PRACE

Instytutu Szkła, Ceramiki Materiałów Ogniotrwałych i Budowlanych

Scientific Works
of Institute of Glass, Ceramics
Refractory and Construction Materials

Nr 3

ISSN 1899-3230

Rok II **Warszawa–Opole 2009**

GERARD BURSY[*]

Sterowanie neuronowe procesem przemiału cementu

Część 1 – Identyfikacja układu przemiałowego na przykładzie młyna pracującego w układzie zamkniętym z separatorem powietrznym

Wysoka energochłonność procesów przemiałowych zmusza do poszukiwania nowych rozwiązań układów służących do przemiału surowców mineralnych. Złożoność procesów zachodzących podczas przemiału (nieliniowość, opóźnienie, niestacjonarność obiektu – jakim jest młyn kulowy), determinuje stosowanie nowych narzędzi służących do realizacji układów sterowania takimi obiektami. W artykule podjęto próby zastosowania do rozwiązania tego zadania metod opartych na teorii sztucznych sieci neuronowych. W części 2 przedstawiona zostanie synteza neuroregulatora. Artykuł jest podsumowaniem rozprawy doktorskiej autora.

1. Wprowadzenie

W przemyśle mineralnych materiałów budowlanych kluczową rolę odgrywają procesy przemiałowe; wykorzystywane na wszystkich etapach produkcji od rozdrabniania surowca, paliwa aż do produktu finalnego, jakim jest cement. W większości krajowych cementowni powszechnie stosowane są wielokomorowe młyny kulowe pracujące w układzie otwartym lub zamkniętym. Są one urządzeniami charakteryzującymi się niską sprawnością.

Zwiększenie tej sprawności można uzyskać przez działania prowadzone w dwu kierunkach:
– modernizację technologii i urządzeń,
– zastosowanie nowych i niestandardowych algorytmów sterowania, realizowanych w oparciu o technikę komputerową.
Zadaniem sterowania pracą młyna jest stabilizacja stopnia rozdrobnienia cementu w oparciu o pomiar powierzchni właściwej przy minimalizacji jednostkowego zużycia energii elektrycznej i zachowaniu wymaganej jakości produktu finalnego.

[*]Dr inż., Instytut Szkła, Ceramiki, Materiałów Ogniotrwałych i Budowlanych w Warszawie, Oddział Inżynierii Materiałowej, Procesowej i Środowiska w Opolu.

Brak dokładnych modeli fizykochemicznych, uwzględniających równocześnie zachodzące procesy rozdrobnienia, transportu i mieszania, a także opóźnienia transportowe oraz nieliniowości charakterystyk procesu przemiału powodują to, że ograniczone są możliwości poprawy jakości regulacji parametrów cementu z wykorzystaniem tradycyjnych algorytmów regulacji. W związku z tym w artykule zaproponowano wykorzystanie algorytmów opartych na teorii sztucznych sieci neuronowych do sterowania procesem przemiału.

Złożoność cyklu przemiałowego wynika z zachodzących wewnątrz młyna procesów rozdrabniania, mieszania i transportu materiału. Charakteryzują się one wielowymiarowością, nieliniowością, fluktuacjami parametrów (zwłaszcza opóźnienia) oraz niestacjonarnym charakterem zakłóceń. Wiele zależności opisujących układ przemiałowy ma charakter empiryczny. W tej sytuacji układy te są obiektami niezwykle złożonymi i trudnymi do analizy z użyciem klasycznych metod. W opracowaniu postanowiono wykorzystać cenne właściwości sztucznych sieci neuronowych, do których zaliczyć można: łatwość budowy układów wielowymiarowych, możliwość aproksymacji dowolnych ciągłych zależności nieliniowych oraz zdolność adaptacji, czyli dopasowania wartości parametrów do zmian charakterystyk obiektu i zakłóceń. Wykorzystanie tych cennych własności sztucznych sieci neuronowych (SSN) do identyfikacji oraz sterowania procesem przemiału cementu pozwoli uwzględnić występujące w nim złożone nieliniowe zależności. Stwarza to możliwość poprawy racjonalnego prowadzenia tego procesu.

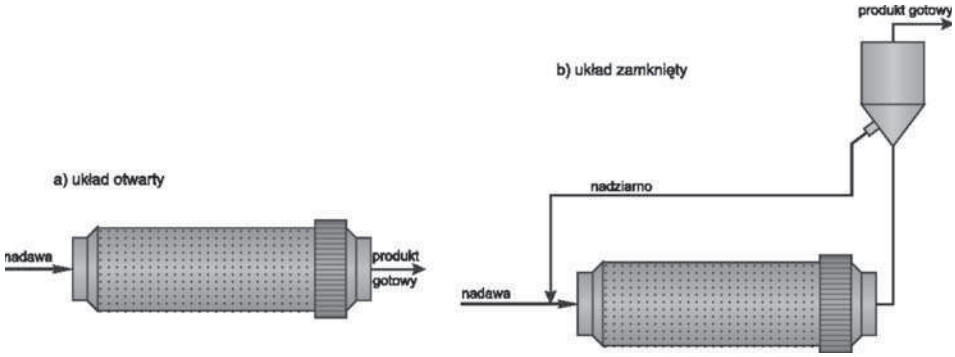
Podczas badań do obliczeń i symulacji w pracy wykorzystano pakiet programowy MatLab ver. 7.5 wraz z przybornikiem Neural Network ver. 5.1 (R2007b). Artykuł jest podsumowaniem rozprawy doktorskiej autora.

2. Charakterystyka młyna kulowego cementu jako obiektu sterowania

By właściwie poznać problemy związane z pracą układu przemiałowego, na początku przedstawiono podstawowy układ służący do przemiału cementu, stosowany w krajowym przemyśle cementowym, jakim jest młyn kulowy.

Opis procesu przemiału cementu. Młyn kulowy jest obracającym się walczakiem podzielonym na komory przy pomocy przegród, wypełnionym wewnątrz w pewnym stopniu kulami i tzw. cylpepsami[1]. W przemyśle cementowym spotyka się dwa podstawowe rodzaje układu pracy młynów kulowych: otwarty i zamknięty (ryc. 1). Oba cechują różne wskaźniki techniczno-ekonomiczne, które

[1] Cylpepsy – (mielniki) elementy robocze młyna bębnowego w kształcie walca lub stożka o zaokrąglonych krawędziach o średnicy nieprzekraczającej 40 mm, które na skutek obrotów bębna uderzają o materiał oraz ścierają go, powodując rozdrabnianie.



Ryc. 1. Układy pracy młynów kulowych

mogą decydować o preferencjach wyboru konkretnego układu do produkcji danych marek cementu.

W młynach kulowych na ich wejście podawane są w odpowiednich proporcjach składniki: klinkier, gips oraz dodatki, takie jak żużel, pyły przemysłowe. Młyn, obracając się ze stałą prędkością, powoduje podnoszenie mielników wraz z mieliwem. Kule opadając uderzają o materiał, powodując jego rozdrobnienie. Z punktu widzenia cech fizycznych materiałów najbardziej istotna w procesie rozdrabniania jest ich wytrzymałość na ściskanie i twardość.

Złożoność zachodzących równocześnie procesów rozdrabniania, transportu i mieszania w młynie oraz fakt, że proces przemiału przebiega w wirującym walczaku, uniemożliwiają pomiar charakterystycznych wielkości procesowych, ważnych z punktu widzenia sterowania bezpośrednio w objętości mielonego materiału. Do celów sterowania, kontroli, diagnostyki i zabezpieczeń oraz wizualizacji pracy młyna wykorzystuje się aktualnie różnorodne zautomatyzowane systemy zbierania danych pomiarowych.

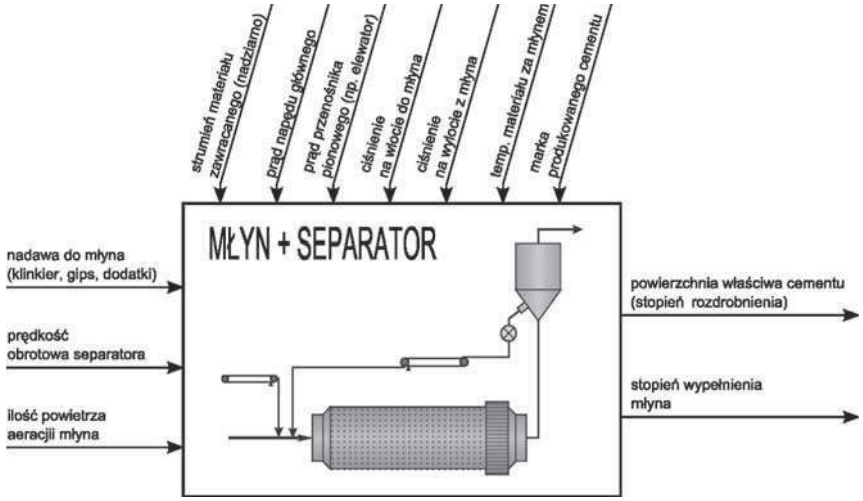
Identyfikacja układu przemiałowego. Identyfikacja jest etapem modelowania matematycznego systemów dynamicznych na podstawie danych eksperymentalnych. Polega ona na wyznaczaniu modelu procesu i otoczenia – jako reprezentanta pewnej klasy modeli – na podstawie dostępnych pomiarów wejść i wyjść, przy pomocy wybranej metody i w oparciu o przyjęte kryterium, zwykle skalarną funkcję strat.

Charakter modelu obiektu, jego ogólność i dokładność zależą od przeznaczenia. Do celów analizy procesu, jego optymalizacji, prowadzenia rozruchu lub wprowadzenia zmian wymagane są modele o charakterze globalnym, opisujące zachowanie się procesu dla wszystkich możliwych obszarów zmienności wielkości procesowych. Natomiast do celów badania stabilności lub syntezy sterowania stosuje się zwykle uproszczone modele matematyczne.

Modele matematyczne procesu przemiału można podzielić na dwie grupy. W przypadku modeli pierwszej grupy identyfikowany system zostaje podzielony na powiązane ze sobą wzajemne bloki, z których każdy jest określony przez równania opisujące zjawiska fizyczne, albo wynika z wiedzy uprzednio zdobytej eksperymentalnie. Druga grupa to modele matematyczne, zwykle wielowymiarowe, w sposób bezpośredni wyznaczone na podstawie aktualnych danych doświadczalnych. W literaturze przedstawione są różne modele matematyczne procesu mielenia, opisujące za pomocą równań zjawiska fizyczne zachodzące podczas przemiału m.in. w pracach A. Auera, R. Rojka i J. Wrzuszczaka [1, 13, 17].

Jakość uzyskanego modelu zależy zarówno od parametrów wybranego modelu, czyli rzędów wielomianów i opóźnień, a także od danych wykorzystanych do identyfikacji [17]. Spotykane w literaturze modele matematyczne mają charakter skomplikowanych zależności, uwzględniających charakter fizyczny zjawisk zachodzących w układach przemiałowych, opisywanych przy pomocy nieliniowych równań różniczkowych zwyczajnych i cząstkowych [2, 6]. Ze względu na dużą złożoność obliczeniową problemów modelowania układów nieliniowych dla celów sterowania, zwykle tworzy się uproszczone modele matematyczne, możliwe do szybkiego wyznaczania i śledzenia na bieżąco ich odchyłek od rzeczywistego zachowania procesu. Nie uwzględniają one wielu zjawisk fizycznych i chemicznych zachodzących podczas procesu przemiału. Umożliwiają jedynie optymalizację statyczną pracy urządzeń, takich jak młyn czy separator.

Charakterystyka zmiennych procesowych. Zmienne procesowe typowe dla przemiału cementu można podzielić na wielkości sterujące (wejściowe), wielkości wyjściowe oraz inne wielkości pomocnicze wykorzystywane m.in. do oceny jakości przebiegu procesu. Szczegółowo wielkości te zilustrowano na rycinie 2.



Ryc. 2. Model układu przemiałowego

• Wielkości sterujące procesem przemiału cementu – sterowanie procesem przemiału sprowadza się do bezpośredniego oddziaływania na wielkości zadane układów wykonawczych, których dynamika może być pominięta w porównaniu z wolnozmiennym charakterem przebiegów zmiennych procesowych, w szczególności w układzie przemiałowym pracującym w cyklu zamkniętym, tzn. z separatorem powietrznym.

Wielkościami sterującymi w przypadku młyna są:
– nadawa świeża do młyna (suma poszczególnych składników nadawy: klinkieru, gipsu, żużla i innych dodatków),
– prędkość obrotowa separatora powietrznego,
– zmiana ilości powietrza wentylującego młyn (aeracja młyna).
Sterowanie procesem sprowadza się do stabilizacji punktu pracy układu przemiałowego, wyznaczonego w oparciu o charakterystyki statyczne poszczególnych urządzeń, osobno dla każdej z produkowanych marek cementu. Występowanie zakłóceń stochastycznych oddziałujących na system przemiałowy utrudnia efektywne sterowanie procesem w układzie otwartym.

• Wielkości wyjściowe i pomocnicze procesu przemiału – z punktu widzenia racjonalnego prowadzenia przemiału cementu do najważniejszych czynności należą pomiary wielkości fizycznych. Spełniają one funkcję wielkości wyjściowych, wykorzystywanych w algorytmach sterowania lub wielkości pomocniczych, wykorzystywanych przez operatora do nadzoru jego przebiegu. Należą do nich następujące pomiary: powierzchni właściwej cementu metodą ciągłą, stopnia wypełnienia młyna (np. przy pomocy ucha akustycznego lub folafonu), strumienia materiału zawracanego z separatora, prądu napędu przenośnika pionowego (elewatora), temperatury materiału za młynem, ciśnienia na wlocie i wylocie młyna, prądu napędu głównego młyna i przenośnika pionowego (elewator lub przenośnik kubełkowy).

• Zakłócenia oddziałujące na proces przemiału cementu – młyn w zakładzie cementowym pracuje w środowisku, które cechuje występowanie zakłóceń o charakterze stochastycznym. Należą do nich: skokowe zmiany występujące w przypadkowych chwilach czasu, jak np. zaklejanie się przegród, oraz przebiegi o charakterze fluktuacji, np. zmiany granulacji i wilgotności surowców oraz zużywanie się mielników.

• Wykorzystywane sposoby sterowania procesem przemiału – w praktyce oraz pracach dotyczących technologii przemiału cementu prezentowanych jest kilka podstawowych sposobów regulacji procesu przemiału [4, 5, 10, 8, 19], do których należą m.in.: regulacja nadawy świeżej bazująca na pomiarze stopnia wypełnienia młyna, regulacja prędkości obrotowej wirnika separatora w oparciu o pomiar stopnia rozdrobnienia. Wskazane jest zatem opracowanie nowych układów sterowania w oparciu o nowoczesne metody sterowania komputerowego.

Zestawienie danych technicznych przykładowych krajowych układów przemiałowych. W kraju od lat wiele uwagi poświęca się modernizacji przemysłu cementowego połączonej z eliminowaniem przestarzałych technologii. Zmiany objęły między innymi układy przemiałowe, decydujące o wielkości zużycia energii elektrycznej. W przemyśle tym zainstalowanych jest ok. 50 instalacji do przemiału cementu. Stosowane układy przemiałowe bazują głównie na młynach kulowych pracujących w układzie otwartym lub zamkniętym. Większość, bo aż 37 młynów, ma wydajność poniżej 100Mg/h, a jedynie 11 z nich, tych nowoczesnych lub zmodernizowanych, posiada wydajności powyżej 100Mg/h[2].

Zużycie energii elektrycznej w przypadku młynów kulowych pracujących w układzie zamkniętym z separatorem powietrznym zawiera się w przedziale od 26 do 60 kWh/Mg, średnio ok. 30–40 kWh/Mg.

3. Przegląd struktur sieci neuronowych oraz metod uczenia pod kątem możliwości ich zastosowania do sterowania procesem przemiału

Modele opisujące zjawiska fizykomechaniczne procesu przemiału posiadają wiele założeń upraszczających. Dostępne obecnie systemy komputerowe oraz metody bazujące na teorii sztucznej inteligencji pozwalają na przygotowanie odpowiednich modeli z pominięciem analizy fizykomechanicznej.

Przystępując do rozwiązywania dowolnego problemu z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych, podstawowym zadaniem jest zaprojektowanie odpowiedniej dla danego zagadnienia struktury sieci oraz dobór odpowiedniej metody uczenia, jak również przygotowanie właściwego zestawu danych uczących. Mimo wielu prac dotyczących rozwoju zagadnień związanych z teorią sztucznych sieci neuronowych, dużo problemów z tego obszaru wciąż pozostaje nierozwiązanych. Jednym z nich jest odpowiedni dobór struktury i rozmiaru sieci oraz metody uczenia [7, 11, 15] – w przypadku tych zagadnień, jak się okazuje – wciąż najczęściej wykorzystywane są metody heurystyczne.

By osiągnąć zamierzony cel, oprócz wyboru odpowiedniej struktury sieci i właściwych danych uczących, ważnym zadaniem jest właściwe przeprowadzenie procesu uczenia. Możemy to uzyskać przez zastosowanie efektywnego algorytmu dostrajania współczynników wagowych (algorytmu uczenia). Ze względu na wybór wielowarstwowych sieci nieliniowych, skupiono się głównie na wykorzystaniu algorytmów gradientowych uczenia, m.in.: algorytmu Levenberga-Marquardta, regularyzacji Bayesa [15, 3].

[2] Nie uwzględniono w tym układów z prasą walcową, które stanowią osobną grupę.

W pracy przeprowadzono analizę porównawczą efektywności poszczególnych metod uczenia, przyjmując jako kryterium wartość błędu średniokwadratowego dla danych uczących i testowych.

Ogólnie sieci neuronowe można podzielić ze względu na:

1) postać charakterystyki przejścia:
– liniowe,
– nieliniowe;
2) ilość warstw:
– jednowarstwowe,
– wielowarstwowe;
3) występowanie sprzężeń zwrotnych:
– sieci jednokierunkowe – bez sprzężenia zwrotnego,
– sieci rekurencyjne (ze sprzężeniem zwrotnym), globalne lub lokalne.

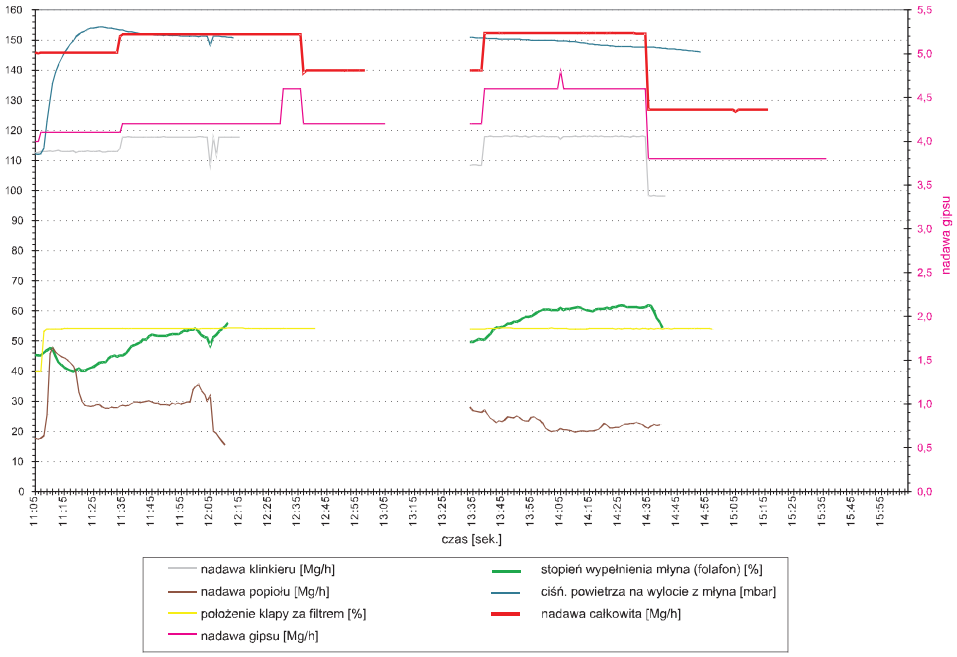
Metody uczenia sieci. Architektura sieci bez możliwości uczenia czy adaptacji ma małe możliwości praktycznego zastosowania. Ze względu na różnorodność struktur wymagane jest stosowanie różnych metod uczenia dla poszczególnych układów sieci neuronowych. Charakteryzują się one odmiennym stopniem złożoności obliczeniowej oraz czasochłonnością obliczeń. Podstawową metodą uczenia sieci wielowarstwowych jest metoda wstecznej propagacji błędu.

4. Opracowanie koncepcji eksperymentów pomiarowych w warunkach rzeczywistej pracy układów przemiałowych dla potrzeb identyfikacji

Proces uczenia sieci neuronowych nie może zostać poprawnie przeprowadzony bez odpowiednich danych wykorzystanych do ich treningu. Ze względu na złożoność obiektu, jakim jest młyn kulowy cementu wraz z separatorem, do badań wykorzystano dane zarejestrowane podczas rzeczywistej pracy tego układu. Pomiary prowadzono w dwu krajowych cementowniach, które posiadają własne przemiałownie. W celu ułatwienia identyfikacji poszczególnych zakładów w pracy przyjęto oznaczenia: zakład nr 1 oraz zakład nr 2. W zakładzie nr 1 zarejestrowano dane w trakcie normalnej pracy układu przemiałowego. W zakładzie nr 2 dodatkowo przeprowadzono eksperyment pomiarowy, który polegał na skokowej zmianie jednego z parametrów wejściowych przy zachowaniu względnie stałych wartości pozostałych wielkości sterujących. Odnotowane dane w obu cementowniach wykorzystane zostały także do weryfikacji i korekty otrzymanych modeli.

Pomiary w zakładzie nr 1 przeprowadzono w dwu układach przemiałowych. Pierwszy wyposażony był w młyn kulowy pracujący w układzie otwartym i wykorzystywany do produkcji cementu o niskich powierzchniach przemiałowych.

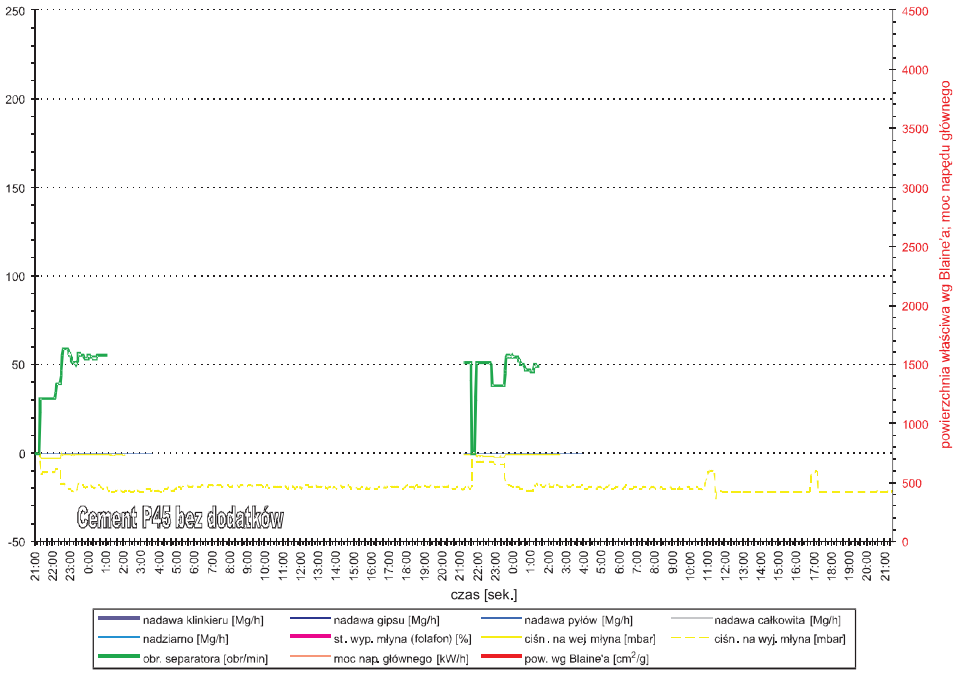
Drugi układ z separatorem powietrznym pracował w systemie technologicznym zamkniętym. Zestaw ten wykorzystywano w zakładzie do produkcji większości marek cementów. Przykładowe – ważne z punktu widzenia prowadzenia procesu – przebiegi wielkości charakteryzujących pracę tego układu podczas normalnej pracy przedstawiono na rycinie 3. Dane rejestrowano bazując na istniejących urządzeniach pomiarowych, w które wyposażony był zakład.



Ryc. 3. Przebiegi w młynie pracującym w otwartym układzie przemiałowym – zakład nr 1

W zakładzie tym zarejestrowano także dane podczas pracy młyna w układzie technologicznym zamkniętym, w trakcie jego normalnej pracy[3]. Do rejestracji wykorzystano istniejące urządzenia pomiarowe oraz komputerowy system wizualizacji i rejestracji danych. Przykładowe pomiary odnotowane podczas produkcji cementu P45 bez dodatków przedstawiono na rycinie 4.

[3] Młyn pracujący w układzie zamkniętym z separatorem dynamicznym, dwukomorowy, średnica 4 m, długość 14 m, wydajność 135 Mg/godz.

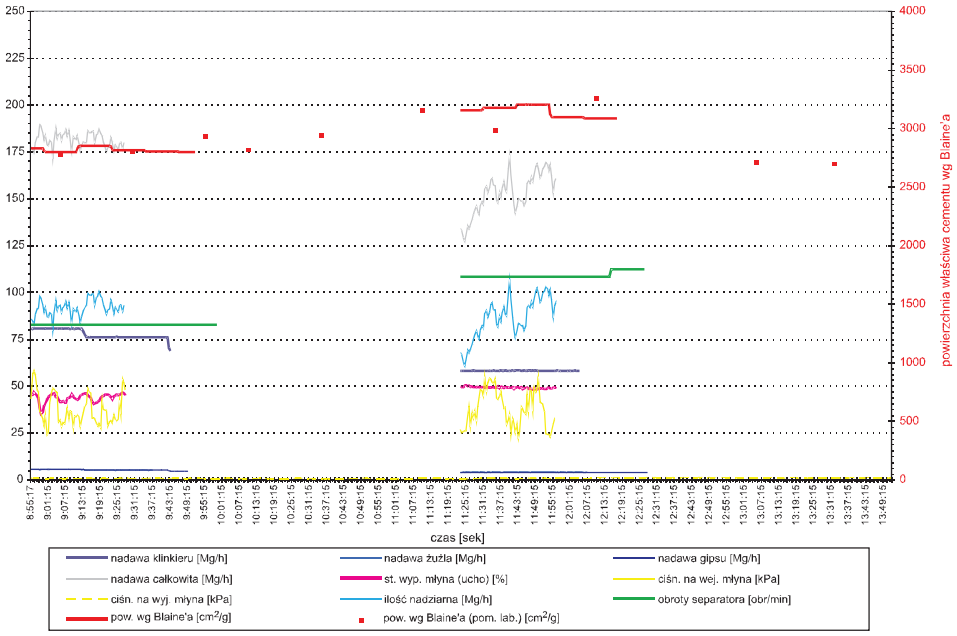


Ryc. 4. Pomiary zarejestrowane w zakładzie nr 1 – cement P45 bez dodatków

Pomiary w zakładzie nr 2 zarejestrowane zostały na młynie kulowym pracującym w układzie technologicznym zamkniętym[4] z separatorem powietrznym. Pomiaru parametrów dokonano w oparciu o istniejące w zakładzie układy pomiarowe. Z powodu braku informacji o jakości produktu finalnego, w sposób ciągły do określenia stopnia rozdrobnienia cementu użyto radioizotopowego miernika pomiaru gęstości usypowej materiałów sypkich RMGU-01, wyskalowanego w jednostkach powierzchni właściwej wg Blaine'a [12].

W zakładzie nr 2 przeprowadzono eksperyment pomiarowy polegający na skokowej zmianie jednego z parametrów sterujących przy zachowaniu względnie stałych wartości wielkości pozostałych (ryc. 5). W początkowym etapie eksperymentu, przy zachowaniu stałej prędkości obrotowej separatora, zmniejszano ilość nadawy surowej do młyna, następnie przy zachowaniu stałej wartości nadawy zwiększano prędkość obrotową wirnika separatora. Podczas ostatniej godziny eksperymentu zarejestrowano dane, w trakcie których układ przemiałowy doprowadzony został do stanu normalnej jego pracy. Dane otrzymane podczas eksperymentu wykorzystano do treningu sieci. Dodatkowo odnotowano wiele danych w trakcie normalnej pracy układu przemiałowego.

[4] Młyn kulowy, młyn dwukomorowy, wydajność ok. 135 Mg/godz.



Ryc. 5. Pomiary zarejestrowane w zakładzie nr 2 w trakcie eksperymentu pomiarowego

Zarejestrowane w zakładzie wielkości wykorzystane zostały do identyfikacji i testowania neuronowego modelu układu przemiałowego oraz budowy neuroregulatora i jego badań w trakcie symulacji komputerowej.

5. Neuronowa identyfikacja układu przemiałowego

Podstawą zadania sterowania dowolnym obiektem dynamicznym jest opracowanie jego odpowiedniego modelu matematycznego. W przypadku złożonych obiektów, jakimi są układy przemiałowe, matematyczne odzwierciedlenie wszystkich praw fizycznych rządzących nimi jest wręcz niemożliwe. Wówczas alternatywą pozostaje proces identyfikacji, mający na celu opracowanie wiarygodnego modelu obiektu w drodze badań eksperymentalnych na podstawie znajomości jego sygnałów wejściowych, wyjściowych i zakłóceń mierzalnych.

O ile znanych jest wiele algorytmów identyfikacji obiektów liniowych, to wciąż brak jest efektywnych metod identyfikacji obiektów nieliniowych, szczególnie zaś obiektów o nieznanej strukturze. W literaturze znane są próby identyfikacji i opisu matematycznego zjawisk zachodzących w młynie kulowym [1, 13, 14, 17, 18, 4], jednakże zbyt duży stopień złożoności nie pozwala na efektywne ich wykorzystanie w realizacji sterowania. Wykorzystując zdolności adaptacyjne sztucznych sieci neuronowych (patrz rozdz. 3) postanowiono zastosować je

w procesie identyfikacji. W oparciu o zanotowane dane (patrz rozdz. 4) 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.

Otrzymane modele zostały zweryfikowane w oparciu o dane zarejestrowane podczas normalnej pracy układu przemiałowego w trakcie produkcji danej marki cementu.

Najlepsze rezultaty otrzymano dla sieci dynamicznych zawierających sprzężenie zwrotne oraz opóźnione informacje z poprzednich chwil czasowych. Badania identyfikacyjne przeprowadzone dla zestawu przemiałowego, pracującego w układzie technologicznym otwartym, pozwoliły na wstępny dobór struktur sieci i metod uczenia w dalszej części pracy.

5.1. Identyfikacja młyna pracującego w układzie zamkniętym

Identyfikację młyna pracującego w układzie technologicznym zamkniętym przeprowadzono w różnych zestawach przemiałowych wykorzystywanych w dwóch zakładach cementowych. Przebadano kilka struktur sieci, przy czym szczególny nacisk został położony na sieci rekurencyjne.

Tworząc model układu przemiałowego, sprawdzono jakość modeli bazujących na sieciach:

– nieliniowych wielowarstwowych jednokierunkowych,

– dynamicznych Elmana i LRN,

– dynamicznych z linią opóźnień TDNN,

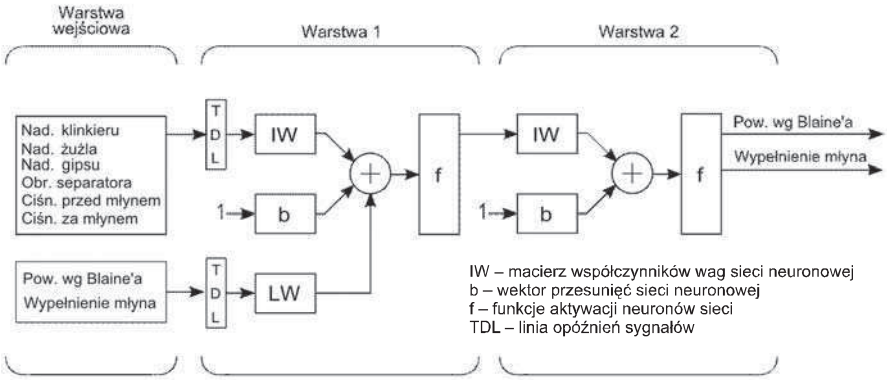
– dynamicznych rekurencyjnych NARX pracujących w architekturze równoległej i szeregowo-równoległej (ryc. 6).

Sprawdzono przydatność w procesie identyfikacji układu przemiałowego nieliniowych sieci jednokierunkowych. Jednak głównie skupiono się na dostępnych w przyborniku Neural Network pakietu MatLab (2007b) sieciach dynamicznych.

Proces treningu sieci oparty został na danych zarejestrowanych podczas eksperymentu pomiarowego (ryc. 5). Pozostałe dane odnotowane w zakładzie 1 i 2 wykorzystano do douczania wybranych struktur sieci oraz testowania jakości

ich działania. Biorąc pod uwagę jakość otrzymanych modeli, w artykule skupiono się tylko 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. Przebadano sieci zawierające od 5 do 50 neuronów w warstwie ukrytej.

W czasie analiz przebadano równoległy oraz szeregowo-równoległy układ identyfikacji. W artykule skupiono się jedynie na układzie szeregowo-równoległym. Układ ten dla młyna pracującego w zakładzie nr 2 przestawiono na rycinie 6.



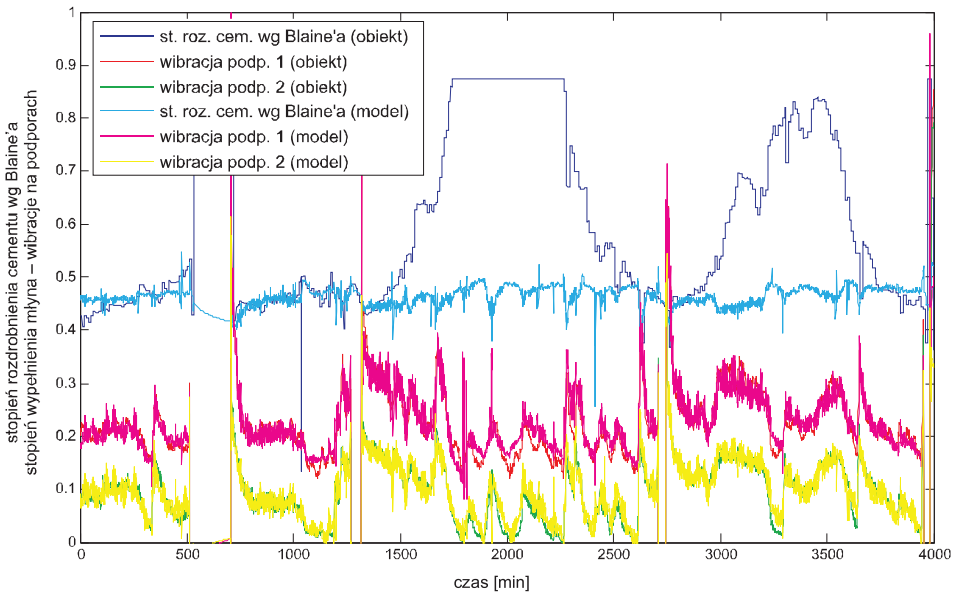
Ryc. 6. Schemat sieci NARX szeregowo-równoległego modelu identyfikacji młyna pracującego w układzie zamkniętym

W trakcie badań zmieniano horyzont czasowy wielkości na wejściu sieci pochodzących z poprzednich okresów. Dokonano tego poprzez linię TDL, podając wartości historyczne opisujące stan obiektu w przeszłości obejmujący okresy od 5 do 20 chwil czasowych. Zmieniano również strukturę sieci, dobierając ilość (od 5 do 50) neuronów w warstwie ukrytej. Do adaptacji wag wykorzystano algorytmy: Levenberga-Marquardta oraz regularyzacji Bayesa.

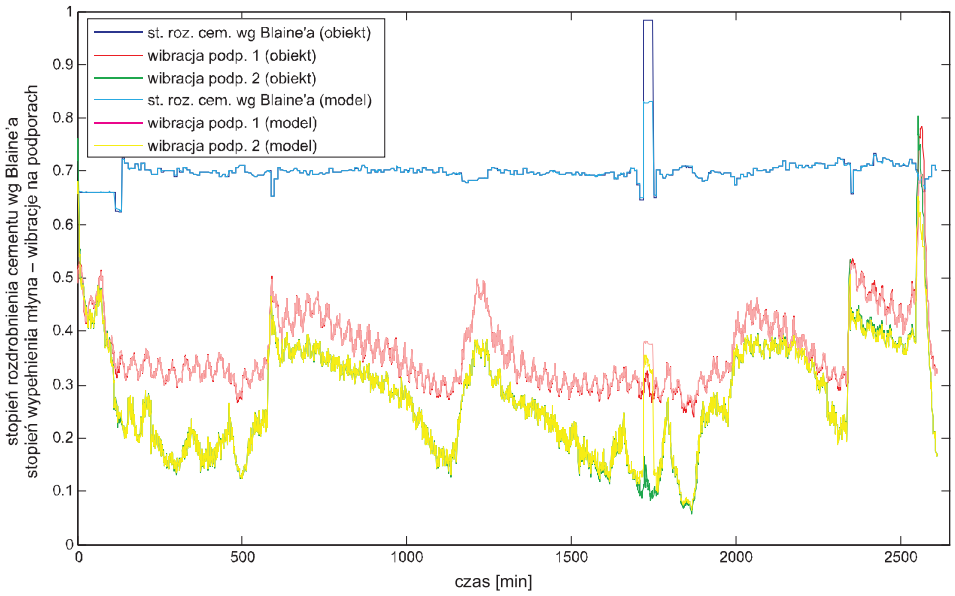
Przykładowe charakterystyki dynamiczne dla sieci zawierającej 30 neuronów w warstwie ukrytej przedstawiono na rycinie 7.

Sieć zweryfikowano w oparciu o dane zarejestrowane w tym samym układzie przemiałowym, lecz w innym okresie czasowym. Przykładowe charakterystyki dynamiczne modelu opartego na sieci przedstawiono na rycinie 8.

Analizując charakterystyki dynamiczne procesu przemiału można stwierdzić, że najlepsze rezultaty uzyskano dla sieci NARX zawierających ok. 40–50 neuronów w warstwie ukrytej i posiadających informację o stanie obiektu w poprzednich 10–15 minutach. Sieci zawierające poniżej 30 neuronów w warstwie wewnętrznej nie potrafią właściwie odzwierciedlić wszystkich zależności wystę-



Ryc. 7. Charakterystyki dynamiczne procesu przemiału dla modelu nieliniowego opartego na sieci NARX zawierającej 30 neuronów w warstwie ukrytej



Ryc. 8. Charakterystyki dynamiczne procesu przemiału dla modelu nieliniowego opartego na sieci NARX zawierającej 50 neuronów w warstwie ukrytej

pujących w wielowymiarowym układzie przemiałowym. Zwiększenie ilości neuronów powyżej 40 podnosi zdolności adaptacyjne sieci i pozwala na prawidłową identyfikację układu przemiałowego. Proces uczenia rozbudowanej sieci składającej się z dużej ilości neuronów jest bardzo czasochłonny i wymaga znacznych mocy obliczeniowych oraz zasobów pamięci do przechowywania macierzy w trakcie obliczeń.

W celu uproszczenia modelu neuronowego zredukowano ilość danych opisujących stan układu w poprzednich chwilach czasowych. Pominięto przy tym część wartości pośrednich, nie zmieniając wielkości horyzontu czasowego.

W trakcie budowy modelu tego procesu, bazując na metodach sztucznej inteligencji, przeprowadzono wiele prób badawczych. Oceniono przydatność poszczególnych struktur sieci neuronowych. Najlepsze rezultaty uzyskano dla rekurencyjnych sieci NARX, które zawierały ok. 35 neuronów w warstwie ukrytej oraz informację o stanie obiektu w poprzednich 15 minutach. Otrzymane rezultaty potwierdzają możliwość wykorzystania teorii sztucznych sieci neuronowych w procesie identyfikacji procesu przemiału.

6. Podsumowanie

W artykule przedstawiono możliwości zastosowania algorytmów neuronowych do rozwiązywania zadań identyfikacji i sterowania procesem przemiału cementu.

W większości krajowych cementowni powszechnie stosowane są wielokomorowe młyny kulowo-rurowe pracujące w układzie otwartym lub zamkniętym. Młyny te są urządzeniami energochłonnymi, charakteryzującymi się niską sprawnością. W warunkach dużej konkurencyjności, narzucającej ostre wymagania jakościowe oraz ekonomiczne produkcji cementu, zaczęto szukać nowych rozwiązań warunkujących dotrzymanie ścisłych rygorów produkcyjnych. Możliwe jest to przez zapewnienie właściwego sterowania procesem mielenia. Zadaniem sterowania pracą młyna jest stabilizacja stopnia rozdrobnienia cementu w oparciu o pomiar powierzchni właściwej, przy minimalizacji jednostkowego zużycia energii elektrycznej i zachowaniu wymaganej jakości produktu finalnego.

Zaprezentowano ofertę racjonalnego sterowania procesem przemiału cementu w zamkniętym układzie przemiałowym, 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 przemiałowym w oparciu o algorytmy bazujące na teorii sztucznych sieci neuronowych. Atrakcyjność ich zastosowania wynika z możliwości aproksymacji dowolnych nieliniowości oraz dostrojenia struktury sieci na podstawie rzeczywistych danych zarejestrowanych w trakcie eksperymentu pomiarowego i rzeczywistej pracy tego

układu. Wykorzystano quasi-ciągły pomiar stopnia rozdrobnienia, realizowany w oparciu o prototypowy miernik pomiaru gęstości usypowej (wyskalowany w jednostkach powierzchni właściwej wg Blaine'a).

W trakcie badań:

– przeprowadzono analizę metrologiczną układu przemiałowego cementu pracującego w układzie technologicznym otwartym i zamkniętym, dla celów sterowania w warunkach rzeczywistej jego pracy;

– opracowano i przeprowadzono autorską koncepcję eksperymentu pomiarowo-identyfikacyjnego układu przemiałowego z wykorzystaniem quasi-ciągłego pomiaru stopnia rozdrobnienia i neuronowych algorytmów identyfikacyjnych młyna kulowego cementu wraz z separatorem powietrznym;

– oceniono możliwości przenoszenia opracowanych algorytmów identyfikacji i sterowania, rozwiązań struktur neuronowych na inne układy przemiałowe, spotykane w pracujących cementowniach.

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. Dodatkowo, dzięki wykorzystaniu informacji pochodzących od operatorów procesu, pozwoliło to na stabilizację jakości produktu i racjonalizację prowadzenia procesu przemiału. Istnieje także możliwość wykorzystania nabytych doświadczeń w identyfikacji i sterowaniu złożonymi wielowymiarowymi obiektami w tych gałęziach przemysłu, w których występują procesy i obiekty podobnej klasy. Wskazano również na możliwości zastosowania nowoczesnych pakietów służących do obliczeń numerycznych w dziedzinie identyfikacji układów dynamicznych oraz badania i projektowania układów sterowania tymi obiektami.

Wszystkie przeprowadzone w trakcie badań analizy oraz symulacje komputerowe zostały zrealizowane z wykorzystaniem pakietu programowego MatLab 7.5 (R2007b) wraz z przybornikiem Neural Network 5.1. Zagadnienia związane z rejestracją danych na obiekcie, ich przygotowaniem oraz prezentacją otrzymanych wyników zaimplementowano w postaci programów komputerowych przygotowanych w środowiskach Delphi, Visual Basic oraz zaadaptowano istniejące na obiekcie układy pomiarowo-monitorujące.

Literatura

[1] Auer A., *Model i identyfikacja procesów klasyfikacji i mielenia*, „Zeszyty Naukowe Wyższej Szkoły Inżynierskiej w Opolu" 1978, nr 26 „Elektryka" z. 4.

[2] Austin L., Rogers R., Bramek K., Stubican J., *A rapid computational procedure for unsteaedy-state ball mill circuit simulations*, „Powder Technology" 1988, Vol. 56, s. 1–11.

[3] Demuth H., Beale M., Hagan M., *Neural Network Toolbox 5 User's Guide MatLab*, The MathWorks Inc., Natick 2007.

[4] D u d a W.H., *Przegląd technik i technologii w światowym cementownictwie*, Zakład Poligrafii Centralnego Ośrodka Informacji Budownictwa, Warszawa 1979.
[5] D u d a W.H., *Cement-data-book*, Bauverlag GmbH, Wiesbaden–Berlin 1985.
[6] H e r b s t J., F u e r s t e n a u D., *Model-based control of mineral processing operations*, „Powder Technology" 1992, Vol. 69, s. 21–32.
[7] J a n c z a k A., *Identification of Nonlinear Systems Using Neural Networks and Polynomial Models. A Block-Oriented Approach*, Springer-Verlag, Berlin–Heidelberg 2005.
[8] K u r d o w s k i W., *150 lat przemysłu cementowego na ziemiach polskich*, „Budownictwo, Technologie, Architektura" 2007, nr 3.
[9] Ng G.W., *Application of Neural Networks to Adaptive Control of nonlinear Systems*, Control Systems Center Series, „Automatika" 2000, Vol. 36, No. 12, s. 1931–1933.
[10] N o w a k E., P a ł k a E., P ł o c i c a M., S t a n o c h W., S z e l i g a A., *Procesy przemielania i młyny w przemyśle cementowym*, „Prace IMMB" 2000, nr 27.
[11] O b u c h o w i c z A., *Evolutionary Algorithms for Global Optimization and Dynamic System Diagnosis*, Lubuskie Towarzystwo Naukowe, Zielona Góra 2003.
[12] P o l e d n i a E., W e r s z l e r A., Radiometryczna metoda pomiaru dyspersji ciała stałego, Instytut Techniki Cieplnej i Mechaniki Płynów Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1997, praca doktorska.
[13] R o j e k R., Model matematyczny procesu mielenia ciągłego w młynach bębnowych dla celów sterowania, Instytut Cybernetyki Technicznej Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1976, praca doktorska.
[14] R o j e k R., *Problemy modelowania wybranej klasy procesów o parametrach rozłożonych dla celów sterowania*, Wyższa Szkoła Inżynierska w Opolu, Opole 1987.
[15] R u t k o w s k i L., *Metody i techniki sztucznej inteligencji*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2006.
[16] T a d e u s i e w i c z R., *Sieci neuronowe*, Akademicka Oficyna Wydawnicza RW, Warszawa 1993.
[17] W r z u s z c z a k J., Badania identyfikacyjne i ocena efektywności algorytmów sterowania adaptacyjnego obiektem z opóźnieniem na przykładzie młyna kulowego cementu, Politechnika Wrocławska, Wrocław 1998, praca doktorska.
[18] W r z u s z c z a k J., *Układ sterowania adaptacyjnego młynem cementu*, [w:] *Materiały XIII Krajowej Konferencji Automatyki, Opole 21–24 IX 1999*, t. 2, Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole 2000, s. 339–344.
[19] [www.polskicement.pl].

GERARD BURSY

NEUROCONTROL WITH PROCESS OF THE GRINDING OF CEMENT
Part 1 – Identification of milling system on example of mill working in closed cycle with air separator

High energy consumption of grinding processes forces to search for new solutions required for grinding mineral raw materials. Complexity of grinding processes such as nonlinearity, delay, instability of ball mill requires application of new tools to control these objects. In the report was carried out study of implementation of methods based on theory of artificial neuron grid. In part 1 was introduced procedure of grinding system identification based on example of cement dry mill operating in closed system with air separator. In part 2 will be introduced synthesis of neurocontroller. The presentation is a summary of doctor's thesis carried out by author.