarówno w sektorze energetycznym, jak również związanym z maszynami i napędami elektrycznymi.

PHOTOVOLTAIC PLANT – TRENDS AND FORECASTS

Abstract: The article discusses issues related to the possibility of using electric machines in systems powered by energy coming from distributed generation, with an emphasis on photovoltaic systems. The current state as well as forecasts for development of photovoltaic markets and trends prevailing on the market of electric machines were presented. Distributed generation was characterized, what it is and what are their definitions. What is more, the process of electric energy production using solar radiation and PV cells was described. The principle of operation of the PV cell was briefly described and their evolution was mentioned in the form of several generations that differ from each other with used materials in the production process as well as technologies used for the implementation of individual elements of the entire PV module. Moreover, the focus was put on the features and parameters that should be distinguished by modern electric machines, which include, among others: control functions, communication interfaces, harmonic filters, response speed to a set point or load change, operator panel, integration of safety functions, built-in control algorithms, miniaturization, increasing environmental resilience or the currently very important topic related to energy efficiency. The paper presents analysis and forecasts of changes taking place in the energy sectors as well as related to electrical machines and drives.

dotąd coraz większe uzyski energetyczne z ogniw powodują stopniowe upowszechnianie się tej formy zaopatrzenia odbiorców w energię elektryczną. Należy również pamiętać o wielu regionach nie tylko w Polsce, ale i na całym świecie, gdzie dostęp do energii elektrycznej produkowanej w konwencjonalny sposób jest utrudniony. Wykorzystanie maszyn elektrycznych w wydzielonych, zdecentralizowanych sieciach energetycznych, opartych o OZE, w tym z układów fotowoltaicznych, staje się więc coraz bardziej popularne, a co za tym idzie – ich konstrukcje i wydajność są dostosowywane do współczesnych potrzeb i możliwości aplikacyjnych. W niniejszej pracy skupiono się na aspektach związanych z energetyką rozproszoną, w tym na perspektywach rozwoju rynku fotowoltaiki w Polsce, jak również możliwościach, jakie taki stan oferuje dla trendów panujących na rynku maszyn elektrycznych.

2. Stan gospodarki i prognozy na dalszy rozwój

Z prognoz Ministerstwa Energii w sprawie rozwoju energetyki, zarządzania unią energetyczną i działaniami w dziedzinie klimatu w Polsce, zawartych w projekcie dokumentu: „Krajowy plan na rzecz energii i klimatu na lata 2021–2030”, jak również przedstawionej strategii państwa w zakresie sektora energetycznego zaprezentowanej w projekcie dokumentu: „Polityka energetyczna Polski do 2040 r.”, wynika, iż należy spodziewać się daleko idących zmian w strukturze wytwarzania energii elektrycznej w Polsce w perspektywie 2040 r.

Według prognozy ME przedstawionej w [2], wykorzystanie energii słonecznej na potrzeby produkcji energii elektrycznej z obecnego stanu, kształtującego się na poziomie 0,1 [TWh] rocznie, może wzrosnąć aż do 14,9 [TWh] rocznie, przy jednoczesnej redukcji użycia na te cele węgla.

Stan obecny, jak również prognozy, zostały przedstawione w tabeli 1. Moc osiągalna netto źródeł wytwarzania wzrośnie z 37,3 GW w 2015 r. do ok. 62,6 GW w roku 2040 [1]. Znacząco zmniejszy się rola jednostek systemowych zasilanych paliwami węglowymi – ich udział w mocy zainstalowanej netto ulegnie redukcji, natomiast wzrośnie wyraźnie udział źródeł odnawialnych, w tym instalacji fotowoltaicznych.

Moc osiągalna netto źródeł wytwarzania energii elektrycznej z systemów fotowoltaicznych w 2015 roku w Polsce wynosiła 108 [MW]. Według prognoz Ministerstwa Energii do 2040 roku wzrośnie ona aż do poziomu 15 671 [MW], czyli będzie to największa i najbardziej dynamiczna zmiana wśród wszystkich źródeł wytwórczych dostępnych w naszym kraju. Przyrost mocy został przedstawiony na rysunku 1.

Przy tak dużym wzroście udziału źródeł fotowoltaicznych w ogólnym bilansie energetycznym kraju zasadne jest poszukiwanie i testowanie najbardziej optymalnych rozwiązań technologicznych z zakresu pozyskiwania i przetwarzania energii słonecznej na energię elektryczną przy wykorzystaniu nowatorskich rozwiązań technologicznych. Należy więc dołożyć wszelkich starań, aby technologie te cechowały się najbardziej optymalnymi konstrukcjami zarówno pod kątem wydajnościowym, jak również jakościowym.

Na rynku maszyn elektrycznych, mogących współpracować z układami wyposażonymi w panele fotowoltaiczne, jednym z najistotniejszych wyznaczników świadczących o doborze

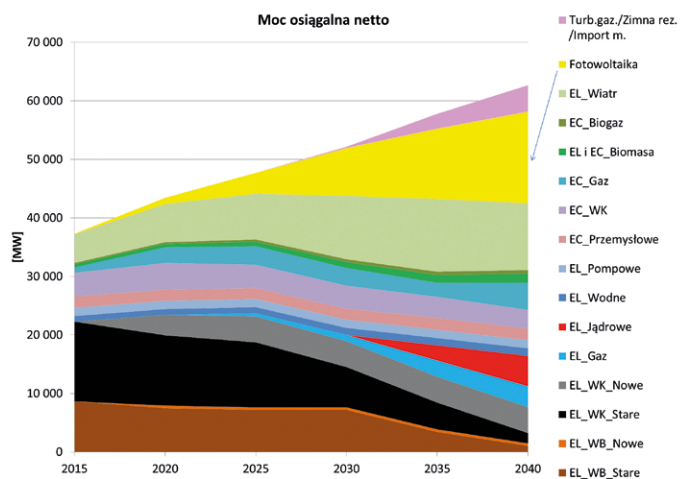
Tabela 1. Produkcja energii elektrycznej brutto z podziałem na paliwo [TWh] [2]

	2005	2015	2025	2040
Węgiel brunatny	54,8	52,8	49,7	10,3
Węgiel kamienny*	88,2	79,4	78,9	53,3
Paliwa gazowe**	5,2	6,4	15,4	41,9
Olej opałowy	2,6	2,0	1,9	1,6
Energia jądrowa	0,0	0,0	0,0	36,2
Biomasa	1,4	9,0	10,4	14,0
Biogaz	0,1	0,9	1,9	3,2
Energia wodna	2,2	1,8	2,6	3,3
Z wody przepompowanej	1,6	0,6	0,5	1,3
Energia wiatru	0,1	10,9	21,3	39,7
Energia słoneczna	0,0	0,1	3,1	14,9
Pozostałe***	0,7	1,0	1,1	2,2
Razem	156,9	164,9	186,6	221,6

* Łącznie z gazem koksowniczym i wielkopieczowym

** Gaz ziemny wysokometanowy i zaazotowany, gaz z odmetanowania kopalni, gaz towarzyszący ropie naftowej

*** Odpady przemysłowe i komunalne



Rys. 1. Moc osiągalna netto źródeł wytwarzania energii elektrycznej wg zastosowanej technologii [2]

konkretnego rozwiązania może okazać się sprawność energetyczna oferowanych jednostek, jak podaje [9] w raporcie techniczno-rynkowym dotyczącym napędów i silników prądu przemiennego. Lista kryteriów i wymogów stawianych obecnie silnikom elektrycznym podczas poszukiwania optymalnego rozwiązania może przedstawiać się następująco: na pierwszym miejscu będzie to cena i kolejno podstawowe parametry, do których można zaliczyć m.in. moc, obroty, jak również stopień ochrony. Przy wykorzystaniu maszyny w skojarzeniu z układem PV bardzo istotną rolę odgrywa długość oferowanej przez producenta gwarancji i wspomniana już wcześniej sprawność energetyczna, kluczowa z punktu widzenia systemu zasilanego z energii elektrycznej pochodzącej z promieniowania słonecznego [4, 7, 8, 9]. Coraz większą popularnością cieszyć się będą

rozwiązania energooszczędne, które pomimo wyższej ceny początkowej, w dłuższej perspektywie okażą się efektywniejsze energetycznie, a co za tym idzie – tańsze w eksploatacji.

3. Generowanie energii w systemie rozproszonym

Generacja rozproszona jest to wytwarzanie energii przez małe (o mocy znamionowej do 50–150 MW) jednostki lub obiekty wytwórcze, przyłączane bezpośrednio do sieci rozdzielczych lub zlokalizowane w sieci elektroenergetycznej odbiorcy (za urządzeniem kontrolno-rozliczeniowym), niepodlegające centralnemu planowaniu rozwoju i dysponowaniu mocą [3].

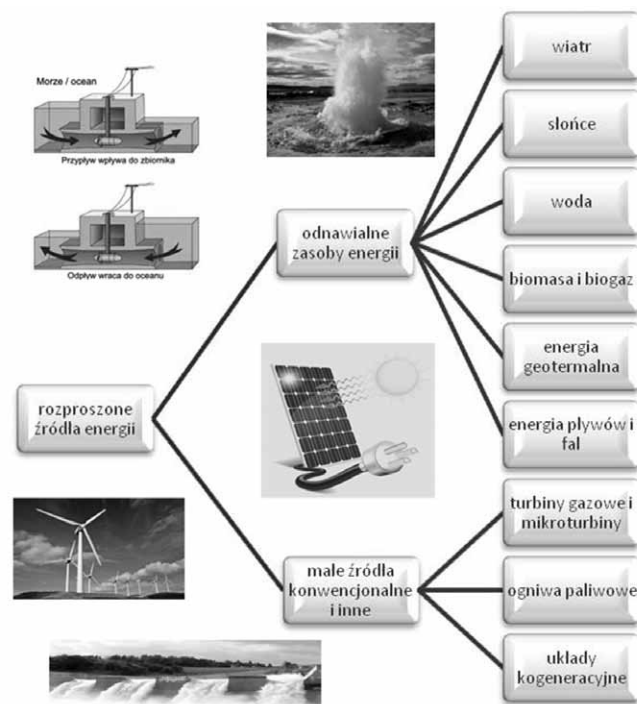
Inne definicje generacji rozproszonej to:

- zintegrowane z systemem lub autonomiczne użycie małych, modułowych generatorów energii elektrycznej, usytuowanych w pobliżu odbiorców; może pozwolić przedsiębiorstwom energetycznym uniknąć kosztownych inwestycji w sieć przesyłową i dystrybucyjną, zwiększa możliwości systemu i przyczynia się do dostarczenia odbiorcom energii elektrycznej o wyższej jakości, zwiększa niezawodność dostaw i przyczynia się do zachowania czystości środowiska (wg US DoE);
- źródła wytwórcze pracujące na potrzeby własne klienta lub dostarczające energię do sieci dystrybucyjnej (nie obejmuje zazwyczaj energetyki wiatrowej w dużych farmach wiatrowych) (wg IEA);
- źródło rozproszone – źródło nieplanowane centralnie, w chwili obecnej niedysponowane centralnie, przyłączone do sieci rozdzielczej (wg Cigre) [3].

Na rys. 2 przedstawiono przykładowy podział rozproszonych źródeł energii ze względu na pochodzenie. Niewątpliwą zaletą generacji rozproszonej są stosunkowo niewielkie nakłady finansowe potrzebne do rozbudowy sieci, jak i niskie straty energii związane z ich eksploatacją. Czas potrzebny na przeprowadzenie inwestycji jest krótszy ze względu na znacznie mniejszy charakter prac w porównaniu do tradycyjnych elektrowni. Dla przykładu można podać sytuację, gdy w gospodarstwie domowym posiadającym już pracującą instalację fotowoltaiczną okaże się, że zapotrzebowanie na energię elektryczną jest wyższe. Zwiększając ilość paneli fotowoltaicznych, a co za tym idzie – generując więcej energii elektrycznej, można rozwiązać problem niedoborów energetycznych. Co więcej, gdy źródła energii są rozproszone, bezpieczeństwo energetyczne na danym obszarze się zwiększa [3], ponieważ nie ma uzależnienia tylko od jednego dostawcy, więc na wypadek awarii któregoś z podzespołów systemu odbiorca nie pozostaje całkowicie bez dostępu do energii elektrycznej.

4. Energia elektryczna pochodząca z ogniw fotowoltaicznych

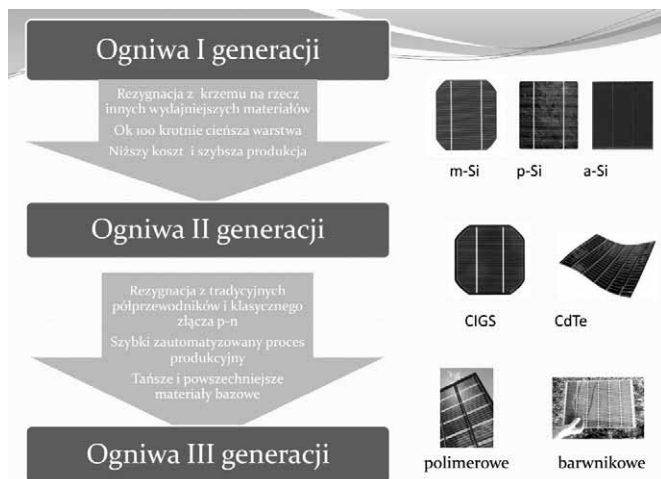
Słońce produkuje energię od miliardów lat, jest źródłem życia wszystkich znanych istot na Ziemi. Bez najmniejszego wątplenia jest darmowym i czystym źródłem energii. Energia słoneczna to promienie Słońca, które docierają do naszej planety. Energia ta może być przetworzona w inną postać, taką jak energia elektryczna i ciepła. Istnieją dwie formy wykorzystania Słońca w produkcji energii elektrycznej: bezpośrednia i pośrednia. Pierwsza metoda wykorzystuje promieniowanie słoneczne



Rys. 2. Rozproszone źródła energii z podziałem na pochodzenie [3]

w celu podgrzania wody i pośredniej produkcji elektryczności. Stosuje się ją raczej na dużą skalę, tzn. w elektrowniach słonecznych. Druga metoda polega na bezpośredniej transformacji światła słonecznego w energię elektryczną przy użyciu przetworników fotoelektrycznych. Są to np. ogniwa fotowoltaiczne, które składają się z płytki z półprzewodnika, posiadającej złącze P–N (*positive – negative*). W chwili, gdy na ogniwo pada światło słoneczne, powstaje para nośników o przeciwnych ładunkach elektrycznych, elektron – dziura, które zostają następnie rozdzielone przez pole elektryczne. Rozdzielenie ładunków powoduje, iż w ogniwie powstaje napięcie. Po podłączeniu urządzenia pobierającego energię następuje przepływ prądu elektrycznego. Słońce na obszarach o wysokim nasłonecznieniu emituje do 4000 kWh/m² rocznie. Promieniowanie to zmniejsza się w miarę oddalania się od równika. W Polsce roczna suma energii słonecznej padającej na 1 m² wynosi 950–1250 kWh/m² [3, 5]. Na tę ilość promieniowania słonecznego wpływa nie tylko pogoda, ale przede wszystkim nasze położenie geograficzne. Na rysunku 3 zaprezentowano kolejne generacje ogniw fotowoltaicznych, czyli etapy rozwoju technologii i materiałów wykorzystywanych do ich produkcji.

Ogniwa fotowoltaiczne umieszczane na wyższej wysokości nad poziomem morza pozwalają zwiększyć żywotność urządzeń i zmniejszyć koszt ich zakupu. Wynika to z faktu, że na obszarach niżej położonych częściej występują mgły oraz jest mniejsze nasłonecznienie, co obniża optymalne wykorzystanie promieni słonecznych. W obszarach tych jest również mniejsza siła promieni słonecznych w różnych porach roku. W letnie miesiące wysoki jest nie tylko poziom promieniowania, ale również czas nasłonecznienia. Aż 75% użytecznego promieniowania słonecznego przypada na miesiące od kwietnia do września. W miesiącach zimowych (od listopada do lutego) jest to zaledwie 12,5% [3, 6].



Rys. 3. Różne rodzaje ogniw fotowoltaicznych [10]

5. Podsumowanie

Technologie wytwarzania energii elektrycznej z ogniw fotowoltaicznych rozwijają się bardzo dynamicznie. Są coraz powszechniej wykorzystywane w codziennym życiu odbiorców indywidualnych, jak również w przemyśle. Celem niniejszego opracowania było zaprezentowanie możliwości wykorzystania energetyki rozproszonej, w tym energii elektrycznej pochodzącej z ogniw fotowoltaicznych, w skojarzeniu z nowoczesnymi maszynami elektrycznymi. Obecnie stajemy w obliczu ciągłych wzrostów cen energii elektrycznej i problemów z jej przesyłem za pomocą przestarzałych krajowych sieci energetycznych. Stan taki rodzi pragnienie zdwersyfikowania źródeł energii elektrycznej, jak i niezależnienia się od dostaw z krajowych sieci. OZE są powszechnie dostępne i ich zasoby regenerują się w bardzo krótkim czasie. W spotykanych standardowo systemach energetycznych energia elektryczna jest wytwarzana w przeważającym stopniu w centralnych elektrowniach zawodowych. Dostarcza się ją do odbiorców za pomocą linii przesyłowych wysokiego napięcia oraz sieci rozdzielczych niskiego i średniego napięcia. Elektrownie zlokalizowane w Polsce mają sprawność na poziomie 35%. Produkowana w nich energia elektryczna wiąże się z dużymi stratami ciepła odpadowego. Wyższe sprawności osiągają elektrociepłownie. Jeszcze większe korzyści wynikające z bezpieczeństwa energetycznego, mniejszych cen energii elektrycznej, redukcji emisji spalin oraz mniejszych strat przesyłowych może przynieść generacja rozproszona, oparta na małych jednostkach wytwórczych, w tym na odnawialnych źródłach energii. Najczęściej jest dostępna lokalnie, czyli generowanie energii elektrycznej odbywa się w bezpośrednim sąsiedztwie jej odbiorców [3]. Spoglądając natomiast na rozwój rynku maszyn i napędów elektrycznych, można wywnioskować, iż najważniejszymi cechami omawianych urządzeń mogą być: funkcje sterowania, interfejsy komunikacyjne (RS232, RS485 jak również Ethernet przemysłowy, w tym światłowody), filtry harmonicznych (zapewniają, że napęd nie będzie powodował zaburzeń w sieci zasilającej i wpływał na pracę innych odbiorników energii), szybkość reakcji na zmianę wartości zadanej lub obciążenia, panel operatorski, integracja funkcji bezpieczeństwa,

wbudowane algorytmy sterowania (pozwalające np. na kontrolę momentu obrotowego silnika), możliwość pracy bezczujnikowej, tj. bez użycia dodatkowego czujnika przesyłającego informacje zwrotne z silnika, różnorodność funkcji dodatkowych (tj. o dużej elastyczności aplikacyjnej, znajdujących zastosowanie w różnych systemach), energooszczędność (dotyczy nie tylko silników, ale też napędów i obejmuje również odzysk energii elektrycznej, wykorzystanie funkcji związanych z optymalizacją zużycia energii elektrycznej), miniaturyzacja i zwiększanie odporności środowiskowej (stopnia ochrony). Jak podaje [9], omawiając zachodzące w ostatnich latach zmiany technologiczne i prognozy na przyszłość, należy wspomnieć o trendzie decentralizacji systemów napędowych. Najbliższych 5–10 lat zweryfikuje poprawność analizowanych w niniejszym opracowaniu prognoz, pewne jednak jest, iż zmiany w omawianych sektorach będą się nasilały na skutek wymogów stawianych przez ustawodawców, jak również wciąż rozwijające się w Polsce, jak i na całym świecie rynki fotowoltaiki wraz z sektorem maszyn i napędów elektrycznych.

Literatura

- [1] Krajowy plan na rzecz energii i klimatu na lata 2021–2030. PROJEKT – w. 3.1 z 04.01.2019. Ministerstwo Energii, 2019.
- [2] Ocena skutków planowanych polityk i środków. Załącznik 2. do Krajowego planu na rzecz energii i klimatu na lata 2021–2030. PROJEKT – w. 3.1 z 04.01.2019. Ministerstwo Energii, 2019.
- [3] PIECH K.: *Energia elektryczna pochodząca z ogniw fotowoltaicznych i budownictwo energooszczędne*. Energetyka dla budownictwa – spojrzenie młodych naukowców: monografia, Kraków 2015.
- [4] NIECHAJ M.: *Aspekty współpracy maszyn elektrycznych i generatorów fotowoltaicznych*. „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe” 75/2006.
- [5] KORASIAK P.: *Sprawność konwersji promieniowania słonecznego na energię elektryczną współczesnych ogniw i modułów fotowoltaicznych*. „Przegląd Elektrotechniczny” 7/2017.
- [6] JASTRZĘBSKA G.: *Ogniwa słoneczne. Budowa, technologia i zastosowanie*. WKŁ, Warszawa 2013.
- [7] NIECHAJ M.: *Optymalizacja pracy maszyny elektrycznej w fotowoltaicznym systemie napędowym*. „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe” 77/2007.
- [8] NIECHAJ M.: *Autonomiczny fotowoltaiczny system napędowy bez elektrycznego źródła buforowego z silnikiem indukcyjnym jednofazowym*. „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe” 1/2013.
- [9] PIĄTEK Z.: *Napędy i silniki prądu przemiennego – raport techniczno-rynkowy*. Automatyka2b, 2010.
- [10] <http://www.fundacja.lublin.pl/>

✉ Krzysztof Piech, Paweł Dybowski, Jarosław Kozik, Edmund Ciesielka, Tomasz Siostrzonek, Waldemar Milej, Jakub Wójcik, Michał Rad, Tomasz Lerch, Tomasz Drabek
Katedra Energoelektroniki i Automatyki Systemów Przetwarzania Energii, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej; AGH – Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie