

Paweł OBSTAWSKI

SZKOŁA GŁÓWNA GOSPODARSTWA WIEJSKIEGO, WYDZIAŁ INŻYNIERII PRODUKCJI,
ul. Nowoursynowska 166, 02-787 Warszawa

Wyznaczanie właściwości dynamicznych płaskiego kolektora słonecznego

Dr inż. Paweł OBSTAWSKI

Absolwent Wydziału Inżynierii Produkcji Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego. Zajmuje się problematyką związaną ze słonecznymi instalacjami grzewczymi i hybrydowymi systemami zasilania. Autor i współautor 30 publikacji naukowych w tym książki poświęconej programowaniu sterowników PLC. Obecnie zatrudniony na stanowisku adiunkta w Katedrze Podstaw Inżynierii Wydziału Inżynierii Produkcji SGGW.



e-mail: pawel_obstawski@sggw.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono metodykę wyznaczania właściwości dynamicznych płaskiego kolektora słonecznego wg Normy PN-EN 12975-2, którą porównano z metodyką wg automatyki. Zaprezentowano występujące rozbieżności. Zwrócono uwagę na fakt dokonywanych aproksymacji w określaniu właściwości dynamicznych kolektora podczas badań normatywnych.

Słowa kluczowe: płaski kolektor słoneczny, charakterystyka skokowa, stała czasowa.

Determination of dynamic properties of a flat plate solar collector

Abstract

In order to correctly design a solar installation or a power supply hybrid system based on a solar segment built of flat fluid collectors, it is necessary to know the characteristic of the applied collector efficiency and to determine its dynamic properties. Exploitation parameters of a flat solar collector and its dynamic properties are determined on a basis of normative investigations according to PN - EN 12975-2 [6]. According to that norm, the collector dynamic properties are determined only on the ground of the equivalent time constant obtained from the experimental step characteristic (Fig. 1) and dependence (1). Such a procedure results in obtaining approximation of the collector dynamic properties because of neglecting the time delay and the amplification factor. Figs. 3 and 4 show the experimental step characteristics of the solar collector, basing on which there were determined the collector dynamic properties according to the standard and the classic theory of automatic control. The obtained time constants are similar, whereas the time delay neglected by the standard in the first case (the flow equal to 1.2 dm³/min) (Fig. 3) is equal to 25% of the time constant, which is a large approximation of the collector dynamic properties. The delay time is connected with the flow speed of a medium through the collector and it can be determined from relationship (6) with a good accuracy. Dynamic properties of an existing solar installation can be determined based on the exploitation data with use of the parametric identification method [5].

Keywords: flat solar collector, step characteristic, time constants.

1. Wstęp

Do poprawnego zaprojektowania instalacji słonecznej lub hybrydowego systemu zasilania, opartym na segmencie słonecznym zbudowanym z płaskich kolektorów cieczowych min. niezbędna jest znajomość charakterystyki sprawności zastosowanego kolektora oraz określenie jego właściwości dynamicznych. Charakterystyka sprawności określa moc użyteczną kolektora w funkcji temperatury zredukowanej, która oprócz możliwości oszacowania wydajności kolektora umożliwia porównywanie kolektorów różnych producentów. Natomiast do zaprojektowania układu automatycznej regulacji umożliwiającego optymalizację pracy instalacji niezbędna jest znajomość właściwości dynamicznych kolektora. Zazwyczaj w warunkach eksploatacyjnych właściwości dynamiczne instalacji słonecznej, ze względu na stochastyczne zakłócenia wpływające na punkt pracy instalacji, mogą odbiegać od tych zakładanych na etapie projektowym [5], jednakże znajomość charakterystyki skokowej umożliwia przeprowadzenie wstępnych badań symulacyjnych, na podstawie których można oszacować zachowanie się kolektora w warunkach eksploatacyjnych. Poprzez analizę charakterystyki skokowej można oszacować prędkość przyrostu temperatury wylotowej czynnika przy określonej temperaturze wlotowej czynnika i określonej wartości natężenia promieniowania słonecznego. Charakterystykę skokową kolektora można wyznaczyć eksperymentalnie, a wytyczne dotyczące metodyki, aparatury pomiarowej oraz warunków jakie powinny panować podczas eksperymentu określone są poprzez normę PN-EN 12975-2 [5].

2. Wyznaczanie charakterystyki skokowej płaskiego kolektora cieczowego

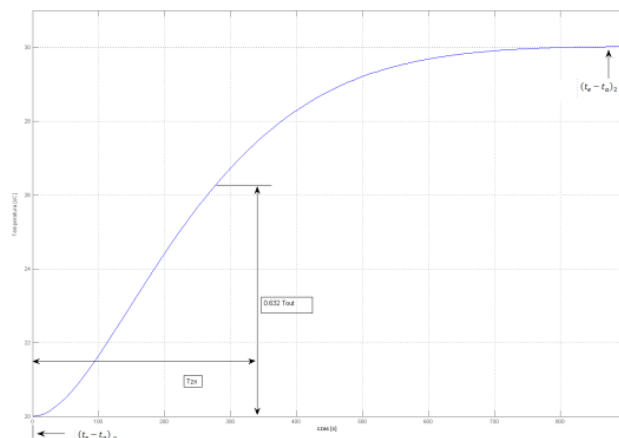
W Polsce od września 2007 roku obowiązuje norma PN-EN 12975-2 „Słoneczne systemy grzewcze i ich elementy. Kolektory słoneczne. Część 2: Metody badań” [6], która precyzuje min.: metodykę wyznaczanie właściwości dynamicznych płaskiego kolektora cieczowego. Według normy PN-EN 12975-2 właściwości płaskiego kolektora cieczowego określane są na podstawie charakterystyki skokowej wyznaczonej eksperymentalnie. Należy zaznaczyć, że eksperymentalne wyznaczenie charakterystyki skokowej jest testem nieobowiązkowym, który może być przeprowadzony dodatkowo podczas wykonywania badań normatywnych, a właściwości dynamiczne określane są jedynie na podstawie wyznaczenia zastępczej stałej czasowej. Norma bardzo dokładnie precyzuje wymagania dotyczące stanowiska pomiarowego, aparatury pomiarowej jak i metodyki przeprowadzenia testu. Dopuszcza przeprowadzenie eksperymentu zarówno w warunkach laboratoryjnych z wykorzystaniem symulatora promieniowania słonecznego jak i w warunkach polowych. Podczas

eksperymentu powinny być mierzone następujące wielkości fizyczne: temperatura wlotowa i wylotowa czynnika oraz natężenie promieniowania słonecznego. Test powinien zostać przeprowadzony przy stałym przepływie masowym czynnika wynoszącym $0,02 \text{ kg/m}^2$ powierzchnią apertury badanego kolektora. Wartość natężenia promieniowania słonecznego podczas testu powinna być wyższa niż 700 W/m^2 . Norma narzuca aby charakterystyka skokowa wyznaczona była jedynie dla temperatury wlotowej czynnika równej temperaturze otoczenia. Przed przystąpieniem do testu należy zakryć badany kolektor za pomocą powłoki refleksyjnej, a następnie doprowadzić go do stanu ustalonego. Gdy mierzone wielkości fizyczne są stałe w czasie, należy zdjąć powłokę refleksyjną zasłaniającą absorber i kontynuować pomiary, aż do momentu uzyskania przez temperaturę wylotową czynnika stanu ustalonego utrzymując stałą temperaturę wlotową czynnika. Można przyjąć, że kolektor znajduje się w stanie ustalonym jeśli temperatura wylotowa czynnika nie zmienia się szybciej jak $0,05 \text{ K/minutę}$. Stałą czasową wyznacza się jako wartość czasu odpowiadającą $0,632$ stanu ustalonego temperatury wylotowej czynnika, którą można wyznaczyć z zależności (1) opierając się o rysunek 1.

$$T_z = 0,632 * \dot{\tau} \quad (1)$$

gdzie: t_e – temperatura wylotowa czynnika, t_a – temperatura otoczenia.

Na rysunku 1 przedstawiono charakterystykę skokową wraz z metodyką obliczania stałej czasowej według normy PN-EN 12975-2. Należy zauważyć, że przebieg stanu przejściowego temperatury wylotowej czynnika świadczy o tym, że kolektor ciekłowy jest obiektem inercyjnym wyższego rzędu, w którym natężenie promieniowania słonecznego należy traktować jako sygnał wejściowy, temperaturę wylotową czynnika jako sygnał wyjściowy, natomiast temperaturę wlotową czynnika jako zakłócenie. Wyznaczając zastępczą stałą czasową z zależności 1 poprzez pominięcie czasu opóźnienia dokonuje się aproksymacji charakterystyki skokowej do właściwej dla obiektu inercyjnego rzędu pierwszego. Taka aproksymacja może doprowadzić do nieścisłości, uniemożliwiających poprawne zaprojektowanie układu automatycznej regulacji.



Rys. 1. Charakterystyka skokowa wg Normy PN-EN 12975-2
Fig. 1. Step characteristic according to Standard PN - EN 12975-2

3. Modele płaskich ciekłowych kolektorów słonecznych

Określenie właściwości dynamicznych kolektora ciekłowego według normy PN-EN 12975-2 w warunkach laboratoryjnych generuje koszty, gdyż min.: wymusza zastosowanie symulatora promieniowania słonecznego. Natomiast oszacowanie właściwości dynamicznych kolektora w warunkach polowych, ze względu na wysoką stałą w czasie wartość natężenia promieniowania słonecznego oraz konieczność utrzymywania podczas eksperymentu temperatury wlotowej czynnika na poziomie temperatury otoczenia, jest trudne do zrealizowania. Z tego też względu w ostatnich latach opracowano wiele metod umożliwiających określenie parametrów eksploatacyjnych kolektora takich jak: efektywna pojemność cieplna $(mc)_e$, współczynnik strat ciepłych U_L , współczynnik sprawności kolektora F' jak również umożliwiających wyznaczenie charakterystyki sprawności na podstawie pomiarów dokonanych w warunkach polowych przy zmiennych warunkach atmosferycznych [1, 2, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14]. Jednakże tylko nieliczne w metodyce przewidują wyznaczenia stałej czasowej [1, 13]. Norma PN-EN 12975-2 również dopuszcza wyznaczenie charakterystyki sprawności na podstawie danych pomiarowych zarejestrowanych w stanach nieustalonych z wykorzystaniem metody QDT [2], jednakże metoda QDT nie uwzględnia wyznaczenia zastępczej stałej czasowej.

Wyznaczenie właściwości dynamicznych kolektora w dziedzinie czasu nie musi wiązać się z przeprowadzeniem odrębnego testu. Zastępczą stałą czasową można wyznaczyć na podstawie algebraizacji modelu kolektora w postaci równania różniczkowego pod warunkiem, że model kolektora wiąże efektywną pojemność cieplną, przepływ masowy oraz ciepło właściwe czynnika. Przykładowa analiza przedstawiona zostanie na podstawie modelu kolektora opartym na równaniu różniczkowym wyprowadzonym z bilansu energetycznego bazującym na równaniu HWB (2) [4].

$$(mc)_e \frac{dT_{out}(t)}{dt} = A_c * F_R [G - U_L(T_i - T_a)] - \dot{m} * cp * (T_{out} - T_i) \quad (2)$$

Równanie to wiąże wartości temperatury wyjściowej czynnika z zewnętrznymi wymuszeniami w postaci natężenia promieniowania słonecznego G , strumieniem masy \dot{m} oraz temperaturą wlotową czynnika T_{in} . Dzieliąc obie strony równania przez $\dot{m} * cp$, równanie (2) można zapisać w postaci (3).

$$\frac{(mc)_e}{\dot{m} * cp} \frac{dT_{out}(t)}{dt} + T_{out}(t) = \frac{A_c * F_R}{\dot{m} * cp} * [G - U_L(T_i - T_a)] + T_i \quad (3)$$

Należy zauważyć, że równanie 3 jest równaniem różniczkowym pierwszego rzędu o ogólnej postaci wyrażonej zależnością 4.

$$T \frac{dy}{dt} + y(t) = k * u(t) \quad (4)$$

Dokonując algebraizacji równania (3) za pomocą transformaty Laplace'a otrzymujemy rozwiązanie równania różniczkowego (2) w postaci transmitancji operatorowej o ogólnej postaci (5).

$$G(s) = \frac{k}{T_z s + 1} \quad (5)$$

gdzie: $G(s)$ – transmitancja operatorowa, k – współczynnik wzmocnienia = $\frac{A_c * F_R}{\dot{m} * cp}$, T_z – zastępcza stała czasowa = $\frac{(mc)_e}{\dot{m} * cp}$,

$u(t)$ -wymuszenie = $[G - U_L(T_i - T_a)]$, T_i - temperatura wlotowa czynnika – określa warunek początkowy całkowania, $y(t)$ sygnał wyjściowy = $T_{out}(t)$.

Z równania (5) możliwe jest wyznaczenie parametrów określających właściwości dynamiczne kolektora – zastępczą stałą czasową oraz współczynnik wzmocnienia. Z równania (5) wynika, że zastępcza stała czasowa uzależniona jest od efektywnej pojemności cieplnej kolektora oraz strumienia masy i ciepła właściwego czynnika. Współczynnik wzmocnienia natomiast zależy od powierzchni kolektora, współczynnika F_R oraz strumienia masy i ciepła właściwego czynnika. Znając wartość efektywnej pojemności cieplnej oraz masowy przepływ czynnika i jego ciepło właściwe, możliwym staje się oszacowanie zastępczej stałej czasowej kolektora. Zatem zastępczą stałą czasową można wyznaczyć przeprowadzając testy kolektora z wykorzystaniem metod, w których parametrem charakterystycznym modelu jest efektywna pojemność cieplna kolektora $(mc)_e$, czyli min.: metodą Perers'a [3], DSC [9], QDT [2], lub dysponując certyfikatem Solar Keymark, w którym to również podana jest efektywna pojemność cieplna kolektora oraz masowy przepływ czynnika, przy którym zostały przeprowadzone testy kolektora.

Pomimo, iż charakterystyka skokowa kolektora cieczowego odpowiada obiektowi inercyjnemu wyższego rzędu, niezależnie od zastosowanej metody analizy właściwości dynamicznych kolektora (badania normatywne, metody testowania kolektora w stanach przejściowych traktujące kolektor jako ciało jednorodne lub opisujące bilans energetyczny za pomocą równania różniczkowego wyższego rzędu) aproksymują charakterystykę skokową jako obiekt rzędu pierwszego. Stosując taką aproksymację popełnia się niewielki błąd w ocenie właściwości dynamicznych badanego kolektora pod warunkiem, że czas opóźnienia w stosunku do zastępczej stałej czasowej jest niewielki. W przeciwnym razie interpretacja właściwości dynamicznych kolektora obciążona jest znacznym błędem, który może powodować trudności zapewnienia stabilności układu regulacji pracą segmentu słonecznego, co zostanie wyjaśnione na poniższym przykładzie.

4. Opis stanowiska badawczego

Charakterystyka skokowa płaskiego kolektora cieczowego została wyznaczona eksperymentalnie na stanowisku badawczym (rys. 2). Jako czynnik roboczy wykorzystano wodę, a pomiar przepływu realizowany został za pomocą wodomierza z impulsatorem elektromagnetycznym. Eksperyment wykonano przy dwóch przepływach masowych czynnika wynoszących 1,2 dm³/min oraz 2,2 dm³/min.



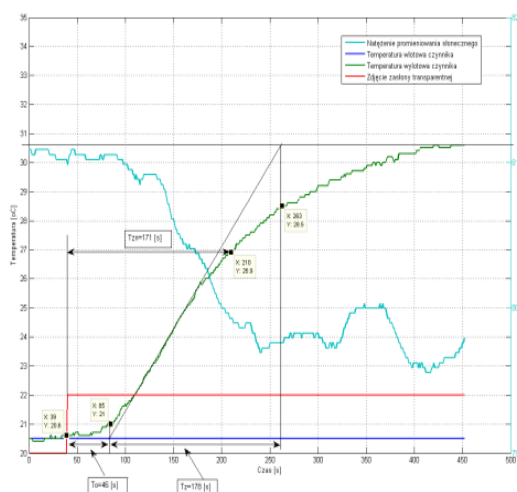
Rys. 2. Stanowisko badawcze
Fig. 2. Investigation stand

Przepływ masowy wody przez instalację słoneczną regulowany był za pomocą ustawienia głowicy zaworu. Jako czujniki temperatury zastosowano termopary typu K z izolowaną spoiną wykonane w klasie 1. Podczas eksperymentu rejestrowano: natężenie promieniowania słonecznego, temperaturę wlotową i wylotową czynnika oraz temperaturę otoczenia z okresem próbkowania 1 sekundy. Do rejestracji danych pomiarowych wykorzystano program typu SCADA.

5. Analiza właściwości dynamicznych płaskiego kolektora słonecznego

Na rysunku 3 przedstawiona została eksperymentalnie wykonana w warunkach polowych charakterystyka płaskiego kolektora cieczowego. Eksperyment przeprowadzony został przy średniej wartości natężeniu promieniowania słonecznego $G = 804 \pm 6 \text{ W/m}^2$, temperaturze wlotowej czynnika $T_{in} = 20.6^\circ\text{C}$ i przepływie masowym czynnika $\dot{m} = 1,2 \text{ dm}^3/\text{min}$. W czasie $t = 0 - 39$ sekundy apertura kolektora zasłonięta była pokrywą transparentną, a temperatura wylotowa czynnika równa była temperaturze wlotowej co dowodzi, że badany kolektor znajdował się w stanie ustalonym.

W chwili $t = 39$ sekund dokonano wymuszenia skokowego poprzez zdjęcie pokrywy transparentnej zakrywającej aperturę kolektora, a na powierzchnię absorbera padła dawka natężenia promieniowania słonecznego $G = 804 \pm 6 \text{ W/m}^2$. Na skutek skokowej zmiany napromieniowania z $G = 0$ do $G = 804 \pm 6 \text{ W/m}^2$, przy stałej temperaturze wlotowej czynnika $T_{in} = 20.6^\circ\text{C}$, nastąpił przyrost temperatury wylotowej czynnika z wartości $T_{out} = T_{in} = 20.6^\circ\text{C}$ do wartości ustalonej $T_{out} = 30.6^\circ\text{C}$. Przebieg przejściowy temperatury wyjściowej czynnika odpowiada obiektowi inercyjnemu wyższego rzędu. Z charakterystyki widać wyraźnie, że reakcja kolektora na pobudzenie natężeniem promieniowania słonecznego występuje z pewnym, dość znacznym opóźnieniem.



Rys. 3. Charakterystyka skokowa kolektora cieczowego przy $\dot{m} = 1.2 \text{ dm}^3/\text{min}$

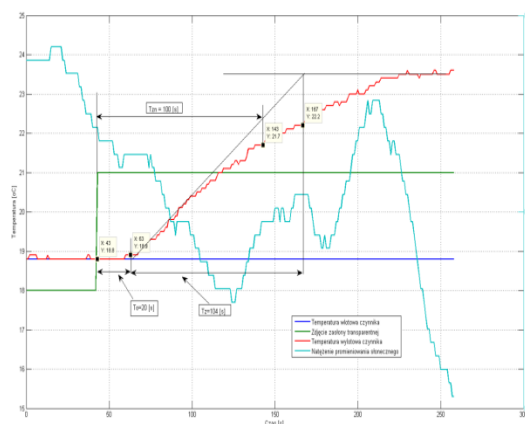
Fig. 3. Step characteristic of the fluid collector at $\dot{m} = 1.2 \text{ dm}^3/\text{min}$

Korzystając z zależności 1 oraz sporządzonej eksperymentalnie charakterystyki skokowej można wyznaczyć według normy zastępczą stałą czasową, która wynosi $T_{zn} = 171 \text{ s}$. Ewidentny czas opóźnienia zostaje pominięty.

Bazując na podstawach teorii automatyki [7], dokonując analizy dynamiki obiektów inercyjnych wyższych rzędów należy wyznaczyć zarówno czas opóźnienia jak i zastępczą stałą czasową, co umożliwi zarazem aproksymację kolektora do obiektu rzędu pierwszego.

Najprostszą metodą określenia zastępczej stałej czasowej i czasu opóźnienia jest wykreślenie stycznej do stanu przejściowego w punkcie przegięcia i określenia szukanych czasów graficznie (rys. 3). Wyznaczone w ten sposób szukane czasy wynoszą odpowiednio $T_z = 178$ s, $T_o = 46$ s. W analizowanym przypadku czas opóźnienia jest dość znaczny i stanowi ponad 25% zastępczej stałej czasowej, zatem analizując dynamikę kolektora cieczowego nie można do pominać.

Na rysunku 4 przedstawiono wyznaczoną eksperymentalnie charakterystykę skokowa badanego kolektora przy przepływie $\dot{m} = 2.2$ dm³/min, nieco wyższej średniej dawce natężenia promieniowania słonecznego wynoszącej $G = 845 \pm 6$ W/m², i zbliżonych do poprzedniego temperaturach eksperymentu i temperaturach czynnika $T_{out} = T_{in} = 18.8^\circ\text{C}$.



Rys. 4. Charakterystyka skokowa kolektora cieczowego przy $\dot{m} = 2.2$ dm³/min

Fig. 4. Step characteristic of the fluid collector at $\dot{m} = 2.2$ dm³/min

Eksperyment identyfikacji wykonano w identyczny sposób jak poprzednio przy czym pomimo wyższej wartości natężenia promieniowania słonecznego na skutek większego przepływu przyrost temperatury wylotowej czynnika był znacznie niższy i wyniósł $\Delta T = 6^\circ\text{C}$.

Na podstawie sporządzonej eksperymentalnie charakterystyki skokowej wyznaczono, według normy korzystając z zależności 1, zastępczą stałą czasową $T_{zn} = 100$ sekundy. Wyznaczona graficznie zastępcza stała czasowa i czas opóźnienia wynoszą odpowiednio: $T_z = 104$ s, $T_o = 20$ s.

6. Analiza otrzymanych wyników

Analizując otrzymane wyniki należy zauważyć, że wyznaczone w poszczególnych przypadkach, według zaleceń normy oraz standardową metodą wykreślną, zastępcze stałe czasowe są ze sobą zbliżone. Niewielkie różnice, rzędu 5 sekund, mogą być spowodowane niedokładnością stycznej do stanu przejściowego temperatury wyjściowej. Należy również zauważyć, że przy wzroście przepływu masowego stała czasowa badanego kolektora maleje, co jest zgodne z definicją stałej czasowej kolektora wyprowadzonej z bilansu energetycznego (zależność 5). Podobnie jest z wartościami przyjmowanymi przez czas opóźnienia. Przy wzroście masowego natężenia przepływu czas opóźnienia maleje, zatem ma on charakter opóźnienia transportowego.

Proponowana przez normę PN-EN 19275:2 aproksymacja właściwości dynamicznych kolektora cieczowego do obiektu inercyjnego rzędu pierwszego jest jedynie poprawna w sensie określenia zastępczej stałej czasowej. Bazując na dokonanej według normy aproksymacji lub korzystając z modeli matematycznych kolektora, dysponując podstawowymi danymi eksploatacyjnymi: efektywną pojemnością cieplną, przepływem masowym czynnika polem powierzchni apertury, współczynnikami: F_R oraz U_L , odtworzenie jego rzeczywistych właściwości dynamicznych ze względu na pominięcie czasu opóźnienia jest niemożliwe, co uniemożliwia zarazem poprawne zaprojektowanie układu regulacji instalacji słonecznej.

Ze względu na fakt, iż czas opóźnienia reakcji kolektora na wymuszenie związane ze zmianą natężenia promieniowania słonecznego jest opóźnieniem transportowym związanym z przepływem masowym czynnika przez węzownicę kolektora, ze znaczną dokładnością czas opóźnienia oszacować z zależności 6.

$$T_o = \frac{l * \rho * \pi * d^2}{4 * \dot{m}} \quad (6)$$

gdzie: T_o – czas opóźnienia [s], ρ – gęstość czynnika [kg/m³],
 l – długość węzownicy kolektora [m], d – średnica wewnętrzna węzownicy [m], \dot{m} – masowe natężenie przepływu [kg/s].

Zależność jest słuszna dla kolektorów węzownicowych. W badanym kolektorze długość węzownicy $l = 7$ m, natomiast średnica węzownicy $d = 0.012$ m. W tabeli 1 przedstawiono rzeczywisty czas opóźnienia oszacowany na podstawie sporządzonej eksperymentalnie charakterystyki skokowej oraz wyznaczony z zależności 6. Obliczone z zależności 6 czasy opóźnienia są zbliżone z czasami wyznaczonymi z charakterystyki skokowej, co potwierdza prawdziwość zależności.

Tab. 1. Porównanie otrzymanych wyników
 Tab. 1. Comparison of received results

Przepływ, dm ³ /min	T_o – z charakterystyki skokowej, s	T_o – z zależności 6, s
1.2	46	43
2.2	20	21.5

7. Podsumowanie i wnioski

Ocena właściwości dynamicznych płaskiego kolektora słonecznego według wytycznych zawartych w normie PN-EN 19275:2 polega na eksperymentalnym wyznaczeniu charakterystyki skokowej. Metodyka wyznaczania zastępczej stałej czasowej kolektora narzucona przez normę dokonuje aproksymacji charakterystyki skokowej do właściwej dla obiektu inercyjnego pierwszego rzędu, przy czym wyznaczana zostaje jedynie zastępcza stała czasowa przy pominięciu czasu opóźnienia oraz współczynnika wzmocnienia, co w rezultacie uniemożliwia odwzorowanie rzeczywistych właściwości dynamicznych kolektora. Analiza właściwości dynamicznych kolektora w oparciu o modele matematyczne daje większe możliwości odwzorowania rzeczywistych właściwości dynamicznych kolektora, gdyż umożliwia oszacowanie współczynnika wzmocnienia. Jednakże należy zauważyć, że nadal zostaje pominięty czas opóźnienia. Czas opóźnienia można oszacować korzystając z zależności 6. W przypadku konieczności określenia właściwości dynamicznych istniejącego segmentu słonecznego, można je wyznaczyć na podstawie danych eksploatacyjnych korzystając z metody identyfikacji parametrycznej [5].

8. Literatura

- [1] Amer E. H., Nayak J. K. Sharma G. K.: A new dynamic method for testing solar flat-plate collectors under variable weather. *Energy Conversion and Management* 40 (1999), 803-823.
- [2] Amer E. H., Nayak J. K. Sharma G. K.: A transient method for testing of flat plate solar collectors. *Energy Conversion and Management* 39, 285-293.
- [3] Perers B.: Dynamic method for solar collector array testing and evaluation with standard database and simulation program. *Solar Energy* 50 (1993), 517-526.
- [4] Hou H. J., Wang Z. F., Wang R. Z., Wang P. M.: A new method for the measurement of solar collector time constant. *Renewable Energy* vol. 30, 855-865.
- [5] Obstawski P., Chochowski A., Czekalski D.: Właściwości dynamiczne płaskich kolektorów słonecznych. *Przegląd Elektrotechniczny* Nr 6, 2010 str. 92-95.
- [6] Norma PN-EN 12975-2 „Słoneczne systemy grzewcze i ich elementy. Kolektory słoneczne. Część 2: Metody badań”.
- [7] Kaczorek T., Dzieliński A., Dąbrowski W., Łopatka R.: *Podstawy teorii sterowania*. WNT, Warszawa 2009.
- [8] Perers B.: Dynamic method for solar collector array testing and evaluation with standard database and simulation program. *Solar Energy* vol. 50, 517-526, 1993.
- [9] Muschaweck J., Spirkel W.: *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 1993, 30-95.
- [10] Wijeyensundera N.E., Hawlader M.N.A., Fong K.Y.: *ASME Journal of Energy Engineering* 1996, 118-30.
- [11] Rogers B.A.: A method of collector testing under transient conditions. In *Solar World Forum. Proc. ISES Congress. Brighton, England. Vol. 1*. Pergamon Press, Oxford 1981, 898-902.
- [12] Saunier G. Y., Chungpaibulpatana S.: A new inexpensive dynamic method of testing to determine solar thermal performance. In *Solar World Congress. Vol. 2*, Pergamon Press, Oxford 1981, 910.
- [13] Chungpaibulpatana S., Exell R.H.B.: The Effects of using a one node heat capacitance model for determining solar collector performance parameters by transient test methods. *Solar Wind Technology*. 5, 1988, 411-421.
- [14] Wang X.A., Xu Y.F., Meng X.Y.: A filter method for transient testing of collector performance. *Solar Energy*. Vol. 38 125-134.

otrzymano / received: 11.01.2012

przyjęto do druku / accepted: 03.09.2012

artykuł recenzowany / revised paper

