

Gerard BURSRY, Ryszard ROJEK

POLITECHNIKA OPOLSKA, WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI, AUTOMATYKI I INFORMATYKI,
INSTYTUT AUTOMATYKI I INFORMATYKI, ul. Sosnkowskiego 31, 45-272 Opole

Pewne aspekty wykorzystania sztucznych sieci neuronowych dla identyfikacji i sterowania procesem przemiału cementu

Dr inż. Gerard BURSRY

Stopień naukowy doktora nauk technicznych uzyskał w 2008 roku na Politechnice Opolskiej. Główny kierunek badań naukowych obejmuje zastosowanie sztucznych sieci neuronowych w zagadnieniach modelowania, identyfikacji oraz sterowania obiektami dynamicznymi.



e-mail: g.bursry@po.opole.pl

Prof. dr hab. inż. Ryszard ROJEK

Jest dyrektorem Instytutu Automatyki i Informatyki na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej. W 2007 roku uzyskał tytuł profesora, specjalizuje się w zakresie modelowania i sterowania procesów o parametrach rozłożonych, syntezy zaawansowanych algorytmów sterowania, zastosowań metod i technik sztucznej inteligencji w automatyce.



e-mail: kaeii@po.opole.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono wybrane aspekty zastosowania sztucznych sieci neuronowych do identyfikacji i sterowania energochłonnym procesem przemiału cementu. Jest to złożony nieliniowy proces dynamiczny. Sterowanie takim procesem z wykorzystaniem klasycznych układów regulacji nie jest efektywne. Zaproponowano zatem wykorzystanie niestandardowych algorytmów opartych na sieciach neuronowych. Do ich realizacji wykorzystano dane pomiarowe oraz wiedzę operatorów. Badania symulacyjne układu przeprowadzono w środowisku Matlab-Simulink pod kątem optymalizacji struktury sieci i wyboru odpowiedniego procesu uczenia. Uzyskane wyniki potwierdzają możliwości wykorzystania algorytmów neuronowych do sterowania procesem przemiału.

Słowa kluczowe: sieci neuronowe, identyfikacja, diagnostyka, sterowanie, przemiał cementu, młyn kulowy.

Some aspects of use of artificial neural networks for identification and control of cement grinding process

Abstract

This paper presents selected aspects of application of artificial neural networks to identification and control of the cement grinding process occurring in the closed-circuit ball mill (Fig. 1) [13, 14]. Cement grinding is a complicated, nonlinear, energy-consuming process. Control of the process by means of classical control systems is not effective. Therefore, nonstandard neural network algorithms combined with the inverse modeling method of Jordan and Jacon [2, 15, 18] are proposed for the purpose. The NARX neural network model (Fig. 3) is used, in addition to the expert operator knowledge developed on a basis of a number of experiments run at a domestic cement plant. Simulation runs in the Matlab/Simulink environment are directed to optimization of the network structure and selection of its adequate learning process. The obtained results enable concluding that the application of a neurocontroller to control of the grinding process can yield satisfactory process performance [4].

Keywords: neural networks, identification, diagnostics, control, cement grinding, ball mill.

1. Wstęp

Rosnąca złożoność nowoczesnych linii technologicznych procesów przemysłowych, a także potrzeba spełnienia wysokich wymagań dotyczących niezawodności oraz bezpieczeństwa ich pracy, stanowią duże wyzwanie dla projektantów układów automatyki. Rozpatrywany w artykule proces przemiału cementu odgrywa istotną rolę w przemyśle mineralnych materiałów budowlanych. Procesy te wykorzystywane są na wszystkich etapach produkcji cementu, od rozdrabniania surowca, paliwa aż do produktu finalnego tj. cementu. W krajowych zakładach cementowych podstawowym urządzeniem do przemiału klinkieru cementowego jest młyn kulowy [13]. Jest to obracający się walczyk, na wejście którego podawany jest surowiec, a na jego wyjściu otrzymuje się gotowy produkt - cement.

Produkcja cementu jest procesem bardzo energochłonnym. Dotyczy to przede wszystkim produkcji klinkieru, gdzie zużycie energii stanowi nawet 80% całkowitej energii wykorzystywanej w produkcji cementu. Średnie zużycie energii elektrycznej podczas produkcji wynosi ok. 90-130kWh na tonę cementu [9, 13, 14].

Podstawowe działania mające na celu obniżenie zużycia energii w przemyśle cementowym obejmują m. in. zastosowania nowych energooszczędnych układów mielenia cementu oraz bardziej racjonalnych układów sterowania nimi. W niniejszym artykule dyskutuje się ten drugi wątek proponując do realizacji układów sterowania procesem przemiału techniki bazujące na teorii sztucznych sieci neuronowych (SSN). Prace badawcze w obszarze zastosowań metod i technik sztucznej inteligencji w automatyce prowadzone są w Instytucie Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej od kilku lat. Przygotowano i obroniono w tym zakresie 5 prac doktorskich (J. Wrzuszczak, 1998; K. Olesiak, 2003; K. Bartecki, 2004; J. Korniak, 2005; G. Bursry, 2008) [1, 4, 16]. W niniejszym artykule przedstawiono pewne praktyczne aspekty wykorzystania sztucznych sieci neuronowych do identyfikacji i sterowania procesem przemiału cementu.

2. Sformułowanie problemu identyfikacji i sterowania

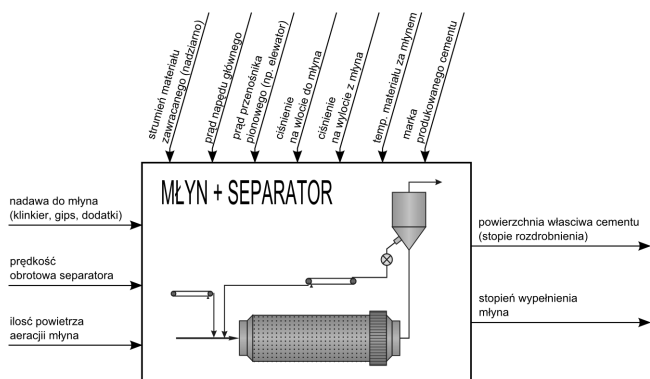
Wiele spośród stosowanych obecnie w przemyśle cementowym układów regulacji automatycznej to klasyczne układy z regulatorami PID. Algorytmy te dla większości typowych zastosowań dają zadowalające rezultaty. Jednak w przypadku obiektów (procesów) złożonych charakteryzujących się: m. in. znacznymi nieliniowościami, niestacjonarnością, wielowymiarowością, niepewnością i zmiennością losową parametrów, jakość sterowania może ulec znacznemu pogorszeniu, wymuszając przez to konieczność częstej ingerencji w nastawy regulatorów czy wyboru innej struktury układu regulacji [12]. Z tego względu w nowoczesnych układach sterowania w takich przypadkach coraz częściej stosuje się zaawansowane i niestandardowe algorytmy sterowania [2, 8, 18]. Jednocześnie, coraz więcej uwagi poświęca się również rozwiązaniom bazującym na metodach sztucznej inteligencji, w tym m. in. algorytmom wykorzystującym SSN. O atrakcyjności sieci neuronowych jako narzędzia do rozwiązywania zadań modelowania, identyfikacji, sterowania i diagnostyki, decydują ich korzystne własności [7, 11, 17].

Podstawą zadania sterowania rzeczywistym obiektem dynamicznym jest opracowanie jego odpowiedniego modelu matematycznego. W przypadku złożonych obiektów jakimi są układy przemiałowe, matematyczne odzwierciedlenie wszystkich praw fizycznych rządzących nimi jest trudne, często nawet wręcz niemożliwe. Alternatywą pozostaje więc przeprowadzenie identyfikacji eksperymentalnej, która umożliwi na podstawie posiadanej a priori wiedzy o procesie, oraz danych pomiarowych zebranych w trakcie doświadczenia identyfikacyjnego opracowanie jego

wiarygodnego modelu. Identyfikacja jest wówczas działaniem iteracyjnym obejmującym nieraz wielu etapów, które są wzajemnie ze sobą sprzężone [8, 10, 18].

Rozpatrywany w pracy układ przemiałowy oparty na młynie kulowym wraz z separatorem powietrznym traktowany jest jako jeden obiekt (rys. 1) [9].

Rozwiązanie zadania identyfikacji odpowiedzi wyjścia od wejścia sprowadza się do zaprojektowania odpowiedniej struktury sieci, doborze metody uczenia, jak również przygotowania właściwego zestawu danych uczących [6]. Ich kongruentny dobór przeprowadzono w oparciu o badania statystyczne wspomagając go również wykorzystaniem metod heurystycznych [7, 10]. Proponując model neuronowy, dla rozpatrywanego układu przemiałowego, przebadano różne struktury sieci, przy czym szczególny nacisk został położony na wielowarstwowe sieci rekurencyjne, dostępne w przyborniku Neural Network pakietu Matlab.

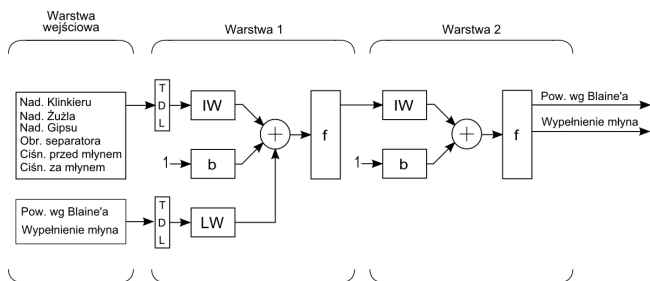


Rys. 1. Model układu przemiałowego

Fig. 1. Model of grinding system

Przeprowadzono eksperymenty w trakcie których zbadano: możliwość wykorzystania jednowarstwowych sieci liniowych dla linearyzacji charakterystyk obiektu, możliwość wykorzystania jedno i wielowarstwowych sieci nieliniowych jako modelu obiektu wielowymiarowego, wpływ zewnętrznego sprzężenia zwrotnego na zmianę jakości otrzymanego modelu, wpływ linii opóźnień TDL sygnałów na dokładność odwzorowań modelu matematycznego [4, 6].

Proces treningu sieci oparty został m. in. na danych zarejestrowanych podczas przeprowadzonego eksperymentu pomiarowego. Dane uzyskane w trakcie normalnej pracy układu przemiałowego wykorzystano do „douczenia” wybranych struktur sieci oraz testowania jakości ich działania. Biorąc pod uwagę charakter układu w artykule skupiono się na dynamicznej sieci rekurencyjnej NARX. Jest to sieć posiadająca zewnętrzne sprzężenie zwrotne oraz linie opóźnień TDL dla sygnałów wejściowego i zwrotnego pozwalające na wykorzystanie informacji pochodzących z poprzednich chwil czasowych (rys. 2) [4].



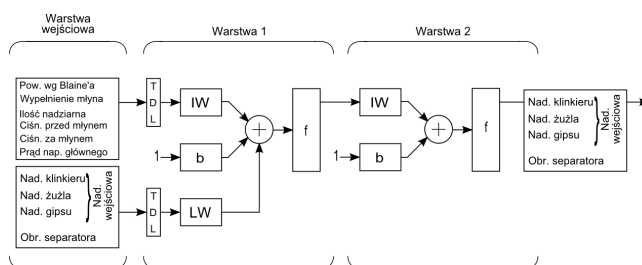
Rys. 2. Schemat sieci NARX szeregowo-równoległego modelu identyfikacji młyna

Fig. 2. Scheme of NARX network for model of grinding mill

gdzie: IW, LW – macierze współczynników wag sieci neuronowej, b – wektor przesunięć sieci neuronowej, f – funkcje aktywacji neuronów sieci, TDL – linia opóźnień sygnałów

Zadaniem sterowania procesem przemiału cementu jest poprawa jakości produktu i efektywności mielenia. Do rozwiązania tego problemu, zaproponowano układ regulacji wykorzystujący wiedzę ekspertów - operatorów procesu. Na podstawie zarejestrowanych wcześniej danych pomiarowych przeprowadzono próby przetwarzania tych informacji przez zastosowanie metod opartych na SSN oraz zaproponowaną przez Jordana i Jacoba technikę „inverse modeling” [15], realizując odwrotną charakterystykę obiektu. Tak nauczona sieć NARX (rys. 3) pozwala na wykorzystanie informacji pochodzącej od wielu ekspertów, którzy prowadzą proces przemiału w różnych warunkach technologicznych oraz w obecności szeregu zakłóceń mierzalnych i niemierzalnych.

Wyniki działania opracowanego w ten sposób regulatora porównane zostały z decyzjami operatorów, bazując na danych pomiarowych zarejestrowanych w trakcie normalnej pracy młyna kulowego. Decyzje te przyjęto, dla dalszych badań, jako wyjściowe [4, 5].



Rys. 3. Schemat sieci NARX realizującej zadanie regulatora neuronowego

Fig. 3. Scheme of NARX network as neurocontroller

W artykule zwrócono również uwagę na zagadnienia diagnostyki procesów zachodzących w układach przemiałowych cementu. Znaczenie problemu diagnozowania procesów rośnie wraz ze wzrostem stopnia automatyzacji i zmniejszania się liczby osób obsługi. Wzrost rozmiarów instalacji przemysłowych powoduje bowiem zwiększenie liczby występujących w nich alarmów. Często sprowadza się to do komputerowego systemu wspomaganie operatorów przy diagnozowaniu przebiegu procesu, a także do diagnostyki stanu technicznego urządzeń. Diagnostykę układu przemiałowego można sprowadzić się do zadania rozpoznania możliwych stanów awaryjnych do których zaliczyć można przekroczenia stanów normalnej pracy młyna m.in. zamięlanie (nadmierne wypełnienie materiałem), niedomielenie lub nadmierne rozdrobnienie cementu. Nie rozpatruje się natomiast diagnostyki uszkodzeń układów mechanicznych [3].

3. Przykładowe rezultaty badań

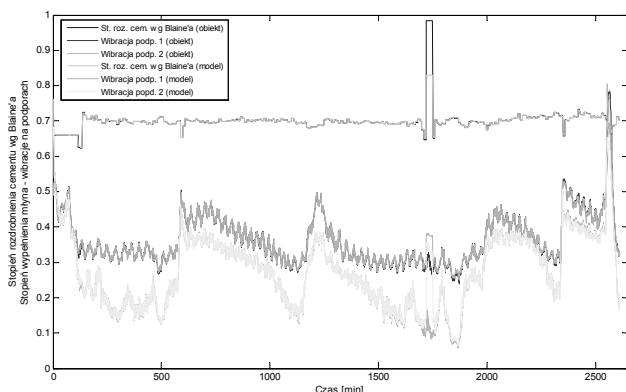
Rezultaty przeprowadzonych badań symulacyjnych wykorzystano przy organizacji eksperymentów na obiekcie przemysłowym w jednej z krajowych cementowni. W pierwszym etapie eksperymentu oceniono jakość odwzorowania układu przemiałowego pracującego w realnych warunkach przez system identyfikacji.

Podczas badań dobierano struktury sieci, oraz zmieniano horyzont czasowy zmian wielkości wejściowych, a pochodzących z poprzednich okresów eksploatacji [4].

Weryfikację modelu przeprowadzono w oparciu o dane zarejestrowane w układzie przemiałowym podczas produkcji tej samej marki cementu lecz w innym okresie czasowym.

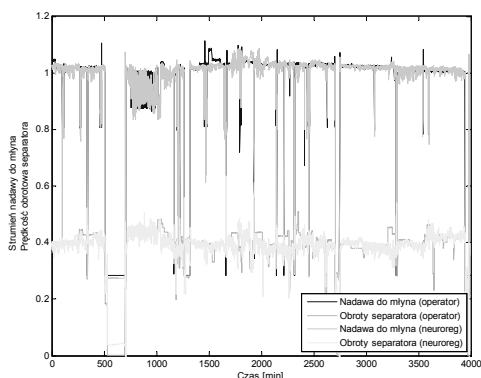
Analizując przykładowe charakterystyki dynamiczne (rys. 4) procesu przemiału oraz błąd modelu można stwierdzić, że najlepsze rezultaty uzyskano dla sieci NARX zawierających około 40-50 neuronów w warstwie ukrytej oraz posiadających informację o stanie obiektu w poprzednich 10-15 minutach [4, 6].

Uwzględniając zdobyte wcześniej doświadczenia podczas realizacji regulatora skupiono się na sieciach dynamicznych NARX. Do uczenia i testowania sieci wykorzystano rzeczywiste dane zarejestrowane na obiekcie. Wynik testowania otrzymanego regulatora porównano z decyzjami operatorów - ekspertów.



Rys. 4. Charakterystyki dynamiczne procesu przemiału modelu nieliniowego
Fig. 4. Plots of process variables for the grinding process

Dobierając ilość neuronów warstwy ukrytej sieci sprawdzano wielkość błędu oraz kontrolowano czy sterowania generowane przez regulator są zgodne z trendami realizowanymi przez operatorów. Przykładowy wynik tego porównania przedstawiono w rys. 5.



Rys. 5. Sygnał sterujący neuroregulatora opartego na sieci
Fig. 5. Control signal from neurocontroller

Badana sieć zawierająca około 20-25 neuronów w warstwie ukrytej i wykorzystująca informacje o stanie obiektu w poprzednich 10 minutach, generuje sterowania zgodne z decyzjami podejmowanymi przez ekspertów. Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, iż wykorzystanie algorytmów neuronowych do sterowania procesem przemiału cementu w układzie technologicznym zamkniętym z separatorem powietrznym (przy wykorzystaniu wiedzy ekspertów) może dać zadowalające wyniki [4, 5]. Po odpowiednim dostrojeniu regulatorów - na podstawie informacji pochodzącej od wybranych ekspertów - możliwe będzie wyeliminowanie błędów popełnianych przez tych mało doświadczonych operatorów, a sterowanie procesem przemiału będzie przebiegało w sposób bardziej efektywny.

4. Wnioski i uwagi

W artykule przedstawiono możliwości zastosowania algorytmów neuronowych dla celów identyfikacji i sterowania procesem przemiału cementu.

Zaprezentowano propozycję racjonalnego sterowania procesem przemiału cementu w zamkniętym układzie przemysłowym, przy uwzględnieniu różnych uwarunkowań związanych z niepewnością modelu procesu, nieliniowościami, fluktuacjami jego parametrów (zwłaszcza opóźnienia) oraz niestacjonarnym charakterem zakłóceń oddziałujących na proces. Podczas badań zastosowano metodę sterowania układem przemysłowym, w oparciu o algorytmy neuronowe.

Wykorzystanie wiedzy najlepszych operatorów procesu w trakcie identyfikacji i realizacji regulatora pozwoliło na zapropono-

wanie układu neuronowego realizującego zadanie sterowania poprzez naśladowanie ich decyzji. Dzięki temu możliwe było wyeliminowanie błędów operatorskich co prowadzi to do poprawy jakości produktu finalnego jakim jest cement oraz pozwala na oszczędność energii elektrycznej [4].

Przeprowadzone badania symulacyjne potwierdzają możliwość wykorzystania teorii sztucznych sieci neuronowych do realizacji zadań identyfikacji i sterowania złożonym układem nieliniowym, niestacjonarnym, z opóźnieniami w torach sterowania.

5. Literatura

- [1] Bartecki K.: Zastosowanie algorytmów neuronowych do optymalizacji pracy systemów grzewczych. Rozprawa doktorska, Politechnika Opolska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, Opole 2004 (promotor: prof. dr hab. inż. Ryszard Rojek).
- [2] Bartecki K., Rojek R.: Neuroowo-adaptacyjne sterowanie procesem wymiany ciepła. Materiały XV Krajowej Konferencji Automatyki, Warszawa 27-30.06.2005r, tom 3, str. 187-192.
- [3] Bursy G., Rojek R.: Diagnostyka młyna cementu dla potrzeb sterowania; Problemy Współczesnej Nauki Teoria i Zastosowania. Automatyka i Robotyka, Diagnostyka Procesów i Systemów, (red. Korbicz J., Patan K., Kowala M.). Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2007.
- [4] Bursy G.: Sterowanie neuronowe procesem przemiału cementu. Rozprawa doktorska. Politechnika Opolska, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, Opole 208, (promotor prof. dr hab. inż. Ryszard Rojek)
- [5] Bursy G., Rojek R.: Neurosterowanie procesem przemiału cementu w oparciu o quasi-ciągły pomiar stopień rozdrobnienia, PAR Pomiar Automatyka Robotyka nr 2/2008; Materiały XII Konferencja Naukowo-Techniczna Automatyka – Nowości i Perspektywy Automation 2008.
- [6] Bursy G., Rojek R.: Neuroidentyfikacja procesu przemiału cementu, XVI Krajowej Konferencji Automatyki, Szczyrk, 11-15.05.2008r. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Komitet Automatyki i Robotyki PAN, Polskie Towarzystwo Sieci Neuronowych, (Red. Krzysztof Malinowski, Leszek Rutkowski), str. 643-651.
- [7] Duch W., Korbicz J., Rutkowski L., Tadeusiewicz R. (2000): Sieci neuronowe, Polska Akademia Nauk. Biocybernetyka i Inżynieria Biomedyczna 2000, Tom 6, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2000.
- [8] Duda J. T.: Modele matematyczne, struktury i algorytmy nadrzędnego sterowania komputerowego. Monografie Komitetu Automatyki i Robotyki PAN Tom 6. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 2003.
- [9] Duda W. H.: Cement-data-book, Bauverlag GmbH Wiesbaden-Berlin 1985.
- [10] Jańczak A.: Identification of Nonlinear Systems Using Neural Networks and Polynomial Models. A Block-Oriented Approach Springer-Verlay. Berlin, Heidelberg, 2005.
- [11] Korbicz J., Kościelny J. M., Kowalczyk Z., Cholewa W.: Diagnostyka procesów. Modele. Metody sztucznej inteligencji. Zastosowania. Komitet Automatyki i Robotyki PAN. Monografia tom 3. WNT Warszawa 2002.
- [12] Korbicz J., Kościelny J. M.: Modelowanie, diagnostyka i sterowanie nadrzędne procesami. Implementacja w systemie DiaSter. Monografie Komitetu Automatyki i Robotyki PAN, tom 14. WNT Warszawa 2009.
- [13] Kurdowski W. (2007): 150 lat przemysłu cementowego na ziemiach polskich, Budownictwo, technologie, architektura 3/2007.
- [14] Mokrzycki E., Eliaz-Bocheńczyk A.: Wybrane problemy zużycia energii w przemyśle cementowym. Problematyka Energetyczna, tom 9, zeszyt, Warszawa 2006, str. 61-70.
- [15] Ng G. W.: Application of Neural Networks to Adaptive Control of nonlinear Systems, Control Systems Center 1997.
- [16] Rojek R., Bartecki K., Korniak J.: Metody sztucznej inteligencji w zastosowaniach automatyki, Pomiar Automatyka Kontrola nr 10/2006, str. 29-34.
- [17] Rutkowski L.: Metody i techniki sztucznej inteligencji (wyd. II), Inteligencja obliczeniowa. Wydawnictwo Naukowe PWN Warszawa 2009.
- [18] Tatjewski P.: Sterowanie zaawansowane obiektów przemysłowych. Struktury i algorytmy. Monografie PAN, Exit 2002.