

Sławomir GOLAK, Tadeusz WIECZOREK
Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Materiałowej i Metalurgii, Katedra Informatyki
Przemysłowej

KONCEPCJA SYSTEMU EKSPERTOWEGO DO OCENY I POPRAWY EKOEFEKTYWNOŚCI KOPALŃ

Streszczenie. W artykule przedstawiono koncepcję budowy systemu ekspertowego służącego do kompleksowej oceny i optymalizacji kopalń węgla kamiennego pod kątem zespołu zagadnień łącznie określanych pojęciem ekoefektywności. Złożoność oraz różniąca się dla poszczególnych kopalń struktura procesu technologicznego przekłada się na komplikację budowy systemu ekspertowego, którego celem jest analiza dowolnej polskiej kopalni. Rozważany system nie jest systemem ekspertowym rozumianym w sposób klasyczny, lecz raczej systemem informatycznym, który za pomocą różnych narzędzi realizuje funkcję doradczą dla kadry kierowniczej przedsiębiorstwa górniczego.

Słowa kluczowe: system ekspertowy, ekoefektywność, optymalizacja

CONCEPT OF EXPERT SYSTEM FOR EVALUATION AND IMPROVEMENT OF ECO-EFFICIENCY OF MINES

Summary. The paper presents concept of structure of an expert system for complex estimation and optimization of coal mines in terms of their eco-efficiency. Complexity and diversity of technological processes cause the construction complexity of the expert system, which objective is analysis of any Polish mine. The analyzed system is not a classical expert system but rather computer system, which with the use of various tools realizes an advisory function for management of a mining company.

Keywords: expert system, eco-efficiency, optimization

1. Wstęp

Doktryna zrównoważonego rozwoju wymaga, by w procesie projektowania procesu technologicznego uwzględniać jego wpływ na środowisko. Stosuje się wiele miar tego wpływu. Jedną z popularniejszych technik są ekowskaźniki wyznaczone na podstawie analizy cyklu życia produktu LCA (ang. *Life Cycle Assessment*) oraz opartego na nich wskaźnika efektywności, wyrażającego uzyskane korzyści w zestawieniu z wpływem procesu na środowisko [1, 2].

Celem budowanego systemu ekspertowego jest umożliwienie oceny procesu technologicznego realizowanego w kopalni pod względem jego oddziaływania na środowisko. Będzie on służył jako system wspomagający podejmowanie decyzji przez kadrę zarządzającą na etapie projektowania lub modyfikacji technologii wydobywania węgla w kopalni.

Systemy ekspertowe znalazły dotychczas powszechne zastosowanie w różnych gałęziach przemysłu ciężkiego. Przykładem może być system ekspertowy wdrożony na początku lat dziewięćdziesiątych w Bethlehem Steel (USA) [3], który zarządzał zamówieniami klientów, optymalizując cykl produkcyjny różnych gatunków stali w zależności od ich jakości, oraz system ekspertowy do harmonogramowania produkcji stali wysokojakościowych, zastosowany w 1992 r. w zakładach Bohler Uddeholm w Kapfenbergu [4].

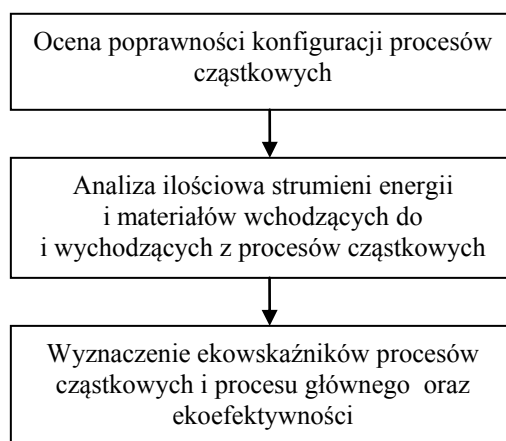
W kolejnych latach wzrosło zainteresowanie wykorzystaniem w praktyce przemysłowej systemów hybrydowych, pojawiało się coraz więcej prac na ten temat [5]. Podstawowy problem systemu hybrydowego to zintegrowanie modelu stworzonego na podstawie danych (najczęściej sieci neuronowej) z modelem procesu, opisanym w sposób symboliczny [6, 7] (np. przez zestaw reguł). Zintegrowanie sieci neuronowej z regułowym systemem wiedzy tworzy system hybrydowy, który może samodzielnie podejmować decyzje. Analizę i porównanie różnych hybrydowych systemów neuronowych służących do przetwarzania wiedzy podanej w postaci reguł zawiera praca [5]. Zastosowanie modelu hybrydowego w celu zwiększenia wydajności stalowniczego procesu elektrołukowego w stalowni Bous (Niemcy) opisano w pracy [8]. Taki hybrydowy system jest zdolny do reagowania na dynamiczne zmiany w procesie i do adaptacji on-line.

W porównaniu ze wspomnianymi procesami technologicznymi proces wydobywania węgla jest bardziej złożony, wieloetapowy, o strukturze silnie zależnej od lokalnych uwarunkowań kopalni, dostępności złóż i warunków rynkowych. Systemy informacyjne w przedsiębiorstwach górniczych nie są tak precyzyjnie zdefiniowane, jak w przypadku branż opartych na klasycznych liniach technologicznych. Utrudnia to tworzenie systemów ekspertowych wspomagających zarządzanie kopalnią i przekłada się na wyraźnie mniejszą liczbę publikacji w tej dziedzinie. Wśród dostępnych systemów ekspertowych silnie reprezentowane są systemy dotyczące bezpieczeństwa [9, 10]. Jest to spowodowane przede

wszystkim dostępnością w krajach posiadających kopalnie węglowe w miarę precyzyjnych regulacji prawnych. Powstały też systemy ekspertowe obejmujące szerszy zakres zagadnień, które zapewniały także optymalizację pracy przedsiębiorstwa górniczego [11, 12], poruszając się jednak często bliżej strefy ekonomiki kopalni, a nie samego procesu technologicznego, lub ograniczając się do wybranych procesów cząstkowych.

Wspomniana wcześniej złożoność procesu wydobywczego komplikuje także budowę systemu ekspertowego, który miałby umożliwiać ocenę efektywności przedsiębiorstwa górniczego oraz pełnić funkcję doradczą przy doborze wariantów i parametrów stosowanych technologii w celu poprawy tego wskaźnika. System ma pozwalać zarówno na ocenę stanu aktualnego, jak i wspomagać podejmowanie decyzji. Te dwa główne zadania projektowanego systemu ekspertowego znajdują odzwierciedlenie w jego głównych elementach – części oceniającej systemu ekspertowego i części doradczej tego systemu.

Stopień komplikacji systemu, jego nietypowa, heterogeniczna struktura powodują, iż trudne byłoby zastosowanie do jego budowy standardowych narzędzi dostępnych na rynku (np. systemów szkieletowych). Z tego powodu dedykowany system ekspertowy zostanie zbudowany z wykorzystaniem platformy programistycznej .NET, która dostarcza różnorodnych narzędzi do pracy z danymi przechowywanymi w bazach relacyjnych i w plikach XML, frameworków prezentacyjnych i bardzo szerokiej gamy gotowych bibliotek przydatnych w tworzeniu systemów ekspertowych.



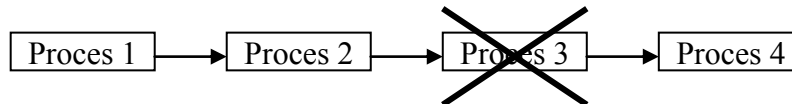
Rys. 1. Struktura warstwowa części oceniającej systemu ekspertowego
Fig. 1. Layer structure of estimating part of expert system

2. Część oceniająca systemu ekspertowego

Część oceniająca projektowanego systemu ekspertowego musi charakteryzować się strukturą wielowarstwową przedstawioną na rys. 1. Wyniki dostarczone przez poszczególne warstwy stanowią podstawę realizacji funkcjonalności warstwy następnej.

2.1. Warstwa oceny konfiguracji procesów cząstkowych

Funkcjonalność realizowana w tej warstwie zostanie zrealizowana na podstawie klasycznego systemu ekspertowego wykorzystującego bazę wiedzy zapisaną w formie regułowej. Przy bardzo zróżnicowanych przebiegach procesu technologicznego, realizowanych w poszczególnych kopalniach, jedyną możliwością zbudowania wspomnianej bazy wiedzy jest metoda wywiadów z ekspertami.



Rys. 2. Łańcuch procesów cząstkowych
Fig. 2. Chain of partial processes

Pierwsza część bazy wiedzy będzie zawierać reguły opisujące konieczność występowania lub brak obecności w łańcuchu procesu wydobycia węgla poszczególnych wariantów procesów cząstkowych (rys. 2).

```

IF warunki lokalne AND sąsiadujące procesy cząstkowe THEN proces cząstkowe
musi/nie może istnieć
  
```

Każdy proces może zostać opisany w bazie wiedzy w postaci odrębnego modułu decyzyjnego [13], w którym wszystkie reguły mają ten sam atrybut w konkluzji, przyjmujący wartość akceptacji lub odrzucenia procesu w danym miejscu łańcucha. Ponieważ taki moduł zawierałby jedynie reguły bezpośrednio łączące wejścia jednostki decyzyjnej z jej wyjściami, zadanie maszyny wnioskującej sprowadzałoby się jedynie do odnalezienia reguły pasującej do danego procesu i jego otoczenia.

Druga część bazy wiedzy obejmuje reguły dotyczące doboru modeli pozwalających na wyznaczenie parametrów poszczególnych procesów cząstkowych.

```

IF warunki lokalne AND procesy poprzedzające THEN model_parametru(warunki
lokalne)
  
```

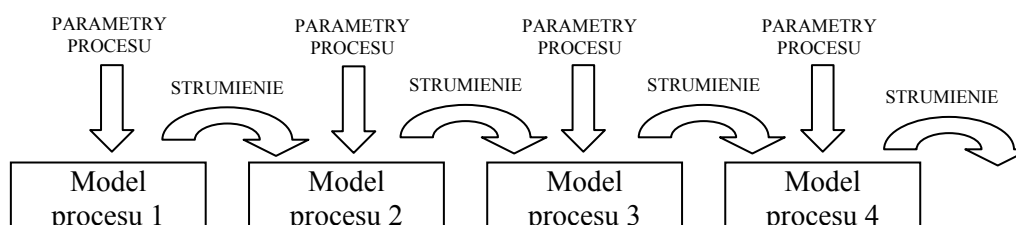
Także tutaj każdy proces może zostać opisany w bazie wiedzy odrębnym modulem decyzyjnym o atrybucie na wyjściu wskazującym model matematyczny pozwalający wyznaczyć parametry ilościowe procesu cząstkowego.

Stosowane do wyznaczenia parametrów modele, tworzące bazę modeli, będą kodowane albo w formie zależności logicznych, albo wzorów matematycznych, zakodowanych w formie modułów .NET (ang. *.NET assemblies*).

Na podstawie zgromadzonej wiedzy system ekspertowy ocenia, czy wprowadzona przez użytkownika struktura łańcucha procesów cząstkowych i ich parametry są zgodne z wiedzą technologiczną pozyskaną od ekspertów. Dodatkowo ta warstwa systemu może wspierać użytkownika w samym procesie projektowania technologii wydobywania węgla, wskazując, które procesy muszą lub nie mogą zostać dodane do łańcucha procesów cząstkowych, oraz może doradzać najbardziej odpowiednie parametry ilościowe tych procesów. Funkcjonalność ta wykracza poza główne cele projektowanego systemu ekspertowego, ale może stanowić bardzo przydatną cechę dla użytkownika systemu.

2.2. Analiza ilościowa strumieni energii, materiałów wchodzących do i wychodzących z procesów cząstkowych

Po zestawieniu łańcucha procesów cząstkowych składających się na technologię wydobywania węgla możliwe jest przejście do analizy ilościowej strumieni energii i materiałów przetwarzanych przez poszczególne procesy cząstkowe. Analiza ta ma na celu określenie łącznych strumieni przepływających przez globalny proces wydobywania oraz dostarczenie danych niezbędnych do wyznaczenia ekowskaźników w kolejnej warstwie systemu ekspertowego.

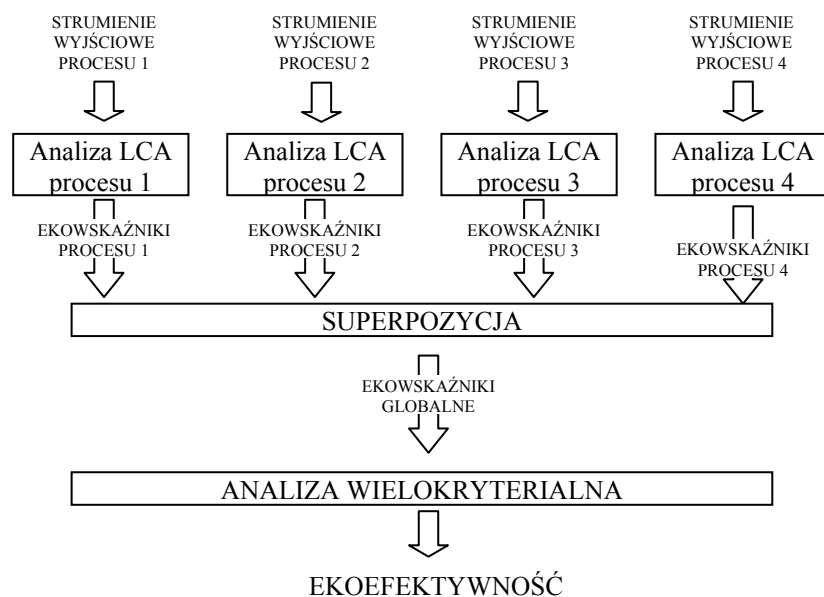


Rys. 3. Wyznaczenie wyjściowych strumieni materiałów i energii na podstawie strumieni wejściowych i parametrów procesów cząstkowych

Fig. 3. Determination of output material and energy streams based on input streams and parameters of partial processes

Ta część budowanego systemu nie jest już klasycznie rozumianym systemem ekspertowym wykorzystującym jasno wydzieloną bazę wiedzy, a jedynie zbiorem modeli matematycznych przypisanych każdemu z procesów cząstkowych, które opisują zależności pomiędzy ich strumieniami wejściowymi i wyjściowymi. Funkcjonalność ta zostanie zrealizowana z wykorzystaniem zbioru, w którym występują dwie klasy modeli. W przypadku procesów cząstkowych, dla których będzie możliwe zebranie odpowiedniej, dużej liczby danych opisujących strumienie materiałów energii wchodzących do i wychodzących z tych procesów, zostaną zbudowane modele oparte na jednym z

algorytmów sztucznej inteligencji (od regresji liniowej poczynając, a na wielu wariantach sieci neuronowych kończąc). Wybór konkretnej metody będzie uzależniony od dostępności danych i stopnia złożoności zależności wiążących strumienie wejściowe i wyjściowe. Jednakże specyfika procesów górniczych, wyrażająca się w ich małej powtarzalności, niepełnym monitoringu, wskazuje, iż w przypadku większości procesów cząstkowych konieczna będzie budowa modeli z wykorzystaniem wywiadu z ekspertem i zapisu zależności w postaci wzorów. Drogą pośrednią może być stworzenie części reguł na podstawie danych [14, 15], a następnie ich uzupełnienie i korekta na podstawie wywiadów. Modele utworzone obiema technikami będą przechowywane w bazie w postaci skompilowanej jako moduły .NET (ang. *assemblies*).

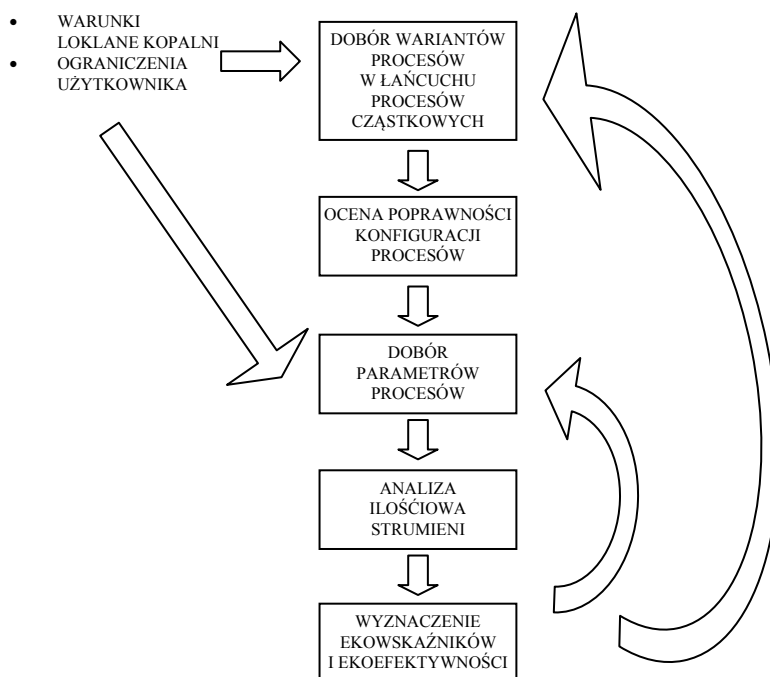


Rys. 4. Wyznaczenie ekowskaźników globalnych i ekoefektywności procesu technologicznego kopalni

Fig. 4. Determination of global eco-indicators and eco-efficiency of technological process of mine

2.3. Wyznaczenie ekowskaźników procesów cząstkowych i procesu głównego

Ostatnia warstwa części systemu realizująca funkcję oceny opiera się na zestawie zależności łączących wartości strumieni wpływających z i wpływających do procesów z wartościami ekowskaźników. Także ta warstwa nie wykorzystuje klasycznej bazy wiedzy. Potrzebne zależności to sumy ważone, których współczynniki są wyznaczone za pomocą narzędzi realizujących metodę LCA. Globalne ekowskaźniki dla całego procesu wydobywania stanowią superpozycję wskaźników wyznaczonych dla procesów cząstkowych. Na podstawie obliczonych wartości ekowskaźników i analizy wielokryterialnej zostanie określona ekoefektywność analizowanego procesu wydobywania.



Rys. 5. Cykl optymalizacyjny części doradczej systemu ekspertowego
 Fig. 5. Optimization cycle of advisory part of expert system

3. Część doradcza systemu ekspertowego

Cześć doradcza systemu ekspertowego, wspomagająca kadrę zarządczą w poprawie efektywności procesu technologicznego realizowanego na kopalni, stanowi rozwinięcie części oceniającej o algorytmy optymalizacji numerycznej, w których jako kryterium optymalizacji wykorzystywana jest wartość efektywności wyznaczana w części oceniającej systemu. Optymalizacja będzie realizowana w układzie dwóch zagnieżdżonych cykli powiązanych z odpowiednimi warstwami struktury części oceniającej.

Cykl zewnętrzny będzie realizował optymalizację kombinatoryczną łańcucha procesów cząstkowych składających się na globalny proces technologiczny kopalni. Cykl ten będzie realizowany z wykorzystaniem algorytmu ewolucyjnego, ponieważ przy niskim koszcie obliczeniowym wyznaczenia funkcji kryterialnej pozwala zastosować algorytmy, które dobrze sprawdzają się w zadaniach kombinatorycznych (obecnych w tym cyklu) i znacznie zwiększają prawdopodobieństwo znalezienia optimum globalnego.

Zadaniem cyklu wewnętrznego będzie dobranie dla zadanej konfiguracji procesów cząstkowych ich parametrów w celu maksymalizacji wskaźnika efektywności całego procesu technologicznego kopalni. Optymalizacja parametrów procesów cząstkowych realizowana wewnątrz tego cyklu będzie mogła być przeprowadzona narzędziami optymalizacji lokalnej dobrze sprawdzającymi się w zagadnieniach ciągłych, szczególnie

jeżeli istnieje przynajmniej częściowa możliwość analitycznego wyznaczenia gradientu funkcji kryterialnej. Wartość funkcji kryterialnej dla rozwiązania optymalnego w tym cyklu będzie stanowić wartość oceny danej wersji łańcucha procesów cząstkowych optymalizowanego przez cykl zewnętrzny optymalizacji kombinatorycznej.

Zarówno przy doborze składowych łańcucha procesów, jak i parametrów poszczególnych procesów cząstkowych zostaną uwzględnione ograniczenia wynikające z lokalnych uwarunkowań kopalni oraz warunki narzucone przez użytkownika systemu.

4. Podsumowanie

W pracy przedstawiono koncepcję budowanego obecnie (w ramach projektu badawczo-rozwojowego NCBiR) systemu ekspertowego służącego do kompleksowej oceny kopalni węgla kamiennego w warunkach polskich. Tę kompleksową ocenę, uwzględniającą zagadnienia techniczne, ekonomiczne, społeczne i środowiskowe, nazwano efektywnością. Na tym etapie badań wstępnie wybrano i zagregowano istotne procesy technologiczne występujące w kopalniach węgla kamiennego. Uwzględniono aktualną strukturę procesów produkcji węgla kamiennego, opierając się na wiedzy i doświadczeniu ekspertów górniczych oraz na istniejących modelach kopalni, które zostały zaktualizowane, przy uwzględnieniu uwarunkowań funkcjonowania krajowych kopalń węgla kamiennego. Proces produkcji węgla zdefiniowano jako układ procesów cząstkowych, czynności i operacji technologicznych, realizowanych w określonym czasie i przestrzeni, wykonywanych przez zespoły ludzkie przy użyciu określonych środków technicznych, mających na celu wyprodukowanie węgla handlowego o określonych parametrach jakościowych.

Procesy produkcji węgla kamiennego podzielono na cztery główne grupy, do których zaliczono procesy: przygotowawcze, podstawowe, pomocnicze oraz towarzyszące. Procesy te zostały podzielone na 14 procesów jednostkowych. Zestawiono zbiory danych wejściowych i wyjściowych dla poszczególnych procesów oraz dla całej kopalni, które są niezbędne dla zaprojektowania systemu ekspertowego. Wykonane badania pozwoliły na opracowanie takiej koncepcji systemu informatycznego pełniącego zadania doradcze, aby była możliwa jego fizyczna realizacja w warunkach przedsiębiorstwa o bardzo złożonej, heterogenicznej strukturze i nie w pełni zdefiniowanym systemie informacyjnym, jakim jest kopalnia węgla kamiennego.

Publikacja została opracowana w ramach projektu „Opracowanie systemu ekspertowego do oceny efektywności środowiskowej, ekonomicznej i społecznej kopalń węgla kamiennego w Polsce” finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach Programu Badań Stosowanych.

BIBLIOGRAFIA

1. Czaplicka K. (red.): Zastosowanie oceny cyklu życia (LCA) w ekobilansie kopalni, GIG, 2002.
2. Golak S., Burchart-Korol D., Czaplicka-Kolarz K., Wieczorek T.: Application of neural network for the prediction of eco-efficiency. *Lecture Notes in Computer Science*, 2011, Vol. 6677, s. 380÷387.
3. Dorn J.: Expert systems in the steelmaking industry. *Proc. Int. Conf. On Computerized Production Control in Steel Plant (CPC'93)*, 1993, s. 219÷227.
4. Dorn J., Shams R.: Scheduling high grade steel making. *IEEE Expert Journal*, 1995, s. 1÷22.
5. McGarry K., Wermter S., McIntyre J.: Hybrid neural systems: from simple coupling to fully integrated neural networks. *Neural Computing Surveys*, nr 2, 1999, s. 62÷93.
6. Ghosh J., Taha I.: A neuro-symbolic hybrid intelligent architecture with applications. [w:] Jain L., Fanelli A.M. (red.) *Recent advances in artificial neural networks*. CRC Press Boca Raton, New York 2000.
7. Wermter S., Sun R.: Hybrid neural systems. *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 1178, 2000, s. 1÷13.
8. Gerling R., Louis T., Schmeiduch G., Sesselmann R., Sieber A.: Improving AC-EAF operating process at stahlwerk Bous with a hybrid model. *AISE\Steel Technology*, nr 10, 2001, s. 41÷45.
9. Yingxu Q., Hongguo Y.: Design and Application of Expert System for Coal Mine Safety. *Second IITA International Conference on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, s. 452÷454.
10. Liu X., Huang X.: Research on Pre-warning Expert System of Coal Mine Gas Safety Based on Object-oriented. *IEEE International Symposium on Knowledge Acquisition and Modeling Workshop*, 2008, KAM Workshop 2008, s. 1109÷1112.
11. Zhang H., Zhao G.: CMEOC – An expert system in the coal mining industry. *Expert Systems with Applications*, Vol. 16, nr 1, 1999, s. 73÷77.
12. Brzywczy E.: The planning optimization system for underground hard coal mines. *Archives of Mining Sciences*, Vol. 56, nr 2, 2011, s. 161÷178.

13. Siminski R., Wakulicz-Deja A.: Application of Decision Units in Knowledge Engineering, Rough Sets and Current Trends in Computing. Lecture Notes in Computer Science, Vol. 3066, 2004, s. 721÷726.
14. Wieczorek T., Mączka K., Świtała P.: Automatyczne tworzenie baz wiedzy z wykorzystaniem drzew decyzyjnych. [w:] Kozielski S., Małysiak B., Kasprowski P., Mrozek D. (red.): Bazy danych – nowe technologie. Architektura, metody formalne i zaawansowana analiza danych. WKŁ, Warszawa 2007, s. 385÷392.
15. Wieczorek T., Świtała P.: Wykorzystanie algorytmu CART do automatycznego tworzenia bazy wiedzy systemu ekspertowego. [w:] Kozielski S., Małysiak B., Kasprowski P., Mrozek D. (red.): Bazy danych – nowe technologie. WKŁ, Warszawa 2008, s. 439÷450.

Wpłynęło do Redakcji 30 stycznia 2014 r.

Abstract

The paper presents concept of structure of an expert system for complex estimation and optimization of coal mines in terms of their eco-efficiency. Complexity and diversity of technological processes cause the construction complexity of the expert system, which objective is analysis of any Polish mine.

The designed system consists of two main parts – estimating one and advisory one. The first part of the expert system contains three layers: estimation of correctness of process chain, quantitative analysis of material and energy streams, determination of eco-efficiency and eco-indicators. The second advisory part of the system is based on numerical optimization algorithms where criterion function is calculated by the estimating part.

Adresy

Sławomir GOLAK: Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Materiałowej i Metalurgii, Katedra Informatyki Przemysłowej, ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice, Polska, slawomir.golak@polsl.pl.

Tadeusz WIECZOREK: Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Materiałowej i Metalurgii, Katedra Informatyki Przemysłowej, ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice, Polska, taduesz.wieczorek@polsl.pl.