

# Możliwość regulacji temperatury na stanowisku testowym do badania właściwości elastomerów

## Possibility of temperature control on the test point study of elastomer properties

MAREK STEMBAŁSKI  
WAĆLAW SKOCZYŃSKI  
JAKUB SANDECKI  
ANDRZEJ ROSZKOWSKI  
PAWEŁ PREŚ\*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.12.198>

Przedstawiono system kontroli i utrzymania temperatury w zbiorniku wykorzystywanym do testów zmęczeniowych elementów. Zaprojektowany system umożliwia osiągnięcie i utrzymanie stałej temperatury w zakresie od 17 do 45°C z odchyłką  $\pm 0,5^\circ\text{C}$ . System kontroli temperatury został skonstruowany z zastosowaniem ogniw Peltiera oraz układu sterowania Arduino Uno.

**SŁOWA KLUCZOWE:** kontrola temperatury, moduł Peltiera, właściwości elastomerów, układ do sterowania temperaturą

*The system of control and maintenance of temperature in the tank used for fatigue tests of the elements is presented. The designed system enables reaching and maintaining a constant temperature in the range from 17 to 45°C with a slope of  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ . The temperature control system was implemented using the Peltier cells and the Arduino Uno control system.*

**KEYWORDS:** temperature control, Peltier module, properties of elastomers, temperature control system

Powstawanie nowych materiałów jest bardzo istotnym czynnikiem, mającym wpływ na kształt oraz parametry wyrobów. Typowymi materiałami są stopy stali, ceramika, elastomery i materiały kompozytowe.

Materiały elastomerowe są to związki wielkocząsteczkowe, mające zdolność do odwracalnej deformacji pod wpływem działania sił zewnętrznych w temperaturze pokojowej. Ważną ich cechą jest zależność właściwości mechanicznych od zmian temperatury [2–4]. Z tego względu konieczne jest zbadanie pracy elementów elastomerowych w różnych warunkach otoczenia, by określić ich przydatność. Znajdują one wykorzystanie np. w systemach adaptacyjnej absorpcji obciążeń udarowych [1].

Opisywane w artykule stanowisko do badania elementów wykonanych z elastomerów powstało na potrzeby firmy zajmującej się projektowaniem i produkcją układów podwozia, elementów konstrukcyjnych oraz podzespołów mechanicznych układów napędowych. Celem badań było opracowanie sposobu pomiaru i kontroli temperatury w zbiorniku wykorzystywanym do testów zmęczeniowych elementów wykonanych z elastomerów. Przed zaprojektowaniem systemu kontroli temperatury określono wymagania dotyczące opisywanego systemu.

### Wymagania dotyczące systemu pomiaru temperatury

System kontroli temperatury powinien umożliwiać wybór temperatury z zakresu od 17 do 45°C, z dokładnością do 0,5°C. Zadaniem systemu będzie uzyskanie i utrzymanie określonej temperatury z dokładnością do  $\pm 0,5^\circ\text{C}$  względem jej zadanej wartości, w zbiorniku stanowiska testowego. Rozwiązanie to powinno być odporne na wpływ temperatury otoczenia.

System ma być programowo zdolny do reakcji na zmiany temperatury, bez względu na stopień izolacji termicznej zapewniany przez pojemnik.

W skład stanowiska testowego powinny wchodzić:

- zbiornik o pojemności ok. 1 m<sup>3</sup> wypełniony powietrzem,
- ogniwo Peltiera umieszczone w ścianie zbiornika,
- radiatory przymocowane po obu stronach ogniwa, które ułatwią przepływ energii cieplnej, przy czym dwa z nich mają się znaleźć po aktywnej stronie ogniwa, wewnątrz testowego zbiornika, a pozostałe dwa – po reaktywnej stronie ogniwa, na zewnątrz zbiornika,
- wentylatory o mocy 30 W, przymocowane do radiatorów i zapewniające ciągły przepływ powietrza.

### Moduł Peltiera

Moduł Peltiera jest półprzewodnikowym urządzeniem termoelektrycznym, które wykorzystuje do przekazywania ciepła odwrotne zjawisko Seebecka. Ma on wiele zastosowań [5, 6].

Należy zaznaczyć, że element ten nie pochłania ani nie wydzielają ciepła, a służy wyłącznie jako pompa cieplna, która transportuje energię cieplną w kierunku zależnym od polaryzacji obwodu. Stanowią go dwie, równoległe osadzone płytki ceramiczne, pomiędzy którymi znajdują się ułożone naprzemiennie półprzewodniki typu „n” oraz „p”. Płytki ceramiczne mają zapewnić sztywność mechaniczną oraz idealną izolację elektryczną. Ważną ich cechą jest dobra przewodność cieplna.

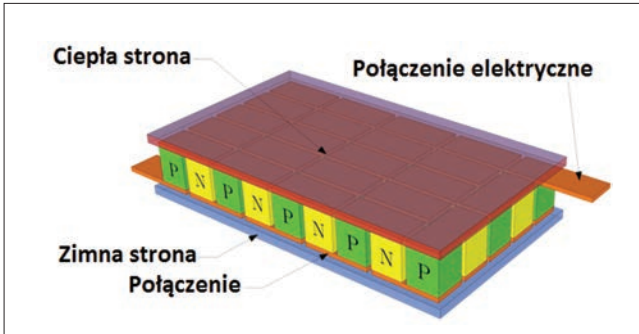
Wykorzystane półprzewodniki są wykonane z tellurku bizmutu domieszkowanego antymonem i selenem. Połączone są ze sobą szeregowo za pomocą miedzianych płytek.

Jak wiadomo, w półprzewodniku typu „p” brakuje elektronów do pełnego obsadzenia górnego poziomu energetycznego, a półprzewodnik „n” ma nadmiar elektronów (rys. 1). Wyróżnia się dwa przypadki w momencie przepływu prądu:

- pobór energii z otoczenia podczas wejścia elektronu na wyższy poziom energetyczny,
- wydzielenie energii do otoczenia podczas spadku elektronu na niższy poziom energetyczny.

\* Dr inż. Marek Stembalski (marek.stembalski@pwr.edu.pl), dr hab. Waćław Skoczyński prof. nadzw. PW (waclaw.skoczyński@pwr.edu.pl), dr inż. Andrzej Roszkowski (andrzej.roszkowski@pwr.edu.pl) – Katedra Obrabiarek i Technologii Mechanicznych Wydział Mechaniczny Politechniki Wrocławskiej; mgr inż. Jakub Sandecki (213938@student.pwr.edu.pl), dr inż. Paweł Preś (pawe.pres@ge.com) – Instytut Lotnictwa

W obu przypadkach rozpatrywana jest energia cieplna. Ponieważ półprzewodniki są połączone równolegle pod względem cieplnym, moduł Peltiera jednocześnie oddaje i pochłania ciepło. Mówi się wtedy o tzw. stronie ciepłej i zimnej. Należy zaznaczyć, że ilość ciepła oddawanego nie jest równa ilości ciepła pobieranego (ciepła oddawanego jest więcej).

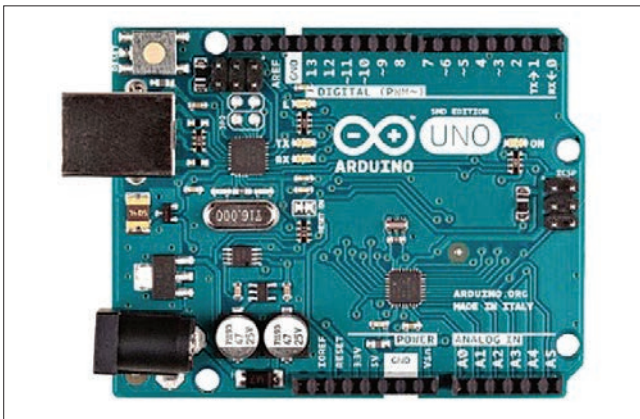


Rys. 1. Schemat modułu Peltiera

### System kontroli temperatury

Serce systemu, odpowiedzialne za sterowanie zaprojektowanym układem pomiaru temperatury, stanowi urządzenie wielofunkcyjne Arduino Uno. Arduino to projekt *open-source* powstały w 2005 r. Składa się z zestawów opartych na mikrokontrolerach do budowy urządzeń cyfrowych oraz interaktywnych obiektów, które mogą wykrywać oraz kontrolować urządzenia fizyczne.

Arduino Uno (rys. 2) zawiera mikrokontroler ATmega328P wyposażony w sześć analogowych wejść o rozdzielczości 10 bitów oraz 14 cyfrowych wejść/wyjść (za pomocą sześciu z nich można generować sygnał PWM). Całość jest taktowana za pomocą 16 MHz kryształu kwarcu.



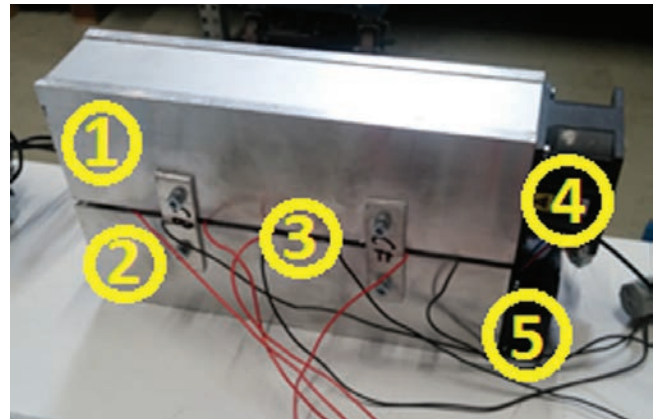
Rys. 2. Płytki mikrokontrolera Arduino Uno [7]

Podstawową funkcją systemu jest zapewnienie określonej wartości temperatury w zbiorniku, w którym odbywać się będą testy zmęczeniowe. W tym celu należy mierzyć temperaturę zarówno wewnątrz, jak i na zewnątrz zbiornika. Do pomiaru temperatury zastosowano czujniki cyfrowe DS18B20. Zapewniają one 9÷12-bitowy pomiar temperatury. Ich zakres pomiarowy wynosi od  $-55$  do  $+125^{\circ}\text{C}$ , a ich dokładność zależy od wykorzystywanej rozdzielczości pomiaru i wynosi od  $0,5^{\circ}\text{C}$  dla 9 bitów do  $0,0625^{\circ}\text{C}$  dla 12 bitów. Wraz ze wzrostem rozdzielczości wydłuża się czas pomiaru od 93,75 ms dla 9 bitów do 750 ms dla 12 bitów.

W opisywanym systemie zastosowano cztery czujniki pomiarowe. Jednym kontrolowano temperaturę w zbiorniku, drugi służył do pomiaru temperatury na zewnątrz zbiornika, natomiast kolejne dwa wykorzystano do pomiaru aktywnej i reaktywnej strony modułu Peltiera.

Ponadto istotną kwestią była kontrola pracy modułów Peltiera. Należało nie tylko zmieniać tryb, w jakim miały pracować (grzanie bądź chłodzenie), ale także kontrolować wartość energii cieplnej, która była w ten sposób dostarczana do zbiornika. Aby to osiągnąć, należy zastosować regulację PWM z możliwością zmiany kierunku prądu. Zapewniono to poprzez zastosowanie półmostka LXR Brushless Motorshield. Może on generować sygnał PWM o częstotliwości do 25 kHz.

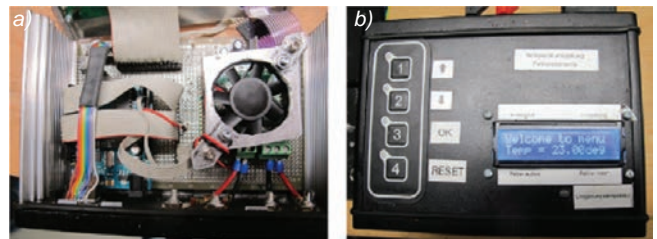
Zaprojektowany system dzieli się na część odpowiadającą za zasilanie oraz zmianę temperatury w zbiorniku (tzw. układ zewnętrzny) oraz część logiczną. Na rys. 3 pokazano układ zewnętrzny.



Rys. 3. Cztery moduły Peltiera umieszczone pomiędzy dwoma radiatorami – główna część układu zewnętrznego: 1) radiator aktywny, 2) radiator pasywny, 3) moduł Peltiera, 4) wentylator zapewniający przepływ przez radiator aktywny, 5) radiator pasywny

Zasilacz zasiliał połączone ze sobą równolegle cztery moduły Peltiera oraz część logiczną. Moduły zostały rozłożone równomiernie i termicznie równolegle pomiędzy dwoma radiatorami. Całość skrócono ze sobą za pomocą czterech płytek aluminiowych oraz śrub montażowych.

Zasilacz w części logicznej bezpośrednio połączono z układem zasilania dla Arduino oraz z półmostkiem Motorshield. Wszystkie elementy części logicznej zostały zamocowane na płytce. Całość części logicznej została umieszczona w obudowie (rys. 4).



Rys. 4. Część logiczna: a) budowa wewnętrzna, b) obudowa

W przedniej części obudowy wykonano otwory na konektory przyłączeniowe sensorów, programator, wyjście do zasilania modułów Peltiera oraz gniazdo od zasilacza. Po tej samej stronie obudowy zamocowano wejścia dla zasilacza oraz wyjścia, które zasilają odpowiednim sygnałem PWM moduły Peltiera.



## Sterowanie

Przed przystąpieniem do pisania kodu sterowania uznano za konieczne sprawdzenie wpływu wartości PWM na temperaturę w zbiorniku. W tym celu należało zbudować stanowisko testowe, które w większym bądź mniejszym stopniu oddawałoby warunki pracy. Wykorzystano do tego pojemnik z tworzywa sztucznego oraz rury PCV.

Testy polegały na pomiarze temperatury powietrza wewnątrz zbiornika testowego przy włączonym systemie chłodzenia z zadaną wartością sygnału PWM. Pomiary wykonywano przy możliwie takiej samej temperaturze początkowej w zbiorniku.

Na rys. 5 pokazano zależność pomiędzy wypełnieniem sygnału PWM a temperaturą w zbiorniku. Natomiast na rys. 6 zilustrowano zależność pomiędzy wartością cyfrową sygnału PWM a spadkiem temperatury w zbiorniku.

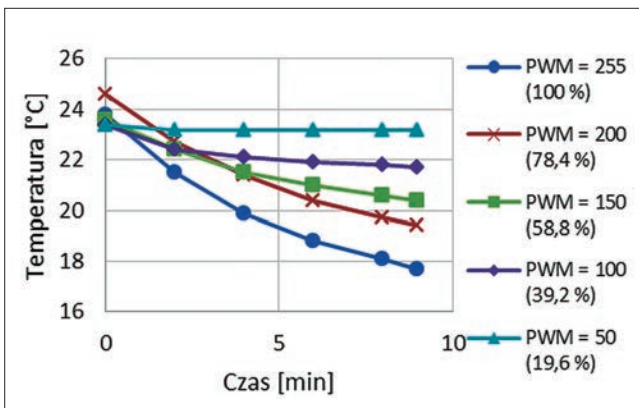
Spadek temperatury w zbiorniku obliczono ze wzoru:

$$\Delta_{tN} = \frac{T_N - T_{N-1}}{t_N - t_{N-1}} \text{ [}^\circ\text{C/min]} \quad (1)$$

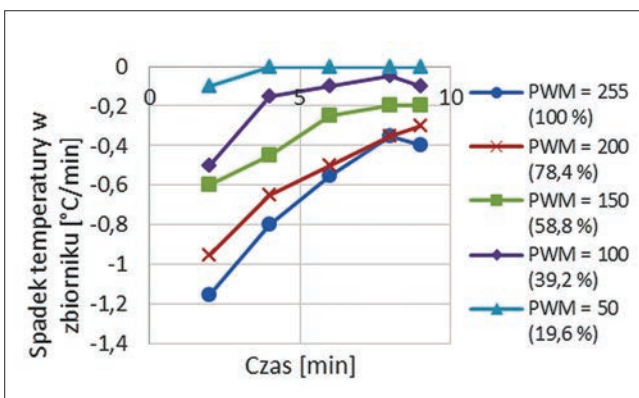
gdzie:  $T_N, T_{N-1}$  – temperatura [ $^\circ\text{C}$ ] w zbiorniku odpowiednio podczas  $N$ -tego oraz  $N-1$ -tego pomiaru,  $t_N, t_{N-1}$  – czas [min] w trakcie odpowiednio  $N$ -tego oraz  $N-1$ -tego pomiaru.

Na podstawie analizy wyników można zauważyć, że:

- wraz ze spadkiem wypełnienia sygnału maleje temperatura osiągnięta w zbiorniku,
- wraz z upływem czasu maleje szybkość spadku temperatury w zbiorniku (dla stałej mocy sygnału).



Rys. 5. Zależność pomiędzy wartością cyfrową sygnału PWM a temperaturą w zbiorniku



Rys. 6. Zależność pomiędzy wartością cyfrową sygnału PWM a spadkiem temperatury w zbiorniku

Duży wpływ na osiąganą temperaturę ma temperatura otoczenia (wpływ ten wzrasta dla sygnałów o małej mocy).

Dla sygnału o każdej mocy, przy danych warunkach zewnętrznych, istnieje ustalona osiągalna wartość temperatury w zbiorniku.

Warto zaznaczyć, że stanowisko pomiarowe nie było wierną kopią docelowego zbiornika. Zbiornik docelowy będzie wykonany z innego materiału (prawdopodobnie ze stali) i zostanie zaizolowany termicznie. Radiator aktywny będzie umieszczony wewnątrz zbiornika.

Pomimo różnic wyniki dają pogląd na wpływ stopnia wypełnienia sygnału na temperaturę w zbiorniku. Na podstawie pomiarów na testowym stanowisku wprowadzono ograniczenie zakresu temperatury możliwej do osiągnięcia w zbiorniku. Użytkownik będzie mógł wybrać temperaturę od  $17^\circ\text{C}$  do  $45^\circ\text{C}$ . Osiągnięcie temperatury spoza tego zakresu może być niemożliwe (dla procesu chłodzenia przy wysokiej temperaturze otoczenia) oraz bardzo czasochłonne (powyżej 20 min) (rys. 5 i 6).

Podstawą działania wykonanego algorytmu sterowania temperaturą jest takie dopasowanie wartości sygnału PWM, sterującego modułami Peltiera, aby osiągnięcie temperatury było jak najszybsze (według zleceńodawcy maksymalny czas osiągnięcia zadanej temperatury nie może przekroczyć 10 min), nie było przeregulowań, układ był odporny na zmiany temperatury otoczenia oraz pobierał jak najmniej mocy.

Algorytm sterowania dzieli się na następujące etapy:

- osiągnięcie temperatury,
- etap stabilizacji,
- etap specjalny,
- etap utrzymania temperatury.

W trakcie każdego z tych etapów system mierzy temperaturę: otoczenia, wewnątrz zbiornika, strony aktywnej oraz strony reaktywnej ogniwa Peltiera.

■ **Etap wyboru trybu.** Po wprowadzeniu przez użytkownika żądanej temperatury system zdecyduje, czy chłodzić, czy ogrzewać powietrze w zbiorniku. Wynika to z różnicy pomiędzy żadaną temperaturą a temperaturą wewnątrz zbiornika (jeżeli wartość tej różnicy jest równa 0, system przełączy się w tryb chłodzenia i algorytm sterowania zrealizuje bezpośrednio etap specjalny).

■ **Etap osiągnięcia temperatury.** Zadaniem systemu w trakcie wstępnego etapu osiągnięcia temperatury jest określenie wartości parametru  $x$  z formuły:

$$x = \frac{t_w - t_z}{t_z} \quad (2)$$

gdzie:  $t_w$  – temperatura powietrza wewnątrz zbiornika,  $t_z$  – zadana temperatura w zbiorniku.

Jeżeli wartość parametru  $x$  jest większa bądź równa 0,1, system z maksymalną mocą dąży do osiągnięcia zadanej temperatury wewnątrz zbiornika, co jest równoznaczne z ustaleniem wartości stopnia wypełnienia PWM na 100%.

Jeśli wartość parametru  $x$  zawiera się pomiędzy 0,1 a 0,05, system będzie dążył do osiągnięcia zadanej temperatury z niższą prędkością. Dzięki temu zminimalizowano prawdopodobieństwo wystąpienia przeregulowania. W tym przypadku stopień wypełnienia sygnału PWM ustalono doświadczalnie na 81% mocy maksymalnej.

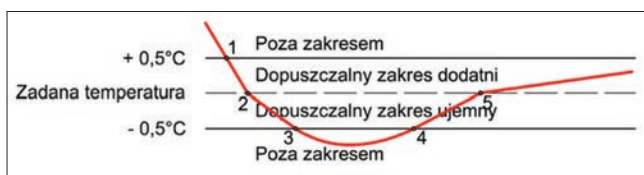
■ **Etap stabilizacji.** Jeśli wartość parametru  $x$  spadnie poniżej 0,05, co odpowiada zakresowi temperatury  $\pm 0,5^\circ\text{C}$ , algorytm sterowania przechodzi do etapu stabilizacji. W algorytmie sterowania temperaturą zdefiniowano pewne przedziały (rys. 7). Idea utrzymywania zadanej temperatury w zakresie stabilizacji polega na odpowiednim zasilaniu ogniwa w zależności od tego, w którym obszarze się znajduje.

Zadana temperatura	+ 0,5°C	Poza zakresem
		Dopuszczalny zakres dodatni
		Dopuszczalny zakres ujemny
	- 0,5°C	Poza zakresem

Rys. 7. Przedziały temperatury wykorzystywane w zaprojektowanym algorytmie sterowania

Oprogramowanie, zmieniając płynnie stopień wypełnienia PWM, dąży do ustabilizowania jego wartości na optymalnym poziomie. Oznacza to, że moduły Peltiera będą zasilane ze stałą mocą, zapewniającą utrzymanie zadanej temperatury w zbiorniku przy odpowiednich warunkach zewnętrznych. Tak działające moduły Peltiera będą miały dłuższą żywotność niż moduły, w których wartość prądu zasilającego będzie zmienna.

Na rys. 8 pokazano przykładowy przebieg zmian temperatury wewnątrz zbiornika podczas schładzania: 1 – temperatura osiąga dopuszczalny zakres; 2 – temperatura osiąga wartość zadaną; mieści się w dopuszczalnym zakresie z zadaną tolerancją  $\pm 0,5^\circ\text{C}$ , wartość wypełnienia sygnału PWM jest zmniejszana; 3 – temperatura przekracza dopuszczalny zakres z powodu zbyt dużego stopnia wypełnienia sygnału zasilającego PWM; stopień wypełnienia sygnału PWM jest zmniejszany; 4 – temperatura wraca do stanu mieszczącego się w dopuszczalnym zakresie; 5 – temperatura ponownie osiąga zadaną wartość; stopień wypełnienia sygnału PWM jest zwiększany.



Rys. 8. Przykładowy przebieg wartości temperatury wewnątrz zbiornika podczas schładzania

Algorytm także ma zabezpieczenie przed stabilizacją temperatury poza zakresem. Polega ono na zwiększaniu bądź zmniejszaniu stopnia wypełnienia sygnału PWM (co pewien czas), aż temperatura wróci do dopuszczalnego zakresu. Główne zadania etapu stabilizacji to:

- stabilizacja wartości temperatury w zbiorniku w dopuszczalnym zakresie (w polu tolerancji  $\pm 0,5^\circ\text{C}$ ),
- osiągnięcie małych oscylacji temperatury wewnątrz zbiornika wokół zadanej temperatury.

Jeśli jeden z tych celów jest spełniony, algorytm przechodzi do etapu utrzymania temperatury i zasilania ogniwa ze stałą mocą.

■ **Etap specjalny.** Algorytm przejdzie do tego etapu, jeżeli w momencie wyboru przez użytkownika zadanej temperatury będzie ona równa temperaturze wewnątrz zbiornika. Etap ten przebiega niemal tak samo jak etap stabilizacji, ale wartość wypełnienia sygnału PWM jest wstępnie ustawiana na 50% zamiast 81%.

■ **Etap utrzymania temperatury.** Jest to finalna część procedury sterowania. Nie różni się on zbytnio od etapu stabilizacji poza tym, że:

- Algorytm reaguje na „granice” i stabilizację poza zakresem, ale zmiany wartości wypełnienia sygnału PWM nie maleją. Wartość zmian była zmniejszana już w trakcie etapu stabilizacji i został spełniony jeden z celów.
- Algorytm będzie reagował na długotrwałe zmiany temperatury otoczenia. Podczas wielogodzinnych testów temperatura otoczenia może się zmienić tak mocno, że niezbędna będzie zmiana trybu pracy modułów Peltiera, np. w momencie uruchomienia systemu temperatura otoczenia (a co za tym idzie – wstępna temperatura w zbiorniku) była wyższa niż zadana temperatura. System sterowania pracował w trybie „chłodzenia”. Po paru godzinach temperatura otoczenia spadła poniżej temperatury zadanej w zbiorniku. Z tego względu system sterowania samoczynnie przechodzi w tryb „grzania”. Samoczynna zmiana trybu pracy została wprowadzona do systemu sterowania po to, aby umożliwić pomiar temperatury w zbiorniku podczas długotrwałych testów materiałów wykonanych z elastomerów.

## Podsumowanie

Wszystkie wymagania dotyczące formy oraz funkcjonalności systemu zostały spełnione. Zaprojektowany algorytm sterowania działa prawidłowo. Żądana temperatura jest osiągnięta w czasie do 10 min, niezależnie od warunków zewnętrznych, i jest stabilizowana w zdanym zakresie.

W trakcie testów nie zaobserwowano przeregulowań większych niż  $2^\circ\text{C}$ . Algorytm sterowania poprawnie reagował na zmiany temperatury otoczenia, poczynając od zmiany wartości wypełnienia sygnału PWM, aż do zmiany trybu pracy. Zapewnienie samoczynnej zmiany trybu pracy w zależności od temperatury otoczenia, np. z „grzania” na „chłodzenie”, pozwala na przeprowadzanie długoterminowych (ponad 24-godzinnych) testów zmęczeniowych materiałów elastomerowych.

Możliwości rozwoju zaprojektowanego systemu sterowania jest wiele. W celu poprawienia funkcjonalności oraz zmniejszenia przeregulowania zadanej temperatury należałoby zaprojektować system sterowania oparty na regulacji PID i porównać skuteczność oraz niezawodność obu rozwiązań podczas pracy zarówno krótkotrwałej, jak i wielogodzinnej.

## LITERATURA

1. Pawłowski K. „Systemy adaptacyjnej absorpcji obciążeń udarowych”. Rozprawa doktorska. Warszawa, 2011.
2. Minoto K., Mayumi K., Maeda R., Kato K., Yokoyama H., Ito K. “Mechanical properties of supramolecular elastomers prepared from polymer-grafted polyrotaxane”. *Polymer*. 128 (2017): s. 386–391.
3. Wei Z., Xinglong G., Shouhu X., Wanquan J. “Temperature-dependent mechanical properties and model of magnetorheological elastomers”. *Industrial & Engineering Chemistry*. 50 11 (2011): s. 6704–6712.
4. Ashrafizadeh H., Mertiny P., McDonald A. “Evaluation of the effect of temperature on mechanical properties and wear resistance polyurethane elastomers”. *Wear*. 368–369 (2016): s. 26–38.
5. Li W., Paul M.C., Montecucco A., Siviter J., Knox A.R., Sweet T., Gao M., Baig H., Mallick T.K., Han G., Gregory D.H., Azough F., Freer R. “Multiphysics simulation of thermoelectric generator modules with cold and hot blocks and effects of some factors”. *Case Studies in Thermal Engineering*. 10 (2017): s. 63–72.
6. Egolf P.W., Gravier L., Francfort T., Pawłowski A.G., Courret G. “High-frequency magnetocaloric modules with heat gates operating with the Peltier effect”. *International Journal of Refrigeration*. 37 (2014): s. 176–184.
7. <http://www.arduino.org/products/boards/arduino-uno> (dostęp: 5.12.2016).