

PAWEŁ STĄCZEK

Politechnika Lubelska  
Wydział Mechaniczny, Katedra Automatykacji  
ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin  
e-mail: p.staczek@pollub.pl

## Zautomatyzowana metoda sekwencyjnego korygowania przebiegu cyklu wtryskiwania tworzyw termoplastycznych

### CZ. II. ROZMYTY ALGORYTM KOREKCJI<sup>\*)</sup>

**Streszczenie** — Przedstawiono jeden z wariantów zautomatyzowanej metody sekwencyjnego nadzorowania w czasie rzeczywistym procesu wtryskiwania tworzyw termoplastycznych, której główne założenia oraz ideę działania zawiera cz. I. (por. [1]). Opisano budowę rozmytych modeli nadzorowanych charakterystyk jakości wypraski, strukturę algorytmu sterującego przebiegiem cyklu wtryskiwania a także metodykę konstruowania reguł rozmytych dla regulatorów korygujących (FLC), realizujących wielokryterialne strategie nadzorowania. Rozmyty wariant opracowanej metody zastosowano do jednoczesnego nadzorowania długości ( $L$ ) oraz wytrzymałości na rozciąganie ( $R_m$ ) znormalizowanej wypraski z PE-LD. Testy doświadczalne wykazały dużą skuteczność zaproponowanej metody — rozproszenie długości ( $\Delta L$ ) znacznie zmalało a jednocześnie nastąpił wzrost średniej wartości wytrzymałości na rozciąganie.

**Słowa kluczowe:** wtryskiwanie, tworzywo termoplastyczne, nadzorowanie, rozmyty algorytm korekcji, sterowanie skurczem i wytrzymałością.

THE AUTOMATED METHOD OF SEQUENTIAL SUPERVISING OF THE CYCLE OF THERMOPLASTIC INJECTION MOLDING. PART II. FUZZY CORRECTION ALGORITHM

**Summary** — Paper presents selected variants of the automated method of real-time sequential supervising of the injection molding process. The foundations of the method were discussed in part I. (see [1]). Fuzzy logic models of supervised moulding's quality characteristics were used in the method described in this paper (Fig. 1 and 2). The structure of the control algorithm is shown as well as the methodology of building the set of fuzzy rules for process correction fuzzy controllers, which are able to perform any multi-criteria supervising strategy (Fig. 3—6). Elaborated method was applied to simultaneous supervising the length and tensile strength of normalized PE-LD molding. Empirical tests proved high efficiency of the method, considerably reducing the distribution of moldings' length deviation and increasing their tensile strength (Fig. 7).

**Key words:** injection molding of thermoplastics, fuzzy correction algorithm, supervision, quality, control of shrinkage and tensile strength.

W cz. I. [1] publikacji przedstawiono ideę opracowanej metody sekwencyjnego nadzorowania cyklu wtryskiwania w czasie rzeczywistym. Przedyskutowano szczegóły technicznej realizacji jednego z wariantów tej metody oraz rezultaty otrzymane w wyniku jego zastosowania. Deterministyczny algorytm decyzyjny (korygujący) opierał się w nim na regresyjnym modelu długości ( $L$ ) albo wytrzymałości ( $R_m$ ) wypraski w funkcji

pięciu głównych zmiennych sterujących wtryskiwaniem [2], mianowicie:

$$\Delta L(\Delta T_f, \Delta T_t, \Delta v_w, \Delta p_d, \Delta t_{ch});$$

$$\Delta R_m(\Delta T_f, \Delta T_t, \Delta v_w, \Delta p_d, \Delta t_{ch})^{1)}$$
(1)

Algorytm ten służy do nadzorowania jednej, wybranej właściwości wypraski. Zastosowanie omawianego wariantu metody do jednoczesnego sterowania większą liczbą właściwości (na przykład według strategii: *zapewnić nominalną długość wypraski z jednoczesną maksymalizacją wytrzymałości*) napotyka na liczne trudności związane z formalnym (analitycznym) zapisem takiego postępowania. Do skutecznej realizacji wielokryterialnych algorytmów niezbędne jest bowiem zdefiniowanie priory-

<sup>\*)</sup> Cz. I. — patrz [1].

<sup>1)</sup>  $T_f$  — temperatura formy,  $T_t$  — temperatura uplastycznionego tworzywa,  $v_w$  — prędkość wtrysku,  $p_d$  — ciśnienie docisku,  $t_{ch}$  — czas chłodzenia.

tetów oraz kompromisów określających np. na ile można pogorszyć daną właściwość wypraski dążąc do poprawienia innej (priorytetowej). Próby rozwiązania podobnych zagadnień przy użyciu różnorodnych metod konstrukcji wielokryterialnych funkcji celu można znaleźć w pracach dotyczących optymalizacji [3–5]. W ramach przeprowadzonych badań własnych opracowano opisaną poniżej oryginalną technikę budowania wielokryterialnych algorytmów decyzyjnych wykorzystującą teorię zbiorów rozmytych.

#### MODELOWANIE DOŚWIADCZALNE A ROZMYTE

Doświadczalne modele długości i wytrzymałości wypraski [2] wykorzystane w deterministycznej wersji opisywanej metody (por. [1]), w sposób oczywisty charakteryzują się pewnym błędem aproksymacji wynikającym z ograniczonej postaci funkcji regresji (wielomianu drugiego stopnia). Można przypuszczać, że wartość błędu będzie tym większa im bardziej wartości zmiennych niezależnych będą oddalone od centralnego punktu modelu. W tych odległych obszarach przestrzeni czynnikowej istotną rolę mogą bowiem odgrywać wieloczynnikowe interakcje zmiennych, które nie ujawniły się na etapie modelowania doświadczalnego. Adekwatność modeli teoretycznie można poprawić na drodze dołączania do wielomianu regresji kolejnych wyrazów (interakcji drugiego i wyższych rzędów) i/lub zwiększania stopnia wielomianu. W takim przypadku jest niezbędna realizacja kolejnych kontrolowanych eksperymentów, co wiąże się z dalszym nakładem czasu i środków.

Alternatywną i pozbawioną wielu niedogodności charakterystycznych dla tak pracochłonnego modelowania eksperymentalnego jest technika modelowania wykorzystująca teorię logiki rozmytej [6]. Skonstruowane przy jej użyciu *modele rozmyte* (lub *lingwistyczne*) składają się ze zbioru prostych reguł opisujących relacje między wartością zmiennej zależnej a kombinacjami wybranych wartości zmiennych wejściowych. Tak zbudowane modele umożliwiają formalny zapis skomplikowanych zależności w wyniku bezpośredniego podania interakcji wyższych rzędów zmiennych niezależnych.

Do konstruowania modeli rozmytych wykorzystuje się najczęściej tzw. *wiedzę ekspercką*, tj. wiedzę technológów, operatorów maszyn a także badaczy, zdobytą dzięki ich intuicji i zdrowemu rozsądkowi — na drodze długotrwałej obserwacji modelowanego obiektu. Wadą modeli rozmytych jest niedokładność („operują” przybliżonymi pojęciami np. mały, średni, duży), a także trudność z pozyskaniem i sformułowaniem kompletnej wiedzy o modelowanych zależnościach.

W niniejszej publikacji zaprezentowano opracowaną technikę modelowania łączącą zalety podejścia eksperymentalnego oraz modelowania rozmytego. Polega ona na konwersji modelu regresji do postaci rozmytej, a następnie wprowadzeniu do tak zbudowanego modelu fragmentarycznej wiedzy eksperckiej formułowanej

jako proste reguły, np. „jeżeli temperatura formy jest wysoka i temperatura tworzywa jest wysoka, i prędkość wtrysku jest duża to wytrzymałość wypraski na rozciąganie jest mała”.

#### MODELE ROZMYTE

Metodykę modelowania oraz kolejne etapy konstruowania modeli rozmytych długości i wytrzymałości wypraski PE-LD [równ. (1)] opisano szczegółowo w pracy [7]. Na rysunku 1 przedstawiono schematycznie strukturę zbudowanego modelu rozmytego długości wypraski, na który składają się między innymi:

- zmienne rozmyte ze zdefiniowanymi wartościami lingwistycznymi (WL) oraz ich funkcjami przynależności;
- reguły rozmyte opisujące relacje między rozmytą zmienną zależną a zmiennymi wejściowymi;
- mechanizm wnioskowania z modelu.

Opracowany model ma pięć rozmytych zmiennych wejściowych oraz jedną rozmytą zmienną zależną. Z liczby zmiennych niezależnych wynika ogólna postać reguł modelu:

$$\text{jeżeli: } \Delta T_f \text{ jest } WL_{1i} \text{ i } \Delta T_t \text{ jest } WL_{2j} \text{ i } \Delta v_w \text{ jest } WL_{3k} \\ \text{ i } \Delta p_d \text{ jest } WL_{4l} \text{ i } \Delta t_{ch} \text{ jest } WL_{5m} \text{ to } \Delta L \text{ jest } WL_{Ln} \quad (2)$$

gdzie:  $WL_{yz}$  — z-owa wartość lingwistyczna y-owej zmiennej niezależnej ( $y = 1 \dots 5$ ),  $WL_{Ln}$  — n-ta WL zmiennej zależnej.

Przy założeniu tej samej liczby WL wszystkich zmiennych wejściowych  $s = 5$  całkowita liczba reguł modelu wynosi  $s^5 = 3125$ .

Analogiczny model zbudowano w odniesieniu do wytrzymałości wypraski  $\Delta R_m$  [por. równ. (1)]. Rysunek 2a prezentuje w sposób graficzny 125 reguł tego modelu postaci:

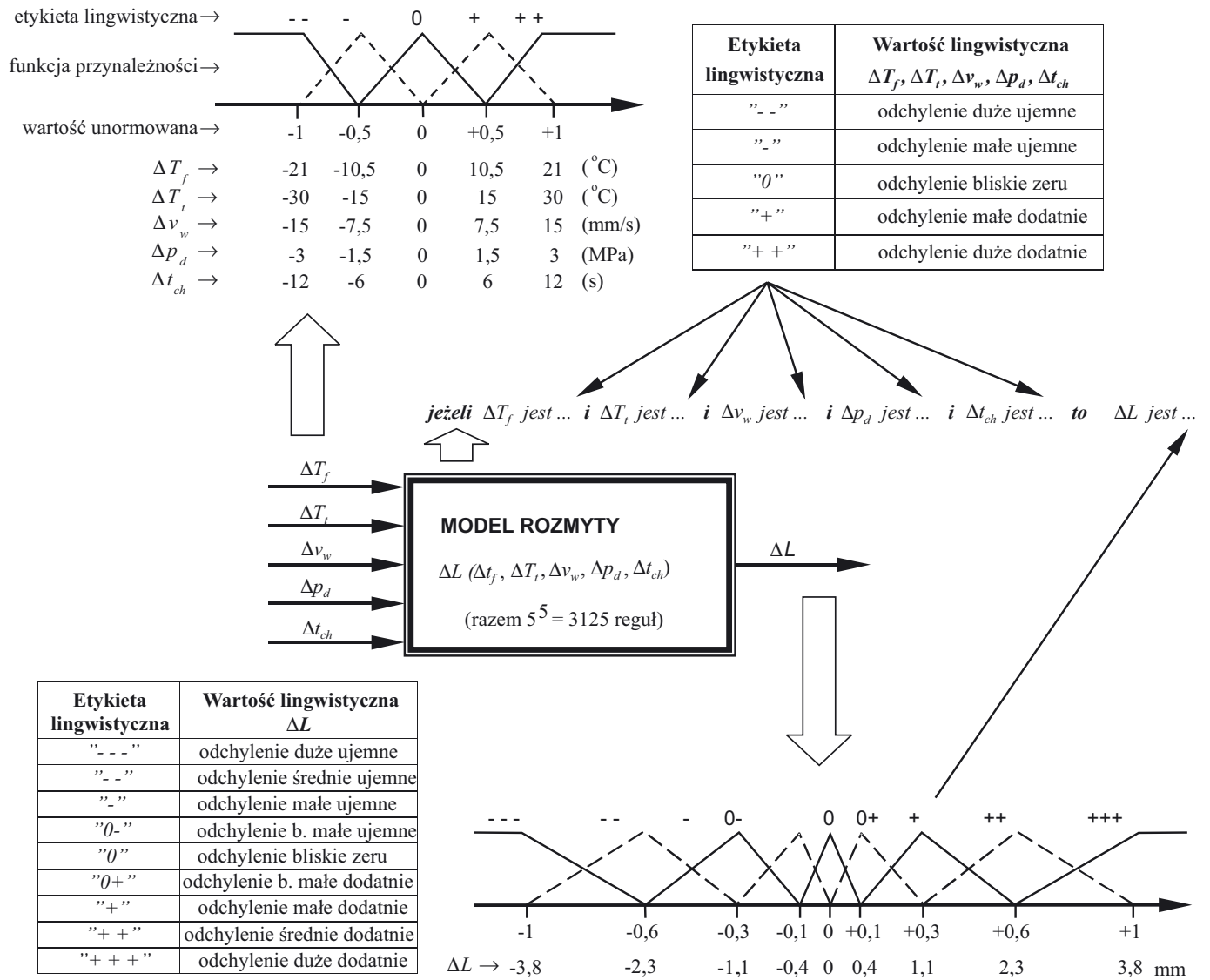
$$\text{jeżeli: } \Delta T_f \text{ jest „++” i } \Delta T_t \text{ jest „++” i } \Delta v_w \text{ jest } WL_{3k} \\ \text{ i } \Delta p_d \text{ jest } WL_{4l} \text{ i } \Delta t_{ch} \text{ jest } WL_{5m} \text{ to } \Delta R_m \text{ jest } WL_{Rn} \quad (3)$$

W tej konwencji kompletny zestaw reguł modelu może być przedstawiony jako maczyca  $5 \times 5$  analogicznych prostopadłościów, każdy dla jednej z 25 kombinacji wartości lingwistycznych  $\Delta T_f$  i  $\Delta T_t$ .

Do wnioskowania ze zbudowanych modeli rozmytych zastosowano metodę Mamdaniego [6], a do defuzyfikacji wartości wyjściowej metodę COA (*Center Of Area*). Na rysunku 2b przedstawiono przestrzenny wykres zależności  $\Delta R_m(\Delta T_f, \Delta T_t, \Delta v_w, \Delta p_d, \Delta t_{ch})$  aproksymowanej przez model rozmyty w obszarze przestrzeni czynnikowej „opisywanym” zestawem reguł z wykresu 2a.

#### ROZMYTY ALGORYTM KOREKCJI CYKLU WTRYSKIWANIA

W przypadku metody sterowania nadrzędnego opartej na modelach rozmytych zasadnicza, opisana w [1], idea trój etapowej sekwencyjnej metody korekcji procesu pozostaje bez zmian. Inaczej skonstruowane są natomiast mechanizmy decyzyjne odpowiedzialne za obli-



Rys. 1. Struktura modelu rozmytego odchylenia długości wypraski od wartości nominalnej w funkcji odchyleń głównych zmiennych sterujących cyklem wtryskiwania:  $\Delta L(\Delta T_f, \Delta T_t, \Delta v_w, \Delta p_d, \Delta t_{ch})$

Fig. 1. Structure of fuzzy model of molding's length deviation relative to nominal value  $\Delta L$  vs. deviations of main control variables of injection molding cycle:  $\Delta L(\Delta T_f, \Delta T_t, \Delta v_w, \Delta p_d, \Delta t_{ch})$

czanie wartości zmiennych korygujących proces:  $\Delta v_{w(I)}$ ,  $\Delta p_{d(I)}$ ,  $\Delta t_{ch(I)}$ ,  $\Delta p_{d(II)}$ ,  $\Delta t_{ch(II)}$ ,  $\Delta t_{ch(III)}$ . Korekty wyznacza się przy użyciu sześciu regulatorów o strukturze rozmytej:  $FLC_{v(I)}$ ,  $FLC_{p(I)}$ ,  $FLC_{t(I)}$ ,  $FLC_{p(II)}$ ,  $FLC_{t(II)}$ ,  $FLC_{t(III)}$  ( $FLC =$  Fuzzy Logic Controller) (rys. 3).

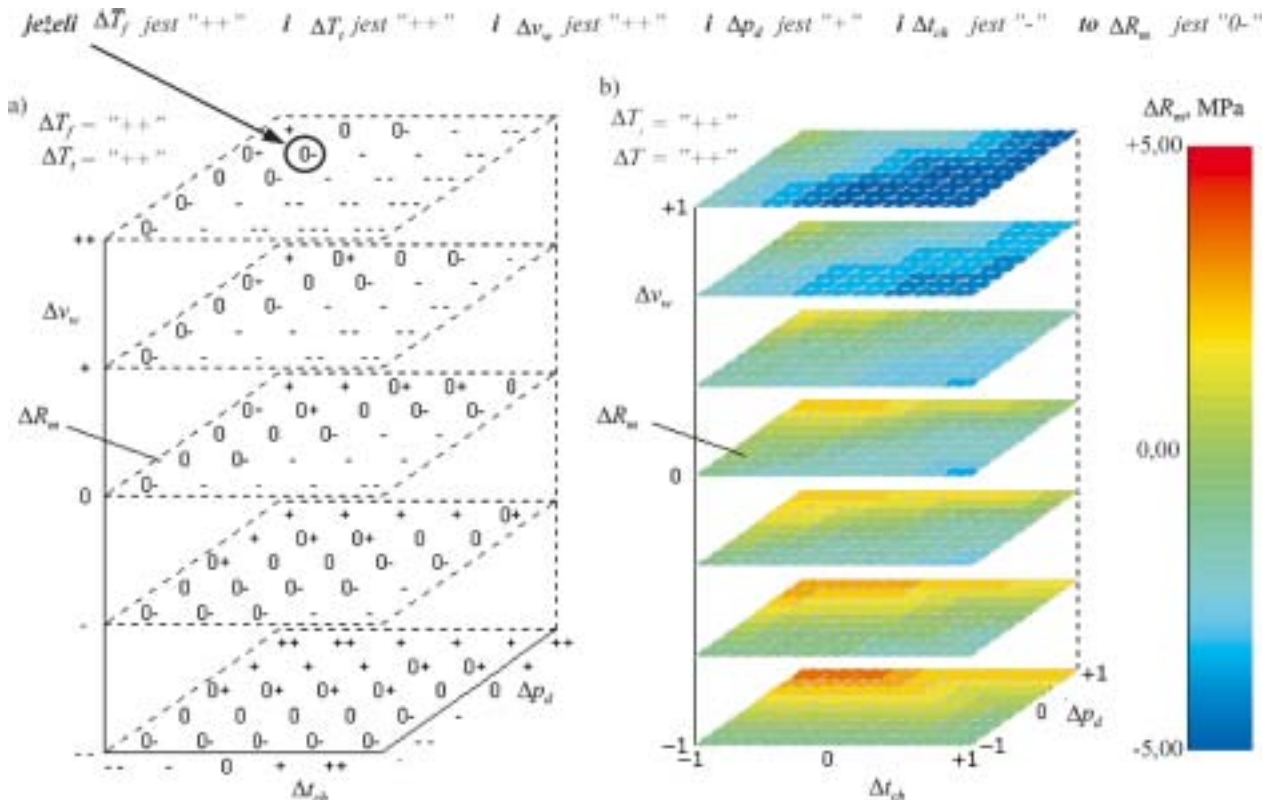
Obliczane za pomocą regulatorów  $FLC_{v(I)}$ ,  $FLC_{p(I)}$ ,  $FLC_{t(I)}$  wartości, odpowiednio, korekt prędkości wtrysku  $\Delta v_{w(I)}$ , ciśnienia docisku  $\Delta p_{d(I)}$ , oraz czasu chłodzenia  $\Delta t_{ch(I)}$ , umożliwiają wytworzenie wypraski o pożądanych właściwościach, pomimo niezerowych odchyleń temperatury formy  $\Delta T_f$  oraz temperatury tworzywa  $\Delta T_t$ . Dlatego też zmiennymi wejściowymi wspomnianych trzech regulatorów będą właśnie  $\Delta T_f$  i  $\Delta T_t$ . Ponieważ reguły regulatorów są budowane na podstawie rozmytych modeli zależności (1), to wielkości wejściowe regulatorów  $FLC_{v(I)}$ ,  $FLC_{p(I)}$ ,  $FLC_{t(I)}$  stanowią zmiennne rozmyte  $\Delta T_f$  i  $\Delta T_t$ , zdefiniowane identycznie jak na rys. 1. Z tego

samemu powodu, rozmyte zmienne wyjściowe  $\Delta v_{w(I)}$ ,  $\Delta p_{d(I)}$ ,  $\Delta t_{ch(I)}$  muszą być zgodne z  $\Delta v_w$ ,  $\Delta p_d$ ,  $\Delta t_{ch}$  (rys. 1). Liczba zmiennych wejściowych w sposób automatyczny narzuca postać reguł regulatorów:

- jeżeli:  $\Delta T_f$  jest  $WL_{1i}$  i  $\Delta T_t$  jest  $WL_{2j}$  to  $\Delta v_{w(I)}$  jest  $WL_{3n}$  — dla  $FLC_{v(I)}$
- jeżeli:  $\Delta T_f$  jest  $WL_{1i}$  i  $\Delta T_t$  jest  $WL_{2j}$  to  $\Delta p_{d(I)}$  jest  $WL_{4n}$  — dla  $FLC_{p(I)}$
- jeżeli:  $\Delta T_f$  jest  $WL_{1i}$  i  $\Delta T_t$  jest  $WL_{2j}$  to  $\Delta t_{ch(I)}$  jest  $WL_{5n}$  — dla  $FLC_{t(I)}$

Z liczby WL zmiennych wejściowych (pięć) wynika liczba reguł odnosząca się do każdego z regulatorów, która wynosi  $5 \times 5 = 25$ .

Podobnie, sposób doboru wartości  $\Delta p_{d(II)}$  i  $\Delta t_{ch(II)}$  na drugim etapie korekcji procesu (po zakończeniu fazy wtrysku) jest zakodowany w regułach regulatorów rozmytych:



Rys. 2. Graficzna prezentacja 125 reguł rozmytych modelu wytrzymałości wypraski  $\Delta R_m(\Delta T_f, \Delta T_t, \Delta v_w, \Delta p_d, \Delta t_{ch})$  dla ustalonych odchyżeń wartości temperatury formy  $\Delta T_f = „++”$  oraz temperatury tworzywa  $\Delta T_t = „++”$  — (a); wykres zależności  $\Delta R_m(\Delta T_f, \Delta T_t, \Delta v_w, \Delta p_d, \Delta t_{ch})$  aproksymowanej przez model rozmyty w obszarze przestrzeni czynnikowej „opisywanej” zestawem reguł z rys. 2a — (b)

Fig. 2. Graphical presentation of 125 fuzzy rules of tensile strength deviation model  $\Delta R_m(\Delta T_f, \Delta T_t, \Delta v_w, \Delta p_d, \Delta t_{ch})$  for selected values of mold temperature deviation  $\Delta T_f = „++”$  and polymer temperature deviation  $\Delta T_t = „++”$  — (a); graph of  $\Delta R_m(\Delta T_f, \Delta T_t, \Delta v_w, \Delta p_d, \Delta t_{ch})$  dependence approximated from fuzzy model inside factor space described by set of rules shown on Fig. 2a — (b)

jeżeli:  $\Delta T_f$  jest WL<sub>1i</sub> i  $\Delta T_t$  jest WL<sub>2j</sub> i  $\Delta v_w$  jest WL<sub>3k</sub>  
to  $\Delta p_{d(II)}$  jest WL<sub>4n</sub> — dla FLC<sub>p(II)</sub>  
jeżeli:  $\Delta T_f$  jest WL<sub>1i</sub> i  $\Delta T_t$  jest WL<sub>2j</sub> i  $\Delta v_w$  jest WL<sub>3k</sub>  
to  $\Delta t_{ch(II)}$  jest WL<sub>5n</sub> — dla FLC<sub>t(II)</sub> (5)

Liczba reguł dla każdego z regulatorów wynosi  $5 \times 5 \times 5 = 125$  (trzy zmienne wejściowe, dla każdej pięć WL).

Po zakończeniu fazy docisku regulator FLC<sub>t(III)</sub> o czterech zmiennych wejściowych i 625 regułach typu:

jeżeli:  $\Delta T_f$  jest WL<sub>1i</sub> i  $\Delta T_t$  jest WL<sub>2j</sub> i  $\Delta v_w$  jest WL<sub>3k</sub>  
i  $\Delta p_d$  jest WL<sub>4l</sub> to  $\Delta t_{ch(III)}$  jest WL<sub>5n</sub> (6)

oblicza optymalną wartość korekty czasu chłodzenia  $\Delta t_{ch(III)}$ .

#### NADZOROWANIE POJEDYNCZYCH CHARAKTERYSTYK JAKOŚCI (WŁAŚCIWOŚCI)

Przyjęto, że cel (strategię) nadzorowania procesu stanowi zapewnienie nominalnej długości wypraski  $\Delta L = 0$  (w nomenklaturze zmiennych rozmytych  $\Delta L$  jest „0” lub równoważnie  $\Delta L = „0”$ ). Rozpatrzono trzy reguły rozmyte regulatorów FLC<sub>v(I)</sub>, FLC<sub>p(I)</sub>, FLC<sub>t(I)</sub> (4) o takich samych poprzednikach ( $\Delta T_f = „--”$  i  $\Delta T_t = „++”$ ):

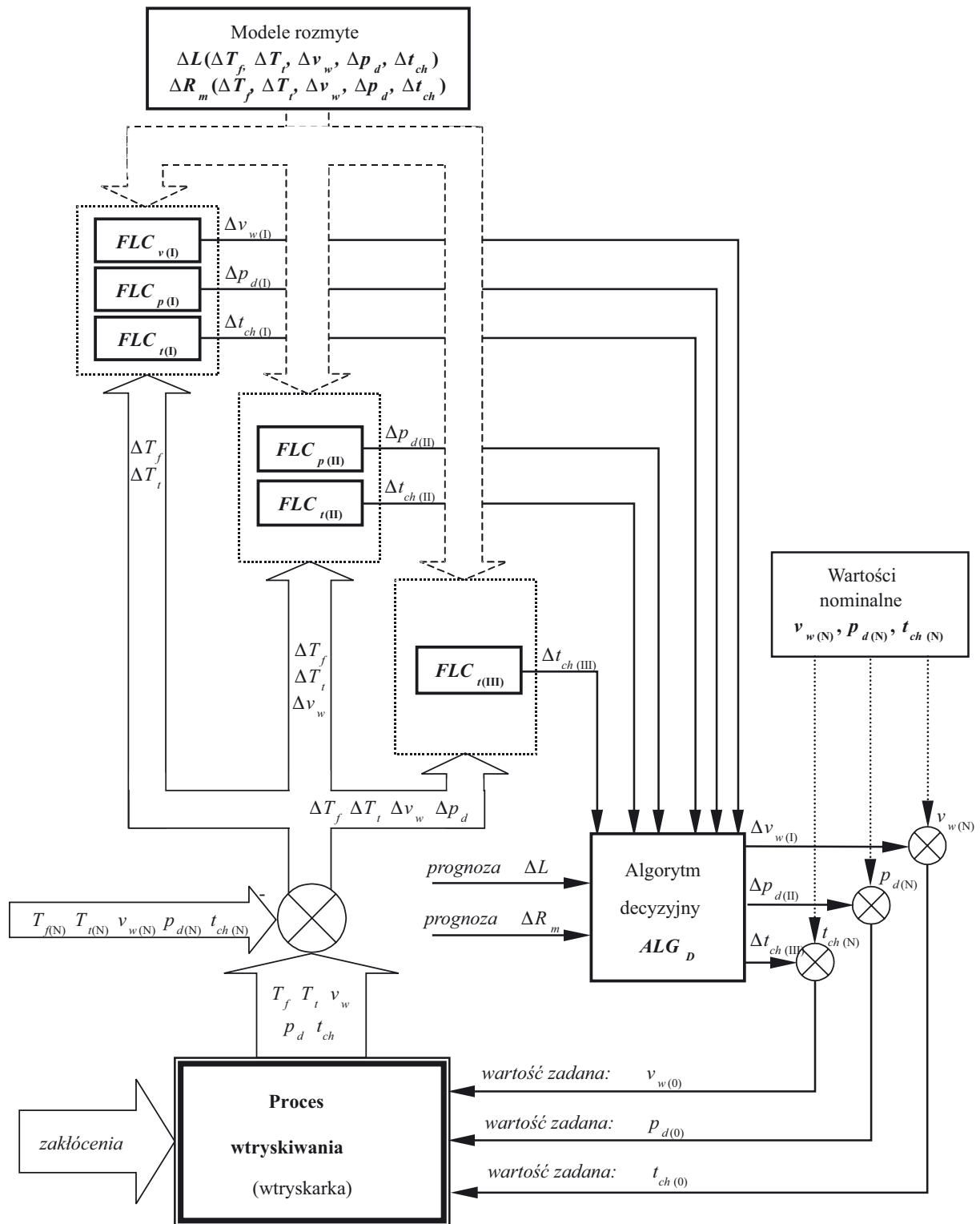
jeżeli:  $\Delta T_f$  jest „--” i  $\Delta T_t$  jest „++” to  $\Delta v_{w(I)}$  jest... — dla FLC<sub>v(I)</sub>  
jeżeli:  $\Delta T_f$  jest „--” i  $\Delta T_t$  jest „++” to  $\Delta p_{d(I)}$  jest... — dla FLC<sub>p(I)</sub>  
jeżeli:  $\Delta T_f$  jest „--” i  $\Delta T_t$  jest „++” to  $\Delta t_{ch(I)}$  jest... — dla FLC<sub>t(I)</sub> (7)

Optymalnych WL dla zmiennych korygujących  $\Delta v_{w(I)}$ ,  $\Delta p_{d(I)}$ ,  $\Delta t_{ch(I)}$  (w następnikach) poszukiwano na podstawie rozmytego modelu zależności  $\Delta L$  (1). W odniesieniu do rozważanych WL odchyżeń  $\Delta T_f = „--”$  i  $\Delta T_t = „++”$ , reguły modelu „zawężają się” do fragmentu przedstawionego na rys. 4.

Z analizy tej części modelu wynika, że w przypadku obranych wartości odchyżeń  $\Delta T_f$  i  $\Delta T_t$  nie można uzyskać wypraski o nominalnych wymiarach, tj.  $\Delta L = „0”$ , w wyniku zaś cyklu wtryskiwania przeprowadzonego w warunkach nominalnych wartości pozostałych zmiennych  $\Delta v_w = „0”$ ,  $\Delta p_d = „0”$ ,  $\Delta t_{ch} = „0”$  uzyskano by wypraskę o *małym dodatnim* odchyleniu długości ( $\Delta L = „+”$ , czerwone kółko na rys. 4a).

Na rysunku 4a widać także, że realizując cykl wtryskiwania z odpowiednio dobranymi wartościami  $\Delta v_{w(I)}$ ,  $\Delta p_{d(I)}$ ,  $\Delta t_{ch(I)}$  można, w najlepszym przypadku, otrzymać wypraskę o *bardzo małym dodatnim* odchyleniu długości ( $\Delta L = „0+”$  — niebieskie kółko). Spośród możliwych



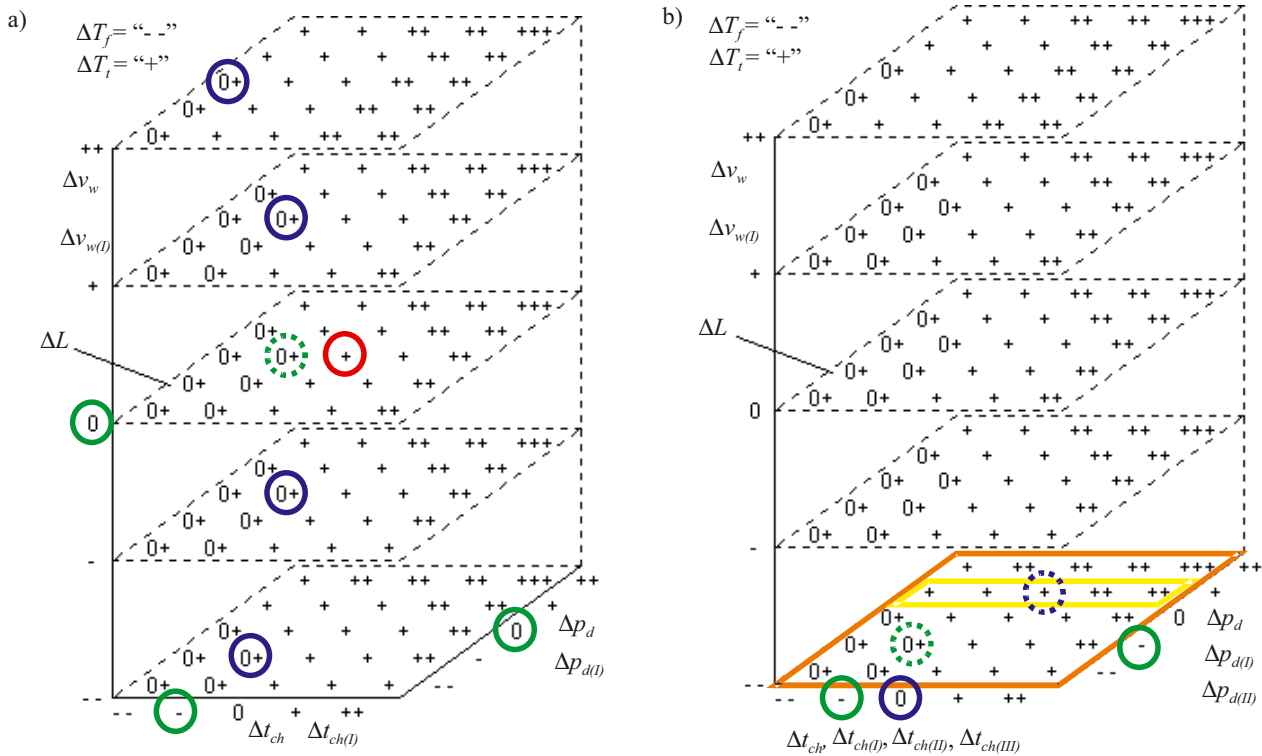


Rys. 3. Schemat blokowy systemu nadzorowania procesu wtryskiwania z rozmytym algorytmem korekcji  
 Fig. 3. Block diagram of supervising system of injection molding process with fuzzy correction algorithm

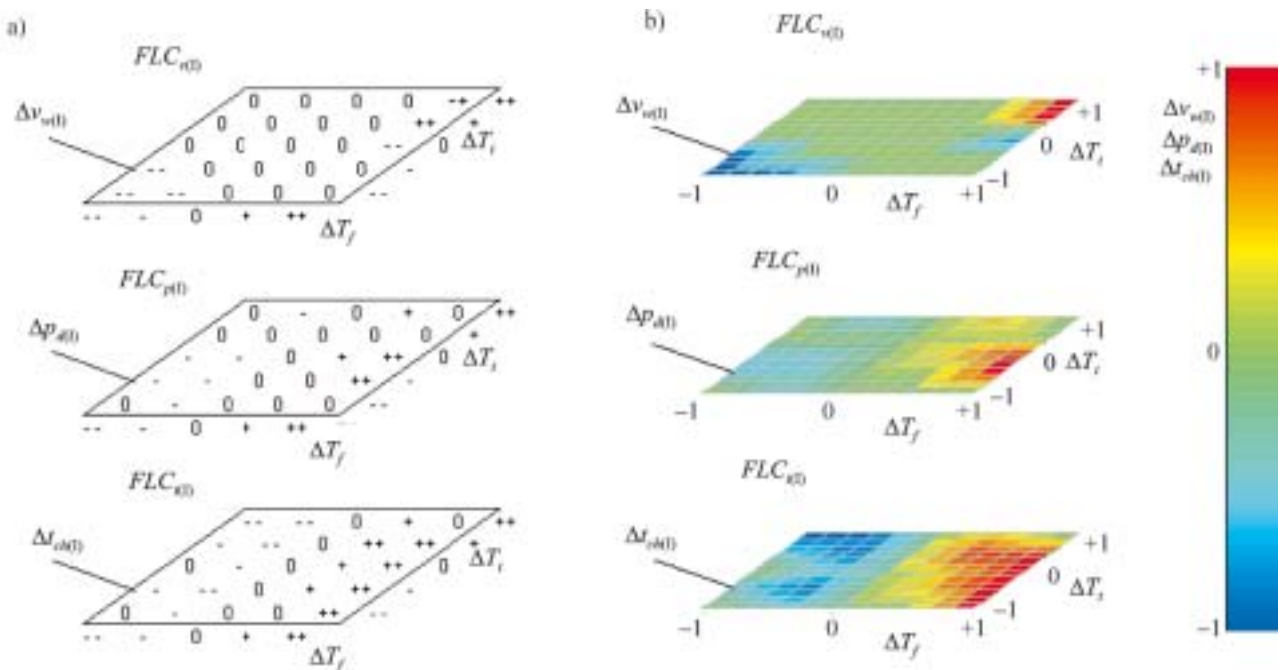
kombinacji wartości zmiennych  $\Delta v_{w(I)}$ ,  $\Delta p_{d(I)}$ ,  $\Delta t_{ch(I)}$  zapewniających  $\Delta L = „0+”$  należy więc wybrać tę, której wartości w najmniejszym stopniu odbiegają od wartości nominalnych  $\Delta v_{w(I)} = „0”$ ,  $\Delta p_{d(I)} = „0”$ ,  $\Delta t_{ch(I)} = „0”$ . Kryterium to wydaje się oczywiste, im mniejsza bowiem ingerencja w proces tym mniejsze ryzyko ujawnienia się efektów nieujętych w modelach (interakcji wyższych

rzędów). Zatem, w odniesieniu do rozpatrywanych wartości zakłóceń  $\Delta T_f = „-”$  i  $\Delta T_t = „+”$ , optymalne wartości korekt wynoszą  $\Delta v_{w(I)} = „0”$ ,  $\Delta p_{d(I)} = „0”$ ,  $\Delta t_{ch(I)} = „-”$  (oznaczone na rys. 4a zielonymi kółkami). Są to jednocześnie WL dla następników reguł [z równ. (7)].

Zieloną przerywaną linią zakreślono wartości lingwistyczne (WL) odchylenia długości wypraski ( $\Delta L$ ), które



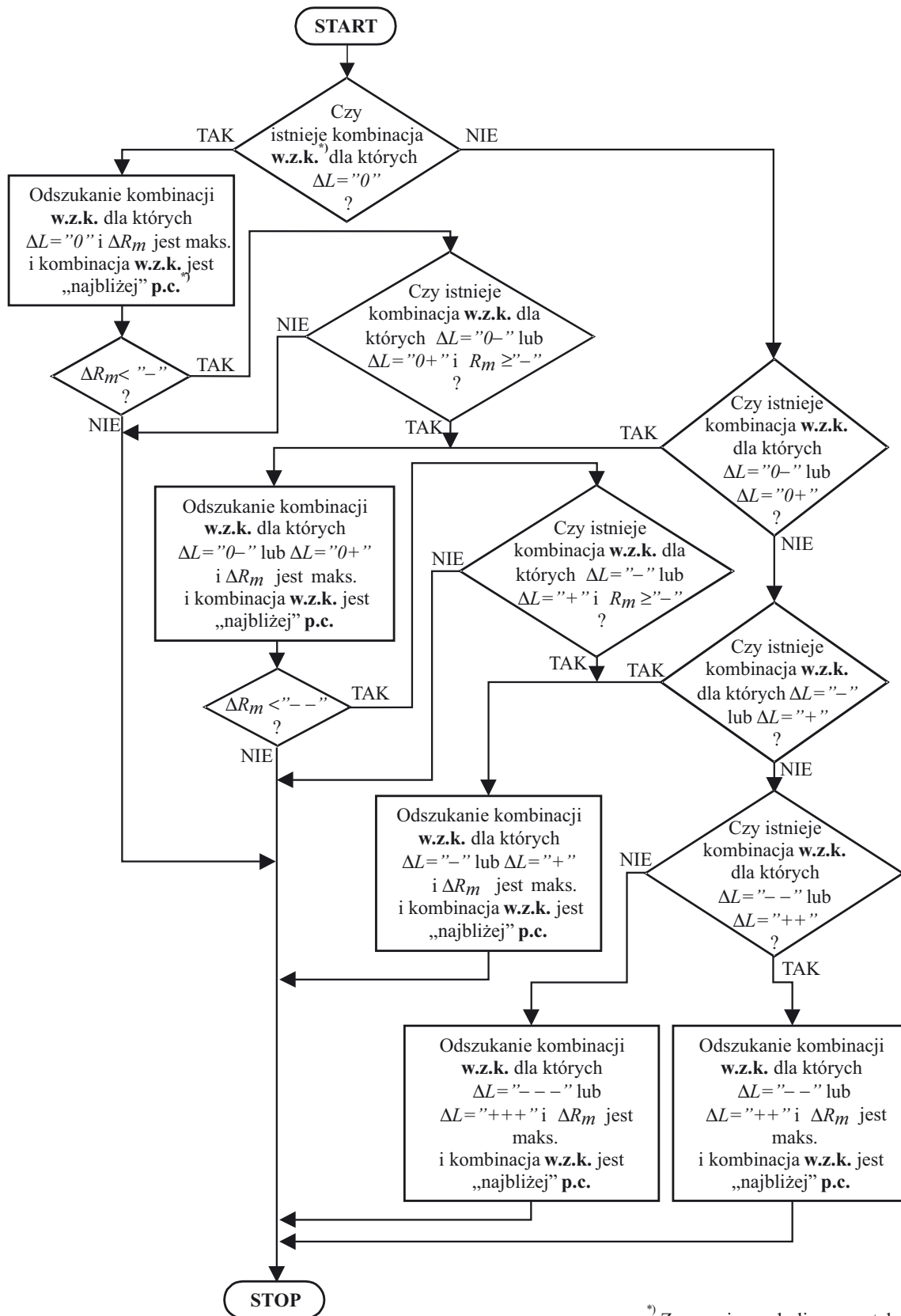
Rys. 4. Optymalne wartości lingwistyczne zmiennych korygujących  $\Delta v_{w(I)}$ ,  $\Delta p_{d(I)}$ ,  $\Delta t_{ch(I)}$ ,  $\Delta p_{d(II)}$ ,  $\Delta t_{ch(II)}$ ,  $\Delta t_{ch(III)}$  dla wybranych wartości odchyłek zmiennych procesu  $\Delta T_f = \text{"- -"}$  i  $\Delta T_t = \text{"+"}$ ,  $\Delta v_w = \text{"- -"}$ ,  $\Delta p_d = \text{"+"}$  (opis w tekście)  
 Fig. 4. Optimal linguistic values of correction variables  $\Delta v_{w(I)}$ ,  $\Delta p_{d(I)}$ ,  $\Delta t_{ch(I)}$ ,  $\Delta p_{d(II)}$ ,  $\Delta t_{ch(II)}$ ,  $\Delta t_{ch(III)}$  for chosen values of process variables deviations  $\Delta T_f = \text{"- -"}$  and  $\Delta T_t = \text{"+"}$ ,  $\Delta v_w = \text{"- -"}$ ,  $\Delta p_d = \text{"+"}$  (refer to text for detailed description)



Rys. 5. Reguły regulatorów  $FLC_{v(I)}$ ,  $FLC_{p(I)}$ ,  $FLC_{t(I)}$  obliczających wartości korygujące  $\Delta v_{w(I)}$ ,  $\Delta p_{d(I)}$ ,  $\Delta t_{ch(I)}$  na pierwszym etapie korekcji (a) oraz ich powierzchnie sterowania (b)  
 Fig. 5. Fuzzy rules set of  $FLC_{v(I)}$ ,  $FLC_{p(I)}$ ,  $FLC_{t(I)}$  controllers, which calculate optimal correction values  $\Delta v_{w(I)}$ ,  $\Delta p_{d(I)}$ ,  $\Delta t_{ch(I)}$  during first stage of correction (a) and their control surfaces (b)

otrzymano by w modelowym cyklu wtryskiwania z zastosowaniem tak obliczonych wartości korygujących.

Opisaną procedurę konstruowania reguł korygujących proces należy powtórzyć w przypadku wszystkich



Rys. 6. Algorytm wyszukiwania wartości lingwistycznej następnika dla każdej z reguł regulatorów  $FLC_{v(I)}$ ,  $FLC_{p(I)}$ ,  $FLC_{t(I)}$ ,  $FLC_{p(II)}$ ,  $FLC_{t(II)}$ ,  $FLC_{t(III)}$  realizujących strategię korygowania procesu: zapewnić nominalną długość wypraski z jednoczesną maksymalizacją jej wytrzymałości

Fig. 6. Algorithm of searching the linguistic value for fuzzy rule's successor of  $FLC_{v(I)}$ ,  $FLC_{p(I)}$ ,  $FLC_{t(I)}$ ,  $FLC_{p(II)}$ ,  $FLC_{t(II)}$ ,  $FLC_{t(III)}$  controllers, which perform process supervising strategy: to provide molding's nominal length with maximization of tensile strength

reguł z równania (7) regulatorów  $FLC_{v(I)}$ ,  $FLC_{p(I)}$ ,  $FLC_{t(I)}$ . Pełne zestawy reguł doboru zmiennych korygujących na pierwszym etapie korekcji przedstawia rys. 5.

Sposób konstruowania reguł rozmytych regulatorów  $FLC_{p(II)}$ ,  $FLC_{t(II)}$  [równ. (5)], odpowiedzialnych za obliczanie optymalnych wartości korekt  $\Delta p_{d(II)}$  oraz  $\Delta t_{ch(II)}$ , jest podobny jak regulatorów  $FLC_{v(I)}$ ,  $FLC_{p(I)}$ ,  $FLC_{t(I)}$ . Każda kombinacja WL w poprzedniku reguł z równania (5) „wydziela” wirtualnie fragment bazy reguł rozmytego modelu długości wypraski [równanie (1)] w postaci jednej „płaszczyzny” (przekroju) prostopadłościanu (por. rys. 4). Na przykład, kombinacji wartości odchyleń  $\Delta T_f = „-”$  i  $\Delta T_t = „+”$  i  $\Delta v_{w(I)} = „-”$  odpowiada fragment modelu zaznaczony czerwonym równoległobokiem (rys. 4b). Podobnie jak na pierwszym etapie korekcji procesu, w obszarze tym należy znaleźć wartości  $\Delta p_{d(II)}$  oraz  $\Delta t_{ch(II)}$  zapewniające otrzymanie wypraski spełniającej postawione wymagania. W diskutowanym przypadku będą to  $\Delta p_{d(II)} = „-”$ ,  $\Delta t_{ch(II)} = „-”$  (zielone kółka na rys. 4b).

Na trzecim, ostatnim etapie korekcji, stosując regulator  $FLC_{t(III)}$  o regułach z równania (6) oblicza się optymalną wartość korekty czasu chłodzenia  $\Delta t_{ch(III)}$ . Na rysunku 4b pokazano przykład konstruowania jednej z reguł wg równania (6) dla wybranych wartości odchyleń:  $\Delta T_f = „-”$  i  $\Delta T_t = „+”$  i  $\Delta v_{w(I)} = „-”$  i  $\Delta p_{d(II)} = „+”$ . Żółtym równoległobokiem zaznaczono fragment bazy reguł modelu, w ramach którego jest możliwa korekcja długości wypraski. Niebieskim przerywanym kółkiem wyróżniono WL odchylenia długości wypraski w największym stopniu spełniającą żądane kryteria, czyli  $\Delta L = „0”$  w warunkach wartości korekty czasu chłodzenia  $\Delta t_{ch(III)}$  jak najmniej odbiegającej od WL „0”.

#### JEDNOCZESNE NADZOROWANIE WIELU CHARAKTERYSTYK JAKOŚCI (WŁAŚCIWOŚCI)

Procedura konstruowania reguł regulatorów przedstawionych równaniami (4), (5) i (6) w odniesieniu do wielokryterialnej strategii nadzorowania cyklu wtryskiwania nie różni się w sposób istotny od procedury opisanej w poprzednim punkcie. Odmienność polega na tym, że optymalnych wartości korygujących (tj. WL dla następników reguł) należy poszukiwać na podstawie wszystkich modeli nadzorowanych wielkości. Zgodnie z obraną strategią korekcji różne są także kryteria doboru WL.

Przyjęto, że zadaniem algorytmu sterowania nadrzędnego jest strategia: *zapewnienie nominalnej długości wypraski z jednoczesną maksymalizacją jej wytrzymałości na rozciąganie*. Nawet z pobieżnych analiz obu zależności opisanych równaniem (1) wynika, że jednoczesne sterowanie dwiema charakterystykami jakości będzie niekiedy wymagało kompromisów — wówczas polepszenie jednej z cech musi odbywać się kosztem pogorszenia drugiej. Należy zatem zdefiniować i zapisać w sposób formalny, najlepiej zalgorytmizowany, właściwość prio-

rytetową oraz zakres akceptowalnych kompromisów. Rysunek 6 przedstawia algorytm wyszukiwania WL następnika każdej z reguł z równań (5), (6) i (7) regulatorów korygujących, realizujących przyjętą strategię. Kombinacje wartości zmiennych korygujących (kombinacje *w.z.k.*) są rozumiane jako WL zmiennych:

—  $\Delta v_{w(I)}$ ,  $\Delta p_{d(I)}$ ,  $\Delta t_{ch(I)}$  podczas konstruowania reguł regulatorów  $FLC_{v(I)}$ ,  $FLC_{p(I)}$ ,  $FLC_{t(I)}$ ;

—  $\Delta p_{d(II)}$ ,  $\Delta t_{ch(II)}$  w toku konstruowania reguł regulatorów  $FLC_{p(II)}$ ,  $FLC_{t(II)}$ ;

—  $\Delta t_{ch(III)}$  w przypadku konstruowania reguł regulatorów  $FLC_{t(III)}$ .

Punktem centralnym (*p.c.*) zmiennych korygujących jest natomiast punkt: ( $\Delta v_{w(I)} = „0”$ ,  $\Delta p_{d(I)} = \Delta p_{d(II)} = „0”$ ,  $\Delta t_{ch(I)} = \Delta t_{ch(II)} = \Delta t_{ch(III)} = „0”$ ).

Opisana metoda konstruowania reguł regulatorów korygujących jest stosunkowo złożona i pracochłonna musi bowiem zostać powtórzona w odniesieniu do  $3 \cdot 25 + 2 \cdot 125 + 625 = 950$  reguł. Dzięki jej zalgorytmizowaniu możliwa była jednak numeryczna implementacja. Należy podkreślić, że w obranej strategii sterowania reguły te buduje się tylko raz w trybie *off-line*, w czasie rzeczywistym natomiast (w trakcie cyklu wtryskiwania) dokonuje się jedynie wnioskowania z tak zbudowanych reguł.

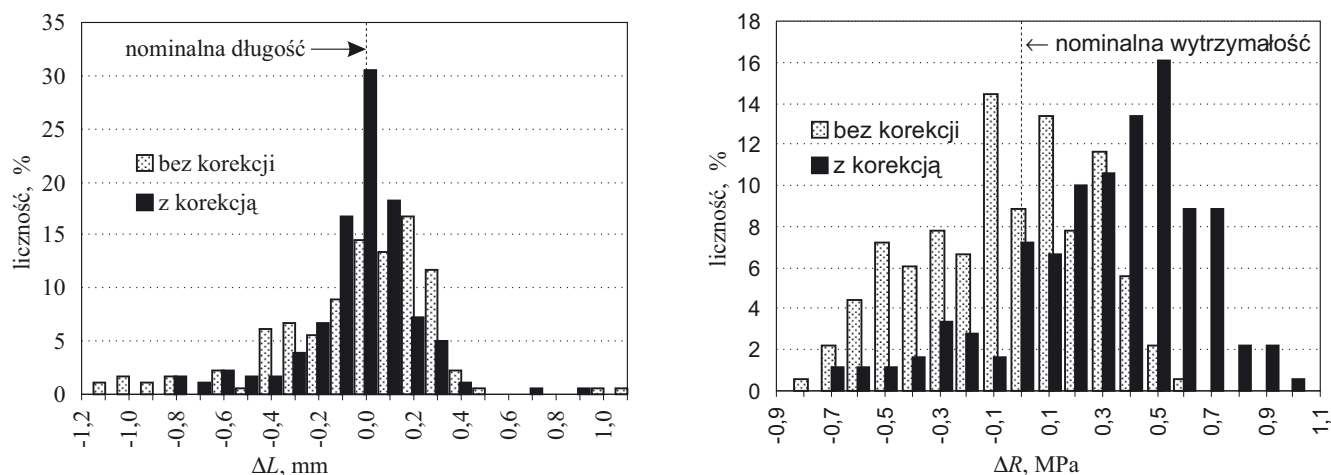
#### TESTOWANIE METODY WIELOKRYTERIALNEGO NADZOROWANIA WTRYSKIWANIA

Skuteczność opracowanej metody nadzorowania z wykorzystaniem wielokryterialnego rozmytego algorytmu korygującego ( $FuzLR_m$ ) skonstruowanego w odniesieniu do opisanej wyżej strategii, przetestowano w procesie wtryskiwania znormalizowanej wypraski z PE-LD. Warunki testów były zbliżone do opisanych w [1], tj. obejmowały końcową fazę „rozruchu” wtryskarki oraz okres wznowienia procesu po zaburzeniu rytmiczności wtryskiwania. Algorytm korygujący był włączany i wyłączany przemiennie co 4 cykle. Na rysunku 7 przedstawiono histogramy rozkładów odchyleń długości oraz wytrzymałości wyprasek wytworzonych w 380 kolejnych cyklach wtryskiwania.

Porównanie rozkładów odchyleń długości wyprasek w cyklach korygowanych i niekorygowanych przebiegających w podobnych warunkach wskazuje, że założona priorytetowa część strategii sterowania — *minimalizacja odchylenia długości wypraski* — została zrealizowana pomyślnie, mianowicie w wyniku korekcji znacznie zmalało rozproszenie skurczu. Jednocześnie można zauważyć wyraźny wzrost średniej wartości wytrzymałości na rozciąganie (ok. 0,4 MPa) w stosunku do wytrzymałości wyprasek z cykli bez korekcji. Zatem drugi człon strategii nadzorowania — *jednoczesna maksymalizacja wytrzymałości* — także przeprowadzono z powodzeniem.

Odnotowano również większą zgodność rozmytych modeli długości i wytrzymałości wyprasek z wynikami doświadczalnymi niż w przypadku modeli regresji opisanych w [1]. Adekwatność modeli wzrosła zwłaszcza





Rys. 7. Porównanie rozkładów odchyleń długości ( $\Delta L$ ) i wytrzymałości ( $\Delta R$ ) wyprasek w cyklach niekorygowanych oraz korygowanych według przyjętej strategii (por. rys. 6)

Fig. 7. Comparison of deviations of moulding's length ( $\Delta L$ ) and tensile strength ( $\Delta R$ ) manufactured in non-corrected and corrected cycles according to assumed supervision strategy (see Fig. 6)

wyraźnie w obszarach przestrzeni czynnikowej mocno oddalonych od punktu centralnego, tj. tam, gdzie wprowadzono do modeli wiedzę ekspercką (technologiczną).

#### PODSUMOWANIE

Opisane w [1] modele regresji długości i wytrzymałości wypraski z PE-LD (1) posłużyły jako punkt wyjścia do zbudowania modeli takich samych zależności, ale o strukturze rozmytej. Opracowano metodykę modelowania pozwalającą na połączenie w jednym modelu rozmytym obiektywnej wiedzy empirycznej oraz — często niekompletnej, ale bardzo cennej — wiedzy technologicznej (eksperskiej).

Zastosowanie modeli rozmytych umożliwiło skonstruowanie rozmytych algorytmów decyzyjnych w metodzie sekwencyjnego nadzorowania procesu wtryskiwania omówionej w [1]. W odróżnieniu od algorytmów deterministycznych zbudowane algorytmy decyzyjne mogą realizować dowolną, wielokryterialną strategię nadzorowania procesu. Pozornie złożoną i czasochłonną procedurę konstruowania reguł regulatorów korygujących można zalgorytmizować i zautomatyzować.

Wyniki testu metody nadzorującej jednocześnie dwie charakterystyki jakości wypraski wykazały jej dużą skuteczność. Rozproszenie wymiaru podłużnego — przyjętego jako priorytetowa część strategii — wyprasek wytworzonych w cyklach korygowanych zmalało wyraź-

nie w stosunku do rozproszenia  $\Delta L$  w cyklach niekorygowanych, przebiegających w warunkach takich samych lub bardzo zbliżonych poziomów czynników zakłócających; jednocześnie, zgodnie z obraną strategią sterowania wzrosła średnia wartość wytrzymałości (maksymalnego naprężenia rozciągającego).

#### LITERATURA

1. Stączek P.: *Polimery* 2008, **53**, 670.
2. Bogucki M., Płaska S., Stączek P.: *Polimery* 2003, **48**, 714.
3. Bogucki M., Płaska S., Stączek P.: VI Warsztaty Profesorskie „Przetwórstwo tworzyw wielkocząsteczkowych”, Wyd. Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2001, mat. konf., str. 59.
4. Yeung V. W. S., Lau K. H.: *J. Mater. Proc. Technol.* 1997, **63**, 481.
5. Myers R., Montgomery D.: „Response Surface Methodology”, John Wiley and Sons, Nowy Jork, USA 1995.
6. Yager R., Filev D.: „Podstawy modelowania i sterowania rozmytego”, WNT, Warszawa 1995.
7. Bogucki M., Płaska S., Stączek P.: *Adv. Manufact. Sci. Technol.* 2003, **27**, 21.

Otrzymano 21 I 2005 r.  
Wersja skorygowana 15 V 2007 r.