

PAWEŁ STĄCZEK

Politechnika Lubelska
Wydział Mechaniczny
Katedra Automatykacji
ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin

Zautomatyzowana metoda sekwencyjnego korygowania przebiegu cyklu wtryskiwania tworzyw termoplastycznych

Cz. I. DETERMINISTYCZNY ALGORYTM KOREKCJI

Streszczenie — Opracowano algorytmiczną metodę nadzorowania procesu wtryskiwania tworzyw termoplastycznych. Polega ona na sekwencyjnym, wieloetapowym kompensowaniu prognozowanych odchył w właściwości wypraski, spowodowanych zakłóceniami wolnozmiennych parametrów sterujących procesem, w wyniku natychmiastowej zmiany wartości zmiennych szybko sterowalnych w tym samym cyklu wtryskiwania. Prognozowanie i korygowanie przebiegu procesu realizowane w czasie rzeczywistym (w tym samym cyklu) ogranicza prawdopodobieństwo wytworzenia wadliwych produktów. Przetestowano jeden z dwóch wariantów algorytmu korygującego — algorytm deterministyczny oparty na doświadczalnych modelach regresji nadzorowanych charakterystyk jakości — tu jej wymiaru podłużnego L . Wybrany wariant algorytmu zastosowano do nadzorowania procesu wtryskiwania znormalizowanej wypraski z PE-LD. Weryfikacja doświadczalna wykazała dużą skuteczność zbudowanych algorytmów — rozproszenie skurczu przetwórczego (wartości ΔL) wyprasek zostało dwukrotnie zmniejszone.

Słowa kluczowe: wtryskiwanie, tworzywa termoplastyczne, nadzorowanie, deterministyczny algorytm korygujący, odchylenie długości.

AUTOMATED METHOD OF SEQUENTIAL CORRECTION OF THE COURSE OF THE CYCLE OF THERMOPLASTIC INJECTION MOLDING. PART I. DETERMINISTIC CORRECTION ALGORITHM

Summary — An algorithmic method of supervision of injection molding process of thermoplastics was elaborated (Fig. 1 and 2). It consists in sequential multistage compensation of forecasted molding quality deviations, caused by disturbances of slow-speed variable parameters supervising the process, by immediate change of quick controllable variables during the same injection molding cycle (Fig. 3 and 4). Both the prediction and process correction is performed in the real-time mode (during the same cycle) so the probability of defective products' manufacturing is limited. One of alternative correction algorithms was tested: deterministic one based on empirical regression models of supervised characteristics of molding quality (here: its length-wise dimension). This algorithm was applied to the supervision of injection molding of PE-LD normalized molding. Empirical revision showed the high efficiency of algorithm designed as the distribution of molding shrinkage was reduced twice (Fig. 5).

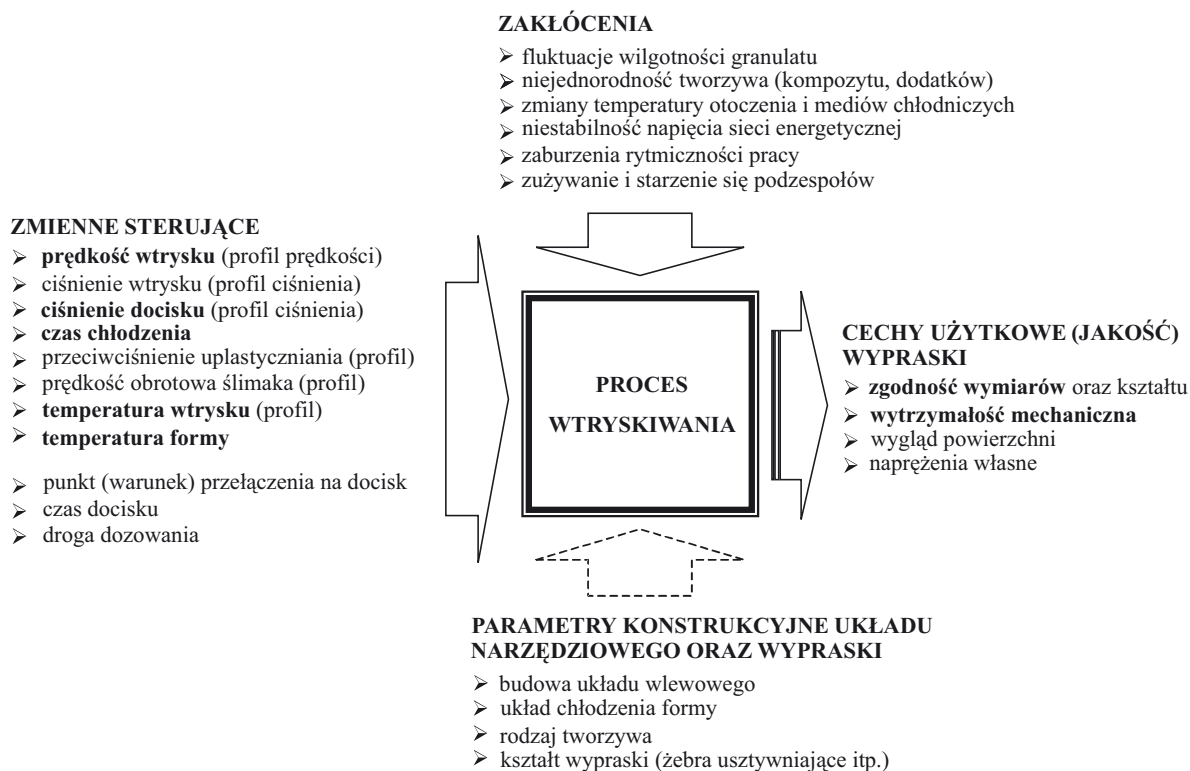
Key words: injection molding of thermoplastics, deterministic correction algorithms, length deviation.

Wtryskiwanie — obok wytłaczania — stanowi jedną z najczęściej stosowanych technologii przetwórstwa tworzyw termoplastycznych. Zwiększający się udział w wyrobach końcowych elementów konstrukcyjnych wykonanych z takich materiałów wiąże się z wymogiem zachowania ich wysokiej jakości wynikającej przede wszystkim z dokładności wymiarów i kształtu oraz z określonych właściwości mechanicznych. W tym celu niezbędne staje się ciągle nadzorowanie przebiegu procesu wtryskiwania [1] polegające na monitorowaniu krytycznych zmiennych (charakterystyk jakości), diag-

nozowaniu i identyfikowaniu zakłóceń oraz na podejmowaniu, w razie potrzeby, działań zaradczych (usuwaniu zakłóceń lub kompensowaniu ich wpływu na drodze korygowania wartości zmiennych sterujących).

NADZOROWANIE PROCESU WTRYSKIWANIA

Nadzorowanie wtryskiwania nie jest zadaniem łatwym, gdyż cechy użytkowe wypraski są złożonymi i słabo poznanymi funkcjami wielu zmiennych, w tym licznych czynników zakłócających oraz parametrów



Rys. 1. Główne czynniki kształtujące właściwości wypraski w toku procesu wtryskiwania tworzyw termoplastycznych (pogrubionym drukiem wyróżniono czynniki uwzględnione w modelach skonstruowanych w ramach badań)

Fig. 1. Main factors determining the molding properties during injection molding process of thermoplastic polymer (the factors used in the models designed in research are distinguished with boldface)

często wzajemnie ze sobą oddziaływujących (rys. 1) [2–5]. Jeszcze do niedawna tylko człowiek — technolog lub doświadczony operator wtryskarki — mógł skutecznie nadzorować przebieg wtryskiwania (rys. 2). Dynamiczny w ostatnich latach rozwój metod sztucznej inteligencji (teoria zbiorów i wnioskowania rozmytego oraz sztuczne sieci neuronowe) zaowocował powstaniem systemów informatycznych wspomagających człowieka w podejmowaniu trafnych działań zaradczych [3, 6–9]. Jednak tylko nieliczne z tych systemów są w stanie działać autonomicznie, samodzielnie korygując przebieg procesu wtryskiwania [8, 9].

Poważnym ograniczeniem większości informatycznych systemów (także całkowicie zautomatyzowanych) jest względnie długi czas reakcji na wykryte nieprawidłowości. Mianowicie, korekcja przebiegu procesu jest dokonywana, w najlepszym przypadku, w cyklu następnym po tym, w którym zdiagnozowano nieprawidłowości (proces decyzyjny tego typu schematycznie przedstawiono w górnej części rys. 3). Istnieje zatem realna możliwość wyprodukowania w zakłóconym cyklu wtryskiwania wadliwej wypraski pomimo procedury ciągłego nadzorowania procesu.

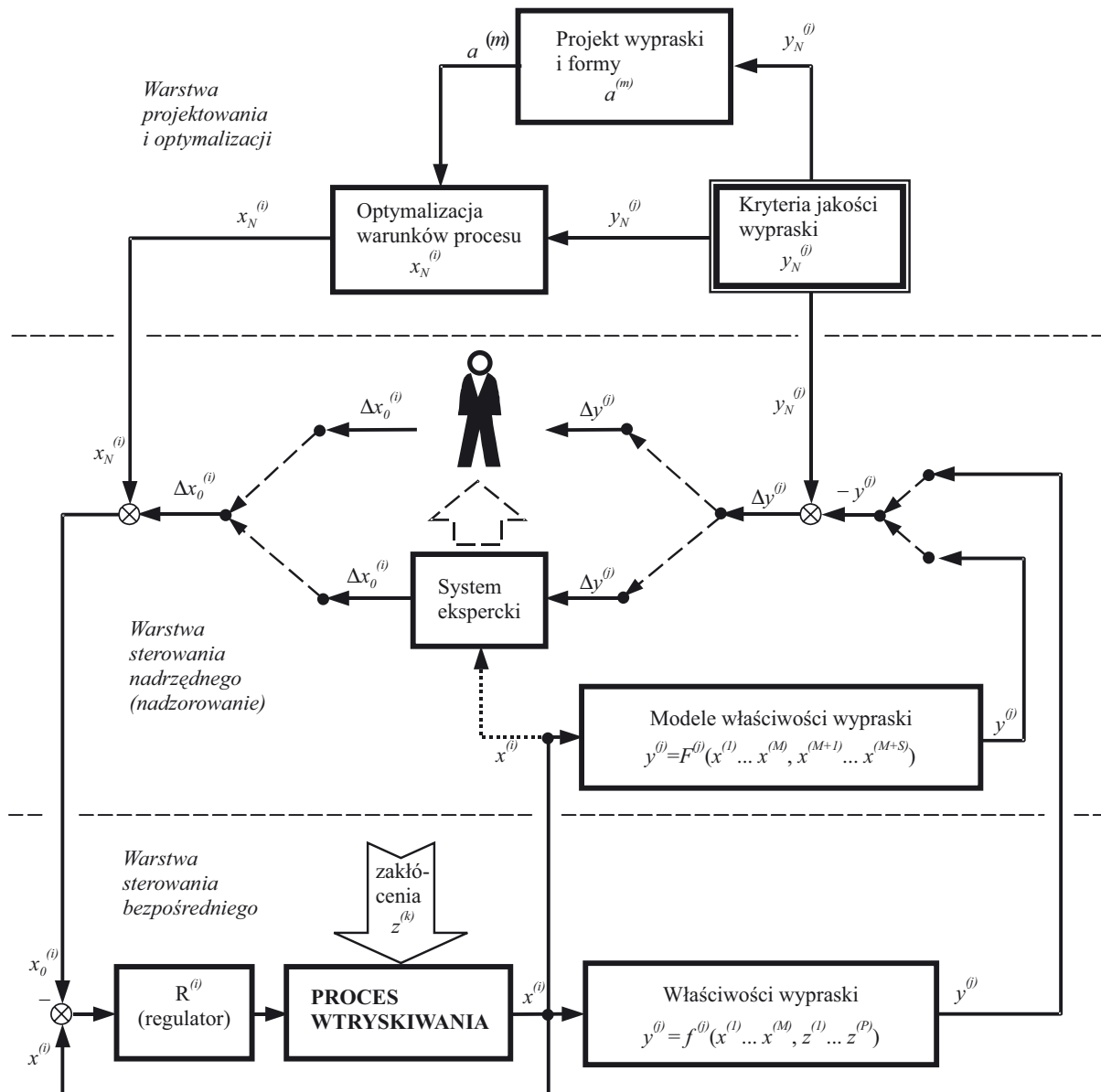
Końcowe właściwości wypraski wtryskowej są kształtowane podczas sekwencji czterech zasadniczych faz cyklu wtryskiwania: uplastyczniania (porcji wdozowanej w poprzednim cyklu), wtrysku, docisku i chłodzenia. Teoretycznie biorąc, powinno być zatem możli-

we diagnozowanie i korygowanie przebiegu tego procesu w toku jednego i tego samego cyklu, tak jak pokazano w dolnej części rys. 3. Taka procedura *nadzorowania w czasie rzeczywistym* pozwoliłaby na istotne skrócenie czasu reakcji na wykryte nieprawidłowości, minimalizując przy tym prawdopodobieństwo wytworzenia wadliwej wypraski.

Ideę natychmiastowego korygowania wtryskiwania podczas trwania cyklu stosuje m.in. producent wtryskarek ENGEL M.B.H. (Austria). Układ sterowania w wytwarzanych przez niego maszynach jest wyposażony w moduł o nazwie *Microflow* [8, 9]. Moduł ten — na podstawie wyznaczonych uprzednio zależności masy (wymiarów) wypraski w funkcji liczby płynięcia (wskaźnika obliczanego jako całka z ciśnienia hydraulicznego w siłownikach wtryskowych w funkcji czasu fazy wtrysku) oraz ciśnienia docisku — tak dobiera wartość ciśnienia w fazie docisku, aby skompensować przewidywane, spowodowane zaburzeniami liczby płynięcia, odchylenia właściwości wypraski. Dzięki temu prognoza oraz kompensacja błędów masy (wymiarów) odbywają się w tym samym cyklu wtryskiwania.

SEKWENCYJNA TRÓJETAPOWA METODA NADZOROWANIA WTRYSKIWANIA W CZASIE RZECZYWISTYM

Automatyczną korekcję przebiegu procesu wtryskiwania realizowaną w metodzie *Microflow* wykonuje się



Rys. 2. Hierarchiczna, wielopoziomowa struktura nadzorowania procesu wtryskiwania (liniami przerywanymi zaznaczono alternatywne ścieżki przepływu informacji)

Fig. 2. Hierarchical multilayer structure of the injection molding process supervision (dashed lines show the alternative paths of information flow)

tylko w fazie docisku. Cykl wtryskiwania obejmuje, jak już wspomniano, cztery podstawowe fazy, z których każda potencjalnie wywiera wpływ na właściwości wypraski. Celem prowadzonych przez autora badań było opracowanie algorytmicznej, obejmującej wszystkie fazy cyklu, metody diagnozowania i natychmiastowego korygowania przebiegu procesu w toku trwania tego samego cyklu wtryskiwania.

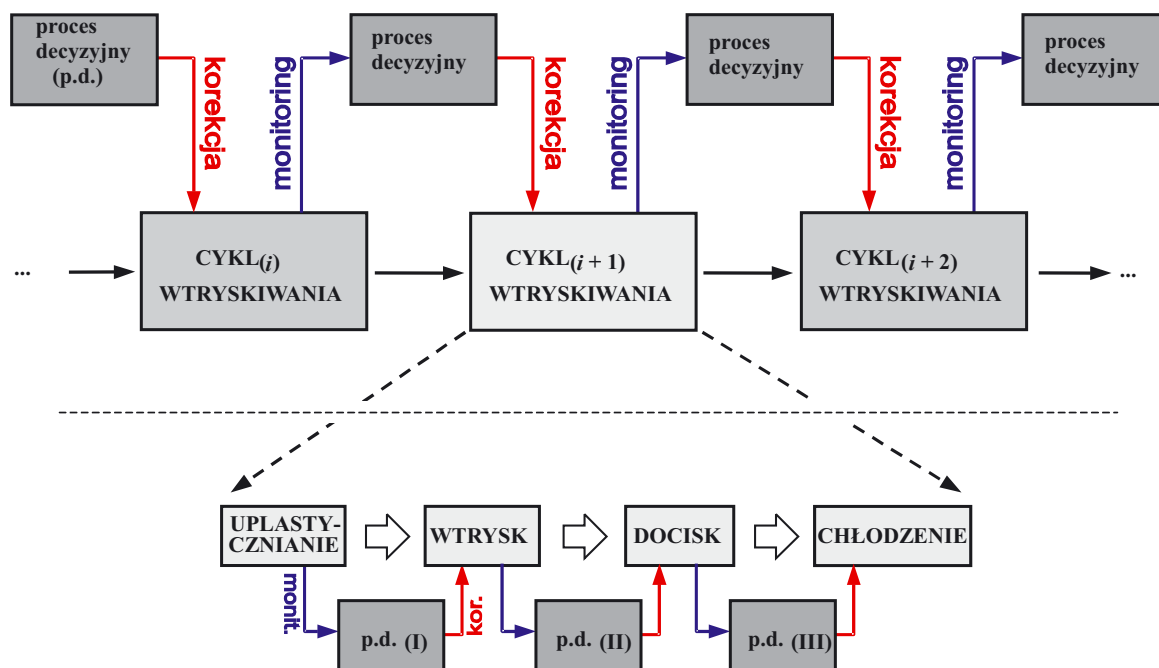
Zaproponowano algorytm nadzorowania procesu wtryskiwania polegający na sekwencyjnej, trój etapowej kompensacji prognozowanych odchyśleń właściwości wypraski od wartości nominalnych. Odchylenia te są spowodowane zakłóceniami parametrów wolnozmiennych procesu (temperatury formy T_f oraz temperatury uplastycznionego tworzywa T_t), a ich kompensacji do-

konuje się na drodze odpowiedniego doboru wartości czynników szybko sterowalnych, tj. prędkości wtrysku v_w , ciśnienia docisku p_d oraz czasu chłodzenia t_{ch} .

Na rysunku 4 przedstawiono schemat blokowy ilustrujący algorytm zaproponowanej metody. Stałe $T_{f(N)}$, $T_{t(N)}$, $v_{w(N)}$, $p_{d(N)}$ oraz $t_{ch(N)}$ to nominalne wartości odpowiednich zmiennych sterujących procesem, z zachowaniem których, w wyniku niezakłóconego (nominalnego) przebiegu cyklu wtryskiwania, otrzymuje się wypraskę o nominalnej długości $L_{(N)}$ i o wytrzymałości na rozciąganie $R_{m(N)}$.

Diagnozę oraz ewentualną korektę przebiegu cyklu realizuje się trój etapowo:

I Tuż przed rozpoczęciem fazy wtrysku oblicza się wartość korekty prędkości wtrysku $\Delta v_{w(1)}$ tak, aby



Rys. 3. Schemat blokowy nadzorowania cyklu wtryskiwania w czasie rzeczywistym, tj. w toku tego samego cyklu (u dołu) na tle klasycznego (w następnym cyklu) procesu wtryskiwania (u góry)

Fig. 3. Block scheme of supervision of real-time injection molding i.e. during the same cycle (bottom) in comparison with classical supervision of injection molding in the next cycle (top)

wtrysk z prędkością $v_{w(N)} + \Delta v_{w(I)}$ skompensował negatywny wpływ odchylenia temperatury formy ΔT_f i temperatury tworzywa ΔT_t na nadzorowane właściwości wypraski.

- II Po zakończeniu fazy wtrysku oblicza się wartość korekty ciśnienia docisku $\Delta p_{d(II)}$ tak, aby faza docisku pod ciśnieniem $p_{d(N)} + \Delta p_{d(II)}$ skompensowała prognozowane odchylenia charakterystyk jakości wypraski spowodowane także zakłóceniami prędkości wtrysku.
- III Przed rozpoczęciem fazy chłodzenia modyfikuje się czas chłodzenia [korekta $\Delta t_{ch(III)}$] w sposób zapewniający otrzymanie wypraski o cechach identycznych jak nominalne bądź do nich zbliżonych.

Jak widać, w zaproponowanej metodzie uwzględnia się, oprócz zakłóceń parametrów wolnozmiennych ΔT_f i ΔT_t , także zakłócenia przebiegu faz wtrysku i docisku.

MODELOWANIE WŁAŚCIWOŚCI WYPRASKI

Podstawowym elementem opracowanej metody nadzorowania (sterowania nadrzędnego) są modele zależności odchylenia nadzorowanych cech wypraski (tu wymiaru podłużnego L oraz wytrzymałości na rozciąganie R_m) od ich wartości nominalnych w funkcji pięciu głównych zmiennych procesu wtryskiwania:

$$\begin{aligned} \Delta L(\Delta T_f, \Delta T_t, \Delta v_w, \Delta p_d, \Delta t_{ch}); \\ \Delta R_m(\Delta T_f, \Delta T_t, \Delta v_w, \Delta p_d, \Delta t_{ch}) \end{aligned} \quad (1)$$

Na podstawie tych modeli dokonuje się zarówno prognozy właściwości wyprasek na każdym z trzech

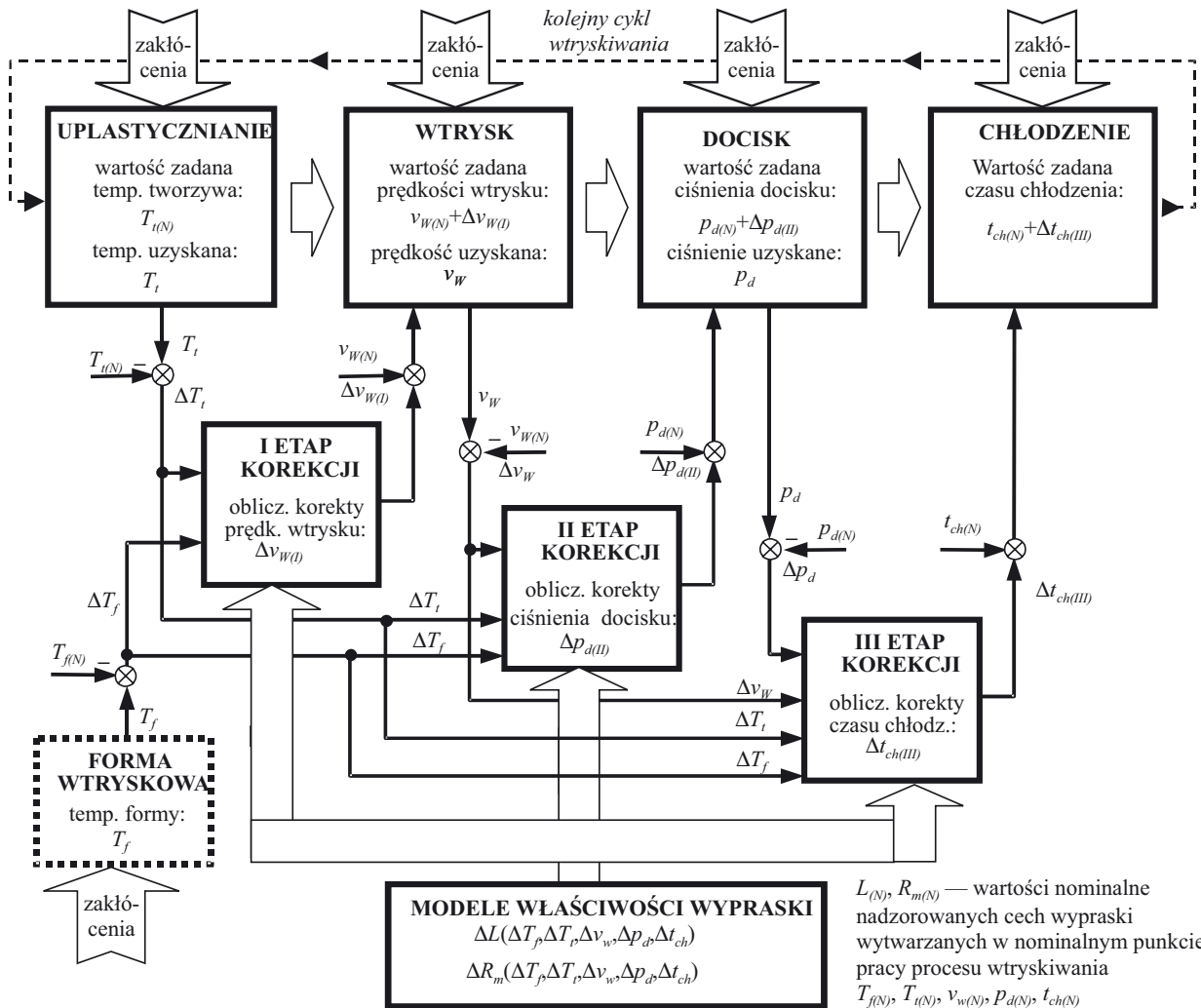
etapów korekcji, jak i doboru optymalnych wartości korygujących $\Delta v_{w(I)}$, $\Delta p_{d(II)}$, $\Delta t_{ch(III)}$.

Na potrzeby doświadczalnej weryfikacji opracowanego algorytmu skonstruowano modele wspomnianych zależności odchylenia ΔL i ΔR_m znormalizowanej wypraski z PE-LD (PN-EN ISO 527:1998, próbka nr 2 — „wiosełko”). Modele budowano dwoma sposobami:

- modele doświadczalne (regresji) — wykorzystując techniki doświadczalne z zastosowaniem teorii planowania eksperymentu oraz
- modele rozmyte — na podstawie wiedzy eksperckiej (technologicznej).

W modelowaniu doświadczalnym posłużono się sekwencyjną procedurą zwaną planowaniem kompozycyjnym, polegającą na przeprowadzeniu serii uzupełniających się doświadczeń według tzw. planów eksperymentów, w wyniku których do wielomianu regresji są dołączane kolejne wyrazy o coraz wyższych stopniach [10, 11]. Na pierwszym etapie wykonano serię doświadczeń według planu frakcyjnego dwuwartościowego 2^{5-1} pozwalającego na wyznaczenie funkcji regresji w postaci wielomianu pierwszego stopnia. Następnie uzupełniono plan z etapu pierwszego o układy eksperymentalne punktów gwiazdnych (plan rotabilny), i ostatecznie, aproksymowano poszukiwane zależności wielomianami drugiego stopnia. Szczegółowy opis przebiegu eksperymentu oraz otrzymanych rezultatów zawarto w [5].

Skonstruowane metodami doświadczalnymi modele skurczu i wytrzymałości wypraski stanowiły także podstawę do budowy analogicznych modeli, ale w wspomnianej strukturze rozmytej [12, 13] w przestrzeni czynni-



Rys. 4. Schemat blokowy trój etapowej, sekwencyjnej metody diagnozowania i korygowania cyklu wtryskiwania tworzyw termoplastycznych

Fig. 4. Block diagram of three-stage sequential method of diagnosis and correction of the cycle of thermoplastic polymer injection molding

kowej rozszerzonej względem modeli regresji. Opracowano oryginalną metodę „konwersji” modelu regresji do postaci rozmytej i „wprowadzania” do niego wiedzy eksperckiej. Rozmyta postać modeli nadzorowanych cech wypraski pozwoliła na zrealizowanie wielokryterialnego wariantu zaproponowanej metody sterowania nadrzędnego, tj. jednoczesnego sterowania skurczem i wytrzymałością wypraski, a także umożliwiła uogólnienie otrzymanych wyników (modeli wyznaczonych zależności) w odniesieniu do innych procesów wtryskiwania. Etapy modelowania rozmytego oraz budowę i rezultaty działania rozmytych algorytmów korygujących przebieg wtryskiwania opisano w cz. II niniejszego artykułu.

OBLICZANIE SUBOPTYMALNYCH WARTOŚCI KORYGUJĄCYCH PRZEBIEG WTRYSKIWANIA

Zgodnie z nakreśloną już koncepcją nadzorowania procesu wtryskiwania, korygowanie właściwości wy-

prasek odbywa się na trzech kolejnych etapach cyklu obejmujących fazy wtrysku, docisku oraz chłodzenia. Zadaniem algorytmu korygującego proces jest zatem obliczenie wartości korekt $\Delta v_{w(I)}$, $\Delta p_{d(II)}$ oraz $\Delta t_{ch(III)}$, zapewniających wytworzenie wypraski o pożądanych właściwościach pomimo działania czynników zakłócających. W omawianym w tej części pracy algorytmie deterministycznym, tj. opierającym się na modelach regresji (funkcyjnych), rozpatruje się przypadek nadzorowania tylko jednej charakterystyki jakości — wymiaru podłużnego L , w odróżnieniu od wielokryterialnego algorytmu rozmytego omawianego w cz. II.

Zadanie znalezienia suboptymalnych wartości korygujących $\Delta v_{w(I)}$, $\Delta p_{d(II)}$, $\Delta t_{ch(III)}$ na I etapie korekcji (tuż przed rozpoczęciem fazy wtrysku) sprowadza się do rozwiązania równania z trzema niewiadomymi:

$$f(\Delta T_f = \text{const} \equiv C_1, \Delta T_t = \text{const} \equiv C_2, \Delta v_{w(I)}, \Delta p_{d(II)}, \Delta t_{ch(III)}) = 0 \quad (2)$$

gdzie: f — wyznaczony model regresji odchylenia nadzorowanej właściwości wypraski od wartości nominalnej [zależność

(1)], ΔT_f oraz ΔT_t — zmierzone wartości odchylenia temperatury formy i tworzywa w bieżącym cyklu.

Ponieważ modele regresji (1) mogą mieć ogólną postać wielomianu drugiego stopnia, to rozwiązanie równania (2) nie jest zadaniem łatwym. Oddzielnej dyskusji wymagają dwa przypadki:

— równanie (2) nie ma pierwiastków rzeczywistych w dziedzinie ograniczonej przez zakresy zmienności argumentów,

— równanie (2) ma co najmniej jedno rozwiązanie.

Przypadek pierwszy oznacza, że nie można dobrać takich wartości korygujących proces (w ich obranych zakresach zmienności), które zapewniłyby uzyskanie wypraski o nominalnych właściwościach. W takiej sytuacji optymalnymi wartościami korygującymi proces [$\Delta v_{w(I)}$, $\Delta p_{d(I)}$, $\Delta t_{ch(I)}$] będą te, dla których moduł odchylenia właściwości wypraski od wartości nominalnej jest najmniejszy:

$$f(C_1, C_2, \Delta v_{w(I)}, \Delta p_{d(I)}, \Delta t_{ch(I)}) = \min |f(C_1, C_2, \Delta v_w, \Delta p_d, \Delta t_{ch})| \quad (3)$$

W drugim przypadku równanie (2) może mieć nieskończenie wiele rozwiązań [w interpretacji geometrycznej równanie (2) jest ogólnym równaniem powierzchni drugiego stopnia, np. elipsoidy obrotowej]. Należało zatem określić kryterium wyboru „najlepszego” zestawu trzech wartości korygujących spośród wszystkich spełniających równanie (2). Zdecydowano, że optymalnym „punktem” [określonym przez $\Delta v_{w(I)}$, $\Delta p_{d(I)}$, $\Delta t_{ch(I)}$] będzie punkt najmniej odległy od początku układu współrzędnych (0,0,0), a więc spośród wszystkich kombinacji wartości korygujących zapewniających otrzymanie wypraski o pożądanym właściwościach wybrano tę, która w najmniejszym stopniu ingeruje w proces [zmienne korygujące $\Delta v_{w(I)}$, $\Delta p_{d(I)}$, $\Delta t_{ch(I)}$ są także „odchyleniami” od wartości nominalnych $v_{w(N)}$, $p_{d(N)}$, $t_{ch(N)}$].

Rozwiązanie przedstawionego zagadnienia obliczania suboptymalnych wartości korygujących przebieg procesu wyłącznie przy użyciu rachunku symbolicznego jest złożone i mogłoby stanowić temat oddzielnej pracy z zakresu wielowymiarowej geometrii analitycznej. Tak więc dla potrzeb konstruowanego algorytmu nadzorowania wtryskiwania wykorzystano numeryczne metody obliczeniowe.

Na drugim etapie korekcji procesu (przed fazą docisku — por. rys. 4) w równaniu (2) występują dwie niewiadome — $\Delta p_{d(II)}$ i $\Delta t_{ch(II)}$ — stanowiące poszukiwane wartości korygujące ($\Delta v_w = \text{const} \equiv C_3$), a na etapie trzecim — jedna niewiadoma $\Delta t_{ch(III)}$ ($\Delta p_d = \text{const} \equiv C_4$).

METODYKA TESTOWANIA OPRACOWANEGO ALGORYTMU STEROWANIA NADRZĘDNEGO

Skuteczność opracowanej metody oceniano z wykorzystaniem technik numerycznych (symulacyjnych) oraz na stanowisku badawczym — wtryskarce ślimako-

wej ze zmodernizowanym układem sterującym umożliwiającym implementację nowatorskich algorytmów nadzorowania [14].

Testom poddano trzy warianty omawianej metody nadzorowania:

— z deterministycznym algorytmem korekcji *DetL* opartym na modelu regresji długości wypraski, którego zadaniem było zapewnienie nominalnej wartości skurczu przetwórczego,

— z algorytmem rozmytym *FuzL* na podstawie modelu długości wypraski o strukturze rozmytej, którego zadaniem było zapewnienie nominalnej (stałej) wartości skurczu,

— z wielokryterialnym rozmytym algorytmem korekcji *FuzLR_m*, którego zadaniem było zapewnienie nominalnej długości wypraski z jednoczesną maksymalizacją jej wytrzymałości.

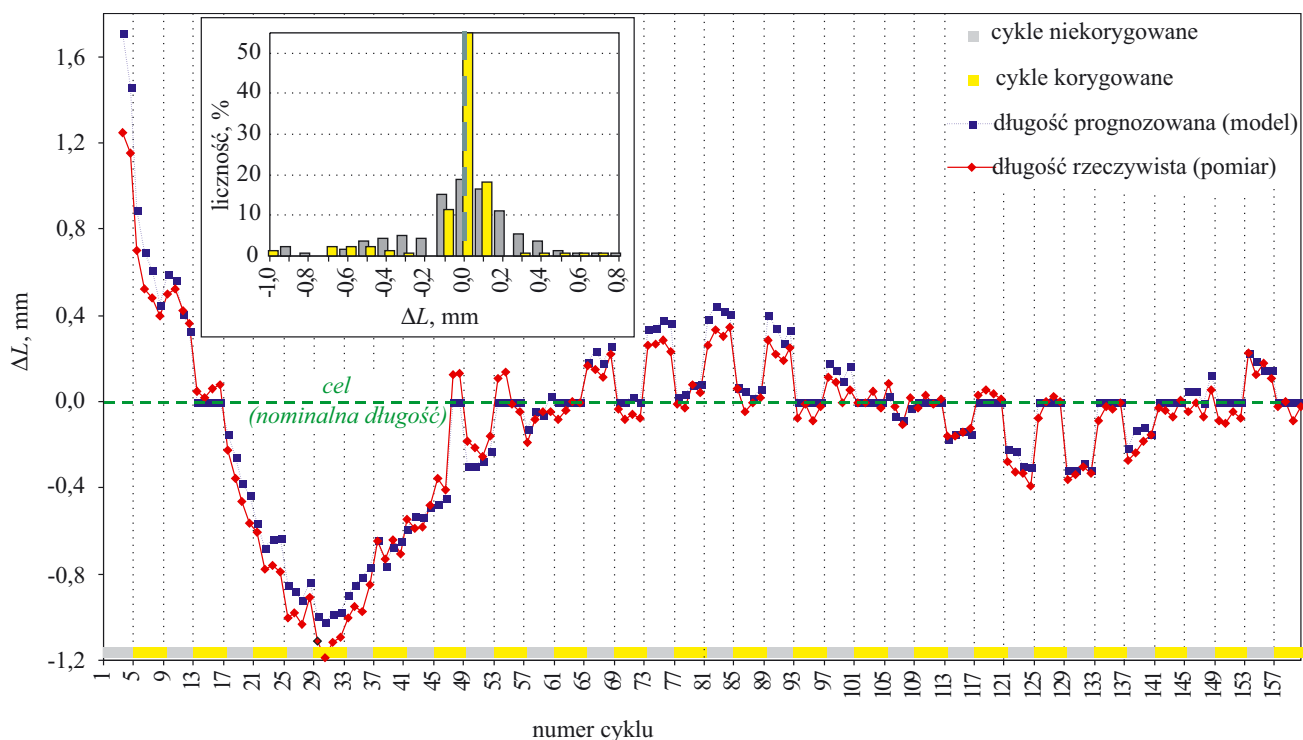
Rezultaty testów dwóch ostatnich wariantów metody przedstawiono w cz. II.

W rzeczywistych warunkach wytwórczych duża część wyprasek niespełniających kryteriów jakości powstaje w końcowej fazie „rozruchu” wtryskarki, tj. podczas stabilizacji warunków jej pracy oraz w wyniku zaburzenia rytmiczności procesu wtryskiwania. Dlatego też ocenę skuteczności działania opracowanej metody przeprowadzono właśnie w końcowej fazie rozgrzewania formy wtryskowej oraz cylindra wtryskowego ($\Delta T_f \approx -20$ °C, $\Delta T_t \approx -30$ °C), następnie podczas przeregulowania wartości obu tych zmiennych ($\Delta T_f \approx +10$ °C, $\Delta T_t \approx +15$ °C) — charakterystycznego dla starszych układów regulacji, aż do ustabilizowania temperatury ($\Delta T_f \approx \pm 3$ °C, $\Delta T_t \approx \pm 4$ °C). W tym czasie wykonano ok. 160 cykli wtryskiwania, po czym wtryskiwanie przerwano i obniżono temperaturę cylindra wtryskowego. Po upływie 60 min proces wznowiono i kontynuowano aż do ponownego ustabilizowania warunków pracy wtryskarki, co obejmowało kolejne 170—190 cykli.

Aby ocenić skuteczność działania testowanych metod korekcji wtryskiwania załączano i wyłączało działanie algorytmów korygujących przebieg procesu przemienne co 4 cykle a następnie porównywano właściwości wyprasek uzyskanych w cyklach niekorygowanych z właściwościami wyprasek wytworzonych w cyklach z włączonym algorytmem.

WYNIKI TESTÓW DOŚWIADCZALNYCH

Na rysunku 5 przedstawiono wyniki testu wariantu metody z algorytmem deterministycznym *DetL*. Na wykresie zaznaczono odchylenia od wartości nominalnej (kolor czerwony) długości wyprasek wyprodukowanych w kolejnych cyklach wtryskiwania podczas pierwszej fazy testu („rozruch” wtryskarki) oraz odchylenia długości wyprasek (kolor niebieski) aproksymowane wyznaczonym wcześniej modelem regresji (1). W cyklach oznaczonych na osi poziomej kolorem żółtym algorytm korygowania procesu był aktywny, w przeciwnie-



Rys. 5. Rzeczywiste oraz modelowe odchylenie długości wypraski (ΔL) od wartości nominalnej w kolejnych cyklach wtryskiwania podczas testowania algorytmu korygującego DetL (faza „rozgrzewania” wtryskarki). Algorytm sterujący przemiennie włączany i wyłączany co 4 cykle

Fig. 5. Measured and modeled length deviation of molding (ΔL) from nominal value in subsequent injection molding cycles during the test of correction algorithm DetL (heating phase of injection molding machine). Control algorithm alternately turned on and off each four cycles

stwie do cykli zaznaczonych kolorem szarym, w których działanie algorytmu było celowo wyłączane.

Jak widać, test wykazał dużą skuteczność opracowanej metody minimalizowania odchylenia długości wypraski od wartości nominalnej. Brak zadowalającego efektu korekcji w cyklach 21–40 wynikał z ograniczenia dopuszczalnych wartości korekt $\Delta v_{w(I)}$, $\Delta p_{d(II)}$, $\Delta t_{ch(III)}$, uniemożliwiającego dokonanie skutecznej kompensacji zmniejszenia długości wypraski spowodowanego dużymi dodatnimi odchyleniami temperatury formy i tworzywa.

Porównanie rozkładów odchylenia długości wypraski z cykli bez korekcji i z pełną korekcją (wstawka na rys. 5, histogramy dotyczące wyprasek z całego testu — 330 cykli) potwierdza bardzo dużą skuteczność algorytmu. Rozproszenie ΔL w cyklach z aktywnym algorytmem korygującym zmalało prawie dwukrotnie w stosunku do rozproszenia ΔL w cyklach niekorygowanych, ponadto ok. 50 % wyprasek charakteryzuje się wartością ΔL z przedziału od $-0,05$ mm do $+0,05$ mm [$L_{(N)} = 143,5$ mm].

Warto podkreślić, że to odnotowane dwukrotne zmniejszenie odchylenia standardowego nadzorowanej charakterystyki jakości odpowiada dwukrotnemu wzrostowi wartości wskaźnika zdolności potencjalnej procesu c_p [1]. Na przykład, wadliwość procesu wtryskiwania, w którym początkowo wytwarza się statystycznie 3 wadliwe wypraski na 1000 sztuk, maleje — po za-

stosowaniu zaproponowanej metody nadzorowania — do pojedynczych wadliwych sztuk na dziesiątki milionów cykli (w warunkach spełnionego założenia o normalności rozkładów).

Na uwagę zasługuje duża niezgodność wartości modelowej z rzeczywistą długością wypraski w cyklach 3. oraz 4., tj. wtedy, gdy temperatura formy i tworzywa jednocześnie osiągają bardzo niskie wartości. Oznacza to, że zastosowany model regresji (1) może być nieodpowiedni w obszarach przestrzeni czynnikowej mocno oddalonych od punktu centralnego. Ujawnioną nieadekwatność modelu usunięto w toku dalszych badań w wyniku konwersji do postaci rozmytej, a następnie wprowadzenia do modelu wiedzy eksperckiej (cz. II).

PODSUMOWANIE

Opracowano w pełni algorytmiczną, sekwencyjną metodę diagnozowania i korygowania przebiegu procesu wtryskiwania w czasie rzeczywistym. W odróżnieniu od wielu innych zautomatyzowanych metod, prognozowane odchylenia nadzorowanych właściwości wypraski kompensowane są tu natychmiast w tym samym cyklu wtryskiwania, w wyniku skorygowania przebiegu faz wtrysku, docisku oraz chłodzenia.

Testowany wariant opracowanej metody — z algorytmem deterministycznym opartym na doświadczalnie

wyznaczonym modelu długości znormalizowanej wypraski z PE-LD — okazał się bardzo skuteczny. Rozproszenie długości wyprasek (ΔL) wytworzonych w cyklach korygowanych zmniejszyło się dwukrotnie w stosunku do rozproszenia z cykli niekorygowanych, przebiegających w warunkach takich samych lub bardzo zbliżonych poziomów czynników zakłócających.

LITERATURA

1. Płaska S.: „Wprowadzenie do statystycznego sterowania procesami technologicznymi”, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2000.
2. Park K., Ahn J.: *J. Mater. Process. Technol.* 2004, **146**, 221.
3. Min B. H.: *J. Mater. Process. Technol.* 2003, **136**, 1.
4. Nitkiewicz Z., Koszkuł J., Sobczak R.: „Wpływ parametrów wtryskiwania na właściwości fizyczne i skurcz przetwórczy polipropylenu i jego kompozytu z włóknem szklanym” w pracy zbiorowej „Materiały polimerowe i ich przetwórstwo”, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2000.
5. Bogucki M., Płaska S., Stączek P.: *Polimery* 2003, **48**, 714.
6. Woll S. L. B., Cooper D. J.: *Polym. Eng. Sci.* 1997, **37**, 801.
7. Woll S. L. B., Cooper D. J.: „An Advanced Method for Injection Molding Part Quality Control”, materiały „Annual Technical Conference of the Society of Plastic Engineers” 1996, **54**, 1975.
8. Andrzejak J.: „Programy sterowania wtryskarek, warunkujące wysoką jakość produkcji” w pracy zbiorowej „Kierunki rozwoju technologii wtrysku PLASTECH '94”, Wydawnictwo Przemysłowe WEMA, Warszawa 1994.
9. „Programme zur qualitatssicherung fur EC100/CC100”, dokumentacja techniczna wtryskarki, ENGEL Vertriebsgesellschaft M.B.H., Niemcy 1995.
10. Polański Z.: „Planowanie doświadczeń w technice”, PWN, Warszawa 1984.
11. Myers R., Montgomery D.: „Response Surface Methodology”, John Wiley and Sons, Nowy Jork, USA 1995.
12. Pedrycz W.: „Fuzzy Control and Fuzzy Systems”, Wiley, Nowy Jork, USA 1989.
13. Yager R., Filev D.: „Podstawy modelowania i sterowania rozmytego”, WNT, Warszawa 1995.
14. Bogucki M., Płaska S., Stączek P.: „Komputerowy system pomiarowo-sterujący dla wtryskarek ślimakowych” w pracy zbiorowej z [4].

Otrzymano 21 I 2005 r.

Wersja skorygowana 19 V 2007 r.