

# ZASTOSOWANIE IDENTYFIKACJI PARAMETRYCZNEJ W MODELOWANIU DYNAMIKI PRACY RUROWYCH KOLEKTORÓW PRÓŻNIOWYCH

P. Obstawski, J. Aleksiejuk

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

## STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono możliwości zastosowania metody identyfikacji parametrycznej do opracowania matematycznego modelu segmentu słonecznego złożonego z kolektorów próżniowych na podstawie zarejestrowanych danych eksploatacyjnych umożliwiające określenie jego właściwości dynamicznych. Określenie właściwości dynamicznych segmentu umożliwia zaprojektowanie układu automatycznej regulacji umożliwiającego optymalizację pracy segmentu. Analizę przeprowadzono na przykładzie dwóch dni o różniących się parametrach pracy. Właściwości dynamiczne w dziedzinie czasu i częstotliwości określono na podstawie analizy charakterystyk skokowych i częstotliwościowych. z przeprowadzonej analizy wynika, że właściwości dynamiczne segmentu zależą od parametrów pracy - zatem w celu optymalizacji pracy segmentu koniecznym jest zastosowanie sterowania adaptacyjnego.

## WSTĘP

Wkład energetyki słonecznej w krajową produkcję ciepła z odnawialnych źródeł energii (OZE) od lat sukcesywnie rośnie. w roku 2010 wytworzono dzięki kolektorom słonecznym 8629,2 TJ ciepła, co przypuszczalnie pozycjonuje energetykę słoneczną nieomal na tym samym poziomie z nośnikami energii tj.: energia geotermalna i odpady komunalne (GUS, 2011). Powinno się zauważyć, iż jest to w znacznym stopniu poniżej możliwości obecnie oferowanych przez technologię pozyskiwania energii słonecznej do celów grzewczych.

W minionych latach zaobserwowano dynamiczny rozwój sektora. Sprzedaż kolektorów słonecznych ciągle wzrasta i zauważa się intensywny rozwój krajowej produkcji urządzeń. w latach 2009-2010 wynik sprzedaży kolektorów słonecznych w Polsce przekroczył 144 tys m<sup>2</sup>. Stanowi to wzrost sprzedaży w stosunku do roku 2008 o ponad 11%. w sumie, na zakończenie 2010 roku powierzchnia zainstalowana wyniosła 655,8 tys m<sup>2</sup> (w celu porównania łączna powierzchnia zainstalowana dla minionego roku wynosiła 509,9 tys. m<sup>2</sup>).

Przewagę na polskim rynku w dalszym ciągu stanowią płaskie kolektory cieczowe. w ciągu dwóch lat stosunek sprzedaży kolektorów płaskich w stosunku do kolektorów próżniowych formuje się na poziomie 70/30 % pomimo tego, że kolektory próżniowe charakteryzują się sumaryczną wyższą wydajnością

energetyczną i wyższą sprawnością ogólną. Należy zauważyć, że warunkach letnich różnice w osiągniętych uzyskach energetycznych są niewielkie, a zasadnicze na korzyść kolektorów próżniowych występują w warunkach jesienno - wiosennych

W celu zapewnienia efektywnej współpracy segmentu słonecznego z zasobnikiem ciepłej wody użytkowej (CWU) niezbędnym jest zastosowanie odpowiedniego algorytmu regulacji pracą segmentu. Na wydajność instalacji słonecznej zasadniczy wpływ ma masowy przepływ czynnika, którego wielkość powinna być uzależniona od panujących warunków pracy. w zależności od rozmiarów instalacji, a także od pory roku stosowane są standardowe typy przepływów czynnika: low flow, high flow. Przepływ low flow stosowany jest w dużych instalacjach słonecznych (o sumarycznej powierzchni absorberów powyżej 30m<sup>2</sup>) i w przypadku kolektorów próżniowych powinien wynosić 40 l/m<sup>2</sup>h. Przepływ high flow stosowany jest w instalacjach małych (o sumarycznej powierzchni absorberów poniżej 30 m<sup>2</sup>) i w przypadku kolektorów próżniowych powinien wynosić 60 l/m<sup>2</sup>h. Należy zaznaczyć, że prędkość przepływu czynnika grzewczego powinna zawierać się w granicach 0.4 – 0.7 m/s (Kompendium Ogrzewnictwa i Klimatyzacji, 2008).

Do sterowania pracą instalacji słonecznych, lub bardziej rozbudowanych systemów hybrydowych zamiast standardowo stosowanych regulatorów, których główną wadą są ograniczone możliwości techniczne można z powodzeniem stosować swobodnie programowalne sterowniki PLC, umożliwiające implementowanie nowatorskich algorytmów regulacji. Jednakże opracowanie algorytmu umożliwiającego optymalizację pracy segmentu słonecznego zdeterminowane jest określeniem właściwości dynamicznych owej instalacji w warunkach eksploatacyjnych (Chochowski, Obstawski, 2005).

## MODEL BATERII KOLEKTORÓW SŁONECZNYCH

Oceny właściwości dynamicznych segmentu słonecznego można próbować dokonać już na etapie projektowym korzystając z badań normatywnych wg normy PN-EN12957-2 (PN-EN 12975-2, 2007), jednakże należy pamiętać, że norma przewiduje określenie właściwości dynamicznych jedynie na

podstawie określenia zastępczej stałej czasowej, której wyznaczenie jest badaniem nieobowiązkowym.

Dużo dokładniej właściwości dynamiczne kolektora można określić na podstawie modeli matematycznych. Poza tym zaletą jest możliwość przeprowadzenia prac symulacyjnych umożliwiających wstępne zaprojektowanie układu automatycznej regulacji pracą instalacji.

Ogólnie modele kolektorów można podzielić pod względem budowy na: modele o parametrach skupionych i modele o parametrach rozłożonych. (Nayak, Amer, 2000). Modele o parametrach skupionych są proste pod względem budowy, traktują kolektor jako ciało jednorodne i poprzez dokonane aproksymacje uniemożliwiają analizę wymiany ciepła pomiędzy poszczególnymi elementami składowymi kolektora. Modele o parametrach rozłożonych pozwalają na wyznaczanie temperatury w kilku węzłach, np. czynnik, absorber oraz szyba solarna (Kamminga, 1985), ale są zazwyczaj skomplikowane i swoją strukturą rozbudowane, co wymaga przeprowadzenia analizy stanów termicznych specjalistycznego oprogramowania. (Costa i inni, 1991).

Prowadzone są również prace nad zastosowaniem sztucznych sieci neuronowych do opracowywania modeli kolektorów słonecznych jednakże dotyczą one jedynie prognozowania przyszłych stanów termicznych kolektora. (Kalogirou, 2006).

W warunkach eksploatacyjnych segment słoneczny na skutek stochastycznych zakłóceń znajduje się w stanie niestabilnym. Większość publikacji odnoszących się do modelowania pracy kolektorów słonecznych pomija niestabilny charakter procesów w nim zachodzących. Jeden z niewielu modeli matematycznych uwzględniający stan przejściowy zaproponowany został przez (Carillo i inni, 2009). w owej pracy przedstawiono model bazujący na metodzie objętości skończonych. Jednakże weryfikacja eksperymentalna tego modelu przeprowadzona przez autorów dotyczyła wyłącznie warunków ustalonych i wyznaczono jedynie charakterystykę sprawności kolektora.

Modele teoretyczne kolektorów próżniowych bazujące na bilansie energetycznym wymagają zastosowania pewnych założeń i uproszczeń, pomijają niektóre zjawiska zachodzące w naturalnym układzie cieplnym. Otrzymane w oparciu o te modele w procesie symulacji wyniki mogą zatem odbiegać od zachowania się segmentu w warunkach eksploatacyjnych (Chochowski i inni, 2010). z tego też względu najbardziej korzystnym rozwiązaniem byłoby określenie dynamiki pracy segmentu słonecznego złożonego z kolektorów próżniowych w warunkach eksploatacyjnych, co umożliwiłoby zaprojektowanie optymalnego układu regulacji.

## CHARAKTERYSTYKA OBIEKTU BADAŃ

Możliwość zastosowania identyfikacji parametrycznej do analizy właściwości dynamicznych kolektorów próżniowych w warunkach eksploatacyjnych przedstawione zostaną na przykładzie

segmentu słonecznego hybrydowego systemu zasilającego w energię ciepłą budynek hotelowy w Regionalnym Centrum Edukacji Ekologicznej (RCEE) w Budach Grabskich. System opisywany był wielokrotnie (Chochowski i inni 2005, 2006, 2009). Dla potrzeb przeprowadzonej analizy zostanie dokładnie przypomniana jedynie budowa segmentu kolektorów próżniowych.

Analizowany segment kolektorów próżniowych składa się z 60 sztuk kolektorów rurowych próżniowych (rys. 1) o powierzchni 6 m<sup>2</sup> umieszczonych na dachu budynku gospodarczego o kącie nachylenia 40° i wystawie południowo-zachodniej. Segment współpracuje z zasobnikiem akumulacyjnym o objętości 300 dm<sup>3</sup>. Sterowanie pracą segmentu realizowane jest za pomocą regulatora realizującego algorytm regulacji dwupołożeniowej. Pompa cyrkulacyjna załączana jest w zależności od zadanego gradientu pomiędzy temperaturą czynnika w instalacji a temperaturą w zasobniku ciepłej wody użytkowej (CWU). Rejestrowane dane pomiarowe: natężenie promieniowania słonecznego, temperatura wlotowa i wylotowa czynnika, oraz przepływ masowy czynnika rejestrowane są z okresem próbkowania wynoszącym 60 sekund (Czekalski, Obstawski, 2006).



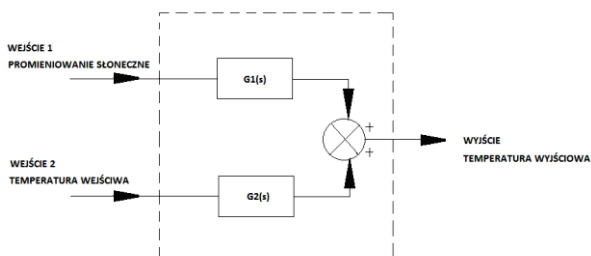
Rys. 1. Segment kolektorów rurowych próżniowych

## MODEL SEGMENTU SŁONECZNEGO

Metoda identyfikacji parametrycznej umożliwia opracowanie matematycznego modelu segmentu słonecznego w postaci układu równań różnicowych na podstawie zarejestrowanych danych eksploatacyjnych w postaci szeregów czasowych (Janiszowski, 2002). Zaletą metody jest duża swoboda podczas procesu modelowania. Osoba tworząca model w sposób subiektywny może wybrać, które spośród zarejestrowanych sygnałów powinny posłużyć do opracowania modelu, a które zostać potraktowane jako sygnały wejściowe i wyjściowe.

W procesie identyfikacji parametrycznej segment kolektorów próżniowych, podobnie jak segment kolektorów płaskich (Chochowski, 2005, 2010) potraktowano jako obiekt dwuwejściowy i jednowyjściowy (model DISO) (rys. 2). Jako sygnały wejściowe przyjęto, natężenie promieniowania słonecznego oraz temperaturę wlotową czynnika. Jako

sygnał wyjściowy przyjęto temperaturę wylotową czynnika. Takie potraktowanie segmentu kolektorów próżniowych w procesie identyfikacji umożliwi ocenę wpływu zmian natężenia promieniowania słonecznego (tor główny – G1(s)) i temperatury wlotowej czynnika (tor zakłócenia – G2(s)) na zmiany temperatury wylotowej czynnika.



Rys. 2. Model baterii kolektorów próżniowych, gdzie: G1(s), G2(s) – transmitancja operatorowa opisująca zależności pomiędzy poszczególnymi sygnałami wejściowymi i wyjściowymi

### CHARAKTERYSTYKA DNI WYBRANYCH DO ANALIZY

Analiza właściwości dynamicznych segmentu kolektorów próżniowych przedstawiona zostanie na przykładzie dwóch dni o znacznie różniącym się punkcie pracy, określonym przez parametry pracy, za które przyjęto kolejno: dobową dawkę napromienienia słonecznego, maksymalną temperaturę wejściową i wyjściową medium roboczego, dobowy rozbiór ciepłej wody użytkowej (CWU), maksymalną temperaturę cieczy w zasobniku CWU i maksymalną temperaturę otoczenia omawianego dnia (tabela 1).

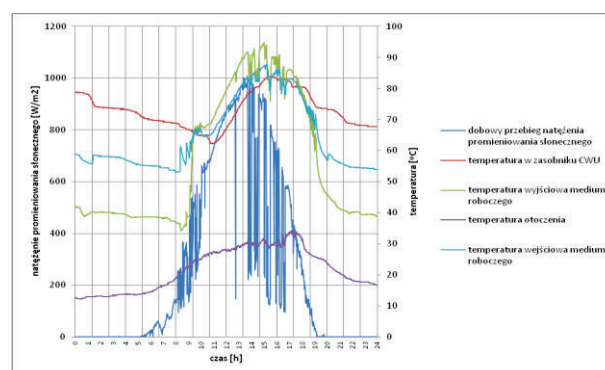
W dniu 08.08.2003 panowały zmienne warunki atmosferyczne (rys. 3). Duża zmienność natężenia promieniowania słonecznego zanotowano w godzinach popołudniowych. Dawka energii promieniowania słonecznego, jaka padła na płaszczyznę segmentu kolektorów próżniowych wyniosła 133.14 MJ, natomiast do zasobnika CWU zostało przekazane 54,96 MJ zakumulowanej energii, zatem sprawność przemian w segmencie kolektorów próżniowych osiągnęła wysoki poziom wynoszący 41 %, na co miał wpływ znaczny w ciągu doby rozbiór ciepłej wody (1193 dm<sup>3</sup>). Maksymalna temperatura wejściowa medium roboczego baterii kolektorów osiągnęła wartość 87.2<sup>o</sup>C, a temperatura wyjściowa medium roboczego z segmentu kolektorów wyniosła 93.8<sup>o</sup>C. Maksymalna temperatura w zasobniku CWU sięgnęła 83,3<sup>o</sup>C, a maksymalna temperatura otoczenia sięgnęła 33,4<sup>o</sup>C.

W dniu 10.09.2002, biorąc pod uwagę porę roku panowały bardzo dobre warunki słoneczne (tabela 1). Na powierzchnię segmentu kolektorów próżniowych padło 97.03 MJ, z czego do zasobnika CWU zostało przekazane 34,08 MJ zakumulowanej energii, zatem sprawność przemian segmentu osiągnęła poziom 35 %. Tego dnia rozbiór CWU ukształtował się na poziomie 931 dm<sup>3</sup>, natomiast temperatura wody w zasobniku osiągnęła poziom 73.7<sup>o</sup>C. Maksymalna temperatura wejściowa medium roboczego baterii kolektorów

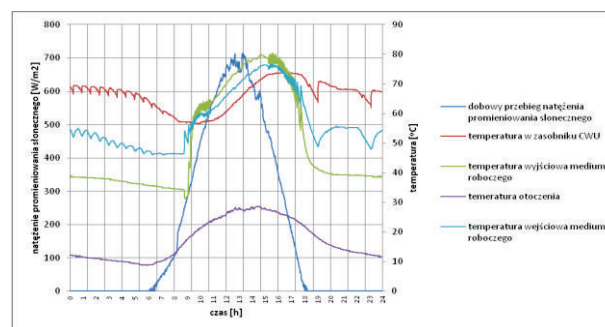
osiągnęła wartość 87.2<sup>o</sup>C, a temperatura wyjściowa 93.8<sup>o</sup>C. Maksymalna temperatura otoczenia sięgnęła 28,6<sup>o</sup>C.

Tabela 1. Parametry pracy i sprawność segmentu słonecznego

data	Dawka dobowa energii słon. [MJ]	Max. temperatura wejściowa °C	Max. temperatura wyjściowa °C	Pobór wody, dm <sup>3</sup>	Max. temperatura otoczenia °C	Max. temperatura w zasob. CWU °C	Energia zakumulowana, MJ	Sprawność, %
08.08.2003	133.14	87.2	93.8	1193	33.4	83.3	54.96	0.41
10.09.2002	97.03	76.2	79.4	931	28.6	73.7	34.08	0.35



Rys. 3. Dobowy przebieg natężenia promieniowania słonecznego i temperatur w dniu 08.08.2003



Rys. 4. Dobowy przebieg natężenia promieniowania słonecznego i temperatur w dniu 10.09.2002

Analizując dokładnie przebieg temperatury wlotowej i wylotowej czynnika z segmentu słonecznego można zauważyć jeden z negatywnych niuansów stosowania regulacji dwupołożeniowej. Polega on na cyklicznym załączaniu i wyłączaniu pompy cyrkulacyjnej w przypadku kiedy mierzona różnica pomiędzy temperaturą czynnika w segmencie a wodą w zasobniku jest na granicy zadanego gradientu załączenia. Niuans szczególnie widoczny jest w przebiegu temperatur w dniu 10.09.2002 roku. Cykliczne długotrwałe (ponad godzinne) załączanie i wyłączanie urządzeń wykonawczych powoduje przyspieszenie ich zużycia.

**ANALIZA DYNAMIKI PRACY SEGMENTU SŁONECZNEGO**

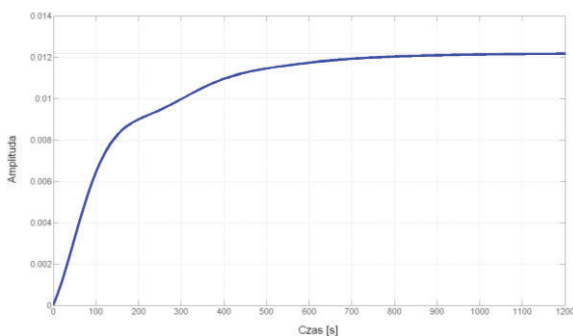
W procesie modelowania otrzymano opis właściwości segmentu słonecznego w postaci układu równań różnicowych, który jest trudny do analizy właściwości dynamicznych. Dogodniejszą formą opisu matematycznego właściwości dynamicznych modelowanego segmentu jest opis w postaci transmitancji operatorowej, zatem otrzymane równania różnicowe przekształcone zostały do postaci transmitancji dyskretnej a następnie do postaci transmitancji operatorowej. Ze względu na fakt, iż w procesie identyfikacji segment potraktowano jako obiekt dwuwęściowy i jednowęściowy, transmitancje operatorowe opisujące poszczególne tory modelu mają identyczne równanie charakterystyczne. Zatem różnice w stanach przejściowych będą wynikać z różnic wielomianów znajdujących się w licznikach transmitancji poszczególnych torów modelu związanych z opisem sygnałów wejściowych.

Na rysunku 5 przedstawiono charakterystykę skokową toru głównego modelu opracowanego na danych zarejestrowanych w dniu 08.08.2003. Przebieg przejściowy opisany transmitancją operatorową 1 ma charakter inercyjny typowy dla obiektów cieplnych. Odczytany z charakterystyki współczynnik wzmocnienia wynosi 0,0121, a zastępcza stała czasowa 119 sekund. Przebieg charakteryzuje się niewielkim czasem opóźnienia wynoszącym 11 sekund.

$$G_1(s) = \frac{4.578 \cdot 10^{-5} s^2 + 2.342 \cdot 10^{-6} s + 3.52 \cdot 10^{-8}}{s^3 + 0.02507 s^2 + 0.0006654 s + 2.895 \cdot 10^{-6}} \quad (1)$$

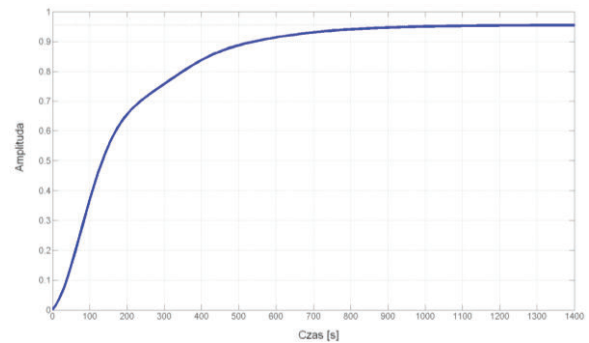
Charakterystyka skokowa toru zakłócenia (rys.6) opisanego transmitancją operatorową 2 również posiada charakter inercyjny, przy czym odczytany współczynnik wzmocnienia jest znacznie większy niż w przypadku toru głównego i wynosi 0.96. Tor zakłócenia charakteryzuje się nieco większą stałą czasową, która wynosi 150 sekund i dłuższym czasem opóźnienia wynoszącym 21.7 sekundy.

$$G_2(s) = \frac{0.001396 s^2 + 0.0001031 s + 2.766 \cdot 10^{-6}}{s^3 + 0.02507 s^2 + 0.0006654 s + 2.895 \cdot 10^{-6}} \quad (2)$$

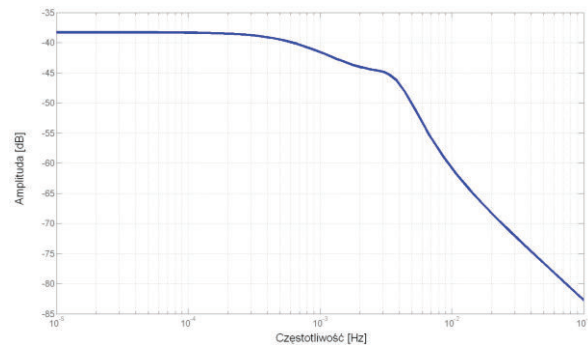


Rys. 5. Odpowiedź skokowa toru głównego w dniu 08.08.2003

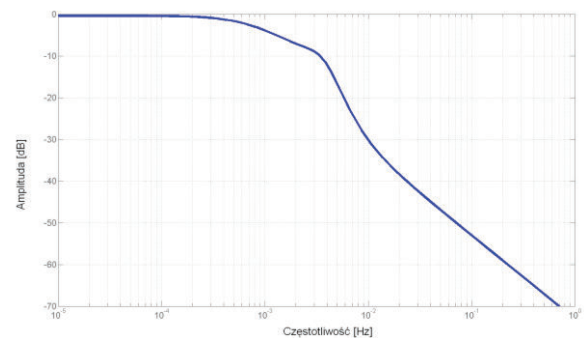
Analizując właściwości dynamiczne obu torów modelu w dziedzinie częstotliwości należy zwrócić uwagę, że pasmo przenoszenia toru głównego określone przez poziom 3 dB jest znacznie szersze niż w przypadku toru zakłócenia. Częstotliwość odcięcia toru głównego (rys. 7) wynosi 0,000927 Hz, co w dziedzinie czasu odpowiada okresowi zmian sygnału 17.9 min, a toru zakłócenia (rys. 8) 0,0055 Hz, co w dziedzinie czasu odpowiada okresowi 3.03 min.



Rys. 6. Odpowiedź skokowa toru zakłócenia w dniu 08.08.2003



Rys. 7. Charakterystyka częstotliwościowa toru głównego w dniu dla 08.08.2003



Rys. 8. Charakterystyka częstotliwościowa toru zakłócenia w dniu 08.08.2003

Podobną analizę można przeprowadzić dla charakterystyk skokowych i częstotliwościowych wyznaczonych z modelu opracowanego na danych eksploatacyjnych zarejestrowanych w dniu 10.09.2002.

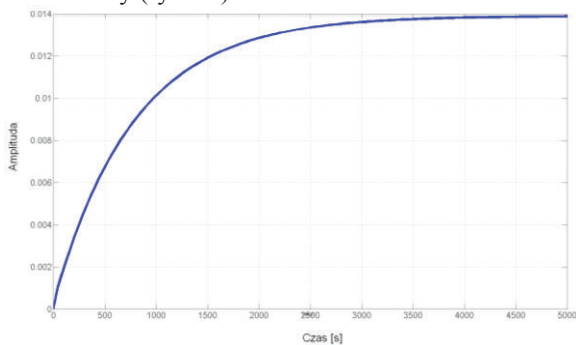
Odpowiedź skokowa toru głównego, którego właściwości dynamiczne są określone transmitancją operatorową 3, posiada klasyczny charakter inercyjny (rys. 9). Współczynnik wzmocnienia wyniósł podobnie jak w poprzednio analizowanym przypadku 0.014, natomiast zastępcza stała czasowa jest blisko 6 razy większa i wynosi 656 sekund.

$$G_1(s) = \frac{2.8089 \cdot 10^{-5} s^2 + 1.622 \cdot 10^{-6} s + 4.236 \cdot 10^{-8}}{s^3 + 0.05576 s^2 + 0.002448 s + 3.0477 \cdot 10^{-6}} \quad (3)$$

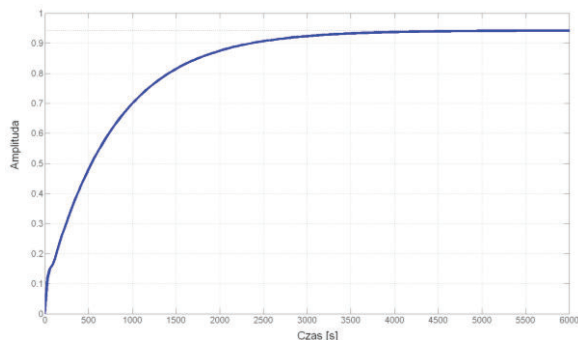
Odpowiedź skokowa dla toru zakłócenia opisanego transmitancją operatorową 4 ma także charakter inercyjny (rys. 10). Współczynnik wzmocnienia wynosi 0.939, natomiast zastępcza stała czasowa 722 sekundy.

$$G_2(s) = \frac{0.006028 s^2 + 0.0002265 s + 2.872 \cdot 10^{-6}}{s^3 + 0.05576 s^2 + 0.002448 s + 3.0477 \cdot 10^{-6}} \quad (4)$$

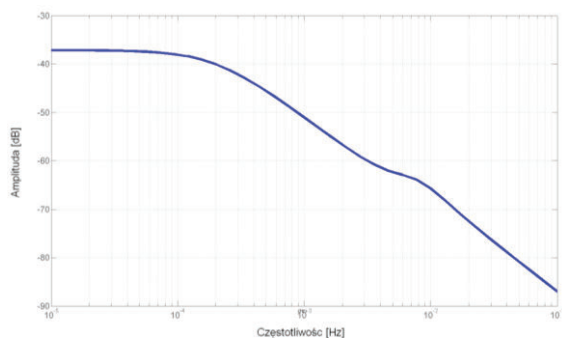
Analizując właściwości toru głównego w dziedzinie częstotliwości należy zauważyć, że częstotliwość odcięcia wynosi 0,00025 Hz (rys. 11), co w dziedzinie czasu odpowiada okresowi zmian sygnału 66.6 minuty, natomiast w przypadku toru zakłócenia częstotliwość odcięcia wynosi 0.0013 [Hz], co w dziedzinie czasu odpowiada okresowi zmian sygnału 12.8 minuty (rys. 12).



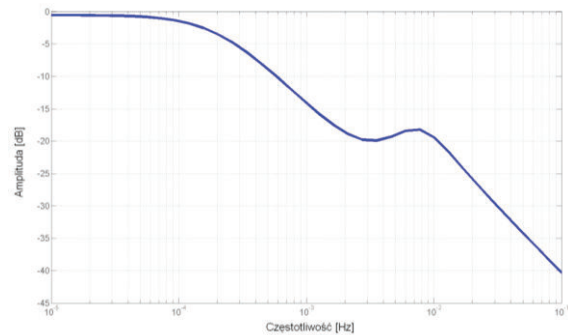
Rys. 9. Odpowiedź skokowa toru głównego w dniu 10.09.2002



Rys. 10. Odpowiedź skokowa toru zakłócenia w dniu 10.09.2002



Rys. 11. Charakterystyka częstotliwościowa toru głównego w dniu 10.09.2002



Rys. 12. Charakterystyka częstotliwościowa toru zakłócenia w dniu 10.09.2002

## PODSUMOWANIE i WNIOSKI

Dysponując danymi eksploatacyjnymi w postaci szeregów czasowych można opracować, w oparciu o identyfikację parametryczną, model matematyczny segmentu słonecznego umożliwiającego określenie jego właściwości dynamicznych zarówno w dziedzinie czasu jak i częstotliwości poprzez analizę sporządzonych charakterystyk skokowych i częstotliwościowych. z dokonanej analizy wynika, że właściwości dynamiczne segmentu słonecznego zależą od panujących parametrów pracy, a ściślej od zmienności natężenia promieniowania słonecznego i temperatury czynnika. Należy zauważyć, że tor główny związany z natężeniem promieniowania słonecznego ma zawsze niższy współczynnik wzmocnienia, krótszą stałą czasową oraz szersze pasmo przenoszenia. w porównaniu z torem zakłócenia związanym z temperaturą wlotową czynnika. Ze względu na zmienny punkt pracy w celu zwiększenia sprawności przemian należy zastosować sterowanie adaptacyjne pracą segmentu słonecznego polegające na dopasowaniu masowego przepływu czynnika do aktualnych parametrów pracy. Algorytm sterowania adaptacyjnego powinien być oparty o regulację ciągłą realizowaną np.: przez regulator PI lub PID standardowo implementowany w sterownikach PLC, przy czym ze względu na zmienny punkt pracy w celu zapewnienia optymalnej jakości regulacji koniecznym staje się opracowanie algorytmu doboru nastaw regulatora.

## LITERATURA CYTOWANA:

Carillo Andrés A., Cejudo Lopez J.M., Dominguez Munoz F., Molero Villar N., Rodriguez Garcia E., 2009, *Numerical 3-D heat flux simulation on flat-plate solar collectors*, Solar Energy Vol. 83, pp. 1086-1092

Costa M., Oliva A., Perrez Segarra C.D., 1991, *Numerical simulation of solar collectors: the effect of nonuniform and nonsteady state of the boundary conditions*, Solar Energy, Vol. 47,

Chochowski A., Czekalski D., 2005, *Badania eksploatacyjne hybrydowego systemu zasilania energią z wykorzystaniem układu archiwizacji,*

- transmisji i przetwarzania danych*, Inżynieria Rolnicza nr 14
- Chochowski A., Obstawski P., 2005, *Model parametryczny baterii kolektorów słonecznych*, Inżynieria Rolnicza nr 14
- Czekalski D., Obstawski P., 2006, *Wydajność hybrydowego systemu pozyskiwania energii ze źródeł odnawialnych w warunkach eksploatacyjnych*, Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja nr 2
- Chochowski A., Czekalski D., Obstawski P., 2009 *Monitorowanie funkcjonowania hybrydowego systemu odnawialnych źródeł energii*, Przegląd Elektrotechniczny nr 8, p. 92-95
- Chochowski A., Czekalski D., Obstawski P., 2010, *Właściwości dynamiczne baterii kolektorów słonecznych*, Przegląd Elektroniczny nr 6
- GUS, 2011, *Energia ze źródeł odnawialnych w 2010r.*, Warszawa
- Janiszowski K., 2002, *Identyfikacja modeli parametrycznych w przykładach*, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT. Warszawa
- Kamma W., 1985, *The approximate temperatures within a flat-plate solar collector under transient conditions*, Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 28, No. 2, pp. 433-440,
- Kompendium Ogrzewnictwa i Klimatyzacji, 2008, OMNI SCALA, , Wrocław.
- Nayak J. K., Amer E. H., 2000, *Experimental and theoretical evaluation of dynamic test procedures for solar flat-plate collectors*, Solar Energy vol. 69, 377-401
- Norma PN-EN 12975-2 „*Słoneczne systemy grzewcze i ich elementy. Kolektory słoneczne. Część 2: Metody badań*”, 2007
- Kalogirou S.A., 2006, *Prediction of a flat-plate collector performance parameters using artificial neural networks*, Solar Energy, 80 pp. 248-259