

ZASTOSOWANIE REGULATORA TYPU MPC DO STEROWANIA PROCESEM SUSZENIA KONWEKCYJNEGO

Dariusz Tomkiewicz

Katedra Automatyki, Politechnika Koszalińska

Streszczenie. W artykule zostały zaprezentowane badania związane z zastosowaniem regulatora MPC (Model Predictive Control) do sterowania procesem suszenia konwekcyjnego. Związek pomiędzy natężeniem wypływu materiału suszonego a wilgotnością zboża i innymi mierzonymi parametrami jest określony za pomocą hybrydowego modelu składającego się z równania różniczkowego cząstkowego i sieci neuronowej. Sieć neuronowa zapewnia uwzględnienie nieliniowości związanych z dynamiką procesu suszenia. Wagi sieci estymowane są w czasie rzeczywistym przy użyciu algorytmu rozszerzonego filtru Kalmana. Pozwala to na samoczynne adaptowanie się modelu do zmieniających się warunków procesu oraz rodzaju suszonego materiału

Słowa kluczowe: wilgotność ziarna, sterowanie adaptacyjne, suszenie, identyfikacja, wilgotność

Wprowadzenie

Proces suszenia należy do najbardziej energochłonnych procesów występujących w przemyśle. Wynika stąd potrzeba oszczędnego gospodarowania ciepłem w trakcie tego procesu, zwłaszcza wobec stale rosnących kosztów nośników energii.

Jedną z metod ograniczenia zużycia energii może być zastosowanie nowych, lepszych metod sterowania procesem suszenia. Algorytm sterowania powinien zapewniać uzyskiwanie takiej wartości wyjściowej wilgotności ziarna aby uzyskać minimalną wariancję odchyłki sterowania.

Nowoczesne algorytmy sterowania wymagają znajomości dynamiki sterowanego procesu. Jest to jednak trudne w przypadku procesów niestacjonarnych, których dynamika nie jest dostatecznie dokładnie rozpoznana i opisana analitycznie. Takim procesem jest proces suszenia konwekcyjnego.

W celu zapewnienia lepszych właściwości sterowania został zaimplementowany algorytm regulacji wykorzystujący opracowaną metodę identyfikacji procesu [Tomkiewicz 1997] pozwalającą na uzyskanie informacji o dynamice przebiegu procesu suszenia, która jest zawarta w zmianach wilgotności i temperatury powietrza suszącego. Dzięki tej informacji możliwa jest adaptacyjna zmiana parametrów regulatora sterującego procesem suszenia, a tym samym optymalne sterowanie procesem.

Cel badań

Obecnie stosowane adaptacyjne układy sterowania nadzorujące proces suszenia wykorzystują liniowe modele procesu. Modele te nie obejmują w swojej strukturze nieliniowości charakterystycznych dla procesu suszenia. Modele analityczne nie są wykorzystywane do sterowania. Wynika to z tego, że wiedza teoretyczna o procesie suszenia konwekcyjnego jest niewystarczająca do tego, aby otrzymać model o wystarczającej dokładności. Istnieją także przykłady zastosowania nieliniowych opisów procesu suszenia konwekcyjnego używane w układach regulacji. Wykorzystują one sieci neuronowe lub logikę rozmytą jednak w tych przypadkach zachodzi konieczność tworzenia modelu matematycznego osobno dla każdego gatunku i odmiany ziarna.

Tak więc obecnie stosowane metody identyfikacji modelu procesu suszenia konwekcyjnego bazują na wykorzystaniu modeli o strukturze liniowej, która nie odzwierciedla w pełni dynamiki procesu.

Celem pracy było sprawdzenie z zastosowaniem metod symulacji komputerowej przydatności metody identyfikacji wykorzystującej model hybrydowy składający się z sieci neuronowej i równania różniczkowego w układzie sterującym procesem konwekcyjnego suszenia ziarna zbóż.

Ważność tej problematyki wynika z dwóch aspektów:

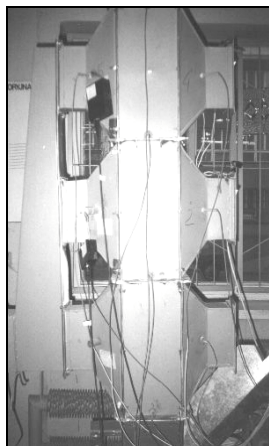
- szybko rosnących kosztów energii, która jest zużywana w dużych ilościach w instalacjach suszarniczych i wentylacyjnych,
- zwiększających się kosztów siły roboczej,
- stale rosnących wymagań jakościowych.

Metodyka

Obiektem sterowania jest suszarnia konwekcyjna daszkowa, która została zbudowana w laboratorium Katedry Inżynierii Spożywczej Politechniki Koszalińskiej. Jest to zmniejszony pod względem wymiarów przestrzennych model przemysłowej suszarni daszkowej (rys. 1). Ten typ suszarni używany jest najczęściej do suszenia zboża. Materiałem suszonym używanym podczas badań były ziarniaki pszenicy.

Suszarnia ta składa się z trzech segmentów o wymiarach 0,3 x 0,2 x 0,43 m każdy. W górnej części suszarni złożonej z dwu segmentów zachodzi proces odparowywania wilgoci z powierzchni ziarna. Powietrze wdmuchiwane do tej strefy jest wstępnie podgrzewane przez grzałki elektryczne. Materiał po przejściu przez strefę suszenia przechodzi do tzw. strefy chłodzenia składającej się z jednego (dolnego) segmentu suszarni. Do tej strefy włączane jest zimne powietrze. Strefa ta służy do obniżenia temperatury ziarna do temperatury zbliżonej do temperatury otoczenia.

W tego typu suszarniach proces suszenia odbywa się w sposób ciągły. W trakcie procesu suszenia powietrze przenika przez warstwę ziarna oddając część energii na jego ogrzanie. Woda znajdująca się na powierzchni ziaren odparowuje. Zwiększa się wilgotność powietrza i równocześnie maleje jego temperatura. Oziębione, wilgotne powietrze jest wyciągane poprzez wentylator promieniowy na zewnątrz suszarni.



Rys. 1. Laboratoryjna suszarnia daszkowa
Fig. 1. Laboratory roof drier

Przeprowadzono cykl doświadczeń podczas których uzyskano dane opisujące dynamikę procesu suszenia w suszarni konwekcyjnej. Podczas doświadczeń suszarnia była w całości zasypywana wilgotnym zbożem. Następnie wtłaczano do wnętrza suszarni ogrzane powietrze i uruchamiano układ wysypu zboża. Podczas doświadczeń rejestrowano zmiany temperatury i wilgotności powietrza na wejściu i wyjściu do każdego segmentu suszarni, zmiany temperatury i wilgotności zboża na wejściu do każdego z segmentów oraz prędkość przepływu powietrza i materiału suszonego. Wszystkie mierzone parametry procesu były rejestrowane w odstępach jednosekundowych z wyjątkiem wilgotności materiału. W celu określenia wilgotności materiału pobierano próbki materiału w odstępach piętnastominutowych a następnie określano ich wilgotność metodą suszarkową.

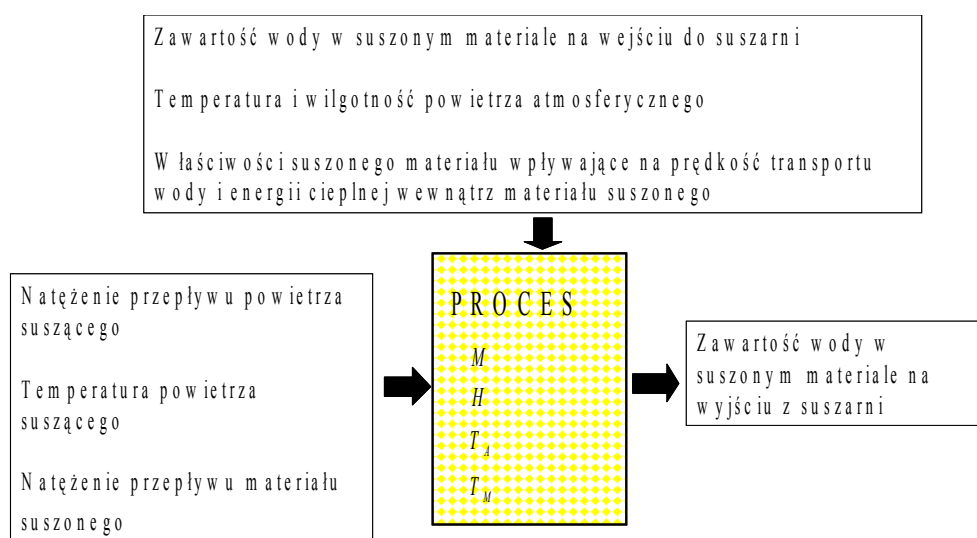
Matematyczny model procesu suszenia wykorzystany w trakcie badań algorytmu sterowania został przedstawiony w pracy [Tomkiewicz 2000]. Równania opisujące ten proces bazują na bilansie energii i masy. Do estymacji parametrów modelu zostały wykorzystane dane zebrane podczas doświadczeń. Dane te zostały wprowadzone do środowiska obliczeniowego Matlab. Posługując się procedurami znajdującymi się w Optimization Toolbox została przeprowadzona estymacja parametrów równań różniczkowych. Ze względu na charakter procesu do estymacji parametrów wybrano algorytmy optymalizacji używane do optymalizacji nieliniowej bez ograniczeń. Na podstawie kilku prób najbardziej niezawodnym okazał się algorytm Nelder–Meada. Model ten posłużył do sprawdzenia poprawności działania algorytmu sterującego.

Algorytm sterowania

Zmiennymi sterującymi w suszarni konwekcyjnej daszkowej są: temperatura powietrza suszącego, natężenie przepływu powietrza suszącego i natężenie przepływu materiału suszonego. Główną wielkością sterowaną jest zawartość wody w materiale suszonym. Czynniki powodującymi zakłócenia w układzie sterowania są: zmiana wilgotności wejścio-

wej powietrza suszącego, zmiana zawartości wody w materiale na wejściu oraz właściwości materiału suszonego wpływające na zmianę prędkości parowania wody i przenikanie ciepła. Zakłócenie to jest typowe dla materiałów biologicznych i wynika z różnicy w jego wewnętrznej budowie nie tylko pomiędzy gatunkami lecz również w obrębie jednej odmiany (rys. 2).

Proces konwekcyjnego suszenia zalicza się do procesów niestacjonarnych, nieliniowych i o parametrach rozłożonych. W przypadku gdy obiekt sterowania jest niestacjonarny jedną z najczęściej stosowanych metod jego regulacji jest zastosowanie adaptacyjnego algorytmu sterowania.



Rys. 2. Sygnały sterujące, sterowane i zakłócenia występujące podczas procesu suszenia

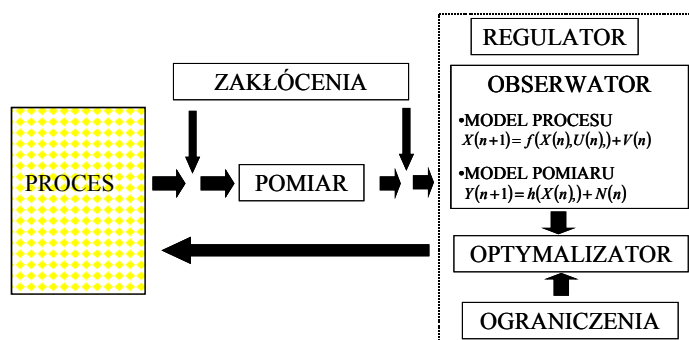
Fig. 2. Command signals, controlled signals, and disturbances occurring during drying process

Algorytm sterowania obiektem wykazującym cechy niestacjonarności wymaga ciągłej identyfikacji obiektu w celu zapewnienia nie tylko odpowiedniej jakości regulacji ale wręcz stabilności pracy obiektu. Dlatego w celu zapewnienia jakości regulacji konieczne jest dostrajanie algorytmów sterowania w trakcie procesu [Niederliński 1985]. Model matematyczny który na bieżąco uaktualnia swoje parametry tak aby jak najwierniej odzwierciedlać dynamikę procesu nazywamy obserwatorem.

Jednym z powszechnie stosowanych algorytmów sterowania w przypadku gdy mamy do czynienia z procesami o skomplikowanej dynamice jest algorytm MPC. Parametry algorytmu sterującego w tego typu regulatorze są na bieżąco optymalizowane podczas pracy tak aby wariancja odchyłki była minimalna (rys. 3).

Najważniejszym elementem regulatora MPC jest obserwator procesu. Zawiera on model procesu oraz w przypadku gdy mamy do czynienia z procesami niestacjonarnymi, algorytm modyfikujący parametry modelu matematycznego.

Proces suszenia jest procesem bardzo trudnym do opisanie matematycznego. Wynika to ze złożoności procesu, w czasie którego występuje wymiana masy i energii. Dużą trudność sprawia także wyznaczenie parametrów modelu matematycznego opisującego proces suszenia. Zależą one nie tylko od rodzaju materiału, jego wewnętrznej budowy lecz również od wilgotności początkowej, czasu suszenia oraz od warunków w jakich przeprowadzany jest proces. W czasie trwania suszenia zboża zmienia się również charakter tego procesu [Pabis 1982].



Rys. 3. Schemat działania regulatora MPC
Fig. 3. Diagram of the MPC controller operation

Fenomenologiczne modele matematyczne opisujące proces suszenia są trudne do wykorzystania. Dokładność tych modeli zależy od dokładności estymacji ich parametrów. Niestety zmieniają one swoją wartość w trakcie procesu. Wymagają zatem ciągłej estymacji w trakcie procesu suszenia. Dlatego zdecydowano się na inne podejście. Do celów estymacji wilgotności materiału wykorzystano zależność opisującą bilans masowy wody (1) zawartej w suszonym materiale i czynnika suszącym.

$$M_0 v_M \frac{\partial M}{\partial z} + \frac{\partial M}{\partial t} = -A_0 v_A \frac{\partial H}{\partial z} + \frac{\partial H}{\partial t} \quad (1)$$

Wykorzystanie tego równania umożliwia pozbycie się nieznanymi parametrów równania opisującego wymianę masy i energii (np. parametru określającego prędkość parowania wody z powierzchni ziaren). Model ten można przekształcić do równania o postaci (2).

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -\frac{A_0}{M_0} v_G \frac{\partial H}{\partial z} + \frac{\partial H}{\partial t} - v_M \frac{\partial M}{\partial z} \quad (2)$$

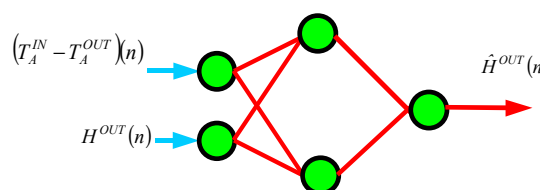
$$M(z, t) \Big|_{t=0} = M^{IN}$$

$$M(z, t) \Big|_{z=0} = M^{IN}$$

W równaniu tym brakuje powiązania pomiędzy temperaturą powietrza suszącego, która jest wielkością sterującą a wilgotnością ziarna. Aby znaleźć tę zależność należy zidentyfikować równanie określające zmianę wilgotności czynnika suszącego w czasie (3).

$$\frac{\partial H}{\partial t} = f(\cdot) \quad (3)$$

Do identyfikacji funkcji w równaniu (3) została użyta sieć neuronowa. Była to sieć jednokierunkowa typu perceptron wielowarstwowy składający się z trzech warstw: warstwy wejściowej, jednej warstwy ukrytej i warstwy wyjściowej (rys. 4).



Rys. 4. Schemat budowy sieci neuronowej wykorzystanej w obserwatorze
Fig. 4. Diagram of construction of a neural network used in the observer

Funkcja aktywacji neuronów znajdujących się w warstwie ukrytej była typu tangens hiperboliczny, neurony w warstwie wyjściowej miały funkcję aktywacji typu liniowego. Odpowiada to funkcji matematycznej przedstawionej w postaci równania (4) [Tadeusiewicz R. 1993].

$$\begin{aligned} \hat{H}^{OUT}(n) = & w_1^H(n) \tanh(w_{11}^I(n) \hat{H}^{OUT}(n-1) + w_{12}^I(n) d(n-1)) + \\ & + w_2^H(n) \tanh(w_{21}^I(n) \hat{H}^{OUT}(n-1) + w_{22}^I(n) d(n-1)) + N(n-1) \end{aligned} \quad (4)$$

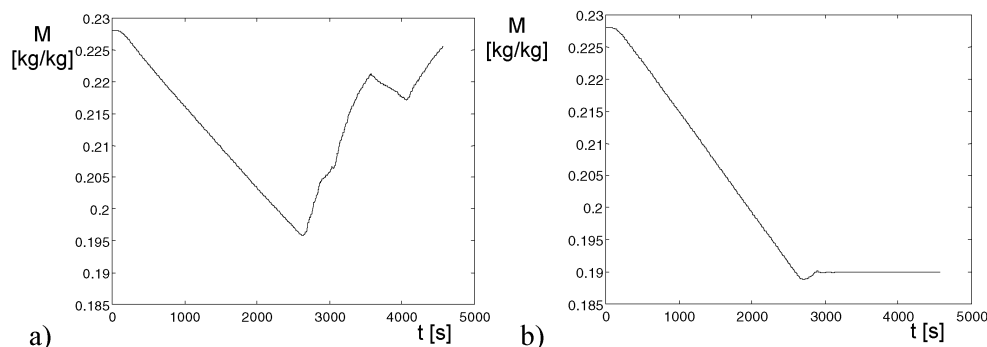
Jeżeli przyjmiemy, że wagi sieci są zmiennymi stanu to wektor zmiennych stanu ma postać równania (5)

$$W(n+1) = W(n) + V(n) \quad (5)$$

gdzie:

$$W(n) = \begin{bmatrix} w_1^H(n) \\ w_2^H(n) \\ w_{11}^I(n) \\ w_{12}^I(n) \\ w_{21}^I(n) \\ w_{22}^I(n) \end{bmatrix}.$$

Dzięki temu wykorzystano do adaptacyjnego uczenia sieci neuronowej algorytm Rozszerzonego Filtru Kalmana [Wan i in. 1996].



Rys. 5. Zmiana zawartości wody w ziarnie a) na wyjściu z pierwszego (górnego) segmentu suszarni, b) na wyjściu z drugiego segmentu suszarni

Fig. 5. Change of water content in the grain: a) at the outlet from the first (upper) segment of the drier, b) at the outlet from the second segment of the drier

W środowisku Matlab przeprowadzono doświadczenia weryfikujące poprawność działania regulatora. Zmiany zawartości wody w ziarnie (głównej wielkości sterowanej) przedstawiano na rysunku 5. Algorytm sterowania wpływał na zmianę zawartości wody poprzez zmianę prędkości przemieszczania zboża przez suszarnię. Suszarnia w chwili uruchomienia sterowania była całkowicie zasypana zbożem. Do momentu osiągnięcia zadanej wilgotności zboża algorytm sterowania nie uruchomił mechanizmu wysypu zboża. Następnie prędkość wysypu była tak dobierana aby skompensować symulowane zmiany zawartości wody na wejściu do suszarni (zawartość wody była zmieniana co piętnaście minut z $0,28 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$ na $0,227 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$). Po uruchomieniu mechanizmu wysypu algorytm tak sterował prędkością przemieszczania ziarna, że maksymalna odchyłka sterowania wynosiła $0,015 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ s.m.}$

Wnioski

Na podstawie doświadczeń symulacyjnych można stwierdzić, że zastosowana metoda sterowania w której w strukturze regulatora MPC zastosowano hybrydowy model poprawnie steruje procesem suszenia konwekcyjnego. Dzięki temu, że obserwator składał się z równania bilansu masy i sieci neuronowej której wagi były na bieżąco modyfikowane za pomocą Rozszerzonego Filtru Kalmana możliwa była adaptacja do zmieniających się warunków procesu. Obecnie trwają prace związane z modyfikacją suszarni laboratoryjnej tak aby można było w następnym etapie badań zweryfikować działanie algorytmu sterującego.

Bibliografia

- Niederliński A. 1985. Systemy komputerowe automatyki przemysłowej. T.2. Zastosowania. WNT Warszawa.
 Pabis S. 1982. Teoria konwekcyjnego suszenia produktów rolniczych. PWRiL Warszawa.

- Tadeusiewicz R.** 1993 Sieci neuronowe. Akademicka Oficyna Wydawnicza RM Warszawa.
- Tomkiewicz D.** 1997. Application of the Neural Network to the Identification Heat and Mass Exchange Process. Proceedings of the III Conference Neural Networks and Their Applications Częstochowa.
- Tomkiewicz D.** 2000. Inteligentny układ pomiaru wilgotności ziarna zbóż dla celów sterowania procesem suszenia. Praca doktorska, Politechnika Koszalińska.
- Wan E. A. Nelson A.T.** 1996 Neural Dual Extended Kalman Filtering: Application in Speech Enhancement and Monaural Blind Signal Separation. Internet.

USING OF THE MPC TYPE CONTROLLER FOR CONVECTION DRYING PROCESS CONTROL

Abstract. The article presents studies on the application of the MPC (Model Predictive Control) controller to operate convection drying process. The relationship between outflow rate of dried material and corn moisture content and other measured parameters is determined using a hybrid model consisting of partial differential equation and a neural network. The neural network ensures taking into consideration nonlinearities connected with drying process dynamics. Network weights are estimated in real time using extended algorithm of the Kalman filter. This allows the model to adapt automatically to changing process conditions and dried material type.

Key words: grain moisture content, adaptive control, drying, identification, humidity

Adres do korespondencji:

Dariusz Tomkiewicz; e-mail: dariusz.tomkiewicz@tu.koszalin.pl
Katedra Automatyki
Politechnika Koszalińska
ul Raławika 15
75-620 Koszalin