

WPLYW TEMPERATURY OTOCZENIA NA ZYSKI ENERGETYCZNE Z MODUŁÓW FOTOWOLTAICZNYCH

B. Chwieduk

Katedra Podstaw Inżynierii, Wydział Inżynierii Produkcji, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Warszawa, Polska

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono wyniki obliczeń dotyczących wpływu temperatury otoczenia modułów fotowoltaicznych na zyski energetyczne. Opisano formuły stosowane przy wyznaczaniu temperatury ogniw fotowoltaicznych. Zyski energetyczne wyznaczone przy wykorzystaniu formuły uproszczonej oraz formuły Homera porównano także z zyskami energetycznymi wyznaczonymi bez uwzględniania zmiany temperatury pracy modułu fotowoltaicznego. W obliczeniach posłużono się danymi meteorologicznymi udostępnionymi na stronie Ministerstwa Inwestycji i Rozwoju oraz danymi technicznymi dwóch wybranych modułów fotowoltaicznych. Na podstawie przeprowadzonych obliczeń stwierdzić można, że zastosowanie obu formuł (uproszczonej i Homera) daje bardzo zbliżone wyniki. Nie uwzględnienie zmiany temperatury podczas określania zysków energetycznych z instalacji fotowoltaicznej w skali roku, nie wpływa znacząco na wynik obliczeń. Biorąc pod uwagę wyniki dotyczące poszczególnych miesięcy różnica w zyskach energetycznych w okresie letnim i zimowym staje się wyraźna. Obliczenia przeprowadzono z godzinowym krokiem czasowym. Godzinne zyski energetyczne w zależności od sposobu ich wyznaczenia mogą różnić się od siebie nawet o kilkanaście procent.

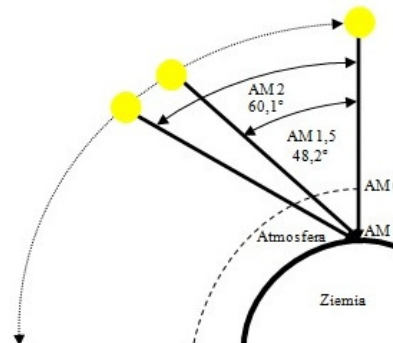
WSTĘP

Na energię produkowaną przez ogniwa fotowoltaiczne wpływ ma wiele czynników zewnętrznych. Mogą one pozytywnie bądź negatywnie wpływać na chwilową moc danego urządzenia. W zależności od strumienia energii promieniowania słonecznego docierającego do powierzchni ogniwa, temperatury zewnętrznej oraz prędkości wiatru zmianie ulega charakterystyka napięciowo-prądowa półprzewodnika. Zmiana natężenia promieniowania słonecznego wpływa głównie na natężenie prądu generowane w ogniwie fotowoltaicznym. Napięcie zmienia się w mniejszym stopniu. Wraz ze wzrostem natężenia promieniowania słonecznego docierającego do powierzchni odbiornika zwiększa się jego moc, a co za tym idzie także produkowana energia. Większość energii promieniowania słonecznego docierającego do powierzchni modułów fotowoltaicznych jest zamieniana na ciepło. Wzrost temperatury zewnętrznej powietrza także przekłada się na wzrost temperatury samego ogniwa i ma niekorzystny wpływ na jego sprawność i moc. Przy stałym poziomie natężenia promieniowania słonecznego wzrost temperatury ogniwa powoduje wyraźny spadek napięcia

i nieznaczny wzrost natężenia prądu. Związek pomiędzy temperaturą ogniwa, a jego mocą jest liniowy i określany podczas badań. W celu określenia wpływu warunków zewnętrznych na moc półprzewodnika należy powiązać je z temperaturą ogniwa. Jest to możliwe dzięki badaniom przeprowadzonym na modułach fotowoltaicznych w różnych warunkach zewnętrznych. Moc modułów fotowoltaicznych podawana przez producentów w danych technicznych jest wyznaczana przy dokładnie określonych parametrach otoczenia zewnętrznego.

WARUNKI BADANIA OGNIW FOTOWOLTAICZNYCH

Najczęściej spotykanymi warunkami, przy których bada się ogniwa fotowoltaiczne są warunki STC (Standard Test Conditions) oraz NOCT (Nominal Operating Cell Temperature). W pierwszym przypadku badanie przeprowadza się przy natężeniu promieniowania słonecznego równym 1000 W/m^2 . Temperatura modułu fotowoltaicznego wynosi 25°C , a współczynnik masy optycznej atmosfery AM 1,5. Masa optyczna atmosfery (Air Mass) jest miarą odległości, jaką musi przebyć promieniowanie słoneczne od zewnętrznej granicy atmosfery do powierzchni ziemi. Wartość współczynnika AM 1,5 odpowiada odchyleniu „położenia” słońca względem płaszczyzny równika o $48,2^\circ$. Są to warunki bardzo zbliżone do tych występujących w Polsce.



Rys.1. Współczynniki AM dla wybranych kątów padania promieniowania słonecznego

Podczas badań w warunkach NOCT określa się temperaturę ogniwa fotowoltaicznego. Natężenie promieniowania słonecznego wynosi 800 W/m^2 . Temperatura otoczenia jest na stałym poziomie i wynosi

20°C. Współczynnik AM jest identyczny jak w przypadku badań przeprowadzanych w warunkach STC i wynosi 1,5. Dodatkowym warunkiem zewnętrznym wpływającym na działanie ogniw uwzględnionym w badaniach NOCT jest prędkość wiatru. Podczas badań moduł fotowoltaiczny owiewany jest powietrzem wiejącym z prędkością 1 m/s (Fesharaki, 2011; Luque, 2003; Matuszczyk, 2015; Mazur, 2016; Radziemska, 2003; Szymański, 2013; Waclawek, 2011)

WYZNACZANIE TEMPERATURY OGNIWA FOTOWOLTAICZNEGO

Wykorzystując wyznaczone podczas tych badań wartości i dane techniczne modułów fotowoltaicznych możliwe jest wyznaczenie mocy modułu fotowoltaicznego w dowolnych warunkach otoczenia. Na przestrzeni lat wykreowały się dwa rodzaje formuł określających moc modułu fotowoltaicznego w danych warunkach meteorologicznych. Pierwsza nazywana uproszczoną wykorzystuje wyniki badania ogniw fotowoltaicznych w warunkach NOCT oraz temperaturę otoczenia i gęstość promieniowania słonecznego. Wynikiem obliczeń przeprowadzonych wg wzoru 1 jest temperatura ogniw fotowoltaicznych przy zadanej temperaturze otoczenia i gęstości promieniowania słonecznego:

$$t_c = t_a + (t_{c,NOCT} - t_{a,NOCT}) \left(\frac{G_T}{G_{T,NOCT}} \right) \quad (1)$$

gdzie:

t_c - temperatura ogniw fotowoltaicznych [°C],

t_a - temperatura otoczenia [°C],

$t_{c,NOCT}$ - temperatura ogniw fotowoltaicznych w warunkach NOCT,

$t_{a,NOCT}$ - temperatura otoczenia w warunkach NOCT,

G_T - natężenie promieniowania słonecznego [W/m^2],

$G_{T,NOCT}$ - natężenie promieniowania słonecznego w warunkach NOCT.

Jednym z parametrów podawanych przez producentów modułów fotowoltaicznych w danych technicznych jest Temperature coefficient of PMPP czyli współczynnik temperaturowy mocy (%/°C). Wykorzystując ten parametr oraz obliczoną wartość t_c można wyznaczyć chwilową moc modułu fotowoltaicznego.

Drugą ze stosowanych formuł mających na celu wyznaczenie chwilowej temperatury ogniw jest formuła Homera. Wykorzystuje ona jednocześnie wyniki badania ogniw w warunkach NOCT oraz STC. Wzór 2 przedstawia sposób wyznaczania temperatury ogniw formułą Homera (Duffie, 1991; Erbs, 1982; Graham, 1990; Graham, 1988; www.homerenergy.com/products/pro/docs/3.11/how_homer_calculates_the_pv_cell_temperature.html):

$$t_c = \frac{t_a + (t_{c,NOCT} - t_{a,NOCT}) \left(\frac{G_T}{G_{T,NOCT}} \right) \left[1 - \frac{\eta_{M,STC} (1 - \alpha_p t_{c,STC})}{\tau \alpha} \right]}{1 + (t_{c,NOCT} - t_{a,NOCT}) \left(\frac{G_T}{G_{T,NOCT}} \right) \left(\frac{\alpha_p \eta_{M,STC}}{\tau \alpha} \right)} \quad (2)$$

gdzie:

$\eta_{Mp,STC}$ - sprawność ogniw w warunkach STC [%],

α_p - współczynnik temperaturowy mocy (%/°C),

$t_{c,STC}$ - temperatura ogniw w warunkach STC,

$\tau \alpha$ - iloczyn transmisyjności τ oraz absorpcyjności α .

ZAŁOŻENIA DO OBLICZEŃ

W artykule rozważono trzy przypadki. W pierwszym w obliczeniach dotyczących zysków energetycznych z modułów fotowoltaicznych nie uwzględniono zmiany sprawności modułu wynikającej ze zmiany temperatury zewnętrznej. Moduły mają temperaturę 25°C przy jakiej badane są w warunkach STC. Moc chwilowa modułu zależy jedynie od gęstości promieniowania słonecznego padającego na powierzchnię odbiornika. W kolejnych dwóch przypadkach wykorzystano dwie wcześniej zaprezentowane formuły. Wszystkie obliczenia przeprowadzono dla powierzchni poziomej. Dane meteorologiczne napromieniowania słonecznego oraz temperatury zewnętrznej pochodzą ze strony Ministerstwa Inwestycji i Rozwoju (www.miir.gov.pl). Posłużono się danymi sporządzonymi dla Warszawy. Obliczenia przeprowadzono dla dwóch modułów fotowoltaicznych różniących się mocą, sprawnością oraz charakterystykami napięciowo-prądowymi. W tabelach 1 i 2 zebrano najważniejsze dane techniczne modułów fotowoltaicznych niezbędne do wyznaczenia ich mocy w określonych warunkach meteorologicznych.

Tab. 1. Dane techniczne modułu fotowoltaicznego (www.recgroup.com/sites/default/files/documents/ds_rec_twinpeak_series_rev_i_eng.pdf).

REC TwinPeak 265			
Warunki STC			
Moc maksymalna	Pmax	265	W
Nominalne napięcie	Vmpp	31,1	V
Nominalne natężenie prądu	Impp	8,53	A
Napięcie obwodu otwartego	Voc	38,3	V
Prąd zwarcia	Isc	9,21	A
Sprawność		16,1	%
Warunki NOCT			
Nominalna moc	Pmax	195	W
Nominalne napięcie	Vmpp	28,75	V
Nominalne natężenie prądu	Impp	6,77	A
Napięcie obwodu otwartego	Voc	35,25	V
Prąd zwarcia	Isc	7,32	A
Temperatura ogniw		44,6	C
Współczynnik temperaturowy mocy	MWT	-0,39	%/C
Współczynnik temperaturowy napięcia	NWT	-0,31	%/C
Współczynnik temperaturowy natężenia prądu	PWT	0,045	%/C

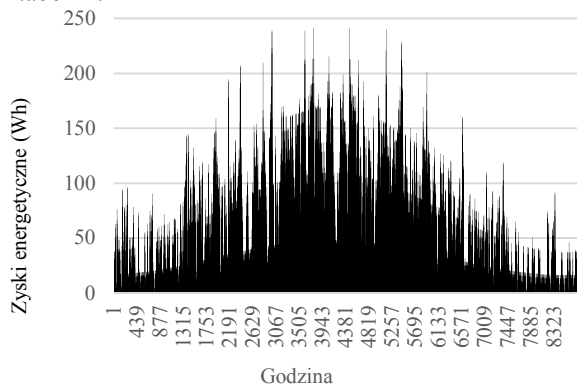
Tab. 2. Dane techniczne modułu fotowoltaicznego (www.lg.com/us/commercial/documents/MonoX-Neon-LG285N1C-20130214.pdf).

LG285N1C-G3			
Warunki STC			
Nominalna moc	Pmax	285	W
Nominalne napięcie	Vmpp	31,6	V
Nominalne natężenie prądu	Imp	9,09	A
Napięcie obwodu otwartego	Voc	39	V
Prąd zwarcia	Isc	9,68	A
Sprawność		17,4	%
Warunki NOCT			
Nominalna moc	Pmax	210	W
Nominalne napięcie	Vmpp	28,9	V
Nominalne natężenie prądu	Imp	7,25	A
Napięcie obwodu otwartego	Voc	36	V
Prąd zwarcia	Isc	7,8	A
Temperatura ogniwa		45	C
Współczynnik temperaturowy mocy	MWT	-0,42	%/C
Współczynnik temperaturowy napięcia	NWT	-0,31	%/C
Współczynnik temperaturowy natężenia prądu	PWT	0,03	%/C

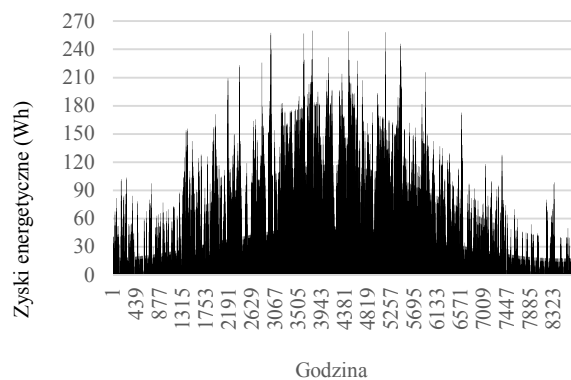
WYNIKI OBLICZEŃ

Zyski energetyczne obliczone z uwzględnieniem braku zmiany temperatury ogniów w czasie ich pracy

W pierwszym rozpatrywanym przypadku pod uwagę w ogóle nie wzięto zmian temperatury ogniów fotowoltaicznych, a co za tym idzie także zmiany sprawności. Sprawność ogniwa jest na stałym poziomie wyznaczonym podczas badania w warunkach STC. Oznacza to, że temperatura ogniów niezależnie od temperatury zewnętrznej zawsze wynosi 25°C. Moc chwilowa ogniwa zależy jedynie od promieniowania całkowitego padającego na odbiornik. Na rysunkach 2 i 3 (przedstawiono godzinowe zyski energetyczne z modułów fotowoltaicznych na przestrzeni całego roku. Rysunek 2 obrazuje wyniki obliczeń dla danych modułu fotowoltaicznego z tabeli 1. Rysunek 3 natomiast został stworzony przy wykorzystaniu danych z tabeli 2.

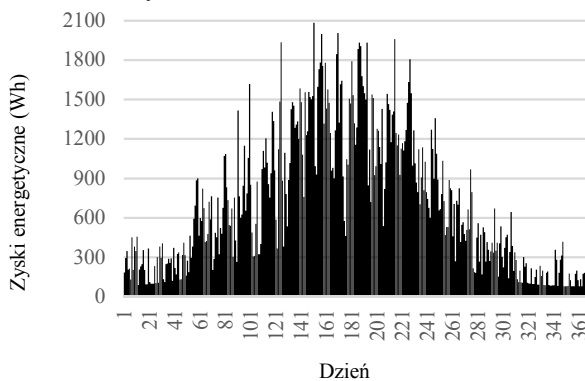


Rys. 2. Godzinowe zyski energetyczne z modułu REC TwinPeak 265

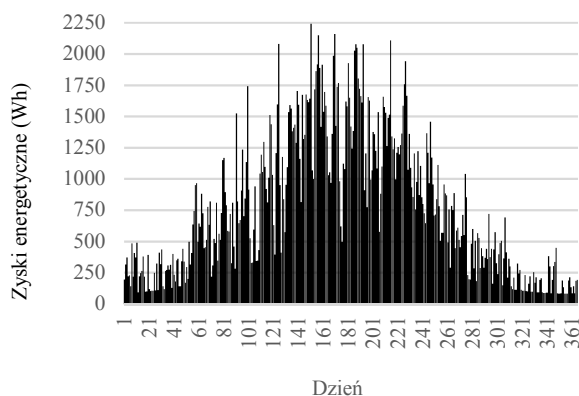


Rys. 3. Godzinowe zyski energetyczne LG285N1C-G3

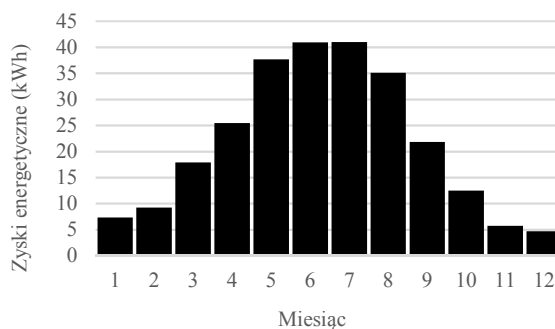
Kolejne wykresy przedstawiają dzienne oraz miesięczne zyski energetyczne z modułów fotowoltaicznych.



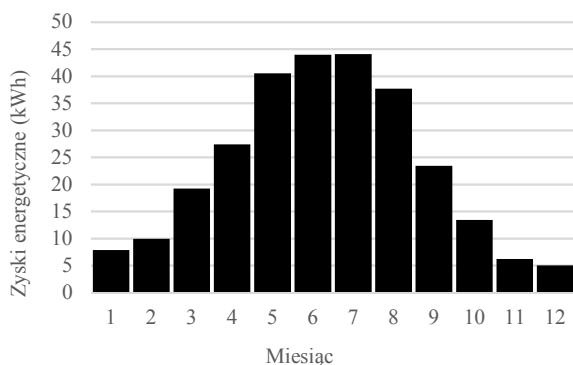
Rys. 4. Dzielne zyski energetyczne z modułu REC TwinPeak 265



Rys. 5. Dzielne zyski energetyczne z modułu LG285N1C-G3



Rys. 6. Miesięczne zyski energetyczne z modułu REC TwinPeak 265

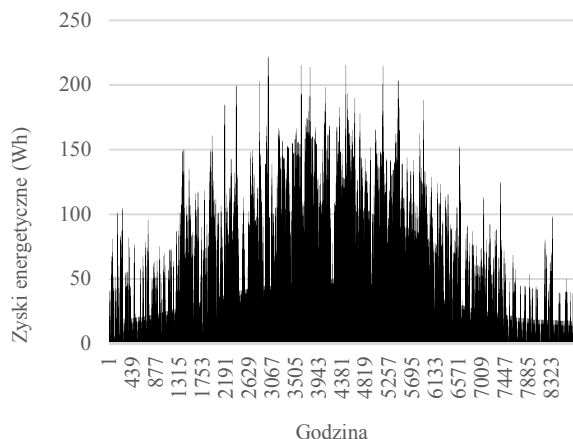


Rys. 7. Miesięczne zyski energetyczne z modułu LG285N1C-G3

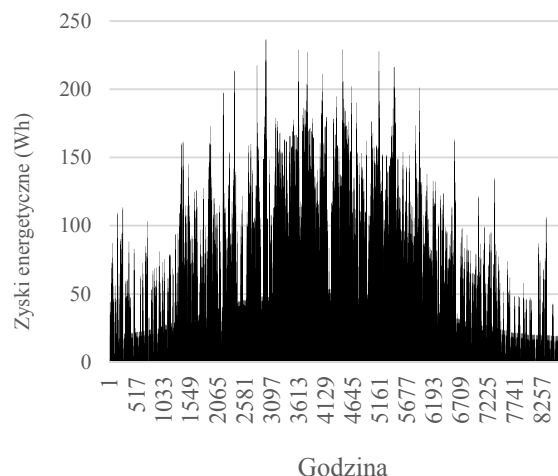
Energia wygenerowana przez moduł fotowoltaiczny REC TwinPeak 265 w ciągu całego roku wynosi 259 kWh. Moduł LG285N1C-G3 o nominalnej mocy wynoszącej 285Wp wyprodukuje 279 kWh. Przedstawione wyniki obliczeń dotyczą sytuacji, w której temperatura modułów fotowoltaicznych jest na stałym niezmiennym poziomie wynoszącym 25°C, co oczywiście nie jest możliwe w normalnych warunkach pracy w czasie całego roku.

Zyski energetyczne obliczone z uwzględnieniem zmiany temperatury modułów fotowoltaicznych wyznaczonej formułą uproszczoną

Sprawność wybranych modułów fotowoltaicznych wyznaczana jest na podstawie zmiany ich temperatury. Wykorzystując dane techniczne modułu oraz jego parametry zmierzone podczas badania w warunkach NOCT obliczono temperaturę modułu. Obliczenia przeprowadzono z godzinnym krokiem czasowym. Wraz ze wzrostem temperatury maleje sprawność modułu. Oznacza to, że wyniki obliczeń przedstawione w tym podrozdziale pokrywać się będą z obliczeniami, w których nie uwzględniono zmian temperatury ogniw, jedynie jeżeli wyznaczona temperatura ogniw będzie wynosić 25°C. Na rysunkach 9 i 10 przedstawiono wyniki obliczeń godzinowych zysków energetycznych z wybranych modułów fotowoltaicznych.

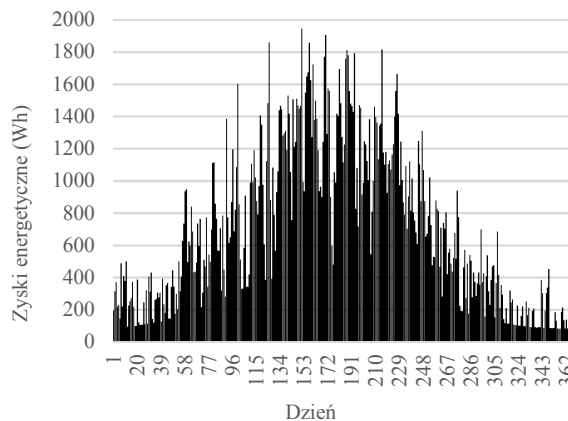


Rys. 9. Godzinowe zyski energetyczne z modułu REC TwinPeak 265

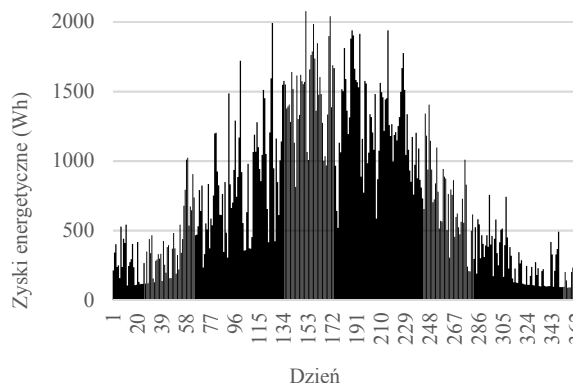


Rys. 10. Godzinowe zyski energetyczne z modułu LG285N1C-G3

Rysunki 11 i 12 przedstawiają dzienne zyski energetyczne wyznaczone przy wykorzystaniu formuły uproszczonej dla wybranych modułów fotowoltaicznych.

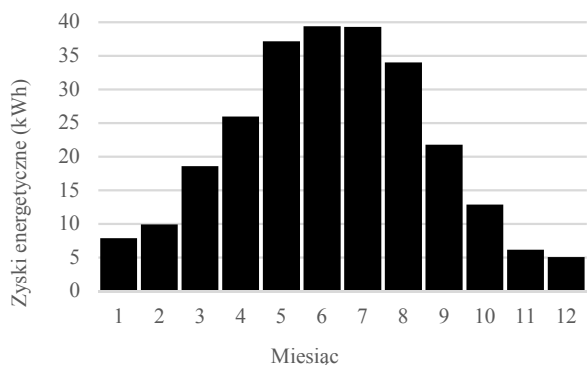


Rys. 11. Dienne zyski energetyczne z modułu REC TwinPeak 265

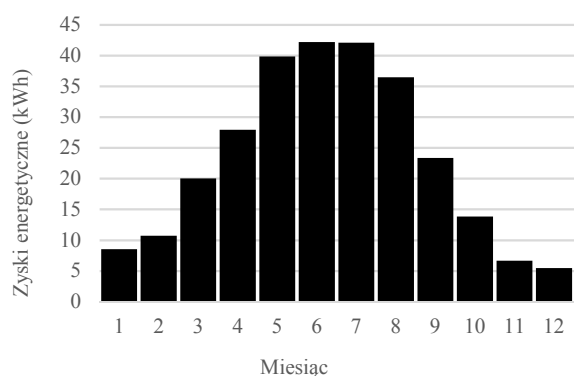


Rys. 12. Dienne zyski energetyczne z modułu LG285N1C-G3

Rysunki 13 i 14 przedstawiają miesięczne zyski energetyczne z modułów fotowoltaicznych REC TwinPeak 265 oraz LG285N1C-G3.



Rys. 13. Miesięczne zyski energetyczne z modułu REC TwinPeak 265

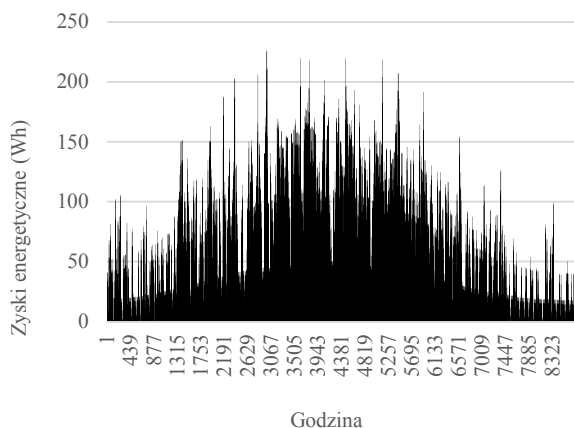


Rys. 14. Miesięczne zyski energetyczne z modułu LG285N1C-G3

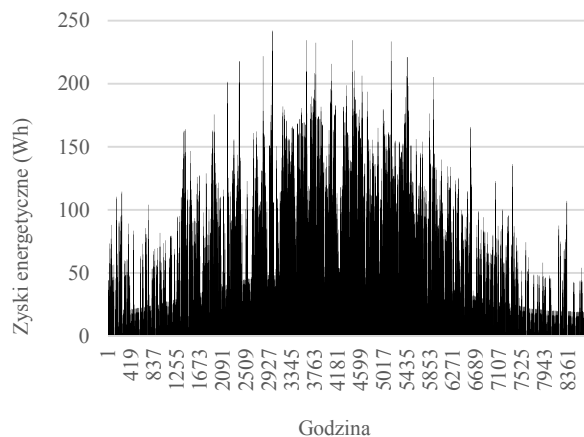
Roczne zyski energetyczne z modułów fotowoltaicznych wynoszą odpowiednio 258 kWh dla modułu REC TwinPeak 265 i 277 kWh dla LG285N1C-G3.

Zyski energetyczne obliczone z uwzględnieniem zmiany temperatury ogniw fotowoltaicznych wyznaczonej formułą Homera

Drugim bardziej skomplikowanym sposobem wyznaczania chwilowej temperatury modułu fotowoltaicznego jest wykorzystanie formuły Homera. Wykorzystuje ona wyniki badań modułów fotowoltaicznych w warunkach NOCT oraz STC. Rysunki 15 i 16 przedstawiają godzinowe zyski energetyczne z modułów REC TwinPeak 265 i LG285N1C-G3.

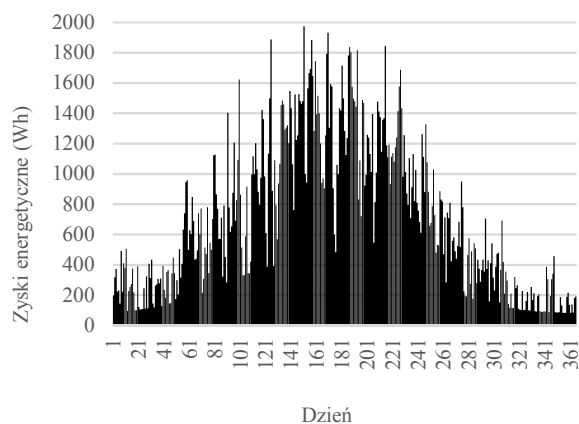


Rys. 15. Godzinowe zyski energetyczne z modułu REC TwinPeak 265

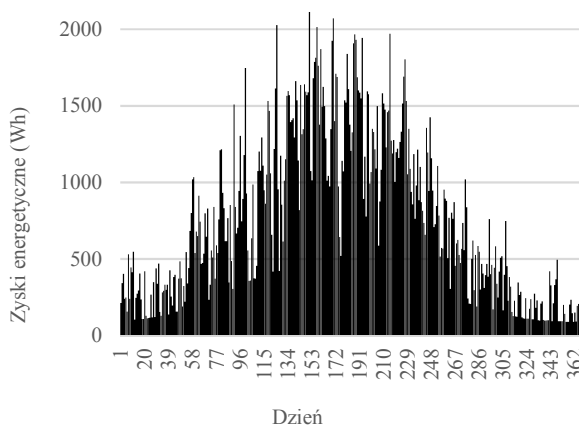


Rys. 16. Godzinowe zyski energetyczne z modułu LG285N1C-G3

Rysunki 17 i 18 przedstawiają dzienne zyski energetyczne pochodzące z wybranych modułów fotowoltaicznych.

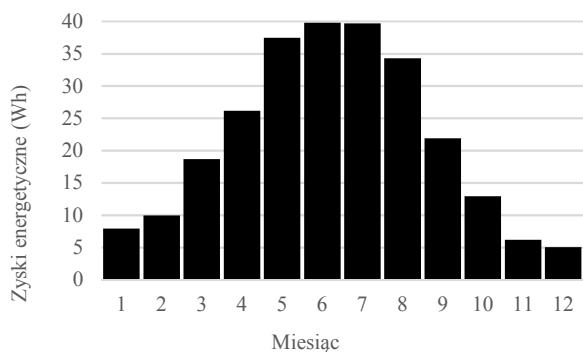


Rys. 17. Dzielne zyski energetyczne z modułu REC TwinPeak 265

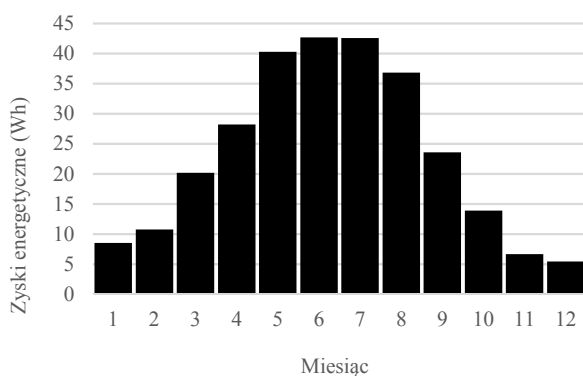


Rys. 18. Dzielne zyski energetyczne z modułu LG285N1C-G3

Na rysunkach 19 i 20 zaprezentowano wyniki obliczeń zysków miesięcznych z modułów fotowoltaicznych.



Rys. 19. Miesięczne zyski energetyczne z modułu REC TwinPeak 265



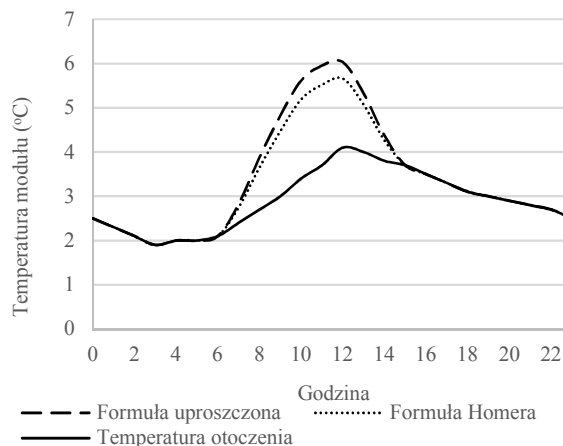
Rys. 20. Miesięczne zyski energetyczne z modułu LG285N1C-G3

Roczne zyski energetyczne z modułów fotowoltaicznych wynoszą odpowiednio 260 kWh dla modułu REC TwinPeak 265 oraz 279,6 kWh dla modułu LG285N1C-G3.

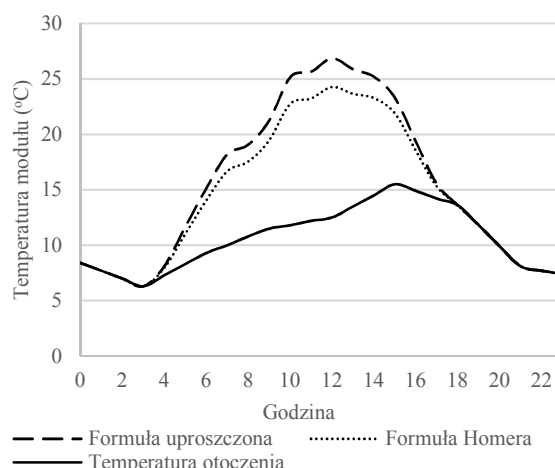
Porównanie wyników obliczeń

W niniejszym rozdziale przedstawiono wyniki obliczeń, dla poszczególnych sposobów uwzględniania zmiany sprawności modułów w zależności od ich temperatury. Różnice w rocznych zyskach energetycznych pomiędzy rozpatrywanymi sposobami wyznaczania energii wyprodukowanej przez moduły są niewielkie. Jeżeli w obliczeniach nie bierze się pod uwagę zmiany temperatury ogniw fotowoltaicznych energia wyprodukowana przez moduły fotowoltaiczne wynosi odpowiednio 259,15 kWh dla modułu REC TwinPeak 265 oraz 278,7 kWh dla modułu LG285N1C-G3. Po przeprowadzeniu obliczeń wykorzystując formułę uproszczoną wartości te wynoszą odpowiednio: 257,88 kWh i 277 kWh. Zyski energetyczne wyznaczone formułą uproszczoną są nieznacznie niższe od tych, w których nie uwzględniono wpływu temperatury ogniw na ich sprawność. Oznacza to, że średnioroczna temperatura pracy ogniw fotowoltaicznych w czasie operacji promieni słonecznych jest wyższa od 25°C. Jest to temperatura badania ogniw w warunkach STC i jednocześnie temperatura ogniw założona w obliczeniach w pierwszym z rozpatrywanych przypadków. Wyniki obliczeń całorocznych zysków energetycznych wyznaczonych przy wykorzystaniu formuły Homera przedstawiają się następująco: 259,94 kWh dla modułu REC TwinPeak 265 oraz 279,63 kWh dla modułu

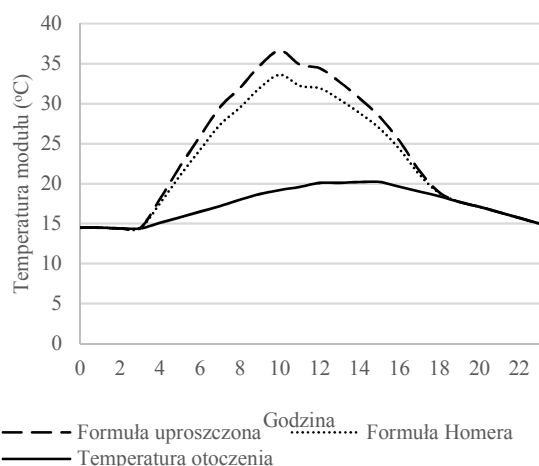
LG285N1C-G3. Wyniki te są wyższe od tych wyznaczonych metodą uproszczoną jak i tych, w których temperatura modułu jest na stałym poziomie. Średnioroczna temperatura modułu fotowoltaicznego w czasie jego pracy wynosi poniżej 25°C. Rysunki 21-24 przedstawiają zmianę temperatury modułów REC TwinPeak 265 w czterech wybranych dniach roku. Na wykresach umieszczono także rozkład temperatury otoczenia.



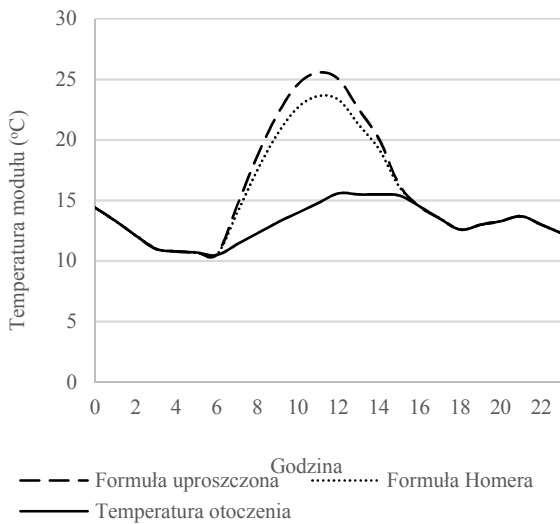
Rys.21. Rozkład temperatury modułu fotowoltaicznego REC TwinPeak 265 26 stycznia



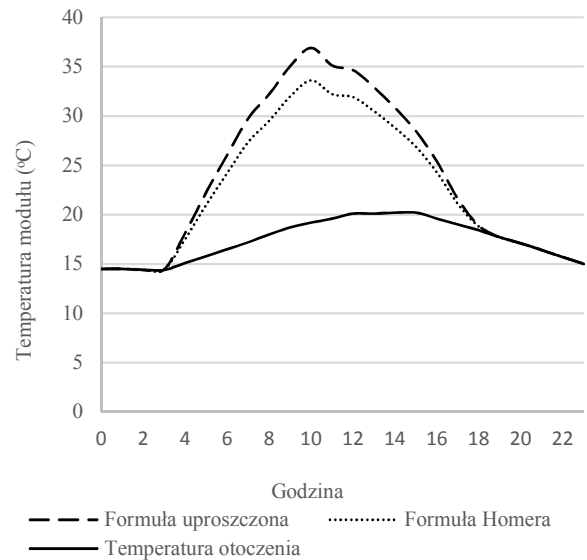
Rys.22. Rozkład temperatury modułu fotowoltaicznego REC TwinPeak 265 21 kwietnia



Rys.23. Rozkład temperatury modułu fotowoltaicznego REC TwinPeak 265 19 lipca

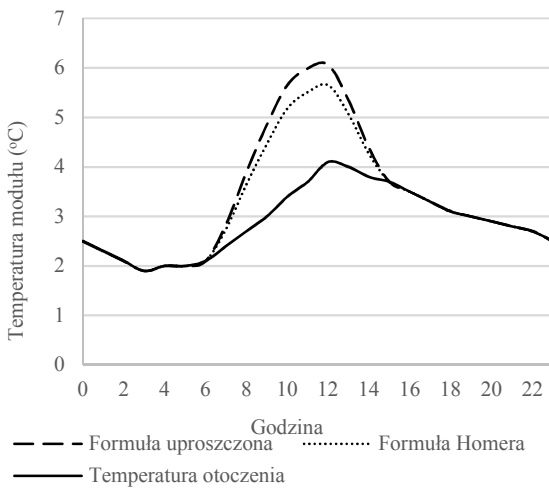


Rys.24. Rozkład temperatury modułu fotowoltaicznego REC TwinPeak 265 25 października

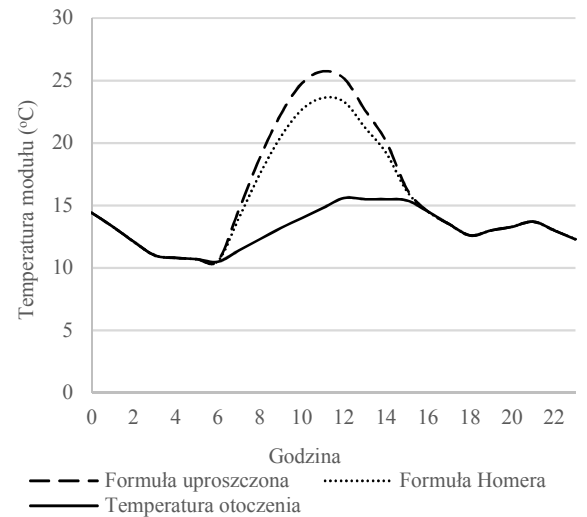


Rys.27. Rozkład temperatury modułu fotowoltaicznego LG285N1C-G3 19 lipca

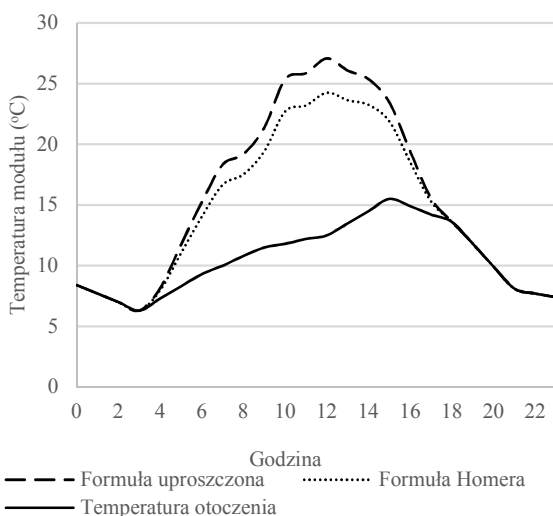
Kolejne cztery wykresy przedstawiają wyniki obliczeń dla modułu LG285N1C-G3. Zaprezentowane rysunki dotyczą tych samych dni co wykresy 21-24.



Rys.25. Rozkład temperatury modułu fotowoltaicznego LG285N1C-G3 26 stycznia.



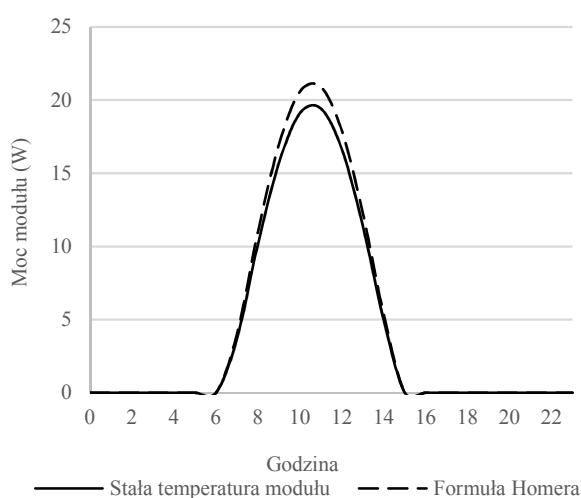
Rys.28. Rozkład temperatury modułu fotowoltaicznego LG285N1C-G3 25 października



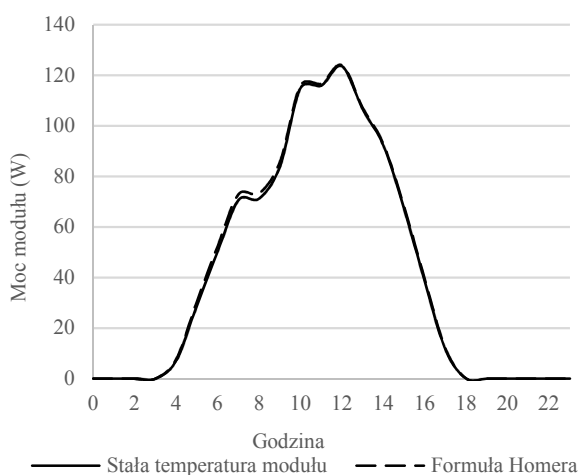
Rys.26. Rozkład temperatury modułu fotowoltaicznego LG285N1C-G3 21 kwietnia

W miesiącach letnich temperatura modułów fotowoltaicznych wyraźnie różni się od temperatury otoczenia. Różnica pomiędzy temperaturą zewnętrzną, a temperaturą modułu fotowoltaicznego w miesiącach z największym napromieniowaniem słonecznym może wynosić ponad 20°C. Porównując wyniki obliczeń z temperaturą badania ogniów w warunkach STC różnice są jeszcze większe. Temperatura maksymalna modułów fotowoltaicznych obliczona wg formuły uproszczonej wynosi 54,53°C. Temperatura maksymalna wyznaczona formułą Homera jest niższa i wynosi 50,32 °C. Jako, że sprawność ogniów spada wraz ze wzrostem temperatury moc chwilowa modułu fotowoltaicznego obliczona metodą uproszczoną będzie niższa niż ta wyznaczona formułą Homera. Temperatura maksymalna otoczenia wynosi 33,2°C. Dane meteorologiczne, które posłużyły do przeprowadzenia obliczeń pochodzą ze strony internetowej Ministerstwa Inwestycji i Rozwoju (www.miiir.gov.pl). Są to wieloletnie dane uśrednione. Uśredniane są wartości kolejnych godzin roku. Oznacza to, że skrajne wartości temperatur nie są zawarte w

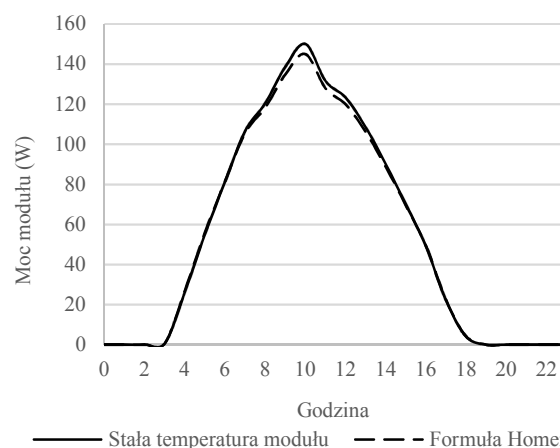
danych. Minimalna temperatura otoczenia wg danych meteorologicznych wynosi $-12,3^{\circ}\text{C}$. W rzeczywistości temperatura w okresie zimy może spadać wyraźnie poniżej tej wartości. Porównując wyniki obliczeń dotyczących chwilowej mocy modułów zauważyć można, że w przypadku zimy obliczenia mocy nie uwzględniające zmian temperatury wartości są wyraźnie zaniżone. Różnica pomiędzy temperaturą, w której badane są ogniwa, a wyznaczoną na podstawie formuł wynosi blisko 40°C . Rysunki 29-36 przedstawiają moc chwilową modułów: REC TwinPeak 265 i LG285NIC-G3 w dniach: 26 stycznia, 21 kwietnia, 19 lipca i 25 października. Ponieważ moce chwilowe obliczone formułami uproszczoną i Homera są bardzo zbliżone, na wykresach widoczne są jedynie wyniki wyznaczone za pomocą formuły Homera i te nie uwzględniające zmian temperatury modułu.



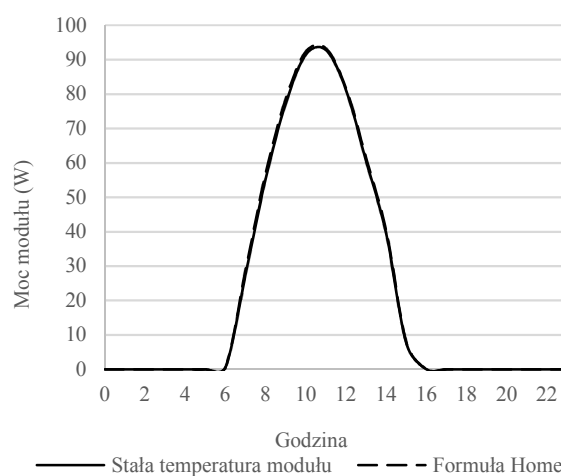
Rys.29. Moc chwilowa modułu fotowoltaicznego REC TwinPeak 265 26 stycznia



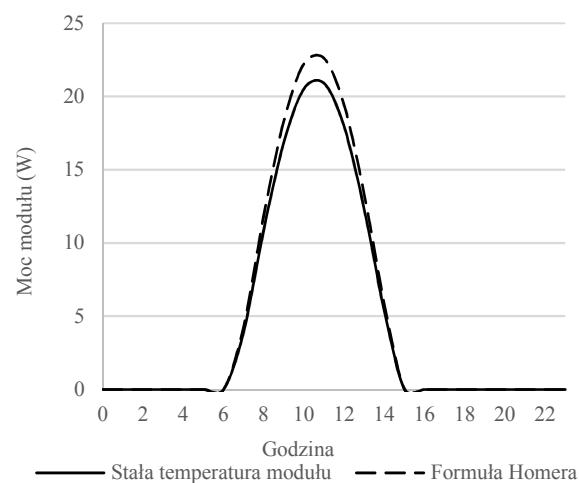
Rys.30. Moc chwilowa modułu fotowoltaicznego REC TwinPeak 265 21 kwietnia



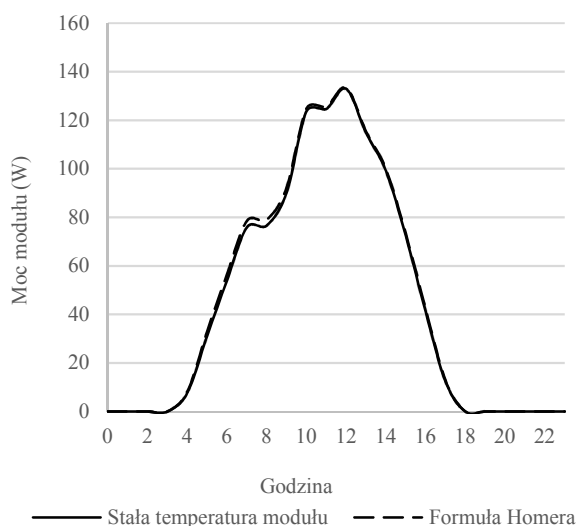
Rys.31. Moc chwilowa modułu fotowoltaicznego REC TwinPeak 265 19 lipca



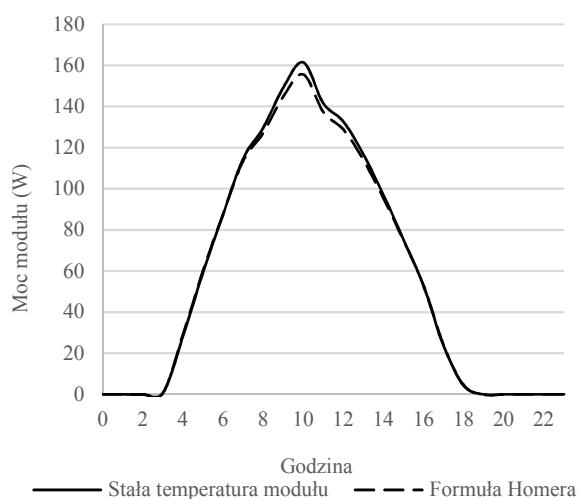
Rys.32. Moc chwilowa modułu fotowoltaicznego REC TwinPeak 265 25 października



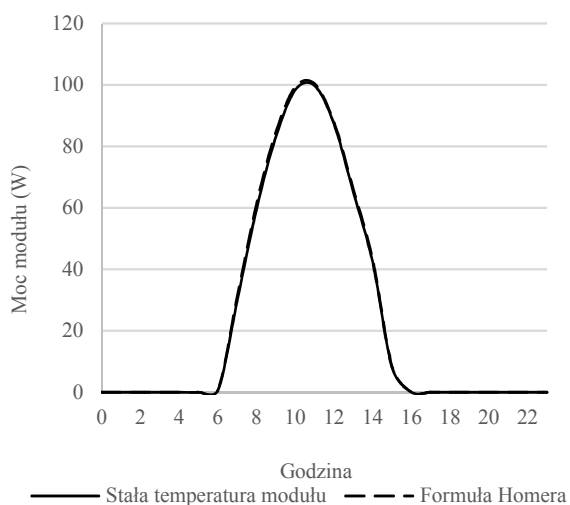
Rys.33. Moc chwilowa modułu fotowoltaicznego LG285NIC-G3 26 stycznia



Rys.34. Moc chwilowa modułu fotowoltaicznego LG285N1C-G3 21 kwietnia



Rys.35. Moc chwilowa modułu fotowoltaicznego LG285N1C-G3 19 lipca



Rys.36. Moc chwilowa modułu fotowoltaicznego LG285N1C-G3 25 października

Jak można zauważyć w okresie letnim, kiedy temperatura otoczenia jest wysoka i występuje duże

natężenie promieniowanie słoneczne moc modułu wyznaczona za pomocą formuły Homera jest niższa od tej wyznaczonej przy stałej temperaturze modułu. W miesiącach przejściowych wyniki obliczeń są bardzo zbliżone. Linie przedstawiające moc chwilową modułów fotowoltaicznych praktycznie się pokrywają. Na wykresach sporządzonych dla 26 stycznia wyraźnie widać, że obliczanie mocy modułów fotowoltaicznych nie uwzględniając zmiany ich temperatur daje zaniżone wartości.

PODSUMOWANIE

Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że całoroczne zyski energetyczne z wybranych modułów fotowoltaicznych wyznaczone trzema przedstawionymi sposobami różnią się nieznacznie. Największą wartość całorocznych zysków energetycznych pochodzących z modułów fotowoltaicznych uzyskać można wykorzystując formułę Homera do wyznaczenia temperatury pracy modułów. Jeżeli przy obliczaniu mocy chwilowej modułu fotowoltaicznego nie uwzględni się zmiany temperatury modułu w czasie, uzyskane wyniki będą bardzo zbliżone. Najniższą wartość całorocznych zysków energetycznych uzyskuje się wykorzystując do obliczeń formułę uproszczoną. Całkowita różnica w wyprodukowanej przez moduły fotowoltaiczne energii elektrycznej wynosi niespełna 1%. Z punktu widzenia właściciela instalacji fotowoltaicznej ważniejsze są wyniki cząstkowe. W miesiącach przejściowych różnice w wyznaczonych zyskach energetycznych są niewielkie, jednak w okresie letnim oraz zimowym rozbieżności są większe. Wyraźnie widać to na wykresach 21-28. Porównując formułę uproszczoną i formułę Homera zauważyć można, że największa procentowa różnica występuje w okresie letnim. W skrajnym przypadku jest to 2% co oznacza, że w przypadku wymiarowania małych instalacji fotowoltaicznych nie ma większego znaczenia która z formuł zostanie zastosowana. Jeżeli do wyznaczenia zysków energetycznych z modułów fotowoltaicznych założona zostanie stała temperatura ich pracy to uzyskane wyniki będą wyraźnie różniły się od obliczeń uwzględniających zmianę ich temperatury. W styczniu i grudniu różnica w wynikach sięga 8,3%. Jeżeli pod uwagę nie weźmie się zmiany temperatury ogniw to miesięczne zyski energetyczne będą zaniżone. W skrajnym przypadku w jednej godzinie wartość zysków energetycznych będzie o 12,5% zaniżona. Wyznaczając zyski energetyczne nie uwzględniając zmian temperatury modułów fotowoltaicznych w okresie letnim mamy do czynienia natomiast z przeszacowaniem zysków energetycznych. W miesiącu lipcu wartość zysków energetycznych obliczona za pomocą formuły Homera będzie o 3,5% niższa od obliczeń nie uwzględniających zmian temperatury. Maksymalna różnica w zyskach godzinnych w lipcu wynosi prawie 11%. Dobierając poszczególne elementy instalacji fotowoltaicznej należy uwzględnić skrajne warunki pracy systemu. Urządzenia tj. inwerter czy regulator ładowania dobiera się do mocy

nominalnej systemu fotowoltaicznego. Jeżeli moduł pracuje przy niskich temperaturach jego moc będzie wyższa niż wynika to z jego charakterystyki napięciowo-prądowej. W przypadku instalacji wielkopowierzchniowych on-grid ilość energii dostarczanej przez producenta może mieć wpływ na działanie lokalnej sieci elektroenergetycznej. Instalacja mająca na celu produkcję określonej ilości energii w okresie letnim może zostać nie dowymiarowana. W obliczeniach posłużono się uśrednionymi danymi meteorycznymi natężenia promieniowania słonecznego oraz temperatury otoczenia. Zastosowanie takich danych sprawia, że nie widoczne stają się skrajne wartości mierzonych wartości. Najwyższa temperatura otoczenia w ciągu całego roku to wg danych umieszczonych na stronie Ministerstwa Inwestycji i Rozwoju 33,2°C, natomiast najniższa to -12,3°C. W rzeczywistości zdarza się, że temperatura otoczenia spada poniżej -12,3°C oraz w okresie letnim jest wyższa niż 33,2°C. Dla takich skrajnych wartości temperatur występują największe różnice w wynikach obliczeń zysków energetycznych. W tych okresach temperatura ma największy wpływ na sprawność modułów fotowoltaicznych. Do dokładnych obliczeń uwzględniających godzinową zmianę temperatury modułów lepszym rozwiązaniem jest zastosowanie danych stochastycznych. Całoroczne zyski energetyczne nie ulegną znaczącej zmianie jednak wyniki dotyczące krótszych okresów takich jak tydzień czy miesiąc mogą różnić się wyraźnie.

LITERATURA:

- Duffie JA., Beckman WA., 1991, *Solar Engineering of Thermal Processes*, Wiley, New York, NY
- Erbs DG., Klein SA., Duffie JA., 1982, *Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily, and monthly-average global radiation*, Solar Energy, 28, 293m
- Fesharaki V., Jafari, Majid Dehghani, J. Jafari Fesharaki, 2011, *The Effect of Temperature on Photovoltaic Cell Efficiency*, Proceedings of the 1st International Conference on Emerging Trends in Energy Conservation – ETEC Tehran, Tehran, Iran
- Graham VA., Hollands KGT., 1990, *A method to generate synthetic hourly solar radiation globally*, Solar Energy, 44 (6), 333-341
- Graham VA., Hollands KGT., Unny TE., 1988, *A time series model for Kt with application to global synthetic weather generation*, Solar Energy, 40 (2), 83-92
- Luque A., Hegedus S., 2003, *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England, pp. 296-297
- Matuszczyk P., Popławski T., Flaszka J., 2015, *Wpływ natężenia promieniowania słonecznego i temperatury modułu na wybrane parametry i moc znamionową paneli fotowoltaicznych*, Przegląd elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 91 Nr 12
- Mazur M., Partyka J., Marcewicz T., 2016, *Wpływ temperatury na sprawność baterii słonecznych*, Przegląd elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, r. 92 nr 8
- Radziemska, E., 2003, *The effect of temperature on the power drop in crystalline silicon solar cells*, Renewable Energy 28, 1–12
- Szymański B., 2013, *Małe instalacje fotowoltaiczne*, Globenergia, Kraków
- Wacławek M., Rodziewicz T., 2011, *Ogniwa słoneczne - wpływ środowiska naturalnego na ich pracę*, WNT, 123-158
- www.homerenergy.com/products/pro/docs/3.11/how_homer_calculates_the_pv_cell_temperature.html
- www.recgroup.com/sites/default/files/documents/ds_rec_twinpeak_series_rev_i_eng.pdf
- www.lg.com/us/commercial/documents/MonoX-Neon-LG285N1C-20130214.pdf
- www.mii.gov.pl