

## **STEROWANIE ROZMYTE TEMPERATURĄ FORM WTRYSKAREK TWORZYWA SZTUCZNEGO**

*W referacie opisano kilka możliwości zastosowania logiki rozmytej w sterowaniu temperaturą form wtryskowych z granzami kanałami wykorzystywanych we wtryskarkach tworzyw sztucznych. Rozważania zilustrowano wynikami symulacji komputerowych.*

## **FUZZY-LOGIC BASED TEMPERATURE CONTROL FOR PLASTICS INJECTION MOULDING MACHINE FORMS**

*In the paper various possibilities to employ fuzzy logic for temperature control applied to plastics injection moulding machine forms equipped with heated channels are described. The considerations are illustrated by results of computer simulations.*

### **1. WPROWADZENIE**

Spośród metod sztucznej inteligencji najwięcej zastosowań w automatyce przemysłowej ma obecnie logika rozmyta a wszyscy znani producenci regulatorów oferują urządzenia w których logika ta jest wykorzystywana. Jednak, pomimo swoich zalet sterowanie rozmyte nie jest powszechne stosowane w przemyśle. Wynika to nie tylko z braku wiedzy i związanych z tym obaw kadry technicznej, lecz niejednokrotnie związane jest także z tym, że algorytmy sterowania rozmytego implementowane w tzw. regulatorach uniwersalnych mają najczęściej dość ograniczone możliwości. Wydaje się zatem, że sposobem na rozpowszechnienie w przemyśle sterowania rozmytego może być zastosowanie go w regulatorach specjalizowanych, zwłaszcza jeśli będą to regulatory opracowane dla często spotykanych procesów technologicznych.

Tworzywa sztuczne stosowane są coraz częściej nie tylko dlatego, że mają wymagane właściwości (fizyczne i chemiczne) ale także z tego powodu, że istnieją tanie technologie masowego i praktycznie bezodpadowego wytwarzanie przedmiotów o bardzo zróżnicowanych kształtach i wymiarach [2]. Jedną z takich technologii jest wtryskiwanie uplastycznionego termicznie tworzywa do formy w której po zestaleniu tworzywa powstaje jest wyrób o żądanym kształcie. Wtryskiwanie stosowane jest od bardzo dawna, jednak coraz częstsze wytwarzanie wielkogabarytowych i cienkościennych przedmiotów przy użyciu metody tzw. wtrysku wielopunktowego wymaga dokładniejszego niż kiedyś sterowania przebiegiem tego procesu a w tym także sterowania temperaturą form wtryskowych i temperaturą wtryskiwanego tworzywa [2].

## **2. FORMA WTRYSKOWA JAKO OBIEKT STEROWANIA TEMPERATURĄ**

Wysoka wydajność wtryskiwania uzyskiwana jest m.in. dzięki wykorzystywaniu form wtryskowych z grzanymi kanałami. Duża moc ich grzałek rezystancyjnych pozwala bowiem na szybkie ogrzanie – podczas wtrysku do formy - tworzywa znajdującego się w kanale. Skrócenie czasu przebywania tworzywa w wysokiej temperaturze ogranicza zaś jego degradację termiczną i polepsza jakość wyrobu [2].

Konstrukcja form z grzanymi kanałami powoduje, że z punktu widzenia sterowania temperaturą są one obiektami statycznym niskiego rzędu z dominującą stałą czasową i niewielkim opóźnieniem. Jako obiekty elektrotermiczne są one także nieliniowe statycznie i dynamicznie zaś dla potrzeb sterowania temperatura właściwości formy z grzanymi kanałami można opisać za pomocą modelu Wienera [3].

Skuteczne sterowanie obiektami o takich właściwościach zapewnia zastosowanie regulatora PID [3], jednak ze względu na stosunkowo niewielkie stałe czasowe obiektu powinien to być tzw. regulator szybki. Ponadto, ponieważ typowa obsługa wtryskarek ma znikomą wiedzę o automatyce, regulator temperatury form z grzanymi kanałami musi być wyposażony w skuteczną procedurę samonastrajania wykorzystującą bazującą na analizie przebiegu procesu rozgrzewania formy.

Cykliczny przepływ tworzywa w kanale formy podczas pracy wtryskarki powoduje, że w układzie sterowania temperaturą występują silne okresowe zakłócenia. Aby uzyskać dużą wydajność pracy wtryskarki regulator temperatury formy wtryskowej powinien szybko i skutecznie je zregulowywać. Ułatwia to duża moc cieplna grzałek rezystancyjnych wykorzystywanych do ogrzewania form wtryskowych.

Dzięki dużej mocy grzałka rezystancyjna o niewielkich wymiarach może szybko rozgrzać się do wysokiej temperatury. Ponieważ jednak grzałki nie są hermetyzowane (ze względu na różne wartości współczynników rozszerzalności cieplnej materiałów z jakimi są one budowane) to łatwo może dojść do zniszczenia zbyt szybko rozgrzewającej się zawilgoconej grzałki. Wilgotna grzałka może być także powodem porażenia elektrycznego obsługi wtryskarki. Aby temu zapobiec regulator sterujący temperaturą formy wtryskowej musi być wyposażony w specjalny algorytm umożliwiający bezpieczne osuszenie grzałki.

## **3. ZASTOSOWANIA LOGIKI ROZMYTEJ W STEROWANIU TEMPERATURĄ FORM WTRYSKOWYCH**

W układach sterowania temperaturą form wtryskowych logika rozmyta pozwala na realizację takich zadań jak:

- bezpośrednie sterowanie rozmyte temperaturą formy,
- wspomagające sterowanie rozmyte temperaturą formy,
- rozmyta optymalizacja sterowania klasycznego,
- rozmyte sterowanie przebiegiem procesu suszenia grzałek.

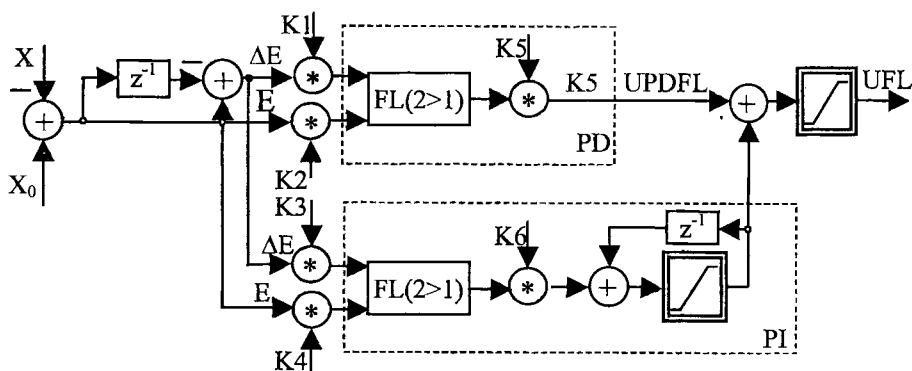
Oczywiście w układzie sterowania można realizować kilka z tych zadań tym bardziej że suszenie grzałek jest wykonywane w innej fazie pracy wtryskarki aniżeli pozostałe z wymienionych powyżej funkcji.

Poniżej zostanie omówiona każda z tych koncepcji zastosowania logiki rozmytej w sterowaniu temperaturą formy wtryskowej.

### 3.1. BEZPOŚREDNIE STEROWANIE ROZMYTE TEMPERATURĄ FORMY WTRYSKOWEJ.

Z uwagi na opisane wcześniej właściwości regulacyjne obiektu sterowania algorytm rozmytego regulatora temperatury form wtryskowych musi być algorytmem typu PID.

Z samej istoty sterowania rozmytego wynika to, że algorytmy rozmyte mają dużo parametrów co niejednokrotnie jednak ogranicza ich praktyczną użyteczność [1]. Ilość parametrów można jednak znacznie zmniejszyć stosując algorytm o odpowiedniej strukturze a ponadto - dzięki wstępnemu określeniu wartości większości tych parametrów - można stworzyć regulator rozmyty, którego nastrojenie wymaga określenia wartości jedynie kilku parametrów. Strukturę takiego algorytmu rozmytego sterowania PID pokazano na rys. 1.



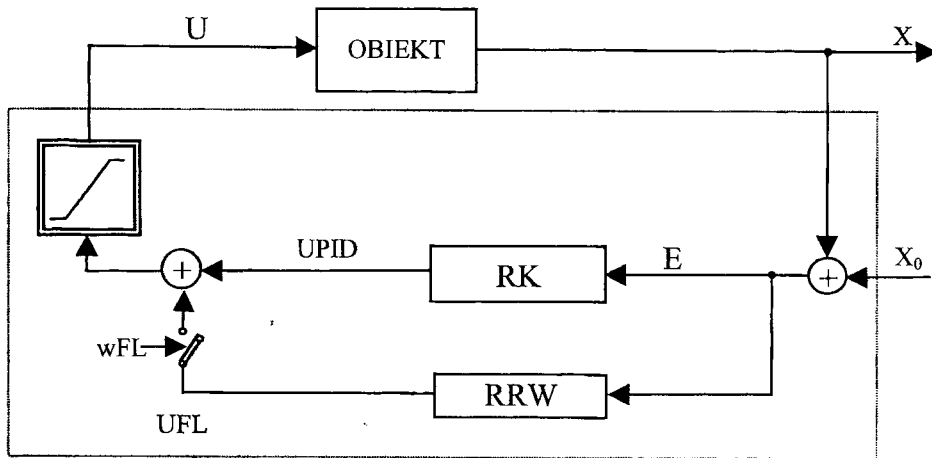
Rys. 1. Struktura prostego rozmytego regulatora PID

Regulator ten tworzą połączone równolegle dwa dwuwęściowe bloki wnioskowania rozmytego (FL(2>1)). Pierwszy z nich pełni rolę członu PD zaś drugi po połączenia z numerycznym integratorem tworzy człon PI tego regulatora. W regulatorze tym wartości progów funkcji przynależności wejść i wyjść oraz tablice decyzyjne mogą być określone na stałe czyli niedostępne dla użytkownika, zaś strojenie takiego regulatora sprowadzać się do określenia wartości sześciu współczynników ( $K_1, \dots, K_6$ ). Przy odpowiednim zaś doborze funkcji przynależności i praw sterowania wartości tych współczynników można określić np. na podstawie przebiegu procesu rozgrzewania się formy co umożliwi zbudowanie rozmytego regulatora samonastrajającego się.

W wykonaniu przemysłowym regulatora temperatury form wtryskowych wskazane jest - ze względu na przyzwyczajenia użytkowników - zaimplementowanie także klasycznego czyli analitycznego algorytmu sterowania typu PID w wersji samonastrajającej się.

### 3.2. WSPOMAGAJĄCE STEROWANIE ROZMYTE TEMPERATURA FORMY WTRYSKOWEJ

Typowy samonastrajający się regulator temperatury form wtryskowych nastraja się podczas rozruchu pustej wtryskarki a następnie sterować musi temperaturą formy przez którą przepływa tworzywo. Cykliczny ruch wtryskiwanego tworzywa zmienia oczywiście właściwości obiektu sterowania lecz nie znajduje to odzwierciedlenia w nastawach regulatora. W sytuacji takiej jakość sterowania można zwiększyć stosując układ ze sterowaniem wspomagającym pokazany na rysunku 2.



Rys. 2. Struktura układu sterowania ze wspomagającym sterowaniem rozmytym

Przemysłowe przeznaczenie regulatora wymaga aby układ pokazany na rysunku 2 mógł pracować bez błędu ustalonego - także z odłączonym rozmytym regulatorem wspomagającym (RRW) - regulator główny (RK) musi wykorzystywać tzw. astatyczny algorytm sterowania czyli algorytm typu PID lub PI.

Z uwagi na sposób pracy wtryskarki sterowanie temperaturą formy z grzaniem kanałami jest regulacją stabilizacyjną odbywającą się w obecności silnych cyklicznych zakłóceń. W praktyce wystarczy zatem aby rozmyty regulator wspomagający (RRW) działał jedynie wówczas gdy błąd sterowania jest niewielki zaś działanie tego algorytmu powinno jedynie przeciwdziałać skutkom zakłóceń. Upraszcza to znacznie jego konstrukcję wspomagającego regulatora rozmytego ponieważ może on wykorzystywać algorytm o działaniu PD, który w wersji najprostszej można zrealizować wykorzystując dwuwęściowy blok wnioskowania rozmytego FL(2>1).

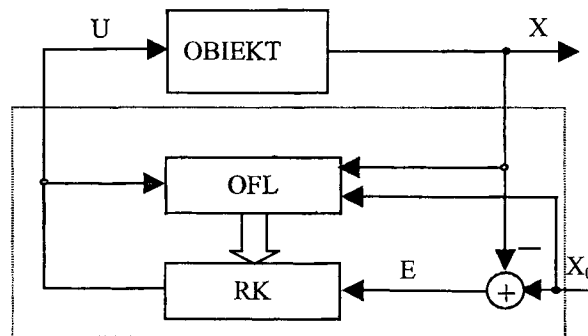
Dla wygody użytkownika progi funkcji przynależności i tablice decyzyjne regulatora wspomagającego powinny być zapisane na stałe w pamięci regulatora zaś wartości współczynników dostrajających ten algorytm do właściwości obiektu sterowania powinny być określane samoczynnie - co pozwoli na stworzenie samonastrajającego się rozmytego regulatora wspomagającego.

### 3.3. ROZMYTA OPTIMALIZACJA KLASYCZNEGO STEROWANIA TEMPERATURĄ FORMY WTRYSKOWEJ

Typowe regulatory samonastrajające określają wartości swoich nastaw na podstawie:

- naturalnych przebiegów wielkości regulowanej występujących po odpowiednio dużej i długotrwałej skokowej zmianie sygnału sterującego np. podczas rozruchu układu sterowania lub po zmianie wartości zadanej,
- wymuszonych przebiegów wielkości regulowanej występujących podczas wykonywania aktywnego eksperymentu identyfikacyjnego, takiego jak np. tzw. eksperyment przekaźnikowy.

W obu tych rozwiązaniach wartości nastaw regulatorów są dobierane w taki sposób aby zoptymalizować (wg przyjętego przez producenta regulatora kryterium jakości) przebiegi wielkości regulowanej. Rozwiązania takie pomijają to, iż podobną jakość regulacji można uzyskać np. eksploatując w różny sposób urządzenie wykonawcze. Wady tej pozbawiona jest – pokazana na rysunku 3 – koncepcja rozmytej optymalizacji układu sterowania klasycznego w której rozmyty optymalizator (OFL) kompleksowo „ocenia” zachowanie się układu sterowania i odpowiednio do niego zmienia wartości nastaw regulatora klasycznego (RK). Pozwala to np. na zachowanie wymaganej jakości sterowania przy równocześnie „oszczędnej” eksploatacji urządzenia wykonawczego.



Rys. 3. Struktura układu sterowania z rozmytą optymalizacją wartości nastaw regulatora klasycznego

Ponieważ w układach regulacji temperatury form z grzanymi kanałami obecnie wykorzystywane są energoelektroniczne elementy wykonawcze to nie ma potrzeby optymalizacji sterowania, która eksploatowałoby je „oszczędniej”. Celem rozmytej optymalizacji może jednak być optymalizacja współpracy obwodów mocy układu sterowania z siecią zasilającą a więc np. zmniejszenie wprowadzanych do tej sieci zakłóceń. Problem ten ma szczególne znaczenie w układach wykorzystujących tzw. fazowe sterowanie elementami energoelektronicznymi.

Innym celem rozmytej optymalizacji układu sterowania temperaturą formy wtryskowej może być adaptacja wartości nastaw regulatora klasycznego do - zależnych od temperatury i właściwości wtryskiwanego tworzywa oraz tzw. objętości wtrysku – chwilowych właściwości układu sterowania. Procedura taka jest obecnie opracowywana.

### **3.4. ROZMYTE STEROWANIE PRZEBIEGIEM PROCESU SUSZENIA GRZAŁEK FORM WTRYSKOWYCH**

Grzałki form wtryskowych z grzanymi kanałami nie są hermetyzowane a znaczna moc cieplna tych grzałek oraz higroskopijność stosowanych w nich materiałów izolacyjnych wymusza konieczność stosowania procedury wstępnego ich suszenia.

W produkowanych dotychczas specjalizowanych regulatorach suszenie grzałki przebiega wg zdefiniowanego a priori programu który nie uwzględnia rzeczywistego stanu zawilgocenia izolacji grzałki i jej podatności na osuszanie. Dlatego też najczęściej proces suszenia trwa zbyt długo. Wskazane jest zatem wyposażenie regulatora temperatury form wtryskowych w nową procedurę suszenia izolacji grzałki, która dzięki wykorzystaniu logiki rozmytej zoptymalizowałaby proces jej suszenia.

Stopień zawilgocenia izolacji grzałki można oceniać np. na podstawie jej oporności którą można wyznaczyć z wartości prądu upływu grzałki i napięcia pod wpływem którego prąd ten płynie. Łatwość osuszania izolacji można zaś ocenić na podstawie temperatury grzałki, szybkości zmian tej temperatury oraz szybkości zmian oporności izolacji. Ponieważ te wielkości są mierzone (temperatura i prąd upływu) lub można je ocenić (wartość maksymalna napięcia zasilającego grzałkę podczas suszenia) tym samym można stworzyć regulator wyposażony w procedurę optymalizowanego suszenia izolacji bez konieczności rozbudowy sprzętowej typowego regulatora temperatury form wtryskowych. Procedura inteligentnego suszenia izolacji grzałek form wtryskowych wykorzystująca podane wyżej informacje jest obecnie w fazie testów symulacyjnych.

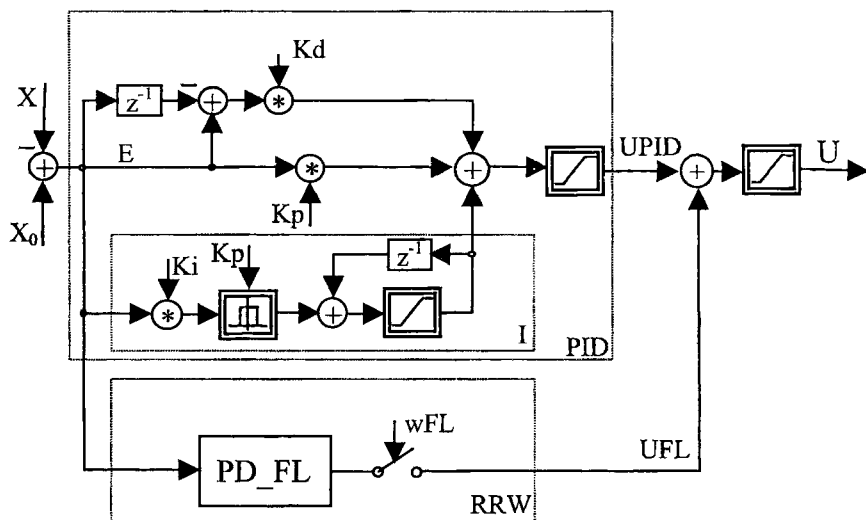
### **4. REALIZACJA ALGORYTMU WSPOMAGAJĄCEGO STEROWANIA ROZMYTEGO TEMPERATURĄ FORM WTRYSKOWYCH Z GRZANYMI KANAŁAMI**

Po przeprowadzeniu analizy rozwiązań wykorzystywanych w wielu produkowanych obecnie na świecie regulatorach temperatury form wtryskowych jako pierwsze – spośród przedstawionych powyżej czterech zastosowań logiki rozmytej – do badań zostało wybrane rozmyte sterowanie wspomagające działanie głównego algorytmu sterowania.

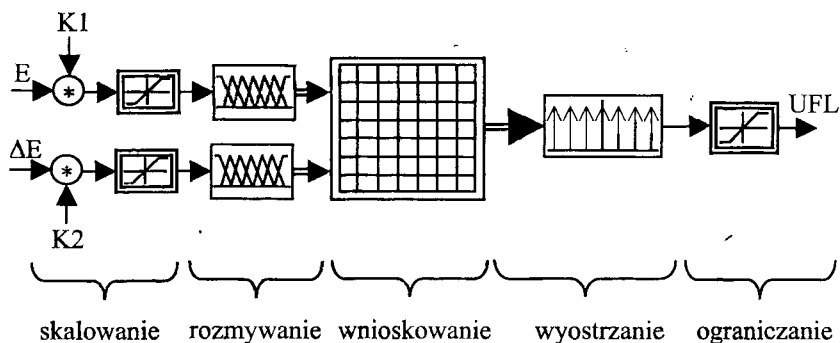
Podczas badań wykorzystywano klasyczny algorytm PID o strukturze równoległej z kluczowaniem akcji całkowującej (poza zakresem proporcjonalności) i akcją różniczkującą wyznaczaną tzw. metodą dwupunktową. Strukturę tego algorytmu – wraz z dołączonym do niego algorytmem rozmytego sterowania wspomagającego – pokazuje rysunek 4.

Pokazany na rysunku 4 tzw. „zewewnętrzny” sposób dołączenia algorytmu sterowania wspomagającego do algorytmu sterowania głównego został wybrany spośród kilku innych - przetestowanych z użyciem symulacji komputerowych - wariantów ze względu na swoją skuteczność.

Po przeprowadzeniu szeregu symulacji komputerowych algorytmów wspomagającego sterowania rozmytego o różnym stopniu złożoności okazało się, że znaczną poprawę jakości sterowania temperaturą formy wtryskowej można uzyskać stosując nawet najprostszy algorytm sterowania rozmytego o właściwościach PD. Strukturę takiego algorytmu pokazuje rysunek 5.



Rys.4. Struktura regulatora temperatury form wtryskowych z dołączonym rozmytym sterowaniem wspomagającym



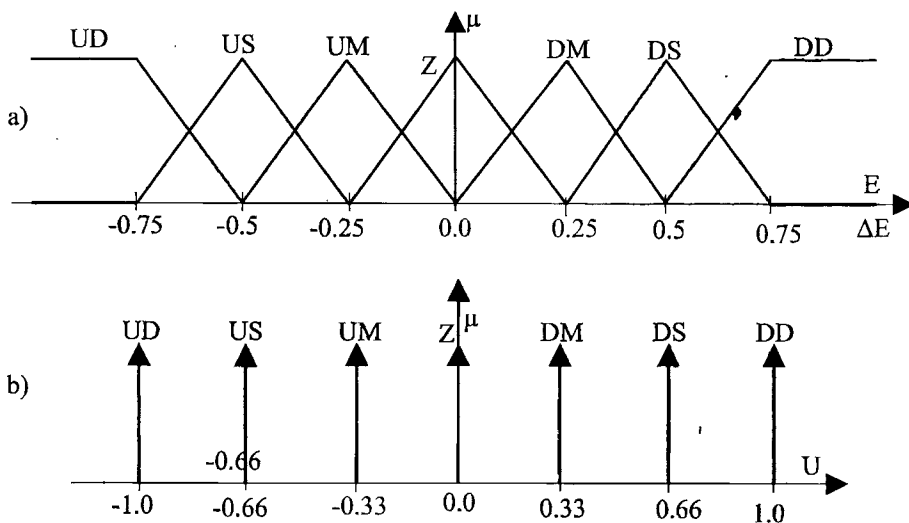
Rys. 5. Struktura najprostszego algorytmu rozmytego wspomagającego sterowania PD temperaturą form z grzanymi kanałami

Podczas badań symulacyjnych w algorytmie wspomagającego PD sterowania rozmytego zastosowano:

- okres powtarzania ( $T_p$ ) taki sam jak głównego algorytmu sterowania,
- rozmywanie błęd sterowania ( $E$ ) i dyskretnej szybkości zmian tego błędu ( $\Delta E$ ) przy pomocy trójkątnych i trapezowej trapezowych funkcji przynależności do siedmiu zbiorów (rys. 6a),
- opis wielkości wyjściowej przy pomocy siedmiu zbiorów reprezentowanych przez tzw. singletonowe funkcje przynależności (rys 6b),

- wnioskowane o wartości sygnału wyjściowego algorytmu sterowania rozmytego przy pomocy reguły MAX-MIN [1],
- wyostrzenie wielkości wyjściowej metodą środka ciężkości [1].

Aby nowy regulator mogli zaakceptować użytkownicy wtryskarek – nie będący przecież najczęściej automatykami – nastajanie algorytmu wspomagającego sterowania rozmytego jest bardzo proste i polega na określeniu wartości jedynie dwóch współczynników skalujących sygnały wejściowe (K1 i K2). Taką prostotę strojenia algorytmu sterowania wspomagającego uzyskano dzięki odpowiedniemu doborowi funkcji przynależności (rys. 6) i praw sterowania (tab. 1).



Rys. 6. Funkcje przynależności wejść (a) i wyjścia (b) algorytmu rozmytego sterowania wspomagającego

Tabela 1. Tablica decyzyjna algorytmu sterowania wspomagającego

E/ΔE	UD	US	UM	Z	DM	DM	DD
UD	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z
US	UM	UM	Z	Z	Z	Z	DM
UM	US	US	UM	Z	Z	DM	DS
Z	UD	UD	US	Z	DM	DS	DD
DM	US	US	UM	Z	Z	DM	DS
DS	UM	UM	Z	Z	Z	Z	DM
DD	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z

Wartości współczynników K1 i K2 mogą być określane samoczynnie podczas rozruchu układu sterowania czyli podczas rozgrzewania wtryskarki. Wykorzystywana w tym celu procedura samonastajania włącza się zawsze podczas wstępnego rozgrzewania wtryskarki i określa okres próbkiowania regulatora:

$$T_p = 0.1 \cdot t_{pp} \quad (1)$$



którego wartość jest zaokrąglana do najbliższej wartości możliwej do zrealizowania oraz współczynniki skalujące wejścia:

$$K1 = (T_p \cdot U_{pocz}) / (t_0 \cdot dX_{max}) \quad (2)$$

$$K2 = U_{pocz} / dX_{max} \quad (3)$$

gdzie  $t_{pp}$  to czas osiągnięcia maksymalnej wartości przez szybkość narastania ( $dX_{max}$ ) temperatury formy której grzałki zostały wysterowane sygnałem  $U_{pocz}$ , zaś  $X_{pp}$  to temperatura w chwili  $t_{pp}$  a  $t_0$  to zastępcze opóźnienie obiektu dane wzorem:

$$t_0 = t_{pp} - (X_{pp} - X_{pocz}) / dX_{max} \quad (4)$$

w którym  $X_{pocz}$  to temperatura od której rozpoczęto rozgrzewanie formy wtryskarki.

## 5. BADANIA ALGORYTMU ROZMYTEGO STEROWANIA WSPOMAGAJĄCEGO

Podczas projektowania algorytmu sterowania wspomagającego wykorzystywano program napisany specjalnie do tego celu w języku C. W programie tym zasymulowano układ sterowania składający się z obiektu sterowania posiadającego właściwości regulacyjne (statyczne i dynamiczne) typowe dla formy wtryskowej i uwzględniający zarówno proces suszenia grzałek jak i wpływ ruchu tworzywa na temperaturę formy, przetworniki pomiarowe, modulator PWM sterujący pracą wykonawczych elementów energoelektronicznych oraz regulator zawierający opisane powyżej klasyczny algorytm PID i algorytm rozmytego PD sterowania wspomagającego.

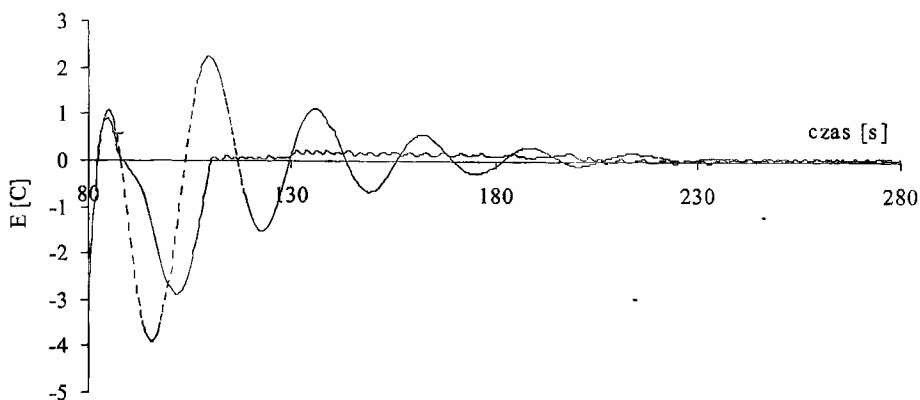
Przykładowe wyniki takich symulacji dla sterowania temperaturą „formy wtryskowej” bez sterowania wspomagającego i z włączonym takim sterowaniem pokazują rys. 7 i 8.

Na rysunku 7 pokazano przebieg błędu sterowania podczas końcowej fazy rozgrzewania formy wtryskowej czyli podczas dochodzenia jej temperatury do wartości zadanej z włączonym rozmytym sterowaniem wspomagającym i bez tego sterowania. W układzie ze sterowaniem wspomagającym błąd sterowania osiągnął dopuszczalną wartość  $0.5^{\circ}\text{C}$  w czasie krótszym o 58 s i tym samym proces rozruchu wtryskarki skrócił się z 166.5 s do 108.5 s.

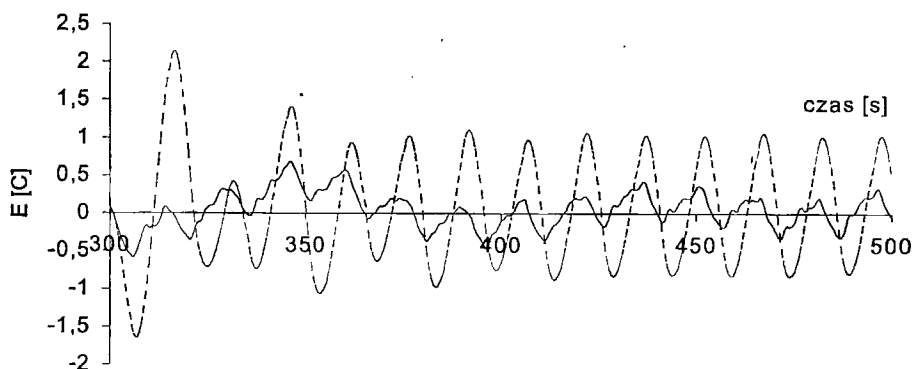
Na rysunku 8 pokazano przebieg błędu sterowania po rozpoczęciu pracy wtryskarki. Jak widać zastosowanie rozmytego sterowania wspomagającego nie tylko zmniejszyło ponad trzykrotnie wahania temperatury formy ale także ograniczyło do maksymalnej wartości błędu sterowania do wartości dopuszczalnej czyli  $0.5^{\circ}\text{C}$  po pierwszym cyklu pracy wtryskarki.

## 6. PODSUMOWANIE

W wyniku przeprowadzonych badań symulacyjnych i praktycznych można stwierdzić, że spośród nawet najprostsze wspomagające sterowanie rozmyte może znacznie zwiększyć jakość sterowanie temperaturą form wtryskowych z grzanymi kanałami. Jakość tą można będzie jeszcze poprawić stosując rozmyty regulator wspomagający uwzględniający nieliniowości statyczne i dynamiczne obiektu sterowania czyli formy wtryskowej z grzanymi kanałami. Prace nad takim algorytmem obecnie trwają.



Rys. 7. Przebieg błędu sterowania w końcowej fazie rozgrzewania formy wtryskowej;  
 — z włączonym sterowaniem wspomagającym,  
 --- bez sterowania wspomagającego



Rys. 8. Przebieg błędu sterowania podczas pracy wtryskarki: — z włączonym sterowaniem wspomagającym, --- bez sterowania wspomagającego

## 7. LITERATURA

1. Piegat A.: Fuzzy Modelling and Control, Physica-Verlag, Springer-Verlag, Heidelberg-New York, 2001
2. Sikora R.: Przetwórstwo tworzyw wielkocząsteczkowych, Wydawnictwo Edukacyjne, Warszawa 1993
3. Skoczowski S.: Deterministyczna identyfikacja i jej wykorzystanie w odpornej regulacji PID temperatury, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, Szczecin 2001