

Analiza efektywności wybranych instalacji fotowoltaicznych w północnej Polsce

Streszczenie. W artykule przedstawiono konfiguracje czterech instalacji fotowoltaicznych zainstalowanych w północnej Polsce. Na podstawie wyników przeprowadzonych pomiarów dokonano oceny efektywności badanych systemów, w zakresie sprawności energetycznej przetwarzania energii, jak i efektywności ekonomicznej działających instalacji, oraz uwarunkowań pozatechnicznych związanych z wytwarzaniem energii z wykorzystaniem źródeł odnawialnych.

Abstract. The article presents the configuration of four photovoltaic systems installed in northern Poland. Based on the results of the measurements, the effectiveness of the systems under investigation, in terms of efficiency of energy conversion and economic efficiency of the installations operating, as well as non-technical determinants related to the production of energy from renewable sources were assessed. (**Analysis of the efficiency of selected photovoltaic systems in northern Poland**).

Słowa kluczowe: odnawialne źródła energii, ogniwa fotowoltaiczne, pomiary energii, ocena efektywności.

Keywords: renewable energy sources, photovoltaic cells, energy measurement, efficiency estimation.

Wstęp

Ostatnie zimowe miesiące pokazały, jakie wyzwania nas czekają w najbliższych latach. W wielu miejscowościach Polski zawartość pyłów w powietrzu, związanych ze spalaniem węgla (a także drewna) dla celów grzewczych, osiągnęła poziom niebezpieczny dla zdrowia mieszkańców.

Zagadnieniami związanymi z ekologią zajmują się komisje unii Europejskiej (UE). Ostatnie prace Rady ds. Transportu, Telekomunikacji i Energii UE, podczas obrad w czerwcu 2017 (26.06), koncentrowały się na zagadnieniach z wiązanych z tzw. etykietowaniem energetycznym, nakierowanym na lepsze uświadomienie konsumentom energii, jak efektywne energetycznie są urządzenia domowe oraz ile zużywają energii, a także na dyrektywach w ramach pakietu „Czysta energia”. Dyrektywy te odnoszą się do charakterystyki energetycznej budynków, obejmującej realizację celów klimatyczno-energetycznych UE na 2020 r. i na 2030 r., dla wspierania efektywności energetycznej i renowacji budynków z myślą o dekarbonizacji obecnych wysoce nieefektywnych europejskich zasobów budowlanych.

Polski rząd nie wykazuje takiego zaangażowania w sprawy ekologii. Natomiast wśród obywateli widoczne jest coraz większe zainteresowanie kwestiami związanymi z ekologią, alternatywnymi w stosunku do węgla źródłami energii. Powiększa się grono osób i instytucji angażujących się w realizację różnorodnych projektów dotyczących wytwarzania energii elektrycznej z wykorzystaniem odnawialnych źródeł energii (OZE). Inicjatywom takim wychodzi naprzeciw wiele organizacji, przy biernej postawie instytucji rządowych. Przykładem może być komercyjna akcja jednej z sieci handlowych pod hasłem „Energia Słoneczna dla Domu” [1], propagująca ideę prosumpcji energii elektrycznej w ramach energetyki rozproszonej.

Inwestowanie w systemy OZE staje się opłacalne. W przypadku polskich gospodarstw domowych ceny energii elektrycznej wzrosły o 50% w ciągu ostatnich 15 lat, a koszt pozyskiwania energii słonecznej spadł o 80% w ciągu 8 lat. W prognozach ekspertów przewidywany jest wzrost cen energii nawet do 20% w najbliższych latach, co motywuje zwolenników pozyskiwania energii ze źródeł odnawialnych.

Energia słoneczna jest alternatywnym źródłem energii, a jej pozyskiwanie nie zagraża środowisku. Sprawność przetwarzania energii słonecznej na energię elektryczną jest istotnym parametrem ogniwa fotowoltaicznego (FW) [2,3]. W warunkach laboratoryjnych uzyskano sprawność prototypowych ogniów FW, zrealizowanych w technologii

ogniów cztero-złączowych, na poziomie 44,7%. Wśród komercyjnie dostępnych ogniów FW ich sprawności są znacznie niższe. Wynika to z ograniczeń technologicznych, które uniemożliwiają przeniesienie prototypu ogniwa do skali przemysłowej. Obecnie komercyjnie dostępne moduły FW zapewniają sprawność przetwarzania energii na poziomie bliskim 20%, jednakże rozwój technologii masowej produkcji ogniów wskazuje, że granica ta zostanie wkrótce przekroczona.

Efektywność wytwarzania energii elektrycznej w zamontowanych stacjonarnie modułach FW zależy również w znacznym stopniu od ich ustawienia w stosunku do kierunku południowego oraz kąta nachylenia ich płaszczyzny do płaszczyzny poziomej [4,5]. Na terenie Polski natężenie promieniowania słonecznego w ciągu roku (nasłonecznienie), docierającego do poziomej powierzchni wynosi ok. 1000 kWh/m². Zastosowanie układów śledzenia ruchu słońca oraz układów pozycjonowania modułów FW umożliwia zwiększenie wydajności produkcji energii elektrycznej w stosunku do systemu stacjonarnego o ponad 20% w miesiącach zimowych i o prawie 40% w miesiącach letnich.

W artykule przedstawiono wybrane wyniki badań czterech fotowoltaicznych (FW) instalacji prosumenckich, które zostały zrealizowane przez prywatnych inwestorów. Trzy z nich można zakwalifikować jako mikro-elektrownie przydomowe, zaś czwarta jest zaprojektowana na potrzeby przedsiębiorstwa.

Elektrownie fotowoltaiczne

Fotowoltaika jest dziedziną techniki zajmującą się wytwarzaniem energii elektrycznej z energii promieniowania słonecznego za pośrednictwem zjawiska fotowoltaicznego. Ogniwo fotowoltaiczne (FW) jest podstawowym elementem produkującym energię elektryczną. Połączone ze sobą ogniwa nazywamy modułami FW [2,3]. Instalacje FW można montować zarówno w płaszczyźnie poziomej, jak i pionowej, w każdym miejscu, do którego dociera promieniowanie słoneczne.

Do wytwarzania energii elektrycznej w instalacjach OZE wykorzystuje się najczęściej baterie słoneczne i/lub generatory wiatrowe [6,7,8]. Instalacje takie realizowane są jako systemy:

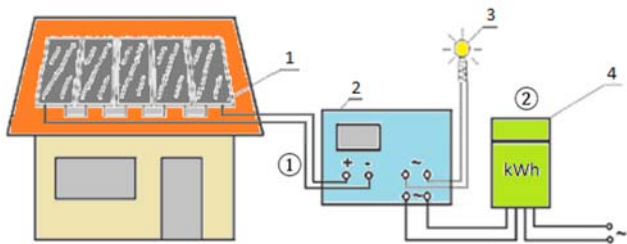
- autonomiczne (wyspowe) – Off-Grid,
- współpracujące z siecią – On-Grid,
- hybrydowe.

Systemy Off-Grid stosuje się do zasilania obiektów w przypadku, gdy publiczna sieć elektroenergetyczna nie jest dostępna. Ze względu na zmiany warunków wytwarzania energii w ciągu doby konieczne jest jej magazynowanie. Wytworzona energia najpierw trafia do akumulatorów, gdzie jest magazynowana, a po przetworzeniu wykorzystywana jest do zasilania odbiorników. Zapewnia to ciągłość zasilania w systemie. Energia elektryczna nie jest pobierana ani oddawana do sieci publicznej.

Większość instalowanych mikro-elektrowni to systemy On-Grid, współpracujące z siecią energetyczną. Koszty instalacji tego typu są zwykle niższe od systemu wyspowego, gdyż nie wymagane jest stosowanie akumulatorów, których koszt stanowi średnio 20% kosztów systemu. Nadwyżki energii są oddawane do sieci, a niedobory są z niej uzupełniane. Systemy te działają w ramach rozproszonego systemu wytwarzania energii. Dzięki połączeniu z publicznym systemem dystrybucji energii zapewniona jest w nich ciągłość dostaw energii do odbiorników.

Wyróżnikiem systemów hybrydowych jest współpraca systemu FW z innym systemem wytwarzania energii, np. z generatorem wiatrowym. Systemy hybrydowe działają podobnie jak systemy autonomiczne, nadwyżka energii z systemu OZE magazynowana jest w akumulatorach. W przypadku rozładowania akumulatorów zasilanie systemu przełączane jest na zasilanie z sieci energetyki zawodowej (lub załączamy jest generator prądowórczy).

Przedstawione w artykule wyniki uzyskano w trakcie badań rzeczywistych instalacji fotowoltaicznych, wykonanych jako systemy On-Grid. Na rysunku 1 pokazano ogólną konfigurację takiego systemu. Moduły fotowoltaiczne 1 umieszczane są zwykle na dachu budynku, po jego południowej stronie. Inwerter 2 steruje pracą systemu FW oraz przetwarza napięcie DC z modułów FW na napięcie AC o parametrach umożliwiających zasilanie odbiorników energii 3. Nadwyżka energii produkowanej w instalacji FW przekazywana jest do sieci dystrybucyjnej (publicznej). Nocą lub w okresach zapotrzebowania na energię, przewyższającego ilość energii wytwarzanej w FW, dla zasilania odbiorników energia pobierana jest z sieci. Dwukierunkowy licznik energii 4 rejestruje ilość energii przesyłanej w każdym z kierunków.



Rys. 1. Przydomowa elektrownia - instalacja fotowoltaiczna On-Grid: 1 – moduły fotowoltaiczne; 2 – przetwornica (inwerter); 3 – odbiorniki energii elektrycznej; 4 – dwukierunkowy licznik energii; ①, ② – rozmieszczenie liczników energii

Charakterystyka badanych instalacji FW

Pierwszy z badanych systemów FW (S1) został zainstalowany w miejscowości Ustarbowo, w województwie pomorskim. Energia elektryczna była wytwarzana przy wykorzystaniu dziesięciu modułów typu SL180-24M200 o łącznej mocy 2 kWp i deklarowanej sprawności 15,7%. Łączna powierzchnia ogniw wynosiła 11,25 m². System ten był częścią systemu hybrydowego [8], w którym system FW współpracował w wytwarzaniu energii z systemem

wiatrowym, z możliwością gromadzenia nadwyżek energii w baterii akumulatorów. W artykule wykorzystano jedynie wyniki pomiarów energii wytwarzanej w systemie S1.

Drugi system FW (S2) powstał na drodze modyfikacji i rozbudowy systemu S1. Właściciel podjął decyzję o przebudowie po analizie efektywności funkcjonowania pierwotnego systemu, zwłaszcza kosztów eksploatacyjnych związanych z akumulatorami. System S2 składa się z 20 modułów typu SL180-24M200 o powierzchni ogniw równej 22,5 m² i o łącznej mocy 4 kWp. Zastosowano w nim nowoczesny inwerter (2 na rys. 1) o lepszych parametrach niż poprzedni.

Trzeci system FW (S3) funkcjonuje w miejscowości Tuchola, w województwie kujawsko-pomorskim. Zainstalowano w nim 27 modułów typu Solar Word 250 o łącznej mocy 6,75 kWp i całkowitej powierzchni ogniw wynoszącej 39,4 m². Deklarowana sprawność ogniw FW wynosi 14,91%.

System czwarty (S4) został zainstalowany w miejscowości Borzymin w województwie kujawsko-pomorskim. Autorzy nie zostali upoważnieni do upublicznienia szczegółów konfiguracji systemu S4, zaś w dalszej części przedstawione zostaną wybrane wyniki badań. System dostarcza część energii elektrycznej niezbędnej dla funkcjonowania przedsiębiorstwa produkcyjnego. Moc szczytowa instalacji FW w systemie S4 wynosi 40 kWp.

Badania systemów FW

Prezentowane wyniki pomiarów energii elektrycznej wytwarzanej w instalacjach FW zostały zgromadzone w przeciągu kilku lat. Badania systemu S1 prowadzono w ciągu 12 miesięcy roku 2014, podczas gdy pomiarów energii wytwarzanej w systemie S2 dokonano w roku 2015. Wyniki badania systemu S3 uwzględniają pomiary realizowane w ciągu 12 miesięcy, na przełomie lat 2016 i 2017. Wyniki pomiarów energii w systemie S4 zawarto w postaci bilansu rocznego za rok 2016.

Przy założeniu, że średnie warunki pogodowe, jak również roczna ilość energii słonecznej docierającej do określonych obszarów na Ziemi podlegają jedynie nieznaczącym wahaniom w relacji rok do roku, możliwe jest przeprowadzenie oceny porównawczej uzyskanych wyników.

W tabeli 1 umieszczono wyniki pomiarów energii elektrycznej E_{FW} , wytworzonej w trzech instalacjach FW (S1-S3), z podziałem na poszczególne miesiące oraz bilans roczny energii dla każdego z systemów. Ze względu na różne poziomy wartości energii wytworzonej w systemach trudno jest dokonywać analiz na drodze bezpośredniego porównania tych energii. Taką ocenę można przeprowadzić po dokonaniu normalizacji uzyskanych wyników pomiarów energii w odniesieniu do mocy maksymalnych modułów FW zainstalowanych w poszczególnych systemach.

Tabela 2 zawiera zestawienie energii elektrycznej E_{FW} wytworzonej w badanych instalacjach FW (S1-S4) w ciągu roku, wartości mocy maksymalnych P_p w instalacjach oraz wartości rocznego uzysku U_{FW} , tj. ilości rocznie wytworzonej energii elektrycznej w przeliczeniu na 1 kWp mocy w poszczególnych systemach.

Na rysunku 2 przedstawiono wartości uzysków U_{FW} energii wytworzonej w systemach S1-S3 z podziałem tych wartości na kolejne miesiące roku. Widoczne prawidłowości w relacjach pomiędzy wartościami U_{FW} dla poszczególnych systemów w miesiącach I-VII i XI-XII niosą informacje zarówno o sprawności energetycznej systemów, jak i zbliżonych warunkach pogodowych w tych okresach. Z kolei relacje pomiędzy U_{FW} w miesiącach VIII-X mogą

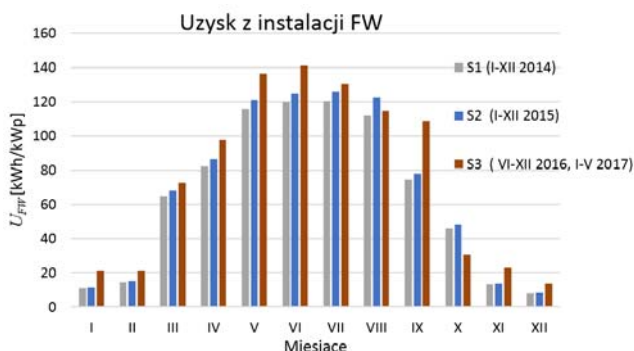
wskazywać na pewne różnice w warunkach pogodowych w tych miesiącach 2016 roku w stosunku do lat 2014 i 2015.

Tabela 1. Zestawienie ilościowe energii E_{FW} wytworzonej w ciągu roku w instalacjach S1-S3

Miesiąc	System		
	S1	S2	S3
	E_{FW} [kWh]		
I	21,7	45,5	142,7
II	28,9	60,6	142,7
III	129,5	271,9	488,7
IV	164,4	345,2	658,2
V	231,6	484,7	920,4
VI	239,8	499,8	952,0
VII	240,5	503,1	881,3
VIII	223,8	491	773,7
IX	148,7	312,2	735,5
X	92,3	193,8	206,2
XI	26,2	55	153,8
XII	15,4	32,3	90,7
Suma	1562,8	3295,1	6146,0

Tabela 2. Roczne uzyski wyznaczone dla badanych systemów FW

	System			
	S1	S2	S3	S4
E_{FW} [kWh]	1562,8	3295,1	6146,0	39600,0
P_p [kWp]	2,00	4,00	6,75	40,00
U_{FW} [kWh/kWp]	781,40	823,78	910,51	990,00



Rys. 2. Uzyski energii w ciągu roku w instalacjach S1-S3

W polskich warunkach klimatycznych instalacja FW, prawidłowo wykonana i odpowiednio zlokalizowana, może wytwarzać energię z rocznym uzyskiem od 950 do 1025 kWh/kWp [2].

Ocena badanych systemów FW

Natężenie promieniowania słonecznego, tj. chwilowa wartość gęstości mocy tego promieniowania, docierającego do Ziemi, zwykle zmienia się w ciągu dnia w zakresie 100-800 W/m² [2]. W słoneczne dni może ono osiągać wartość 1000 W/m². Sprawność modułów FW jest podawana przez producentów dla natężenia promieniowania równego 1000 W/m².

Przyjmując średnie roczne nasłonecznienie, tj. roczną ilość energii słonecznej docierającej do 1 m² powierzchni terenu umiejscowienia instalacji, na poziomie 1000 kWh/m², można wyznaczyć ilość energii słonecznej E_s , odbieranej w ciągu roku przez ogniwa poszczególnych instalacji oraz, po odniesieniu do energii elektrycznej E_{FW} , wytworzonej w instalacjach, oszacować sprawność energetyczną η systemów S1-S3. Wyniki oszacowania umieszczono w tabeli 3. Dla porównania, w tabeli 3 podano również wartości sprawności energetycznych η_D ogniw FW,

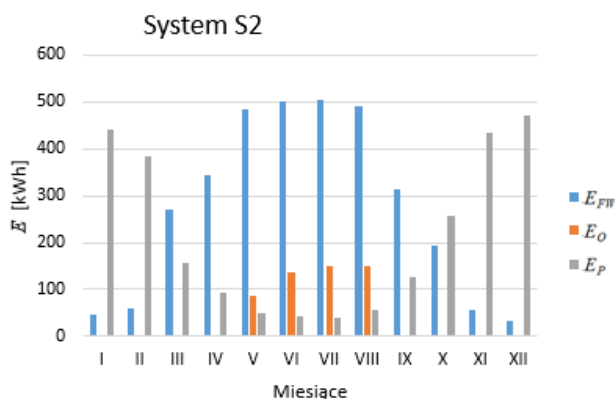
wykorzystywanych w instalacjach S1-S3, podawanych przez producentów.

Tabela 3. Oszacowanie sprawności energetycznej systemów S1-S3

	System		
	S1	S2	S3
S_o [m ²]	11,25	22,5	39,4
E_s [kWh]	11250	22500	39400
E_{FW} [kWh]	1562,8	3295,1	6146,0
η [%]	13,9	14,6	15,6
η_D [%]	15,7	15,7	14,9

Wprowadzony na początku 2015 roku system dotacji inwestycyjnych do instalacji OZE został zawieszony. Przyjęty wówczas system rozliczenia z prosumentem w stosunku 1:1 za wytworzoną energię w instalacji OZE i przesłaną do sieci dystrybucyjnej został zastąpiony rozliczaniem w relacji 0,8:1, co oznacza, że prosument otrzymuje za sprzedaną dystrybutorowi energię 80% kwoty, jaką musi zapłacić za tą samą ilość energii pobranej z sieci. Zmiany te nie są korzystne dla inwestorów i perspektyw rozwoju systemów OZE.

Dla prosumenta korzystniej jest więc zużytkować wytworzoną energię niż przekazywać ją do sieci dystrybucyjnej. Można przy okazji obniżyć koszty, zmieniając w umowie z dystrybutorem energii wartość tzw. mocy przyłączeniowej. Na rysunku 3 przedstawiono bilans energetyczny systemu S2 z uwzględnieniem energii E_{FW} wytworzonej w modułach FW, energii E_o przekazanej do sieci publicznej oraz energii E_p pobranej z sieci. Nawet w miesiącach, w których nadwyżka energii wytworzonej w instalacji FW była przekazywana do sieci dystrybucyjnej (E_o), równocześnie konieczne było pobieranie energii z sieci zewnętrznej (E_p), chociażby w związku z potrzebą zasilania określonych odbiorników w godzinach nocnych.



Rys. 3. Bilans energetyczny dla systemu S2

W ocenie ekonomicznej badanych instalacji przyjęto, że wytwarzana energia w instalacji FW jest w całości zagospodarowywana lokalnie, a efekt ekonomiczny stanowi obniżenie opłaty za energię liczone po kosztach jej zakupu u dystrybutora. Przy odsprzedaży całej wytworzonej energii wyznaczone okresy amortyzacji wydłużają się o ok. 25%. Rzeczywisty okres amortyzacji może być dłuższy, gdyż zależy on od ceny zakupu energii, kosztów eksploatacyjnych, nawyków użytkownika w zakresie oszczędzania energii, warunków gwarancyjnych i ewentualnych dodatkowych kosztów związanych z awariami, które mogą się wydarzyć w tak długich okresach czasu.

W tabeli 4 zamieszczono wyniki oszacowania długości okresów amortyzacji dla poszczególnych systemów FW. Wykorzystując uproszczony sposób oszacowania, długości okresów amortyzacji L_a oraz L'_a wyznaczono z zależności:

$$(1) \quad L_a = K_i / (E_{FW} \cdot O_E)$$

gdzie: L_a – liczba lat amortyzacji przy własnym zagospodarowaniu wytworzonej energii, L'_a – liczba lat amortyzacji przy odsprzedaży wytworzonej energii (rozliczenie w relacji 0,8:1), K_i – koszty inwestycji, E_{FW} – ilość energii wytwarzanej w ciągu roku, O_E – koszt zakupu 1 kWh energii.

Tabela 4. Oszacowanie okresów amortyzacji badanych systemów FW

	System			
	S1	S2	S3	S4
E_{FW} [kWh]	1563	3295	6146	39600
Taryfa	G11	G11	G11	C12a
O_E [zł/kWh]	0,65	0,65	0,65	0,57
K_i [zł]	16000	25000	46000	182600
R_o [zł]	1016,0	2141,8	3994,9	22572,0
L_a	15,7	11,7	11,5	8,1
L'_a	19,7	14,6	14,4	10,1

Skracanie okresów amortyzacji systemów FW wynika głównie z czynników technologicznych: zwiększenia sprawności energetycznej zarówno nowych typów ogniw FW, jak i inwerterów energii.

Wnioski

Wyniki przeprowadzonych badań i analiz wskazują, że inwestycje w instalacje OZE stają się coraz bardziej opłacalne.

Końcowe ryzyko związane z efektami wynikającymi z eksploatacji instalacji FW pozostaje po stronie inwestora.

Zdaniem grupy naukowców, aby uniknąć katastrofalnych skutków zmian klimatycznych, w ciągu

trzech najbliższych lat należy wdrożyć zalecenia proponowane m.in. przez komisje UE.

W tym kontekście, wydaje się być rozsądnym i uzasadnionym ekonomicznie wspieranie technologii OZE w miejsce wyszukiwania uzasadnień dla polityki wspierania wydobycia różnych gatunków węgla i jego wykorzystaniu w energetyce.

Autorzy: dr inż. Romuald Maśnicki, Akademia Morska w Gdyni Poznańska, Katedra Elektroenergetyki Okrętowej, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia, E-mail: romas@am.gdynia.pl, mgr inż. Marcin Lisowski, Akademia Morska w Gdyni Poznańska, Katedra Elektroenergetyki Okrętowej, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia, E-mail: m.lisowski@we.am.gdynia.pl.

LITERATURA

- [1] <http://www.ikea.com/pl/pl/energia-sloneczna-dla-domu/index.html>
- [2] Szymański B., Instalacje fotowoltaiczne, *Wydanie VI. Geosystem, Redakcja GlobeEnergia*, Kraków, 2017
- [3] Klugmann-Radziemska E., Fotowoltaika w teorii i praktyce, *Wydawnictwo BTC*, Legionowo, 2010
- [4] Sawicka-Chudy P., Colewa M., Sibiński M., Pawełek R., Analiza parametrów modułów fotowoltaicznych stacjonarnych i nadążnych w warunkach rzeczywistych, *Przegląd Elektrotechniczny*, 92(2016), nr 9, 58-61
- [5] Szczerbowski R., Instalacje fotowoltaiczne - aspekty techniczno-ekonomiczne, *Przegląd Elektrotechniczny*, 90(2014), nr 10, 31-36
- [6] Wiśniewski G., Więcka A., Dziamski P., Kamińska M., Rosołek K., Santorska A., Małoskalowe odnawialne źródła energii i mikroinstalacje. Kolektory słoneczne, systemy fotowoltaiczne, małe elektrownie wiatrowe, *Instytut Energetyki Odnawialnej, Publikacja Fundacji im. Heinricha Bölla, Studio27*, Warszawa, 2012
- [7] Maśnicki R., Mindykowski J., Lieske A., Melcer F., Przydomowa mikro-instalacja OZE – czy to się opłaca? *MKM 2017* (zaakceptowany na konferencję)
- [8] Lieske A., Melcer F., Wykorzystanie energii słonecznej i wiatrowej na potrzeby gospodarstw domowych. *Praca dyplomowa pod kierunkiem prof. J. Mindykowskiego*, Wydział Elektryczny Akademii Morskiej w Gdyni, Gdynia, 2016