

UPROSZCZONY MODEL WYMIANY ENERGII W MODULE PV Z WYMUSZONYM CHŁODZENIEM POWIETRZEM

A. Opiela, Z. Zapalowicz

Katedra Techniki Ciepłej, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Szczecin, Polska

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono bilans energii i opisano uproszczony model matematyczny modułu PV z kanałem chłodzącym powstałym przez zabudowanie przestrzeni pomiędzy nim a ścianą budynku. Model ten zakłada, że tylna ścianka modułu jest chłodzona strumieniem powietrza o niższej temperaturze niż temperatura panująca za panelem fotowoltaicznym. Proces chłodzenia stosuje się tylko w okresie letnim pracy modułu PV. W tym właśnie czasie pojawia się problem zbyt wysokiej temperatury pracy modułu PV, która powoduje obniżenie sprawności konwersji energii promieniowania słonecznego na energię elektryczną. W dalszych badaniach przewiduje się wykorzystanie opracowanego modelu do oceny poprawy sprawności pracy modułu PV i oszacowania przyrostu wyprodukowanej energii elektrycznej w warunkach klimatycznych naszego kraju.

WPROWADZENIE

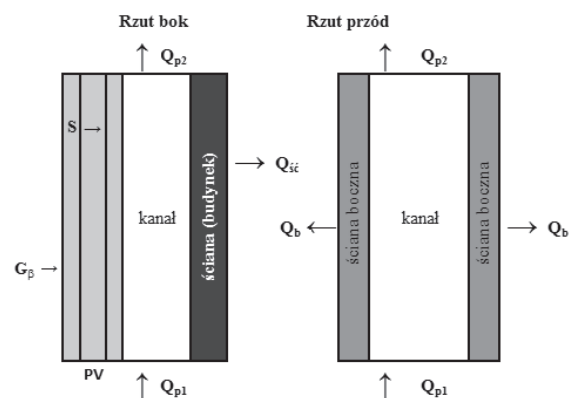
W praktyce coraz częściej i chętniej wykorzystuje się odnawialne źródła energii (Klugmann-Radziemska, 2009). Wraz ze zwiększeniem się zainteresowania ich stosowaniem zwiększają się wymagania dotyczące sprawności, oczywiście przy równoczesnej stabilności cen lub nawet zmniejszaniu się kosztów zakupów takich urządzeń. Producenci urządzeń dążą, aby sposoby poprawy sprawności nie powodowały zbytniego wzrostu ponoszonych nakładów finansowych. W przypadku, gdy koszty takie wystąpią, muszą być one skompensowane, aby inwestycja była opłacalna. W związku z tym producenci urządzeń starają się wyeliminować czynniki, które negatywnie wpływają na pracę danych urządzeń. Oczywiście nie wszystkie czynniki mogą być wyeliminowane lub ich negatywne oddziaływanie zmniejszone. W przypadku instalacji PV niemożliwe jest wpłynięcie na stopień nasłonecznienia modułu, który zależy od warunków klimatycznych panujących w miejscu posadowienia instalacji. Natomiast możliwe jest oddziaływanie na temperaturę pracy modułu poprzez chłodzenie jego tylnej ścianki (Klugmann-Radziemska, 2010). Chłodzenie to można zrealizować na kilka sposobów np. chłodzenie powietrzem, chłodzenie cieczą, zastosowanie materiałów typu PCM etc. (Hasan, 2010). Należy jednak pamiętać, że proces chłodzenia musi być realizowany przy jak najmniejszym zużyciu energii. Duża konsumpcja ener-

gii lub skomplikowany system chłodzenia może spowodować, że przedsięwzięcie to będzie nieopłacalne. W literaturze przedmiotu można znaleźć informacje dotyczące tego problemu (Krauter, 2004). Jednak nie zawsze podane w literaturze zależności można bezpośrednio wykorzystać do oceny zmiany mocy modułu fotowoltaicznego.

Celem niniejszej pracy jest sformułowanie uproszczonego modelu wymiany energii w module PV, którego tylna ścianka jest chłodzona wymuszonym przepływem strumienia powietrza. Model ten zostanie wykorzystany do oszacowania chwilowej mocy modułu wskutek zmiany temperatury jego tylnej ścianki.

UPROSZCZONY MODEL

W niniejszej pracy rozpatrywany będzie moduł fotowoltaiczny umieszczony pionowo na zewnętrznej powierzchni ściany budynku. Moduł zamocowano w pewnej ustalonej odległości od ścianki budynku tak, by powstała przestrzeń, przez którą możliwy jest swobodny lub wymuszony przepływ powietrza (rys.1). Boczne powierzchnie tej przestrzeni zamknięto i zaizolowano. W ten sposób utworzono kanał umożliwiający ruch powietrza z dołu do góry.



Rys.1. Schemat modułu PV z kanałem chłodzącym

Moc wytworzona w module fotowoltaicznym zależy od wielu parametrów m. in. od natężenia promieniowania słonecznego, temperatury i obciążenia elektrycznego modułu. Parametry te są funkcjami czasu. W dal-

szych rozważaniach przyjęto, że w określonym, krótkim przedziale czasowym parametry rozpatrywanego układu są niezmiennie, a więc układ znajduje się w stanie ustalonym.

Jak już stwierdzono wcześniej, jednym z istotnych parametrów jest temperatura modułu fotowoltaicznego. Zwykle wpływ temperatury modułu jest określany za pomocą współczynnika zmiany mocy w stosunku do mocy nominalnej określonej w warunkach standardowych (STC), tj. współczynnika B wyrażonego w procentach na stopień. Zatem moc modułu w zależności od jego temperatury można wyznaczyć z zależności:

$$N_{el} = N_{el}^n \left[1 - \frac{B}{100} (t_{PV} - 20) \right] \quad (1)$$

We wzorze (1) przyjęto, że temperatura modułu jest równa temperaturze jego tylnej ścianki, tj. $t_{PV} = t_{PV}^t$.

Z kolei temperatura tylnej ścianki modułu zależy od procesu wnikania ciepła od modułu PV do przestrzeni tworzącej kanał. Strumień ciepła wnikający do kanału powietrznego za modułem PV wyraża wzór:

$$\dot{Q}_{PV}^k = \alpha_{PV-k} \cdot A_{PV}^t \cdot (t_{PV}^t - t_k) \quad (2)$$

Stąd:

$$t_{PV} = \frac{\dot{Q}_{PV}^k}{\alpha_{PV-k} A_{PV}^t} + t_k \quad (3)$$

Z drugiej strony, strumień ciepła można wyznaczyć z bilansu energii dla zasadniczej części modułu tj. podłoża z ogniwami PV:

$$S = N_{el} + \dot{Q}_{PV}^k + \dot{Q}_{PV}^{sm} \quad (4)$$

lub

$$1 = \xi_{el} + \xi_{PV}^k + \xi_{PV}^{sm} \quad (5)$$

Zakładając, że straty energii do otoczenia z zasadniczej części modułu są znikomo małe, tj. $\xi_{PV}^{sm} = 0$, wtedy:

$$1 = \xi_{el} + \xi_{PV}^k \quad (6)$$

Stąd:

$$\dot{Q}_{PV}^k = \xi_{PV}^k \cdot S \quad (7)$$

Występujący we wzorze (7) współczynnik ξ_{PV}^k , określający udział strumienia ciepła przekazanego do kanału chłodzącego w stosunku do strumienia energii doprowadzonej, należy wstępnie założyć. Z kolei strumień energii docierający do modułu zależy od rodzaju osłony oraz absorpcji promieniowania przez powierzchnię „roboczą” modułu. Zakładając, że znany

jest współczynnik transmisyjno-absorpcyjny ($\tau\alpha$) można obliczyć strumień ciepła zaabsorbowany przez podłoża z ogniwami PV:

$$S = (\tau\alpha) \cdot G_{\beta} \quad (8)$$

W celu wyznaczenia średniej temperatury powietrza w kanale najpierw sporządzono bilans energii dla kanału chłodzącego moduł:

$$\dot{Q}_{PV}^k + \dot{Q}_{p1} = \dot{Q}_{p2} + \dot{Q}_b + \dot{Q}_{\dot{\xi}\dot{\xi}} \quad (9)$$

a następnie określono poszczególne strumienie ciepła występujące w równaniu (9).

Strumień ciepła przenikający z pomieszczenia przez ścianę budynku, na której osadzono moduł można obliczyć z zależności:

$$\dot{Q}_{\dot{\xi}\dot{\xi}} = k_{\dot{\xi}\dot{\xi}} \cdot A_{\dot{\xi}\dot{\xi}} \cdot (t_k - t_m) \quad (10)$$

Strumień ciepła przenikający przez ścianki boczne kanału można wyznaczyć ze wzoru:

$$\dot{Q}_b = 2 \cdot k_b \cdot A_b \cdot (t_k - t_{ot}) \quad (11)$$

Strumień ciepła doprowadzonego z powietrzem chłodzącym określa wzór:

$$\dot{Q}_{p1} = \dot{m}_{p2} \cdot c_{p1} \cdot t_{p1} \quad (12)$$

Natomiast strumień ciepła odprowadzonego z powietrzem chłodzącym wyraża zależność:

$$\dot{Q}_{p2} = \dot{m}_{p2} \cdot c_{p2} \cdot t_{p2} \quad (13)$$

Ponadto przyjęto założenia, że temperatura powietrza w kanale jest średnią arytmetyczną temperatur powietrza na wlocie i wylocie:

$$t_k = \frac{t_{p1} + t_{p2}}{2} \quad (14)$$

oraz

$$k_b = k_{\dot{\xi}\dot{\xi}} \quad (15)$$

$$c_{p1} = c_{p2} \quad (16)$$

$$\dot{m}_{p1} = \dot{m}_{p2} \quad (17)$$

Strumienie powietrza na wlocie i wylocie można obliczyć ze wzorów:

$$\dot{m}_{p1} = w_{p1} \cdot A_k \cdot \rho_{p1} \quad (18)$$

$$\dot{m}_{p2} = w_{p2} \cdot A_k \cdot \rho_{p2} \quad (19)$$

Po uwzględnieniu w równaniu (9) wzoru (7) i zależności (10) ÷ (19), otrzymano:

$$\begin{aligned} \xi_{PV}^k \cdot S + w_{p1} \cdot A_k \cdot \rho_{p1} \cdot c_{p1} \cdot t_{p1} &= \\ = w_{p2} \cdot A_k \cdot \rho_{p2} \cdot c_{p2} \cdot t_{p2} + & \\ + k_b \cdot A_b \cdot (t_{p1} + t_{p2} - 2 \cdot t_{ot}) + & \\ + k_{śc} \cdot A_{śc} \cdot \left(\frac{t_{p1}}{2} + \frac{t_{p2}}{2} - t_m \right) & \end{aligned} \quad (20)$$

Z równania (20) można wyznaczyć temperaturę powietrza na wylocie z kanału t_{p2} , a następnie ze wzoru (14) średnią temperaturę powietrza w kanale.

Aby wyznaczyć temperaturę tylnej ścianki modułu PV należy wcześniej, ze wzoru (3), określić współczynnik wnikania ciepła α_{PV-k} .

Po wyznaczeniu z równania (3) temperatury tylnej ścianki modułu PV można ze wzoru (1) obliczyć chwilową moc modułu.

Następnie należy określić współczynnik:

$$\xi_{el} = \frac{N_{el}}{S} \quad (21)$$

i ze wzoru (6) obliczyć:

$$\xi_{PV}^k = 1 - \xi_{el} \quad (22)$$

Jeśli wartość ta różni się będzie od początkowo założonej wartości tego współczynnika to należy zastosować metodę iteracyjną jego poszukiwania.

PRZYKŁAD OBLICZENIOWY

Algorytm obliczeń przedstawia rys. 2. Przykładowe obliczenia wykonano dla jednego wybranego zestawu danych.

Do obliczeń przyjęto, że ściana budynku przeznaczonego pod montaż modułu jest wykonana z materiałów budowlanych, dzięki którym średnia wartość współczynnika przenikania ciepła ściany wynosi $k_{śc} = 0,3 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Wartość tą przyjęto na podstawie obowiązujących przepisów budowlanych dotyczących izolacji cieplnej budynków mieszkalnych. (Dz. U., 2008). Temperatura panująca wewnątrz budynku wynosi $t_m = 20^\circ\text{C}$. Pole powierzchni ściany budynku, przez którą odbywa się wymiana ciepła jest równe polu powierzchni modułu umieszczonego na niej.

Ściany boczne kanału wykonano z materiałów budowlanych w taki sposób, aby średni współczynnik przenikania ciepła był taki sam jak dla ściany budynku i wynosił $k_b = 0,3 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

Pole powierzchni ściany bocznej kanału zależy od odległości tylnej ścianki modułu od ściany budynku. W rozpatrywanym przykładzie obliczeniowym przyjęto, że odległość ta wynosi 0,1 m. W związku z tym pole to jest równe $A_b = 0,167 \text{ m}^2$.

Obliczenia wykonano dla modułu PV typu SV60P-235 firmy Selfa Photovoltaics (www.selfa.pl). Charakterystyczne parametry analizowanego modułu PV podano w tab. 1. Wymiary zewnętrzne rozpatrywanego modułu są równe odpowiednio: wysokość 1,672 m, szerokość 0,985 m, grubość 0,045 m. Stąd pole powierzchni modułu brutto, równe polu powierzchni ściany budynku, wynosi $A_{śc} = 1,647 \text{ m}^2$.

Obliczenia wykonano dla temperatury otoczenia równej $t_{ot} = 25^\circ\text{C}$. Temperatura o takiej wartości panuje zazwyczaj w okresie letnim na terenie naszego kraju.

Moduł PV jest chłodzony powietrzem, którego temperatura na wlocie jest równa -10°C . Parametry fizyczne powietrza wlotowego (Nowak, 1993) określone dla tej temperatury wynoszą odpowiednio:

- gęstość $\rho_{p1} = 1,206 \text{ kg}/\text{m}^3$,
- ciepło właściwe: $c_{p1} = 1010 \text{ J}/(\text{kg K})$.

Tab. 1. Charakterystyczne parametry techniczne modułu typu SV60P-235

Specyfikacja techniczna SV60P		
Typ modułu		SV60P-235
Moc maksymalna (+3%; -0%)	$P_{\max}[\text{W}]$	235
Napięcie obwodu otwartego	$V_{oc}[\text{V}]$	37,3
Napięcie mocy maksymalnej	$V_{mpp}[\text{V}]$	30,2
Prąd zwarcia	$I_{sc}[\text{A}]$	8,35
Natężenie prądu mocy maksymalnej	$I_{mpp}[\text{A}]$	7,8
Współczynnik wypełnienia	[%]	75,5
Sprawność	[%]	14,4
Masa całkowita	[kg]	19,5

Powietrze jest transportowane w kanale, którego pole przekroju wynosi $A_k = 0,0985 \text{ m}^2$. Założono, że przepływ ten odbywa się z prędkością powietrza na wlocie równą $w_{p1} = 2 \text{ m/s}$.

Dla podanych wartości parametrów strumień masy powietrza na wlocie do kanału wynosi $\dot{m}_{p1} = 0,2376 \text{ kg/s}$.

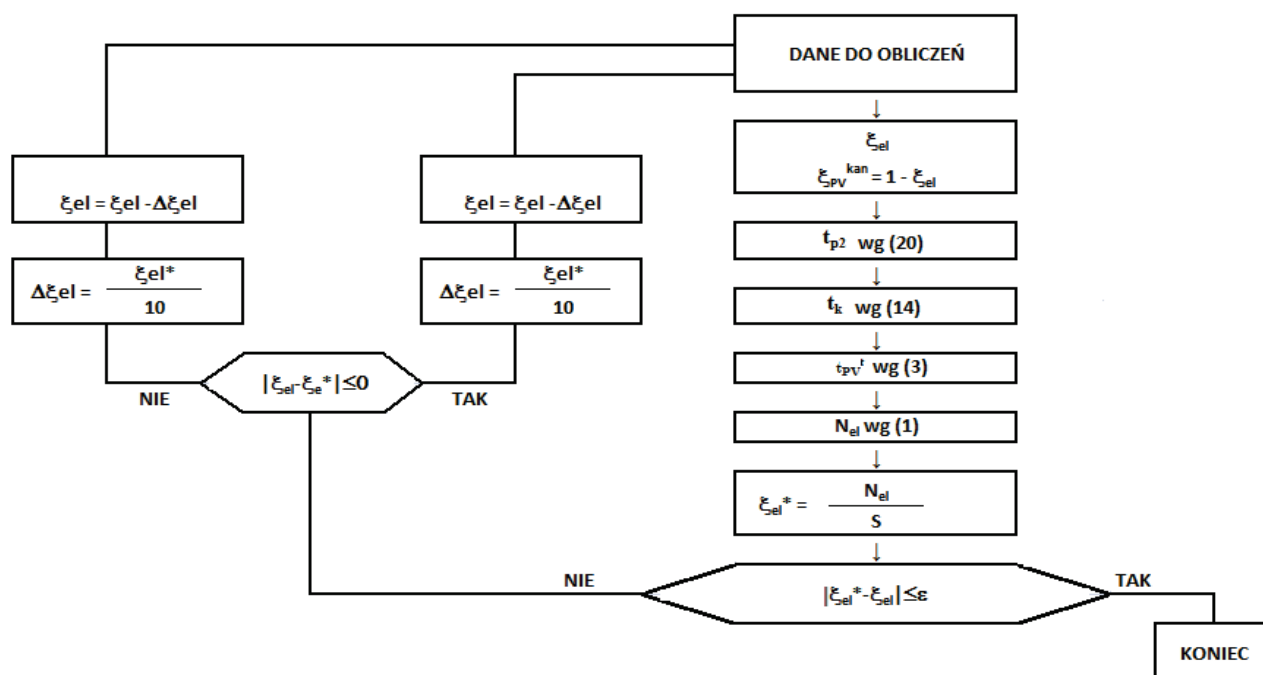
Po podstawieniu powyższych danych do równań (10) - (13) odpowiednie strumienie ciepła (energii) są jedynie funkcjami temperatury powietrza na wylocie z kanału. Równania te przyjmują postać:

- dla ściany budynku

$$\dot{Q}_{śc} = 0,247 \cdot t_{p2} - 7,411$$

- dla ścian bocznych ograniczających kanał

$$\dot{Q}_b = 0,494 \cdot t_{p2} - 19,763$$



Rys.2. Algorytm obliczeń

- dla powietrza na wlocie do kanału

$$\dot{Q}_{p1} = 2399,58 \text{ W},$$

- dla powietrza na wylocie z kanału

$$\dot{Q}_{p2} = 240,0 \cdot t_{p2}.$$

W celu określenia strumienia ciepła przekazanego od strony modułu PV do kanału powietrznego przyjęto podany poniżej sposób postępowania. Dla rozważanego wariantu obliczeń założono strumień energii promieniowania słonecznego równy 1000 W/m^2 . Po uwzględnieniu pola powierzchni modułu strumień ten wynosi $G_{\beta} = 1647 \text{ W}$. Przyjmując, że wartość współczynnika transmisyjno-absorpcyjnego jest równa $(\tau\alpha) = 0,75$ (wartość średnia z przedziału $0,6 - 0,9$, podawanego w pracy (Pluta, 2000)). Stąd, zgodnie z wzorem (8) strumień energii docierający do powierzchni ogniw PV wynosi $S = 1235 \text{ W}$. Jeśli przyjmując, że początkowa wartość współczynnika ξ_{el} odpowiada sprawności modułu SV60P-235 w warunkach STC (www.selfa.pl) i wynosi $\xi_{el} = 0,144$, to obliczony ze wzoru (22) współczynnik określający udział energii (ciepła) przekazanej do kanału powietrznego jest równy $\xi_{PV}^k = 0,856$. Zatem strumień ciepła doprowadzony do kanału powietrza jest równy $\dot{Q}_{PV}^k = 1057 \text{ W}$.

Z bilansu energii dla kanału powietrza chłodzącego moduł (9) wynika temperatura powietrza na wylocie z kanału, która wynosi $t_{p2} = 26,7^{\circ}\text{C}$.

Na tej podstawie można wyznaczyć, ze wzoru (14), średnią temperaturę powietrza w kanale $t = 18,4^{\circ}\text{C}$. Z kolei zakładając arbitralnie, że współczynnik wnika-

nia ciepła wynosi $\alpha_{PV-k} = 15 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ (Staniszewski, 1980) można ze wzoru (2) wyznaczyć temperaturę tylnej ścianki modułu PV $t_{PV}^t = 61,2^{\circ}\text{C}$.

Następnie korzystając z zależności (1) obliczono moc modułu PV równą $N_{el} = 233,4 \text{ W}$. W kolejnym kroku obliczeniowym ze wzoru (21) wyznaczono nową wartość współczynnika $\xi_{el}^* = 0,160$. Stwierdzono, że wartość ta różni się od wartości zadanej o 2,9%. Dalsza procedura obliczeniowa wymaga więc wykonania kilku iteracji, by oszacować dostatecznie dokładną wartość współczynnika, która ostatecznie jest równa $\xi_{el} = 0,189$. Na tej podstawie można oszacować parametry pracy modułu PV z chłodzeniem za pomocą strumienia powietrza. Stąd: $\dot{Q}_{PV}^k = 1001,7 \text{ W}$, $t_{PV}^t = 58,9^{\circ}\text{C}$, a $t_k = 18,4^{\circ}\text{C}$.

PODSUMOWANIE

Sformułowany model matematyczny bilansu energii dla modułu PV z chłodzeniem pozwala oszacować moc chwilową wynikającą z temperatury panującej za jego tylną ścianką. Dalsza weryfikacja modelu pozwoli na bardziej precyzyjne oszacowanie parametrów pracy tego rozwiązania konstrukcyjnego instalacji PV.

PODZIĘKOWANIE

Autorka składa podziękowanie za pozyskane środki finansowe w ramach grantu wewnętrznego Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki ZUT „Młoda Kadra”.

WYKAZ OZNACZEŃ

A	pole powierzchni	m^2
B	współczynnik zmiany mocy z temperaturą	$\%/K$
c	ciepło właściwe	$J/(kg\ K)$
G_{β}	strumień energii promieniowania słonecznego padającego na zewnętrzną powierzchnię modułu PV	W
k	współczynnik przenikania ciepła	$W/(m^2\ K)$
\dot{m}	strumień masy	kg/s
N	moc	W
\dot{Q}	strumień ciepła	W
S	strumień energii promieniowania słonecznego padającego na powierzchnię podłoża ogniw PV	W
t	temperatura	$^{\circ}C$
w	prędkość	m/s
α	współczynnik przejmowania ciepła	$W/(m^2K)$
λ	współczynnik przewodzenia ciepła	$W/(mK)$
ξ	współczynnik określający udział strumienia ciepła w stosunku do strumienia energii promieniowania słonecznego padającego na powierzchnię ogniw PV	
ρ	gęstość	kg/m^3
$\tau\alpha$	współczynnik transmisyjno - absorpcyjny	
ν	kinematyczny współczynnik lepkości	m^2/s

Indeksy:

1	wlot do kanału
2	wylot z kanału
a	współczynnik
b	ściana boczna
b_R	współczynnik
el	elektryczny
k	kanał
n	nominalne

ot	otoczenie
p	powietrze
m	pomieszczenie
PV	panel fotowoltaiczny
sm	straty
śc	ściana budynku
t	tylna ścianka modułu PV

LITERATURA CYTOWANA

Dz. U.2008.201.1238, Rozporządzenie ministra infrastruktury z dnia 6 listopada 2008 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie warunków technicznych jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowania

Hasan A., McCormack S. J., Huang M. J., Norton B., 2010, *Solar Energy*, Evaluation of phase change materials for thermal regulation enhancement of building integrated photovoltaics, pp. 84, 1601-1612

Klugmann-Radziemska E., 2010, *Fotowoltaika w teorii i praktyce*, Wyd. BTC, Legionowo

Klugmann-Radziemska E., 2009, *Fundamentals of Energy Generation*, Wyd. Politechniki Gdańskiej, Gdańsk pp. 10, 86-114

Krauter S., 2004, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Increased electrical yield via water flow over the front of photovoltaic panels, pp. 82, 131-137

Nowak W., 1993, *Teoria rekuperatorów*, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, Szczecin, p. 299

Staniszewski B., 1980, *Wymiana ciepła*, PWN, Warszawa, p. 25

www.selfa.pl