

# BADANIE SYSTEMU FOTOWOLTAICZNEGO PRACUJĄCEGO W TRYBIE OFF-GRID

Adrianna Rzepkowska, Arkadiusz Adamczyk

Wydział Mechaniczno-Elektryczny, Akademia Marynarki Wojennej, Gdynia, Polska

## STRESZCZENIE

Współczesny przemysł energetyczny dąży do jak najmniejszego udziału nieodnawialnych źródeł energii w życiu codziennym. Najczęstszymi podawanymi konsekwencjami korzystania z wyżej wymienionych źródeł jest: zanieczyszczenie środowiska, globalne ocieplenie oraz wyczerpywanie się ich zasobów. Artykuł zawiera analizę danych, która ma na celu znalezienie optymalnego połączenia systemu fotowoltaicznego pracującego w trybie OFF-GRID, który w późniejszych projektach będzie można wykorzystywać w instalacjach autonomicznych.

## WSTĘP

Celem tego artykułu jest przedstawienie teoretycznych możliwości energetycznych paneli słonecznych różnego rodzaju, pracujących z regulatorami Maximum Power Point Tracking (MPPT) oraz z systemem zarządzania akumulatorami (Battery Management System -BMS) w różnych konfiguracjach połączenia.

Świat inwestuje w źródła nieemisyjne nie tylko z powodów ekologicznych. Prowadzone badania udowodniły, że odnawialne źródła energii (OZE) mają najmniejszy wpływ na środowisko, emisja z procesów spalania jest na poziomie zerowym oraz zauważono minimalizację szkód przy eksploatacji innych zasobów produkcyjnych (np. glebowych). Inwestycja w OZE jest dla państw i przedsiębiorstw korzystna, ponieważ źródła te po zainstalowaniu prowadzą do nieuchronnego spadku kosztów energii w dłuższym okresie oraz poprawiają też swoją konkurencyjność. Naukowcy z Uniwersytetu Stanforda przygotowali analizy (Polska została w nich także uwzględniona), w których badano możliwości realizacji potrzeb energetycznych dzięki energii z odnawialnych źródeł. Zostały przy tych badaniach wykluczone paliwa stałe. Uczni wykazali, że w 2050 roku byłoby możliwe całkowite przejście na OZE w Polsce i przyniosłoby ok. 200 tys. miejsc pracy do obsługi nowej energetyki oraz przy wytwarzaniu urządzeń i ich instalacji. Energetyka słoneczna wniosłaby wkład na poziomie 27%, z czego 10% stanowiłaby słoneczna energetyka przemysłowa. Natomiast 5% fotowoltaika na domach mieszkalnych [1]. Umieszczanie instalacji fotowoltaicznych na konstrukcjach wzniesionych ponad powierzchnię ziemi (np. uprawnej) mogłoby

chronić glebę przed wysychaniem oraz zapewnić błyskawiczny odpływ wód opadowych, ponieważ panele nie zakrywałyby dużych powierzchni uprawnych. Ochrona wód przed oddziaływaniem energetyki węglowej, nawadnianiem czy zwiększenie skuteczności ochrony powietrza to jedne z niewielu czynników, na które pozwala rozwój OZE. Analiza danych ma na celu znalezienie optymalnego połączenia systemu fotowoltaicznego pracującego w trybie OFF-GRID, który w późniejszych projektach będzie można wykorzystywać w instalacjach autonomicznych.

## SYSTEM OFF-GRID

System fotowoltaiczny pracujący w trybie OFF-GRID jest instalacją posiadającą dodatkowe magazyny energii. System ten nie potrzebuje przyłączenia do zewnętrznej sieci energetycznej, dzięki czemu jest niezależny energetycznie. Wykorzystuje się go w różnego rodzaju domach letniskowych, schroniskach, jachtach, łodziach oraz w miejscach, w których przyłączenie miejskiej sieci energetycznej jest niemożliwe bądź nieopłacalne. Rozwiązanie to jest wykorzystywane również w miejscach, w których dochodzi do częstych przerw w dostawie prądu, np. na wsiach. Wpływa na lepszy komfort życia oraz jako OZE nie powoduje zmian klimatycznych, z którymi naukowcy walczą od wielu lat. Doświadczenia ostatnich lat pokazały zwiększenie zainteresowania OZE. Przyczyną tego zjawiska jest między innymi zwiększenie dostępności (niższa cena) oraz zwiększająca się świadomość związana z ochroną środowiska. Prowadzi to do tego, że nie tylko naukowcy są zainteresowani takimi rozwiązaniami.

Do przeprowadzonych obliczeń wykorzystano dwa układy. Pierwszy składający się z paneli monokrystalicznych, MPPT, akumulatorów oraz BMS. Drugi natomiast z paneli elastycznych, MPPT, akumulatorów oraz BMS. W drugim układzie wykorzystane zostały panele elastyczne ze względu na ciężar oraz możliwość delikatnego odkształcenia. Są one lżejsze od klasycznych paneli kilkakrotnie, więc wykorzystanie ich na jachtach nie wpływa niekorzystnie na ich parametry. Z dostępnych na polskim rynku wybrano XSOL-250PFLEX firmy XDISC S.A. oraz X22-360 firmy SunPower®. Specyfikacja paneli zawarta jest w tabeli nr 1.

Tabela 4. Dane katalogowe wybranych paneli

	XSOL-250PFLEX	X22-360
Moc szczytowa $P_{max}$ [W <sub>p</sub> ]	250	360
Maksymalna sprawność panelu [%]	14,20	22,2
Napięcie mocy maksymalnej $V_{mpp}$ [V]	31,5	60,6
Natężenie prądu mocy maksymalnej $I_{mpp}$ [A]	7,91	5,94
Napięcie obwodu otwartego $V_{oc}$ [V]	37,44	69,5
Prąd zwarcioowy $I_{sc}$ [A]	8,48	6,48
Współczynnik temperaturowy $I$ [mA/°C]	4,4	3,5
Współczynnik temperaturowy $V$ [mV/°C]	-2,15	-167,4
Waga [kg]	4,53	18,6
Minimalna temperatura pracy [°C]	-40	-40
Maksymalna temperatura pracy [°C]	80	80

Regulator MPPT przez cały czas bada napięcie na panelach oraz analizuje położenie punktu mocy maksymalnej, co wpływa na przyspieszenie ładowania akumulatora. Dodatkowo może przekształcić moc z wyższego napięcia do mocy przy niższym napięciu. W analizie wykorzystano MPPT z napięciem wejściowym 150V oraz prądem wyjściowym o wartości 45A. Funkcja obciążenia wyjściowego zapobiega uszkodzeniom akumulatora. Regulator ładowania dąży do 100% doładowania akumulatora, co wpływa pozytywnie na żywotność akumulatorów. Śledzi najbardziej optymalne parametry pracy i napięcia paneli fotowoltaicznych, co pozwala na uzyskanie wyższej sprawności i wydajności od tradycyjnych regulatorów ładowania PWM od 10% do 30%.

System BMS służy do zarządzania pracą akumulatorów. BMS nadzoruje ładowanie oraz rozładowywanie akumulatorów oraz analizuje pracę każdej z cel w akumulatorze. W przypadku gdy jedna z cel jest bliska rozładowaniu bądź została rozładowana – odłącza ją. Nadzoruje także by każda z cel akumulatora miała to samo napięcie.

W układach wykorzystano akumulatory litowo-jonowe, ponieważ charakteryzują się one dużą trwałością oraz dobrymi parametrami ładowania oraz rozładowywania. Akumulatory litowo-jonowe mają najlepsze parametry ze wszystkich dostępnych rodzajów akumulatorów: niezawodność, wydajność pracy, brak efektu pamięci (nie ma konieczności

rozładowania do zera), niski prąd samorozładowania, praca w szerszym zakresie temperaturowym, mniejsze wymiary, mniejsza szkodliwość dla środowiska (w porównaniu do akumulatorów kadmowo-niklowych). Akumulatory te mają także dłuższą żywotność, którą można wydłużyć przy wykorzystaniu systemu BMS.

## ANALIZA

Moc badanego układu według założenia powinna wynosić 1 kW. Podczas przeprowadzonych analiz wzięto pod uwagę różne możliwości połączenia paneli fotowoltaicznych -połączenia szeregowo, szeregowo-równoległe oraz równoległe. Wstępnie przy wybranym MPPT możliwe do zrealizowania były połączenia równoległe oraz szeregowo-równoległe, ponieważ tylko przy tych konfiguracjach nie została przekroczona maksymalna wartość napięcia wejściowego oraz natężenia prądu wyjściowego. W przypadku przekroczenia maksymalnych wartości napięcia i natężenia prądu doszłoby do uszkodzenia całego układu. Wartości te dla połączenia szeregowego zostały obliczone z następujących wzorów:

$$P = \sum_{i=1}^n P_i \quad (1)$$

$$V_{oc/mpp} = \sum_{i=1}^n V_i \quad (2)$$

$$I_{oc/mpp} = I_1 = I_2 = \dots = I_n \quad (3)$$

Natomiast dla połączenia równoległego zostały obliczone z poniżej wymienionych wzorów:

$$I_{oc/mpp} = \sum_{i=1}^n I_i \quad (4)$$

$$V_{oc/mpp} = V_1 = V_2 = \dots = V_n \quad (5)$$

Moc paneli połączonych równoległe została obliczona z rów.(1).

Następnie sprawdzono zmiany napięcia i natężenia prądu w zależności od zmian temperatury. Do obliczeń wykorzystano minimalną oraz maksymalną temperaturę w jakiej mogą pracować panele. Przy wzroście temperatury następuje spadek napięcia oraz wzrost natężenia prądu, natomiast przy spadku miejsce ma sytuacja odwrotna. W kolejnym kroku obliczono maksymalne natężenie prądu dla akumulatora przy pracy w minimalnej temperaturze pracy paneli. Skorzystano z następującego wzoru:

$$I_{BATMAX} = \frac{V_{mpp\_min}}{V_{BAT}} \cdot I_{mpp\_min} \quad (6)$$

gdzie:

$I_{BATMAX}$  – maksymalne natężenie prądu akumulatora,

$V_{BAT}$  – napięcie ładowania akumulatora,

$V_{mpp\_min}$  – napięcie pracy akumulatora w najniższej temperaturze,

$I_{mpp\_min}$  - natężenie pracy akumulatora w najniższej temperaturze,

Przyjęto, że napięcie ładowania akumulatora wynosi 28V. Natomiast napięcie pracy akumulatora nie może być mniejsze niż napięcie otwartego obwodu przy minimalnej temperaturze. Jedyne rozwiązanie spełniające powyższe wymagania uzyskano przy połączeniu równoległym. Nie została przekroczona ani maksymalna wartość napięcia wejściowego ani wartość natężenia prądu wyjściowego. Wyniki przedstawiono w tabeli nr 2 dla SunPower® X22-360 dla możliwych połączeń. W przypadku połączenia szeregowego otrzymane napięcie będzie zbyt wysokie dla przyjętego w układzie regulatora ładowania, którego napięcie maksymalne wynosi 150V, natomiast natężenie prądu 45A. Zatem jedynym rozwiązaniem jest równoległe połączenie.

Tabela 5. Wyniki wyliczeń napięcia otwartego obwodu oraz natężenia prądu zwarcia paneli SunPower® X22-360

Liczba stringów	Liczba modułów w 1 stringu	V <sub>oc</sub> [V]	I <sub>sc</sub> [A]
1	3	208,5	6,48
3	1	69,5	19,44

Liczba stringów oznacza liczbę połączeń szeregowych. W tabeli 3 przedstawiono obliczone wartości dla maksymalnej i minimalnej temperatury pracy paneli fotowoltaicznej. Wyniki podano dla napięcia otwartego obwodu, natężenia prądu zwarcia, napięcia mocy maksymalnej oraz natężenia prądu mocy maksymalnej.

Tabela 6. Wyniki wyliczeń dla skrajnych temperatur pracy paneli SunPower® X22-360

T [°C]	V <sub>oc</sub> [V]	I <sub>sc</sub> [A]	V <sub>mpp_min</sub> [V]	I <sub>mpp_min</sub> [A]
-40	80,381	19,216	71,481	17,593
80	59,456	19,668	50,556	18,048

W dwóch powyższych przypadkach nie zostały przekroczone żadne maksymalne parametry dla regulatora ładowania. W związku z czym kolejnym aspektem, na który zwrócono uwagę był akumulator. Ładowanie akumulatora niskim prądem jest dla niego o wiele bardziej korzystne niż wyższym, ponieważ przedłuża ono żywotność akumulatora. Zatem ostatecznie dla paneli XSOL-250PFLEX najbardziej optymalnym rozwiązaniem jest połączenie szeregowo-równoległe.

Analogicznie obliczono wielkości dla paneli XSOL-250PFLEX. Wyniki przedstawiono w tabelach 4,5 i 6.

Tabela 7. Wyniki obliczeń napięcia otwartego obwodu oraz natężenia prądu zwarcia paneli XSOL-250PFLEX

Liczba stringów	Liczba modułów w 1 stringu	V <sub>oc</sub> [V]	I <sub>sc</sub> [A]
1	4	149,76	8,48
2	2	74,88	16,96
4	1	37,44	33,92

Dla połączenia szeregowego (cztery moduły w jednym stringu) wartość napięcia obwodu otwartego jest bliska maksymalnego napięcia regulatora ładowania, więc ze względu na istniejące ryzyko, iż może ono być wyższe niż napięcie regulatora połączenie to zostało wyeliminowane. W kolejnym rozpatrywane były dwa przypadki : równoległy (cztery stringi) oraz szeregowo-równoległy (po dwa moduły w dwóch stringach).

Tabela 8. Wyliczenia dla połączenia szeregowo-równoległego dla paneli XSOL-250PFLEX

T [°C]	V <sub>oc</sub> [V]	I <sub>sc</sub> [A]	V <sub>mpp</sub> [V]	I <sub>mpp</sub> [A]
-40	75,019	16,732	63,139	15,534
80	74,751	17,188	62,871	16,106

Tabela 9. Wyliczenia dla połączenia równoległego dla paneli XSOL-250PFLEX

T [°C]	V <sub>oc</sub> [V]	I <sub>sc</sub> [A]	V <sub>mpp</sub> [V]	I <sub>mpp</sub> [A]
-40	37,579	33,692	31,639	31,354
80	37,311	34,147	31,371	31,926

## PODSUMOWANIE

Podsumowując, po wykonanych obliczeniach oraz wzięciu pod uwagę wszystkich rozpatrywanych rozwiązań oraz założeń obu badanych paneli zostały wybrane po jednym połączeniu dla każdej paneli. Porównując obliczone wartości pracy dla skrajnych temperatur, wywnioskowano, że układ składający się z paneli elastycznych będzie dobrym rozwiązaniem.

## LITERATURA

- Adamczewski T., 2017. *Przyjazny rozwój Polski. Ludziom – gospodarce – środowisku. Raport merytoryczny*, Fundacja Instytut na rzecz Ekorozwoju, Warszawa
- Specyfikacja paneli SunPower® X22-360: <https://sunsol.pl/oferta/panele-fotowoltaiczne/sunpower/sunpower-x-22-360-w/> [dostęp na 31.05.2018r.]
- Specyfikacja paneli XSOL-250PFLEX: [http://serwer.timestudio.pl/klienci/energia\\_odnawialna\\_wp/wpcontent/uploads/2014/04/SPECYFIKACJA-XSOL-FLEX.pdf](http://serwer.timestudio.pl/klienci/energia_odnawialna_wp/wpcontent/uploads/2014/04/SPECYFIKACJA-XSOL-FLEX.pdf) [dostęp na 31.05.2018r.]