

AGH

AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej

Praca magisterska

Joanna Wawrzyczek

kierunek studiów: **fizyka techniczna**

specjalność: **fizyka komputerowa**

Projekt i wykonanie układu automatycznej regulacji temperatury

Opiekun: **dr hab. inż. Marek Idzik**

Kraków, wrzesień 2012

Oświadczam, świadomy(-a) odpowiedzialności karnej za poświadczenie nieprawdy, że niniejszą pracę dyplomową wykonałem(-am) osobiście i samodzielnie i nie korzystałem(-am) ze źródeł innych niż wymienione w pracy.

.....
(czytelny podpis)

**Tematyka pracy magisterskiej i praktyki dyplomowej Joanny Wawrzyczek,
studentki V roku studiów kierunku fizyka techniczna, specjalności fizyka
komputerowa**

Temat pracy magisterskiej: **Projekt i wykonanie układu automatycznej regulacji
temperatury**

Opiekun pracy: dr hab. inż. Marek Idzik

Recenzenci pracy: ...

Miejsce praktyki dyplomowej: WFiIS AGH, Kraków

Program pracy magisterskiej i praktyki dyplomowej

1. Omówienie realizacji pracy magisterskiej z Opiekunem.
2. Zebranie i opracowanie literatury dotyczącej tematu pracy.
3. Praktyka dyplomowa:
 - zapoznanie się z układami elektronicznymi wykorzystywanymi oraz budowanymi na Wydziale,
 - analiza schematów różnych układów stabilizujących,
 - analiza różnych elementów chłodzących,
 - sporządzenie sprawozdania z praktyki.
4. Kontynuacja prac związanych z tematem pracy magisterskiej.
5. Opracowanie finalnego projektu układu.
6. Wykonanie i uruchomienie układu.
7. Analiza działania wykonanego układu, omówienie jej wyników i zatwierdzenie ich przez opiekuna.
8. Opracowanie redakcyjne pracy.

Termin oddania w dziekanacie: 30 września 2012

.....
(podpis kierownika katedry)

.....
(podpis opiekuna)

Na kolejnych dwóch stronach proszę dołączyć kolejno recenzje pracy popelnione przez Opiekuna oraz Recenzenta (wydrukowane z systemu MISIO i podpisane przez odpowiednio Opiekuna i Recenzenta pracy). Papierową wersję pracy (zawierającą podpisane recenzje) proszę złożyć w dziekanacie celem rejestracji co najmniej na tydzień przed planowaną obroną.

druga recenzja

...

Spis treści

1	Podstawy teoretyczne	11
1.1	Zjawiska termoelektryczne	11
1.1.1	Efekt Seebecka	11
1.1.2	Efekt Peltiera	12
1.1.3	Efekt Thomsona	13
1.1.4	Dobroć zjawisk termoelektrycznych - zT	14
1.2	Moduł Peltiera	15
1.2.1	Budowa i zasada działania	15
1.2.2	Możliwości i ograniczenia	16
1.2.3	Współczynnik chłodzenia COP	19
1.3	Układy regulacji automatycznej	19
1.3.1	Algorytm PID	20
1.3.2	Dobór nastaw regulatora	22
1.3.3	Metoda Zieglera-Nicholsa	23
1.4	Modulacja szerokości impulsów PWM	24
2	Projekt układu chłodzenia i stabilizacji temperatury	26
2.1	Regulator	26
2.2	Urządzenie pomiarowe	30
2.3	Obiekt regulacji	30
2.4	Stany układu i tryby jego pracy	33
2.4.1	Schłodzenie komory	34
2.4.2	Stabilizacja niskiej temperatury przy pracującym urządzeniu	37
2.5	Urządzenie wykonawcze	38
2.5.1	Układ modułów Peltiera z mechanizmem odprowadzania ciepła	38
2.5.2	Optymalne połączenie modułów	40
2.5.3	Pierwsza koncepcja - sterowanie ciągle zrealizowane poprzez układ ze wzmacniaczem	41
2.5.4	Druga koncepcja - sterowanie impulsowe	43
2.5.5	Trzecia koncepcja - zastosowanie PWM	43

2.5.6	Zwiększenie mocy chłodzenia	44
3	Analiza działania wykonanego urządzenia	45
3.1	Szczegóły montażu układu stabilizacji temperatury	45
3.2	Szybkość chłodzenia wnętrza komory układu stabilizacji temperatury	46
3.3	Stabilność temperatury wnętrza komory układu stabilizacji temperatury	50
A	Pozostałe nastawy pomocniczne regulatora PID ACS-13A	54
B	Zwymiarowane rysunki obudowy komory chłodzenia	57
C	Schematy wykonanych układów elektronicznych	59

Wstęp

Współczesna nauka zajmuje się takimi zagadnieniami, że wiele doświadczeń wymaga zapewnienia co najmniej temperatury pokojowej lub niższej przez cały okres wykonywania eksperymentu. Przykładem mogą być prace związane z badaniem właściwości półprzewodników albo wykorzystujące do pomiarów urządzenia półprzewodnikowe. Często w osiągnięciu żądanej temperatury jak i odpowiedniej jej stabilności przeszkadza wydzielanie się ciepła w urządzeniach laboratoryjnych. Stosowanie ciekłego azotu do schładzania układów eksperymentalnych jest bardzo popularne, natomiast trudno opracować opartą o jego zastosowanie metodę automatycznej regulacji temperatury pracy urządzeń elektronicznych. Ostatnio popularnością w obszarze chłodzenia takich urządzeń cieszą się półprzewodnikowe moduły Peltiera. Dzięki zastosowaniu takich elementów można skonstruować nieskomplikowane urządzenie, w którym nakład manualnej pracy przy kontroli temperatury będzie minimalny.

Cel i zakres pracy

Głównym celem pracy jest wykonanie układu, który będzie służył do utrzymywania stałej i w miarę możliwości niskiej temperatury testowanego urządzenia. Projekt został wykonany z myślą o stabilizacji temperatury pracy skonstruowanego na Wydziale¹ układu elektroniki odczytu dla detektorów promieniowania, ale wykorzystany może być także w celu zapewnienia odpowiednich warunków pracy innych urządzeń. Możliwość różnych zastosowań rozwiązania odgrywała też znacząca rolę zarówno na etapie prac projektowych jak i przy późniejszym wykonaniu. Urządzenie przeznaczone jest do użytku laboratoryjnego i jest w znacznym stopniu uniwersalne.

W pierwszym rozdziale tej pracy zawarte są informacje dotyczące podstaw teoretycznych. Na początku znajdują się objaśnienia zjawisk termoelektrycznych. Zaraz po nich podane są szczegóły dotyczące samych modułów Peltiera, których działanie bazuje na jednym z tych zjawisk. Następnie zamieszczone są podstawowe informacje o klasyfikacji układów regulacji automatycznej. Dalej znajduje się opis algorytmu PID. Na końcu rozdziału zostały zamieszczone informacje na temat metody modulacji szerokości impulsów tzw. PWM, której użycie okazało się niezbędne na etapie projektowania.

¹mowa o Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej Akademii Górniczo - Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie

Drugi rozdział poświęcony został projektowi. Zamieszczone zostały tu podstawowe założenia projektu oraz wyliczenia, a także opisanych zostało kilka koncepcji realizacji układu chłodzenia i stabilizacji temperatury. Każda kolejna była wynikiem analizy niedoskonałości poprzedniej. Opis zmian także został udokumentowany. W tej części pracy zawarte są również szczegółowe informacje na temat wybranych do zastosowania elementów wraz z uzasadnieniem wyborów.

W trzecim rozdziale zawarta jest analiza działania wykonanego urządzenia.

Rozdział 1

Podstawy teoretyczne

1.1 Zjawiska termoelektryczne

Zjawisko termoelektryczne to zjawisko, w którym różnica temperatur między dwoma punktami podlega bezpośredniej zmianie na napięcie elektryczne lub gdy to napięcie powoduje powstanie różnicy temperatur. Napięcie elektryczne można precyzyjnie ustawiać i dokładnie zmierzyć. Jeśli chodzi o różnicę temperatur to sterowanie nią jest dużo trudniejsze, dlatego zjawiska termoelektryczne są wykorzystywane w automatyzacji procesów regulacji temperatury. Do zjawisk termoelektrycznych zaliczają się opisane poniżej efekty Seebecka, Peltiera oraz Thomsona.

1.1.1 Efekt Seebecka

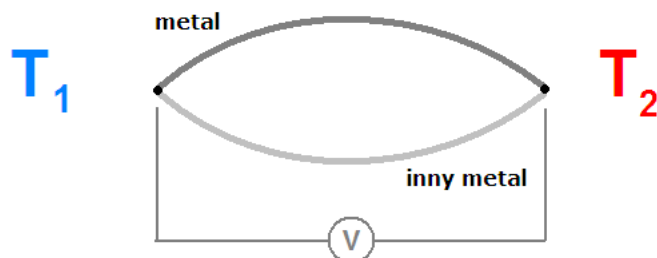
Odkryty został już w 1821 roku przez Thomasa J. Seebecka. Zaobserwował on odchylenie igły magnetycznej umieszczonej w pobliżu obwodu wykonanego z dwóch różnych metali połączonych w dwóch miejscach o różnych temperaturach.

Nie rozpoznał on jednak istoty zjawiska i nazwał je zjawiskiem termomagnetycznym. W rzeczywistości pomiędzy złączami wytwarza się napięcie w konsekwencji czego płynie prąd i powstaje pole magnetyczne. Na cześć swojego odkrywcy to termoelektryczne napięcie nazwane zostało jego imieniem, chociaż zjawisko wyjaśnił dopiero duński fizyk Hans Christian Ørsted. Na rysunku 1.1 zilustrowany został efekt Seebecka dla dwóch metali.

Termosiła w metalach konwencjonalnych jest niewielka na skutek kompensacji przyczynków do generowanego napięcia elektrycznego pochodzących od elektronów i dziur. Okazuje się jednak, że efekt jest wystarczająco silny, aby mógł być wykorzystany do pomiaru temperatury. Efekt ten odkryty został także dla półmetali. Sprawniejsze termoelektryki na układach półprzewodnikowych pojawiły się dopiero w połowie XX wieku.

Fizyka doświadczalna, szczególnie w niskich temperaturach, zyskała na skonstruowaniu termopary wykorzystującej zjawisko Seebecka. Urządzenie to służy do pomiaru temperatury, a właściwie różnicy temperatur w dwóch punktach. Składa się z pary wykonanych z różnych metali

przewodów połączonych ze sobą na końcach. Jedno złącze jest umieszczone w miejscu o określonej temperaturze (np. w pojemniku z topniejącym lodem). Jest to złącze referencyjne. Drugie złącze umieszczone jest w miejscu pomiaru. Następnie mierzone jest napięcie powstałe pomiędzy złączami, które jest proporcjonalne do różnicy temperatur. Znając temperaturę jednego złącza referencyjnego można określić temperaturę drugiego.



Rysunek 1.1: Ilustracja efektu Seebecka

Termopara nie została użyta w wykonanym układzie ze względu na jedną z jej podstawowych wad tj. konieczność utrzymania stałej temperatury tam gdzie znajduje się złącze referencyjne. Często realizacją tego wymagania jest umieszczenie złącza referencyjnego w termosie z topniejącym lodem. Przy założeniu, że urządzenie służące do automatycznej regulacji temperatury ma działać przez dłuższy czas bez potrzeby manualnej ingerencji, topniejący lód zdąży całkowicie się roztopić, a powstała w ten sposób woda będzie się stopniowo ogrzewać aż do osiągnięcia temperatury otoczenia. Temperatura ta może się oczywiście zmieniać, więc nie stanowi dobrej referencji.

Efekt Seebecka można opisać w bardziej formalny sposób poprzez zapisanie zależności natężenia powstałego pola elektrycznego \vec{E} od gradientu temperatury złącz ∇T :

$$\vec{E} = S\nabla T \quad (1.1)$$

gdzie:

S - współczynnik Seebecka, jego wymiar to $\frac{V}{K}$ np. dla termopary miedź-kostantan ma on wartość $41 \frac{mV}{K}$

$$|\vec{E}| = |S\nabla T| = \left[\frac{V}{K} \cdot K \right] = [V] \quad (1.2)$$

Często podawane są wartości współczynników Seebecka dla pojedynczych metali. Aby otrzymać wartość dla termopary należy wyliczyć różnicę wartości współczynników obu występujących w niej metali.

1.1.2 Efekt Peltiera

W 1834 roku francuski fizyk Jean C. A. Peltier zaobserwował wydzielanie się ciepła na złączu dwóch metali, przez które przepływa prąd. Zaobserwował on również, że po odwróceniu

kierunku przepływu prądu ciepło jest pochłaniane. Aby prąd mógł płynąć przez złącze dwóch metali obwód musi być zamknięty, czyli w takim układzie musi pojawić się drugie złącze, na którym ciepło będzie odpowiednio pochłaniane bądź emitowane. Można powiedzieć, że powstanie strumień ciepła o gęstości \vec{j}_Q proporcjonalny do gęstości prądu elektrycznego \vec{j}_E , co wyraża poniższa zależność:

$$\vec{j}_Q = \Pi \vec{j}_E \quad (1.3)$$

gdzie:

Π - współczynnik Peltiera, jego wymiar to V

$$\vec{j}_Q = \Pi \vec{j}_E = \left[V \cdot \frac{A}{m^2} \right] = \left[\frac{V \cdot A}{m^2} \right] = \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (1.4)$$

Zjawisku Peltiera nieodzownie towarzyszy odkryte kilka lat wcześniej zjawisko Seebecka. Napięcie Seebecka powoduje, że wraz ze zmianą różnicy temperatur, zależność prądu od napięcia zmienia się tj. przy stałym napięciu zasilania prąd zmniejsza się wraz ze zwiększaniem się różnicy temperatur. Współczynniki Peltiera Π i Seebecka S wiąże relacja Kelvina:

$$\Pi = ST \quad (1.5)$$

$$\Pi = ST = \left[\frac{V}{K} \cdot K \right] = [V] \quad (1.6)$$

Więcej informacji na temat tego zjawiska oraz szersze objaśnienie jego natury znajduje się w sekcji 1.2.

1.1.3 Efekt Thomsona

Zjawiskami Seebecka i Peltiera zajmował się także William Thomson, czyli lord Kelvin. Do jego dokonań należy określenie zależności matematycznych służących do opisu zjawisk termoelektrycznych. Oprócz tego przewidział on istnienie kolejnego efektu, który potem nazwano jego imieniem. *Efekt Thomsona* to wydzielanie oraz pochłanianie ciepła w jednorodnym przewodniku, przez który w kierunku gradientu temperatury płynie prąd.

W przewodniku, przez który płynie prąd elektryczny, o gęstości \vec{j}_E i w którym jednocześnie istnieje gradient temperatury ∇T suma ciepła Joule'a oraz ciepła Thomsona z odpowiednim znakiem daje całkowite wydzielone ciepło, które liczone na jednostkę objętości przewodnika, wyraża się wzorem:

$$q = \frac{j_E^2}{\sigma} - \mu j_E |\nabla T| \quad (1.7)$$

gdzie:

μ - współczynnik Thomsona, jego wymiar to $\frac{V}{K}$,

σ - przewodnictwo właściwe.

$$\begin{aligned} q &= \frac{j_E^2}{\sigma} - \mu j_E |\nabla T| = \left[\frac{\frac{A^2}{m^4}}{\frac{1}{\Omega \cdot m}} - \frac{V}{K} \cdot \frac{A}{m^2} \frac{K}{m} \right] = \left[\frac{A^2 \cdot \Omega}{m^3} - \frac{V \cdot A}{m^3} \right] = \left[\frac{A^2 \cdot \frac{V}{A}}{m^3} - \frac{V \cdot A}{m^3} \right] = \\ &= \left[\frac{V \cdot A}{m^3} \right] = \left[\frac{W}{m^3} \right] \end{aligned} \quad (1.8)$$

Rezultaty tego efektu nie zostały wykorzystane w tej pracy. Nie mają one też znaczącego negatywnego wpływu na działanie urządzenia.

1.1.4 Dobroć zjawisk termoelektrycznych - zT

Do porównania jakości konwersji termoelektrycznej, tj. zamiany różnicy temperatur na napięcie w efekcie Seebecka i procesu odwrotnego w efekcie Peltiera, w różnych materiałach służy *dobroć zjawisk termoelektrycznych*, czyli tzw. *parametr zT* zdefiniowany w następujący sposób:

$$zT = \frac{S^2 \sigma}{\kappa} T \quad (1.9)$$

gdzie:

S - współczynnik Seebecka,

σ - przewodność elektryczna,

κ - współczynnik przewodnictwa ciepła.

$$zT = \frac{S^2 \sigma}{\kappa} T = \left[\frac{\frac{V^2}{K^2} \cdot \frac{1}{\Omega \cdot m}}{\frac{W}{m \cdot K}} \cdot K \right] = \left[\frac{V \cdot \frac{A}{V}}{W} \right] = \left[\frac{W}{W} \right] \quad (1.10)$$

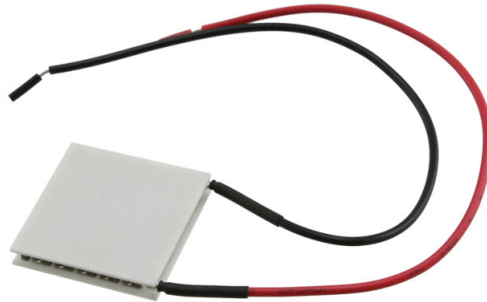
Sama wielkość z ma wymiar K^{-1} natomiast pomnożona przez temperaturę T daje bezwymiarowy parametr zT . Wartości dobroci zjawisk termoelektrycznych zT są rzędu jedności.

Im większa wartość zT tym wyższa wydajność efektów termoelektrycznych. Z równania (1.9) wynika, że dla dobrego termoelektryka współczynnik Seebecka S , zwany również *termosilą* jest duży. Konsekwencją tego oraz relacji Kelvina (1.5) jest wysoki współczynnik Peltiera Π . Lepsze utrzymanie różnicy temperatur zapewnia dobra przewodność elektryczna σ przy jednocześnie niskiej przewodności cieplnej κ . Dobre termoelektryki to te, dla których $zT > 1$.

Przy poszukiwaniach coraz lepszych materiałów termoelektrycznych szuka się kompromisu pomiędzy własnościami elektrycznymi i termicznymi. Istotne są też zmiany tych własności wraz z temperaturą. Dobre przewodniki zazwyczaj dobrze przewodzą ciepło, a parametr zT jest funkcją temperatury posiadającą dla danego termoelektryka maksimum. Powoduje to potrzebę optymalizacji parametrów S , σ oraz κ . W praktyce do budowy złącz Peltiera wykorzystuje się półprzewodniki, głównie domieszkowany odpowiednio antymonem i selenem tellurek bizmutu Bi_2Te_3 .

1.2 Moduł Peltiera

Ilość ciepła wydzielana na jednym i pochłaniana na drugim złączu w wyniku zachodzenia zjawisk termoelektrycznych nie jest zbyt duża, dlatego w zastosowaniach praktycznych łączy się wiele pojedynczych par złącz w moduł. Moduły takie to płaskie kwadratowe płytki o szerokości od 20 do 65 mm i grubości ok. 3 - 5 mm. Przykładowe urządzenie przedstawione jest na rysunku 1.2.



Rysunek 1.2: Zdjęcie modułu Peltiera,

źródło: media.digikey.com/Photos/Laird Tech Photos/430436-504.jpg

1.2.1 Budowa i zasada działania

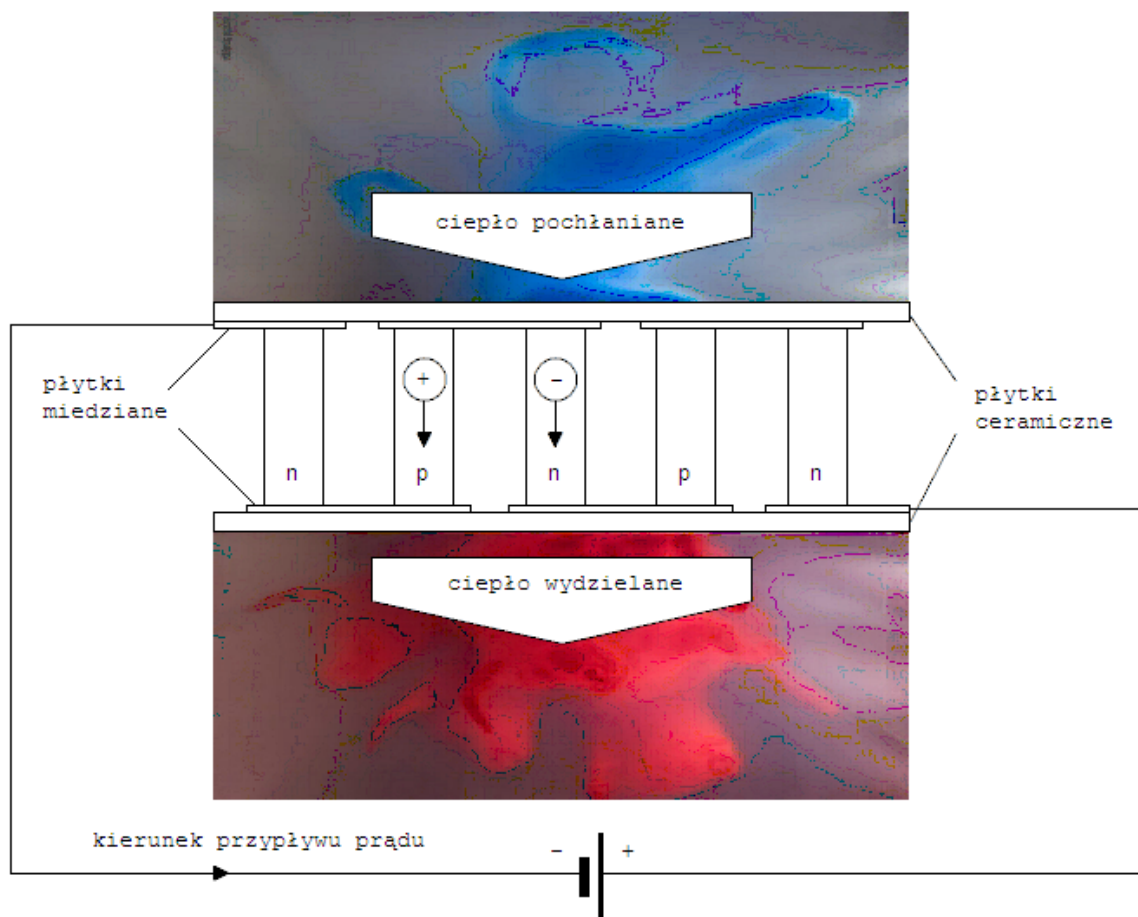
Na rysunkach 1.2 i 1.3 widać dwie płytki ceramiczne, pomiędzy którymi znajdują się pojedyncze „kolumnienki”. Są one wykonane z półprzewodników, na przemian typu n i typu p i połączone ze sobą szeregowo za pomocą miedzianych płytek, które zapewniają kontakt elektryczny. Płytki ceramiczne zapewniają sztywność układu. Materiał, z jakiego są wykonane, stanowi izolację elektryczną i dodatkowo dobrze przewodzi ciepło.

Płytki miedziane łączą półprzewodniki różnych typów tworząc połączone szeregowo złącza p-n i n-p. Pierwszy typ złącz występuje po jednej stronie, która będzie po zamknięciu obwodu i przyłożeniu napięcia stroną chłodniejszej, a drugi po drugiej, która będzie cieplejsza. Pod względem cieplnym połączenie par złącz w module jest równoległe.

Tam gdzie znajdują się złącza p-n elektrony przechodzą z półprzewodnika typu p do półprzewodnika typu n o wyższych poziomach energetycznych, ale żeby to przejście mogło zajść potrzebna jest dodatkowa energia. Energia ta pobierana jest w postaci ciepła. W taki sposób złącze p-n pochłania ciepło. Na rysunku 1.3 górna płytka ceramiczna, przy której znajdują się właśnie złącza tego typu, jest chłodzona¹.

W przypadku złącz n-p energia jest emitowana w postaci ciepła przy „spadaniu” elektronów o wyższych energiach z półprzewodnika typu n do półprzewodnika typu p. Wynikiem tego jest

¹na rysunku 1.3 oznaczony jest kierunek przepływu prądu, trzeba pamiętać, że elektrony poruszają się w przeciwną stronę



Rysunek 1.3: Moduł Peltiera, wykorzystano fotografię ze strony <http://synapticstimuli.com/bandwidth/>

ocieplanie dolnej płytki ceramicznej.

Ilość ciepła pobranego po jednej stronie modułu powinna być równa ilości ciepła wydzielonego po drugiej. Obie te wartości zależą od ilości elektronów zmieniających poziomy energetyczne oraz różnicy między tymi poziomami. Jednak ciepła wydzielanego jest więcej ze względu na towarzyszące przepływowi prądu dodatkowe ciepło Joule'a, które też jest przepompowywane z zimniejszej strony.

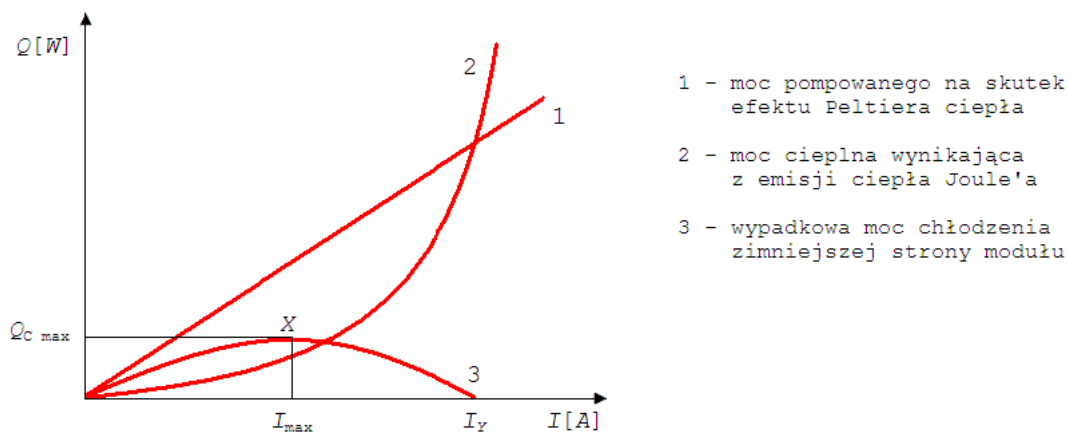
Przy zmianie kierunku przyływu prądu w miejscach, gdzie dotychczas były złącza p-n będą złącza n-p i odwrotnie, co implikuje zamianę miejscami strony cieplejszej z zimniejszą.

1.2.2 Możliwości i ograniczenia

Wydawałoby się, że zdolności transportowe modułów Peltiera są proporcjonalne do natężenia płynącego prądu. Zależność ta nie jest jednak liniowa ze względu na efekt Joule'a i przewodzenie ciepła. Zjawiska Seebecka i Thomsona nie są aż tak istotne. Wraz z liniowym wzrostem natężenia prądu ilość wydzielonego ciepła Joule'a rośnie kwadratowo. Ciepło to jest

transportowane na cieplejszą stronę modułu. Sprawność maleje, ponieważ moduł oprócz wypompowywania ciepła ze strony chłodniejszej musi jeszcze wypompowywać powstałe ciepło Joule'a.

Jednym z najważniejszych parametrów modułu Peltiera, jest prąd maksymalny I_{max} , ponieważ jego przekroczenie powoduje pogorszenie chłodzenia. Prąd ten określany jest mianem maksymalnego, bo przy takim prądzie osiągamy najlepszy stosunek ciepła pobranego po stronie zimniejszej do wydzielonego na stronie cieplejszej. Nie należy go mylić z prądem I_y , przy którym ilość ciepła Joule'a jest już tak duża, że stosunek ciepła pobranego do wydzielonego nie tylko nie jest najlepszy, ale tylko ono jest transportowane na cieplejszą stronę. Po przekroczeniu tego prądu moduł nie potrafi już odprowadzić całego ciepła Joule'a a jego nadwyżka powoduje ocieplanie się zimniejszej strony modułu. W tym momencie obie strony modułu zaczynają się ogrzewać.

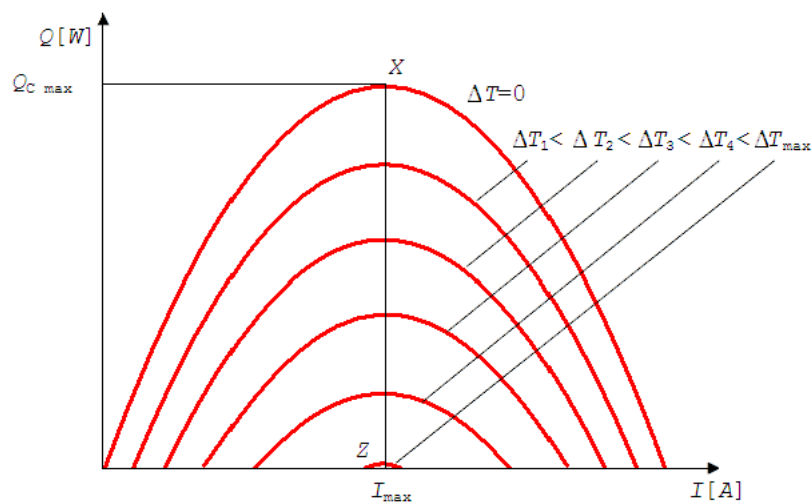


Rysunek 1.4: Moce cieplne modułu Peltiera w zależności od wartości natężenia prądu

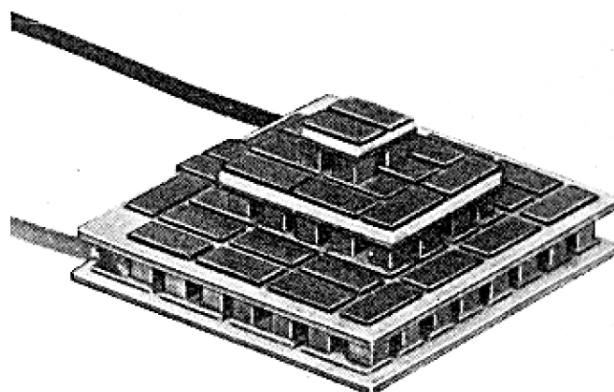
Na rysunku 1.4 cyfrą 1 oznaczony jest przebieg zależności mocy pompowanego na skutek efektu Peltiera ciepła od natężenia prądu, cyfrą 2 - moc cieplna wynikająca z emisji ciepła Joule'a, a cyfrą 3 ich różnica, czyli wypadkowa moc chłodzenia zimniejszej strony modułu.

Poza tym ciepło ze strony ciepłej będzie chciało wrócić na stronę zimną. Siła tego zjawiska zależy od różnicy temperatur i przewodności cieplnej materiału, z którego wykonane są kolumnienki. Ten niekorzystny efekt nasila się wraz ze wzrostem różnicy temperatur po obu stronach modułu. Na rysunku 1.5 przedstawiona jest przykładowa zależność wypadkowej mocy chłodzenia zimniejszej strony modułu w zależności od natężenia prądu dla kilku wybranych wartości różnic temperatur ΔT .

Istnieje maksymalna wartość ΔT_{max} (ok. 60 - 75 °C), która wyznacza maksymalną temperaturę zimniejszej strony przy danej temperaturze strony cieplejszej. Dlatego ważne jest też odprowadzanie ciepła ze strony cieplejszej np. poprzez zastosowanie dobrego radiatora w połączeniu z odpowiednio umieszczonym wentylatorem. Można również ułożyć moduły jeden na drugim jak na rysunku 1.6, aby zwiększyć tę różnicę temperatur.



Rysunek 1.5: Wypadkowa moc chłodzenia zimniejszej strony modułu Peltiera a różnica temperatur



Rysunek 1.6: Piramida modułów Peltiera

Różnica temperatur pomiędzy zimniejszą stroną pierwszego modułu (na samej górze na rysunku 1.6), a cieplejszą ostatniego (dolnego) może być znacznie większa niż dla pojedynczego modułu. Każde kolejne urządzenie musi być większe od poprzedniego, ponieważ musi przepompować oprócz ciepła chłodzenia poprzedniego elementu również jego ciepło Joule'a. W ten sposób można osiągnąć temperatury rzędu -80 do -110 °C przy sześciu stopniach, moce chłodzenia Q_C są jednak niewielkie.

Maksymalna wydajność chłodzenia $Q_{C_{max}}$ odczytana w punkcie X z wykresu 1.4 nie jest parametrem rzeczywistym, ponieważ jest liczona przy zerowej różnicy temperatur obu stron modułu.

Podsumowując, sprawność działania urządzenia zmniejsza się ze względu na występujące ciepło Joule'a i ciepło chcące wrócić na chłodniejszą stronę.

1.2.3 Współczynnik chłodzenia COP

Współczynnik chłodzenia COP (ang. *Coefficient Of Performance*) jest używany do zdefiniowania sprawności modułów Peltiera, która jest stosunkiem ilości ciepła zaabsorbowanego na chłodzonej stronie modułu o temperaturze T_C do ilości energii elektrycznej niezbędnej do pobrania tego ciepła. Dla optymalnej wartości prądu elektrycznego maksymalną wartość COP modułu o dobroci ZT , pracującego w średniej temperaturze $T_{AV} = \frac{T_C + T_H}{2}$ (T_H to temperatura strony cieplejszej) można zapisać jako:

$$COP_{max} = \frac{T_C}{T_H - T_C} \frac{\sqrt{1 + ZT_{AV}} - \frac{T_H}{T_C}}{\sqrt{1 + ZT_{AV}} + 1} \quad (1.11)$$

Gdy ZT_{AV} zmierza do ∞ , to maksymalny współczynnik chłodzenia COP_{max} dąży do wyrażenia będącego odwrotnością sprawności w cyklu Carnota:

$$COP_{max} \Leftarrow \frac{1}{\eta_C} = \frac{T_H - T_C}{T_C}, \quad (1.12)$$

czyli do sprawności idealnej chłodziarki. Najlepsze moduły chłodzące, powinny posiadać dużą dobroć ZT , jak najbardziej zbliżoną do dobroci materiału zT , z którego je wykonano.

1.3 Układy regulacji automatycznej

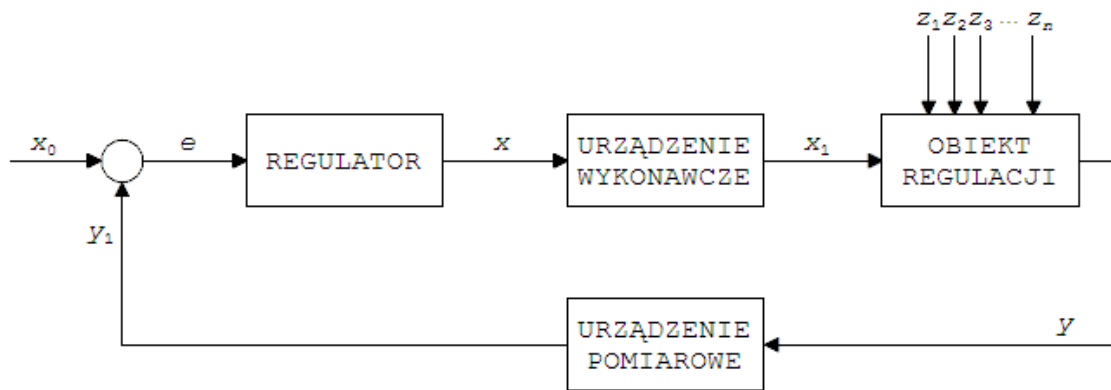
Niech wielkość regulowana oznaczona zostanie jako y . Chcąc kontrolować jej wartość dla danego *obiekту regulacji* potrzebne są informacje o jego stanie. Takich informacji dostarcza *urządzenie pomiarowe* składające się zazwyczaj z czujnika oraz przetwornika, dzięki któremu sygnał z wyjścia urządzenia pomiarowego y_1 można podać bezpośrednio na wejście regulatora.

Regulator to urządzenie, w którym można zadać żądaną wartość wielkości regulowanej x_0 . Jego zadaniem jest porównanie zadanej wartości x_0 z wartością wielkości regulowanej zmierzoną przez kolejny element układu regulacji, czyli urządzenie pomiarowe y_1 . Wygenerowany zostanie sygnał regulujący x zależny od różnicy pomiędzy wartościami x_0 i y_1 , czyli tzw. *uchybu regulacji e*. Regulator używać może różnych algorytmów, aby wyznaczyć odpowiednią wartość sygnału regulującego. Może także korzystać z dodatkowych informacji jak na przykład informacji o tendencji zmian wartości wielkości regulowanej tj. czy wartości maleją czy rosną. W taki sposób można zrealizować histerezę.

Sygnał regulujący x jest przekazywany do *urządzenia wykonawczego*, którego zadaniem jest zmiana stanu obiektu regulacji poprzez oddziaływanie sygnałem sterującym x_1 , który to z kolei zależy od sygnału na wyjściu regulatora x . Te sygnały mogą mieć różną naturę np. x może być napięciem natomiast x_1 może być strumieniem ciepła.

Na skutek działania urządzenia wykonawczego zmienia się wartość wielkości regulowanej, a co za tym idzie także sygnał regulujący. Tak więc występuje tu pętla sprzężenia zwrotnego.

Na rysunku 1.7 zamieszczony został schemat takiego układu.



Rysunek 1.7: Schemat układu automatycznej regulacji

Ze względu na charakter sygnału sterującego możemy wyróżnić m.in. układy:

- *stabilizacji automatycznej* - mające za zadanie utrzymywanie sygnału regulowanego na stałym zadanym poziomie,
- *nadążne* - zwane często serwomechanizmami, zadana wartość zmienia się w czasie, a układ ma śledzić wartość zadaną,
- *regulacji programowej* - to szczególny przypadek układu nadążnego, w którym wartość zadana jest znaną funkcją czasu.

Układ będący przedmiotem tej pracy jest układem stabilizacji automatycznej z możliwością zmiany wartości temperatury, jaka ma być utrzymywana².

1.3.1 Algorytm PID

Algorytm ten to najpopularniejszy algorytm stosowany w regulatorach analogowych³ i nadal podstawowy algorytm stosowany w regulatorach cyfrowych⁴. Jest on stosunkowo prosty i znajduje szerokie zastosowania w przemyśle.

Regulator PID to regulator proporcjonalno-całkująco-różniczkujący (z ang. proportional-integral-derivative controller). Taki regulator realizuje algorytm PID. Transmitancja operatorowa, czyli stosunek transformaty Laplace'a funkcji wyjścia do transformaty Laplace'a wejścia systemu przy zerowych warunkach początkowych, idealnego analogowego regulatora PID wyraża się wzorem:

$$K_{PID}(s) = K_P + \frac{1}{T_I s} + T_D s, \quad (1.13)$$

²zakres, w jakim takiej zmiany można dokonać, został opisany w rozdziale 3

³regulator taki generuje ciągły sygnał wyjściowy w odpowiedzi na ciągły sygnał wejściowy

⁴regulatory cyfrowe w przeciwieństwie do regulatorów analogowych produkują impulsowy sygnał wyjściowy przetwarzając sygnał wejściowy w momentach próbkowania

natomiast dla rzeczywistego regulatora PID:

$$K_{PID}(s) = K_P + \frac{1}{T_I s} + \frac{T_D s}{sT + 1} \quad (1.14)$$

gdzie:

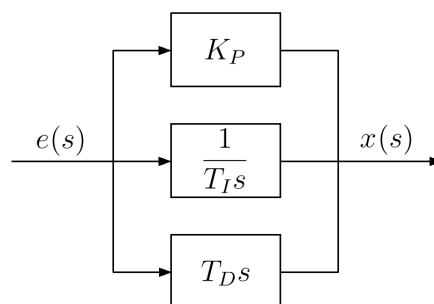
K_P - wzmacnienie,

T_I - czas zdwojenia (całkowania),

T_D - czas wyprzedzenia (różniczkowania),

T - stała czasowa.

W obydwu powyższych równaniach można wyróżnić trzy człony odpowiadające trzem blokom funkcjonalnym regulatora: *proporcjonalnemu* P (z ang. *proportional*), *całkującemu* I (z ang. *integral*) i *różniczkującemu* D (z ang. *derivative*). Schemat blokowy idealnego regulatora PID znajduje się na rysunku 1.8. Sygnał regulujący z bloku proporcjonalnego P jest proporcjonalny do uchybu regulacji, czyli bieżącej różnicy między wartością zadaną a zmierzoną. W bloku całkującym I przetwarzana są informacje o tym jak wyglądał uchyb regulacji w przeszłości tzn. jest on całkowany w pewnym czasie, a sygnał regulujący z tego bloku jest proporcjonalny do wyliczonej całki. Czas całkowania jest parametrem regulacji, który można zmieniać. W bloku różniczkującym D obliczana jest pochodna uchybu regulacji, czyli przewidywane jest zachowanie się uchybu w przyszłości. Czas różniczkowania także można ustawić. Parametry każdego z bloków, czyli odpowiednio wzmacnienie bloku proporcjonalnego K_P , czas całkowania T_I oraz czas różniczkowania T_D , określa się mianem *nastaw regulatora*. Odpowiednio dobrane wartości nastaw zapewniają stabilizację regulowanej wielkości.



Rysunek 1.8: Schemat blokowy idealnego regulatora PID

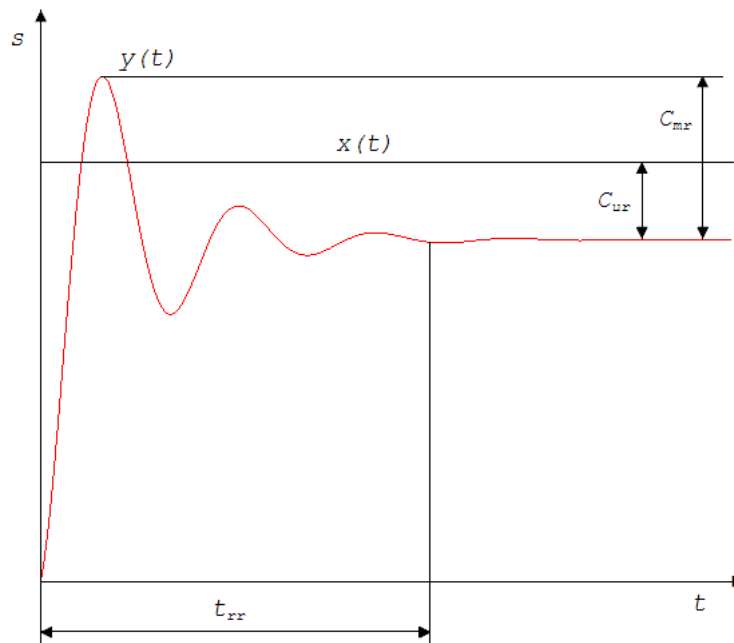
Dobierając odpowiednie wartości nastaw regulatora PID można zmienić go, w zależności od tego które człony zostaną wyłączone, w regulator PI, regulator PD, regulator P albo regulator I. Człon różniczkujący jest wrażliwy na szum pomiarowy, natomiast człon całkujący może być niezbędny do tego, aby układ mógł osiągnąć wartość zadaną.

1.3.2 Dobór nastaw regulatora

Dla każdego układu regulacji należy optymalnie dobrać nastawy regulatora. Zadanie to jest czasem trudne. Może być ono jednak dużo prostsze przy posłużeniu się charakterystykami logarytmicznymi obiektu oraz regulatora. Sygnału wymuszający $x(t)$ to sygnał podany na wejście układu regulacji. Na wyjściu tego układu pojawia się jego odpowiedź $y(t)$. Różnica pomiędzy tymi dwoma sygnałami w stanie nieustalonym to uchyb regulacji (błąd sterowania). Charakteryzują go trzy wielkości, do których minimalizacji należy dążyć dDobierając odpowiednie wartości nastaw:

- *statyczny błąd regulacji* C_{ur} - czyli różnica pomiędzy sygnałem wymuszającym $x(t)$ a odpowiedzią układu $y(t)$ w stanie ustalonym,
- *przeregulowanie* C_{mr} - czyli wyrażany w procentach stosunek wartości największego uchybu do wartości zadanej,
- *czas regulacji* t_{rr} - czyli czas, po którym odpowiedź układu $y(t)$ nie różni się od wartości tej odpowiedzi w stanie ustalonym o więcej niż do 5%.

Na rysunku 1.9 przedstawiona jest przykładowa odpowiedź regulatora na skok jednostkowy z zaznaczonym statycznym błędem regulacji C_{ur} , przeregulowaniem C_{mr} oraz czasem regulacji t_{rr} .



Rysunek 1.9: Sygnał wymuszający i odpowiedź układu regulacji

Im mniejsze przeregulowanie tym mocniejsze tłumienie oscylacji. Na granicy stabilności, kiedy pojawiają się niegasnące oscylacje, przeregulowanie osiąga 100%.

Każdy człon regulatora PID ma wpływ na inne parametry regulacji. Poniżej opisany został wpływ każdego z nich.

Działanie proporcjonalne P

Błąd statystyczny C_{ur} zależy od wzmocnienia i zastosowanie regulatora składającego się jedynie z członu proporcjonalnego nie eliminuje go. Im większe wzmocnienie K_P tym większa amplituda sygnału wyjściowego i krótszy czas regulacji t_{rr} .

Działanie całkujące I

Regulator realizujący jedynie człon całkujący wykazuje dobre zdolności reakcji dla wolnozmennego sygnału regulowanego. Ważne jest to, że zastosowanie bloku I powoduje zmniejszenie wartości błędu statycznego regulacji C_{ur} do zera. Odbywa się to kosztem czasu regulacji. Działanie całkujące zwiększyć można poprzez jednoczesne zwiększenie wzmocnienia K_P oraz zmniejszenie wartości czasu całkowania T_I .

Aby całkowicie wyłączyć człon całkujący należy ustawić czas całkowania na nieskończoność.

Działanie różniczkujące D

Działanie to nie zależy od szybkości zmian sygnału regulowanego, a jego wynikiem jest zmniejszenie przeregulowania C_{mr} oraz skrócenie czasu regulacji t_{rr} .

Aby całkowicie wyłączyć człon różniczkujący należy wyzerować czas różniczkowania.

1.3.3 Metoda Zieglera-Nicholsa

Znajomość charakterystyk logarytmicznych obiektu regulacji oraz regulatora jest potrzebna do doboru nastaw. Nie zawsze jednak takie charakterystyki łatwo otrzymać. W takich przypadkach można skorzystać z metod przybliżonych niewymagających znajomości tych charakterystyk np. z *metody Zieglera-Nicholsa* nazywanej również *metodą inżynierską*. Metoda ta wymaga przeprowadzenia prostego doświadczenia.

W pierwszym kroku należy podłączyć jedynie blok proporcjonalny⁵ P i ustawić minimalne wzmocnienie K_P . Następnie należy stopniowo zwiększać wzmocnienie aż do uzyskania w odpowiedzi układu regulacji niegasnących oscylacji. Wartość wzmocnienia odpowiadającego pojawieniu się takich oscylacji określa *współczynnik wzmocnienia krytycznego* $K_{P_{kr}}$. Ważnym parametrem jest również okres tych oscylacji nazywany *okresem drgań niegasnących* T_{osc} . Zmierzenie tych dwóch wielkości pozwala wyznaczyć wartości nastaw. Wyznacza się je korzystając z wartości podanych w tabeli 1.1.

⁵aby odłączyć pozostałe dwa bloki regulatora PID należy ustawić czas całkowania T_I jak największy, a czas różniczkowania T_D zerowy

	K_P	T_I	T_D
P	$0,5K_{P_{kr}}$	∞	0
PI	$0,45K_{P_{kr}}$	$0,85T_{osc}$	0
PID	$0,6K_{P_{kr}}$	$0,5T_{osc}$	$0,12T_{osc}$

Tabela 1.1: Tabela dla podstawowej metody Zieglera-Nicholsa

Dla zmniejszenia bądź całkowitego wyeliminowania przeregulowania w regulatorach PID można przy doborze nastaw posłużyć się tzw. zmodyfikowaną metodą Zieglera-Nicholsa. Różni się ona tabelą, z której należy wziąć wartości nastaw. Dla zmodyfikowanej metody Zieglera-Nicholsa skorzystać należy z wartości podanych w tabeli 1.2.

	K_P	T_I	T_D
PID - niewielkie przeregulowanie	$0,33K_{P_{kr}}$	$0,5T_{osc}$	$T_{osc}/3$
PID - brak przeregulowania	$0,2K_{P_{kr}}$	$0,5T_{osc}$	$T_{osc}/3$

Tabela 1.2: Tabela dla zmodyfikowanej metody Zieglera-Nicholsa

Reguły te mają znaczenie pomocnicze i mogą być punktem wyjścia do doświadczalnej optymalizacji nastaw regulatora w rzeczywistym układzie.

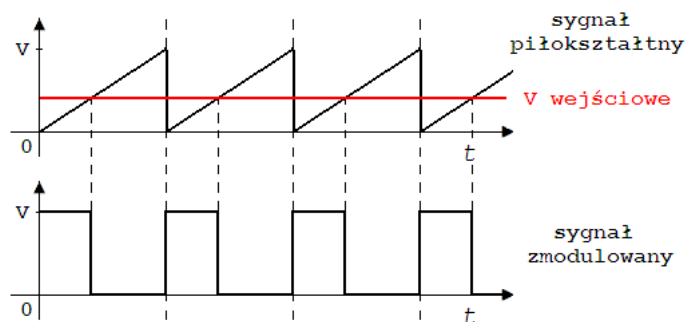
1.4 Modulacja szerokości impulsów PWM

PWM (ang. pulse-width modulation) to modulacja długości impulsu. Mając sygnał o stałej częstotliwości oraz amplitudzie, zmieniane jest jedynie wypełnienie sygnału. Modulacja ta znajduje zastosowanie we wzmacniaczach, zasilaczach impulsowych oraz układach sterujących pracą silników elektrycznych.

Dla przebiegu zmodulowanego można wyznaczyć średnie napięcie w czasie. Jest ono proporcjonalne do wypełnienia sygnału. Gdy wypełnienie osiąga 100%, to średnie napięcie jest równe górnej granicy napięcia sygnału i liniowo maleje aż do 0 wraz ze zmniejszaniem się wypełnienia sygnału.

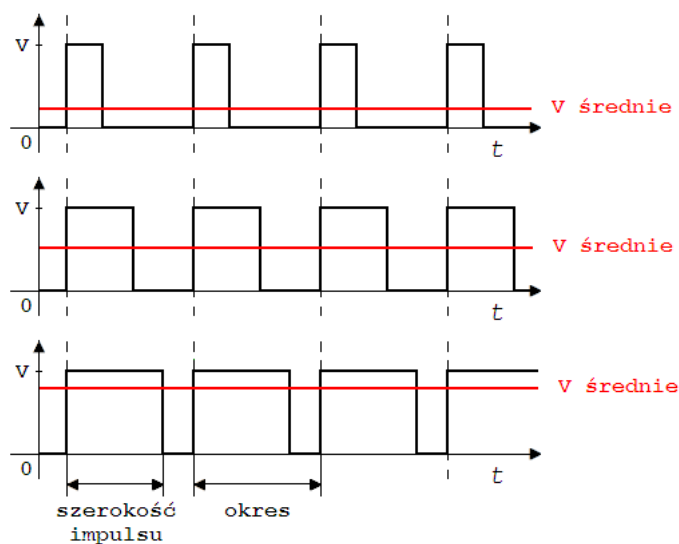
Taka modulacja może zostać wykorzystana do sterowania pracą modułów Peltiera. W takim przypadku napięcie na modułach nie zmienia się liniowo tylko przeskakuje z wartości minimalnej na maksymalną i zmianę mocy chłodzenia zastępuje zmiana czasu chłodzenia z daną mocą. Zastosowanie modulacji PWM jest korzystniejsze niż sterowanie napięciem, ponieważ zależność mocy chłodzenia modułu Peltiera od napięcia do niego przyłożonego nie jest liniowa.

Prostą implementacją modulacji długości impulsu jest generacja sygnału piłokształtnego i porównanie go z ciągłym napięciem wejściowym. Porównanie takie można zrealizować po-



Rysunek 1.10: Sposób realizacji modulacji długości impulsu

dając sygnał piłokształtny na wejście odwracające komparatora, a ciągle napięcie na wejście nieodwracające. Gdy napięcie wejściowe jest większe od aktualnego narastającego napięcia, z którym jest porównywane, to sygnał wyjściowy ustawiany jest na poziomie wysokim. W pewnym momencie napięcie wejściowe przestaje być większe i wtedy na wyjściu pojawia się napięcie niskie. Moment ten następuje wcześniej dla mniejszego i później dla większego napięcia wejściowego. W konsekwencji wypełnienie sygnału wyjściowego liniowo rośnie wraz ze wzrostem napięcia na wejściu. Mechanizm powstawania sygnału zmodulowanego w ten sposób zilustrowany jest na rysunku 1.10. Na rysunku 1.11 znajdują się ilustracje średnich napięć w zależności od wypełnienia sygnału dla trzech różnych przypadków wypełnienia.

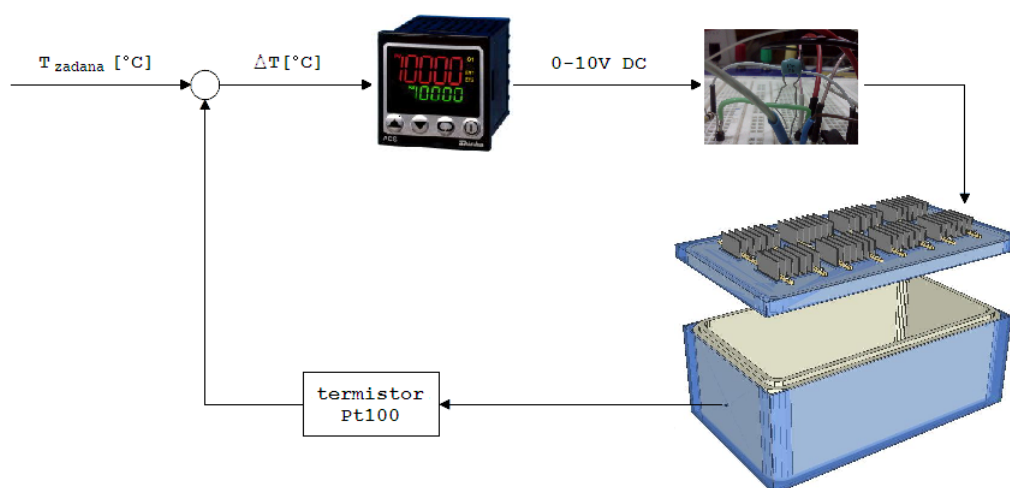


Rysunek 1.11: Modulacja długości impulsu

Rozdział 2

Projekt układu chłodzenia i stabilizacji temperatury

Na rysunku 2.1 przedstawione są najważniejsze elementy projektowanego układu regulacji. W tym rozdziale zostanie zaprezentowana koncepcja ich realizacji.



Rysunek 2.1: Schemat układu automatycznej regulacji temperatury

2.1 Regulator

Na samym początku podjęta została decyzja o użyciu analogowego regulatora PID. W wykonanym układzie regulacji użyto modelu ACS-13A V/M firmy Shinko Technos Co., Ltd.. Zakup takiego urządzenia to duży koszt, dlatego wybór padł na urządzenie dostępne już na Wydziale¹.

¹mowa o Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej Akademii Górniczo - Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie

Urządzenie to posiada kolorowy wyświetlacz LCD, dzięki któremu można m.in. w prosty sposób zadać temperaturę. W urządzeniu tym można skorzystać z funkcji automatycznego doboru nastaw jednak nie została ona wykorzystana w tym projekcie. W opracowaniu tym zamieszczone zostały najważniejsze informacje dotyczące tego regulatora w kontekście jego zastosowania w wykonanym układzie. Pozostałe informacje można znaleźć w instrukcji obsługi dołączonej do urządzenia.



Rysunek 2.2: Regulator PID model,

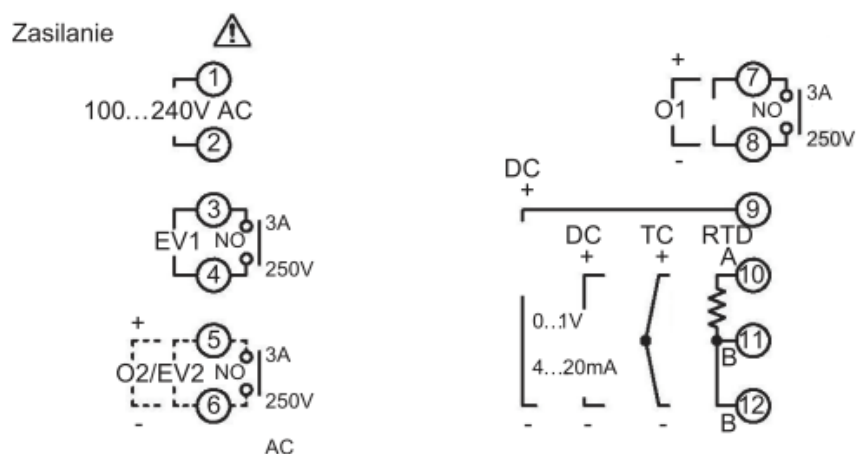
wykorzystano fotografię ze strony www.shinko-technos.co.jp/e/JPEG_GIF/ACS-13A.jpg

Używając wyjścia OUT1 tego regulatora można wybrać jedną z dwóch opcji regulacji tj. chłodzenie bądź grzanie. Oznacza to, że regulator będzie podawał sygnał sterujący odpowiednio jeśli temperatura zmierzona przez podłączony do regulatora czujnik przekroczy nastawioną w górę lub w dół. Sygnał ten będzie napięciem zmieniającym się proporcjonalnie w zakresie 0 - 10V. W przypadku użycia modułów Peltiera po przestawieniu opcji regulacji należy jeszcze przepięć przewody dochodzące do urządzenia wykonawczego, aby prąd przepływał przez nie w drugą stronę, co spowoduje zamianę miejscami strony zimniejszej z cieplejszą. Gdy wyjście jest załączone po prawej stronie wyświetlacza zapala się kontrolka 01.

Aby uruchomić regulator należy do zacisków oznaczonych numerami 1 i 2 podłączyć przewody zasilające, a do zacisków oznaczonych numerami 10 do 12 podłączyć czujnik temperatury. Regulator zasilany jest napięciem sieciowym 230V. Należy jeszcze wyprowadzić przewody wyjściowe. Na samym regulatorze po obu bokach można znaleźć rysunki z opisami zacisków takie jak na rysunku 2.3.

Po zasileniu regulatora uruchamia się on automatycznie i po 3 sekundach pokazywania typu wejścia (u góry) oraz górnego limitu wejścia (na dole) przechodzi on w tryb wyświetlania temperatury zadanej oraz zmierzonej. Wyłączyć go można odłączając od zasilania. W tym modelu regulatora można również włączyć jedynie wyjście. Wtedy na wyświetlaczu regulatora pojawia się słowo OFF i wyjście zostaje odłączone. Po ponownym włączeniu wyjścia urządzenie powraca do domyślnego trybu wyświetlania. Regulator ten ma też funkcję zapamiętywania ustawień po odłączeniu zasilania tak więc wyłączenie i ponowne włączenie urządzenia nie zresetuje żadnych ustawień.

Poniżej została zamieszczona lista przydatnych ustawień zastosowanego regulatora. Pozo-












Rysunek 2.3: Zaciski regulatora ACS-13A

stałe informacje można znaleźć w instrukcji obsługi dołączonej do urządzenia.

Przeznaczenie przycisków

Wszystkie ustawienia regulatora można zmienić przy użyciu czterech przycisków znajdujących się pod ekranem regulatora. Na rysunku 2.4 przedstawione zostały możliwe kombinacje przycisków wraz z opisem ich działania.

-  1s włączenie/wyłączenie wyjścia regulacyjnego
-  3s wskazanie wartości sygnału regulacyjnego
-  +  przejście to trybu nastaw pomocniczych
-  +  przejście to trybu nastaw pomocniczych - poziom 1
-  +  przejście to trybu nastaw pomocniczych - poziom 2
-  przejście to trybu nastaw głównych oraz przejście pomiędzy nastawami

Rysunek 2.4: Opis działania kombinacji przycisków

Aby powrócić do domyślnego trybu wyświetlania trzeba przejść przez wszystkie nastawy.

Podstawowe informacje dla użytkownika

Po przejściu w jeden z trybów nastaw możliwa jest zmiana wartości nastawy, której oznaczenie jest aktualnie wyświetlane w górnej części ekranu. Sposób wyświetlania różnych liter przedstawiony jest na rysunku 2.5.

Wyświetlenie liter w trybie nastaw:

+	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	°C	F
-	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	°C	F
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z

Rysunek 2.5: Sposób wyświetlania liter przez regulator ACS-13A

Ustawianie temperatury

W zastosowanym modelu regulatora po przejściu w tryb nastaw głównych, jedyną wartością jaką można ustawić, jest temperatura jaka ma być utrzymywana. Można ją zwiększyć lub zmniejszyć używając odpowiednio klawiszy z trójkątem skierowanym wierzchołkiem w górę i w dół. Podczas ustawiania tej temperatury w górnej części ekranu wyświetlona zostanie litera S.

Tryb nastaw pomocniczych

Wybierając tryb nastaw pomocniczych można ustawić zakres proporcjonalności P^2 , czas całkowania I^3 oraz czas różniczkowania d^4 . Zakres proporcjonalności P jest odwrotnością współczynnika wzmocnienia wyrażoną w procentach. Jeśli zakres proporcjonalności zostanie ustawiony na 0 następuje przełączenie na regulację włącz/wyłącz, a ustawienie czasów całkowania i różniczkowania nie będzie możliwe. Człony całkujący jak i różniczkujący można wyłączyć ustawiając odpowiednio czas całkowania oraz czas różniczkowania na 0 sekund.

Regulacja włącz/wyłącz polega na działaniu na obiekt regulacji zawsze kiedy wielkość regulowana przekracza wartość zadaną. Wielkość sygnału regulacyjnego nie zależy od uchybu regulacji.

²w %, może przyjmować wartości od 0 do 1000, domyślnie jest to 10

³w sekundach, może przyjmować wartości od 0 do 1000, domyślnie jest to 200

⁴w sekundach, może przyjmować wartości od 0 do 300, domyślnie jest to 50

Pozostałe nastawy pomocnicze tego regulatora zostały opisane w dodatku A.

Wyświetlanie

Zmierzona temperatura może być wyświetlana w trzech kolorach:

- *pomarańczowym*, kiedy jest niższa od dolnej granicy histerezy
- *zielonym*, kiedy jest w granicach histerezy
- *czerwonym*, kiedy jest wyższa od dolnej granicy histerezy

2.2 Urządzenie pomiarowe

Do pomiaru temperatury wewnątrz komory zastosowany został jeden z czujników RTD⁵ a dokładniej termistor Pt100, czyli rezystor platynowy o oporze 100Ω w temperaturze 0°C . W pewnym zakresie temperatur oporność takiego rezystora rośnie liniowo z temperaturą. Do zastosowanego regulatora PID można taki czujnik bezpośrednio podłączyć.

Układ elektroniki odczytu dla detektorów półprzewodnikowych, dla którego wykonany układ jest dedykowany posiada wbudowany czujnik temperatury z wyjściem napięciowym. Zastosowany regulator ma kilka wejść napięciowych 0-1V, 0-5V, 1-5V oraz 0-10V. W łatwy sposób można zmienić rodzaj wejścia, z którego korzysta regulator. Napięcie z wbudowanego czujnika trzeba wzmocnić i dostosować do wybranego zakresu dostępnego w regulatorze.

2.3 Obiekt regulacji

Główną częścią urządzenia będącego przedmiotem tej pracy będzie komora, w której umieszczone będzie inne urządzenie wymagające stałości temperatury do poprawnej pracy. Regulacji podlega temperatura wewnątrz komory. Komora ta powinna być dobrze izolowana cieplnie od otoczenia. Można to osiągnąć stosując prostopadłościennie styropianowe pudło podobne do tych stosowanych w transporcie żywności. Można też zastosować pudło o podwójnych ściankach, gdzie pomiędzy tymi ściankami występuje próżnia techniczna, czyli obszar ten jest wypełniony gazem pod niskim ciśnieniem np. prostopadłościennie pudło o ściankach ze stali nierdzewnej, gdzie obszar pomiędzy ściankami wypełniony jest rozrzedzonym powietrzem. Dobra izolacja jest istotna, ponieważ używane do obniżenia temperatury moduły Peltiera nie mają zbyt dużej sprawności.

W urządzeniu zrealizowanym w ramach tej pracy zdecydowano się na pierwsze rozwiązanie, ze względu na jego dostępność i koszty konstrukcji takiej komory. Wymiary pudełka zostały dobrane tak, aby przede wszystkim zmieścił się w nim wspomniany we wprowadzeniu tej pracy

⁵RTD z ang. *Resistive Thermal Device*, czyli rezystancyjne urządzenie termiczne



Rysunek 2.6: Styropianowe pudło będące bazą komory chłodzenia

układ elektroniki odczytu. Jako baza użyty został pojemnik styropianowy PL 160 firmy KNAUF Industries przedstawiony na rysunku 2.6 o następujących parametrach⁶:

Wymiary zewnętrzne: $500 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$,

Wymiary wewnętrzne: $460 \text{ mm} \times 250 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$,

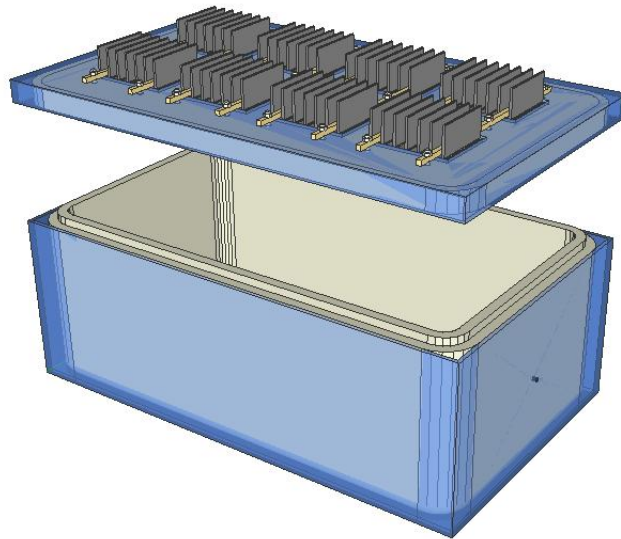
Pojemność: 19,2 l,

Gęstość spieniania: ok. $23 - 25 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$.

Sam styropianowy pojemnik łatwo uszkodzić, dlatego skonstruowana została specjalna obudowa ze szkła akrylowego. Rysunek 2.7 jest szkicem tej obudowy. Przewidziano w niej odpowiednie otwory m.in. na elementy urządzenia wykonawczego, czujnik temperatury, przewody zasilające urządzenie wykonawcze oraz elementy urządzeń, których temperatura pracy ma być regulowana. Na jednej krótszej bocznej ścianie centralnie umieszczony został okrągły otwór o średnicy 30 mm, przez który można wprowadzić do środka komory np. końcówkę światłowodu. Uszczelniony jest on gumowym korkiem wypełnionym dodatkowo gęstą gąbką. Na przeciwległej ścianie na samym środku wykonany został okrągły otwór o średnicy 4 mm na czujnik temperatury. Otoczony on został czterema podłużnymi otworami ułożonymi w literę X, które także są uszczelnione gęstą gąbką ze względu na jej elastyczność. Takie ułożenie ich umożliwia wygodne doprowadzenie zasilania do znajdującego się wewnątrz urządzenia dla niemal każdego wariantu umiejscowienia na nim odpowiednich gniazd. Na rysunkach B.1 oraz B.2 w dodatku B przedstawione są odpowiednio wymiary obudowy i pokrywy.

Pokrywa została tak skonstruowana, aby zminimalizować przenikanie ciepła z zewnątrz. Pokrywa styropianowego pudła została obudowana pokrywą ze szkła akrylowego w celu ochrony

⁶dane ze strony internetowej producenta www.knauf-industries.com/pl/content/pudł-styropianowe-produkowane-w-polsce

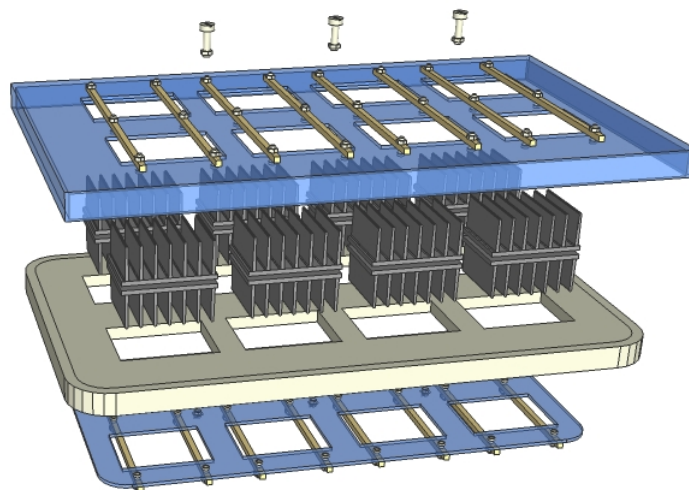


Rysunek 2.7: Obudowa komory chłodzenia - szkic 3D

przed uszkodzeniami mechanicznymi. Dodatkowo od wewnętrznej strony dołożona została płyta, której podstawowym zadaniem jest zapewnienie mocowania pozostałych elementów pokrywy oraz zapewnienie jest sztywności i wytrzymałości.

W każdym z 8 otworów znajduje się jeden moduł Peltiera razem z dwoma radiatorami po obu stronach. Radiatory są dopasowane do otworów. Ilość modułów i ich parametry zostały dobrane w fazie projektowania. Każda para radiatorów została skręcona ze sobą śrubami dla lepszego kontaktu termicznego z modułem Peltiera. Niebanalne było opracowanie koncepcji montażu takich elementów do pokrywy. Bezpośredni kontakt nagrzanego radiatora z tworzywem sztucznym mógłby powodować jego topienie. Aby uniknąć kontaktu radiatorów z tworzywami sztucznymi zostały zastosowane drewniane listewki zapobiegające wypadnięciu radiatorów z otworów. Są one drewniane, ponieważ drewno nie przewodzi ciepła tak jak metal, a jego wytrzymałość jest wystarczająca dla tego zastosowania. Listwy te są przykręcone odpowiednio do obudowy pokrywy lub wewnętrznej płyty pokrywy. Obie te części są ze sobą połączone jedynie trzema długimi plastikowymi śrubami, aby zminimalizować ilość ciepła wnikającego przez pokrywę do wnętrza komory. Na rysunku 2.8 przedstawiona jest konstrukcja pokrywy komory chłodzenia. Dodatkowo nad każdym radiatorem po cieplejszej, czyli zewnętrznej stronie pokrywy, został zamontowany wentylator 12V DC⁷. Kable zasilające moduły Peltiera zostały poprowadzone po zewnętrznej stronie pokrywy. Kable te oddają ciepło w związku z tym, że przepływają przez nie duże prądy. Początkowo były one umieszczone od wewnątrz, ale po przeniesieniu ich na zewnątrz poprawiła się zauważalnie szybkość oraz jakość chłodzenia.

⁷wybór sposobu zamontowania wentylatorów jest opisany w sekcji 2.5.1

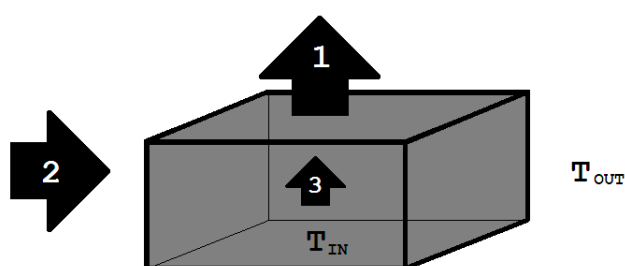


Rysunek 2.8: Konstrukcja pokrywy komory chłodzenia

2.4 Stany układu i tryby jego pracy

Aby określić parametry poszczególnych elementów układu trzeba zastanowić się, w jakich stanach może się on znajdować oraz jakie będą tryby jego pracy. Dążymy do sytuacji, kiedy temperatura wewnątrz komory chłodzenia T_{IN} jest stale niska, a w środku komory pracuje urządzenie, którego temperaturę pracy regulujemy.

Na samym początku temperatura wewnątrz komory T_{IN} , jak i na zewnątrz T_{OUT} , jest równa temperaturze pokojowej tj. 25°C , czyli ok. 298K^8 . Aby obniżyć T_{IN} trzeba odpompować ciepło z komory. Proces ten oznaczony jest na rysunku 2.9 strzałką 1. Kiedy różnica obu temperatur $T_{OUT} - T_{IN}$ jest różna od zera, przez ścianki komory zaczyna przenikać ciepło z otoczenia, co na rysunku 2.9 oznaczone jest strzałką 2. Drugi proces jest zależny od pierwszego, który zmienia tę różnicę temperatur. Strzałka 3 symbolizuje ciepło emitowane przez pracujące wewnątrz komory urządzenie.



Rysunek 2.9: Ilustracja możliwych przyływów ciepła w układzie

⁸w starszych publikacjach, jako temperatura pokojowa może być podana wartość 20°C

2.4.1 Schłodzenie komory

Strzałka 1 na rysunku 2.9 reprezentuje ciepło, które trzeba odpompować z komory, aby temperatura T_{IN} osiągnęła pożądaną niską wartość przy założeniu, że ścianki komory chłodzenia idealnie izolują cieplnie wewnątrz od otoczenia. Wtedy korzystając z definicji ciepła właściwego oraz pamiętając o zależności ciepła właściwego i gęstości powietrza od jego temperatury można zapisać:

$$Q_1 = V \int_{T_{pokojowa}}^{T_{MIN}} \rho(T_{IN}) c_V(T_{IN}) dT_{IN} \quad (2.1)$$

gdzie:

Q_1 - ciepło do odpompowania z komory,

V - objętość pustej komory,

$\rho(T_{IN})$ - gęstość powietrza w danej temperaturze,

c_V - ciepło właściwe powietrza przy stałej objętości w danej temperaturze.

Gęstość powietrza zależy od jego temperatury. Można ją wyrazić wzorem:

$$\rho(T_{IN}) = \frac{P_{atmosferyczne}}{R_d T_{IN}} \quad (2.2)$$

gdzie:

$P_{atmosferyczne}$ - ciśnienie atmosferyczne, czyli 1013,25 hPa,

R_d - stała gazowa powietrza wynosząca $287 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$.

Ciepło właściwe powietrza przy stałej objętości także zależy od temperatury. Istnieje wzór na ciepło właściwe gazu przy stałym ciśnieniu⁹:

$$c_p = A + BT + CT^2 + DT^{-2} + ET^3 \quad (2.3)$$

gdzie:

A, B, C, D, E - stałe współczynniki.

Po podstawieniu wartości współczynników:

$$c_p = 3,355 + 0,575 \cdot 10^{-3} \cdot T - 0,016 \cdot 10^5 \cdot T^{-2}. \quad (2.4)$$

Dodatkowo znana jest zależność:

$$\frac{c_p}{c_V} = \kappa \quad (2.5)$$

gdzie:

⁹wzór zaczerpnięty z *Engineering and Chemical Thermodynamics* Milo D. Koretsky, John Wiley & Sons (2004)

κ - wykładnik adiabaty, wielkość bezwymiarowa.

Chociaż κ zależy od temperatury, to w przedziale temperatur, w jakim urządzenie będzie pracować, można przyjąć $\kappa = 1,4$. Otrzymany w ten sposób wzór na ciepło właściwe powietrza przy stałej objętości w zależności od temperatury wygląda następująco:

$$c_V = \frac{1}{\kappa} \left(A + BT + CT^2 + DT^{-2} + ET^3 \right) \quad (2.6)$$

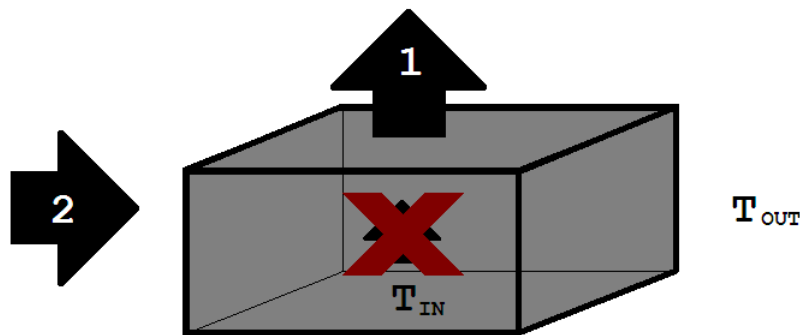
A po podstawieniu wartości:

$$c_V = \frac{1}{1,4} \left(3,355 + 0,575 \cdot 10^{-3} \cdot T - 0,016 \cdot 10^5 \cdot T^{-2} \right) \quad (2.7)$$

Korzystając z powyższych zależności może zostać wyliczone ciepło Q_1 :

$$\begin{aligned} Q_1 &= V \int_{T_{pokojo\,owa}}^{T_{MIN}} \rho(T_{IN}) c_V(T_{IN}) dT_{IN} \\ &= V \int_{T_{pokojo\,owa}}^{T_{MIN}} \frac{p_{atmosferyczne}}{R_d \cdot T_{IN}} \frac{1}{\kappa} \left(A + BT_{IN} + \frac{D}{T_{IN}^2} \right) dT_{IN} \\ &= \frac{V p_{atmosferyczne}}{\kappa R_d} \int_{T_{pokojo\,owa}}^{T_{MIN}} \frac{1}{T_{IN}} \left(A + BT_{IN} + \frac{D}{T_{IN}^2} \right) dT_{IN} \\ &= \frac{V p_{atmosferyczne}}{\kappa R_d} \int_{T_{pokojo\,owa}}^{T_{MIN}} \left(\frac{A}{T_{IN}} + B + \frac{D}{T_{IN}^3} \right) dT_{IN} \\ &= \frac{V p_{atmosferyczne}}{\kappa R_d} \left[A \ln T_{IN} + BT_{IN} - \frac{D}{2T_{IN}^2} \right]_{T_{pokojo\,owa}}^{T_{MIN}} \end{aligned} \quad (2.8)$$

Otrzymane po podstawieniu wartości ciepło Q_1 wynosi ok. 3 064 J, co oznacza, że możliwe byłoby otrzymanie temperatury 250K w ciągu 30 sekund przy użyciu układu modułów chłodzących o mocy 102W przy takiej różnicy temperatur, lub w ciągu 60 sekund przy mocy dwukrotnie niższej.



Rysunek 2.10: Ilustracja możliwych przepływów ciepła w układzie - chłodzenie

Niestety w rzeczywistości ścianki przewodzą ciepło. Na rysunku 2.10 przedstawione są możliwe przepływy ciepła w układzie w trakcie chłodzenia z uwzględnieniem przenikania ciepła z otoczenia. Gdy występuje różnica temperatur ciepło zaczyna przepływać w kierunku od wyższej do niższej temperatury. Korzystając z prawa Fouriera, które mówi, że strumień ciepła

wynikający z przewodnictwa cieplnego jest proporcjonalny do gradientu temperatury, można zapisać¹⁰:

$$\frac{\dot{Q}_2}{S} = \frac{\lambda \cdot \Delta T}{d} \quad (2.9)$$

Ilość ciepła, które przenika przez ścianki przy danej temperaturze T_{IN} , można obliczyć korzystając ze wzoru na współczynnik przenikania ciepła U , który jest odwrotnością oporu cieplnego:

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{\dot{Q}_2}{S \cdot \Delta T} = \frac{\lambda}{d} \quad (2.10)$$

gdzie:

R_T - opór cieplny,

S - powierzchnia ścianki,

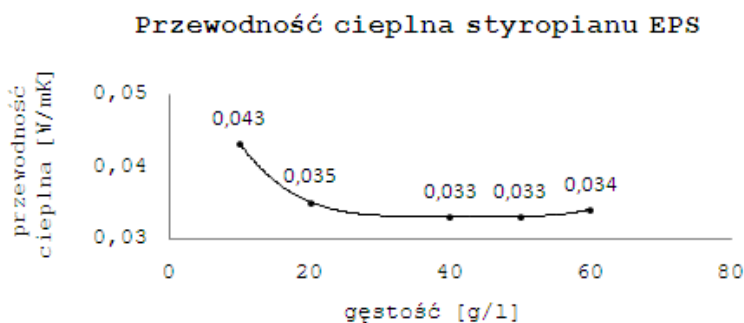
λ - współczynnik przewodzenia ciepła,

d - grubość ścianki,

ΔT - różnica temperatur po obu stronach ścianki,

Z równania 2.10 można wyprowadzić zależność:

$$\dot{Q}_2(T_{IN}) = \frac{\lambda \cdot S \cdot \Delta T}{d} = \frac{\lambda \cdot S \cdot (T_{OUT} - T_{IN})}{d} \quad (2.11)$$

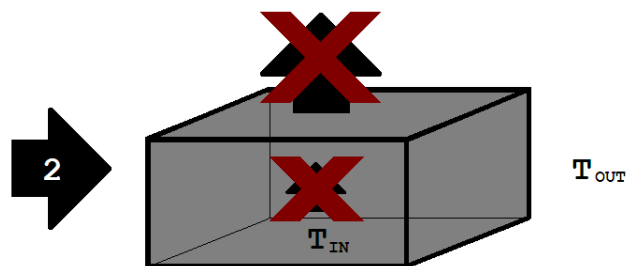


Rysunek 2.11: Przewodność cieplna styropianu EPS w zależności od gęstości

Ścianki komory wykonane są ze styropianu EPS o gęstości ok. 23 - 25 $\frac{g}{l}$. Na podstawie danych z wykresu z rysunku 2.11 można przyjąć, że współczynnik przewodzenia ciepła inaczej przewodność cieplna λ takiego materiału wynosi:

$$\lambda_{komory} = 0,034 \frac{W}{m \cdot K} \quad (2.12)$$

¹⁰na podstawie *A heat transfer textbook, third edition*, John H. Lienhard IV, John H. Lienhard V, Phlogiston Press, Cambridge Massachusetts, (2008).



Rysunek 2.12: Ilustracja możliwych przepływów ciepła w układzie - utrzymanie temperatury

Jeżeli wewnątrz komory osiągnięta zostanie oczekiwana temperatura T_{IN} , to aby ją utrzymać należy dostatecznie szybko odpompować ciepło przenikające z otoczenia. Jedynym przepływem ciepła jest w tej sytuacji przenikanie ciepła z otoczenia co ilustruje rysunek 2.12. Strumień ciepła przenikającego przez ścianki komory jest proporcjonalny do różnicy temperatur wewnątrz i na zewnątrz, dla różnicy wynoszącej 1K:

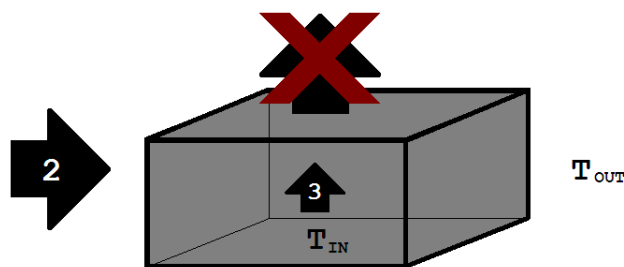
$$\dot{Q}_2 = \frac{\lambda \cdot S \cdot \Delta T}{d} = 2,11W \quad (2.13)$$

co dla temperatury 250K wewnątrz komory przy temperaturze pokojowej na zewnątrz daje ok. 101W.

Przy zastosowaniu urządzenia chłodzącego o mocy 210W również przy różnicy temperatur ok. 50K układ powinien osiągać temperaturę wewnętrzną 250K w czasie jednej minuty i być gotowy do stabilizacji temperatury wewnątrz komory. Czas ten może się wydłużyć z powodu nieuwzględnionych w obliczeniach nieszczelności komory chłodzenia np. otworów na kable w bocznych ściankach. Im większa powierzchnia nieszczelności tym czas potrzebny do osiągnięcia danej niższej temperatury większy. Przy odpowiednio dużej powierzchni otworów w komorze może nie być możliwe schłodzenie jej wnętrza do pożądanej niskiej temperatury.

2.4.2 Stabilizacja niskiej temperatury przy pracującym urządzeniu

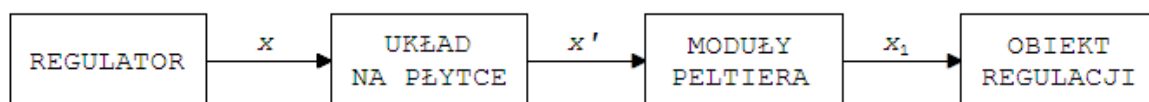
Gdy wewnątrz komory chłodzenia włączone zostanie urządzenie, którego pracy towarzyszy emisja ciepła, przepływy ciepła będą takie jak na rysunku 2.13. Na utrzymanie stałej temperatury zużyte zostanie maksymalnie 100W. Zmianie temperatury o 0,01K układ zniweluje w czasie poniżej 0,007 sekundy. Innymi słowy o ile temperatura wewnątrz komory w czasie 1 sekundy w konsekwencji działania układu nie podniesie się o 1,5K to układ nadaży z chłodzeniem. Ważnym czynnikiem wpływającym na jakość stabilizacji temperatury jest to ile ciepła wniknie do komory z zewnątrz, czyli powierzchnia nieszczelności. Im ona mniejsza tym lepsza jakość stabilizacji temperatury. W fazie stabilizacji temperatury



Rysunek 2.13: Ilustracja możliwych przyływów ciepła w układzie - właściwa praca

2.5 Urządzenie wykonawcze

Regulator daje na wyjściu sygnał 0-10V DC, a jego moc jest za mała żeby zasilić choćby jeden moduł Peltiera. Potrzebny jest więc układ elektroniczny, na którego wejście podany będzie sygnał regulujący x i z którego wyjścia będzie możliwe zasilenie odpowiedniego układu modułów. Elementy urządzenia wykonawczego pokazane są na rysunku 2.14.



Rysunek 2.14: Realizacja urządzenia wykonawczego

W skład urządzenia wykonawczego wchodzi też układ odprowadzania ciepła. Do podania szczegółowych informacji na temat konstrukcji układu elektronicznego, konfiguracji modułów oraz tego układu należy zastanowić się nad tym jak dokładnie układ ma działać.

2.5.1 Układ modułów Peltiera z mechanizmem odprowadzania ciepła

Jak już zostało wspomniane przy omawianiu ograniczeń modułów Peltiera, istnieje pewna graniczna różnica temperatur obu stron modułu tzn. im wyższa temperatura strony cieplejszej tym wyższa maksymalna temperatura strony chłodniejszej. Przy wydajnym odprowadzaniu ciepła ze strony cieplejszej minimalna temperatura, jaką można uzyskać wewnątrz komory jest niższa niż przy braku takiego mechanizmu, dlatego warto zastosować radiator, wentylator bądź oba jednocześnie. Można także zastosować chłodzenie wodne. Szybkość odprowadzania ciepła przekłada się na szybkość stabilizacji temperatury przy jej wzroście wewnątrz komory. Maksymalną różnicę temperatur jak i szybkość reakcji układu regulacji można również zwiększyć przy użyciu kaskady modułów. Jednoczesne zastosowanie obu rozwiązań pozwala osiągnąć jeszcze lepsze parametry urządzenia.

Do wykonania urządzenia wykorzystanych będzie 8 modułów o wymiarach 40 mm × 40

mm, które utworzą jedną warstwę. Parametry każdego z nich:

$$Q_{C_{max}} = 89\text{W} \quad (2.14)$$

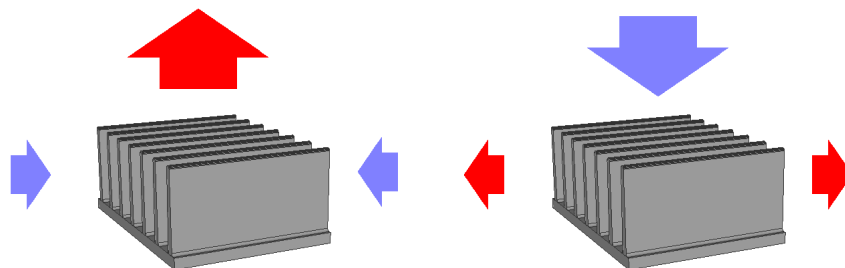
$$I_{max} = 10\text{A} \quad (2.15)$$

$$U_{max} = 15,4\text{V} \quad (2.16)$$

$$\Delta T_{max} = 67\text{K} \quad (2.17)$$

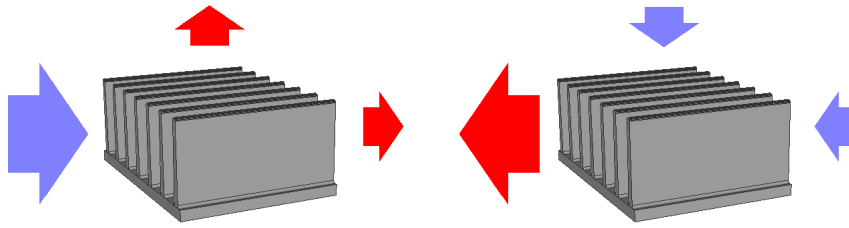
Ich wspólna moc przy $T_{OUT} = T_{pokojowa}$ oraz $T_{IN} = 250\text{K}$ to ok. 120W.

Dla szybszego odprowadzenia ciepła nagromadzonego z jednej strony modułu podobnie jak do zwiększenia powierzchni zimniejszej strony użyte zostały aluminiowe radiatory o wymiarach $50\text{mm} \times 80\text{mm}$. Powierzchnie wszystkich radiatorów zostały wyszlifowane papierem ściernym zaczynając od papierów o małej ziarnistości, a kończąc na papierze o ziarnistości 2500 ziaren/cm³. Na tak przygotowaną powierzchnię została nałożona niewielka ilość silikonowej pasty termoprzewodzącej, która miała za zadanie wypełnić pozostałe nierówności. Aby radiatory miały dobry kontakt termiczny z modułami Peltiera zostały parami skręcone ze sobą śrubami w czterech rogach. We wczesnych próbach, gdy powierzchnie radiatorów nie były wyszlifowane, ilość pasty termoprzewodzącej była większa i radiatory nie były ze sobą skręcone ani w żaden inny sposób dociśnięte do modułów, przy dużych prądach moduły szybko stawały się bardzo gorące, na tyle, że zimniejsza strona modułu zaczynała się ocieplać jeszcze przed przekroczeniem prądu I_y .



Rysunek 2.15: Przepływy powietrza przy różnym ustawieniu wentylatora względem radiatora
- wentylator nad radiatorom.

Dodatkowo po cieplejszej stronie umieszczone zostały wentylatory firmy SUNON zasilane stałym napięciem 12V. Moc każdego z nich wynosi 1,1W. Zostały one zamontowane na radiatorach w taki sposób, żeby wyciągać do góry ciepłe powietrze. Wentylatory można by też zamocować tak, aby właczały chłodniejsze powietrze w dół lub aby wymuszały poziomy ruch powietrza wzdłuż żeberki radiatora jednak takie rozwiązania są mniej efektywne. Rysunki 2.15 oraz 2.16 ilustrują przepływ powietrza przez radiator w zależności od miejsca zamontowania wentylatora oraz kierunku wymuszonego przez wentylator ruchu powietrza. Kolorem czerwonym



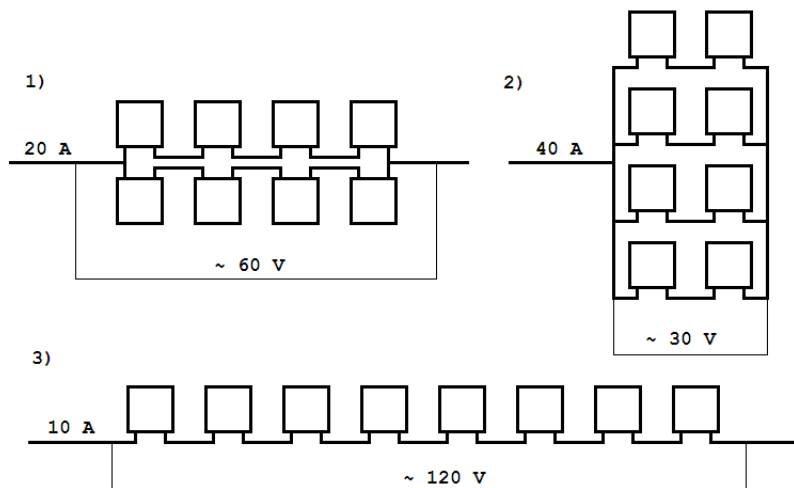
Rysunek 2.16: Przepływy powietrza przy różnym ustawieniu wentylatora względem radiatora - wentylator z boku radiatora.

zostało oznaczone powierze ogrzane przez radiator, natomiast niebieskim powietrze z otoczenia, które jest chłodniejsze.

Poczynione zabiegi mające na celu zapewnienie dobrego kontaktu termicznego jak i dołączenie wentylatorów polepszyły sprawność chłodzenia.

2.5.2 Optymalne połączenie modułów

W rozdziale 2.5 ustalona została potrzebna liczba modułów Peltiera tj. 8. Można je połączyć na kilka sposobów, które zostały przedstawione na rysunku 2.17. Podane zostały też wartości maksymalnego prądu oraz napięcia, jakie mogą zostać podane, aby uzyskać maksymalną moc modułów. Prądy rzędu kilku czy kilkudziesięciu amperów są dość trudne do otrzymania tak



Rysunek 2.17: Możliwe konfiguracje modułów

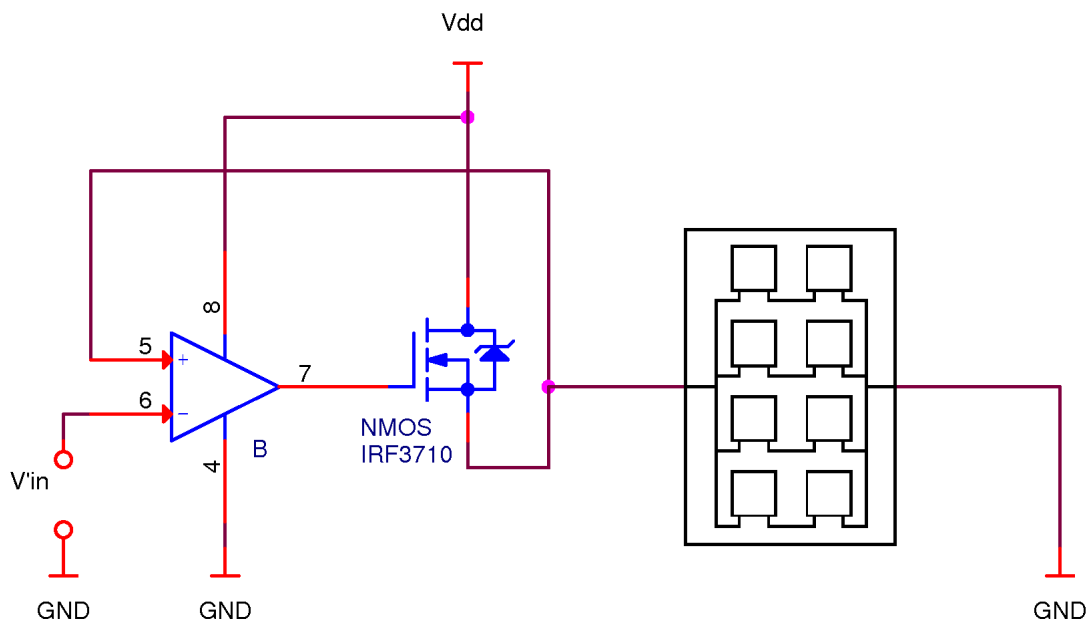
więc powinno się dążyć do sytuacji, kiedy prąd jest jak najmniejszy. Z drugiej strony dla prądu stałego granica tzw. napięcia bezpiecznego to 60V w pomieszczeniach mokrych i gorących oraz

120V w suchych. Dodatkowo trzeba pamiętać, że elementami wzmacniacza będą wzmacniacze operacyjne, których napięcia nie są wysokie. Najkorzystniejsza jest konfiguracja 2) i ona została zrealizowana.

Sam regulator nie ma wystarczającej mocy, żeby zasilić cały układ modułów Peltiera, dlatego potrzebny jest układ elektroniczny, na którego wyjściu dostępne będzie odpowiednie napięcie i odpowiedni prąd.

2.5.3 Pierwsza koncepcja - sterowanie ciągle zrealizowane poprzez układ ze wzmacniaczem

Aby otrzymać prąd o odpowiednio dużym natężeniu potrzebny jest układ elektroniczny np. będący realizacją schematu z rysunku 2.18. Napięcie na wejściu wzmacniacza powinno się zmieniać w zakresie 0V do V_{DD} w taki sposób, aby było równe 0V w momencie, kiedy nie potrzebna jest ingerencja regulatora.



Rysunek 2.18: Układ do sterowania ciągle ze wzmacniaczem - podstawowa konfiguracja

Zastosowane elementy:

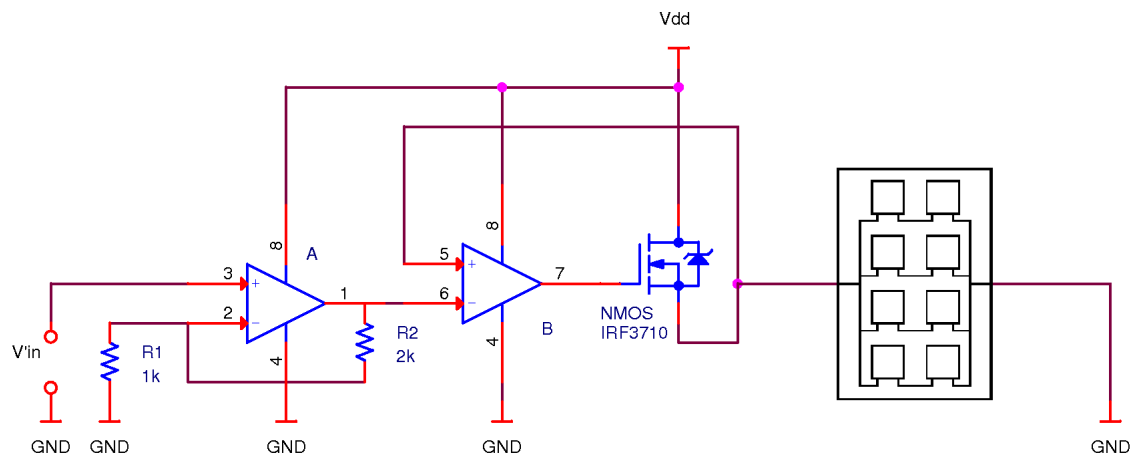
- tranzystor NMOS, IRF3710:

$$V_{DSS} = 100V, \quad (2.18)$$

$$R_{DS(on)} = 23m\Omega, \quad (2.19)$$

$$I_D = 57A, \quad (2.20)$$

$$V_{GS} = \pm 20V \quad (2.21)$$



Rysunek 2.19: Układ do sterowania ciągłego ze wzmacniaczem - całość

- wzmacniacz operacyjny LM358, który może być zasilany napięciem do 32V albo $\pm 16V$

Z wyjścia zastosowanego regulatora można odebrać napięcie zmieniające się w zakresie 0-10V. Aby otrzymać z niego napięcie od 0V do 30V można użyć układu z rysunku 2.19. Zastosowano tu dodatkowy wzmacniacz operacyjny tj. wzmacniacz nieodwracający (0-10V na 0-30V).

Gdy na bramkę tranzystora podamy napięcie równe zero to napięcie bramka - źródło U_{GS} także będzie równe zero i pomiędzy drenem a źródłem nie popłynie prąd. Tranzystor będzie zatkany. Im większe będzie napięcie wejściowe tym większe będzie napięcie U_{GS} , popłynie większy prąd przez kanał z powodu zmniejszenia się rezystancji dren - źródło R_{DS} . Rezystancja ta zmniejsza się tylko do pewnej minimalnej wartości R_{DSon} .

Moc wydzielaną na tranzystorze można wyrazić wzorem:

$$P = I_{DS}^2 \cdot R_{DS} \quad (2.22)$$

Gdy napięcie na bramce tranzystora będzie liniowo się zmieniać to tranzystor ten nie będzie pracował w obszarze triodowym tj. jako klucz. Będzie on natomiast przewodził prąd prawie¹¹ przez cały czas. Podobnie moc statyczna będzie się na nim stale wydzielała. Układ ten będzie więc realizował wzmacniacz typu A, którego teoretyczna sprawność nie przekracza 25%, a w rzeczywistości przyjmuje wartości w okolicy 10%. Gdyby zastosować taki układ w projektowanym urządzeniu do zasilania modułów chłodzących to wydzielałaby się na nim duża ilość ciepła. Aby zminimalizować ilość ciepła można by go umieścić na radiatorze, ale przy tym zastosowaniu musiałby być on bardzo duży. Dodatkowo trzeba by zapewnić bardzo dobry kontakt cieplny takiego tranzystora z radiatorem. Dochodzi jeszcze kwestia transportu ciepła wewnątrz samego tranzystora. Zbyt duża temperatura może np. zniszczyć tranzystor typu MOSFET.

¹¹z wyjątkiem nielicznych momentów kiedy sygnał regulujący będzie zerowy

2.5.4 Druga koncepcja - sterowanie impulsowe

Rozwiązaniem problemu nagrzewania się tranzystora jest stworzenie takiego układu, w którym tranzystor lub tranzystory będą albo odcięte albo zwarte. Wtedy układ będzie realizował wzmacniacz typu D, którego sprawność sięga teoretycznie 100%, a w praktyce nawet do 90%. Potrzebny jest sygnał regulujący do podania na bramkę, który przyjmuje tylko dwie wartości napięcia i szybko się pomiędzy nimi przełącza czyli sygnał o przebiegu prostokątnym. Taki sygnał można uzyskać z opisanego powyżej regulatora przełączając go w tryb regulacji włącz/wyłącz, w przypadku której sygnał regulujący nie zależy od uchybu regulacji a wyjście regulatora złącza się i rozłącza dla ściśle określonych wartości uchybu. Taka regulacja nie zapewnia jednak odpowiedniej jakości stabilizacji temperatury a przy jej realizacji nie jest potrzebny regulator z dostępnymi tak zaawansowanymi funkcjami.

2.5.5 Trzecia koncepcja - zastosowanie PWM

Sygnał o przebiegu prostokątnym może nieść tyle samo informacji przydatnej w procesie regulacji co ciągły sygnał z wyjścia analogowego regulatora PID. Można to osiągnąć stosując modulację wypełnienia impulsu PWM¹². Dla sygnału prostokątnego o danym wypełnieniu można obliczyć średnie napięcie w czasie. Liniowa zmiana wypełnienia sygnału powoduje liniowe zmiany średniego napięcia.

Do modulacji sygnału z wyjścia regulatora PID użyty został przebieg piłokształtny wygenerowany przy użyciu układu¹³ opartego na dwóch wzmacniaczach operacyjnych oraz pojemności, która jest na przemian ładowana poprzez małą rezystancję i rozładowywana przez dużo większą. Schemat tego układu jest zamieszczony w dodatku C na rysunku C.1. Użyte zostały wzmacniacze operacyjne LM358N.

Częstotliwość wygenerowanego sygnału wyliczyć można ze wzoru:

$$f = \frac{1}{2C(R_1 + R_2)} \cdot \frac{R_3}{R_4} \quad (2.23)$$

i wynosi ona:

$$f = \frac{1}{2 \cdot 330 \cdot 10^{-9} \cdot (100 + 6,2) \cdot 10^3} \cdot \frac{120 \cdot 10^3}{100 \cdot 10^3} = 17Hz \quad (2.24)$$

Układ zasilony został napięciem $\pm 6V$. Gdy na wejście odwracające kolejnego wzmacniacza operacyjnego zostanie podany sygnał z generatora, a na drugie wejście sygnał z regulatora, to na wyjściu otrzymamy odpowiednio zmodulowany sygnał, który można już podać na bramkę tranzystora. Na rysunku C.2 w dodatku C przedstawiony został cały układ regulacji z wykorzystaniem modulacji PWM. Zaletą zastosowania tego sposobu modulacji jest możliwość skonstruowania układu ze wzmacniaczem typu D.

¹²dokładny opis tego sposobu modulacji znajduje się w sekcji 1.4

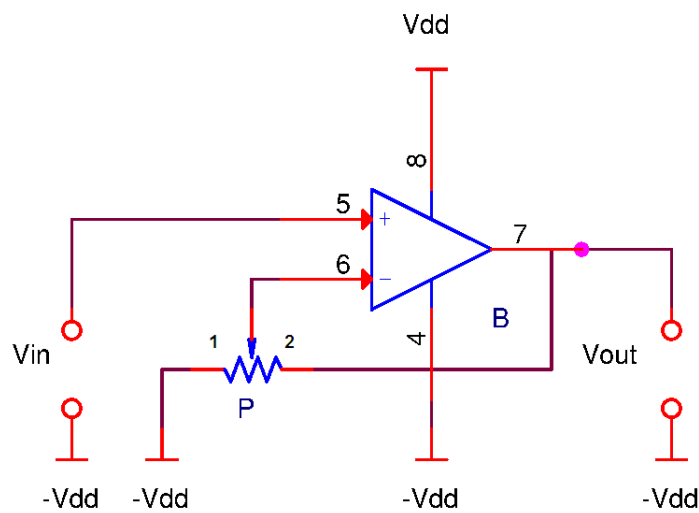
¹³wykorzystany układ jest realizacją schematu ze strony internetowej http://www.piclist.com/images/www/hobby_elec/e_ckt17.htm z pewnymi drobnymi zmianami

W układzie występują trzy różne napięcia tj. napięcie ujemne $-V_{dd}$, masa oraz dodatnie napięcie V_{dd} . Do zasilenia tego układu potrzebny jest z jednej strony zasilacz trójwyjściowy, z drugiej natomiast zasilacz o odpowiednio dużej mocy, żeby zasilić układ modułów Peltiera.

2.5.6 Zwiększenie mocy chłodzenia

Różnica napięć w przedstawionym w poprzednim punkcie układzie to 12V. Wykorzystując wzmacniacz nieodwracający taki jak na rysunku 2.20, w którym zwykle rezystory zastąpione są potencjometrem liniowym można zmienić tę różnicę korzystając ze wzoru na jego wzmocnienie:

$$k_U = 1 + \frac{P_2}{P_1} \quad (2.25)$$



Rysunek 2.20: Wzmacniacz nieodwracający

Po zwiększeniu napięcia moduły Peltiera będą pobierać większy prąd co będzie skutkowało zwiększeniem mocy chłodzenia urządzenia.

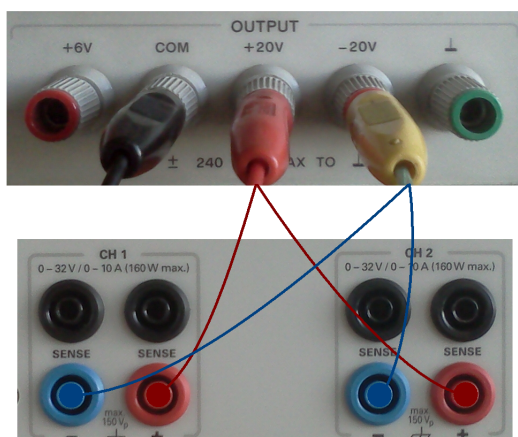
Rozdział 3

Analiza działania wykonanego urządzenia

W tym rozdziale zamieszczone są informacje o wykonanych pomiarach urządzenia oraz wyniki testów wraz z ich interpretacją.

3.1 Szczegóły montażu układu stabilizacji temperatury

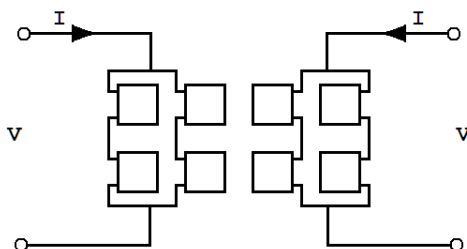
Do zasilenia układu użyto dwóch połączonych równoległe zasilaczy. Jeden z nich to trójwyjściowy zasilacz firmy Hewlett-Packard E 3630A o małej mocy oraz drugi zasilacz Hameg HMP4040 o dużej mocy, który jest dwuwyjściowy. Z każdego kanału tego zasilacza można uzyskać do 32V i do 10A przy czym maksymalna moc dla jednego kanału to 160W. Ujemne wyjście pierwszego zasilacza połączone zostało z wyjściami o niższym potencjale drugiego tak jak zostało to pokazane na rysunku 3.1.



Rysunek 3.1: Połączenie zasilaczy

W przeprowadzonych testach urządzenia moduły Peltiera zasilone zostały tak jak na rysunku 3.2 tj. każda czwórka modułów z jednego kanału zasilacza. Napięcia i prądy użyte do zasilenia układu modułów chłodzących w poszczególnych próbach zostały podane razem z wynikami tych prób. Minimalna temperatura, jaką udało się uzyskać w testach, to 11,6°C przy

schładzaniu od temperatury 25°C . Efekt ten osiągnięty został przy zasileniu układu z dwóch kanałów zasilacza z napięciem ustawionym na $15,4\text{V}$. Natężenie prądu z każdego z nich wynosiło maksymalnie $7,5\text{A}$. Na układ 8 wentylatorów połączonych równolegle podane zostało napięcie 12V .



Rysunek 3.2: Zasilanie modułów

W pierwszych próbach wydajność chłodzenia nie była zadowalająca. W celu jej polepszenia kable zasilające umieszczone początkowo wewnątrz komory zostały poprowadzone po jej zewnętrznej stronie. Kolejnym zabiegiem mającym korzystny wpływ na szybkość obniżania temperatury wewnątrz komory chłodzenia było uszczelnienie silikonem przestrzeni pomiędzy radiatorami a pozostałą częścią obudowy od jej wewnętrznej strony.

Dodatkowo regulator PID został umieszczony w obudowie, tak aby można było wygodnie zmieniać jego nastawy. Obudowa kryje też podłączenia przewodów zasilających, przewodów czujnika temperatury oraz przewodów wyjściowych.

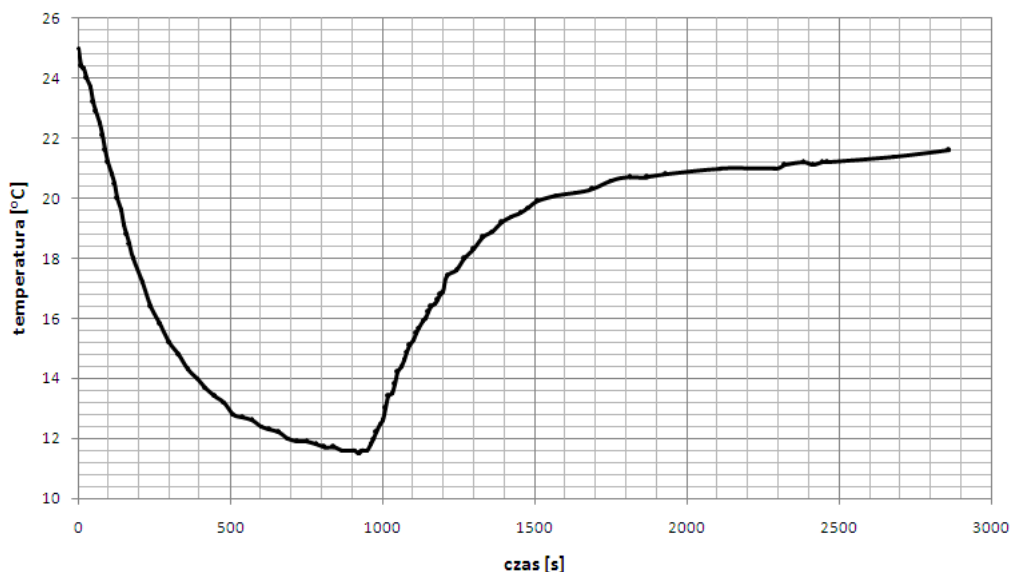
3.2 Szybkość chłodzenia wnętrza komory układu stabilizacji temperatury

W sekcji tej zamieszczone są przykłady wyników otrzymanych na etapie testów urządzenia. Wybrane zostały m.in. takie przykłady aby pokazać własności samych modułów Peltiera.

Na rysunku 3.3 przedstawiona została czasowa zależność temperatury wewnątrz komory urządzenia w trakcie chłodzenia, a następnie samoczynnego ogrzewania się jej wnętrza. Przez samoczynne ogrzewanie należy rozumieć zaprzestanie chłodzenia i pozostawienie komory zamkniętej. Pokrywa nie została podniesiona, natomiast wentylatory zostały wyłączone i nie wspomagały odprowadzania ciepła z nad pokrywy urządzenia. Temperatura radiatorów także samoczynnie zbliżała się do temperatury otoczenia. Zachowanie się układu w takiej sytuacji daje pewne informacje na temat jakości izolacji cieplnej komory od otoczenia.

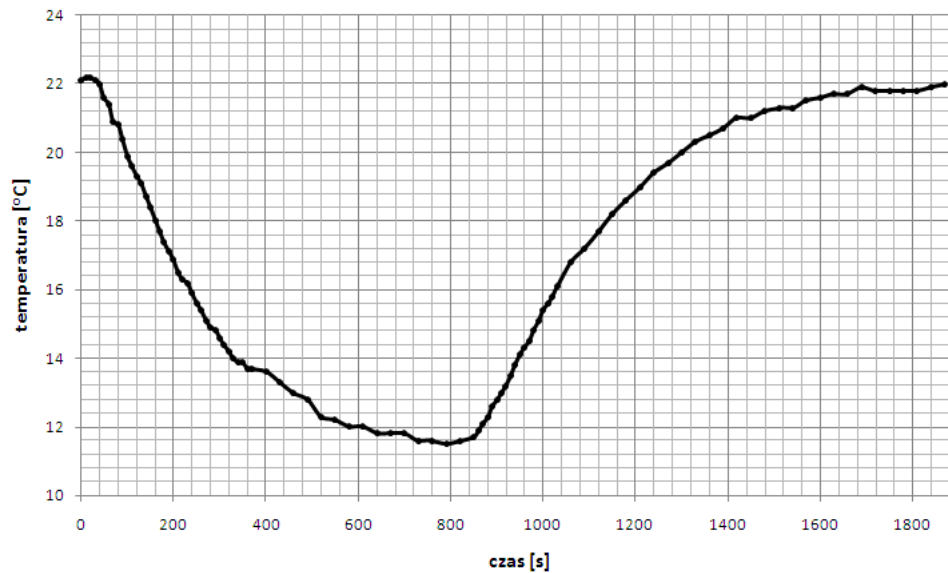
Na rysunku 3.4 została przedstawiona taka sama zależność jak na rysunku 3.3 z tą różnicą, że w tej próbie zwiększone zostało napięcie zarówno na układzie modułów jak i na układzie wentylatorów.

Na rysunku 3.5 zamieszczone są zależności różnicy temperatury otoczenia od temperatury wewnątrz komory od czasu. Kolorem czerwonym oznaczone są różnice temperatur przy lepszym wspomaganie odprowadzania ciepła z cieplejszej strony modułów tzn. gdy do układu wentylatorów przyłożone było napięcie 15,4V, a kolorem czarnym różnice przy gorszym wspomaganie tj. przy napięciu 12V na układzie wentylatorów. Obroty użytych wentylatorów rosną wraz ze wzrostem napięcia. Widać, że skuteczność odprowadzania ciepła ma wpływ na szybkość chłodzenia i jest on tym większy im większa różnica temperatur. Ponadto ma też ona wpływ na to jaką maksymalną różnicę temperatur można uzyskać.

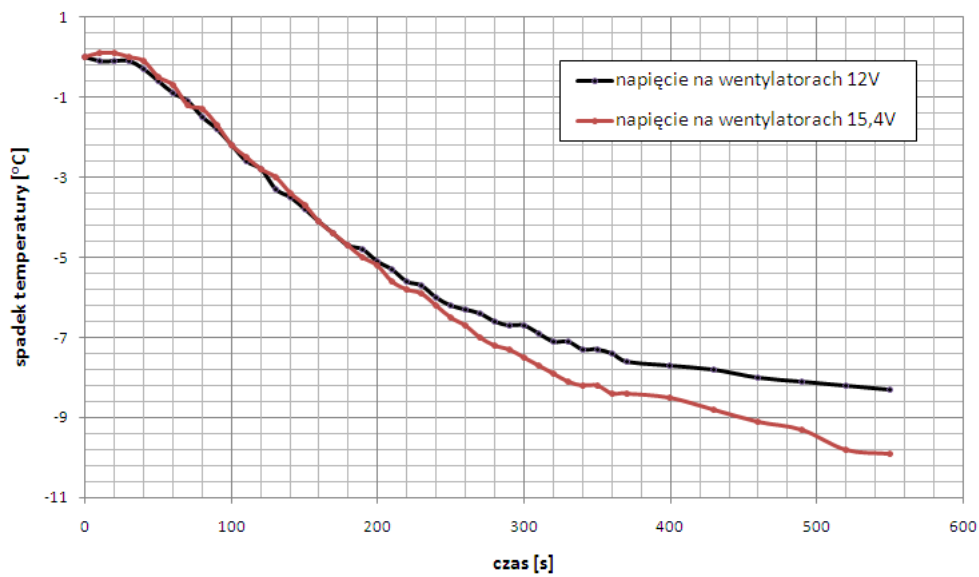


Rysunek 3.3: Wykres zależności temperatury od czasu dla chłodzenia oraz samoczynnego ogrzewania moduły: 2 x 12V, 2 x 7,5A, wentylatory: 12V

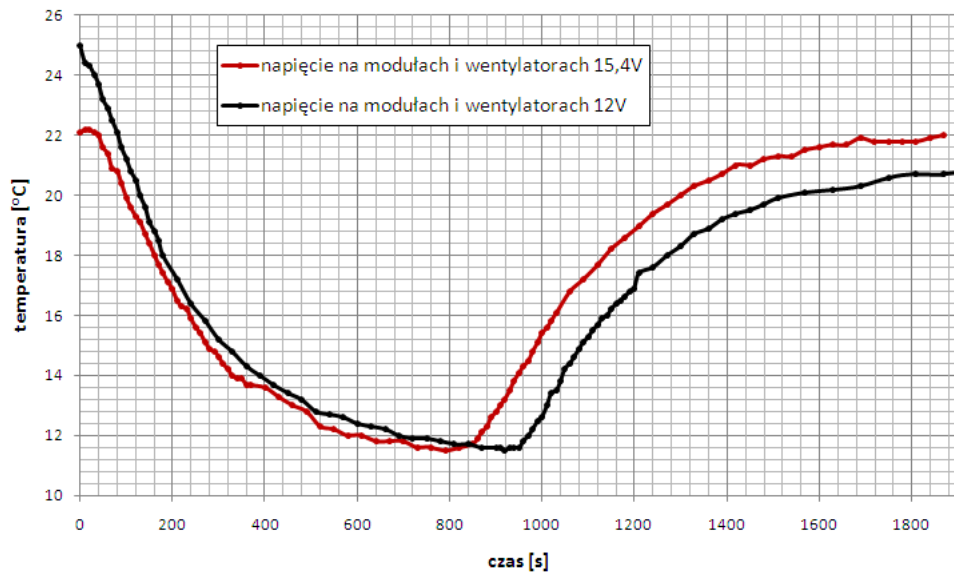
Na rysunku 3.6 porównane zostały wartości temperatur wewnątrz komory chłodzenia w zależności od czasu dla całego cyklu chłodzenia oraz samoczynnego ogrzewania się komory zgromadzone podczas dwóch pomiarów. Kolor czarny odpowiada pomiarom przeprowadzonym dla mniejszego napięcia tj. 12V zarówno na układzie modułów chłodzących jak i układzie wentylatorów. W drugim pomiarze, którego wyniki oznaczone są na wykresie kolorem czerwonym zwiększone zostało napięcie na układzie modułów Peltiera, ale także na układzie wspomaganie odprowadzania ciepła. Temperatura początkowa w obu przypadkach była inna, natomiast przy porównaniu obydwu zależności okazuje się, że schładzanie komory jest szybsze co jest zachowaniem oczekiwanym. Bez zwiększenia napięcia na układzie wentylatorów wzrost szybkości chłodzenia może nie nastąpić. Na rysunku 3.7 widać, że zwiększenie napięcia na układzie modułów nie polepszy szybkości chłodzenia jeśli skuteczność odprowadzania ciepła ze strony cieplejszej nie zostanie poprawiona. Widać tu także, że układ nie osiągnie tak niskiej temperatury jak przy mniejszym napięciu na modułach chłodzących przy tak samo skutecznym odprowadzaniu ciepła.



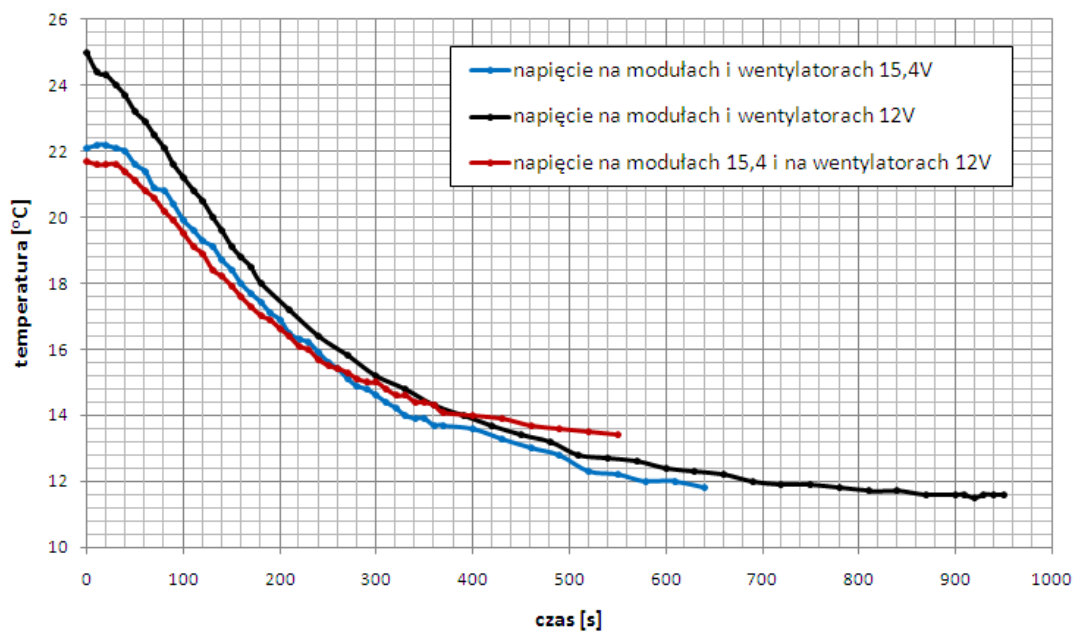
Rysunek 3.4: Wykres zależności temperatury od czasu dla chłodzenia oraz samoczynnego ogrzewania moduły: 2 x 15,4V, 2 x 7,5A, wentylatory: 15,4V



Rysunek 3.5: Wykres zależności temperatury od czasu dla chłodzenia - porównanie moduły: 2 x 15,4V, 2 x 7,5A



Rysunek 3.6: Wykres zależności temperatury od czasu dla chłodzenia oraz samoczynnego ogrzewania - porównanie moduły: 2 x 7,5A

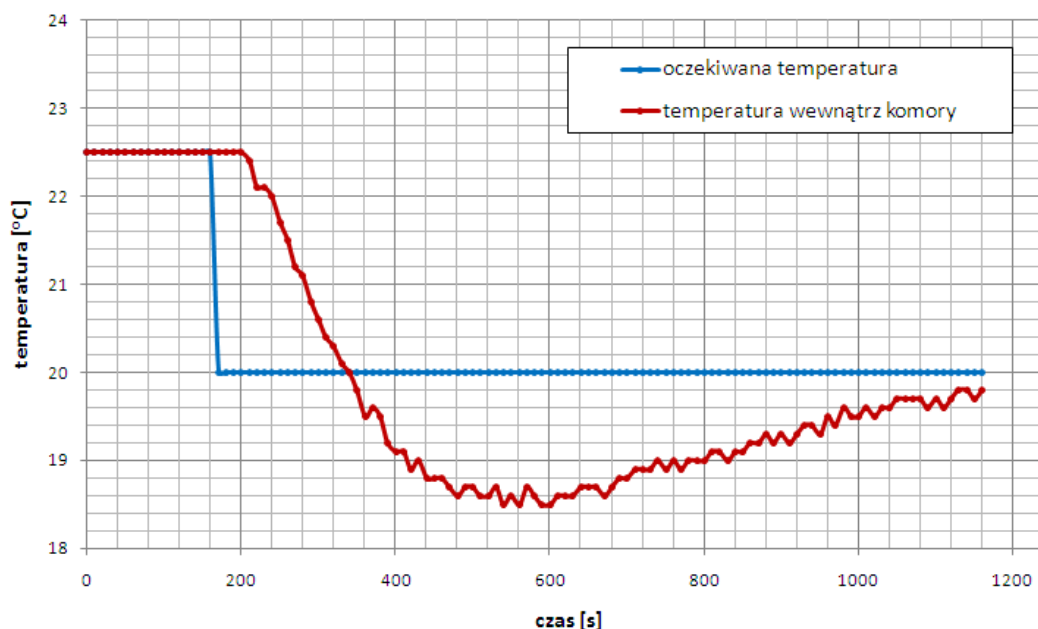


Rysunek 3.7: Wykres zależności temperatury od czasu dla chłodzenia - porównanie moduły: 2 x 7,5A

3.3 Stabilność temperatury wnętrza komory układu stabilizacji temperatury

Do testów stabilności temperatury w wykonanym urządzeniu użyto generatora sygnału piłokształtnego wykonanego według przedstawionego w tej pracy projektu. Zasilony on został napięciem $\pm 6,87V$. Zmierzony okres sygnału wyniósł 58ms, co po przeliczeniu daje częstotliwość 17,2Hz czyli bardzo zbliżoną do przewidzianej w projekcie tj. 17Hz.

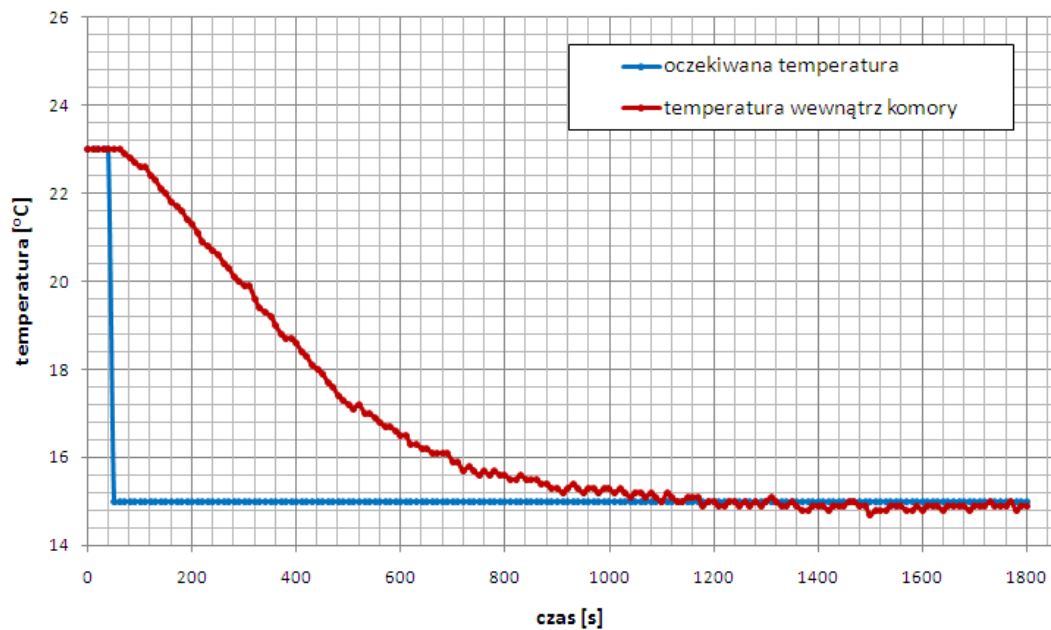
Poniżej opisane zostały dwa przykłady wyników pomiarów. W obydwu przypadkach nastawy regulatora PID były ustawione na wartości domyślne dla użytego modelu tj. zakres proporcjonalności P wynosił 10%, czas całkowania 200s, a czas różniczkowania 50s. Napięcie na układzie modułów Peltiera ustawione było na 12V. W pierwszym teście ustawione zostało ograniczenie prądowe na 2A, a na układ wentylatorów zostało podane napięcie 12V. Rysunek 3.8 przedstawia otrzymane w tej próbie wyniki.



Rysunek 3.8: Wykres zależności temperatury zadanej oraz zmierzonej od czasu
moduły: 2 x 12V, 2x 2A, wentylatory: 12V

Szybkość regulacji zwiększyła się, a przeregulowanie zostało prawie całkowicie wyeliminowane po zwiększeniu ograniczenia prądu do 10A i podniesieniu napięcia na układzie wentylatorów do 15,4V. Wyniki próby po takich modyfikacjach przedstawia rysunek 3.9.

Czas, po jakim ją uzyskano, był dużo dłuższy niż wyliczona 1 minuta, natomiast prąd przepływający przez każdy z modułów Peltiera był mniejszy od I_{max} ze względu na to, że układ został zmontowany testowo na płytce prototypowej. Większe prądy mogą taką płytkę uszkodzić. Przy użyciu większych prądów minimalna temperatura będzie niższa.



Rysunek 3.9: Wykres zależności temperatury zadanej oraz zmierzonej od czasu
 moduły: 2 x 12V, 2 x 10A, wentylatory: 15,4V

W fazie regulacji w testach temperatura utrzymywała się na zadanym poziomie z dokładnością do $0,1^{\circ}\text{C}$ przy domyślnych wartościach nastaw regulatora.

Podsumowanie

Wykonanie urządzenia, które jest przedmiotem tej pracy, było bardzo ciekawym i rozwijającym doświadczeniem. Dla autorki było to pierwsze tego typu zadanie. Łączyło ono i wymagało wiedzy z zakresu wielu dziedzin takich jak automatyka, elektronika czy termodynamika. W trakcie realizacji projektu okazało się, że zdobyta w trakcie studiów wiedza teoretyczna jak i doświadczenie praktyczne, zdobyte podczas zajęć laboratoryjnych, nie są wystarczające. Niezbędne było pogłębienie wiedzy poprzez przestudiowanie wielu materiałów czy konsultacje z inżynierami dysponującymi większym doświadczeniem praktycznym.



Rysunek 3.10: Fotografia wykonanego urządzenia

Pracom projektowym towarzyszyła weryfikacja koncepcji z użyciem częściowych prototypów jak np. mniejsze komory będące sześciennymi pudełkami wykonanymi ze styropianu, pianki modelarskiej o różnych grubościach, czy z metalowych płytek. Wykonanie takich prototypów wymagało dużej wyobraźni oraz dobrych zdolności manualnych co dodatkowo czyniło projekt bardziej interesującym. Wykorzystanie tych prototypów podczas prób dostarczyło wielu

cennych informacji, które zostały następnie wykorzystane w fazie projektowania urządzenia docelowego. Ciekawym wyzwaniem było również zaprojektowanie konstrukcji samej pokrywy komory tak, aby spełniała swoje zadanie, a jednocześnie była odpowiednio trwała i stabilna. Mając na uwadze materiał jaki został użyty do wykonania pokrywy ważną była minimalizacja wagi elementów obciążających pokrywę.

W pracy tej do chłodzenia wykorzystane zostały moduły Peltiera. Można by się ograniczyć do stwierdzenia, że przy ich konstrukcji skorzystano z jednego z trzech efektów termoelektrycznych, w którym przepływający przez złącze prąd wywołuje pochłanianie bądź wydzielanie ciepła, ale obserwując ich pracę można bez użycia specjalistycznego sprzętu zaobserwować konsekwencje zmian poziomów energetycznych elektronów. Jest rzeczą fascynującą to, w jak prosty sposób można pokazać skomplikowane zjawisko.

Praca ta jest ukierunkowana praktycznie, natomiast nie mogło zabraknąć solidnych podstaw teoretycznych. Na wielu etapach realizacji istniała potrzeba odpowiedniego ich użycia. Praca nad realizacją tego projektu była okazją do rozwijania ważnej umiejętności stosowania posiadanej wiedzy w praktyce przy jednoczesnym jej poszerzaniu. Praca ta pozwoliła rozwinąć umiejętności w wielu nie do końca znanych autorce dziedzinach. Każda z nich była na swój sposób fascynująca.

Dodatek A

Pozostałe nastawy pomocnicze regulatora PID ACS-13A

Tryb nastaw pomocniczych

W tym trybie można też ustawić cykl proporcjonalności c w zakresie od 1 do 120 sekund. Jego skrócenie powoduje zwiększenie częstotliwości i w konsekwencji skrócenie żywotności przełącznika. Nastawa ta jest niedostępna w przypadku regulacji włącz/wyłącz.

Kolejną dostępną nastawą jest funkcja ARW, czyli Anti-reset windup. Polega ona na wstrzymaniu działania całkującego, gdy wielkość regulowana znajdzie się poza zakresem proporcjonalności. Mierzony jest w procentach zakresu proporcjonalności i można go ustawić w zakresie 0-100%. Mając wartość przeregulowania przy ARW ustawionym na 100%, aby otrzymać optymalną wartość ARW należy podzielić je przez ustawiony zakres proporcjonalności.

Będąc w tym trybie można włączyć/wyłączyć auto-tuning AT (PID) lub auto-reset RSET (P, PD). Nastawa ta jest niedostępna przy regulacji włącz/wyłącz oraz dla regulatora PI. W czasie auto-tuningu regulator wprowadza sztuczną fluktuację i dobiera optymalne wartości P, I, d oraz ARW. Jeżeli auto-tuning zostanie przerwany, wartości P, I, d wrócą do wartości zapamiętanych przed jego uruchomieniem. Auto-tuning jest automatycznie przerywany, gdy nie zakończy się w ciągu 4 godzin. Dla funkcji auto-resetu ten czas to ok. 4 minuty, a ręczne przerwanie go nie jest możliwe. Auto-reset to automatyczne kasowanie offsetu. Należy ją włączyć po ustabilizowaniu się wartości regulowanej. Poprawka zapamiętywana jest aż do momentu zmiany parametrów regulacji.

Po wykonaniu auto-tuningu można dokonać korekty doboru nastaw pod kątem parametrów regulacji, na których najbardziej nam w danym momencie zależy. Szybkość regulacji można zwiększyć:

- zawężając zakres proporcjonalności P,
- wydłużając cykl proporcjonalności c ,
- zwiększając ARW,

natomiast oscylacje można spowolnić:

- poszerzając zakres proporcjonalności P,
- zwiększając czas zdwojenia I i wyprzedzania d,
- skracając cykl proporcjonalności c.

Korzystny wpływ na zmniejszenie przeregulowania mają:

- poszerzenie zakresu proporcjonalności P,
- zwiększenie czas zdwojenia I,
- skrócenie cyklu proporcjonalności c,
- zmniejszenie ARW.

Tryb nastaw pomocniczych - poziom 1

Możliwe jest zablokowanie nastaw. Służy do tego nastawa Lock. Gdy ma ona wartość ---- to wszystkie nastawy są odblokowane. Loc1 oznacza, że żadne wartości nie mogą być zmieniane, Loc2 - tylko wartości trybu głównego, a Loc3 - nie może być zmieniany tylko typ wejścia, natomiast po wyłączeniu i włączeniu przywrócone zostaną wartości nastaw sprzed włączenia blokady.

Drugą dostępną w tym trybie nastawą jest So, która służy do ustawiania korekcji czujnika.

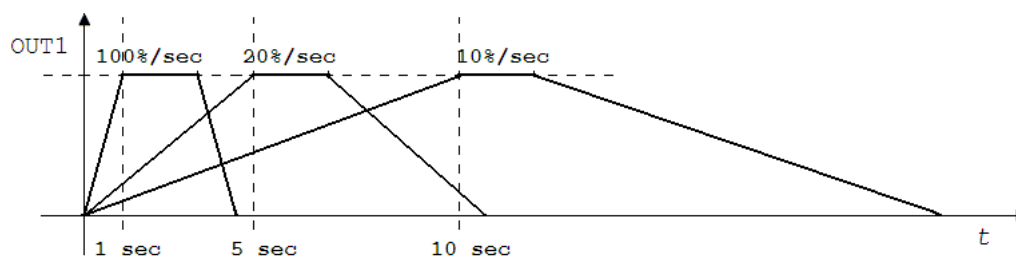
Tryb nastaw pomocniczych - poziom 2

Pierwszą wartością, jaką można w tym trybie ustawić, jest typ wejścia. Gdy na ekranie wyświetlane jest SENS można wybrać z 10 typów termopar, 2 typów termometrów rezystancyjnych, 2 typów sygnałów prądowych i 4 typów sygnałów napięciowych. Przy korzystaniu z termistora Pt100 należy wybrać opcję PT_C. Dostępne są też m.in. opcje 420A, 020A, 0_1V, 0_5V, 1_5V i 0_10V, które odpowiadają kolejno sygnałom wejściowym 4-20 mA DC, 0-20 mA DC, 0-1 V DC, 0-5 V DC, 1-5 V DC i 0-10 V DC.

Przechodząc dalej można ustawić m.in.:

- oLH i oLL, czyli górny i dolny limit sygnału regulacyjnego OUT1 (niedostępne dla regulacji włącz/wyłącz),
- dP, czyli położenie punktu dziesiętnego (dostępne tylko dla wejść DC),
- HYS, czyli histereza regulacji włącz/wyłącz, może się zmieniać w zakresie od 0.1 do 100.0 stopni, a dla wejść DC od 1 do 1000 (z ustawionym punktem dziesiętnym),

- **RATU** i **RATd**, czyli prędkość narastania i opadania wartości zadanej, może przyjmować wartości od 0 do 10000 °C/min (F/min), a dla wejść napięciowych i prądowych od 0 do 10000 1/min (z ustawionym punktem dziesiętnym),
- **coNT**, czyli sposób działania wyjścia regulacyjnego **OUT1**, może być ustawione na działanie odwrotne, czyli grzanie (**HEAT**) lub działanie wprost (**cooL**),
- **EoUT**, czyli stan wyjścia przy anomalnym stanie wejścia tzn. gdy wartość wejścia analogowego przekracza limity
- **MANU**, czyli ustawienie funkcji klawisza ON/OFF, można go ustawić tak, aby włączał/wyłączał wejście (**oFF**), lub żeby przełączał pomiędzy regulacją automatyczną i manualną (**MANU**)¹,
- **oRAT**, czyli prędkość zmian wyjścia **OUT1**, od 0 do 100% na sekundę², rysunek A.1 przedstawia prędkość zmian sygnału wyjściowego w zależności od wielkości nastawy **oRAT**.



Rysunek A.1: Limit prędkości zmian sygnału **OUT1**.

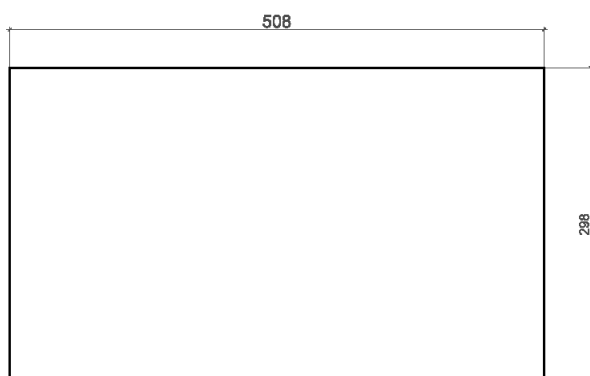
¹jeśli wybrana zostanie ta opcja to po przejściu na regulację manualną, sygnał regulacyjny może być zwiększany i zmniejszany za pomocą klawiszy ze strzałkami

²dla grzałek wysokotemperaturowych (wykonanych z molibdenu, wolframu, platyny, itp.), które łatwo uszkodzić w wyniku gwałtownych zmian zasilania ta wartość powinna być mała, natomiast w urządzeniu będącym przedmiotem tej pracy powinna być jak największa z uwagi na zastosowany tranzystor

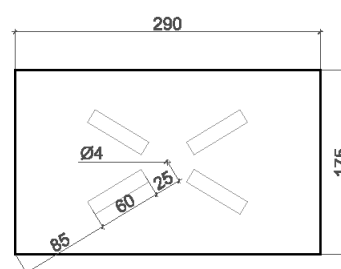
Dodatek B

Zwymiarowane rysunki obudowy komory chłodzenia

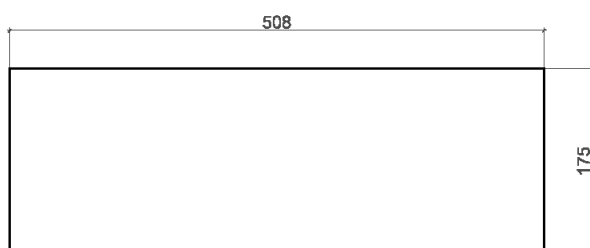
RZUT DENKA POJEMNIKA GRUBOŚĆ 4 MM



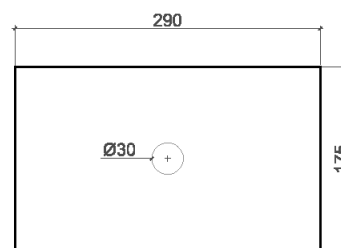
KRÓTSZY BOK POJEMNIKA x1 GRUBOŚĆ 4 MM



DŁUŻSZY BOK POJEMNIKA x2 GRUBOŚĆ 4 MM

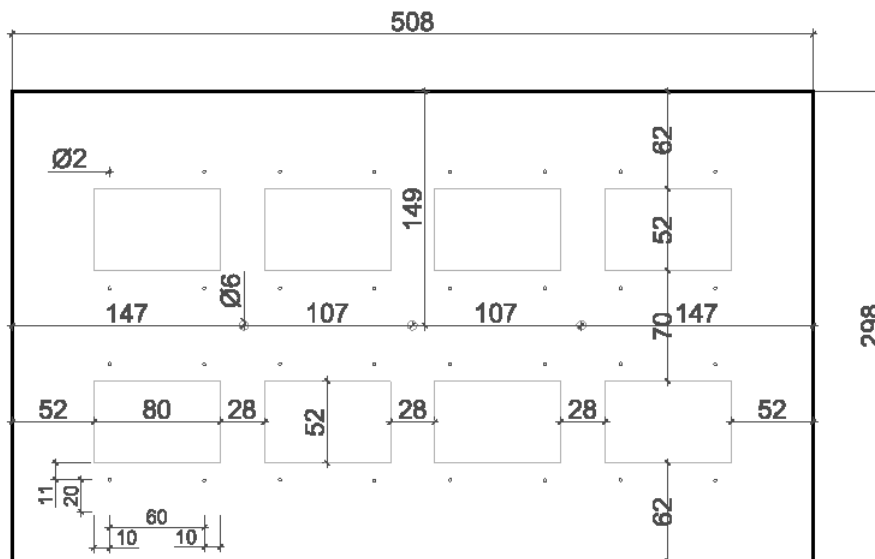


KRÓTSZY BOK POJEMNIKA x1 GRUBOŚĆ 4 MM

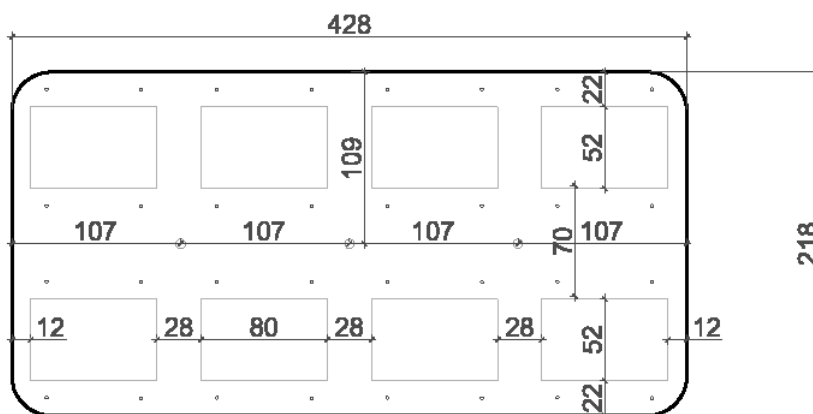


Rysunek B.1: Obudowa komory chłodzenia - rysunki

RZUT POKRYWKI ZEWNĘTRZNEJ GRUBOŚĆ 3MM



RZUT POKRYWKI WEWNĘTRZNEJ GRUBOŚĆ 3MM



DŁUŻSZY BOK POKRYWKI x2 GRUBOŚĆ 4 MM



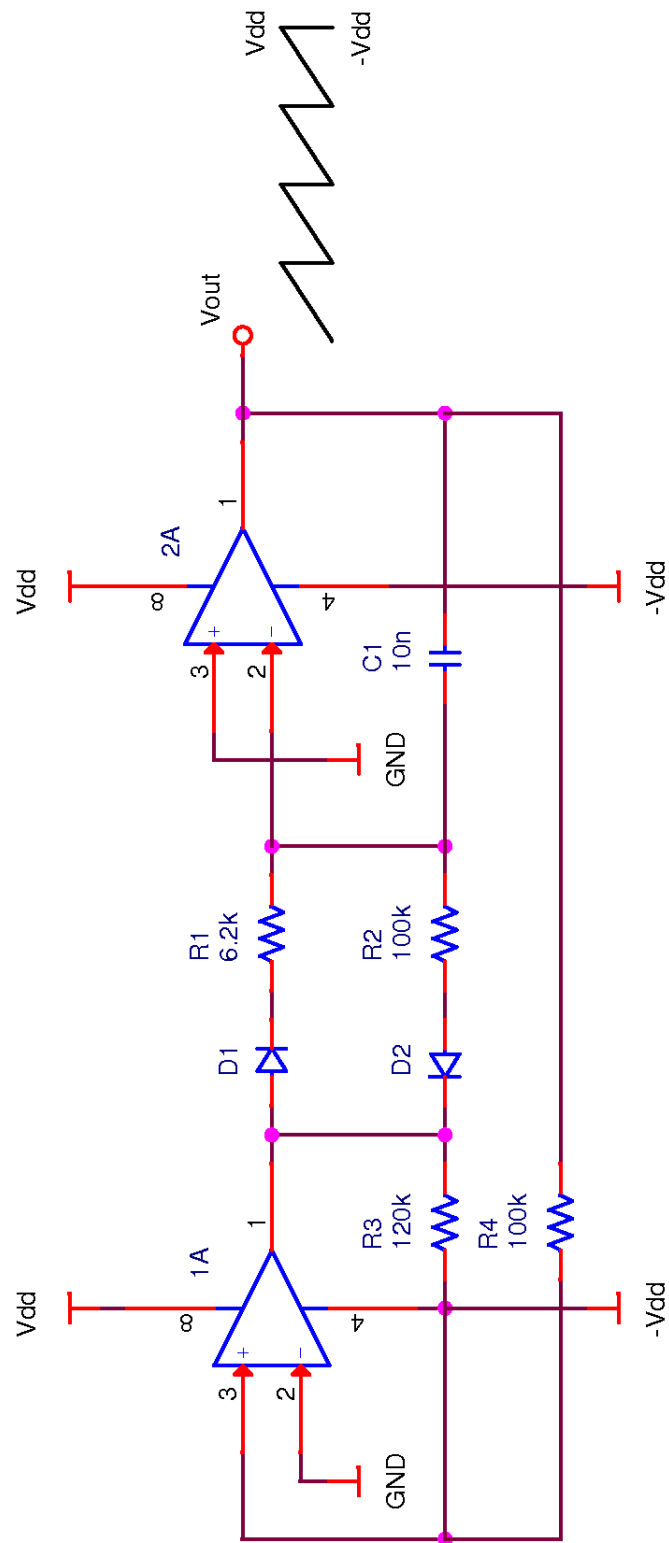
KRÓTSZY BOK POKRYWKI x2 GRUBOŚĆ 4 MM



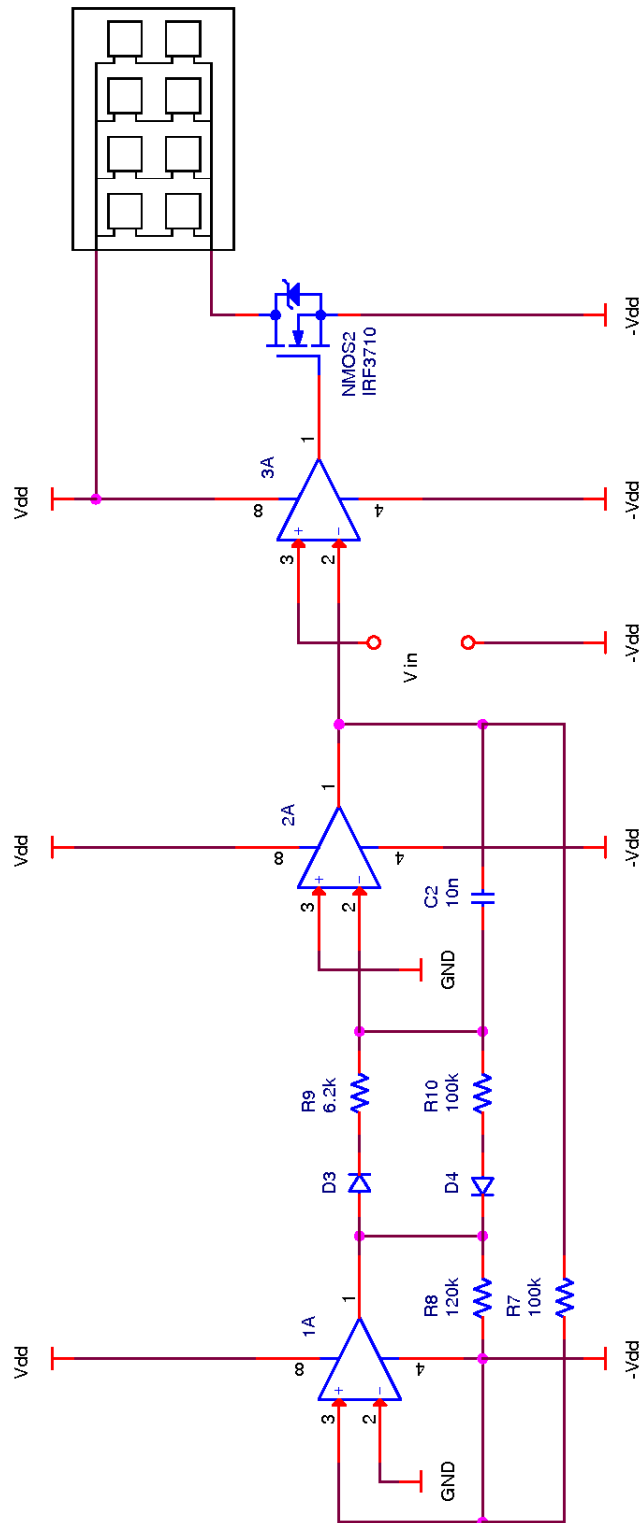
Rysunek B.2: Pokrywa komory chłodzenia - rysunki

Dodatek C

Schematy wykonanych układów elektronicznych



Rysunek C.1: Generator przebiegu piłokształtnego



Rysunek C.2: Schemat całego układu regulacji z wykorzystaniem modulacji PWM

Bibliografia

- [1] *Handbook of Polymer Foams*, Dawid Eaves, Rapra Technology Limited (2004)
 - tabela 3.1: Physical properties of EPS foam at varying densities
 - tabela 3.2: Thermal properties of EPS foam at varying densities
- [2] *Engineering and Chemical Thermodynamics* Milo D. Koretsky, John Wiley & Sons (2004)
 - tabela A.2.2: Heat Capacity of Ideal Gases: Inorganic Compounds
- [3] *Badania przejść metal-półprzewodnik w układach z silnym efektem termoelektrycznym*, Piotr Zwoleński, praca magisterska, Rozdział 3 oraz Wstęp, Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej, AGH, Kraków (2010).
- [4] *Podstawy regulacji automatycznej*, Karol Rumatowski, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań (2008).
- [5] *Dobór parametrów regulatora - symulacja komputerowa*, instrukcja do ćwiczenia laboratoryjnego, Politechnika Świętokrzyska, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn, Centrum Laserowych Technologii Metali PŚk i PAN, Zakład Informatyki i Robotyki (2002/2003).
- [6] *Regulatory i układy regulacji*, Jerzy Kuźnik, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice (2002).
- [7] *Podstawy sterowania. Kompilacja wykładów i książki „Obserwacja i sterowanie w systemach dynamicznych”*, dr hab. inż. Witold Byrski, prof. nadzw. AGH, sekcje 4.5, 4.6, 6.7 *Transmitancja operatorowa*.
- [8] *Podstawy automatyki - liniowe układy regulacji*, Jerzy Mikulski, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice (2001).
- [9] *Elektronika dla wszystkich. Klub konstruktorów. Ogniwa Peltiera - cz. I*, numer 7/97 (1997).
- [10] *Elektronika dla wszystkich. Klub konstruktorów. Ogniwa Peltiera - cz. II*, numer 8/97 (1997).
- [11] *Laboratorium podstaw automatyki*, praca pod redakcją Henryka Góreckiego, Skrypt AGH, Kraków (1973).

- [12] *Mechaniczne urządzenia automatyki*, B. Chorowski, M. Werszko, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, wyd. II, Warszawa (1970).
- [13] *A heat transfer textbook, third edition*, John H. Lienhard IV, John H. Lienhard V, Phlogiston Press, Cambridge Massachusetts, (2008).