

## ALGORYTMY STEROWANIA NAPĘDAMI LINII WYTŁACZARKOWEJ

*W referacie omówiono wyniki badań algorytmów sterowania napędami elektrycznymi linii wytłaczarkowej produkującej przewody elektryczne w izolacji z tworzywa sztucznego. Celem prac było znalezienie algorytmów sterowania procesem formowania izolacji na przewodzie. Rozpatrzono układ sterowania wykorzystujący zarówno klasyczne algorytmy PID jak i algorytmy sterowania rozmytego. Rozważania zilustrowano wynikami symulacji komputerowych pracy linii wytłaczarkowej.*

### CONTROL ALGORITHMS FOR EXTRUSION LINE DRIVES

*In the paper results of an investigation into control algorithms for extrusion line drives designed to cover electric wires with plastic insulation are presented. The investigation has sought control algorithms for optimizing the forming of the insulation on the wire. A control system utilizing both conventional PID algorithms and fuzzy-logic based ones has been analyzed. Results of computer tests complete the considerations.*

#### 1. WPROWADZENIE

Wytłaczanie jest jedną z podstawowych technologii wytwarzania wyrobów z tworzywa sztucznego formowanego w sposób ciągły przy pomocy urządzeń tworzących linię wytłaczarkową [5-7]. W ten sposób produkowane są kształtki (pręty, rury itp.), folie oraz prowadzone jest natłaczanie tworzywa sztucznego na nośnik (folie lub rury wielowarstwowe oraz przewody elektryczne).

W skład linii wytłaczarkowej wchodzi jedna lub kilka wytłaczarek wraz z urządzeniami zasilającymi je w tworzywo, urządzenia odbierające wytworzony produkt oraz ew. urządzenia podające nośnik do natłaczania. Odpowiednie sterowanie ich pracą jest konieczne dla uzyskania wyrobów o wymaganej jakości.

Linia wytłaczarkowa jest złożonym obiektem sterowania. Kompleksowe sterowanie jej pracą wymaga bowiem równoczesnego sterowania:

- wolnozmiennymi procesami termicznej „obróbki” przetłaczanego tworzywa,
- szybkozmiennymi procesami formowania i przemieszczania wyrobu.

Podobnie też na ocenę przebiegu procesu wytłaczania składa się:

- jakość (właściwości) tworzywa w wyrobie po wytłaczaniu,
- jakość „geometrii” wyrobu, tzn. grubość warstwy tworzywa i jej rozkład w przekroju poprzecznym wyrobu.

Jakość tworzywa w wyrobie zależy od jego tzw. historii cieplnej na którą można wpłynąć

poprzez odpowiednie – do wydajności wytłaczania – ukształtowanie profilu temperatur stref wytłaczarki. Aby zoptymalizować ten profil należy zastosować do sterowania temperaturami stref wytłaczarki hierarchiczny układ regulacji [1,2].

W niniejszym referacie przedstawione zostaną natomiast – na przykładzie linii do produkcji przewodów elektrycznych w izolacji z tworzywa sztucznego - problemy sterowania pracą linii wytłaczarkowej związane z uzyskaniem odpowiedniej „geometrii” wyrobu.

## 2. STEROWANIE WYMIARAMI WYROBU

Wymiary poprzeczne wyrobu zależą od objętościowego natężenia wypływu tworzywa z wytłaczarki ( $q$ ) oraz od liniowej szybkości formowania wyrobu ( $v_c$ ) wymuszanej przez urządzenia przemieszczające przewód wzdłuż linii wytłaczarkowej.

Podczas wytwarzania jednożyłowego przewodu elektrycznego jego wytworzoną średnicę zewnętrzną ( $D$ ) opisuje zatem wzór:

$$D(t) = \sqrt{D_0^2 + \frac{q(\omega(t), \vartheta(y))}{v_c(t)}} \quad (1)$$

gdzie:

- $D_0$  – średnica „żyły” przewodu,
- $\omega$  – prędkość obrotowa ślimaka wytłaczarki,
- $\vartheta(y)$  – profil temperatury tworzywa wzdłuż wytłaczarki,
- $t$  – czas.

Automatyczna stabilizacja średnicy produkowanego przewodu wymaga jej mierzenia. Jednak z uwagi na zmianę wymiarów wyrobu następującą w miarę oddalania się jego od formującej go dyszy – tzw. efekt Barusa [7] - pomiar średnicy przewodu dokonywany jest w odległości ( $L_p$ ) od wytłaczarki. Zmierzona średnica przewodu ( $D_p$ ) jest zatem opóźniona w stosunku do średnicy wytworzonej ( $D$ ) o zmienne i zależne od prędkości formowania wyrobu opóźnienie pomiarowe ( $\tau_p$ ) wartość którego opisuje wzór:

$$L_p = \int_{t-\tau_p}^t v_c(t) dt \quad (2)$$

Utrzymywanie stałej średnicy zewnętrznej przewodu wymaga algorytmu koordynującego:

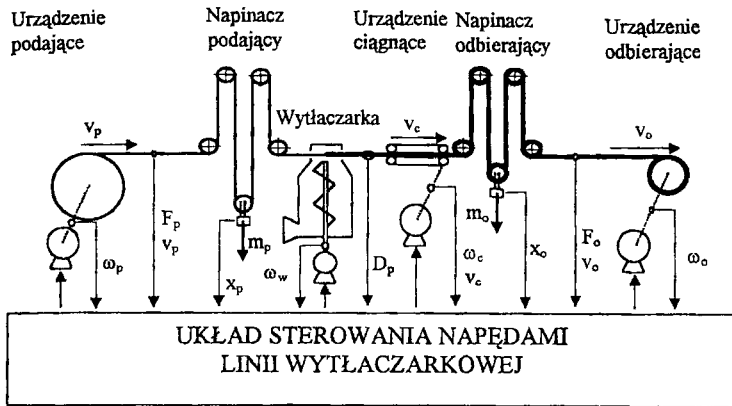
- liniową prędkości ( $v_c$ ) przeciągania „żyły” przez dyszę natłaczającą na nią izolację,
- obrotową prędkość ślimaka wytłaczarki ( $\omega$ ).

Ponadto dla uzyskania stałości kształtu przewodu – a zwłaszcza jego centryczności- konieczne jest także utrzymywanie w nim podczas natłaczania izolacji stałego rozciągającego naprężenia ( $F$ ). Jest ono najczęściej wytwarzane dzięki tzw. napinaczom (np. grawitacyjnym) oraz odpowiedniemu sterowaniu:

- liniową prędkością podawania nośnika, tzn. żyły przewodu ( $v_p$ ),
- liniową prędkością obierania gotowego przewodu ( $v_o$ ).

Aby zrealizować to zadanie linia wytłaczarkowa wyposażona jest w odpowiednie urządzenia obracające bębny (szpule) podające i odbierające przewód. Wszystkie urządzenia linii wytłaczarkowej najczęściej napędzane są bocznikowymi silnikami prądu stałego.

Na rysunku 1 pokazano schematycznie konfigurację typowej linii wytłaczarkowej wyposażonej we wszystkie wymienione urządzenia. Linia taka była przedmiotem opisywanych badań.



Rys.1. Schemat technologiczny badanej linii wytłaczarkowej.

Do stabilizacji zarówno wymiarów poprzecznych wyrobu jak i naprężenia napinającego go konieczne jest skoordynowanie prędkości obrotowej ślimaka wytłaczarki z prędkością podawania nośnika ( $v_p$ ), przeciągania przewodu przez dyszę wytłaczarki ( $v_c$ ) oraz prędkości odbierania wyrobu ( $v_o$ ). Zakres regulacji tych prędkości jest bardzo szeroki z uwagi na konieczność dokonywania kontrolowanego rozruchu i zatrzymywania linii.

Stabilizacja wymiarów wyrobu jest trudna do sterowania bowiem:

- związek pomiędzy objętościowym natężeniem wytłaczania tworzywa ( $q(\omega)$ ) a prędkością obrotową ślimaka wytłaczarki ( $\omega$ ) jest silnie nieliniowy (statycznie i dynamicznie) zaś nawet dla małych odchyłeń opisuje go stosunkowo skomplikowana transmitancja [8]:

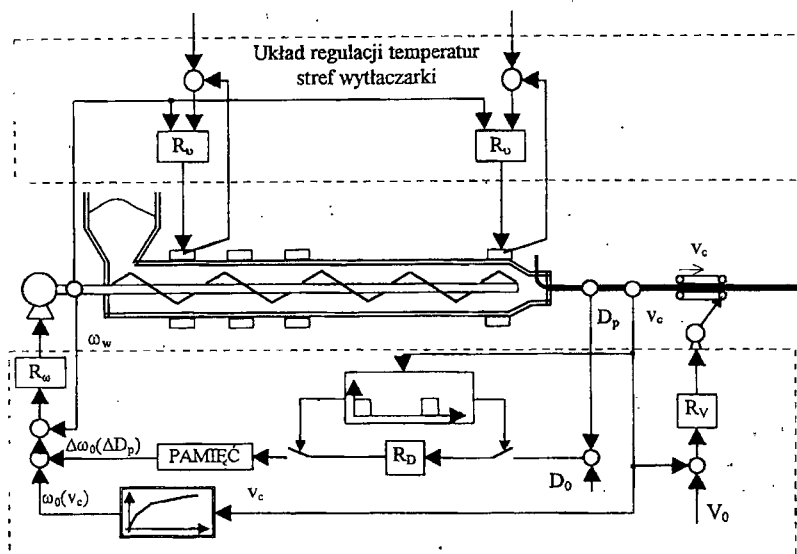
$$\frac{q(s)}{\omega(s)} = \frac{(1+as)^4}{bs^2 + cs + 1} \quad (3)$$

- znacznie prostsza do sterowania prędkość ( $v_c$ ) przeciągania przewodu - dynamikę jej zmian opisuje transmitancja typu inercja II rzędu zaś statyka jest prawie liniowa - znajduje się w mianowniku wzoru (1) co komplikuje właściwości tego toru sterowania,
- w układzie pomiaru średnicy przewodu występuje zmienne opóźnienie pomiarowe ( $\tau_p$ ).

Wpływ zmiennego opóźnienia pomiarowego można wyeliminować poprzez zastosowanie - pokazanego na rysunku 2 - układu regulacji kaskadowej z impulsową pętlą zewnętrzną. Okres impulsowania tej pętli jest zmienny i zależy od prędkości odbierania wyrobu ( $v_o$ ). Pomędzy momentami zadziałania pętli zewnętrznej regulator pętli wewnętrznej stabilizuje prędkość obrotową ślimaka wytłaczarki na wartości zadanej wynikającej z charakterystyki statycznej wytłaczania ( $\omega_b(v_o)$ ) i poprawki ( $\Delta\omega_b(\Delta D_p)$ ) wyznaczonej przez regulator pętli zewnętrznej. W pętli wewnętrznej układu regulacji sterowaniu podlega prędkość obrotowa ślimaka wytłaczarki, bowiem jej zmiany - niezbędne do utrzymywania stałych wymiarów wyrobu - praktycznie nie wpływają na pracę pozostałych urządzeń linii wytłaczarkowej. Na rysunku 2 pokazano także układ regulacji temperatur stref wytłaczarki ponieważ jest on „sprzężony” z układem regulacji prędkości obrotowej ślimaka wytłaczarki.

Duże zmiany wydajności wytwarzania wyrobu (np. rozruch lub zatrzymywanie linii technologicznej) występują stosunkowo rzadko zatem o skuteczności stabilizacji średnicy zewnętrznej przewodu decydują algorytmy stabilizacji prędkości liniowej  $v_c$  i obrotowej  $\omega$ . Dotychczas stosowane do sterowania tymi napędami standardowe regulatory prędkości obrotowej boczniowych silników prądu stałego wykorzystują typowe algorytmy PID.

Znacznie ograniczając szybkość zmian wydajności wytwarzania (tzn. szybkość rozruchu i zatrzymywania) uzyskuje się zadowalającą jakość produkcji.



Rys.2 Układ stabilizacji średnicy przewodu.

Znając z innych praktycznych zastosowań dużą skuteczność sterowania rozmytego spróbowano zasymulować zastosowanie ich do sterowania silnikiem napędu ślimaka wytłaczarki oraz silnikami napędów urządzeń przeciągających przewód przez natłaczającą nań izolację dyszę wytłaczarki. Wyniki tych badań zostaną przedstawione w dalszej części referatu.

### 3. STEROWANIE PRZEMIESZCZANIEM WYROBU W LINII WYTŁACZKOWEJ

Sterowanie prędkościami podawaniem żyły ( $v_p$ ) i odbierania gotowego przewodu ( $v_o$ ) musi dodatkowo stabilizować naprężenia ( $F$ ) rozciągające przemieszczany przewód.

Ponieważ jednak przewód podczas natłaczania nań izolacji jest przewijany z bębna podającego na bęben odbierający sterowanie silnikami napędzającymi te bębny jest trudne. Podczas pracy - wraz ze zmianami średnic obu bębnow - zmieniają się ich momenty bezwładności i opory obracania się oraz prędkości obrotowe. Zakres zmian tych wielkości jest bardzo duży a sterowanie zakłócają często występujące mechaniczne uszkodzenia bębnow (np. ich niecentryczność) lub nierównomierność nawinięcia przewodu na bębnie.

Dotychczas najczęściej do napędu obu bębnow stosowane są bocznikowe silniki prądu stałego sterowane są przy pomocy typowych regulatorów prędkości obrotowej wykorzystujących klasyczne algorytmy PID. Jednak z uwagi na znaczne zmiany właściwości napędzanych urządzeń dobór nastaw tych regulatorów jest trudny. Z zasady zatem strojąc te regulatory przyjmuje się, że podczas rozruchu linii bęben podający jest pełny zaś bęben odbierający pusty. Ilość przewodu nawiniętego na bębny podczas pracy linii zmienia się powoli - w stosunku do dynamiki sterowanego urządzenia - co powoduje, że regulatory napędu pracują w warunkach quasi ustalonych i dzięki temu można uzyskać żądaną jakość sterowania. Problemy pojawiają się natomiast jeśli na bębnie podającym mieści się inna ilość

przewodu aniżeli na bębnie odbierającym. W takim przypadku linia pracuje ze silnie zmienną prędkością bowiem dochodzi do jej rozruchów i zatrzymań z jednym z bębnow tylko częściowo zapełnionym. Klasyczny regulator PID może wówczas nie zapewnić wymaganej jakości sterowania.

Podstawowym zadaniem układów sterowania prędkościami obrotowymi bębnow podającego i odbierającego jest stabilizacja naprężenia w przewodzie przesuwającym się z wymuszoną przez urządzenie ciągnące prędkością ( $v_c$ ) przez dyszę wylączarki która natłacza na nim warstwę izolacji. Dzięki utrzymywaniu stałej wartości tego naprężenia możliwe jest „scentrowanie” wytwarzanego przewodu.

W linii pokazanej na rys. 1 naprężenie ( $F$ ) w stanie ustalonym „wytwarzają” napinacze. Pomijając opory przeciągania przewodu oraz zakładając, że masa przewodu znajdującego się pomiędzy bębnami jest znacznie mniejsza od mas ( $m$ ) napinających go, naprężenie przewodu na odcinku pomiędzy bębniem a urządzeniem przeciągającym do przez dyszę wylączarki wynosi:

$$F_i = \frac{1}{2} m_i \left( g - \frac{d^2 x_i}{dt^2} \right) \quad (4)$$

gdzie:

- $i = p$ , oznacza siłę w przewodzie podawanym do wylączarki,
- $i = o$ , oznacza siłę w przewodzie odbieranym z wylączarki,
- $g$  - przyspieszenie ziemskie,
- $m_i$  - odpowiednia masa napinająca,
- $x_i$  - położenie odpowiedniej masy napinającej, określone wzorem:

$$x_i(t) = \frac{1}{2} \int_0^t (v_d - v_z) dt \quad (5)$$

gdzie:

$$v_d = \begin{cases} v_p; & i = p \\ v_o; & i = o \end{cases} \quad (6)$$

$$v_z = \begin{cases} v_c; & i = p \\ v_o; & i = o \end{cases} \quad (6)$$

Jednak uzyskanie w przewodzie, w wyniku poprawnego działania układu sterowania, stałego naprężenia

$$F_i = F_{i0} = \frac{1}{2} m_i g = const \quad (8)$$

może oznaczać, że:

$$v_d - v_z \neq 0 = const \quad (9)$$

Ponieważ zaś „pojemność” napinacza jest ograniczona:

$$x_{i\min} \leq x_i \leq x_{i\max} \quad (10)$$

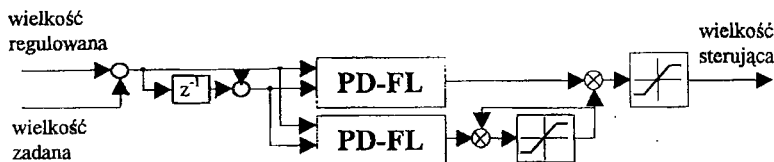
tym samym więc sterowanie naprężeniem ( $F$ ) w przeciąganym przewodzie musi być realizowane w układzie regulacji położenia ( $x_i$ ) masy napinającej. Jednak aby w stanach przejściowych działanie takiego układu nie wywoływało zbyt dużych naprężeń rozciągających w przewodzie na który natłaczana jest izolacja musi to być tzw. sterowanie „miękkie”, a więc sterowanie dopuszczające do znacznych jednak powolnych przemieszczeń mas napinających przewód.

#### 4. ALGORYTM ROZMYTEGO STEROWANIA SILNIKIEM BOCZNIKOWYM

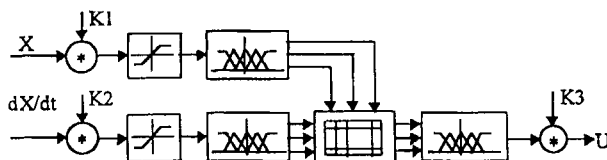
Obecnie coraz więcej urządzeń wykorzystuje niekonwencjonalne algorytmy sterowania a zwłaszcza algorytmy rozmyte. W algorytmie takim wartość sygnału sterującego wyznaczana jest z opisu zachowania się regulatora formułowanego w postaci zdania:

$$\begin{aligned} & \{ \text{IF } (... \text{AND } ... \text{AND } ... \text{AND } ...) \text{ THEN } (...) \} \quad \text{OR} \\ & \{ \text{IF } (... \text{AND } ... \text{AND } ... \text{AND } ...) \text{ THEN } (...) \} \quad \text{OR} \\ & \{ \text{IF } (... \text{AND } ... \text{AND } ... \text{AND } ...) \text{ THEN } (...) \} \quad \text{OR} \end{aligned} \quad (11)$$

Zainteresowanie praktyków sterowaniem rozmytym wynika w znacznej mierze z tego, iż przy pomocy tej techniki można zrealizować praktycznie dowolnie złożone układy sterowania. Formalnie prawo sterowania rozmytego jest bardzo proste, jednak wraz ze wzrostem jego złożoności bardzo szybko rośnie ilość występujących w nim parametrów. Ponadto najczęściej brak analitycznych reguł doboru ich wartości. Powoduje to wśród potencjalnych użytkowników - zrozumiałą w tych warunkach - ostrożność i nieufność. Jednak przeprowadzone przez autora badania symulacyjne oraz próby praktyczne pokazały, że można zbudować prosty i uniwersalny regulator rozmyty, znacznie skuteczniejszy od regulatora PID, w którym użytkownik będzie dobierał wartość tylko kilku parametrów [3,4]. Rysunek 3 pokazuje strukturę takiego algorytmu zastosowanego do sterowania prędkością obrotową bocznikowego silnika prądu stałego. Algorytm ten powstał w wyniku równoległego połączenia rozmytego algorytmu PD-FL oraz algorytmu PI-FL który powstał w wyniku scałkowania sygnału z drugiego bloku PD-FL. Algorytm składowy PD-FL pokazuje rys. 4.



Rys. 3. Struktura użytego rozmytego algorytmu sterowania napędami linii wytłaczarkowej.



Rys. 4. Struktura składowego algorytmu PD-FL.

Algorytm regulatora rozmytego zrealizowano wykorzystując rozmywanie wszystkich wielkości do 7-miu zbiorów, podczas wnioskowania wykorzystując operatory logiki nieostrej opisane przez Zadeh'a zaś wyostrzając wielkość sterującą przy pomocy metody środka ciężkości powierzchni decyzyjnej.

Pomimo prostoty algorytm taki wykazuje znaczną skuteczność i odporność na zmiany właściwości obiektu sterowania [3,4].

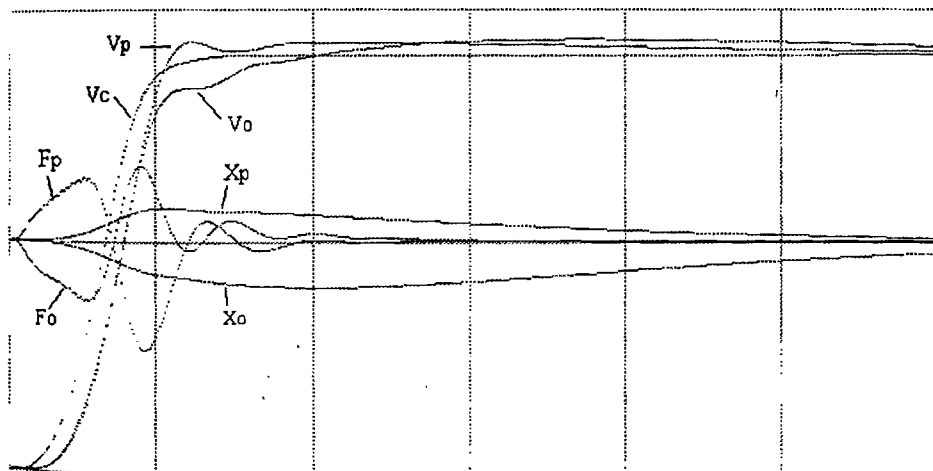
Podczas badań symulacyjnych porównywano skuteczność - wyrażoną zmiennością napięcia w przewodzie oraz dopuszczalną szybkością rozpędzania linii - zastosowania do

regulacji położenia masy napinającej klasycznego algorytmu PID i opisanego algorytmu rozmytego.

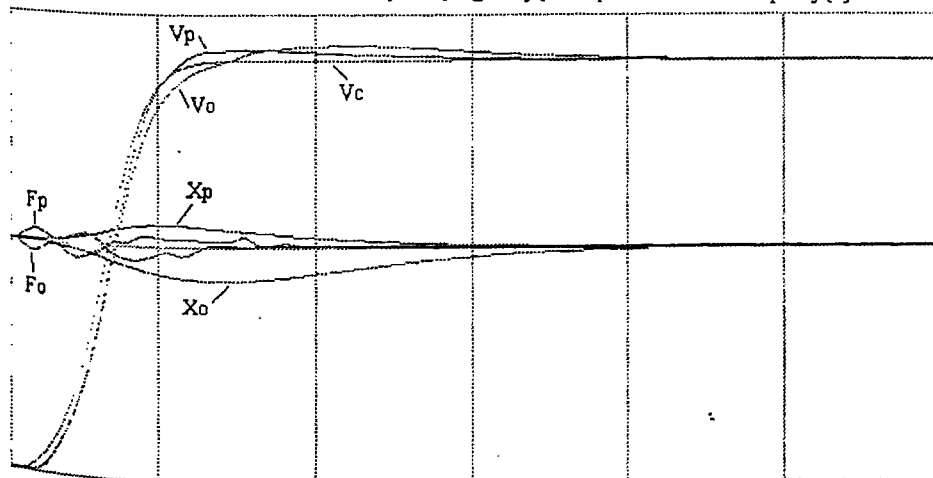
## 5. BADANIA UKŁADÓW STEROWANIA NAPĘDAMI LINII WYTŁACZARKOWEJ

Aby ocenić możliwość zastosowania algorytmów rozmytych do sterowania napędami linii wytłaczarkowej napisany został w języku TurboC program modelujący proces przewijania przewodu w linii o konfiguracji pokazanej na rysunku 1. Przy pomocy symulacji komputerowych badano zastosowanie do regulacji prędkości położenia ( $x_p$ ,  $x_o$ ) mas napinających przewód kalsycznego algorytmu PID oraz pokazanego na rysunku 3 algorytmu rozmytego.

Wyniki symulacji pierwszych 1,5 sekundy rozruchu linii od stanu zatrzymania do prędkości ustalonej 3 m/sek, z pełnym bębnem podającym i pustym bębnem odbierającym pokazano na rysunkach 5 oraz 6.



Rys.5. Proces rozruchu linii z klasyczną regulacją PID położenia mas napinających.



Rys.6. Proces rozruchu linii z rozmytą regulacją PID położenia mas napinających.

## 6. WNIOSKI

Badania symulacyjne pokazały, że stosując nawet bardzo prosty algorytm rozmytego sterowania napędami linii wytłaczarkowej można uzyskać znaczną poprawę jakości regulacji.

Przy tej samej szybkości rozruchu linii zastosowanie regulatorów rozmytych do stabilizacji położenia obu mas napinających przewód spowodowało kilkukrotne zmniejszenie maksymalnych naprężeń rozciągających przeciągany przewód oraz mniej więcej dwukrotnie szybsze sprowadzenie mas napinających do położenia początkowego.

Jednak niezaprzeczną zaletą klasycznego regulatora PID jest to, że można go znacznie łatwiej – porównaniu z algorytmem rozmytym – nastroić, zaś naprężenia w przewodzie można ograniczyć spowalniając rozruch linii.

Wydaje się jednak, że zastosowanie w konstrukcji regulatorów napędu silników linii wytłaczarkowej algorytmów rozmytych może w wielu wypadkach podnieść jakość sterowania.

## LITERATURA

- [1] Broel-Plater B.: Optymalizacja sterowania procesem wytłaczania, POLIMERY, nr 6/42, 1997, str. 386-397
- [2] Broel-Plater B., Domek S.: A control system to stabilize the quality of electrical insulation coatings extruded on wires over a wide range of productivity variations, Kautschuk-Gummi-Kunststoffe, nr 3, 1996, str. 186-193
- [3] Broel-Plater B., Kalisiak S.: Fuzzy-logic control for switched reluctance motor, Proc. Of First International Symposium on Mathematical Models and Robotics, Międzyzdroje, Poland, September 1994, pp. 159-164
- [4] Broel-Plater B., Kalisiak S.: Simulation tests of a fuzzy-logic controlled switched reluctance motor, Proc. 3<sup>rd</sup> International Scientific and Technical Conference on Unconventional Electromechanical and Electrical Systems, Alushta, Ukraine, September 1997, pp. 821-825
- [5] Menges G., Michali W., Kunze B., Haupt M.: Prozessregelungskonzepte in der Extrusion, Kunststoffe, 1988, str. 933-941
- [6] Menges G., Recker H.: „Automatisierung in der Kunststoffverarbeitung”, Carl Hanser Verlag, Munchen - Wien, 1986
- [7] Sikora R.: „Przetwórstwo tworzyw wielkocząsteczkowych”, Wydawnictwo Edukacyjne ŻAK, Warszawa, 1993
- [8] White D.H., Schott N.R.: Dynamic Testing of Plastic Extrusion System, 30<sup>th</sup> Annual Technical Conference, Soc. Of Plastic Eng., Chicago, 1972

Niniejsza praca finansowana była w ramach projektu badawczego KBN8T11 029 15