

BOGDAN BROEL-PLATER¹⁾, JANUSZ W. SIKORA²⁾

Proces wytłaczania jako obiekt sterowania automatycznego^{*)}

EXTRUSION PROCESS AS AN AUTOMATIC CONTROL OBJECT

Summary — On the example of technological line for covering thermoplastic insulation on an electric wire, the tasks that an automatic system to control such a line must fulfill are presented. On this basis two sub-systems are distinguished. One of them is designed to control the properties of the processed plastic *via* influencing the processes taking place within the plastifying system and extruder head. The other one is designed to control the product displacement along the extruder line, *i.e.* the processes taking place outside the extruder. In the control systems currently used for extrusion the above mentioned systems operate independently. The quality of an extrudate can be improved if both systems are cooperating in that the temperature set-point values at extruder zones are dependent on plastic flow intensity correlated with the rate of extrusion. Creating such a system requires a computer-based control. The solution preceding such a system creation can be the use of specialized programmed controllers. The quality of extrudate can also be improved by the algorithms based on artificial intelligence using, first of all fuzzy logic, to control the extruder line. Fuzzy logic based control algorithms can be applied to both multidimensional control of properties of the processed plastic and complex control of product displacement along the extruder line. In order to illustrate the fuzzy logic based control algorithms use, the results of computer simulated product displacement along the extruder line are depicted. As a result of using fuzzy logic control, a substantial improvement of the quality of product displacement process has been achieved which manifests itself in lowering the plastic tensile stress and limitation of tightening compensators shifting and, at the same time, increase in the line rate of starting and stopping.

Key words: extrusion, automatic control, plastifying system, extruder head, extrudate displacement outside the extruder.

Podstawowym elementem linii technologicznej wytłaczania jest wytłaczarka z układem uplastyczniającym, w którym tworzywo zostaje uplastyczniane, a więc nagrzane, sprężane, homogenizowane oraz transportowane [1]. Wstępne nadanie wytworowi kształtu i wymiarów odbywa się w sposób ciągły w dyszy głowicy wytłaczarskiej. Jednak, aby wytłoczyna zachowała — do chwili aż tworzywo ulegnie zestaleniu — nadany kształt i wymiary, jest konieczne skoordynowanie działania wytłaczarki i urządzeń odbierających wytłoczynę. Koordynację taką zapewniają układy sterowania, a od skuteczności ich pracy zależy jakość wytworu [2, 3]. Ponie-

waż jakość może zależeć także od wydajności wytłaczania, dlatego kolejnym zadaniem układów sterowania powinno być utrzymywanie warunków wytłaczania odpowiednich do aktualnej wydajności wytłaczania [2—4].

Ścinanie tworzywa, występujące podczas jego uplastyczniania, intensyfikuje zachodzące w tworzywie procesy fizykochemiczne i prowadzi do nieodwracalnych zmian jego właściwości, mogąc pogarszać jakość uzyskiwanej wytłoczyny [1, 3—5].

Na jakość wytłoczyny wpływa także ciśnienie i lepkość tworzywa w układzie uplastyczniającym, albowiem właśnie od tych czynników zależy np. struktura, chropowatość powierzchni, bądź też ciągliwość wytłoczyny. Ciśnienie oraz lepkość tworzywa, jak również jego degradacja mechaniczna i cieplna zależą z kolei od warunków kinematycznych, dynamicznych i cieplnych, w jakich tworzywo przebywało w wytłaczarce i w głowicy wytłaczarskiej. W przypadku wytłaczarek konwencjonalnych na warunki te można w praktyce wpływać poprzez sterowanie — odpowiednio do wydajności wytłaczania —

¹⁾ Politechnika Szczecińska, Instytut Automatyki Przemysłowej, ul. 26 Kwietnia 10, 71-126 Szczecin, e-mail: Bogdan.Broel-Plater@ps.pl

²⁾ Politechnika Lubelska, Katedra Procesów Polimerowych, ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin, e-mail: jsikora@irchimedes.pol.lublin.pl

^{*)} Wykład wygłoszony w ramach VIII Profesorskich Warsztatów Naukowych „Przetwórstwo tworzyw polimerowych”, Darłowo, 9—11 czerwca 2003 r.

zarówno temperaturą stref grzejnych cylindra i głowicy wytłaczarskiej [1—4], jak i prędkością ślimaka [1, 3, 4].

Dodatkowych możliwości wpływania na jakość wytłoczyny oraz natężenie przepływu dostarczają wytłaczarki o konstrukcji pozwalającej na ciągłe i niezależne mechaniczne zmiany cech konstrukcyjnych układu uplastyczniającego, przede wszystkim cylindra, jednak ich użytkowanie wymaga opracowania nowych rozwiązań układów sterowania automatycznego.

W niniejszym artykule przedstawiamy wybrane problemy związane ze sterowaniem automatycznym procesem wytłaczania. Omówimy w nim sterowanie zarówno wytłaczarką konwencjonalną, jak i wytłaczarką z aktywną strefą rowkowaną, o układzie uplastyczniającym, którego elementy geometryczne mogą być zmieniane w toku trwania procesu wytłaczania [6, 7].

STRUKTURA UKŁADU STEROWANIA PROCESEM WYTŁACZANIA

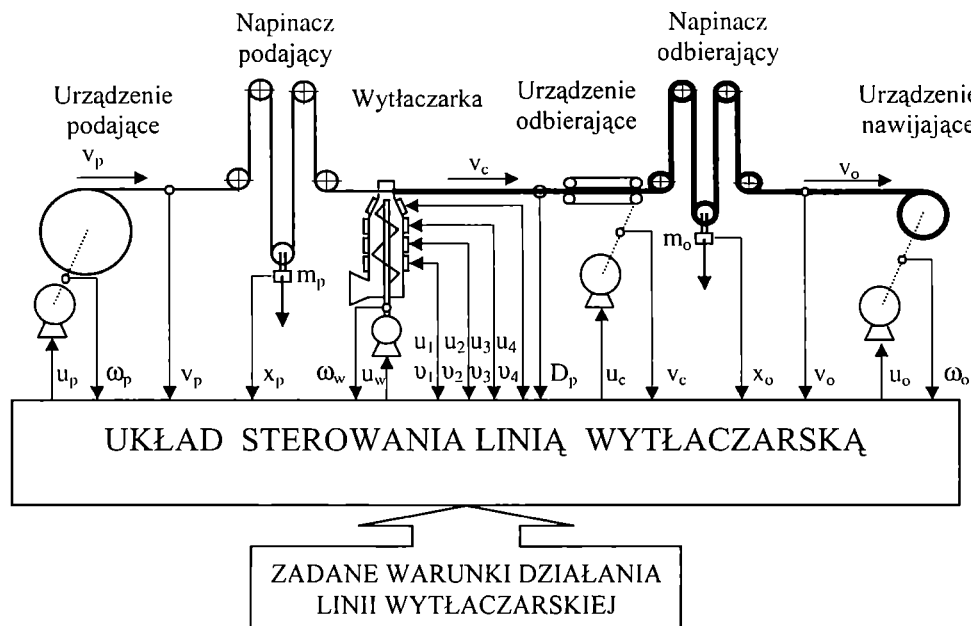
Sposób sterowania linią wytłaczarską zależy zarówno od jej budowy, jak i od zastosowanej odmiany proce-

su wytłaczania (wytłaczanie konwencjonalne, wytłaczanie porujące, współwytłaczanie, wytłaczanie powlekające, wytłaczanie z rozdmuchiowaniem i inne), prawidłowe zaś sterowanie linią wytłaczarską powinno zapewniać uzyskiwanie z wymaganą wydajnością wytłoczyny o żądanej jakości [1—3].

Aby przedstawić problemy związane ze sterowaniem automatycznym linią wytłaczarską, zilustrujemy je tu na przykładzie wytłaczania powlekającego [1], sterowanie bowiem takim procesem wymaga rozwiązania szczególnie dużej liczby problemów związanych z prawidłowym działaniem linii wytłaczarskiej.

W skład — pokazanej na rys. 1 — typowej linii technologicznej wytłaczania powlekającego zastosowanej do nakładania warstwy izolacji z tworzywa termoplastycznego na przewód elektryczny wchodzi:

- urządzenie podające przewód,
- wytłaczarka,
- poprzeczna (krzyżowa) głowica wytłaczarska,
- urządzenia napinające przewód oraz kabel,
- urządzenie odbierające kabel,
- urządzenie nawijające kabel,



Rys. 1. Linia technologiczna wytłaczania powlekającego: u_p — sygnał sterujący prędkością podawania przewodu; ω_p — prędkość obrotowa szpuli podającej; v_p — prędkość podawania przewodu; x_p — położenie napinacza podającego; ω_w — prędkość obrotowa ślimaka wytłaczarki; u_w — sygnał sterujący prędkością ślimaka wytłaczarki; u_1, u_2, u_3, u_4 — sygnały sterujące temperaturą stref wytłaczarki; v_1, v_2, v_3, v_4 — temperatura stref wytłaczarki; D_p — zmierzona średnica wyprodukowanego kabla; u_c — sygnał sterujący prędkością wytłaczania kabla; v_c — prędkość wytłaczania kabla; x_o — położenie napinacza odbierającego; v_o — prędkość nawijania kabla; u_o — sygnał sterujący prędkością nawijania kabla; ω_o — prędkość obrotowa szpuli nawijającej; m_p oraz m_o — masy napinające

Fig. 1. Technological line for coating extrusion: u_p — signal controlling the wire feeding speed; ω_p — frequency of the feed reel rotation; v_p — wire feeding speed; x_p — position of the feed stretcher; ω_w — frequency of the extruder screw rotation; u_w — signal controlling the extruder screw speed; u_1, u_2, u_3, u_4 — signals controlling the extruder zones temperatures; v_1, v_2, v_3, v_4 — extruder zones temperatures; D_p — measured diameter of the cable produced; u_c — signal controlling the cable extrusion speed; v_c — cable extrusion speed; x_o — position of the take-up stretcher; v_o — cable winding speed; u_o — signal controlling the cable winding; ω_o — frequency of the winding reel rotation, m_p and m_o — stretching masses

leży właściwie uplastycznic w układzie uplastyczniającym wyltaczarki, który powinien — z jak najmniejszym pogorszeniem właściwości użytkowych tworzywa — doprowadzić je do zadanej temperatury, właściwego ciśnienia, należytego stopnia ujednorodnienia oraz stosownej prędkości ruchu z odpowiednim natężeniem przepływu. Odchylenia temperatury i natężenia przepływu tworzywa powinny zawierać się w określonych dopuszczalnych granicach wyznaczonych przez amplitudy fluktuacji temperatury oraz pulsacji natężenia przepływu [1, 3, 4].

Uzyskanie takiego stanu tworzywa wiąże się z doprowadzeniem do układu uplastyczniającego odpowiedniej ilości energii cieplnej i mechanicznej [1, 2]. W tym celu wyltaczarka jest wyposażona w silnik napędowy, strefy grzejne, ewentualnie wentylatory lub chłodnice wodne, którymi trzeba w odpowiedni sposób sterować.

Wyltaczarka konwencjonalna, ze względu na zachodzące w niej zjawiska reologiczne, cieplne, tribologiczne i kinematyczne, musi być rozpatrywana jako miejsce występowania wpływających na siebie dwóch typów procesów [3, 4]:

— procesu cieplnego, wielowymiarowego i powolnego, o złożonej charakterystyce statycznej i dynamicznej, poddanego oddziaływaniu intensywnych zakłóceń o niezerowej wartości średniej zależnej od właściwości tworzywa i prędkości ślimaka wyltaczarki;

— procesu przemieszczania tworzywa wewnątrz wyltaczarki z natężeniem zależnym od prędkości ślimaka oraz od właściwości wytłaczanego tworzywa, przy czym na właściwości te można wpływać poprzez proces cieplny w wyltaczarcie.

Podczas wytłaczania tworzywa jednym ze źródeł dostarczanej mu energii cieplnej jest tarcie, rozpraszające w tworzywie energię mechaniczną przekazywaną przez ślimak wykonujący ruch obrotowy. Energię cieplną można dostarczyć tworzywu także wskutek przeniesienia ciepła od grzejników elektrycznych umieszczonych na cylindrze wyltaczarki. Ponadto, w przetwarzanym tworzywie następuje przemiana fazowa oraz mogą przebiegać reakcje chemiczne zarówno endo-, jak i egzotermiczne wpływające na jego temperaturę [8].

Różne ilości wydzielającego się w tworzywie ciepła — wywołane zmianami prędkości ślimaka — powodują zmiany temperatury materiału oraz wpływają na jego właściwości. Dlatego też jest to jeden z podstawowych czynników decydujących o jakości otrzymywanej wyltaczarki [1, 3, 4, 8].

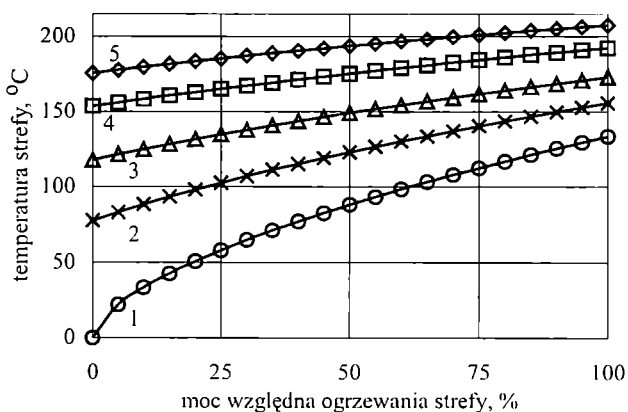
Minimalizacja wpływu zmian prędkości ślimaka wyltaczarki na jakość uzyskiwanej wyltaczarki powinna być jednym z podstawowych zadań każdego układu sterowania wyltaczarką [3, 4].

Niezbędnym warunkiem prawidłowego przebiegu wytłaczania jest to, aby temperatura tworzywa zmieniała się w zadany sposób wzdłuż układu uplastyczniającego i głowicy wyltaczarskiej [1, 2, 8]. Energia cieplna

powstająca w wyniku tarcia wywołanego ruchem obrotowym ślimaka może jedynie podwyższać temperaturę tworzywa, a tylko dzięki wymianie ciepła pomiędzy tworzywem i stykającymi się z nim powierzchniami cylindra i ślimaka wyltaczarki jest możliwe zarówno obniżanie, jak i podwyższanie tej temperatury. Dlatego też podstawowy sposób wpływania na temperaturę tworzywa znajdującego się wewnątrz wyltaczarki, a tym samym na właściwości otrzymywanej wyltaczarki, stanowi oddziaływanie na temperaturę powierzchni cylindra wyltaczarki i głowicy poprzez zastosowanie grzejników nagrzewających i, ewentualnie, wentylatorów ochładzających wybrane powierzchnie wyltaczarki [1—4, 8, 9].

Uzyskanie dużej dokładności sterowania temperaturą stref grzejnych wyltaczarki wymaga uwzględnienia nieliniowych właściwości statycznych i dynamicznych tych stref [3], strefy wyltaczarki mają bowiem różne szybkości nagrzewania i ochładzania oraz charakterystyki statyczne zależne od rodzaju przetwarzanego tworzywa, a także od natężenia jego przepływu w układzie uplastyczniającym.

Kształt rodziny statycznych charakterystyk strefy grzejnej wyltaczarki oraz dynamiczne charakterystyki tej strefy ilustrują, odpowiednio, rys. 3 i 4.

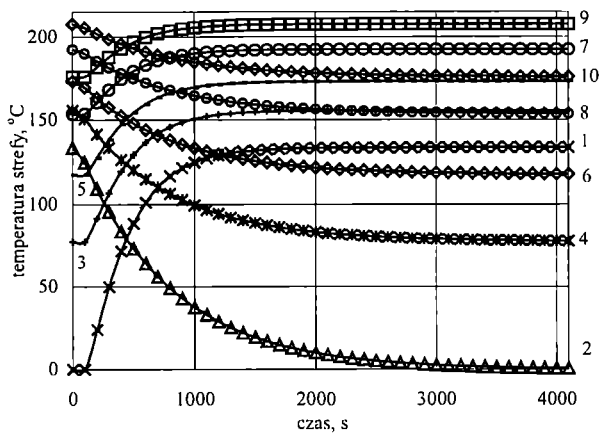


Rys. 3. Rodzina statycznych charakterystyk strefy grzejnej wyltaczarki; względna prędkość ślimaka wyltaczarki, w , wynosi: 1 — 0,0; 2 — 0,25; 3 — 0,50; 4 — 0,75; 5 — 1,0

Fig. 3. Family of static characteristic of the extruder heating zone; w — relative extruder screw speed equal: 1 — 0.0, 2 — 0.25, 3 — 0.50, 4 — 0.75, 5 — 1.0

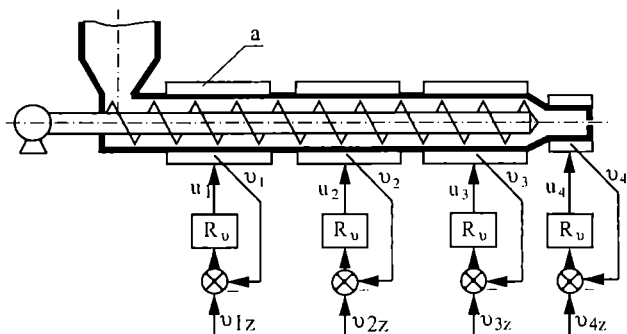
Właściwości stref grzejno-chłodzących są znacznie bardziej skomplikowane, a ich charakterystyki regulacyjne zależą także od konstrukcji układu chłodzącego i sposobu sterowania jego działaniem.

Powszechnie do sterowania temperaturą stref grzejnych wyltaczarki są stosowane przedstawione na rys. 5 zespoły uniwersalnych autonomicznych, jednokanałowych regulatorów temperatury [2, 10—12]. Wykorzystywane przez nie typowe algorytmy sterowania proporcjonalno-całkująco-różniczkującego (PID) nie pozwalają



Rys. 4. Rodzina dynamicznych charakterystyk strefy grzejnej wylaczkarki (przebieg procesu nagrzewania i ochładzania strefy tej wylaczkarki) zależnych od względnej prędkości ślimaka wylaczkarki, w , wynoszącej: 1, 2 — 0,0; 3, 4 — 0,25; 5, 6 — 0,5; 7, 8 — 0,75; 9, 10 — 1,0

Fig. 4. Family of dynamic characteristic of the extruder heating zone (the course of the heating and cooling this zone processes) dependently on relative speed of extruder screw, w : 1, 2 — 0.0; 3, 4 — 0.25; 5, 6 — 0.5; 7, 8 — 0.75; 9, 10 — 1.0

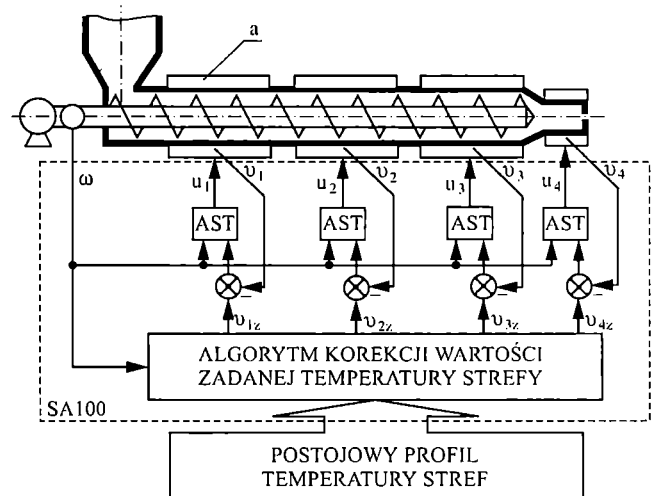


Rys. 5. Struktura typowego układu regulacji temperatury stref grzejnych wylaczkarki: a — grzejnik strefy wylaczkarki, R_v — autonomiczny jednokanałowy regulator temperatury, pozostałe oznaczenia jak na rys. 1 i 2

Fig. 5. Structure of the typical temperature control system for extruder heating zones a — extruder zone heater, R_v — autonomous single channel temperature control unit, other designations as in Fig. 1 and 2

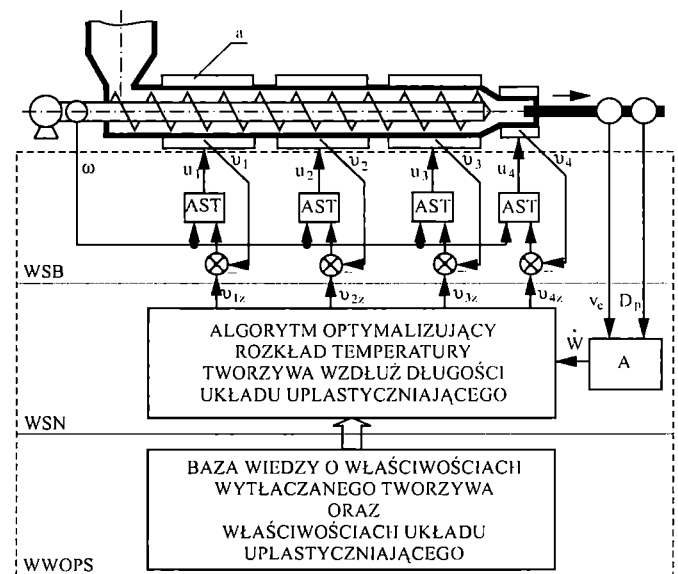
jednak na zbudowanie układu regulacji, który w swoim działaniu uwzględni złożone właściwości cieplne stref i tym samym umożliwi uzyskanie żądanej jakości sterowania. Jakość sterowania temperaturą stref grzejnych wylaczkarki można poprawić stosując specjalizowane autonomiczne regulatory temperatury [13] lub układ sterowania wykorzystujący specjalizowany sterownik programowalny SA100 (rys. 6).

Jednak istotnej poprawy efektywności sterowania temperaturą stref grzejnych wylaczkarki można oczekiwać dopiero wówczas, gdy zostanie zastosowany komputerowy układ wielowarstwowego sterowania hierarchicznego, na przykład o strukturze przedstawionej na



Rys. 6. Struktura układu regulacji temperatury stref grzejnych wylaczkarki wykorzystującego specjalizowany sterownik programowalny SA100; AST — algorytm sterowania temperaturą pojedynczej strefy wylaczkarki, pozostałe oznaczenia jak na rys. 1, 2 i 5 [14, 15]

Fig. 6. Structure of the temperature control system for extruder heating zones with the specialized programmable controller SA100; AST — temperature control algorithm for a single extruder zone, other designations as in Fig. 1, 2 and 5 [14, 15]



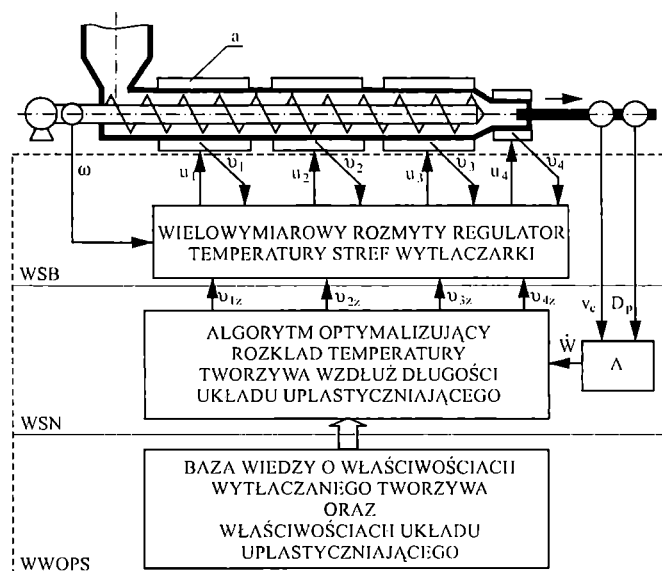
Rys. 7. Struktura kompleksowego hierarchicznego układu sterowania temperaturą stref grzejnych wylaczkarki z niezależnymi algorytmami sterowania: A — algorytm obliczający natężenie przepływu tworzywa \dot{W} , WSB — warstwa sterowania bezpośredniego, WSN — warstwa sterowania nadrzędnego, WWOPS — warstwa wiedzy o procesie sterowanym, pozostałe oznaczenia jak na rys. 1, 2, 5 i 6

Fig. 7. Structure of the complex hierarchical temperature control system for extruder heating zones with independent control algorithms; A — algorithm computing the polymer flow rate \dot{W} , WSB — direct control layer, WSN — superordinated control layers, WWOPS — control process knowledge layer; other designations as in Fig. 1, 2, 5 and 6

rys. 7. Pokazana na tym rysunku warstwa wiedzy o procesie sterowanym zawiera charakterystyki opisujące wpływ temperatury na właściwości użytkowe tworzywa wytłaczanego oraz charakterystyki układu uplastyczniającego wytłaczarki [3, 4].

Zadaniem warstwy sterowania nadrzędnego jest wyznaczanie rozkładu temperatury tworzywa wzdłuż długości układu uplastyczniającego, dostosowanego do aktualnego natężenia przepływu tworzywa, oraz wartości zadanej temperatury poszczególnych stref grzejnych wytłaczarki. Algorytm wykonywanych obliczeń dotyczących układu sterowania opisano szczegółowo w [3].

Stabilizację temperatury stref grzejnych wytłaczarki uzyskuje się stosując regulatory warstwy sterowania bezpośredniego, w której mogą działać niezależne algorytmy sterowania (rys. 7), jednak dopiero zastosowanie wielowymiarowego algorytmu sterowania rozmytego (rys. 8) pozwala na uzyskanie bardzo dużej dokładności stabilizacji temperatury tych stref.



Rys. 8. Struktura kompleksowego hierarchicznego układu sterowania temperaturą stref grzejnych wytłaczarki z wielowymiarowym algorytmem sterowania rozmytego; oznaczenia jak na rys. 1, 2, 6 i 7 [16, 17]

Fig. 8. Structure of the complex hierarchical temperature control system for extruder heating zones with multidimensional fuzzy logic control algorithm; other designations as in Fig. 1, 2, 6 and 7 [16, 17]

Jednak w każdym przypadku skutki szybkozmiennego zakłócającego oddziaływania ciepła generowanego wskutek tarcia tworzywa należy kompensować za pomocą znacznie powolniejszego sterowania temperaturą stref grzejnych. Dlatego też optymalizacji w układzie sterowania może podlegać przede wszystkim stan wytłaczania nazwanego umownie ustalonym — będący podstawowym stanem działania wytłaczarki. Problemy takiej optymalizacji zostały już opisane w [3, 4].

STEROWANIE PROCESAMI ZACHODZĄCYMI POZA WYTŁACZARKĄ

Otrzymywana wytłoczyna musi mieć przekrój poprzeczny o żądanym kształcie i wymiarach. Kształt wstępny przekroju poprzecznego wytłoczyny określa dysza głowicy wytłaczarskiej, natomiast kształt i wymiary ostateczne wytłoczyna uzyskuje w kalibratorze. Wymiary poprzeczne wytłoczyny zależą jednak także od stosunku natężenia przepływu tworzywa i prędkości wytłaczania w chwili gdy powstaje wytłoczyna [1—3]. Utrzymywanie stałej, niezależnej od prędkości wytłaczania wartości tego stosunku jest zadaniem realizowanym przez układ sterowania wymiarami wytłoczyny.

Aby wytłoczyna zachowała nadane w dyszy kształt i wymiary jest także konieczne utrzymywanie do chwili zestalenia tworzywa wzdłużnego naprężenia rozciągającego o odpowiedniej wartości. Zadanie to spełnia układ stabilizacji naprężenia.

Sterowanie wymiarami wytłoczyny

Automatyczne utrzymywanie stałych wymiarów wytłoczyny, np. średnicy wytwarzanego kabla, wymaga ciągłego lub dostatecznie często powtarzanego pomiaru. Jednak ze względu na efekt Barusa, a więc na zmianę wymiarów poprzecznych wytłoczyny opuszczającej dyszę głowicy wytłaczarskiej [1, 8], pomiaru średnicy kabla wykonuje się w pewnej odległości od dyszy wytłaczarskiej [2, 3]. Dlatego też zmierzona i wykorzystywana do sterowania w chwili t_p średnica kabla zależy od warunków powstawania wytłoczyny, na przykład stosunku natężenia przepływu tworzywa i prędkości wytłaczania panujących wcześniej, tzn. w chwili $(t_p - \tau_p)$, a wartość opóźnienia τ_p jest zmienna w szerokich granicach i zależy od prędkości wytłaczania v_c oraz odległości l_p pomiędzy głowicą a miernikiem wymiarów wytłoczyny [4]:

$$l_p = \int_{t_p - \tau_p}^{t_p} v_c(t) dt \quad (1)$$

Sterowanie obiektem ze zmiennym opóźnieniem τ_p wymaga zastosowania specjalnych układów sterowania [4].

Wytwarzaną w chwili t_w średnicę zewnętrzną $D(t_w)$ otrzymywanego kabla można wyznaczyć z następującego równania:

$$D(t_w) = \sqrt{D_0^2 + \frac{W(t_w)}{v_c(t_w)}} \quad (2)$$

gdzie: D_0 — średnica zewnętrzna przewodu pokrywanego izolacją, W — natężenie objętościowe przepływu tworzywa.

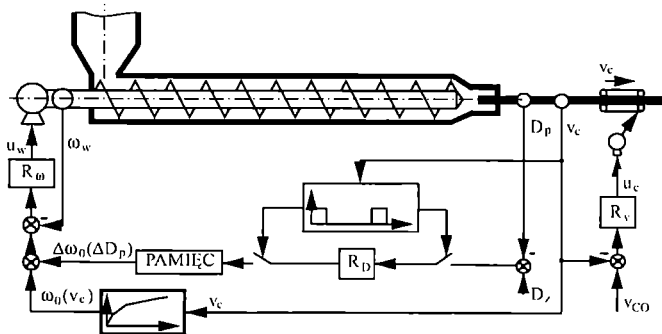
Natężenie przepływu tworzywa w wytłaczarce konwencjonalnej o stałych cechach konstrukcyjnych układu uplastyczniającego zależy przede wszystkim od prędkości

kości ślimaka wylączarki oraz od rozkładu temperatury tworzywa wzdłuż długości układu uplastyczniającego.

Ponieważ zmiany rozkładu temperatury tworzywa wzdłuż długości układu uplastyczniającego są wykorzystywane do sterowania jakością tworzywa [1, 3, 4], dlatego też na natężenie przepływu tworzywa można wpływać jedynie poprzez zmianę prędkości ślimaka. Natężenie przepływu tworzywa w wylączarkach o konstrukcji pozwalającej na ciągłą i niezależną zmianę cech konstrukcyjnych układu uplastyczniającego zależy także od aktualnych właściwości tego układu [18].

Z uwzględnieniem powyższych ograniczeń, do stabilizacji wymiarów poprzecznych wylączarki jest konieczne, zgodnie ze wzorem (2), skoordynowanie prędkości ślimaka wylączarki z prędkością wylączania kabla. Zakres wartości prędkości wylączania kabla może być bardzo szeroki ze względu na konieczność stabilizacji średnicy kabla także podczas rozruchu i zatrzymywania linii technologicznej.

W układzie pomiaru średnicy kabla występuje zmienne opóźnienie pomiarowe o wartości określonej równaniem (1). Wpływ tego opóźnienia można wyeliminować poprzez zastosowanie pokazanego na rys. 9 układu regulacji kaskadowej.



Rys. 9. Układ regulacji kaskadowej stabilizujący wymiary wylączarki: R_D — korekcyjny regulator impulsowy, R_v — regulator stabilizujący prędkość wylączania, R_ω — regulator stabilizujący prędkość ślimaka, pozostałe oznaczenia jak na rys. 1 [3]

Fig. 9. Cascade control system stabilizing the extrudate dimensions; R_D — impulse correction control unit, R_v — control unit stabilizing the extrusion speed, R_ω — control unit stabilizing the screw speed, other designations as in Fig. 1 [3]

W pętli zewnętrznej układu zastosowano korekcyjny regulator impulsowy, którego czas impulsowania powinien być większy od opóźnienia, a wartość tego czasu zależy od prędkości wylączania. Pomiedzy chwilami zadziałania regulatora pętli zewnętrznej omawianego układu regulator pętli wewnętrznej utrzymuje stałą prędkość ślimaka wylączarki. Wartość zadaną tej prędkości określa tzw. statyczna charakterystyka wylączania, czyli zależność pomiedzy prędkością wylączania i prędkością ślimaka wylączarki zapewniająca — w od-

niesieniu do określonego rozkładu temperatury tworzywa wzdłuż długości układu uplastyczniającego — uzyskiwanie wylączarki o wymiarach zbliżonych do zadanych. Jednak ze względu na ograniczoną dokładność takiej charakterystyki oraz zmiany rozkładu temperatury (wykorzystywane do sterowania jakością tworzywa) utrzymanie stałych wymiarów wylączarki odbywa się w wyniku dodania poprawek do wartości zadanej prędkości ślimaka wyznaczonej z charakterystyki. Wartość tych poprawek określa się za pomocą korekcyjnego regulatora pętli zewnętrznej. Istotną zaletę opisanego układu stanowi to, że jeśli zmiany wydajności linii są dostatecznie powolne, to może on utrzymywać stałe wymiary wylączarki także wtedy, gdy postać statycznej charakterystyki wylączania nie jest znana.

Ponieważ duże zmiany wydajności linii wylączarki (np. jej rozruch lub zatrzymywanie) występują stosunkowo rzadko, zatem o skuteczności stabilizacji średnicy zewnętrznej przewodu decydują algorytmy stabilizacji prędkości wylączania kabla i prędkości ślimaka wylączarki.

Dotychczas stosowane do sterowania napędami urządzeń linii wylączarki standardowe regulatory prędkości obrotowej wykorzystują typowe algorytmy PID [3, 19]. Stosując opisany układ stabilizujący wymiary wylączarki oraz znacznie ograniczając szybkość zmian natężenia przepływu tworzywa podczas rozruchu i zatrzymania linii można — mimo ograniczeń tych regulatorów — uzyskać zadowalającą jakość wylączarki. Znacznie większe możliwości stwarza stosowanie algorytmu sterowania rozmytego [19].

Sterowanie naprężeniem rozciągającym

Aby zachować kształt i wymiar przekroju poprzecznego oraz symetryczność kabla jest konieczne utrzymywanie podczas wylączania i obciskania tworzywa na przewodzie stałego naprężenia rozciągającego σ wytwarzanego wskutek odpowiedniego sterowania następującymi parametrami:

- prędkością podawania przewodu v_p ;
- prędkością wylączania kabla, czyli prędkością powlekania przewodu v_c ;
- prędkością nawijania kabla v_n .

W linii technologicznej wylączania powlekającego pokazanej na rys. 1 naprężenie rozciągające σ wytwarzają dwa napinacze grawitacyjne — podający i odbierający. Pomijając opory przeciągania przewodu przez dyszę wylączarki oraz zakładając, że masa kabla znajdującego się pomiedzy urządzeniem podającym i odbierającym linii technologicznej jest znacznie mniejsza od mas napinających, naprężenie rozciągające σ_p przewodu na odcinku pomiedzy urządzeniem podającym a wylączarką wynosi [19]:

$$\sigma_p = \frac{1}{2} m_p \left(g - \frac{d^2 x_p}{dt^2} \right) \quad (3)$$

gdzie: g — przyspieszenie ziemskie, m_p — masa napinająca napinacza podającego, x_p — położenie masy napinającej.

Położenie masy napinającej określa równanie

$$x_p(t) = \frac{1}{2} \int_0^t (v_p - v_c) dt \quad (4)$$

Aby urządzenie nawijające mogło prawidłowo nawinąć kabel na szpulę należy utrzymywać stałe naprężenie rozciągające σ_o kabla na odcinku pomiędzy wytłaczarką a urządzeniem nawijającym. Wartość tego naprężenia wynosi [19]

$$\sigma_o(t) = \frac{1}{2} m_o \left(g - \frac{d^2 x_o}{dt^2} \right) \quad (5)$$

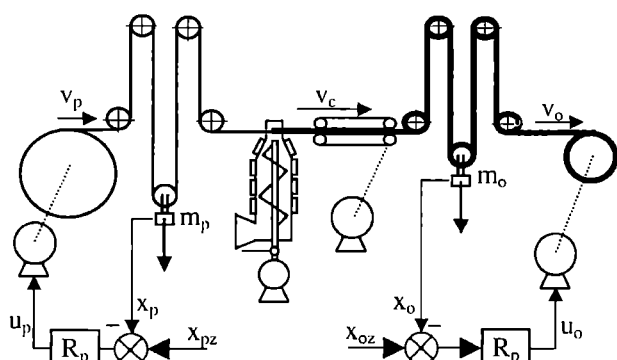
gdzie: m_o — masa napinająca napinacza odbierającego, x_o — położenie masy napinającej.

Położenie x_o określa się zależnością

$$x_o(t) = \frac{1}{2} \int_0^t (v_c - v_o) dt \quad (6)$$

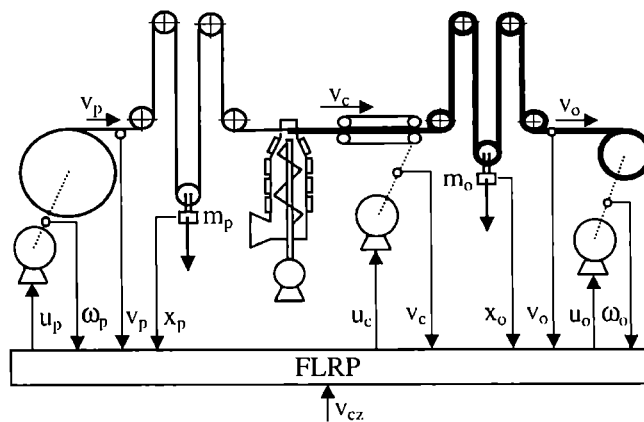
Jednak w przewodzie i kablu można uzyskać stałą wartość naprężenia rozciągającego także wówczas, gdy w odniesieniu do napinacza odbierającego $v_p - v_c = \text{const} \neq 0$, a w odniesieniu do napinacza odbierającego $v_c - v_o = \text{const} \neq 0$. Ponieważ zaś, ze względów konstrukcyjnych zakres dopuszczalnych położenia mas napinających napinaczy jest ograniczony, mianowicie $x_{p \min} \leq x_p \leq x_{p \max}$ oraz $x_{o \min} \leq x_o \leq x_{o \max}$, zatem podczas sterowania naprężeniem rozciągającym należy również uwzględnić położenie odpowiedniego napinacza.

Stosowane dotychczas regulatory PID (rys. 10) nie pozwalają na równoczesne sterowanie naprężeniem rozciągającym przewodu i kabla oraz położeniem masy na-



Rys. 10. Klasyczny układ sterowania procesem przemieszczania wycioru wzdłuż linii wytłaczarskiej: R_p — autonomiczny regulator prędkości obrotowej szpuli; x_{pz} , x_{oz} — zadane neutralne położenie masy napinającej podawacza, odpowiednio, podającego i odbierającego; pozostałe oznaczenia jak na rys. 1

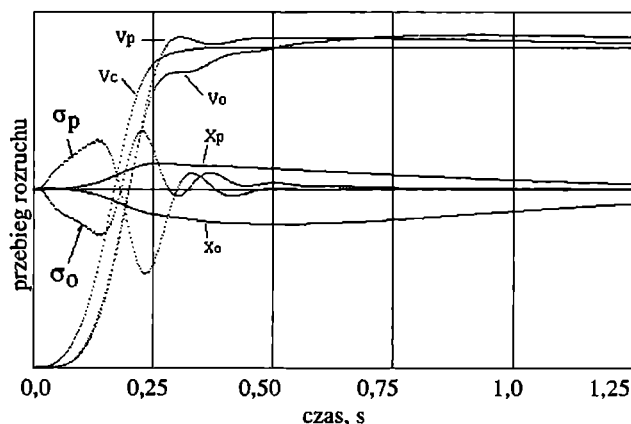
Fig. 10. Classical control system for the process of product displacement along the extruder line: R_p — autonomous control unit for the frequency of the reel rotation; x_{pz} , x_{oz} — set neutral position of the stretching mass of stretcher, feed one and take-up one, respectively, other designations as in Fig. 1



Rys. 11. Rozmyty układ sterowania procesem przemieszczania wycioru wzdłuż linii wytłaczarskiej; FLRP — wielowymiarowy algorytm sterowania rozmytego, pozostałe oznaczenia jak na rys. 1

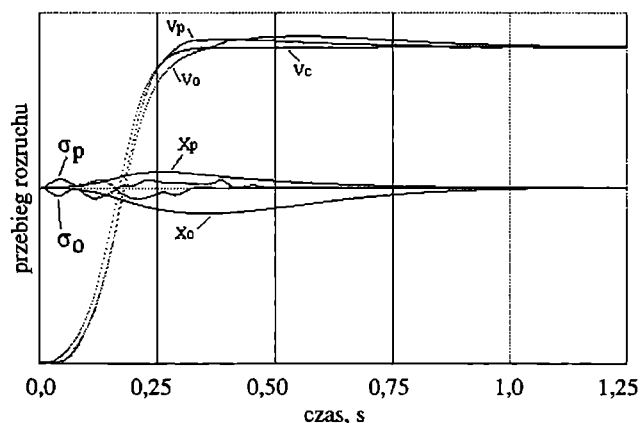
Fig. 11. Fuzzy logic control system for the of product displacement process along the extruder line: FLRP — multidimensional fuzzy logic control algorithm, other designations as in Fig. 1

pinającej. Możliwości takie mają natomiast algorytmy sterowania rozmytego. Wielowymiarowy algorytm sterowania rozmytego, pokazany na rys. 11, uwzględnia równocześnie podczas sterowania nie tylko położenia obu mas napinających, ale także właściwości szpuli, z której odwijany jest przewód, i szpuli, na którą nawijany jest wyprodukowany kabel. Aby zbadać skuteczność działania takiego algorytmu opracowano [19] program komputerowy modelujący proces przemieszczania przewodu i kabla wzdłuż linii wytłaczarskiej, pokazanej na rysunku 1.



Rys. 12. Proces rozruchu linii z klasyczną regulacją PID położenia mas napinających; σ_p — naprężenie rozciągające przewodu, σ_o — naprężenie rozciągające kabla, pozostałe oznaczenia jak na rys. 10

Fig. 12. Line start-up process with classical PID control for stretching masses position σ_p — tensile stress of wire, σ_o — tensile stress of cable, other designations as in Fig. 10



Rys. 13. Proces rozruchu linii z rozmytą regulacją PID położenia mas napinających, oznaczenia jak na rys. 12

Fig. 13. Line start-up process with fuzzy logic PID control for stretching masses position, designations as in Fig. 12

Wyniki symulacji pierwszego okresu (1,25 s) rozruchu linii wylaczarskiej od stanu zatrzymania do osiągnięcia prędkości ustalonej $v_c = 3$ m/s, z pełną szpulą podającą i pustą szpulą nawijającą, pokazano na rys. 12 i 13. Tak więc, stosując algorytm sterowania rozmytego napędami linii wylaczarskiej można uzyskać znaczną poprawę sterowania całą linią wylaczarską. W identycznym sposobie rozruchu takiej linii zastosowanie regulatorów rozmytych do stabilizacji położenia mas napinających przewód i kabel powoduje kilkukrotne zmniejszenie maksymalnych wartości naprężeń rozciągających σ_p przewodu oraz σ_0 kabla, jak również ok. dwukrotnie szybsze sprowadzenie mas napinających do położenia środkowego.

Praca wykonana w ramach projektu badawczego KBN nr 7 T08E 062 20.

LITERATURA

- Sikora R.: „Przetwórstwo tworzyw wielkocząsteczkowych”, Wydawnictwo Edukacyjne, Warszawa 1993, str. 11, 19, 166—169.
- Menges G., Recker H.: „Automatisierung in der Kunststoffverarbeitung”, Carl Hanser Verlag, Monachium—Wiedeń 1986, str. 93—138.
- Broel-Plater B.: „Sterowanie procesem wytłaczania tworzywa sztucznego”, XIII Krajowa Konferencja Automatyki KKA '99, Opole 1999, t. 2., str. 319.
- Broel-Plater B.: *Polimery* 1997, 42, 386.
- Sikora J. W.: *Polimery* 2002, 47, 435.
- Pat. polski 174 068 (1998).
- Pat. polski 174 623 (1998).
- Sikora R.: „Podstawy przetwórstwa tworzyw wielkocząsteczkowych”, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 1992, str. 24—119.
- Rauwendaal C., Noriega M.: „Troubleshooting the Extrusion Process”, Carl Hanser Verlag, Monachium 2001, str. 23.
- Ratajczak Z.: *Polimery* 1993, 38, 306 i 471.
- Skoczowski S.: „Technika regulacji temperatury”, Agenda Wydawnicza PAK, Warszawa—Zielona Góra 2000, str. 89—92.
- Michalski L., Kuźmiński K., Sadowski J.: „Regulacja temperatury urządzeń elektrotermicznych”, WNT, Warszawa 1981.
- Broel-Plater B.: „Mikroprocesorowy regulator temperatury stref grzejnych wylaczarki tworzywa sztucznego”, XI Konferencja „Application of Microprocessors in Automatic Control and Measurement”, Warszawa 1998, t. 2., str. 257.
- Broel-Plater B., Daca W.: „Sterowniki programowalne do przetwórstwa tworzyw sztucznych”, Zeszyty naukowe Politechniki Śląskiej, seria Automatyka z. 136, Gliwice 2002, str. 181.
- Daca W., Broel-Plater B., Małeki B.: „System sterowania procesem przetwórstwa tworzyw sztucznych z wykorzystaniem sterownika programowalnego SA100”, *Pomiary Automatyka Kontrola — Aparatura Przemysłowa* 2000, nr 4, XXIV.
- Broel-Plater B.: „Rozmyte sterowanie procesem wytłaczania tworzywa sztucznego” w pracy zbiorowej „Metody sztucznej inteligencji w automatyzacji procesów” (red. Bukowski L. A.), Instytut Automatyki Wydziału Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej Politechniki Krakowskiej, Kraków 2000, str. 9.
- Broel-Plater B., Domek S.: „Zastosowanie regulatora fuzzy-logic do regulacji wielostrefowego obiektu elektrotermicznego”, III Symposium „Symulacja, pomiary i diagnostyka w elektrotermii”, Białystok 1994, str. 61.
- Sikora J. W.: „Studium autotermiczności procesu wytłaczania i strefy rowkowanej wylaczarki”, Wydawnictwa Uczelniane Politechniki Lubelskiej, Lublin 2000, str. 143—166.
- Broel-Plater B.: „Applying fuzzy-logic to control of extrusion line drive”, 4th International Conference on Unconventional Electromechanical and Electrical Systems UEES '99, St. Petersburg (Rosja) 1999, str. 559.