

Wybrane zagadnienia hierarchicznego sterowania i zarządzania w zakładzie przeróbki węgla – cz. II

W pierwszej części artykułu [16] omówiono zagadnienia dekompozycji funkcjonalnej i przestrzennej celu sterowania oraz warstwową strukturę sterowania i zarządzania w zakładzie przeróbki węgla kamiennego. W drugiej części scharakteryzowano modele obiektu sterowania w różnych warstwach struktury hierarchicznej sterowania i zarządzania oraz własności algorytmów sterowania w strukturze hierarchicznej. Omówione zostały też zagadnienia planów produkcyjnych oraz optymalizacji bieżącej stanu ustalonego automatyzowanych procesów.

4. MODELE OBIEKTU W WARSTWOWEJ STRUKTURZE STEROWANIA I ZARZĄDZANIA

Wypracowanie decyzji jest czynnością skierowaną ku przyszłości, gdyż sterowaniu podlegają jedynie przyszłe stany procesu. Z tego powodu, oprócz znajomości stanu procesu, potrzebne są modele matematyczne wykorzystywane do prognozowania przyszłych stanów procesu. Modele matematyczne są stosowane w algorytmach sterowania, których zadaniem jest osiągnięcie celów procesu. Algorytmy te wyznacza się metodami analitycznymi i symulacyjnymi. Ten sam proces może mieć różne modele matematyczne w różnych warstwach struktury hierarchicznej, zależnie od rozwiązywanego zadania decyzyjnego.

Procesy przemysłowe, w tym procesy, którym jest poddawana struga węgla surowego w zakładzie przeróbki, są procesami dynamicznymi [20]. W produkcji sortymentów handlowych węgla ważne jest, aby ich jakość była stabilna. Z tego powodu sterowanie przebiegiem procesów rozdzielczych ma na celu stabilizację parametrów jakościowych produktów oraz odpowiednie reagowanie na różne zakłócenia, wpływające na zmianę tychże parametrów. W warstwie sterowania bezpośredniego i zabezpieczeń układy sterujące poszczególnych operacji mają za zadanie przede wszystkim bezpieczne prowadzenie procesów. Wartości zadane zmiennych sterujących przekazywane do tych układów z warstwy sterowania nadrzędnego lub optymalizacji mają na celu stabilizację parametrów – głównie parametrów koncen-

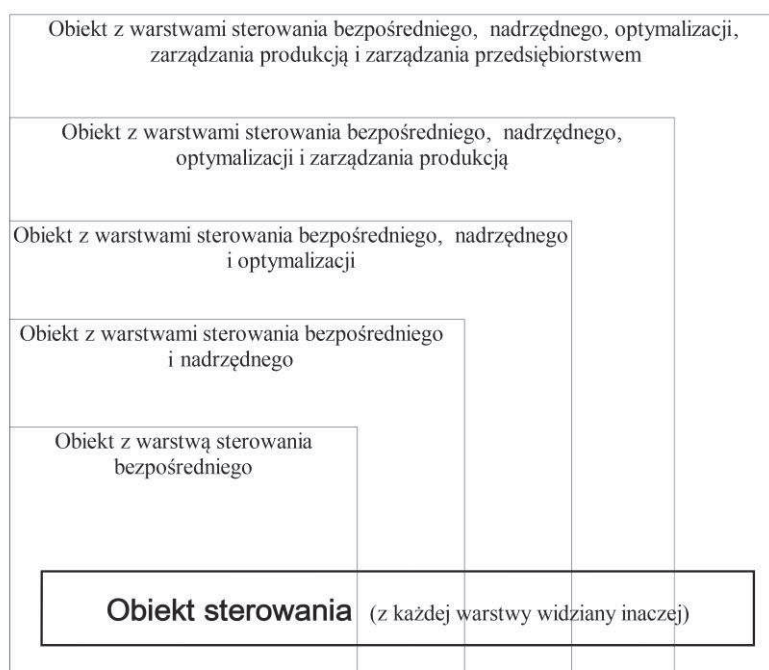
tratów z operacji wzbogacania węgla. Zmiany wartości zadanych zmiennych sterujących oraz zakłócenia, zwłaszcza szybkie, powodują wahania stabilizowanych parametrów wskutek inercji i opóźnień w obiekcie sterowania, we wzbogacalnikach, przenośnikach, przesiewaczach i operacjach pomocniczych. Jeżeli układy regulacji bezpośredniej funkcjonują poprawnie, to po okresach takich fluktuacji¹ zachodzi stabilizacja wartości określonych parametrów produktów, a precyzyjniej mówiąc, parametry te zawierają się w pewnych akceptowalnych przedziałach wartości. Można zatem powiedzieć, że obiekty sterowania – a więc poszczególne operacje przerobcze – są przez układy regulacji nadrzędnej oraz algorytmy optymalizacji bieżącej postrzegane jako wolne procesy dynamiczne. Tak więc względnie szybkie procesy w operacjach wzbogacania wraz z warstwą sterowania bezpośredniego stanowią system wykonawczy (rys. 1) [16] dla układów regulacji nadrzędnej i algorytmów optymalizacji [19]. Dlatego zmiany parametrów jakościowych produktów handlowych², które są procesami wolnozmiennymi, pozwalają

¹ Zakłócenia w procesach wzbogacania występują oczywiście nieustannie – np. chwilowe fluktuacje składu ziarnowego i wzbogacalności węgla surowego czy ilości nadawy do procesów wzbogacania [5]. Mimo różnych zabiegów – najprostszym jest tutaj uśrednianie, ale częściowe tylko, parametrów węgla w zbiornikach buforowych – zakłócenia te wpływają na chwilowe zmiany parametrów produktów wzbogacania.

² Oczywiście poszczególne ziarna w produktach końcowych, trafiające do ekspedycji, mogą mieć różne parametry jakościowe, jednak istotne są uśrednione parametry odpowiednio dużej masy węgla, np. wagonu; postulowane jest nawet określanie średnich parametrów jeszcze większej masy węgla [2, 9], np. całego składu wagonów.

traktować produkcję sortymentów handlowych węgla jako procesy optymalizowane na bieżąco poprzez algorytmy warstwy optymalizacji oraz, ze mniejszą częstotliwością interwencji, przy harmonogramowaniu produkcji i planowaniu strategii, w ramach działań podejmowanych w warstwach zarządzania. W hierarchicznej strukturze warstwowej sterowania i zarządzania (rys. 1) [16] każda warstwa steruje wprawdzie tym samym obiektem, lecz każda w inny sposób, gdyż obiekt jest widoczny przez pryzmat warstwy niższej. Modelowanie obiektu pod kątem projektowania sterowania uwzględnia tylko istotne zależności – im wy-

żej w modelu hierarchicznym, tym sygnały są wolniej zmienne. Rys. 3. ilustruje sposób modelowania obiektu w postaci struktury zagnieżdżonej w następujących po sobie warstwach sterowania i zarządzania. W konkretnej warstwie przyjmuje się model obiektu łącznie z układami sterowania wszystkich niższych warstw, a w konsekwencji – efekty działania tych układów, które pozwalają na takie uproszczenia modelowe. W praktyce przemysłowej jest to sprawdzony i skuteczny sposób projektowania, sterowania i optymalizacji automatyzowanych procesów [19].



Rys. 3. Modelowanie obiektu sterowania w hierarchicznej strukturze warstwowej [15]

W tabeli 1. podane zostały najważniejsze cele realizowane w poszczególnych warstwach struktury hierarchicznej, typowe okresy interwencji oraz rodzaje modeli matematycznych w rozpatrywanych warstwach. Operacje przerobcze oraz układy technolo-

giczne przeróbki węgla są procesami i obiektami dynamicznymi [20]. W wyższych warstwach struktury hierarchicznej obiekty te są postrzegane jako statyczne i charakteryzują stany ustalone.

Tabela 1.

Cele, okresy interwencji i rodzaje modeli w warstwach struktury hierarchicznej [19]

Warstwa	Główny cel	Okres interwencji	Model
Sterowania bezpośredniego i zabezpieczeń	Stabilizacja i nadzorowanie procesu	Ułamek sekundy, sekundy	Dynamiczny szybki – liniowy lub nieliniowy
Regulacji nadrzędnej	Sterowanie jakością produktów, regulacja zmiennych decyzyjnych	Minuta	Dynamiczny wolny – liniowy lub nieliniowy
Optymalizacji	Maksymalizacja bieżącej wartości produkcji	Godzina	Stacyjny nieliniowy (dynamiczny)
Zarządzania produkcją	Maksymalizacja wartości produkcji w dłuższych okresach	Zmiana produkcyjna, kilka dni	Stacyjny bilansowy – liniowy lub nieliniowy
Zarządzania przedsiębiorstwem	Strategiczna maksymalizacja wartości produkcji	Miesiące, lata	Stacyjny bilansowy – liniowy (nieliniowy)

4.1. Właściwości algorytmów sterowania w warstwowej strukturze sterowania [14]

W warstwowej strukturze sterowania najistotniejszą cechą są hierarchiczne powiązania między algorytmami sterowania w różnych warstwach. Algorytm warstwy wyższej wypracowuje parametry, zmienne sterujące, wykorzystywane w warstwie niższej. Najważniejsze właściwości algorytmów powiązanych hierarchicznie sformułować można następująco:

- problemy decyzyjne rozwiązywane w warstwach wyższych są bardziej złożone i mniej przejrzyste,
- algorytm warstwy wyższej wyznacza decyzje dotyczące większego fragmentu procesu lub decyzje bardziej ogólne,
- horyzont sterowania w algorytmie warstwy wyższej jest dłuższy – cele są osiąganę w dłuższym czasie; algorytmy są opracowywane na podstawie modeli statycznych obiektów sterowania,
- zakłócenia kompensowane przez algorytmy warstwy wyższej mają większe znaczenie, ale węższe widmo częstotliwościowe,
- wyniki identyfikacji obiektów w warstwach wyższych zależą od struktury i parametrów algorytmów w warstwach niższych.

5. PLANY PRODUKCYJNE I OPTYMALIZACJA BIEŻĄCA

Przy tworzeniu planów produkcyjnych względnie łatwe jest przewidywanie w zakładzie wzbogacania węgla – przynajmniej, jeśli chodzi o zakład funkcjonujący w ramach kopalni – struktury składu ziarnowego nadawy węgla surowego w horyzoncie czasowym rzędu roku. Struktura ta wynika z właściwości węgla w pokładach eksploatowanych i planowanych do eksploatacji, a także ze stosowanych technik i technologii eksploatacji oraz wydobycia węgla. Natomiast o jakości i rodzaju sortymentów handlowych decydują technologie przeróbki węgla, wyposażenie techniczne w zakładach przeróbki oraz warunki kontraktów handlowych, które mogą być zmienne, zwłaszcza w przypadku odbiorców mniejszych ilości węgla niż energetyka zawodowa.

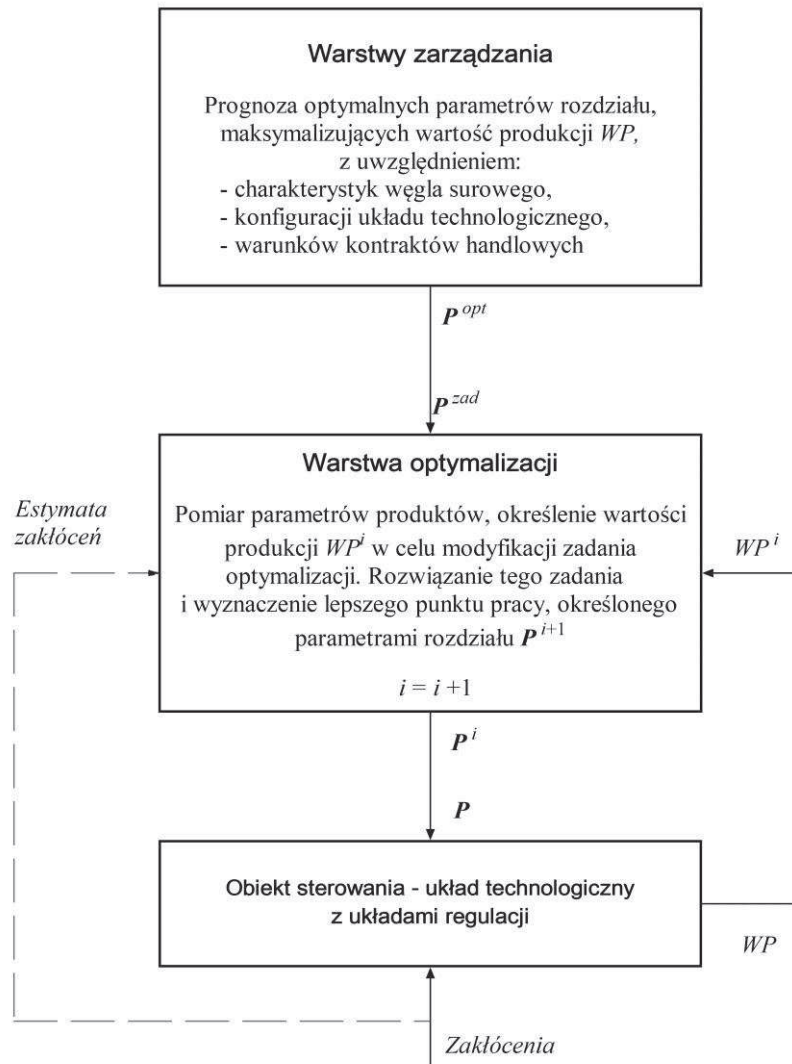
Ważnym zagadnieniem optymalizacji produkcji jest opracowanie odpowiednich scenariuszy i harmonogramowanie produkcji. Z reguły są to wielowariantowe i wielokryterialne [21] analizy wartości produkcji, które powinny być wypracowane w warstwie zarządzania produkcją. Bilansowanie i programowanie produkcji w zakładzie przeróbki węgla podane jest przykładowo w pracach [6, 13].

W zakładzie wzbogacania węgla znajomość charakterystyk węgla surowego i potrzeb rynku (zwłaszcza na etapie projektowania układu technologicznego) jest niepełna. Z kolei podczas produkcji zmieniają się często punkty pracy maszyn przerobczych, ceny węgla, a nawet normy ekologiczne. Wszystkie te czynniki wpływają na konieczność stosowania – oprócz optymalizacji projektowej wstępnej – optymalizacji bieżącej procesów przerobczych w warstwie optymalizacji, czyli takiego sterowania procesów wzbogacania, dzięki któremu uzyskać można np. maksymalną wartość produkcji o zadanej jakości. Celem optymalizacji bieżącej jest więc najlepsze wykorzystanie węgla surowego, zależnie od bieżących kontraktów handlowych, wymuszających określoną jakość produktów³.

Wypracowane w warstwie zarządzania produkcją sterowania optymalne (optymalne wartości parametrów rozdziału operacji przerobczych) są przekazywane i zadawane do niższych warstw struktury sterowania w celu realizacji odpowiedniego zadania produkcyjnego. W praktyce przemysłowej w warstwie optymalizacji najczęściej stosowane jest sterowanie stanem ustalonym. Wskutek różnych zakłóceń, czyli zmian wartości wejść niesterowanych oraz nieuniknionych błędów sterowania, wynikających chociażby z niepewności pomiarów w warstwie sterowania bezpośredniego, współrzędne rzeczywiste osiągniętego punktu pracy obiektu sterowania różnią się od współrzędnych punktu optymalnego. Gdyby wartości zakłóceń były znane, czyli poprawnie zmierzone bądź zidentyfikowane, wtedy zadanie optymalizacji mogłoby być poprawnie rozwiązane przy znajomości modelu statycznego obiektu sterowania.

Charakterystyka statyczna obiektu jednak zmienia się, i to nieraz znacząco, pod wpływem zakłóceń, które najczęściej są niemierzalne albo trudne do zmierzenia [18]. Możliwe jest, w ograniczonym stopniu, poszukiwanie punktu ekstremalnego tradycyjnymi metodami regulacji ekstremalnej z badaniem znaków pochodnych wymuszeń i odpowiedzi [10]. Opracowane zostały jednak predykcyjne, iteracyjne algorytmy regulacji ekstremalnej, których ogólna struktura przedstawiona jest na rys. 4.

³ Doświadczenia innych zakładów przemysłowych, w których od dawna stosuje się optymalizację bieżącą, pokazują, że jest to proces nieustanny, którego nie należy traktować jako jednorazowy etap, lecz jako kierunek ciągłego działania [14]. Zwłaszcza sterowanie komputerowe otwiera tutaj nowe możliwości [7, 11].



Rys. 4. Struktura sterowania iteracyjnego optymalizacji stanu ustalonego [19]

Algorytmy predykcyjne po każdym próbkowaniu sygnałów wejściowych i optymalizacji funkcji celu, sformułowanej w pewnym określonym horyzoncie czasowym, wyznaczają odpowiednie sterowania. Względnie prostym sposobem jest wykorzystanie danych nowego punktu pomiarowego do identyfikacji oraz poprawy – adaptacji – modelu obiektu [8]. Inne, zaawansowane algorytmy iteracyjnej optymalizacji bieżącej punktu pracy zostały obszernie, wraz z przykładami, scharakteryzowane w pracy [19]. Są to algorytmy działające w warunkach dużej niepewności, wynikającej zarówno z niedokładności modelu obiektu, jak i błędów szacowania zakłóceń. W układzie z algorytmem sterowania (jak na rys. 4.) ocena bieżącej wartości produkcji (na podstawie danych ekspedycyjnych z wag taśmowych i popiołomierzy) oraz oszacowanie zakłóceń (np. zmian własności technologicznych węgla surowego za pomocą pomiarów parametrów jakościowych oraz analizy składu ziarnowego w trybie on-line) oddziałujących na obiekt sterowania

prowadzić mogą do wypracowania odpowiednich korekt wartości zadanych parametrów rozdziału.

Reasumując, można stwierdzić, że optymalizacja bieżąca stanu ustalonego polega na etapowych, sukcesywnych działaniach dostrajania wartości zadanych do regulatorów w warstwie sterowania bezpośredniego. Wartości zadane są optymalizowane, a celem ich zmian jest kompensacja zmian sygnałów na wejściach niesterowanych oraz cech obiektu [19].

6. PODSUMOWANIE

Z przeprowadzonej kwerendy różnych opracowań wynika, że węgiel kamienny będzie jeszcze przez dłuższy czas pełnił rolę podstawowego surowca, zapewniającego bezpieczeństwo energetyczne kraju [1, 3, 4, 15, 17]. Niezwykle ważnym zagadnieniem ekonomicznym jest więc lepsze wykorzystanie węgla surowego poprzez

jego optymalne wzbogacanie, czemu sprzyja hierarchiczna struktura warstwowa. Sterowanie i zarządzanie złożonym obiektem przemysłowym, jakim jest układ technologiczny przeróbki węgla, jest dokonywane w kilku warstwach uporządkowanych hierarchicznie. Scharakteryzowano zatem zagadnienia dekompozycji celu sterowania na odpowiednie cele cząstkowe, które wyznaczają odpowiednie zadania cząstkowe, realizowane w poszczególnych warstwach struktury hierarchicznej. Omówione zostały ogólnie rozwiązania aktualnie stosowane oraz postulowane.

Zestaw zadań, które są wykonywane przez system automatyki, oraz powiązania pomiędzy tymi zadaniami tworzą strukturę funkcjonalną systemu automatyki. Najbardziej charakterystyczną cechą struktury funkcjonalnej są hierarchiczne powiązania między grupami algorytmów sterowania w różnych warstwach sterowania struktury hierarchicznej (z reguły algorytm warstwy wyższej wyznacza parametry zadawane do kilku algorytmów warstwy niższej). Najważniejsze właściwości hierarchicznego sterowania i zarządzania [14], to:

- dokonywana jest dekompozycja złożonego problemu decyzyjnego na szereg problemów decyzyjnych prostszych i bardziej precyzyjnie określonych,
- algorytmy sterowania w poszczególnych warstwach mogą być wykonywane równolegle, co skraca czas obliczeń, a to z kolei jest szczególnie istotne przy krótkim horyzoncie sterowania,
- podział obciążenia obliczeniowego pozwala na osiągnięcie większej niezawodności systemu automatyki,
- w przypadku konieczności modyfikacji algorytmów sterowania zasięg modyfikacji jest bardziej ograniczony,
- niezawodność systemu jest znacząco lepsza – awaria lokalnego układu regulacji nie pociąga za sobą konieczności przerwania ruchu całego zakładu.

Struktura warstwowa pozwala również na elastyczne reagowanie w przypadkach różnych typów zakłóceń produkcji. Ułatwia wprowadzenie odpowiednich scenariuszy postępowania przy różnych awariach, a także tworzenie alternatywnych harmonogramów produkcji. Wszystko to razem, wraz z modelowaniem produkcji w warstwach zarządzania, może być źródłem wiedzy o układzie technologicznym przeróbki węgla. Wiedza jest podstawą rozwoju przedsiębiorstw przyszłości, będzie ona też najistotniejszym czynnikiem przewagi konkurencyjnej [12]. Można nawet powiedzieć, że barierą rozwoju społecznego nie jest zdolność produkcyjna przedsiębiorstw, lecz zdolność opracowywania nowych idei, a więc szybkość rozwoju technologii. W dużym stopniu opracowywanie nowych koncepcji produkcyjnych i wy-

lasków zależy od technologii przetwarzania informacji i zarządzania wiedzą [15]. Zagadnienia te w istotnym stopniu mogą być rozwijane w hierarchicznej strukturze sterowania i zarządzania.

Literatura

1. Barszcz M., Kaliś H.: *Polityka energetyczna. Zagrożenia dla polskiej gospodarki*. „Nowa Energia”, 2009, nr 3(9), s. 14-22.
2. Bartoniek W., Głowiak S.: *Ekonomiczne aspekty eksploatacji osadzarek*, Materiały IX Konferencji Automatyzacji Procesów Przeróbki Kopalni, Szczyrk, 4-6 czerwca 2003, s. 7-2.; Szczyrk, 28-30 maja 2008, s. 9-21.
3. Blaschke W.: *Perspektywy węgla w gospodarce świata i Polski – szanse polskiego węgla w Unii Europejskiej*. *Polityka Energetyczna*, t. 8, z. spec., WIGSMiE, Kraków 2005, s. 13-34.
4. Buchwald P.: *Rola węgla w założeniach do bilansu paliwowo-energetycznego Polski*, Materiały Konferencyjne Kongresu Górnictwa Podziemnego, Gliwice 2010, s. 19-31.
5. Cierpisz S.: *Zakłócenia w układach sterowania produkcji mieszanki węgla*. „Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa”, 1997, nr 3 (320), s. 28-33.
6. Cierpisz S.: *Bilansowanie produkcji zakładu wzbogacania węgla*. „Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej”, nr 1697, s. Górnictwo, z. 269, Gliwice 2005, s. 353-359.
7. Duda J. T.: *Modele matematyczne, struktury i algorytmy nadrzędnego sterowania komputerowego*, Uczelniane Wydawnictwo Naukowe–Dydaktyczne AGH, Kraków 2003.
8. Forbes J.F.: *Model Structure and Adjustable Parameter Selection For Operations Optimization*, McMaster University, 1994.
9. Głowiak S.: *Wybrane zagadnienia regulacji jakości produktów wzbogacania w osadzance*, Materiały XII Konferencji Automatyzacji Procesów Przeróbki Kopalni, Szczyrk, 31 maja – 2 czerwca 2006, s. 83-96.
10. Halawa J.: *Symulacja i komputerowe projektowanie dynamiki układów sterowania*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2007.
11. Havlena V., Lu J.: *A distributed automation framework for plant-wide control, optimization, scheduling and planning*, 16th IFAC World Congress, Prague, Czech Republic, 4-8 July 4, 2005, p. 80-94, DVD Tu-M03-TP/14 (paper code).
12. Klonowski Z. J.: *Systemy informatyczne zarządzania przedsiębiorstwem. Modele rozwoju i właściwości funkcjonalne*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2004.
13. Kostorz I.: *Prognozowanie i bilansowanie produkcji zakładu wzbogacania węgla jako obiektu sterowania z zastosowaniem modelu symulacyjnego*, -raca doktorska (niepublikowana), Gliwice 2008, Biblioteka Główna Politechniki Śląskiej.
14. Niederliński A.: *Systemy komputerowe automatyki przemysłowej*, t. 2. *Zastosowania*, WNT, Warszawa 1985.
15. Pielot J.: *Wielokryterialna optymalizacja produkcji układów technologicznych grup wzbogacalników grawitacyjnych*, Monografia nr 306, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2011.
16. Pielot J.: *Wybrane zagadnienia hierarchicznego sterowania i zarządzania w zakładzie przeróbki węgla*, cz. I. „Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa”, 2014, nr 3 (517), s. 37-44.
17. Sienkiewicz M.: *Węgiel a bezpieczeństwo energetyczne Polski*. „Nowa Energia”, 2009, nr 4(10), s. 48-51.
18. Świątek J.: *Wybrane zagadnienia identyfikacji statycznych systemów złożonych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2009.
19. Tatjewski P.: *Sterowanie zaawansowane obiektów przemysłowych. Struktury i algorytmy*, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2002.
20. Trybalski K.: *Analiza właściwości dynamicznych procesów i układów technologicznych przeróbki surowców mineralnych*, Rozprawy Monografie nr 83, Uczelniane Wydawnictwo Naukowe–Dydaktyczne AGH, Kraków 1999.
21. Witkowski T.: *Decyzje w zarządzaniu przedsiębiorstwem*, WNT, Warszawa 2000.

Artykuł został zrecenzowany przez dwóch niezależnych recenzentów.