

## Roman ŚMIERZCHALSKI, Przemysław MIKULSKI

POLITECHNIKA GDAŃSKA,  
ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk

# Badanie układu regulacji temperatury powietrza ogrzewanego w próżniowym kolektorze słonecznym

Dr hab. inż. Roman ŚMIERZCHALSKI

Studia wyższe ukończył na Wydziale Elektrycznym PG specjalność automatyka. Od roku 1980 pracował w Akademii Morskiej w Gdyni, również jako elektroautomatyk na statkach. Od roku 2009 pracuje na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki PG. Zajmuje się sterowaniem i automatyką systemów okrętowych, metodami sztucznej inteligencji. Jest autorem ponad 200 prac naukowych, książek, skryptów, artykułów i członkiem organizacji technicznych oraz naukowych.



e-mail: romsmier@eia.pg.gda.pl

Mgr inż. Przemysław MIKULSKI

Studia wyższe ukończył w roku bieżącym na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki w Gdańsku. Pracuje na stanowisku konstruktora w Stoczni Marynarki Wojennej S.A. Zajmuje się systemami sterowania, zabezpieczeń, łączności okrętowej oraz energetyką odnawialną.



e-mail: przemyslaw.mikulski87@gmail.com

### Streszczenie

W pracy przedstawiono badanie układu regulacji temperatury powietrza na zmodernizowanym stanowisku badawczym kolektora słonecznego. Zaprezentowano metody regulacji temperatury wyjściowej kolektora oraz wyniki z przeprowadzonych pomiarów. Na ich podstawie stwierdzono, że najbardziej efektywną metodą regulacji temperatury wyjściowej jest mieszanie powietrza z wykorzystaniem regulatora proporcjonalno-całkującego (PI).

**Słowa kluczowe:** kolektor słoneczny powietrzny, metody regulacji temperatury, badanie układu sterowania.

## The study of a temperature control system for the air heated in a vacuum solar collector

### Abstract

The paper describes the study of a control system of a solar collector in the modernized station. The technical parameters and details of this innovative solution of collectors as well as the test results are presented in [1]. The basis of the solution is to use a novel method of mixing air to the control output temperature. The medium (air) heated by the collector at the output is mixed with the ambient air passing into the fan. The output temperature varies depending on the rotational speeds of the fans. The first section of the paper concerns the possibility of replacing fossil fuels with renewable energy development. It presents some aspects of the use of solar collectors for heating the air in the construction market in Poland. The second section contains the description of the modernized station for testing the control system of the solar collector (Fig.2). In the third section there is the block diagram of the control system of the solar collector (Fig.3) with its description. The fourth section contains the results of studies of the control system of the solar collector. There are presented the graphs of the output and setpoint temperature for heating and cooling processes, with one and two fans (air mixing). For each controller there is determined the setpoint by the method of manual tuning (engineering). On the basis of the studies it was found that the most effective method of output temperature control was the method of air mixing with a PI controller. For the air heating process the operation of one fan at the maximum speed is sufficient.

**Keywords:** solar collector for heating air, air mixing, methods of control output temperature, controllers.

## 1. Wprowadzenie

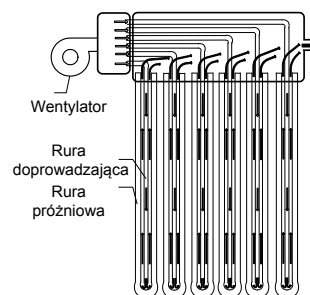
W związku rozwojem technologii oraz wyczerpującymi się paliwami kopalnymi (ropa, gaz itp.) występuje konieczność zwiększenia bezpieczeństwa energetycznego krajów wysokorozwiniętych poprzez wykorzystanie energii ze źródeł odnawialnych (wiatr, woda, słońce, itp.). Rozwój energetyki odnawialnej przyczynia się do ograniczenia problemów ekologicznych występujących przy rozwiązaniach tradycyjnych. Podstawowym czynnikiem dostarczającym energię cieplną jest słońce. Pozwala także, na uzyskanie energii elektrycznej po konwersji, dzięki zastosowaniu paneli PV. Zwiększająca się wysokość dotacji unijnych dla systemów bazujących na wykorzystaniu energii „zielonej” świadczy

o opłacalności inwestycji. Określono strategiczne cele dla bezpieczeństwa energetycznego Polski. Podstawowym jest zwiększenie udziału energii słonecznej w zużyciu energii odnawialnej do poziomu 4,4% w roku 2020. W związku z modernizacją sektora energetycznego rośnie zapotrzebowanie na kolektory charakteryzujące się efektywną konwersją energii słonecznej. Chociaż ogrzewanie powietrzne w Polsce nie jest popularną metodą zabezpieczania energetycznego budynków to w ciągu ostatnich lat zaobserwowano zwiększenie popytu na tego typu systemy. Wynika to, z redukcji kosztów instalacji oraz eksploatacji systemów wykorzystujących powietrze jako czynnik roboczy. Szczegóły dotyczące budowy oraz zastosowania powietrznego próżniowego kolektora słonecznego zostały przedstawione w pozycji [1] oraz pracy [2].

W dalszej części artykułu przedstawiony zostanie opis zmodernizowanego stanowiska kolektora słonecznego oraz wyniki pomiarów i badań układu regulacji temperatury wyjściowej.

## 2. Kolektor słoneczny do grzania powietrza - opis stanowiska do badań

Działanie kolektora słonecznego do grzania powietrza polega na oddawaniu ciepła strumieniowi przepływającego powietrza w rurach próżniowych [7]. Budowa kolektora pracującego według idei przedstawionej w [6], składa się z zestawu szklanych rur próżniowych pochłaniających energię słoneczną i rur doprowadzających powietrze do części dolnej szklanych rur próżniowych [7]. Działanie kolektora przedstawia się w następujący sposób: powietrze sprężone przez wentylator doprowadzane jest do dolnej części rury próżniowej. W wewnętrznej części rury próżniowej, pochłaniana jest przez powietrze energia cieplna. Ogrzane powietrze następnie doprowadzane jest do zbiorczego kolektora. Schemat działania przedstawia poniższy rysunek (rys. 1) [7].

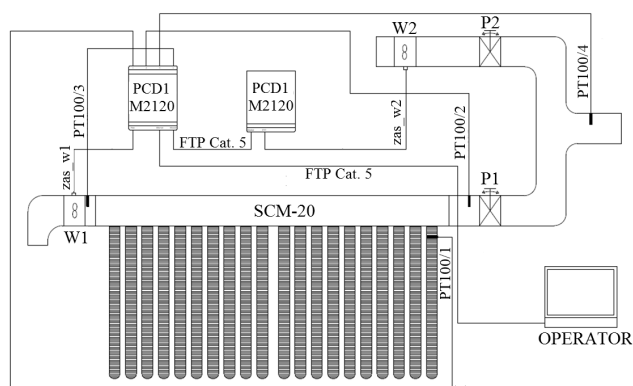


Rys. 1. Schemat działania systemu do rozprowadzania czynnika ogrzewanego w kolektorze słonecznym

Fig. 1. Diagram of the system for distributing the heated medium in a solar collector

Zastosowane w kolektorach próżniowe rury charakteryzują się wysoką absorpcją energii słonecznej i niską emisją. Rury te pochłaniają również energię promieniowania rozproszonego. Prosta konstrukcja kolektora implikuje nieskomplikowany montaż tych urządzeń. Moduły lekkich kolektorów do grzania powietrza mogą być montowane niezależnie lub jako zespoły kolektorów na dachach, elewacjach ścian lub wydzielonym nasłonecznionym miejscu. Dzięki zastosowaniu odpowiednich materiałów w kolektorach nie występuje problem przegrzania podczas dużego nasłonecznienia jak i w okresie stagnacji. Zastosowanie systemu do rozprzeczania powietrza ogrzewanego w kolektorze słonecznym zapewnia wysoką sprawność urządzenia oraz wydajność cieplną.

W ramach modernizacji istniejącego stanowiska badawczego zamontowano dodatkowo kanały wentylacyjne z przepustnicami P1, P2 oraz wentylator W2, który wymusza obieg powietrza z otoczenia, sterowany przez osobny sterownik (rys. 2). Pozwala to na doprowadzenie czynnika roboczego ogrzanego oraz powietrza z otoczenia do trójnika. Dzięki takiemu rozwiązaniu uzyskano możliwość mieszania powietrza podgrzanego w kolektorze z powietrzem z otoczenia. Stabilizację temperatury powietrza wyjściowego uzyskuje się przez zmianę prędkości obrotowej wentylatorów W1 powietrza podgrzanego i W2 powietrza z otoczenia.

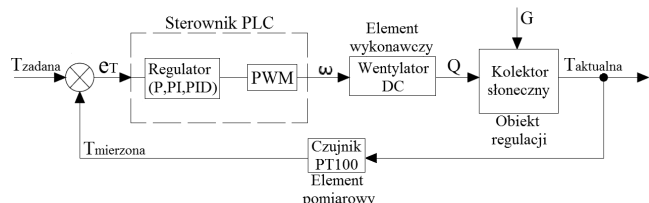


Rys. 2. Schemat blokowy zmodernizowanego stanowiska kolektora słonecznego powietrznego

Fig. 2. Block diagram of the modernized position of a solar collector

### 3. Opis układu sterowania

Układ sterowania pracą kolektora słonecznego oparty jest o zamknięty układ regulacji temperatury z ujemnym sprzężeniem zwrotnym i składa się z regulatora PWM, wentylatora, kolektora słonecznego jako obiektu regulacji oraz czujnika pomiaru temperatury. W regulatorze PWM szerokości impulsu sterującego (współczynnika wypełnienia) powoduje zmianę wartości napięcia średniego PWM, a w efekcie prędkości obrotowej wentylatorów. Poszczególne elementy przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Schemat blokowy układu sterowania kolektora słonecznego powietrznego [4]

Fig. 3. Block diagram of a solar collector control system

Przy realizacji sterowania temperaturą na wyjściu układu wprowadzono następujące wielkości:

- $T_{zad}$  – temperaturę zadaną przez operatora procesu [°C]
- $T_{mierzona}$  – temperaturę mierzoną na wyjściu układu [°C]

- $e_r$  – uchyb temperatury
- $\omega$  – wielkość sterującą (prędkość obrotową wentylatora, [obr./min]),
- $Q$  – wielkość sterowaną (przepływ powietrza [m<sup>3</sup>/h]),
- $G$  – zakłócenia – zmienny poziom nasłonecznienia [W/m<sup>2</sup>],
- $T_{aktualna}$  – temperaturę aktualną na wyjściu z układu [°C].

### 4. Badania układu sterowania

Badania układu sterowania kolektora słonecznego realizowano dla dwóch wariantów regulacji temperatury poprzez zmianę prędkości obrotowej wentylatora W1 (natężenia przepływu powietrza) i mieszanie powietrza z użyciem wentylatorów W1 i W2 (rys. 2).

Określenie modelu kolektora słonecznego jako obiektu sterowania, który w rozważaniach przyjęto jako „black-box”, napotyka na szereg trudności. Ze względu na zmienne warunki pracy kolektora: nasłonecznienia i temperatury zewnętrznej powietrza identyfikacja modelu jest trudna. W związku z powyższym oraz faktem, iż zaproponowano do implementacji regulator PID z biblioteki HEVAC sterownika SAIA [8, 9], którego zakresy nastaw są dobrane standardowo dla typowych procesów grzewczych, przyjęto eksperymentalną metodę strojenie regulatora.

Podczas eksperymentalnego doboru nastaw kierowano się następującymi zależnościami i ograniczeniami:

- dla członu P duża wartość współczynnika wzmocnienia proporcjonalnego  $k_p$  spowoduje wystąpienie przeregulowań sygnału oraz poprawi dynamikę układu – zwiększenie prędkości obrotowej wentylatora nastąpi w małych odstępach czasu,
- dla członu I stosunkowo krótki czas  $T_i$  spowoduje szybkie zmiany wielkości sterowanej przyczyniając się do krótszego czasu narastania. Przy krótkim czasie całkowania otrzymujemy szybkie zmiany wielkości mierzonej (krótki czas narastania), natomiast dla zbyt małej wartości pętla regulacji staje się niestabilna,
- dla członu D ograniczenie czasu  $T_d$  wyeliminuje oscylacje sygnału (brak odchyłek wielkości sterowanej zapewni stabilność pracy wentylatora). Czas różniczkowania powoduje intensywne zmiany wielkości mierzonej (oscylacje sygnału). W celu ograniczenia wpływu różniczkowania na pracę układu, należy zmniejszyć do minimum wartość  $T_d$ ,
- martwa strefa pozwala na ograniczenie zmian wielkości regulowanej w odniesieniu do wahań danych pomiarowych. Przyjęcie dużej wartości powoduje niestabilność pętli regulacji,
- dla wielkości regulowanej  $Y$  wartości graniczne przyjęto w oparciu o zakres napięcia roboczego wentylatorów. Przy doborze nastaw przyjęto następujące kryteria sterowania:
- jak najkrótszy czas regulacji,
- osiaganie wartości zadanej w określonym przedziale czasowym,
- brak oscylacji sygnału,
- brak przeregulowań.

Na tej podstawie w bloku regulatora PID eksperymentalnie ustalono następujące wartości nastaw:

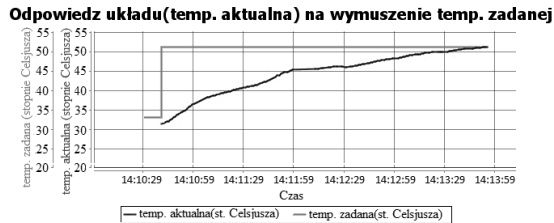
- wzmocnienie członu proporcjonalnego  $k_p = 25$
- czas całkowania  $T_i = 9,9$  sek
- czas różniczkowania  $T_d = 1$  sek
- czas filtrowania członu różniczkującego  $T_f = 10$  sek
- ograniczenia wielkości wyjściowej: min – 1400, max – 3300.

Wartości graniczne na wyjściu  $Y$  przyjęto na podstawie zakresu napięcia roboczego dla wentylatora oraz zakresu przetwornika C/A o rozdzielczości 12 bitów (0 – 4096) dla PWM gdzie: 1400 odpowiada napięciu równemu 10 V przy, którym wirnik startuje, z kolei 3300 odpowiada napięciu równemu 27,6 V przy, którym wentylator obraca się z prędkością maksymalną. Na podstawie powyższych wartości należy zaznaczyć, że wpływ członu różniczkującego na wyjście jest nieznaczny. Z tego względu regulator pracował jako PI.

Dla tak przyjętych nastaw regulatora i układu z wykorzystaniem tylko jednego wentylatora W1 badano proces grzania oraz chłodzenia powietrza. W dniu wykonywania badań (15 marzec, 2014 godz. 13-15) natężenie promieniowania słonecznego wynosiło 450

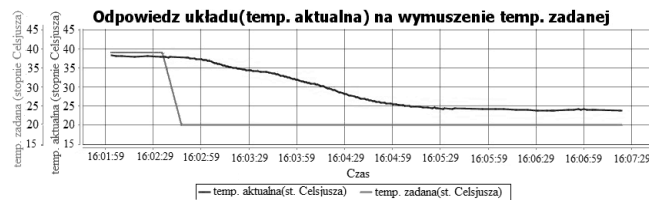
W/m<sup>2</sup> a temperatura powietrza 11°C. Po uruchomieniu systemu i ustabilizowaniu temperatury, wymuszono zwiększenie temperatury z 31 do 51°C, a następnie zmniejszenie z 40 do 20°C.

Wyniki przebiegu temperatur dla procesu grzania i chłodzenia przy skokowej zmianie wartości zadanej przedstawiono na rys. 4 i 5.



Rys. 4. Przebiegi temperatury mierzonej i zadanej przy wymuszeniu skokowym (grzanie) [4]

Fig. 4. Waveforms of the measured and forcing setpoint (step function) temperature (heating process)

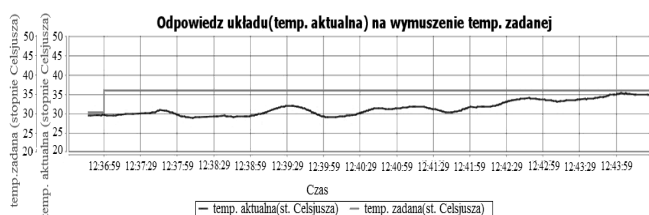


Rys. 5. Przebiegi temperatury mierzonej i zadanej przy wymuszeniu skokowym (chłodzenie) [4]

Fig. 5. Waveforms of the measured and forcing setpoint (step function) temperature (cooling process)

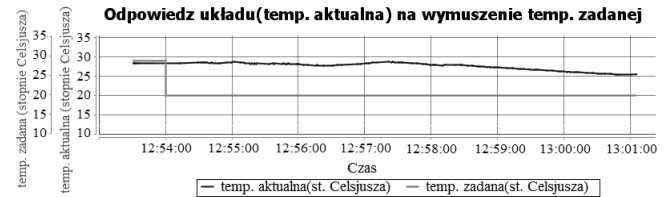
Drugim wariantem badań było wykorzystanie metody mieszania powietrza ogrzanego z powietrzem z otoczenia w celu stabilizacji temperatury na wyjściu kolektora. Aby stabilizować temperaturę powietrza, sterowaniu podlegały dwa wentylatory W1 i W2. Praca dwóch wentylatorów odbywała się z wykorzystaniem sygnałów sterujących PWM z funkcją przełączania na grzanie i chłodzenie. W przypadku wymuszenia wzrostu temperatury zadanej (proces grzania) opracowany algorytm na podstawie sygnału z regulatora (badano odpowiednio regulatory P, PI, lub PID) zwiększał prędkość obrotową wentylatora W1, zmniejszając o taką samą wartość prędkość obrotową wentylatora W2. W przypadku chłodzenia algorytm zmniejszał obroty wentylatora W1, natomiast wentylatora W2 zwiększał. Wraz ze zmniejszaniem się wartości uchybu temperatury (dążąc do temperatury zadanej), prędkości obydwu wentylatorów ustalały się na podobnych wartościach.

Nastawy regulatora P, PI i PID dla wentylatora W2 były identyczne jak dla wentylatora W1. Dla dobranych eksperymentalnie nastaw regulatora badano przebiegi regulowanych temperatur. Dla regulatora proporcjonalnego P uwzględniając zależności i ograniczenia, przyjęto następujące parametry:  $k_p = 25$ ,  $Y_{min} = 1400$ ,  $Y_{max} = 3300$ , martwa strefa : 10 %. Wyniki pracy układu dla procesu grzania i chłodzenia z regulatorem P przedstawiono na rys. 6 i 7.



Rys. 6. Przebieg temperatury mierzonej po wymuszeniu zadana (grzanie) dla metody mieszania powietrza z regulatorem P (dla  $k_p=25$ ) [4]

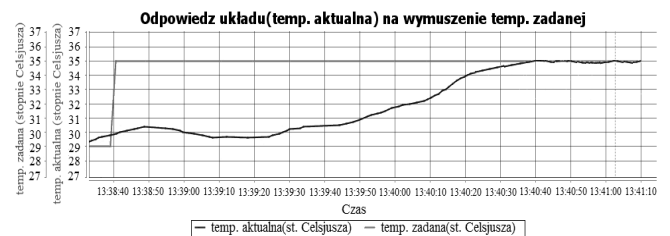
Fig. 6. Variation of the measured temperature after forcing setpoint (heating process) for the method of air mixing with the P controller (for  $k_p=25$ )



Rys. 7. Przebieg temperatury mierzonej po wymuszeniu zadana (chłodzenie) dla metody mieszania powietrza z regulatorem P (dla  $k_p=25$ ) [4]

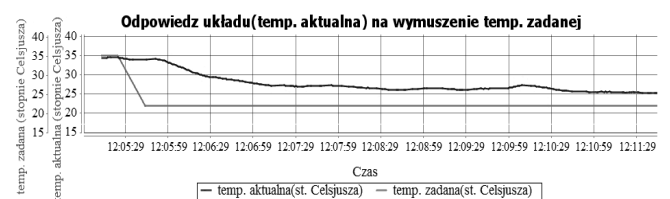
Fig. 7. Variation of the measured temperature after forcing setpoint (cooling process) for the method of air mixing with the P controller (for  $k_p=25$ )

Dla regulatora proporcjonalno-całkującego PI, przyjęto następujące parametry:  $k_p = 25$ ,  $T_i = 2,5$ , offset: 0°C – brak wpływu na uchyb regulacji,  $Y_{min} = 1400$ ,  $Y_{max} = 3300$ , martwa strefa: 10%. Wyniki pracy układu dla procesu grzania i chłodzenia przedstawiono na rys. 8 i 9.



Rys. 8. Przebieg temperatury mierzonej po wymuszeniu zadana (grzanie) dla metody mieszania powietrza z regulatorem PI (dla  $k_p=25$ ;  $T_i=2,5$ ) [4]

Fig. 8. Variation of the measured temperature after forcing setpoint (heating process) for the method of air mixing with the PI controller (for  $k_p=25$ ;  $T_i=2,5$ )

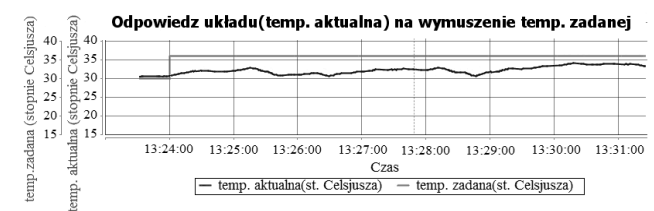


Rys. 9. Przebieg temperatury mierzonej po wymuszeniu zadana (chłodzenie) dla metody mieszania powietrza z regulatorem PI (dla  $k_p=25$ ;  $T_i=2,5$ ) [4]

Fig. 9. Variation of the measured temperature after forcing setpoint (cooling process) for the method of air mixing with the PI controller (for  $k_p=25$ ;  $T_i=2,5$ )

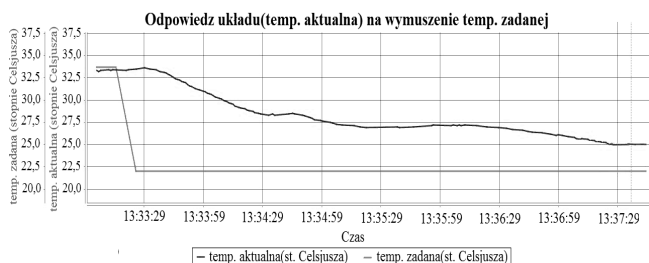
Dla regulatora proporcjonalno-całkująco-różniczkującego PID przyjęto następujące nastawy:  $k_p = 25$ ,  $T_i = 2,5$ ,  $T_d = 10$ ,  $T_I = 5$  - czas filtracji części różniczkującej, offset: 0°C – brak wpływu na uchyb regulacji,  $Y_{min} = 1400$ ,  $Y_{max} = 3300$ , martwa strefa : 10 %. Wyniki pracy układu dla procesu grzania i chłodzenia przedstawiono na rys. 10 i 11.

Na podstawie powyższych badań układu sterowania stwierdzono, że układ regulacji z regulatorem PI najlepiej steruje wielkością mierzoną.



Rys. 10. Przebieg temperatury mierzonej po wymuszeniu zadana (grzanie) dla metody mieszania powietrza z regulatorem PID (dla  $k_p=25$ ;  $T_i=2,5$ ;  $T_d=10$ ,  $T_I=5$ ) [4]

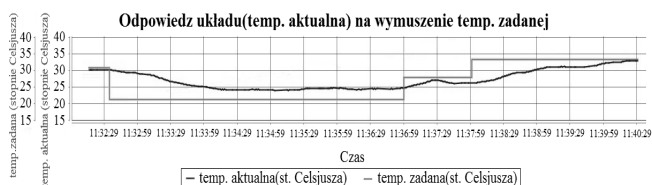
Fig. 10. Variation of the measured temperature after forcing setpoint (heating process) for the method of air mixing with the PID controller (for  $k_p=25$ ;  $T_i=2,5$ ;  $T_d=10$ ,  $T_I=5$ )



Rys. 11. Przebieg temperatury mierzonej po wymuszeniu zadanej (chłodzenie) dla metody mieszania powietrza z regulatorem PID (dla  $k_p=25$ ,  $T_i=2,5$ ;  $T_d=10$ ,  $T_I=5$ ) [4]

Fig. 11. Variation of the measured temperature after forcing setpoint (cooling process) for the method of air mixing with the PID controller (for  $k_p=25$ ;  $T_i=2,5$ ;  $T_d=10$ ,  $T_I=5$ )

W dalszej części badań eksperymentalnych poprzez zmianę wartości zadanej temperatury wyjściowej przeprowadzono proces chłodzenia a następnie grzania w celu sprawdzenia efektywności metody mieszania powietrza. Przebieg temperatury przedstawiono na rys. 12.

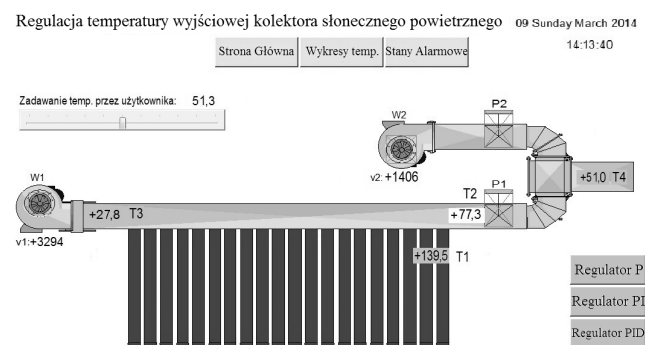


Rys. 12. Przebieg temperatury mierzonej po wymuszeniu zadanej (chłodzenie i grzanie) dla metody mieszania powietrza z regulatorem PI (dla  $k_p=25$ ,  $T_i=2,5$ ) [4]

Fig. 12. Variation of the measured temperature after forcing setpoint (cooling and heating process) for the method of air mixing with the PI controller (for  $k_p=25$ ;  $T_i=2,5$ )

Sterowanie prędkością obrotową zarówno wentylatora W1 i W2 w przypadku metody mieszania powietrza dla chłodzenia i grzania, pozwala na płynną regulację temperatury wyjściowej kolektora.

Kontrola pracy układu była możliwa dzięki realizacji wizualizacji za pomocą tablicy synoptycznej przedstawiającej stanowisko kolektora słonecznego z wszystkimi urządzeniami (rys. 13). Po wymuszeniu zmian temperatury system rejestrował parametry z czujników pomiarowych. Na rys. 13 przedstawia stronę główną wizualizacji pracy układu regulacji kolektora słonecznego.



Rys. 13. Okno strony głównej tablicy synoptycznej zrealizowanej w Control Maestro [4]

Fig. 13. Window of the main page of the synoptic table realized in Control Maestro

## 5. Wnioski

Na podstawie badań, można stwierdzić, że układ regulacji z początkowymi nastawami regulatorów nie spełniał wymogów kryteriów sterowania. Z tego względu przeprowadzono strojenie regulatorów eksperymentalnie. Uzyskano w ten sposób nastawy regulatorów, dla których regulacja temperatury wyjściowej spełniała wymagania według określonych kryteriów. Ponadto wykorzystanie pojedynczego wentylatora W1 do grzania powietrza w układzie kolektora słonecznego przyniosło wymierne efekty regulacji temperatury wyjściowej (rys. 4 – czas regulacji przy zmianie temperatury zadanej o  $20^{\circ}\text{C}$  wyniósł 3,5 minuty). W przypadku procesu chłodzenia znacznie lepszą metodą okazało się zastosowanie mieszania powietrza. Sterowanie prędkością obrotową zarówno wentylatora W1 i W2 w przypadku metody mieszania powietrza, pozwoliło na płynną regulację temperatury wyjściowej kolektora. Na podstawie wyników pomiarów stwierdzono, że regulator proporcjonalno-całkujący był najefektywniejszą metodą do regulacji temperatury wyjściowej za pomocą mieszania powietrza.

Głównym zakłóceniem wpływającym na osiągnięte poziomy temperatury było zmienne natężenie promieniowania słonecznego, które zmieniało się w zależności od pory dnia i zachmurzenia.

Zaobserwowano stosunkowo duże spadki wartości temperatury za kolektorem w stosunku do temperatury wyjściowej układu, wynikające z strat ciepłych oraz konstrukcji stanowiska.

Maksymalna różnica pomiędzy temperaturą wejściową kolektora a wyjściową wyniosła  $66,5^{\circ}\text{C}$ . Dla tego przypadku obliczona sprawność kolektora wynosiła 67%.

## 6. Literatura

- [1] Gołębiowski S., Wiśniewski G.: Kolektory słoneczne. Energia słoneczna w mieszkalnictwie, hotelarstwie i drobnym przemyśle, Wyd. MEDIUM, Warszawa 2000.
- [2] Kramer K.: Collector test according to EN 12975-1,2:2006, Fraunhofer-Institute for Solar Energy Systems ISE, 8th November 2007.
- [3] Mikulski P.: Badanie własności kolektora słonecznego do grzania powietrza, praca dyplomowa, EiA, Gdańsk 2011.
- [4] Mikulski P.: Dobór metody regulacji temperatury wyjściowej kolektora słonecznego z wykorzystaniem sterownika PLC SAIA, praca dyplomowa, EiA, Gdańsk 2014.
- [5] Różycka E.: Analiza opłacalności zastosowania niekonwencjonalnych źródeł energii w projektowanym budynku jednorodzinny. Kolektory słoneczne, pompy ciepła. Politechnika Warszawska, Tom 11. 2009.
- [6] Śmierchalski R., Trębowski R.: System do rozprowadzania czynnika ogrzewanego w kolektorze słonecznym, Patent nr 215025, Urząd Patentowy, Warszawa, 2013.
- [7] Śmierchalski R., Trębowski R.: Badanie właściwości eksploatacyjnych próżniowego kolektora słonecznego do grzania powietrza, PAK vol. 56, nr 1/2010.
- [8] SAIA DDC Plus, System approaches for building automation HeaVAC-SE library, 2013.
- [9] SAIA Project Maganer - Hvac online manual, Help Menu 2013.

otrzymano / received: 25.05.2014

przyjęto do druku / accepted: 01.07.2014

artykuł recenzowany / revised paper