

mgr inż. Gerard Bursy
Instytut Szkła, Ceramiki, Materiałów Ogniotrwałych i Budowlanych
Oddział Inżynierii Materiałowej, Procesowej i Środowiska
prof. dr hab. inż. Ryszard Rojek
Politechnika Opolska Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki

NEUROSTEROWANIE PROCESEM PRZEMIAŁU CEMENTU W OPARCIU O QUASI-CIĄGŁY POMIAR STOPNIA ROZDROBNIENIA

Wysoka energochłonność procesów przemiałowych zmusza do poszukiwania nowych rozwiązań układów służących do przemiału surowców mineralnych. Oprócz doskonalenia układów technologicznych zwraca się również uwagę na modernizację i poprawę efektywności systemów sterowania. Biorąc pod uwagę złożoność procesów zachodzących podczas przemiału (nieliniowość, opóźnienie, niestacjonarność obiektu - jakim jest młyn kulowy), celowym wydaje się stosowanie nowych narzędzi służących do realizacji układów sterowania takimi obiektami. W niniejszym referacie podjęto próby zastosowania do rozwiązania te-go zadania metod opartych na teorii sztucznych sieci neuronowych. Przedstawiono sposób identyfikacji układu przemiałowego na przykładzie suchego młyna cementu pracującego w układzie zamkniętym z separatorem powietrznym.

NEUROCONTROLLING THE PROCESS OF THE GRINDING OF CEMENT BASING ON THE QUASI-CONTINUOUS MEASUREMENT OF FRAGMENTING THE STEP

High heat of the grinding process, force us, to search many new things in grinding in process, of mineral resources. Apart from up-grade many technology parts, we attract attention on modernization, and improvement of quality in control systems. To take every grinding process into consideration (like: not-linear, delay, not-stationary object – like the sphere mill is). So creating new tools of better control is on purpose. In this paper, we attempt to find a solution to a problem, based on artificial neuron network. To provide a diagnosis of control, on sphere mill as example, worked in closed pattern with air separator.

1. WPROWADZENIE

W polskim przemyśle cementowym do przemiału wykorzystywane są głównie młyny kulowo-rurowe. Młyny te są urządzeniami bardzo energochłonnymi zużywają łącznie ponad 50 % energii elektrycznej potrzebnej do wyprodukowania 1 Mg cementu (z czego ponad 30 % przypada na przemiał cementu). Urządzenia te posiadają bardzo niską sprawność i tylko mała część dostarczonej energii (3-8 %) wykorzystana zostaje w procesie mielenia, resztę stanowią straty. Efektywność ich pracy można zwiększyć poprzez zastosowanie mniej energochłonnych układów przemiałowych (rozwiązanie bardzo kosztowne) lub zastosowanie układów sterowania zapewniających lepsze wykorzystanie istniejących układów oraz stabilniejszą ich pracę [1].

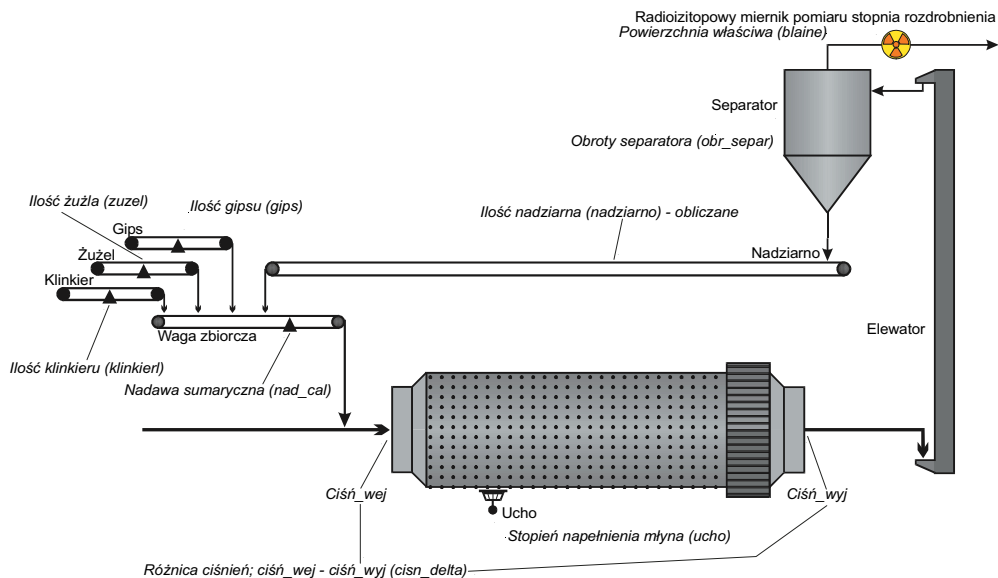
Młyny te mogą pracować w układzie otwartym lub zamkniętym. Obecnie głównie stosuje się układy przemiałowe pracujące w cyklu zamkniętym z separatorem powietrznym (rys. 1) lub

w układach hybrydowych z kruszarkami. Gwarantują one mniejsze zużycie energii podczas przemiału wyższych marek cementu.

W celu jednoznacznego określenia stopnia zużycia energii przez dany układ podczas przemiału do odpowiedniej powierzchni właściwej wykorzystuje się wielkość jednostkowego zużycia energii elektrycznej potrzebnej na zmielenie 1 Mg klinkieru. Wielkość ta określa ilość energii elektrycznej jaką trzeba dostarczyć do układu aby zmielić 1Mg klinkieru do wymaganej powierzchni właściwej. Dla potrzeb racjonalnego prowadzenia procesu przemiałowego niezbędna jest znajomość jego modelu matematycznego, który można uzyskać m. in. w drodze badań eksperymentalnych.

Burzliwy rozwój w ostatnich latach w dziedzinie sprzętu komputerowego, stworzył możliwości techniczne praktycznej realizacji metod opartych na teorii sztucznych sieci neuronowych wykorzystywanych do rozwiązywania szeregu zadań i problemów w różnych dziedzinach, w tym także w sterowaniu. Do ich niewątpliwych zalet należy zaliczyć:

- możliwość aproksymacji dowolnych ciągłych zależności nieliniowych,
- możliwość adaptacji, czyli dopasowania wartości parametrów do zmian charakterystyk obiektu i zakłóceń,
- odporność na błędy działania, w tym uszkodzenia podstawowych elementów przetwarzających (neuronów),
- możliwość generalizacji (uogólniania), czyli generowania odpowiedzi na pobudzenia nie zawarte w zbiorze danych stosowanych w procesie uczenia,
- łatwość modelowania systemów wielowymiarowych.



Rys. 1. Schemat młyna kulowego pracującego w układzie zamkniętym

W związku z powyższym zaproponowano wykorzystanie algorytmów opartych na teorii sztucznych sieci neuronowych do sterowania procesem przemiału, a do pomiaru stopnia rozdrobnienia cementu wykorzystano prototypowy, radioizotopowy miernik pomiaru gęstości usypowej wyskalowany w jednostkach powierzchni właściwej wg Blainea (cm^2/g), pracujący w sposób quasi-ciągły. Aktualnie w krajowych cementowniach prowadzone są prace dotyczące modernizacji istniejących układów technologicznych, pomiarowych oraz rejestrujących,

a prowadzenie procesu przemiału oparte jest w głównej mierze na wiedzy ekspertów, jakimi są operatorzy nadzorujący pracę układów przemiałowych – młynarze.

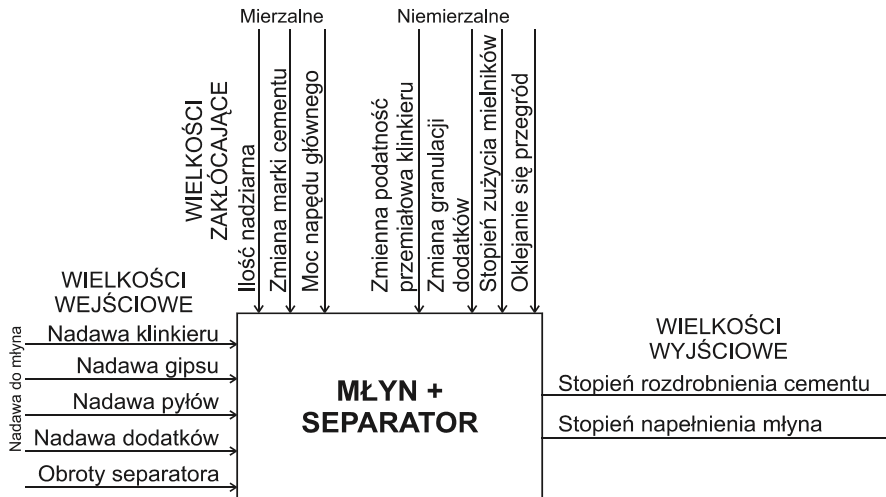
Zadanie sterowania pracą młyna sprowadza się do stabilizacji stopnia rozdrobnienia cementu w oparciu o pomiar powierzchni właściwej, przy zachowaniu minimalizacji jednostkowego zużycia energii elektrycznej i zachowaniu wymaganej jakości produktu. Ze względu na bardzo duże opóźnienia w torach sterowania występujące w układach przemiałowych oraz brak pomiaru znaczących wielkości w sposób ciągły, stosuje się różne sposoby sterowania w oparciu o wielkości pośrednie (sygnał stopnia napełnienia młyna, obciążenie przenośnika elewatorowego, itp.).

Uwzględniając złożoność procesu postanowiono wykorzystać przy wyborze układu i propozycji regulacji wiedzę ekspertów. Na podstawie zarejestrowanych danych przeprowadzono próby aproksymacji tych informacji poprzez wykorzystanie metod opartych na sztucznych sieciach neuronowych z wykorzystaniem zaproponowanej przez Jordana i Jacoba techniki inverse modeling, realizując odwrotną charakterystykę obiektu. Tak nauczona sieć pozwala na wykorzystanie zaproksymowanej informacji pochodzącej od wielu ekspertów, którzy prowadzą proces przemiału w różnych warunkach technologicznych oraz w obecności szeregu mierzalnych i niemierzalnych zakłóceń. Wyniki tak opracowanego regulatora zostały porównane z decyzjami operatorów, bazując na danych pomiarowych zarejestrowanych podczas normalnej pracy młyna i przyjmując decyzje operatorów jako optymalne rozwiązanie.

2. CHARAKTERYSTYKA MŁYNA KULOWEGO DLA POTRZEB STEROWANIA

Młyn kulowy pracujący w układzie przemiałowym z separatorem powietrznym jest obiektem wielowymiarowym, nieliniowym, niestacjonarnym, nieminimalnofazowym z opóźnieniem transportowym o wartościach rzędu od kilku do kilkunastu minut w torach sterowania. Wszystkie występujące nieliniowości mają charakter nieliniowości gładkich. Na niestacjonarność obiektu ma wpływ wiele czynników takich jak: zmienność własności surowców używanych do przemiału, zużycie elementów mielących, zmiany temperatury otoczenia itp. Nieminimalnofazowość tej klasy modeli dyskretnych jest zjawiskiem niemal powszechnym przy tworzeniu modeli procesów przemysłowych w oparciu o dane pomiarowe [3].

Podczas badań młyn wraz z separatorem powietrznym rozpatrywany jest jako jedna całość bez określania wewnętrznych powiązań i zależności między obu częściami układu (rys. 2). Obiekt ten można opisać przy pomocy następujących wielkości wejściowych: nadawa do młyna (nadawa klinkieru, gipsu, popiołów), prędkość obrotowa łopat separatora, strumień powietrza wentylującego młyn (aspiracja młyna), różnica ciśnień na wejściu i wyjściu młyna, oraz wielkości wyjściowych: stopień rozdrobnienia cementu, stopień napełnienia młyna. Na proces mielenia ma również wpływ szereg zakłóceń. Wielkość jednego z zakłóceń (ilość nadziarna zawracanego do młyna) można ocenić pomiarowo, znana jest także marka produkowanego cementu. Pozostałe zakłócenia natomiast są niemierzalne, należą do nich m. in.: zmienna podatność przemiałowa klinkieru wynikająca ze zmienności składu metrologicznego i warunków magazynowania, ciężaru litra klinkieru, granulacji i temperatury, fluktuacja granulacji i wilgotności dodatków, gipsu, żużla i popiołów lotnych, zaklejanie się przegród, zużycie mielników, przechodzenie gipsu w anhydryt w temp. powyżej 105 °C.



Rys. 2. Schemat blokowy młyna jako obiektu sterowania

3 PRZEBIEG EKSPERYMENTU POMIAROWEGO

Proces identyfikacji przeprowadzony został na podstawie danych zarejestrowanych podczas rzeczywistej pracy młyna kulowego z separatorem powietrznym w dwu polskich cementowniach. Zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 2 zarejestrowane zostały dostępne pomiarowo dane jednoznacznie charakteryzujące stan obiektu.

3.1 Rejestracja danych procesowych

W czasie przeprowadzonych eksperymentów podczas normalnej pracy młyna kulowego w układzie zamkniętym z separatorem powietrznym zostały zarejestrowane dane procesowe. W czasie pomiarów wykorzystane zostały istniejące urządzenia pomiarowe wraz z systemem rejestracji.

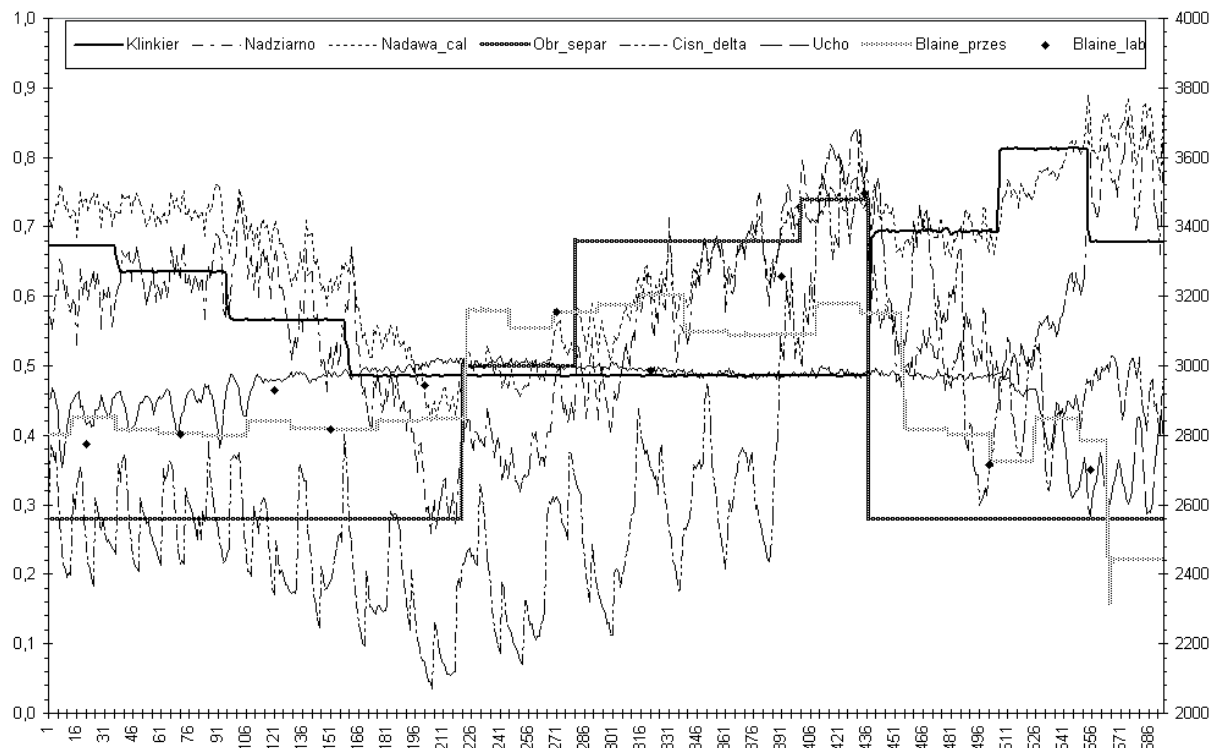
W celu określenia zależności pomiędzy poszczególnymi parametrami obliczono współczynniki korelacji dostępnych wielkości (patrz tab. 1). Wynika z nich, iż istotna zależność pomiędzy odpowiednimi parametrami występuje dla następujących sygnałów: nadawy klinkieru, nadawy gipsu, ilości nadziarna z sygnałem stopnia napełnienia młyna (folafon) oraz nadawy klinkieru i ilości nadziarna z powierzchnią właściwą cementu wg Blaine'a.

Tab. 1. Zestawienie współczynników korelacji dla Cementu P45

| | Klinkier | Nadawa całkowita | Nadziarno | Folafon | Obr. separ. | Blaine |
|---------------|----------|------------------|-----------|--------------|--------------|--------|
| Klinkier | 1,000 | | | | | |
| Nad. cał. | 0,898 | 1,000 | | | | |
| Nadziarno | 0,797 | 0,796 | 1,000 | | | |
| Folafon | 0,793 | <u>0,893</u> | 0,774 | 1,000 | | |
| Obr. spa-rar. | 0,446 | 0,518 | 0,579 | <u>0,575</u> | 1,000 | |
| Blaine | 0,686 | <u>0,738</u> | 0,724 | <u>0,823</u> | <u>0,546</u> | 1,000 |

3.2 Rejestracja danych procesowych – eksperyment pomiarowy

W jednej z polskich cementowni dane zostały zarejestrowane podczas normalnej pracy młyna kulowego oraz dodatkowo przeprowadzony został eksperyment pomiarowy polegający na skokowej zmianie ilości nadawy oraz prędkości obrotowej separatora przy zachowaniu stałych wartości pozostałych wielkości. Do pomiarów wykorzystana została istniejąca instalacja oraz prototypowy radioizotopowy miernik pomiaru stopnia rozdrobnienia konstrukcji IMMB¹ w Opolu. Zapis danych przeprowadzono z częstotliwością 2 pomiarów na minutę. Z powodów technologicznych ilość nadziarna zawracanego do młyna i różnica ciśnień na wlocie i wylocie młyna zostały obliczone w oparciu o inne zarejestrowane wielkości pomiarowe. Rezultaty eksperymentu przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Przebiegi zarejestrowane podczas eksperymentu pomiarowego

Eksperyment pomiarowy trwał jedną zmianę tj. 8 godzin, a w czasie jego trwania przy zapewnieniu: względnie stałych obrotów separatora powietrznego zmieniano ilość nadawy do młyna (pomiar od 1 do 230), oraz stałej ilości nadawy do młyna zmieniano skokowo prędkość obrotową łopat separatora (pomiar od 231 do 430). Dane uzyskane podczas eksperymentu pomiarowego, oraz ciągła kilkutygodniowa rejestracja pracy układu przemiałowego zagwarantowała pozyskanie odpowiedniej ilości i jakości danych charakteryzujących proces potrzebnych do przeprowadzenia procesu identyfikacji.

4. IDENTYFIKACJA UKŁADU PRZEMIAŁOWEGO

Identyfikacja procesu przemiału przeprowadzona została z wykorzystaniem metod opartych na teorii sztucznych sieci neuronowych (SSN) zaimplementowanych w pakiecie narzędziowym Neural Network pakietu MatLab-Simulink. Podczas uczenia sieci i symulacji ich dzia-

¹ IMMB (Instytut Mineralnych Materiałów Budowlanych) od 01.09.2007r Instytut Szkła, Ceramiki, Materiałów Ogniotrwałych i Budowlanych.

łania sprawdzone zostały różne struktury sieci ze względu na ich strukturę topograficzną i zastosowane funkcje aktywacji. Przebadano również wpływ metod uczenia, oraz wielkości i jakości zbioru uczącego na efektywność pracy sieci.

Proces identyfikacji układu przemiałowego przeprowadzono z wykorzystaniem sieci liniowych i nieliniowych jedno- i wielowarstwowych ze i bez sprzężenia zwrotnego. Badając wpływ i strukturę sieci użyto różnych metod uczenia. Rozpatrywano m. in.:

- sieć liniową jednowarstwową (reguła delta, reguła Widorowa-Hoffa),
- sieć Elmana,
- sieć nieliniową wielowarstwową (metoda wstecznej propagacji błędu oraz jej modyfikacje np. metoda Levenberga-Marquardta).

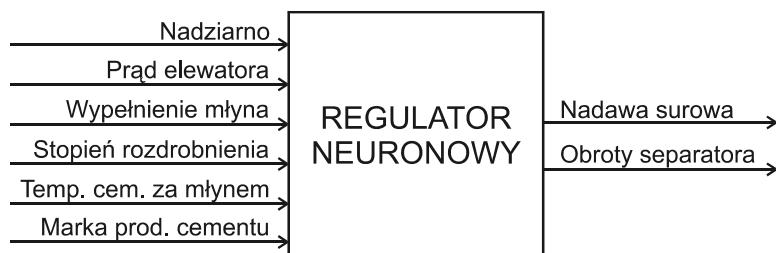
Zgodnie z przewidywaniami sieci liniowe jednowarstwowe ze względu na swą prostą budowę nie są w stanie w pełni odzwierciedlić zjawisk (nieliniowości) zachodzących podczas pracy młyna wraz z separatorem powietrznym. Układ sprawdzono jako liniowy jednowarstwowy ze sprzężeniem zwrotnym i bez niego. Do realizacji sprzężenia zwrotnego wykorzystano sygnały wyjściowe (stopień rozdrobnienia cementu, stopień napełnienia młyna) z poprzedniej chwili czasowej. Wielkościami wejściowymi w tym przypadku był uproszczony zestaw danych gdzie na wejście sieci podano sygnały: ilości nadawy zewnętrznej, ilości zawracanego nadziarna, prędkości obrotowej łopat separatora z chwili obecnej oraz kroku poprzedniego. Do uczenia tego rodzaju sieci wykorzystana została uogólniona metoda delta - Widorowa-Hoffa [5].

Ze względu na złożoność obiektu sprawdzono możliwość wykorzystania sieci dynamicznych na przykładzie sieci Elmana, która posiada w swej strukturze wewnętrzne sprzężenie zwrotne od wyjścia warstwy ukrytej do wejścia warstwy wyjściowej. Niestety mimo zmiany złożoności sieci i szczegółowości danych wejściowych sieć tego typu nie odzwierciedlała poprawnie stanu obiektu.

Najlepsze rezultaty otrzymano wykorzystując w badaniach sieci nieliniowe wielowarstwowe ze sprzężeniem zwrotnym. Zastosowanie zewnętrznego sprzężenia zwrotnego (sygnały z wyjścia sieci zostały podane na wejście warstwy wyjściowej) pozwoliło wykorzystując statyczne metody uczenia na wprowadzenie elementów dynamiki układu do struktury sieci. W badanych sieciach zastosowano w warstwie wewnętrznej neurony o logistycznej funkcji aktywacji, natomiast w warstwie wyjściowej neurony o liniowej funkcji aktywacji. Do procesu uczenia wykorzystano m. in. metodę wstecznej propagacji błędu, oraz metodę Levenberga-Marquardta. Ze wszystkich przedstawionych metod jedynie ostatnia powaliła na uzyskanie zadawalających wyników w określonym skończonym czasie uczenia. Dalsze badania po przeprowadzeniu wstępnej analizy możliwości zastosowania odpowiednich struktur sieci oraz metod ich uczenia zostały przeprowadzone z wykorzystaniem sieci nieliniowych dwuwarstwowych, do uczenia których wykorzystana została użyta zmodyfikowana metoda wstecznej propagacji błędu - metoda Levenberga-Marquardta (dostępna w pakiecie Matlab-Simulink).

5. SYNTEZA REGULATORA NEURONOWEGO

Opierając się na doświadczeniach nabytych w trakcie budowy neuronowego modelu procesu przemiału do realizacji neuroregulatora wybrano dwuwarstwową sieć neuronową z jedną ukrytą warstwą nieliniową. Ilość neuronów w warstwie wejściowej i wyjściowej była uzależniona od ilości sygnałów wejściowych oraz wyjściowych, natomiast rozmiar i rodzaj funkcji aktywacji warstwy ukrytej dobierano w trakcie budowy regulatora.



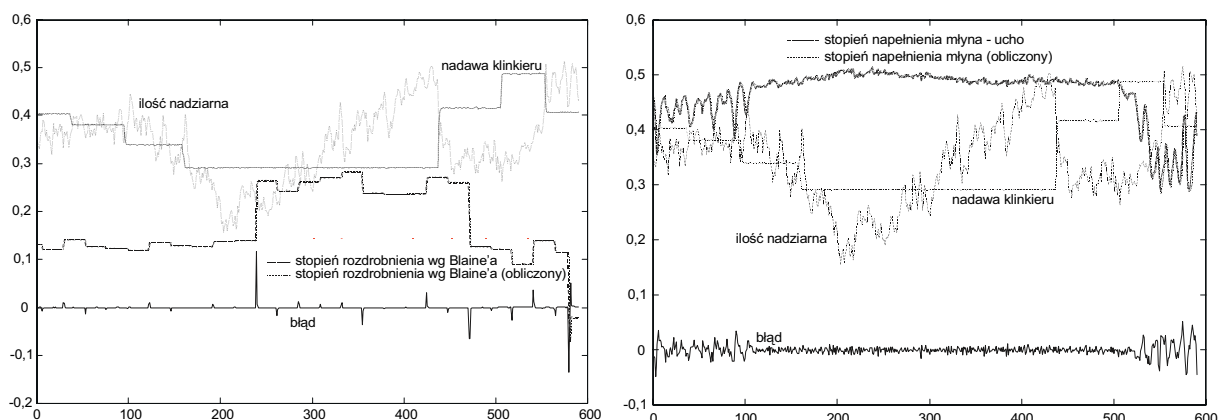
Rys. 4. Schemat blokowy regulatora neuronowego

Podczas wstępnego doboru rozmiaru wielkości warstwy ukrytej wykorzystano regułę piramidy geometrycznej. Mówi ona, iż dla wielu praktycznych zastosowań sieci liczba neuronów w warstwach tworzy kształt piramidy, w której liczby neuronów w kolejnych warstwach dają postęp geometryczny. Zatem w przypadku sieci trójwarstwowej można jako początkową ilość neuronów w warstwie ukrytej przyjąć $\sqrt{m \cdot n}$ gdzie: m – ilość neuronów w warstwie wyjściowej, n – ilość neuronów w warstwie wejściowej.

Na podstawie nabytych wcześniej doświadczeń do treningu sieci neuronowych wykorzystano gradientową metodą Levenberga-Marquardta, która charakteryzuje się dużą zbieżnością procesu uczenia. Niestety wymaga ona dużych zasobów pamięci w trakcie treningu sieci.

Do uczenia sieci wykorzystano funkcje znajdujące się w przyborniku Neural Network pakietu MatLab-Simulink.

Proces uczenia przeprowadzono dla sieci zawierających różną liczbę neuronów w warstwie ukrytej. Jakość każdego z tak przygotowanych neuroregulatorów sprawdzono porównując wypracowane przez regulator sygnały z decyzjami operatorów, obliczając różnicę obu wartości (rys. 5). W trakcie testowania wykorzystano wielkości pomiarowe zarejestrowane podczas normalnej pracy układu przemiałowego. Na ich podstawie wybrano regulator najlepiej spełniający zadanie regulacji przyjmując decyzje operatorów jako optymalne.



Rys. 5. Przebieg pracy neuroregulatora w porównaniu z decyzjami operatora

Siecią najlepiej spełniającą zadanie regulacji procesem przemiału klinkieru w oparciu o quasi-ciągły pomiar stopnia rozdrobnienia z wykorzystaniem prototypowego miernika pomiaru gęstości usypowej oraz stopnia wypełnienia młyna, była sieć nieliniowa z jedną warstwą ukrytą i tangensoidalną funkcją aktywacji z zewnętrznym sprzężeniem zwrotnym.

Przygotowany w powyższy sposób regulatora bazował na danych zarejestrowanych podczas produkcji jednej marki cementu. W związku z tym podczas zmiany marki cementu praca regulatora była błędna i generowane przez sieć wielkości sterujące byłyby poprawne jedynie dla cementu używanego w trakcie treningu sieci. Układy przemiałowe w zakładach cemento-

wych nigdy nie są wykorzystywane do produkcji jedynie jednego asortymentu cementu, w związku z powyższym istnieją dwie możliwości poprawy funkcjonalności pracy regulatora:

1. przygotowanie osobnego regulatora dla produkcji danej marki cementu,
2. zwiększenie rozmiaru sieci i przeprowadzenie procesu uczenia sieci na danych rozszerzonych o sygnały pochodzące z produkcji kilku marek cementu.

W pracy przyjęto drugi rozwiązanie i rozbudowano zakres danych wejściowych o wielkości zarejestrowane podczas produkcji wszystkich marek cementu produkowanych na badanym układzie przemiałowym. Następnie dodatkowo przeprowadzono procesu douczania sieci dla danych marek cementu.

6. WNIOSKI

Rezultaty pracy potwierdzają możliwość wykorzystania teorii sztucznych sieci neuronowych do identyfikacji młyna kulowego z separatorem powietrznym jako obiektu nieliniowego z opóźnieniem. W pracy przeprowadzono identyfikację dwu młynów pracujących w polskich cementowniach. Całość badań identyfikacyjnych przeprowadzono w oparciu o rzeczywiste dane zarejestrowane podczas normalnej pracy młynów, a także przeprowadzonego eksperymentu pomiarowego. Identyfikację układów przemiałowych przeprowadzono w oparciu o sieci liniowe i nieliniowe ze i bez sprzężenia zwrotnego. Najlepsze rezultaty uzyskano dla rekurencyjnych dwuwarstwowych sieci nieliniowych. Struktura sieci i metody jej uczenia nie zależą od konstrukcji młyna, wystarczy dla danego obiektu przeprowadzić proces uczenia dla nowych danych pomiarowych, opisujących układ przemiałowy.

Zawansowane metody numeryczne realizujące działanie sztucznych sieci neuronowych w powiązaniu z wydajnymi obliczeniowo komputerami idealnie sprawdzają się w identyfikacji złożonych nieliniowych obiektów dynamicznych opóźnieniem jakim jest młyn kulowy. Wszystkie obliczenia i symulacje przeprowadzone zostały w oparciu o pakiet MatLab-Simulink, będący na wyposażeniu Wydziału Elektroniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej.

LITERATURA

- [1] Bursy G. (1997) Identyfikacja młyna cementu z użyciem sztucznych sieci neuronowych cz. 1. Prace IMMB, 49-66, Opole.
- [2] Korbicz J., Obuchowski A., Uciński A. (1994). Sztuczne sieci neuronowe. Podstawy i zastosowanie. Akademicka Oficyna wydawnicza, Warszawa 1994.
- [3] Wrzuszczak J. (1998) Badania identyfikacyjne i ocena efektywności algorytmów sterowania adaptacyjnego obiektem z opóźnieniem na przykładzie młyna kulowego cementu Raport Instytutu Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów Politechniki Wrocławskiej nr 43, Wrocław 1998 (rozprawa doktorska).
- [4] Korbicz J., Kościelny J. M., i inni (2002) Diagnostyka procesów Modele Metody sztucznej inteligencji Zastosowania, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne Warszawa 2002.
- [5] Rutkowski L. (2006) Metody i techniki sztucznej inteligencji, Wydawnictwa Naukowe PWN, Warszawa 2006.