WYKORZYSTANIE LOGIKI ROZMYTEJ W STEROWANIU OGNIWEM PELTIERA

W artykule przedstawiono, opracowany przez autorów układ sterowania ogniwa Peltiera. Ze względu na nieliniową zależność wydajności ogniwa od prądu do wyznaczania wartości sterowania zastosowano logikę rozmytą. W kolejnych częściach artykułu omówiono: rzeczywiste charakterystyki ogniwa Peltiera, sposób wyznaczania wartości prądu sterowania (syntezę sterownika rozmytego). Zaprezentowano kontroler logiki rozmytej oraz jej związek z tradycyjnym sterowaniem w układzie zamkniętym. Oprogramowanie FUDGE firmy Motorola zostało użyte do implementacji logiki rozmytej. Przedstawiony w artykule algorytm sterowania będzie wykorzystany do opracowania systemu sterowania baterią ogniw, umożliwiającego optymalizację procesu sterowania baterią ogniw Peltiera.

WSTĘP

Na rynku jest dostępne wiele rozwiązań klasycznych regulatorów liniowych proporcjonalno-całkująco-różniczkujący. Regulator PID jest najczęściej stosowaną strategią sterowania spotykaną obecnie w ponad 90% pętli układów regulacji automatycznej. Praktycznie wszystkie produkowane dzisiaj sterowniki PID oparte są na mikroprocesorach. Dało to możliwość zapewnienia dodatkowych funkcji, takich jak automatyczne dostrajanie, planowanie wzmocnienia i ciągła adaptacja. Używane są także do sterowania modułami Peltiera.

Przepływ ciepła w ogniwie Peltiera zmienia się wraz z wartością prądu przepływającego przez złącze. Pojęcie «rozmyte» (ang. Fuzzy) zostało wprowadzone we wcześniejszych latach 1970 [8]. Systemy fuzzy i teorie sterowania rozmytego jako wschodząca technologia ukierunkowana na aplikacje przemysłowe dodały obiecujący nowy wymiar do istniejącej dziedziny konwencjonalnych systemów sterowania. W celu optymalizacji sterowania przepływem ciepła autorzy opracowali sterownik wykorzystujący logikę rozmytą.

1. OGNIWO PELTIERA

Efekt Peltiera to zjawisko termoelektryczne zachodzące w ciałach stałych. Polega na wydzielaniu lub pochłanianiu energii przez złącze, pod wpływem przepływu prądu elektrycznego. W wyniku pochłaniania energii na jednym złączu i wydzielania energii na drugim, pomiędzy złączami powstaje różnica temperatur. Efekt ten jest odwrotny do efektu Seebeck'a. Ilość wydzielonego ciepła Q w jednostce czasu jest proporcjonalna do natężenia prądu I :

$$\frac{Q}{t} = P_p = \pi I = \alpha T I \quad (1)$$

gdzie:

π – jest współczynnikiem Peltiera,

α – współczynnikiem Seebecka,

T – temperaturą bezwzględną.

Budowę ogniwa pokazano na rysunku 1. Rysunek 2 przedstawia charakterystykę ogniwa Peltiera.

Rys. 1. Budowa i zasada działania modułu Peltiera. [3]

Rys.2. Charakterystyka ogniwa Peltiera. [3]

2. LOGIKA ROZMYTA

Klasyczna logika bazuje na dwóch wartościach reprezentowanych najczęściej przez: 0 i 1 lub prawda i fałsz. Granica między nimi jest jednoznacznie określona i niezmienna. Logika rozmyta stanowi rozszerzenie klasycznego rozumowania na rozumowanie bliższe ludzkiemu. Wprowadza ona wartości pomiędzy standardowe 0 i 1; „rozmywa” granice pomiędzy nimi dając możliwość zaistnienia wartościom z pomiędzy tego przedziału (np.: prawie fałsz, w połowie prawda). Logika rozmyta ma duże zastosowanie tam gdzie użycie odpowiednika dwuwartościowego tworzy problem z zapisem, obliczeniem i praktycznym wykorzystaniem - na przykład w sterowaniu urządzeniami [10]. Sterowniki rozmyte z powodzeniem wykorzystuje się w połączeniu z sieciami neuronowymi.

Układ sterowania można przedstawić jako obiekt, którym sterujemy a którego wejście u ustalamy na podstawie wejścia regulatora y_0 oraz jego przekształceń.

Rys. 3. Podstawowy układ regulacji.

W układzie przedstawionym na rys. 3 często występują błędy sterowania. Błędy te spowodowane są dynamiką układu, dlatego należy stosować zamknięte układy sterowania. Układy takie charakteryzują się występowaniem pętli sprzężenia zwrotnego dzięki, której do regulatora trafia różnica wyjścia obiektu y oraz wartości y_m .

Rys. 4. Podstawowy układ regulacji. Oznaczenia: y – wielkość regulowana, y_0 – wielkość zadana, e – uchyb (błąd) regulacji, u – wielkość sterująca (regulująca), y_m – wielkość regulowana.

Najczęściej stosowanymi regulatorami są regulatory PID. Są nazywane regulatorami proporcjonalno-całkująco-różniczkującymi ze względu na elementy, które składają się na algorytm regulacji PID:

- P – proporcjonalny (dąży do równoważenia uchybów bieżących),
- I – całkujący (odpowiada za wcześniejsze uchyby),
- D – różniczkujący (przewiduje przyszłe uchyby).

Regulatory mogą występować w poniższych wersjach:

- P – regulator proporcjonalny,
- PI – regulator proporcjonalno-całkujący,
- PD – regulator proporcjonalno-różniczkujący,
- PID – proporcjonalno-całkująco-różniczkujący.

Schemat blokowy regulatora PID pokazano na rys. 5.

Rys. 5. Schemat blokowy regulatora PID.

Właściwości dynamiczne idealnych regulatorów PID mogą być opisane za pomocą transmitancji operatorowej, będącej stosunkiem transformaty Laplace'a sygnału wyjściowego regulatora $U'(s)$ i transformaty Laplace'a uchybu regulacji (sygnału wejściowego) $E(s)$:

$$G_r(s) = \frac{U'(s)}{E(s)} = k_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (2)$$

Gdzie:

k_p – współczynnik wzmocnienia,

T_i – czas zdwojenia,

T_d – czas wyprzedzenia,

s – zmienna zespolona w przekształceniu Laplace'a.

W praktyce nie da się zrealizować regulatora idealnego. W warunkach rzeczywistych w członie różniczkującym występuje inercja,

określona stałą czasową T . Stała ta nie jest nastawialna. Zatem zamiast członu $T_d s$ w transmitancji występuje człon $\frac{T_d s}{T s + 1}$. Transmitancja operatorowa rzeczywistego regulatora PID ma wówczas postać:

$$G_r(s) = \frac{U'(s)}{E(s)} = k_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{T s + 1} \right) \quad (3)$$

- idealny regulator proporcjonalny typu P

$$G_r(s) = k_p \quad \text{dla } T_i = \infty \text{ i } T_d = 0$$

- regulator całkujący typu I

$$G_r(s) = \frac{1}{T_i s} \quad \text{dla } T_d = 0$$

- regulator proporcjonalno – całkującego typu PI

$$G_r(s) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad \text{dla } T_d = 0$$

- idealny regulator proporcjonalno – różniczkujący typu PD

$$G_r(s) = k_p (1 + T_d s) \quad \text{dla } T_i = \infty$$

Logika rozmyta kopiuje działanie regulatorów PID z pewnymi modyfikacjami nieliniowymi. Poniższy rysunek pokazuje, w jaki sposób system logiki rozmytej może zastąpić konwencjonalny kontroler.

Rys. 6. Kontroler logiki rozmytej i jej związek z tradycyjnym sterowaniem w układzie zamkniętym. [9]

Procedura zastosowana w kontroli rozmytej polega na naśladowaniu działania tradycyjnego kontrolera z wykorzystaniem reguł rozmytych i dodawania cech.

3. STEROWANIE ROZMYTE

Systemy rozmyte korzystają z praw logiki rozmytej w celu podjęcia decyzji w warunkach niepewnych. Posiadają one pewną bazę wiedzy oraz reguły wnioskowania. Po obserwacji otoczenia i procesie wnioskowania automat taki podejmuje decyzję. Baza wiedzy i reguły wnioskowania pochodzą od eksperta tworzącego system. Zatem efektywności systemu głównie zależy od wiedzy eksperta w danej dziedzinie i jego umiejętności zamodelowania jej za pomocą logiki rozmytej. Dostępne są dwa podstawowe modele rozmyte tj. sterownik typu Mamdani i sterowniki Takagi-Sugeno [11]. Reguły modelu rozmytego typu Mamdani mają postać:

$$\text{JEŻELI}(x_1 = A_1) \text{ I } (x_2 = B_1) \text{ TO } (y = C_1)$$

$$\text{JEŻELI}(x_1 = A_2) \text{ I } (x_2 = B_2) \text{ TO } (y = C_2)$$

gdzie: x_1, x_2, y – zmienne lingwistyczne,

$A_1, \dots, C_1$ – zbiory rozmyte.

Jest to model oparty na wiedzy eksperta, który charakteryzuje się:

- intuicyjnością,
- metoda jest szeroko wykorzystywana i akceptowana,
- jest dobrze dopasowany do wejść opisywanych przez człowieka.

Model Takagi-Sugeno różni się od modelu Mamdaniego postacią reguł.

JEŻELI(x jest A_1) TO ($y = f(x)$)

gdzie: x – zmienna wejściowa, A_1 , – zbiór rozmyty, $f(x)$ – funkcja, y – zmienna wyjściowa, określana ze wzoru defuzyfikacji (wyodrębnienia).

Ważne zalety modelu typu Takagi - Sugeno to:

- efektywny obliczeniowo,
- pracuje poprawnie z technikami liniowymi,
- jest wydajny dla technik optymalizacji i adaptacji,
- gwarantuje ciągłość płaszczyzny wyjściowej,
- dopasowany do analiz matematycznych.

Sterowanie rozmyte stosowane jest między innymi w systemach wspomagania hamowania w samochodach (ABS), tworzenia systemów eksperckich działających w pralkach, lodówkach.

Najczęstszymi wyborami prostych i wydajnych funkcji przynależności są funkcje trójkątne, trapezowe, gaussowskie itp. [8] Ponieważ wszystkie zmienne wejściowe przyjmują wartości rzeczywiste lub mogą być identyfikowane przez (lub odwzorowywane): wartości rzeczywiste, jednolite funkcje przynależne do trójkąta opisujące negatywną dużą (NL - negative large), negatywną (NM - negative medium), ujemną małą (NS - negative small), zero (Z), dodatnie małe (PS - positive small), dodatnie medium (PM - positive medium) i dodatnie duże (PL - positive large, oznaczane także jako PB - positive big), wszystkie w wartościach bezwzględnych.

Rys. 7. Jednolite funkcje przynależności do trójkąta w zakresie wartości $[x_{min}, x_{max}]$ zmiennej wejściowej x . [8]

4. REALIZACJA

Do syntezy sterownika wykorzystano program FUDGE (Fuzzy Design GEnerator) w wersji 1.02 autorstwa firmy Motorola, który stworzony został do syntezy sterowników rozmytych, opartych na mikrokontrolerach rodzin HC05, HC11 firmy Motorola. Oprogramowanie to cechuje się 8 wejściami, oraz 8 przynależnościami stanów dla każdego z nich (funkcje trapezoidalne oraz trójkątne). Można zdefiniować aż 1000 reguł i sterować 4 wyjściami [12]. FUDGE zapewnia projektantowi łatwy w użyciu interfejs graficzny.

W programie, po wprowadzeniu funkcji opisujących zmienne wejściowe i wyjściowe (ang. Membership Function) – rys. 8, oraz po zdefiniowaniu relacji (Rules) między funkcjami wejściowymi i wyjściowymi – rys. 9 możliwe jest przetestowanie zaprojektowanego sterownika. Największe możliwości kryją się w opcji „Fuzzy Logic Evaluator” (rys. 10), gdzie można przetestować reakcję sterownika na wszystkie możliwe zmiany zmiennych wejściowych. Jednocześnie program raportuje wartość generowaną przez wybraną relację. Po dostrojeniu i przetestowaniu sterownika można wygenerować plik wyjściowy. Program tworzy kody źródłowe w assemblerze dla mikrokontrolerów: HC05, HC11, HC16, 68000. Dodatkowo można wygenerować plik źródłowy w języku C (Ansi). Z tej ostatniej możliwości skorzystano w przypadku realizowanego projektu.

Dokonano implementacji i uruchomienia z układem mikroprocesorowym Arduino (Atmega 328P). Stopień końcowy zrealizowany

na tranzystorze typu MOSFET, oraz mostku H wykonanym na przełączniku o odpowiedniej mocy – rys. 11. Cały układ może pracować w zakresie napięć: 7,5V...12V DC.

Rys. 8. Definiowanie funkcji wejściowych.

Rys. 9. Edycja relacji.

Rys. 10. Dostrajanie regulatora.

Rys. 11. Układ sterowania modulem Peltiera.

PODSUMOWANIE

Ze względu na nieliniową zależność między prądem płynącym przez złącze, a przenoszonym ciepłem trudno jest zapewnić odpowiednie sterowanie ogniwem Peltiera z wykorzystaniem klasycznego regulatora PID, a logika rozmyta jest dobrą alternatywą w stosunku do konwencjonalnych sposobów sterowania. Zastosowanie regulatora rozmytego zapewnia optymalne sterowanie ogniwem przy zachowaniu stabilności. Wymaga mniejszych nakładów obliczeniowych, a dobrze zaprojektowana, pozwoli uzyskać lepsze efekty niż układy konwencjonalne.

Uzyskane wyniki będą wykorzystane przy syntezie rozbudowanych regulatorów dla baterii Peltiera oraz użyte dla różnych popularnych układów mikroprocesorowych.

BIBLIOGRAFIA

1. Ashenden P.J.: The VHDL Cookbook. First Edition, University of Adelaide, Internet, 1990.
2. Driankow D., Helendoorn H., Reinfrank M., Wprowadzenie do sterowania rozmytego, WNT Warszawa, 1996.
3. Filin S. 2002. Termoelektryczne urządzenia chłodnicze, IPPU Masta, Gdańsk, wydanie 1, ISBN 83-913895-6-1.
4. Pniewska B., Pniewski R.: Ocena jakości sterowania pojazdem trakcyjnym przy zastosowaniu logiki rozmytej. Konferencja Naukowa Trakcji Elektrycznej SEMTRAK'96.
5. Pniewski R.: Struktura systemu mikroprocesorowego do sterowania pojazdem trakcyjnym w logice rozmytej. Materiały Międzynarodowej Konferencji TRANSPORT'97: Ostrawa-Katowice 1997.
6. Yager R.R., Filev D.P.: Podstawy modelowania i sterowania rozmytego. WNT Warszawa 1995.
7. Zalewski W. 1998. Podstawy teoretyczne i przykłady zastosowań. Pompy ciepła. Skrypt. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej. ISBN 83-903878-3-2.
8. Guanrong Ch., Trung Tat Ph.. Introduction to Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, and Fuzzy Control Systems. 2001. CRC Press. ISBN 0-8493-1658-8.
9. Vernon J. Fuzzy Logic Systems. control-systems-principles.co.uk.
10. Ang K. H., Chong G. and Li Y., "PID Control System Analysis, Design, and Technology," IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 13, no. 4, pp. 559-576, 2005.
11. Filo G., Modelling fuzzy logic control system using the Matlab Simulink program. Czasopismo techniczne, Politechnika Krakowska, zeszyt 2/2010.
12. Workman M. Hardware requirements for fuzzy logic control system. B.S.E.T. 1996.

Fuzzy logic for control Peltier module

The article presents the Peltier cell control system developed by the authors. Due to the non-linear dependence of the cell's efficiency on the current, fuzzy logic was used to determine the control value. In the following parts of the article the actual characteristics of the Peltier cells, the method of determining the control current value (fuzzy controller synthesis). The controller of fuzzy logic and its relation to traditional control in a closed system and obtained results have been presented. The FUDGE software from Motorola was used to implement fuzzy logic. The control algorithm presented in the article will be used to develop cell control system that enables optimization of the Peltier cell control process.

Autorzy:

mgr inż. **Emil Sadowski** – Przedsiębiorstwo Usługowo Handlowe HESTA w Radomiu.

mgr **Tomasz Marek** – Zespół Szkół Elektronicznych w Radomiu.
dr hab. inż. **Roman Pniewski, prof. nadzw.** – Uniwersytet Technologiczno – Humanistyczny w Radomiu. Wydział Transportu i Elektrotechniki.

dr inż. **Rafał Kowalik** – Wyższa Szkoła Oficerska Sił Powietrznych w Dęblinie, Wydział Lotnictwa, Katedra Awioniki i Systemów Sterowania.

JEL: L64 DOI: 10.24136/atest.2018.160

Data zgłoszenia: 2018.05.24 Data akceptacji: 2018.06.15