

Wpływ natężenia promieniowania słonecznego i temperatury modułu na wybrane parametry i moc znamionową paneli fotowoltaicznych

Streszczenie. Temperatura modułu fotowoltaicznego PV jest w głównej mierze zdeterminowana przez wartość natężenia promieniowania słonecznego, temperatury otoczenia, prędkości i kierunku wiatru jako czynnika chłodzącego oraz przez właściwości techniczne uwzględniające parametry materiałowe modułu. Zagadnienia związane z temperaturą i mechanizmem transportu ciepła w instalacjach fotowoltaicznych są bardzo istotne z punktu widzenia otrzymywanych parametrów elektrycznych tych instalacji.

Abstract. PV module temperature is mainly determined by the value of solar radiation, ambient temperature, wind speed and direction as the coolant, and by taking into account the technical characteristics of the material parameters of the module. Issues related to the temperature and heat transport mechanism in photovoltaic installations are very important from the point of view received electrical parameters of these installations. *(The influence of solar radiation and temperature module on selected parameters and the power rating of photovoltaic panels).*

Słowa kluczowe: temperatura modułu PV, współczynniki temperaturowe, moc nominalna, moc znamionowa.

Keywords: PV module temperature, temperature coefficients, power nominal, power rating.

Wstęp

W rzeczywistych warunkach pracy panele fotowoltaiczne pracują w szerokim spektrum temperaturowym, jest to związane z dużą zmiennością temperatury otoczenia (praca w różnych porach roku), wydajności chłodzenia oraz chwilową wartością natężenia promieniowania słonecznego. W polskich warunkach klimatycznych zakłada się, że temperatura pracy ogniw fotowoltaicznych oscyluje w granicach: $-20^{\circ}\text{C} \div +70^{\circ}\text{C}$.

Wraz ze wzrostem temperatury modułu fotowoltaicznego ulegają zmianie jego właściwości fizyczne struktury materiałowej:

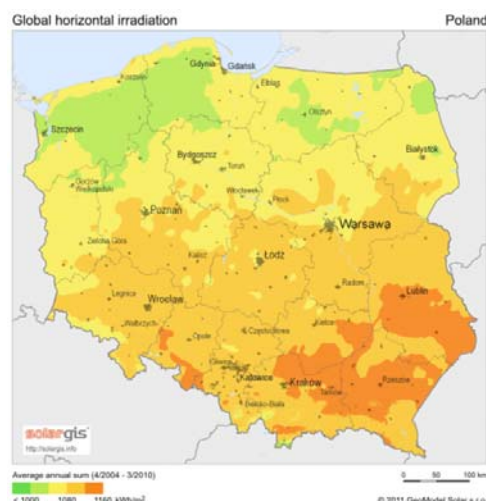
- maleje napięcie złącza p-n, co powoduje zmiany w zdolności separacji nośników ładunku elektrycznego;
- zmniejsza się szerokość przerwy energetycznej, co powoduje zmniejszenie napięcia wyjściowego ogniwa i modułu fotowoltaicznego;
- rośnie potencjał elektrokinetyczny;
- rośnie rozpraszanie nośników ładunku elektrycznego na fononach sieci krystalicznej, co prowadzi do zmniejszenia się ich ruchliwości.

Warunki nasłonecznienia w Polsce

Natężenie promieniowania słonecznego stanowi chwilową wartość mocy promieniowania słonecznego padającego w ciągu jednej sekundy na powierzchnię jednego metra kwadratowego, prostopadłą do kierunku padania promieni. Jednostką natężenia promieniowania słonecznego jest $[\text{W}/\text{m}^2]$ lub $[\text{kW}/\text{m}^2]$. Do atmosfery Ziemi dociera ze Słońca strumień energii o mocy ok. $1366 \text{ W}/\text{m}^2$, który jest nazywany stałą słoneczną. Energia ta częściowo odbija się od atmosfery i jest rozpraszana zanim dotrze do powierzchni Ziemi. Natężenie promieniowania słonecznego docierające do powierzchni Ziemi – Polski, zawiera się w przedziale $100 - 1000 \text{ W}/\text{m}^2$ w ciągu dnia. Wartość maksymalna nie odzwierciedla w żaden sposób możliwości uzysku energii w skali roku, ponieważ jest tylko wartością chwilową natężenia promieniowania słonecznego.

Wartością najbardziej przydatną podczas szacowania uzysku energii jest nasłonecznienie. Jest to suma natężenia promieniowania słonecznego w danym czasie dla danej powierzchni (np. suma natężenia promieniowania słonecznego w czasie godziny, dnia lub roku na powierzchni 1 m^2). Nasłonecznienie jest wielkością

opisującą ilość energii słonecznej przypadającej na powierzchnię w danym okresie czasu. Nasłonecznienie najczęściej wyrażane jest w kWh/m^2 na rok. Dla Polski zawiera się w przedziale od $1050 - 1150 \text{ kWh}/\text{m}^2/\text{rok}$.



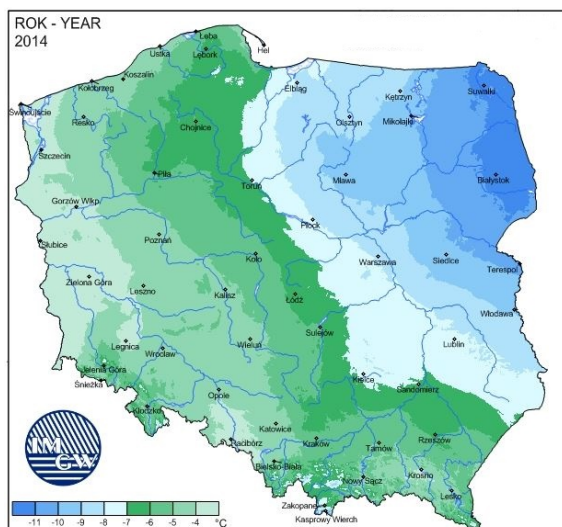
Rys.1. Nasłonecznienie w Polsce [24]

Warunki temperaturowe w Polsce

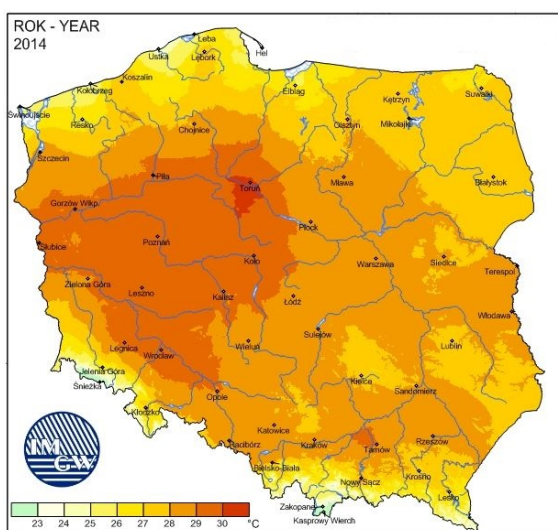
Wzrost natężenia promieniowania słonecznego implikuje wzrost temperatury otoczenia, która znacząco wpływa na parametry pracy modułów fotowoltaicznych. Średnia temperatura w warunkach Polski waha się w zależności od lokalizacji od ok. 6°C - obszar wschodni do ok. 12°C w przypadku zachodniej części kraju.

Warunki w jakich badane są panele fotowoltaiczne

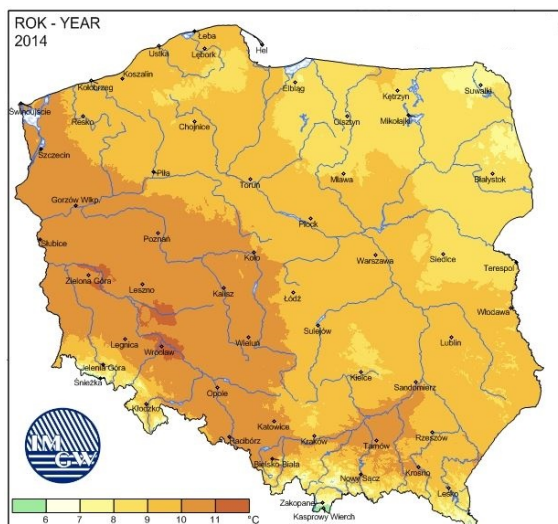
Przy dobieraniu mocy instalacji fotowoltaicznej należy uwzględnić parametr mocy nominalnej oznaczanej w $[\text{Wp}]$ (ang. *Watt peak*). Jest to maksymalna moc panelu fotowoltaicznego wyznaczona w pewnych ściśle określonych warunkach, nazywanych STC (ang. *Standard Test Conditions*). Warunki STC, przy których wyznaczana jest moc paneli fotowoltaicznych, nie uwzględniają wielu czynników rzeczywistych, co w konsekwencji zmierza do zmiany warunków pracy paneli PV, które wówczas będą pracowały w innych niż standardowe - przełoży się to na wygenerowanie niższej mocy, [12].



Rys.2. Temperatura minimalna w roku 2014 dla Polski (5%) [19]



Rys.3. Temperatura maksymalna w roku 2014 dla Polski (95%) [19]



Rys.4. Temperatura średnia w roku 2014 dla Polski [19]

Główną przyczyną tego stanu będzie niższe niż w warunkach STC natężenie promieniowania słonecznego, które w słoneczny dzień, w Polsce w większości przypadków nie przekracza 1000W/m² oraz wyższa niż 25°C temperatura oświetlanego panelu. Projektując

instalację fotowoltaiczną należy uwzględnić zależność, że wraz ze wzrostem temperatury spada moc nominalna panelu fotowoltaicznego.

W praktyce idealne warunki praktycznie nie występują. Dlatego wprowadzono drugi standard NOCT (ang. *Nominal Operating Cell Temperature*). Warunki nominalnej temperatury pracy ogniwa wg. NOCT:

- promieniowanie słoneczne 800W/m²;
- temperatura powietrza 20°C;
- prędkość wiatru 1 m/s.

Standard ten odzwierciedla w większym stopniu warunki w jakich faktycznie będą pracowały moduły fotowoltaiczne oraz parametry jakie będą osiągały. Przy porównaniu różnych modułów fotowoltaicznych bardziej wiarygodne są parametry podawane przez producentów dla standardu NOCT niż dla standardu STC.

Tabela 1. Porównanie różnych standardów w odniesieniu do mocy natężenia promieniowania słonecznego

Standard	Natężenie promieniowania [W/m ²]	Temperatura [°C]
STC	1000	25 (ogniwa)
NOCT	800	20 (otoczenia)
LIC Niski stan natężenia oświetlenia	200	25 (ogniwa)
HTC Wysoki stan temperatury	1000	75 (ogniwa)
LTC Niski stan temperatury	500	15 (ogniwa)

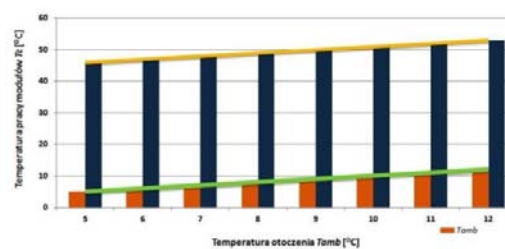
Wpływ natężenia promieniowania słonecznego oraz temperatury otoczenia na temperaturę znamionową pracy modułów fotowoltaicznych – NOCT

W module fotowoltaicznym rzeczywista temperatura ogniwa T_c uzależniona jest od właściwości materiałowych użytego półprzewodnika, jakości i konfiguracji hermetycznej modułu oraz od otaczającego środowiska i warunków pogodowych. Znamionowa temperatura pracy ogniw słonecznych – NOCT, określa wpływ wszystkich czynników na temperaturę pracy ogniw w budowie modułu – dostarcza wszystkich niezbędnych informacji o właściwościach termicznych użytych modułów w projektowanym systemie fotowoltaicznym.

Temperaturę pracujących modułów przedstawia zależność (1):

$$(1) \quad T_c = T_{amb} + G_0 \cdot \frac{NOCT - 20}{800}$$

gdzie: T_{amb} – temperatura otoczenia [°C], G_0 – globalna wartość natężenia promieniowania słonecznego [1366W/m²], NOCT – wartość od 42°C do 46°C.



Rys.5. Wpływ średniej temperatury otoczenia na temperaturę pracy modułów fotowoltaicznych – w roku 2014 dla Polski [oprac. własne]

Wartość NOCT dla modułów dostępnych na rynku waha się w przedziale od 42°C do 46°C, przy braku informacji o tym współczynniku do obliczeń numerycznych przyjmuje się wartość średniej arytmetycznej 44°C.

Wpływ temperatury otoczenia, temperatury modułu oraz natężenia promieniowania słonecznego na wybrane parametry paneli fotowoltaicznych

Temperatura pracy paneli fotowoltaicznych jest silnie uzależniona od warunków atmosferycznych: natężenia promieniowania słonecznego ($R^2=0,64$), temperatury powietrza ($R^2=0,35$), natomiast korelacja z prędkością i kierunkiem wiatru jest stosunkowo mała ($R^2=0,003$), przy czym R^2 – kwadrat współczynnika korelacji (współczynnik determinacji). Wpływ czynników atmosferycznych na wartość temperatury złącza opisuje zależność empiryczna (2):

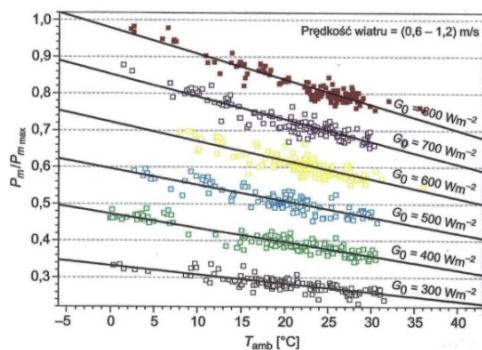
$$(2) \quad T_C = A + B \cdot (G_0 - 300) + C \cdot (T_{amb} - 25)$$

gdzie: A , B , C – współczynniki krzywej regresji wyznaczone statystycznie na poziomie ufności $\alpha = 0,95$.

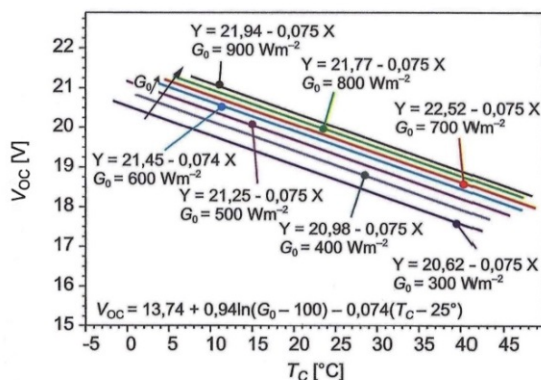
Wpływ natężenia promieniowania Słońca i temperatury na parametry modułów fotowoltaicznych jest bardzo duży, jest określany przez współczynniki temperaturowe takie jak: napięcie obwodu otwartego - V_{OC} , prąd zwarcia - I_{SC} , sprawność - η , maksymalna moc - P_{max} oraz przez współczynnik wypełnienia charakterystyki FF (ang. *Fill Factor*). Korzystając z w/w współczynników można odpowiednio korygować parametry testowanych modułów PV, uwzględniając zmiany natężenia promieniowania słonecznego oraz zmiany temperatury złącza T_C .

Z poniższego rysunku wynika, że istnieje silna zależność pomiędzy napięciem obwodu otwartego a temperaturą pracy ogniwa ($R^2=0,991$), która umożliwia wyznaczenie temperatury absorbera ogniwa/modułu według zależności (3):

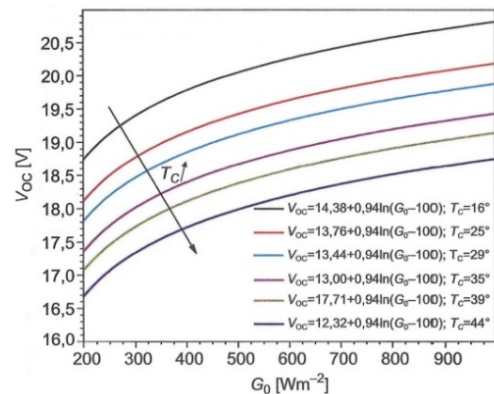
$$(3) \quad T_C = 25 + \frac{V_{OC} - A - B \cdot \ln(G_0 - 100)}{C}$$



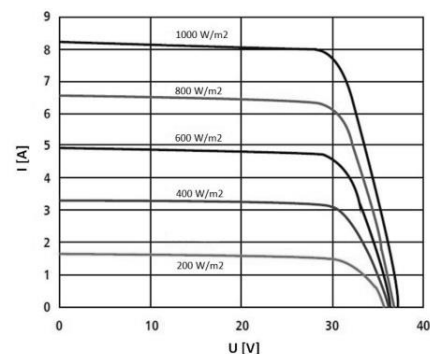
Rys.6. Wpływ temperatury otoczenia na znormalizowaną moc maksymalną modułu z krzemu monokrystalicznego [11]



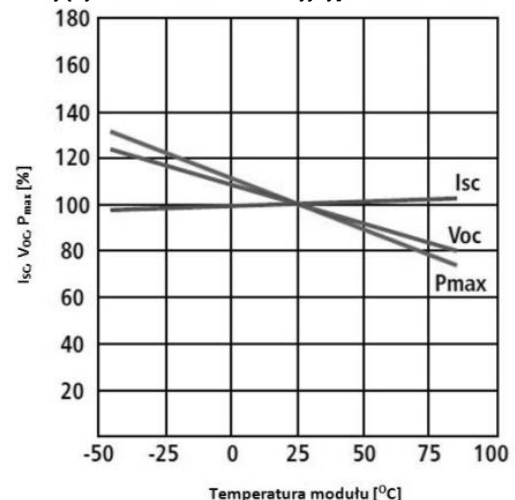
Rys.7. Wpływ temperatury pracy ogniwa na napięcie obwodu otwartego modułu z krzemu monokrystalicznego [11]



Rys.8. Wpływ natężenia promieniowania słonecznego na napięcie obwodu otwartego V_{OC} modułu z krzemu monokrystalicznego [11]



Rys.9. Charakterystyka prądowo-napięciowa panelu fotowoltaicznego w warunkach STC [oprac. własne, wartości liczbowe mają tylko charakter orientacyjny]



Rys.10. Krzywe: prądu zwarcia - I_{SC} , napięcia obwodu otwartego V_{OC} i mocy maksymalnej P_{max} przy różnej wartości temperatury [oprac. własne, wartości liczbowe mają tylko charakter orientacyjny]

Rzeczywista temperatura pracy modułów PV w różnych warunkach pracy

Temperatura pracy modułów PV oprócz silnej zależności od warunków atmosferycznych jest również uzależniona od konstrukcji modułów. Wpływ konstrukcji określany jest poprzez wartość znamionowej temperatury pracy ogniwa w module PV, [13]. Biorąc pod uwagę powyższy parametr obliczono z zależności (1) temperaturę pracy ogniwa zamkniętych - T_C , w konstrukcjach modułów dla poszczególnych dni wg normy IEC 61853 – tabela 2. Do obliczeń przyjęto średnią wartość współczynnika $NOCT = 42^{\circ}C$. Wartość kąta padania słonecznego bezpośredniej promieniowania Słońca do

normalnej do powierzchni horyzontu o godzinie 12.00 oznaczono symbolem - AOI (ang. *Angle of Incidence*).

Tabela 2. Ogólna charakterystyka różnych typów dni w kontekście temperatur: T_c i T_{amb} , według standardu IEC 61853

Typ dnia	Wschód/ Zachód	Godzina	T_{amb} [°C]	G_o [W/m²]	NOCT	T_c [°C]	AOI
HIHT	5.00/ 19.00	12.00	45	1100	42	75	27,6
MIHT	5.00/ 19.00	12.00	30	450	42	42	27,7
HILT	6.00/ 18.00	12.00	1	1032	42	29	19,0
LILT	7.00/ 17.00	12.00	0	260	42	7	24,2
MIMT	6.00/ 19.00	12.00	14	350	42	24	18,1

HIHT (ang. *high irradiance, high temperature*)

MIHT (ang. *medium irradiance, high temperature*)

HILT (ang. *high irradiance, low temperature*)

LILT (ang. *low irradiance, low temperature*)

MIMT (ang. *medium irradiance, mean temperature*)

Podsumowanie

Aktualne prognozy wskazują, że w rozrachunku globalnym w roku 2020 całkowita moc instalacji PV wyniesie ok. 29GW i będzie zaspokajać aż 7% ogólnego światowego zapotrzebowania na energię elektryczną. Dla tego samego czasu prognozy wskazują, iż energia elektryczna, wyprodukowana w elektrowniach jądrowych, będzie stanowiła zaledwie 1% zużywanej energii. Trend ten, według prognoz, przyniesie do roku 2030, 6500 Mt₁₅ redukcji emisji CO₂, [8]. Fotowoltaika jest jednym z najszybciej rozwijających się sektorów energii odnawialnych i najdynamiczniej rozwijającym się sektorem gospodarki obok informatyki i biotechnologii, [8]. Można więc postawić tezę, że przemysł PV wchodzi dopiero na rynek i wciąż boryka się z szeregiem problemów – np. ustawą prosumencką w Polsce. W związku z tym, w najbliższym czasie, obok szukania sposobów zminimalizowania wpływu wzrastającej temperatury podczas pracy ogniwa na jego sprawność, poprzez poprawienie sprawności linii przesyłu energii i składowania jej nadmiaru, zespoły naukowe będą poszukiwać metod udoskonalenia sprawności systemów PV. Dopiero w dalszym etapie technolodzy sięgną po zmianę materiału do produkcji ogniwa PV z Si na ogniwa wykonane ze stopu indu, galu, miedzi, selenu lub innych dostępnych materiałów, jak również technologii nanoszenia opartej o nanotechnologię.

LITERATURA

- [1] Chmielniak T., *Technologie energetyczne*, (2008), 437-452
- [2] Góralczyk I., Tytko R., *Fotowoltaika - Urządzenia, instalacje fotowoltaiczne i elektryczne*, (2015), 191-273
- [3] Jastrzebska G., *Odnawialne źródła energii i pojazdy proekologiczne*, (2007), 73-91
- [4] Jastrzebska G., *Ogniwa słoneczne, budowa, technologie i zastosowanie*, (2013), 25-57
- [5] Klugman-Radziemska W., *Odnawialne źródła energii. Przykłady obliczeniowe*, (2009), 21-24, 78-79
- [6] Lewandowski W. M., *Proekologiczne odnawialne źródła energii*, (2007), 147-168
- [7] Miszczak M., Waszkiewicz C., *Energia Słońca, wiatru i inne*, (1988), 9-15
- [8] Pietruszko S.M., Światowy rynek fotowoltaiki, Centrum Fotowoltaniki Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2009; http://ptes-ises.itc.pw.edu.pl/Swiatowy_rynek_fotowoltaiki_Pietruszko.pdf
- [9] Pluta Z., *Podstawy teoretyczne fototermicznej konwersji energii słonecznej*, (2013), 13-48, 61-67
- [10] Sarniak M. T., *Podstawy fotowoltaiki*, (2008), 9-27
- [11] Wacławek M., Rodziewicz T., *Ogniwa słoneczne - wpływ środowiska naturalnego na ich pracę*, (2011), 123-158
- [12] Korzeniewska E., Drzymała A., *Elektrownie fotowoltaiczne - aspekty techniczne i ekonomiczne*, Przegląd Elektrotechniczny, 2013, R. 89, nr 12, 324-327
- [13] Pawlak R., Kawczyński R., Korzeniewska E., Lebiada M., Rosowski A., Rymaszewski J., Sibiński M., Tomczyk M., Walczak M., *Ogniwa fotowoltaiczne o niekonwencjonalnych kształtach*, Przegląd Elektrotechniczny, 2013, R. 89, nr 7, 288-292
- [14] <http://czysty-zysk.pl/nasloniecznienie>
- [15] http://www.energisol.pl/energia_slonca.html
- [16] <http://www.enis-pv.com/nasloniecznienie-w-polsce.html>
- [17] <http://www.globenergia.pl>
- [18] <http://heliospower.pl/panele-fotowoltaiczne/charakterystyka-modulow>
- [19] <http://www.imgw.pl/klimat>
- [20] <http://ioze.pl/energetyka-sloneczna/zasoby-energii-slonecznej-w-polsce>
- [21] <http://www.koniec-swiata.org>
- [22] http://pl.wikipedia.org/wiki/Stała_sloneczna
- [23] http://pl.wikipedia.org/wiki/Promieniowanie_elektromagnetyczne
- [24] <http://solargis.info>

Autorzy: mgr inż. Paweł Matuszczyk, Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, Al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: pawelmatuszczyk@windowslive.com; dr hab. inż. Tomasz Popławski Prof. PCz, Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, Al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: popptom@el.pcz.czest.pl; dr inż. Janusz Flaszka, Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, Al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: januszflasza@o2.pl.