

Andrzej Chochowski, Paweł Obstawski  
Katedra Podstaw Inżynierii  
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

## MODEL PARAMETRYCZNY BATERII KOLEKTORÓW SŁONECZNYCH

### Streszczenie

W pracy zaprezentowano parametryczny model baterii kolektorów płaskich opracowany na podstawie rzeczywistych danych pomiarowych pochodzących z monitoringu pracy hybrydowego systemu zasilającego w energię ciepłą budynek hotelowy w Regionalnym Centrum Edukacji Ekologicznej w Budach Grabskich. Do analizy wybrano sześć dni o różniących się zasadniczo parametrach pracy. W procesie identyfikacji segment kolektorów potraktowano jako element dwuwęjsciowy i jednowęjsciowy. Instrumentem użytym do osiągnięcia celu głównego był pakiet *Matlab*, umożliwiający opracowywanie modeli parametrycznych metodą „czarnej skrzynki”.

**Słowa kluczowe:** model parametryczny, system hybrydowy, czarna skrzynka, parametry pracy

### Wstęp

Polityka Unii Europejskiej zmusza kraje członkowskie do stopniowego zwiększania udziału odnawialnych źródeł energii w całkowitym pokryciu zapotrzebowania na nośniki energetyczne. Każde z państw UE musi wypracować własne rozwiązania lub dostosować znane technologie pozyskiwania energii z tych źródeł, odpowiednio do warunków i możliwości konkretnego regionu. Wadą źródeł odnawialnych jest ich mała gęstość energii uzyskiwana z jednostki objętości lub powierzchni, duża zawodność dostaw, szeroka zmienność w ciągu roku, a przede wszystkim słaba możliwość prognozowania mocy, nawet krótkoterminowego. Dlatego dla zapewnienia ciągłości dostaw energii u odbiorcy łączy się je z konwencjonalnymi źródłami wytwarzania, tworząc tzw. hybrydowe systemy zasilania energią. W takich systemach mogą współpracować ze sobą różne źródła odnawialne, np. wzajemnie się uzupełniające. Istotnym problemem naukowym staje się więc odpowiedni dobór rozmiarów poszczególnych segmentów składowych, zapewniających pozyskiwanie dużych ilości energii, nawet z możliwością ich krót-

koterminowej akumulacji. Ważne jest także i to, by te segmenty nie były przewymiarowane, bowiem koszty inwestycyjne wznoszą nieporównywalnie do efektów przyrostu energii. W celu zapewnienia optymalnych rozmiarów instalacji i dostatecznej sprawności całego systemu hybrydowego należy opracować odpowiedni algorytm sterowania jego pracą. To wymaga znajomości dynamiki poszczególnych jego segmentów, w tym np. baterii słonecznych płaskich kolektorów cieczowych.

Zespół pracowników Zakładu Elektrotechniki i Automatyki SGGW od blisko 5 lat prowadzi badania eksploatacyjne hybrydowego systemu zasilania energią ciepłą budynku hotelowego Regionalnego Centrum Edukacji Ekologicznej (RCEE) w Budach Grabskich. System składa się z baterii słonecznych kolektorów płaskich i próżniowych, pompy ciepła z wymiennikiem gruntowym i zbiorników akumulacyjnych. Głównym celem tych badań jest identyfikacja parametryczna i opracowanie modelu dynamicznego baterii kolektorów płaskich. Umożliwi to analizę dynamiki segmentu kolektorowego, pozwoli na prognozowanie temperatury wyjściowej medium roboczego, a tym samym umożliwi opracowanie algorytmu sterowania pracą systemu.

### Modele fizyczne kolektora

Dotychczasowe metody analizy dynamiki pracy kolektora płaskiego opierały się na równaniu HWB [Duffie, Beckman 1974]:

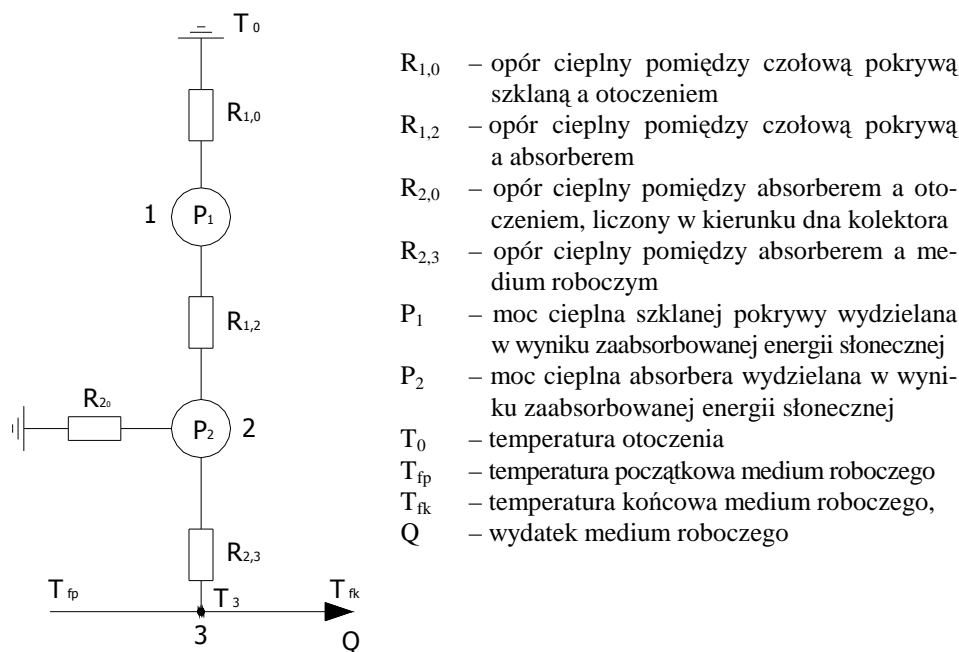
$$q_u = (p_s \cdot a_a) \cdot G - u_1(T_a - T_0) \quad (1)$$

gdzie:

- $q_u$  – użyteczna moc cieplna kolektora odniesiona do jednostki powierzchni absorbera,
- $p_s$  – przepuszczalność pokrywy szklanej kolektora,
- $a_a$  – absorpcyjność absorbera,
- $G$  – natężenie promieniowania słonecznego [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]
- $u_1$  – współczynnik strat cieplnych kolektora [ $\text{W}/(\text{K} \cdot \text{m}^2)$ ]
- $T_a$  – średnia temperatura absorbera [K]
- $T_0$  – temperatura otoczenia [K]

Równanie to oparte na bilansie ciepła w kolektorze, traktuje kolektor jako ciało jednorodne. Przeprowadzana analiza jest mało dokładna, wymaga wprowadzenia licznych założeń upraszczających.

Bardziej szczegółową metodę analizy pracy baterii kolektorów słonecznych zaproponował Chochowski [1991], wykorzystując do tego analogię termo-elektryczną i tworząc dla kolektora tzw. zastępczą sieć cieplną. W pracy tej przyjęto, że kolektor płaski jest elementem składającym się z 3 ciał jednorodnych: pokrywy szklanej, absorbera, medium roboczego (rys. 1). W utworzonym, za pomocą schematu elektrycznego, fizycznym modelu kolektora płaskiego przepływają strumienie ciepła między węzłami obwodu (analogicznie do prądu elektrycznego). Metoda ta jednak jest dość skomplikowana i pracochłonna, wymagająca również wprowadzenia pewnych założeń upraszczających i znajomości teorii obwodów elektrycznych.



Rys. 1. Schemat cieplny kolektora dla stanu ustalonego

Fig. 1. Collector heat diagram for the steady state

Rozwój technik informatycznych, wzrost mocy obliczeniowej komputerów i dostęp do specjalistycznego oprogramowania umożliwiają obecnie tworzenie modeli metodą „czarnej skrzynki” [Janiszewski 2002]. Jako narzędzia służącego do osiągnięcia celu użyto pakietu *Matlab*. W procesie identyfikacji wykorzystano bibliotekę *system identification* [Mrozek, Mrozek 2004]. Posiada ona prosty interfejs graficzny, przyjazny dla użytkownika i kilka typów modeli parametrycznych. Ma możliwość przeszukiwania struktur poszczególnych typów modeli, co pozwala

opracować model jak najdokładniej odzwierciedlający modelowany system. *Matlab* daje również możliwość konwersji otrzymanego modelu z postaci równania różnicowego, np. do transmitancji dyskretnej lub transmitancji ciągłej.

### Opis obiektu badań

Badany segment baterii kolektorów płaskich składa się z 20 cieczowych płaskich kolektorów słonecznych typu *Heliostar 200* o łącznej powierzchni  $40 \text{ m}^2$ , umieszczonych na konstrukcji wolnostojącej. Zastosowano południową ekspozycję kolektorów, o stałym kącie nachylenia do poziomu wynoszącym  $30^\circ$  (rys. 2). Z względu na całoroczną pracę instalacji słonecznej jako medium robocze zastosowano uzdatniony czynnik na bazie glikolu. Wymiana ciepła ze zbiornikiem ciepłej wody użytkowej odbywa za pośrednictwem wymiennika płytowego *CB 26* firmy *Alfa-Laval* o rozwiniętej powierzchni czynnej  $0,45 \text{ m}^2$ .



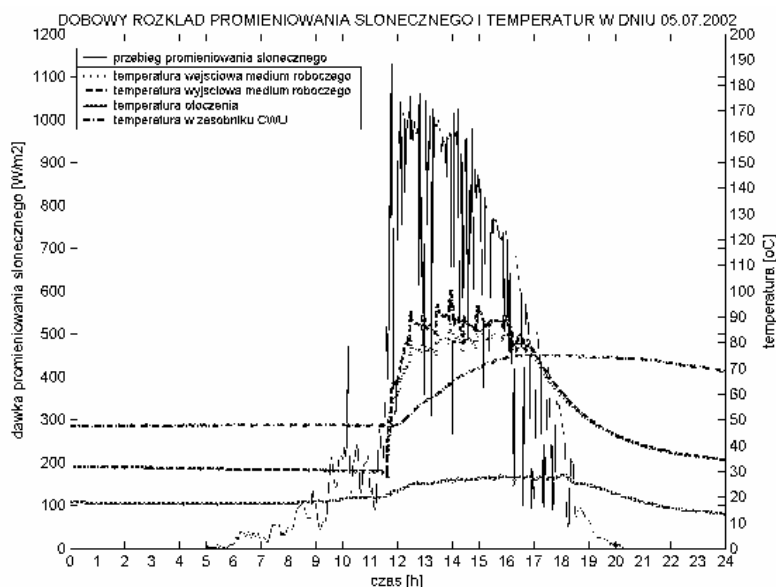
Rys. 2. Bateria kolektorów płaskich

Fig. 2. Flat collector battery

### Układ pomiarowy

Praca baterii kolektorów słonecznych jest monitorowana przez specjalnie zaprojektowany układ pomiarowy, zbudowany na bazie kart analogowo-cyfrowych firmy *Advantech* współpracujących z komputerem klasy PC ze specjalistycznym

oprogramowaniem. Pomiary temperatury wykonywane są czujnikami półprzewodnikowych typu LM 35, pomiary natężenia promieniowania – solarymetrami firmy Kipp&Zonen, a wydatek medium roboczego i zużycie ciepłej wody użytkowej (cwu) – wodomierzami impulsowymi firmy Metron. Mierzone wielkości są rejestrowane w dyskretnych krokach czasowych, z okresem próbkowania 60 sekund, zgodnie z zaleceniami podawanymi w literaturze [Janiszewski 2002] i zapisywane w plikach dobowych. Przykładowe wyniki dobowych pomiarów prezentuje rys. 3.

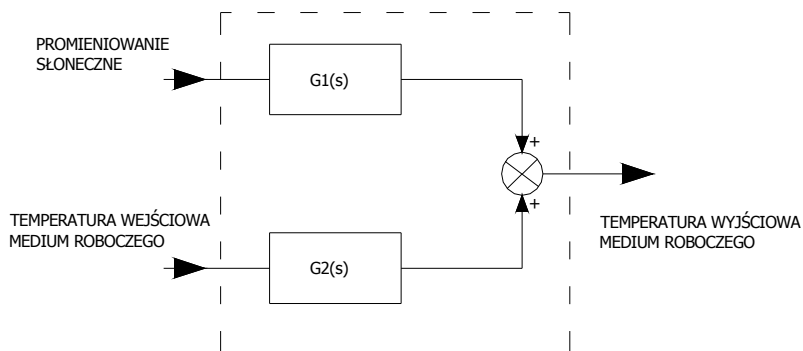


Rys. 3. Zarejestrowane sygnały pomiarowe  
 Fig. 3. Recorded measurement signals

### Parametryczny model baterii kolektorów płaskich

Parametryczny model baterii kolektorów płaskich opracowany został na podstawie rzeczywistych danych pochodzących z monitoringu pracy systemu. W procesie identyfikacji segment kolektorów potraktowano jako element dwuwejściowy i jednowyjściowy (model DISO, rys. 4). Jako sygnały wejściowe przyjęto natężenie promieniowania słonecznego i temperaturę medium roboczego na wlocie, a jako sygnał wyjściowy - temperaturę medium roboczego na wylocie kolektora. Z bazy danych pomiarowych do analizy wybrano sześć dni o różniących się zasadniczo parametrach pracy. Jako kryterialne parametry pracy baterii kolektorów płaskich przyjęto następujące wielkości: dobową dawkę napromienienia słonecznego,

maksymalną temperaturę wejściową medium roboczego, maksymalną temperaturę wyjściową medium (na wylocie z kolektora), zużycie ciepłej wody użytkowej (cwu), maksymalną temperaturę w zasobniku ciepłej wody (zcu). W tabeli 1 zestawiono te parametry dla wybranych dni.



Rys. 4. Schemat blokowy baterii kolektorów (model DISO)

Fig. 4. Block diagram of the collector battery (DISO model)

Tabela 1. Parametry pracy baterii kolektorów

Table 1. Operating parameters of the collector battery

Data	Dobowa dawka promieniowania słonecznego [kWh]	Maksymalna temperatura wejściowa [°C]	Maksymalna temperatura wyjściowa [°C]	Zużycie cwu [dm <sup>3</sup> ]	Maksymalna temperatura w zasobniku cwu [°C]
05.07.2002	304,60	87,55	100,55	355	75,1
20.06.2002	439,27	105	115,5	442,5	92,9
30.08.2002	302,12	91,6	99,2	187	82,0
19.07.2004	299,96	94,9	104	1885	71,5
23.07.2004	270,27	80,2	94,2	1975	63,4
31.07.2004	375,92	95,9	105	1452,5	79,3

Poszukując właściwego modelu analizowano wszystkie dostępne w pakiecie *Matlab* typy modeli o zróżnicowanych strukturach (AR, ARX, MA, ARMA, ARMAX). Strukturę modelu jednoznacznie określają trzy parametry:  $na$  – odpowiadający liczbie biegunów równania,  $nb$  – liczbie zer,  $nk$  – opóźnienie sygnału między wejściem i wyjściem.

Ogólną postać modelu parametrycznego opisuje zależność:

$$A(q)y(t) = \frac{B(q)}{F(q)} u(t - n_k) + \frac{C(q)}{D(q)} e(t) \quad (2)$$

gdzie:

- $u(t)$  – sygnał wejścia obiektu w dyskretnym kroku  $t$ ,
- $y(t)$  – sygnał wyjścia obiektu w dyskretnym kroku  $t$ ,
- $e(t)$  – niemierzalne zakłócenie w dyskretnym kroku  $t$ ,
- $n_k$  – opóźnienie pomiędzy sygnałem wyjściowym a wejściowym
- $A(q), B(q), C(q), D(q)$  to wielomiany
- $A(q) = 1 + a_1q^{-1} + a_2q^{-2} + \dots + a_{na}q^{-na}$
- $B(q) = b_0 + b_1q^{-1} + b_2q^{-2} + \dots + b_{nb}q^{-nb}$
- $C(q) = 1 + c_1q^{-1} + c_2q^{-2} + \dots + c_{nc}q^{-nc}$
- $D(q) = 1 + d_1q^{-1} + d_2q^{-2} + \dots + d_{nd}q^{-nd}$
- $F(q) = 1 + f_1q^{-1} + f_2q^{-2} + \dots + f_{nd}q^{-nd}$ ,

w których  $a_i, b_i, c_i, d_i, f_i$  są poszukiwanymi współczynnikami, a  $q$  jest operatorem opóźnienia.

Na podstawie przeprowadzonych badań i weryfikacji najlepiej odzwierciedlającymi modelowany segment kolektorów okazały się modele typu: ARX i ARMAX. W tabeli 2 przedstawiono kilka struktur wymienionych typów modeli, charakteryzujących się najlepszymi parametrami weryfikacyjnymi. Jako parametry kryterialne przyjęto następujące współczynniki:

- FPE (Final Prediction Error) – określający przewymiarowanie modelu,
- LOSS FUNCTION - otrzymany na podstawie procesu identyfikacji uzyskany w wyniku estymacji równy wyznacznikowi macierzy kowariancji błędów predykcji,
- FIT – określający w procentach dopasowanie otrzymanego modelu do zbioru danych walidacyjnych,
- błąd średniokwadratowy – liczony jako:

$$b\acute{s}k = (a - b)/\sqrt{\text{length}(b)} \quad [4]$$

gdzie:

- $a$  – wektor otrzymany w wyniku prognozy,
- $b$  – pomiarowy sygnał wyjściowy w postaci wektora,
- $\sqrt{\text{length}(b)}$  – pierwiastek z liczby elementów wektora  $b$ .

Najdokładniejszy jest model o strukturze, dla której współczynniki FPE, LOST FUNCTION oraz błąd średniokwadratowy będą jak najmniejsze, a współczynnik FIT jak największy.

Tabela 2. Typy i struktury modeli dla danych z dnia 05.07.2002  
 Table 2. Types and structures of the models for the data of 5th July, 2002

Model	Struktura na[nb nb] [nk nk]	FPE	LOSS FUNCTION	FIT	Błąd śred. kwadr.
ARX	2 [2 2] [0 0]	0,08	0,078	90,37	3,69
ARX	3 [2 2] [0 0]	0,077	0,076	90,2	3,78
ARX	3 [3 3] [0 0]	0,047	0,046	89,91	2,83
Model	Struktura na[nb nb] nc[nk nk]	FPE	LOSS FUNCTION	FIT	Błąd śred.kwadr..
ARMAX	2 [2 2] 2 [0 0]	0,037	0,038	90,24	3,87
ARMAX	3 [3 3] 3 [0 0]	0,032	0,033	93,73	4,59

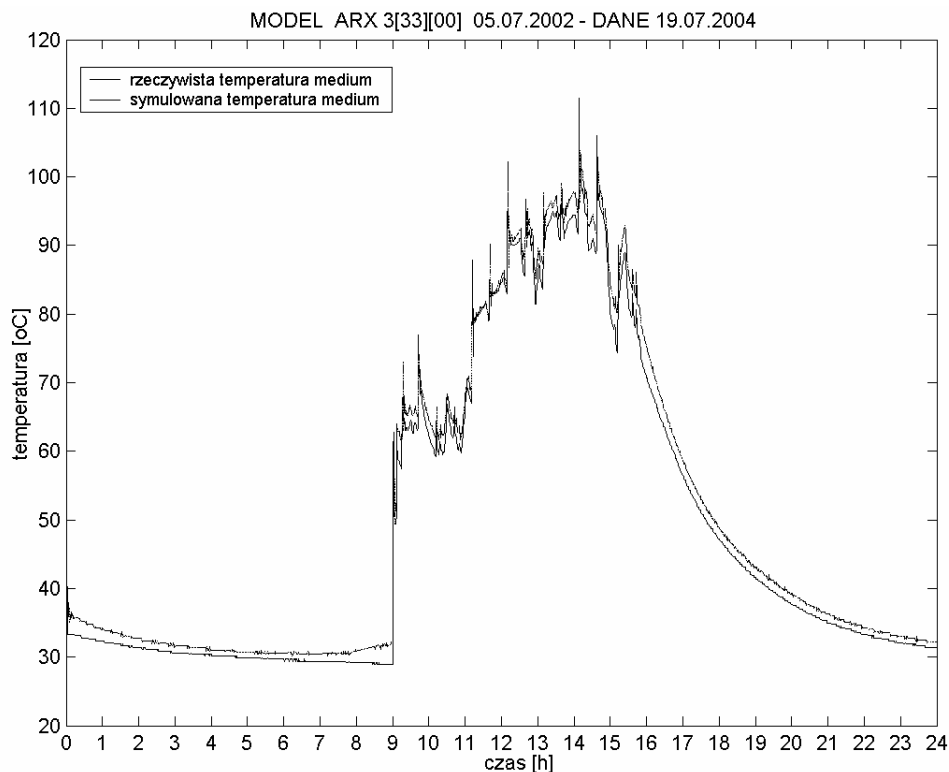
W celu stwierdzenia, że określony model można traktować jako uniwersalny, tzn. że będzie on w sposób zadowalający prognozował temperaturę wyjściową medium roboczego, należy przeprowadzić test porównawczy. Na wejścia opracowanych modeli parametrycznych, dla wcześniej wybranych warunków pracy (tab. 1), wprowadzono zarejestrowane sygnały dla zupełnie innych dni, o odmiennych warunkach pracy baterii kolektorów niż dzień, dla którego został opracowany model. Na podstawie symulacji otrzymano prognozowaną temperaturę medium roboczego, którą porównano z danymi rzeczywistymi i przedstawiono na rys. 5.

W tabeli 3 zestawiono wyniki testów symulacyjnych dla modelu ARX o strukturze  $na=3, nb=3, nk=0$ , opracowanego dla rzeczywistych danych pomiarowych. Bardzo wysoki współczynnik korelacji świadczy o dobrze dopasowanym modelu i właściwej jego strukturze. Przykładowo na rys. 5 pokazano wyniki symulacji przebiegu temperatury wylotowej z kolektora dla modelu opracowanego na danych pomiarowych z dnia 05.07.2002 i porównano je z danymi rzeczywistymi zarejestrowanymi w dniu 19.07.2004. Obie krzywe wykazują dużą zbieżność. W przypadku pozostałych dni uzyskano bardzo zbliżone wyniki (tabela 3).

Tabela 3. Wartości współczynnika korelacji wybranego modelu o strukturze ARX 330  
 Table 3. Correlation coefficient values for the selected model with ARX 330 structure

Model utworzony na danych zarejestrowanych w dniu 20.06.2002	Dane z dnia	Współczynnik korelacji
	05.07.2002	0,9975
	19.07.2004	0,9982
	23.07.2004	0,9975
	30.08.2002	0,9989
	31.07.2004	0,9985





Rys. 5. Porównanie wyników symulacji temperatury wyjściowej baterii kolektora z danymi rzeczywistymi

Fig. 5. Comparison of the results of simulation of the collector battery output temperature with real data

### Podsumowanie

Zastosowana metoda identyfikacji parametrycznej obiektu i oprogramowanie *Matlab* umożliwiają ocenę właściwości dynamicznych baterii kolektorów w trybie *on-line*, bez potrzeby prowadzenia specjalnych badań wyłączających kolektory z pracy systemu. Wyznaczony model odwzorowuje z wysoką dokładnością dynamikę całej baterii. Pozwala to na prognozowanie temperatury medium roboczego na wylocie kolektorów, umożliwiając tym samym programowanie regulatorów (bądź sterowników PLC) nadzorujących pracę całego systemu hybrydowego, np. z zastosowaniem algorytmu wyprzedzającego (*feedforward*).

## **Bibliografia**

Chochowski A. 1991. Analiza stanów dynamicznych płaskiego kolektora słonecznego. Wyd. SGGW Warszawa.

Duffie J.A., Beckman W.A. 1974. Solar Energy Thermal Processes. J.Wiley & Sons, New York.

Janiszowski K. 2002. Identyfikacja modeli parametrycznych w przykładach. Akad. Oficyna Wyd. EXIT Warszawa.

Mrozek B., Mrozek Z. 2004. Matlab i Simulink. Poradnik użytkownika. Wyd. Helion.

## **PARAMETRIC MODEL OF SOLAR COLLECTOR BATTERY**

### **Summary**

In work was presented the parametrical model of battery of flat collectors which was worked out on the base the real measuring coming from monitoring of work of hybrid system feeding in heat energy hotel in Regional Center of Ecological Education in Budy Grabskie. It to analysis was chosen the six days about differing fundamentally the parameters of work. In identification process the segment of collectors was treated as two inputs and one output element. Instrument which used to achievement the of main aim was packet *Matlab*, enabling it working out parametrical models of method "black box".

**Key words:** parametrical model, hybrid system, black box, parameters of work