

GERARD BURSZY*

Sterowanie neuronowe procesem przemiału cementu

Część 2 – Synteza regulatora neuronowego

Wysoka energochłonność procesów przemiałowych zmusza do poszukiwania nowych rozwiązań układów służących do przemiału surowców mineralnych. Złożoność procesów zachodzących podczas przemiału, determinuje stosowanie nowych narzędzi w układach sterowania takimi obiektami. W artykule podjęto próby zastosowania do rozwiązania tego zadania metod opartych na teorii sztucznych sieci neuronowych. W części pierwszej przedstawiono identyfikację procesu przemiałowego. W niniejszej (części 2) przedstawiono syntezę regulatora neuronowego oraz badania symulacyjne pracy regulatora bazującego na sztucznych sieciach neuronowych. Prezentowane opracowanie jest podsumowaniem rozprawy doktorskiej autora obronionej na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej.

1. Wprowadzenie

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

Zwiększenie tej sprawności można uzyskać poprzez 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 ograniczone możliwości poprawy jakości regulacji parametrów cementu z wykorzystaniem tradycyjnych algorytmów regulacji. W związku z powyższym w artykule zaproponowano wykorzystanie algorytmów opartych na teorii sztucznych sieci neuronowych (SSN) 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 pracy 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 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), będący na wyposażeniu Wydziału Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej.

Artykuł jest kontynuacją części 1, oraz podsumowaniem rozprawy doktorskiej autora przeprowadzonej na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej.

2. Propozycja sterowania neuronowego młynem cementu

Modele matematyczne obiektów statycznych i dynamicznych odgrywają podstawową rolę w układach sterowania. Istnieje dobrze opracowana teoria sterowania obiektami liniowymi, lecz problem sterowania nieliniowego jest trudny i wymaga poszukiwań odpowiednich rozwiązań.

W praktyce przemysłowej do sterowania procesem przemiałowym wykorzystuje się jedynie układy dozowania wielkością strumienia wejściowego do młyna. Część zakładów podjęła próby włączenia lokalnych pętli regulacji w celu stabilizacji wybranych wielkości procesowych. Na przykład w jednym z zakładów

uruchomiona została pętla stabilizacji całkowitego strumienia nadawy do młyna. Pozwoliło to na uniknięcie zmielenia¹ młyna w przypadku zmiany własności fizycznych materiału, np. większej twardości dozowanego surowca. W tym celu wykorzystano klasyczny regulator PID zaimplementowany w sterowniku PLC. Prowadzono również próby polegające na uzależnieniu strumienia nadawy wejściowej od informacji pochodzącej z czujnika wypełnienia młyna i stabilizowanie ilości materiału znajdującego się w młynie. W wyżej wymienionych pętlach regulacji stosuje się klasyczne regulatory PID dostrajane w sposób doświadczalny na obiekcie tak, aby układ pracował stabilnie. W literaturze proponuje się wykorzystanie adaptacyjnego systemu sterowania w oparciu o różne modele odniesienia [17]. Nie znalazły one jednak zastosowania w warunkach przemysłowych.

Z uwagi na wiele ograniczeń i trudności związanych z syntezą układów sterowania dla obiektów i procesów nieliniowych metodami analitycznymi wydaje się, że alternatywnym i atrakcyjnym podejściem jest zastosowanie teorii sztucznych sieci neuronowych. Wraz z pomiarem stopnia rozdrobnienia cementu pozwoli to na poprawę racjonalnego prowadzenia tego procesu. Uwzględniając jego złożoność, postanowiono wykorzystać w propozycji układu regulacji wiedzę ekspertów². Na podstawie zarejestrowanych danych przeprowadzono próby przetworzenia tych informacji poprzez zastosowanie metod opartych na sztucznych sieciach neuronowych.

W trakcie badań oparto się na wiedzy zdobytej podczas identyfikacji procesu przemiałowego oraz oceniono użyteczność poszczególnych struktur sieci neuronowych do realizacji zadania sterowania młynem cementu wraz z separatorem.

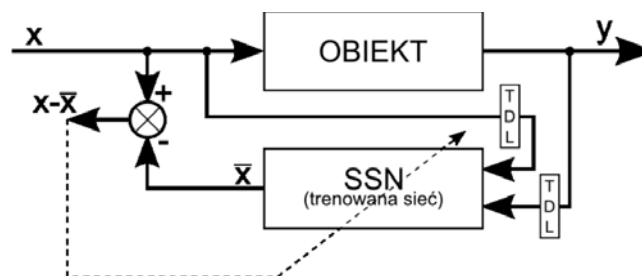
2.1. Neuronowa realizacja decyzji eksperta

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 utrzymaniu wymaganej jakości produktu. Ze względu na opóźnienia występujące w torach sterowania układów przemiałowych oraz brak możliwości pomiaru wielkości jednoznacznie określających jakość produktu finalnego w sposób ciągły, stosuje się różne sposoby sterowania w oparciu o różne wielkości pośrednie (sygnał stopnia napełnienia młyna, obciążenie przenośnika elewatorowego, itp.). Biorąc pod uwagę złożoność procesu, postanowiono wykorzystać w proponowanym układzie regulacji wiedzę ekspertów.

¹ Zmielenie – czyli nadmierne wypełnienie młyna materiałem i poprzez to utratę zdolności rozdrabniania materiału w układzie przemiałowym.

² Ekspertami w tym przypadku są operatorzy procesu zwani potocznie młynarzami.

Na podstawie zarejestrowanych danych przeprowadzono próby aproksymacji tych informacji przez wykorzystanie metod opartych na sztucznych sieciach neuronowych, posilując się zaproponowaną przez Jordana i Jacoba techniką inverse modelling [9], realizując odwrotną charakterystykę obiektu (ryc. 1). Tak nauczona sieć pozwala na wykorzystanie zaproksymowanej informacji pochodzącej od wielu ekspertów, którzy prowadzą proces przemiału w różnych warunkach technologicznych oraz w obecności wielu zakłóceń mierzalnych i niemierzalnych.



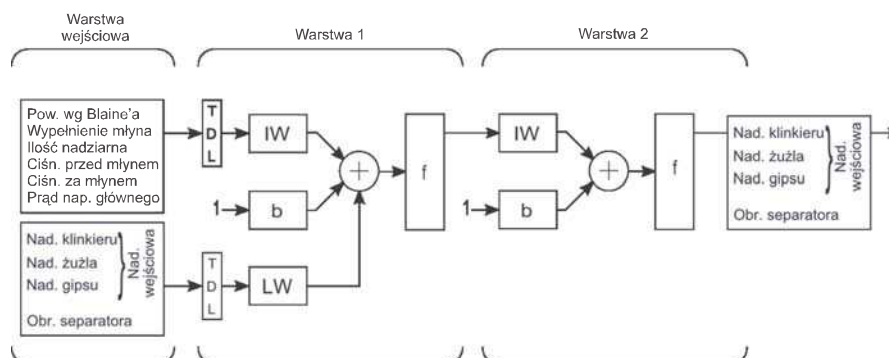
Ryc. 1. Schemat uczenia neuroregulatora z liniami opóźnień – identyfikacja inwersji

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 jako rozwiązania optymalne.

Tworząc neuronowy regulator wykorzystano doświadczenia uzyskane podczas identyfikacji układu przemiałowego. Pominięte w trakcie syntezy zostały sieci liniowe oraz jednokierunkowe. Skupiono się na sieciach dynamicznych, takich jak TDNN, LRN i NARX, oraz metodach treningu Levenberga-Marquardta i regularyzacji Bayesa. Do uczenia i weryfikacji pracy regulatora wykorzystano dane zarejestrowane w zakładzie cementowym.

Realizując zadanie sterowania jako aplikację przeznaczoną do wdrożenia na rzeczywistym obiekcie przemysłowym oraz uwzględniając czynniki ekonomiczne i ruchowe zakładu, w pierwszym etapie postanowiono przygotować układ do pracy w systemie doradczym.

Ze względu na ograniczoną objętość artykułu skupiono się w nim jedynie na **neuroregulatorze opartym na sieci NARX**. Regulator ten powinien najlepiej realizować postawione zadanie, gdyż sieć posiada zarówno sprzężenie zwrotne, jak i linie opóźnień TDL, które pozwalają na uwzględnienie stanu obiektu w przeszłości. Ogólny schemat regulatora bazującego na takiej strukturze sieci przedstawiono na rycinie 2.

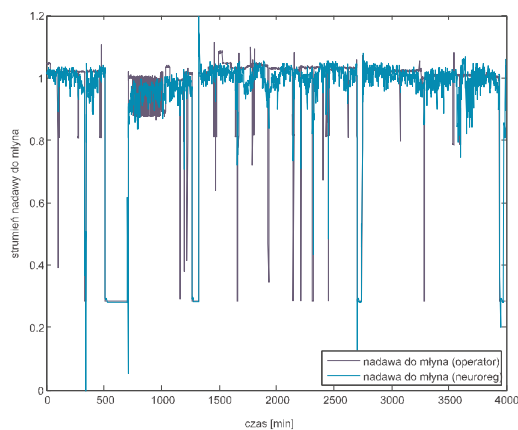


Ryc. 2. Schemat sieci NARX realizującej zadanie neuroregulatora

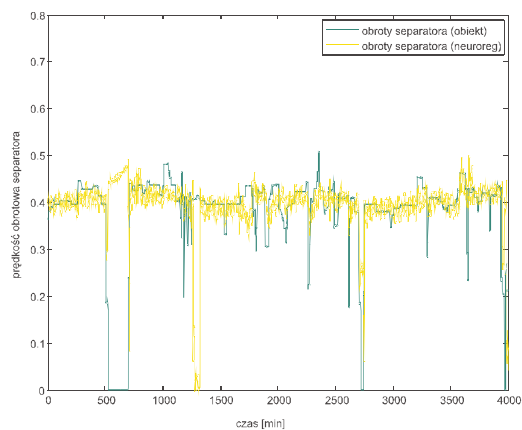
Sprawdzono pracę neuroregulatorów zawierających w swej strukturze od 10 do 50 neuronów w warstwie ukrytej oraz dobierając horyzont czasowy linii TDL od 5 do 20 minut. W początkowym etapie przetestowano pracę sieci realizujących sterowanie ilością nadawy do młyna. Przykładowe wielkości sterujące wygenerowane przez sieć zawierającą 20 neuronów w warstwie wewnętrznej, co przedstawiono na rycinie 3. Na wejściu sieci zastosowano linię TDL zawierającą sygnały opóźnione z 9 poprzednich chwil czasowych oraz 10 w sprzężeniu zwrotnym. Po analizie otrzymanych w trakcie badań wielkości można stwierdzić, że rozbudowa sieci nie prowadzi do większej zgodności pracy regulatora z decyzjami podejmowanymi przez operatora. Sieć zawierająca ok. 20 neuronów w warstwie wewnętrznej generuje sterowania, których trend jest zgodny z decyzjami operatora (ryc. 3).

Następnie sprawdzono pracę regulatora realizującego zadanie sterowania prędkością obrotową separatora powietrznego. Przebadano regulatory zawierające w swej strukturze od 10 do 50 neuronów w warstwie ukrytej. Przykładowe sygnały sterujące, generowane przez sieć NARX zawierającą 20 neuronów w warstwie wewnętrznej, przedstawiono na rycinie 4. Porównując otrzymane wyniki z decyzjami operatorów widać, że sieci zawierające mniejszą liczbę neuronów wypracowują sterowania zgodne z trendami realizowanymi przez operatorów. Nadmierna rozbudowa sieci generuje sygnały o zbyt dużych wahaniami wartości.

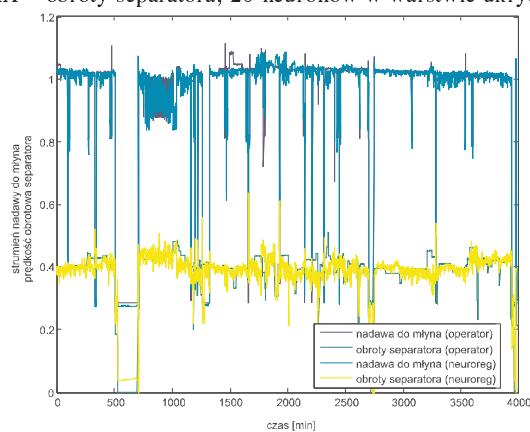
Sprawdzono także jakość pracy regulatora neuronowego generującego oba sygnały sterujące. Przykładowe charakterystyki dynamiczne generowane przez sieć zawierającą 25 neuronów w warstwie ukrytej w odniesieniu do decyzji operatora przedstawiono na rycinie 5. Trendy proponowanych sterowań neuroregulatora są zgodne z decyzjami operatora. Rozbudowa sieci ponad 35 neuronów warstwy wewnętrznej oraz zwiększenie zakresu wykorzystywanego horyzontu czasowego dla wybranych opóźnień nie spowodowały większej zbieżności sterowań generowanych przez regulator w porównaniu z decyzjami podejmowanymi przez operatorów.



Ryc. 3. Sygnał sterujący neuroregulatora opartego na sieci NARX – nadawa do młyna, 20 neuronów w warstwie ukrytej



Ryc. 4. Sygnał sterujący neuroregulatora opartego na sieci NARX – obroty separatora, 20 neuronów w warstwie ukrytej



Ryc. 5. Sygnał sterujący neuroregulatora opartego na sieci NARX – nadawa do młyna, obroty separatora, 25 neuronów w warstwie ukrytej

Neuroregulator oparty na sieciach typu NARX w sterowaniu młynem cementu z separatorem powietrznym daje lepsze rezultaty przy wykorzystaniu jednego regulatora zapewniającego kompleksowe zadanie sterowania, zarówno strumieniem nadawy do młyna, jak i prędkością obrotową separatora. Sieć tego typu, zawierająca ok. 20–25 neuronów w warstwie ukrytej i wykorzystująca informacje o stanie obiektu w poprzednich 10 minutach, generuje sterowania zgodne z decyzjami podejmowanymi przez ekspertów, jakimi są operatorzy. Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że wykorzystanie sztucznych sieci neuronowych do sterowania procesem przemiału cementu w układzie technologicznym zamkniętym z separatorem powietrznym – przy posiłkowaniu się wiedzą ekspertów – jest możliwe do zrealizowania. Cenna wiedza jaką posiadają operatorzy i użycie jej do budowy regulatora neuronowego pozwoli na „naśladowanie” ich decyzji. Po odpowiednim nastrojeniu regulatorów – na podstawie informacji pochodzącej od wybranych ekspertów – możliwe będzie wyeliminowanie błędów popełnianych przez tych mało doświadczonych, przyniesie oszczędności szacowane³ na poziomie ok. 10%. Również sterowanie procesem przemiału będzie przebiegało w sposób mniej zróżnicowany.

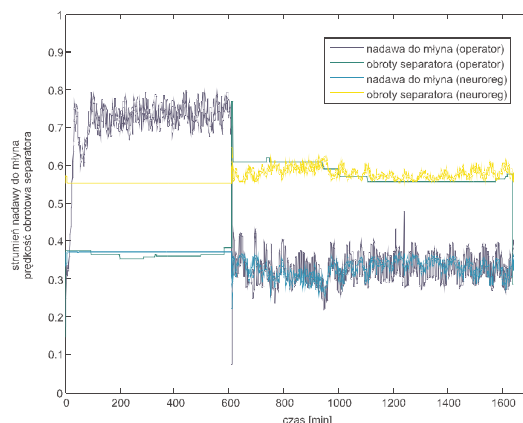
2.2. Adaptacja układu sterowania w przypadku produkcji różnych marek cementu

W praktyce przemysłowej często ma miejsce sytuacja, w której zachodzi potrzeba produkowania kilku marek cementu w jednym układzie przemiałowym. Wymaga to przygotowania wielu regulatorów, pracujących optymalnie podczas sterowania układem przemiałowym w trakcie produkcji danego asortymentu.

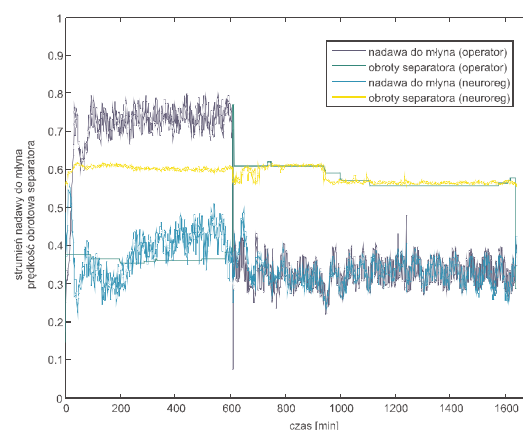
Podjęto zatem próby przygotowania systemu sterowania, który może sterować pracą układu przemiałowego z uwzględnieniem produkowanej marki cementu. W tym celu sporządzono szereg nowych wzorców uczących na podstawie danych zarejestrowanych podczas produkcji różnych marek cementu w jednym układzie przemiałowym. Przeprowadzono kolejny proces uczenia sieci, bazując na wcześniej nabytych doświadczeniach. W wyniku przeprowadzonych prób zmodyfikowano rozmiary istniejących sieci, tak aby mogły one zachować dodatkowe informacje dotyczące wymaganej powierzchni właściwej oraz udziałów procentowych poszczególnych składników nadawy dla szerszego asortymentu produkowanego w danym układzie przemiałowym.

Produkcja kilku marek cementu. Dotychczasowe badania przeprowadzono w oparciu o dane zarejestrowane w trakcie produkcji jednej marki cementu CEM III A 32.5NA. Aby umożliwić prowadzenie procesu przemiału podczas produkcji kilku marek cementu, przygotowano dodatkowe ciągi uczące i testu-

³ Wynika to z analizy zużycia energii przemiału podczas produkcji z rozdziałem na poszczególnych operatorów.



Ryc. 6. Sygnał sterujący neuroregulatora opartego na sieci NARX – nadawa do młyna, obroty separatora, 15 neuronów w warstwie ukrytej



Ryc. 7. Sygnał sterujący neuroregulatora opartego na sieci NARX – nadawa do młyna, obroty separatora, 45 neuronów w warstwie ukrytej

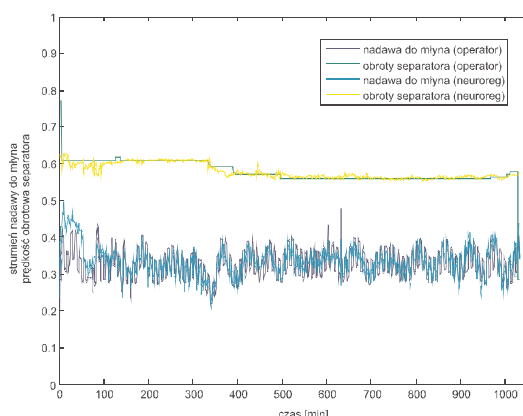
jące, które zawierają dane zarejestrowane w trakcie produkcji dwóch marek cementu, wykorzystanego wcześniej CEM III A 32.5NA oraz CEM II SB 32.5R. Do realizacji regulatora neuronowego wykorzystano sieci neuronowe typu NARX (ryc. 2.) zawierające w swej strukturze od 15 do 50 neuronów w warstwie ukrytej oraz informację o stanie obiektu z poprzednich chwil czasowych obejmujących od 10 do 20 minut.

Mimo wielu prób nie udało się zaproponować regulatora bazującego na sieci neuronowej, który poprawnie sterowałby procesem przemiału dla dwóch marek cementu. Przykładowe sygnały sterujące generowane przez część z testowanych sieci w odniesieniu do decyzji podejmowanych przez operatora przedstawiono na rycinie 6 i 7. Wynika z nich, że sieć poprawnie realizowała zadanie sterowania dla jednej marki cementu. Wynikało to z niesymetryczności zbioru

uczącego, który zawierał różną ilość informacji pochodzących z produkcji wybranych marek cementu. Przygotowanie wzorców zawierających równomierne ilości danych dla poszczególnych marek produkowanego cementu spowoduje problemy podczas dodatkowego douczania otrzymanego regulatora. Stwarza to w momencie douczania sieci problemy z przygotowaniem odpowiednich ciągów uczących w warunkach przemysłowych.

Realizacja neuroregulatora w przypadku cementu CEMII B-S 32.5R.

W związku z negatywną próbą wykonania regulatora realizującego zadanie sterowania procesem przemiału do produkcji kilku marek cementu, postanowiono sprawdzić możliwość budowy odrębnych regulatorów przystosowanych do produkcji wybranej marki cementu. Pozwoliło to również na dodatkowe zweryfikowanie wcześniejszych badań. W pierwszym etapie sprawdzono regulator podczas produkcji cementu CEM II BS 32.5R. Przebadano regulatory oparte na sieci typu NARX (ryc. 2), która zawiera w swej strukturze od 15 do 45 neuronów w warstwie ukrytej i informację o stanie obiektu w poprzednich chwilach czasu. Wykorzystano zredukowane ciągi zawierające informację z przeszłości obejmujące: opóźnienie o 12, 15 i 20 minut.



Ryc. 8. Sygnał sterujący neuroregulatora opartego na sieci NARX – nadawa do młyna, obroty separatora, 35 neuronów w warstwie ukrytej

Sprawdzono pracę neuroregulatorów realizujących zadanie sterowania strumieniem nadawy do młyna i prędkością obrotową separatora (ryc. 8) oraz wykonujących odrębnie zadania sterowania wsadu masy materiału do młyna i prędkości obrotowej separatora. Porównując generowanie przez sieci wartości sygnałów sterujących z decyzjami podejmowanymi przez operatorów stwierdzono, że istnieje duża ich zgodność. Zarówno trend przebiegów, jak i wartości są zbliżone (przykładowe przebiegi przedstawione zostały na ryc. 8). Oznacza to możliwość użycia neuroregulatorów do produkcji różnych marek cementu.

Z przeprowadzonych badań wynika, iż regulator zbudowany w oparciu o sztuczne sieci neuronowe typu NARX potrafi właściwie sterować procesem przemiału wybranej marki cementu. Do produkcji w jednym układzie przemiałowym kilku marek cementu wymagane jest przygotowanie odrębnych neuroregulatorów, realizujących zadanie sterowania dla danej marki cementu. Wybór konkretnego regulatora może następować podczas wyboru marki produkowanego cementu w skomputeryzowanym systemie wizualizacyjnym.

3. Podsumowanie

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

Celem pracy było przedstawienie propozycji 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.

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.

W artykule wykorzystano metodę sterowania układem przemiałowym w oparciu o algorytmy bazujące na teorii sztucznych sieci neuronowych. Charakteryzują się one możliwością aproksymacji dowolnych nieliniowości oraz dostrojenia struktury sieci na podstawie rzeczywistych danych zarejestrowanych w trakcie eksperymentu pomiarowego i rzeczywistej pracy tego układu.

Zdaniem autora do istotnych oryginalnych osiągnięć, uzyskanych w pracy należy zaliczyć:

- przeprowadzenie analizy metrologicznej układu przemiałowego cementu pracującego w układzie technologicznym otwartym i zamkniętym dla celów sterowania w warunkach rzeczywistej jego pracy (opisano w części 1 artykułu);
- opracowanie i przeprowadzenie autorskiej koncepcji eksperymentu pomiarowo-identyfikacyjnego układu przemiałowego, z wykorzystaniem quasi-ciągłego pomiaru stopnia rozdrobnienia i neuronowych algorytmów identyfikacyjnych młyna kulowego cementu wraz z separatorem powietrznym (opisano w części 1 artykułu);
- opracowanie i przetestowanie metodą symulacji komputerowej neuronowego algorytmu sterowania, opartego na nieliniowej sieci neuronowej ze sprzężeniem zwrotnym (NARX), który daje możliwość uwzględnienia różnych przypadków pracy układu przemiałowego, w tym produkcji kilku marek cementu w jednym układzie przemiałowym;

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

Wykorzystanie wiedzy najlepszych operatorów procesu w trakcie identyfikacji oraz budowy neuroregulatora pozwoliło na zaproponowanie układu neuronowego realizującego zadanie sterowania przez naśladowanie ich decyzji. Dzięki temu możliwe było wyeliminowanie błędów operatorskich, co prowadzi do poprawy jakości produktu finalnego, jakim jest cement, oraz pozwala na oszczędność energii elektrycznej na poziomie ok. 10%.

Oszacowanie to przeprowadzono w oparciu o dane układu przemiałowego w warunkach eksploatacji młyna w trakcie badań eksperymentalnych.

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 ustabilizowano jakość produktu i racjonalizację prowadzenia procesu przemiału.

Uzyskane wyniki potwierdzają także możliwość wykorzystania nabytych doświadczeń w identyfikacji i sterowaniu złożonymi wielowymiarowymi obiektami, także w tych gałęziach przemysłu, w których występują procesy i obiekty podobnej klasy.

Znaczącym aspektem pracy jest wskazanie 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 ramach pracy analizy oraz symulacje komputerowe zostały zrealizowane z wykorzystaniem pakietu programowego MatLab 7.5 (R2007b) wraz z przybornikiem Neural Network 5.1, będącego na wyposażeniu Wydziału Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej. 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.

Wszystkie wymienione czynniki sprawiają, że poruszona w pracy problematyka jest w pewnym zakresie zbieżna z aktualnymi tendencjami, zmierzającymi do zastąpienia człowieka w wykonywaniu powtarzających się czynności i podejmowania decyzji przez układy tzw. sztucznej inteligencji.

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 unsteady-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] Duda W.H., *Przegląd technik i technologii w światowym cementownictwie*, Zakład Poligrafii Centralnego Ośrodka Informacji Budownictwa, Warszawa 1979.
- [5] Duda W.H., *Cement-data-book*, Bauverlag GmbH, Wiesbaden-Berlin 1985.
- [6] Herbst J., Fuerstenau D., *Model-based control of mineral processing operations*, „Powder Technology” 1992, Vol. 69, s. 21–32.
- [7] Janczak A., *Identification of Nonlinear Systems Using Neural Networks and Polynomial Models. A Block-Oriented Approach*, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg 2005.
- [8] Kurdowski 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] Nowak E., Pałka E., Płocica M., Stanoch W., Szelięga A., *Procesy przemielania i młyny w przemyśle cementowym*, t. 2: *Młynownie*, „Prace IMMB” 2000, nr 27.
- [11] Obuchowicz A., *Evolutionary Algorithms for Global Optimization and Dynamic System Diagnosis*, Lubuskie Towarzystwo Naukowe, Zielona Góra 2003.
- [12] Polednia E., Werszler A., *Radiometryczna metoda pomiaru dyspersji ciała stałego*, Instytut Techniki Ciepłej i Mechaniki Płynów Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1997, praca doktorska.
- [13] Rójek R., *Model matematyczny procesu mielenia ciągłego w młynach bębnowych dla celów sterowania*, Instytut Cybernetyki Technicznej Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1976, praca doktorska.
- [14] Rójek R., *Problemy modelowania wybranej klasy procesów o parametrach rozłożonych dla celów sterowania*, Wyższa Szkoła Inżynierska w Opolu, Opole 1978.
- [15] Rutkowski L., *Metody i techniki sztucznej inteligencji*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2006.
- [16] Tadeusiewicz R., *Sieci neuronowe*, Akademicka Oficyna Wydawnicza RW, Warszawa 1993.
- [14] Wruszczak J., *Badania identyfikacyjne i ocena efektywności algorytmów sterowania adaptacyjnego obiektem z opóźnieniem na przykładzie młyna kulowego cementu*, Politechnika Wrocławska, Wrocław 1998, praca doktorska.
- [15] Wruszczak 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.

GERARD URBAN

NEUROCONTROL WITH PROCESS OF THE GRINDING OF CEMENT
Part 2 – Synthesis of Neurocontroller

High energy consumption of grinding processes forces to search for new solutions required for grinding mineral of raw materials. Complexity of grinding

processes 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 identification of grinding process system.

In this part was introduced synthesis of neurocontroller and simulation research of controller operation based on artificial neuron grid.

The presentation is an author's summary of doctor's thesis carried out on Faculty of Electrical Engineering, Automatic Control and Computer Science of The Opole University of Technology.