

## Komputerowy system ekspertowy do wspomagania pracy operatora procesu metalurgicznej fabryki kwasu siarkowego

*Przedstawiono ogólną strukturę komputerowego Systemu Ekspertowego OPERATOR, służącego do wspomagania pracy operatora (technologa) metalurgicznej fabryki kwasu siarkowego. System składa się z 2 ściśle współpracujących części: "Symulacyjnej" - wykorzystującej modele matematyczne i "Przetwarzania danych procesowych" - przetwarzającej dane rejestrowane w plikach archiwalnych sterowni komputerowej.*

### Process Operator-Supporting Computer Expert System for Metallurgical Sulphuric Acid Plant

*Abstract - A computer expert system OPERATOR developed as a software support for operator (process engineer) of metallurgical Sulphuric Acid Plant is presented. The system includes two closely co-operating parts: "Simulation" utilizing mathematical models and "Plant Data Processing" performing data recorded in archive files by an industrial computer data acquisition system.*

#### 1. WPROWADZENIE

Rosnące wymagania ochrony środowiska i jakości produktów chemicznych znacznie zwiększają rolę technologa procesu w bieżącej eksploatacji instalacji przemysłowej. W procesie podejmowania decyzji winien on - dysponując na ogół niewielką ilością czasu - podejmować optymalne decyzje. Pomocą w takiej sytuacji mogą być tzw. Systemy Ekspertowe (SE), których głównym zadaniem jest gromadzenie tzw. "baz wiedzy" i tworzenie narzędzi komputerowych ułatwiających dostęp do zgromadzonych w nich informacji. Najczęściej bazy wiedzy gromadzą reguły w postaci zdań logicznych typu: *Jeśli... to... (If...then...)*. Reguły te, nazwane deklaratywną reprezentacją wiedzy, wynikać mogą bądź ze ścisłej wiedzy fizykochemicznej, bądź też z doświadczenia operatorów procesu. Tego rodzaju Systemy są dziś najbardziej popularne. Systemy takie są w istocie dość proste i mają z natury rzeczy możliwości ograniczone do statycznej analizy pewnego zbioru faktów. Znacznie bardziej bogate możliwości daje wykorzystanie w SE modeli matematycznych. W inżynierii chemicznej ten rodzaj systemów zaczął się rozwijać dopiero w ostatnich latach. Jednym z pierwszych SE w tej dziedzinie, wykorzystującym obok deklaratywnej reprezentacji wiedzy również symulacje na modelach matematycznych był prawdopodobnie amerykański system DESIGN-KIT [1]. Nowsze SE np. [2] łączą nowoczesne metody (sieci neuronowe) z obliczeniami na modelach matematycznych. W dziale badawczym firmy Norsk Hydro opracowano, bazujący na modelach matematycznych procesu, system wspomagania pracy operatora fabryki nawozów amonowych [3]. Podobny system dla produkcji amoniaku opracowano w kraju jednak jak wynika z omówienia w [4], nie wykorzystuje on modelowania, lecz wyłącznie wiedzę deklaratywną.

Krajowe instalacje chemiczne często wyposażane są w nowoczesne, komputerowe sterownie rejestrujące wiele parametrów procesu. Bogata informacja gromadzona przez taki układ centralnej rejestracji danych może być lepiej wykorzystana, gdy użyje się specjalnych narzędzi do jej dalszego przetwarzania. Tym celom służyć ma, pracujący *off-line* SE OPERATOR opracowany przez autora wraz zespołem: Robert Marczycki, Zbigniew Ogonowski, Bogusław Zagata i Mateusz Sztaba w Instytucie Chemii Nieorganicznej w Gliwicach

## 2. OGÓLNY OPIS SYSTEMU OPERATOR

Schemat blokowy struktury systemu OPERATOR pokazano na rys.1. System składa się z dwu zasadniczych części:

- **Symulacyjnej**
- **Przetwarzania danych procesowych**

Każda z tych części zawiera po dwa wyodrębnione moduły programowe.

W **części symulacyjnej** [5] najistotniejszy jest program MODEL, któremu w referacie poświęcone będzie nieco więcej uwagi. Program BANK ma natomiast znaczenie zdecydowanie pomocnicze i z tego względu nie będzie szczegółowo omawiany.

Program MODEL służy do przetwarzania informacji o procesie przy pomocy modeli matematycznych. Program składa się z dwu ściśle ze sobą współpracujących bloków funkcjonalnych:

- **Graficznego Menażera Modułów (MM)**
- **Części obliczeniowej SYMUL**

Umożliwia on symulacje wykorzystujące modele matematyczne procesu. Z wyjątkiem małych fragmentów są to zawsze modele oparte o fizykochemiczny opis procesu wykorzystujący wiedzę z zakresu inżynierii chemicznej.

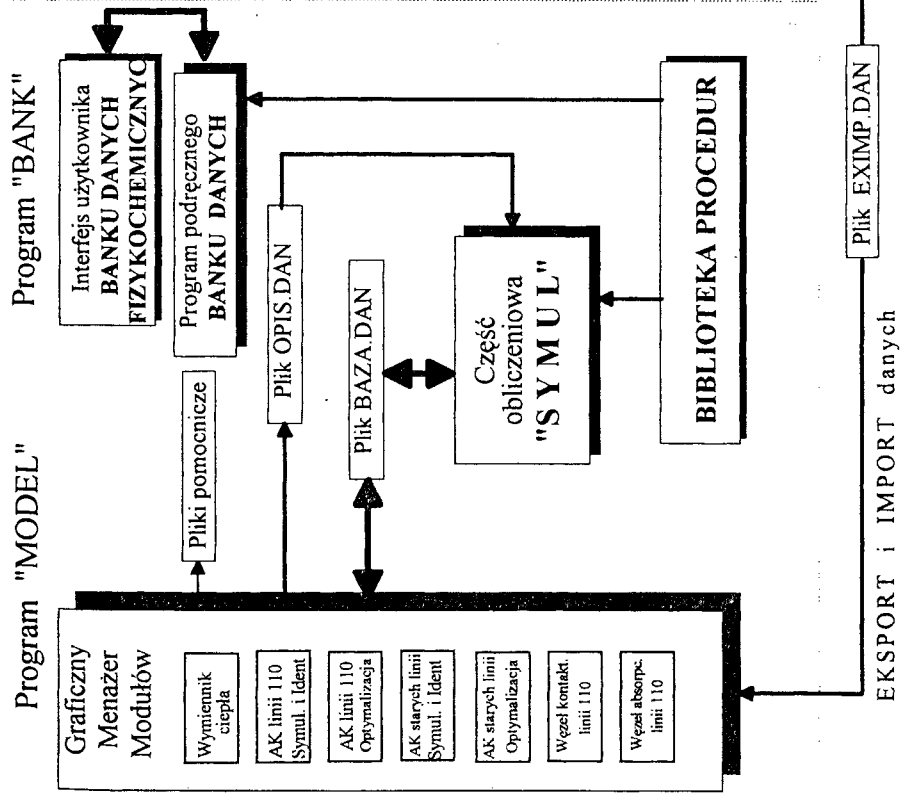
Program MODEL składa się z następujących modułów obliczeniowych:

- ◆ Obliczenia symulacyjne pojedynczego wymiennika ciepła
- ◆ Symulacja i identyfikacja aktualnych parametrów reaktora kontaktowego nazywanego Aparatem Kontaktowym - AK) z podwójną konwersją i absorpcją
- ◆ Optymalizacja temperaturowa stopnia przemiany reaktora z podwójną konwersją i absorpcją
- ◆ Symulacja i identyfikacja aktualnych parametrów reaktora kontaktowego z pojedynczą konwersją i absorpcją
- ◆ Optymalizacja temperaturowa stopnia przemiany reaktora z pojedynczą konwersją i absorpcją
- ◆ Symulacja całego wężła kontaktowego utleniania SO<sub>2</sub>
- ◆ Symulacja całego wężła susząco - absorpcyjnego

Graficzny Menedżer Modułów stanowi interfejs użytkownika, pozwalający na łatwe wprowadzanie danych do symulacji i korzystanie z uzyskiwanych wyników. Zawiera także wbudowane funkcje "eksperta" generującego diagnozy odnoszące się do wprowadzonego zestawu danych do symulacji oraz uzyskiwanych wyników obliczeń.

SYMUL który stanowi właściwy program obliczeniowy, z MM komunikuje się poprzez 2 pliki z danymi, zawierające opis zadania obliczeniowego (w tym konfigurację symulatora) oraz wejściowe dane liczbowe do symulacji. Jego aktywacja następuje również z poziomu MM, do którego powraca się po zakończeniu obliczeń programu symulacyjnego.

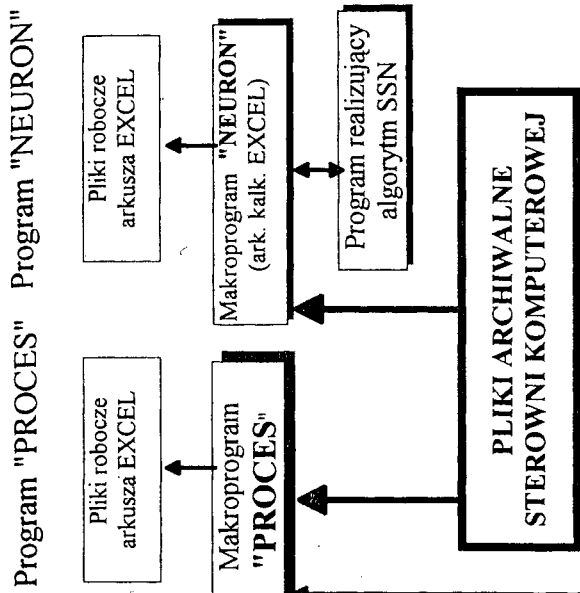
Część symulacyjna systemu



Rys. 1.

Schemat blokowy struktury Systemu Ekspertowego "OPERATOR"

Część przetwarzania danych procesowych



**Część przetwarzania danych procesowych**, zawierająca programy PROCES i NEURON służy do przetwarzania informacji gromadzonej przez wspomnianą na wstępie sterownię komputerową. Ilość rejestrowanych punktów pomiarowych w omawianym przypadku przekracza 100. Sprawę dodatkowo komplikuje fakt, że pliki archiwalne zawierają wielkości mierzone w stosunkowo krótkich odstępach czasu (większość pomiarów co 10 minut, ale wybrane parametry nawet co minutę), w dodatku większość tych zapisów nie została w plikach archiwalnych przetworzona do postaci liczb odpowiadających jakimkolwiek stosowanemu w praktyce układowi jednostek fizycznych i wymaga każdorazowego przeskalowywania. Bezpośrednie "przeoglądanie" takich zapisów jest czynnością znużającą, przy której dawne wyklejanie taśm rejestratorów analogowych wydaje się być zajęciem wręcz komfortowym. Tak więc, generowane zapisy archiwalne wymagają tworzenia specjalnych narzędzi software'owych, celem dalszego ich przetwarzania i wizualizacji gromadzonych w nich danych. Dla umożliwienia wglądu w pliki archiwalne stosuje się zwykle taki ich format cyfrowy, który ułatwia dalsze przetwarzanie informacji. Jest nim zwykle format akceptowany przez standardowe arkusze kalkulacyjne. Współczesne arkusze posiadają wbudowane szerokie możliwości tworzenia makroprogramów, a także wywoływania procedur napisanych w konwencjonalnych językach programowania (jak np. język C, czy Visual BASIC). Wykorzystanie tych możliwości, a także bogatych możliwości środowisk graficznych jak np. MS Windows powoduje, że użytkownik - technolog - może otrzymać gotowy program przetwarzania danych archiwalnych z pozoru nie przypominający arkusza kalkulacyjnego w jego podstawowej formie.

Program (a raczej makroprogram) PROCES służy do takiej wizualizacji danych archiwalnych sterowni komputerowej i przygotowania zestawu wartości średnich, które przekazywane są do części symulacyjnej jako dane wejściowe do obliczeń.

NEURON jest odrębnym programem systemu OPERATOR, służącym do automatycznego rozpoznawania stanów i generowania ocen pracy zmian roboczych na podstawie analizy danych zapisanych w plikach archiwalnych sterowni komputerowej. Jest on zrealizowany jako algorytm opisanej w [6] sieci neuronowej, "nauczonej" oceniać parametry węzła kontaktowego na podstawie ocen testowych wystawianych przez doświadczonego technologa procesu (eksperta).

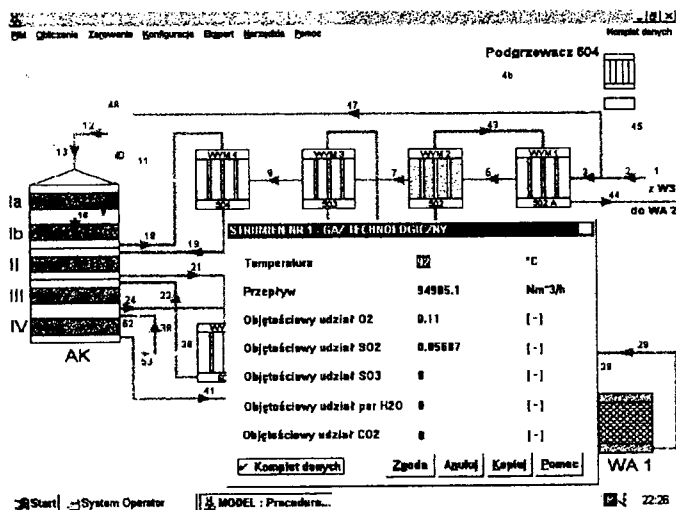
### 3. CZĘŚĆ SYMULACYJNA

#### 3.1. Menażer Modułów

Graficzny "Menażer Modułów" systemu OPERATOR stanowi **Graficzny Interfejs Użytkownika**, wykorzystujący bogate możliwości środowiska MS Windows. Oprogramowanie MM wykonane zostało w języku programowania C<sup>++</sup>. Moduł zapewnia przede wszystkim możliwość wybrania jednego z wymienionych poprzednio wariantów obliczeniowych. Wybór wariantu powoduje wyświetlenie na ekranie, bądź schematu pojedynczego aparatu (jak np. w module "Wymiennik ciepła"), bądź odpowiedniego schematu synoptycznego całego fragmentu instalacji stanowiącego węzeł technologiczny.

Przykład ekranu ze schematem tzw. węzła kontaktowego z widocznym formularzem do wprowadzenia danych dla strumienia gazowego pokazano na rys. 2. Strumienie, dla których przed rozpoczęciem obliczeń musimy wprowadzić pewne dane liczbowe są na schemacie synoptycznym odróżniane jaśniejszym kolorem. Obliczenia we wszystkich modułach obliczeniowych mogą być wykonywane wielowariantowo, co między innymi oznacza, że są one wykonywane dla różnych kombinacji danych wejściowych. Dla ułatwienia, wprowadzanie danych jest na bieżąco kontrolowane przez tzw. **funkcje ekspertowe** systemu polegające w

tym przypadku na bieżącym nadzorowaniu wprowadzania danych. Te pola na formularzach na które w żadnym z wariantów obliczeniowych nie powinno się wprowadzać wartości liczbowych, gdyż mogą być one tylko wynikiem obliczeń, są wyświetlane w kolorze szarym i system "nie przyjmuje" do tych pól żadnych wartości z klawiatury. Kontrola wprowadzania danych polega również na bieżącym sprawdzaniu przez system, czy wprowadzony zestaw danych "pasuje" do jednego z wariantów akceptowanych przez część obliczeniową systemu. W przypadku zgodności generowany jest odpowiedni komunikat. Kontrola ta odbywa się zarówno na poziomie pojedynczego formularza danych (kompletność danych danego formularza), jak i na poziomie całego zbioru danych obliczeniowych dla danego modułu przez wyświetlenie w pewnym momencie komunikatu: "Komplet danych".



Rys. 2. Ekran ze schematem synoptycznym węzła kontaktowego utleniania SO<sub>2</sub> i formularzem danych

MM umożliwia zaawansowanym użytkownikom konfigurowanie parametrów systemu. Do tego służy funkcja "Konfiguracja" w menu głównym MM. Jednym z istotnych elementów konfiguracji jest np. wybór układu jednostek, zarówno dla komunikacji przez ekran, jak i osobno dla wydruku wyników.

MM zapewnia również możliwość wykonywania obliczeń bazujących na wartościach rzeczywistych parametrów instalacji, rejestrowanych w plikach archiwalnych, poprzez ich automatyczne wprowadzenie w odpowiednie miejsca formularzy danych - wprost z makroprogramu PROCES. Istnieje również możliwość odwrotna, przekazania wyników obliczeń do makroprogramu PROCES, celem porównania wyników symulacji z rzeczywistymi parametrami instalacji. Wzajemne przekazywanie danych pomiędzy Programem Model (ściślej: Menedżerem Modułów) a makroprogramem Proces odbywa się poprzez plik eksportu i importu danych.

W przypadku zakończenia wprowadzania danych do MM, uruchomiony zostaje program obliczeniowy SYMUL, zaś po zakończeniu obliczeń następuje automatyczny powrót do MM, który umożliwia czytelny podgląd uzyskanych wyników. W tej fazie można dokonać przeglądu wszystkich wyliczonych wartości wywołując odpowiednie ekranowe formularze z danymi,

bądź zbiorcze ich zestawienie w odpowiednim pliku z wynikami obliczeń. Istnieje również możliwość wglądu w tabelkę zawierającą zestawienie najważniejszych parametrów procesu.

Z ciekawszych możliwości MM wymienić jeszcze należy funkcję EKSPERT służącą do analizy zestawu parametrów zapisanych aktualnie w ekranowych formularzach danych (odnosi się to zarówno do wprowadzanych danych wejściowych do symulacji, jak też do uzyskanych wyników obliczeń symulacyjnych).

**W fazie wprowadzania danych** do obliczeń EKSPERT dokonuje rozpoznania wariantu obliczeniowego dla którego wprowadzono komplet danych i opatruje go odpowiednim komentarzem. Służyć to może pomocą we właściwym wprowadzeniu danych do obliczeń, jako dodatkowa informacja wspomagająca wspomniane poprzednio *bieżące nadzorowanie wprowadzania danych*.

**W fazie po wykonaniu obliczeń** EKSPERT analizuje uzyskane wyniki i generuje pewne uwagi (diagnozy) na temat stanu technicznego aparatury względnie wiarygodności otrzymanych wyników, dając jednocześnie pewne sugestie dotyczące identyfikacji parametrów i sposobu wykonywania symulacji.

Funkcja EKSPERT stanowi rozwiązanie "otwarte". Razem z systemem opracowano prosty język zapisu relacji logicznych pomiędzy wartościami liczbowymi parametrów procesu i narzędzie do kompilacji warunków zapisanych w tym języku. W wyniku tej kompilacji powstaje plik, który umieszczony w katalogu roboczym MM daje możliwość odczytywania (po wywołaniu z MM wspomnianej funkcji Ekspert) komentarzy, które odnoszą się do tych relacji, które zostały spełnione (są prawdziwe).

### 3.2. Część obliczeniowa SYMUL

Z punktu widzenia inżynierii chemicznej najbardziej istotnym elementem systemu OPERATOR jest jego część obliczeniowa SYMUL. Stanowi ona odrębny program symulacyjny który ze względu na dużą ilość obliczeń numerycznych napisany został w języku FORTRAN. Obok symulacji bilansu masy i ciepła procesu program zawiera pewne dodatkowe możliwości. Najważniejsze z nich to:

- ◆ Możliwość dokonywania optymalizacji AK, której funkcją celu jest maksymalizacja stopnia przemiany przez dobór właściwych temperatur wlotowych pól reaktora. Konfiguracja programu zapewnia możliwość wyboru jednej z 3 procedur optymalizacyjnych (Hooke'a Jeevesa, Rosenbrocka i Neldera Meada),
- ◆ Możliwość automatycznej identyfikacji aktywności katalizatora,
- ◆ Możliwość automatycznej identyfikacji błędu pomiaru wlotowego stężenia  $SO_2$ ,
- ◆ Poprawę zbieżności trudno zbieżnych pętli iteracyjnych, przez zastosowanie procedur optymalizacyjnych do sterowania procesem iteracji w takich pętlach.

### 3.3. Program BANK

Program BANK pozwala na obliczanie podstawowych parametrów fizykochemicznych mediów spotykanych w produkcji kwasu siarkowego. Po wprowadzeniu danych i zakończeniu obliczeń formularze ekranowe zostają uzupełnione o zestaw wyliczonych danych fizykochemicznych dla wybranego medium.

## 4. CZĘŚĆ PRZETWARZANIA DANYCH PROCESOWYCH,

### 4.1. Program PROCES

Jak wspomniano w ogólnym opisie systemu program ten, jest ściśle rzecz biorąc makroprogramem, wykorzystującym możliwości programowania wbudowane w arkusz kalkulacyjny. System sterowni komputerowej generuje 2 skompresowane pliki archiwalne, które rozpakować można do formatu DIF (*Data Interchange File*) akceptowanego przez standardowe arkusze kalkulacyjne. Arkusz kalkulacyjny EXCEL był już wcześniej wykorzystywany przez technologa procesu do przeglądania tych plików. Postanowiono więc pozostać przy korzystaniu z tego właśnie narzędzia, wykorzystując jego bogate możliwości tworzenia makroprogramów.

Źródłowe pliki archiwalne formatu DIF są wczytywane przez program do arkuszy roboczych. Istnieje również możliwość rozpakowywania z poziomu makroprogramu PROCES plików źródłowych z ich oryginalnej skompresowanej wersji archiwalnej. Pierwszy z arkuszy roboczych zawiera 26 parametrów procesu rejestrowanych co 1 minuta., natomiast drugi 92 parametry rejestrowane co 10 minut. Różna częstość ich rejestracji, a także to, że dane są w plikach źródłowych zapisywane wyłączenie jako liczby całkowite (INTEGER), powoduje konieczność przeskalywania ich wartości do stosowanego układu jednostek i wyrównywania skali czasu. Z tych również powodów ich bezpośrednie przeglądanie było poprzednio czynnością dość żmudną.

Uruchomienie makroprogramu wywołuje winiętkę tytułową i podstawowe menu programu, z którego można: wczytać nowe pliki, skonfigurować system, bądź przejść do głównych arkuszy kalkulacyjnych systemu. Makroprogram zawiera szereg graficznych "ekranów" pozwalających na wygodną w odczycie i interpretacji wizualizację parametrów procesu. Każdy arkusz został wzbogacony o ekranowe "przyciski" graficzne ułatwiające poruszanie się pomiędzy "ekranami" i organizujące pracę programu. Jeden z ważniejszych ekranów makroprogramu przedstawia schemat synoptyczny całego węzła kontaktowego (podobny do schematu ukazującego się w części symulacyjnej) z zaznaczeniem ważniejszych temperatur tego węzła oraz wartości natężenia przepływu i stężenia SO<sub>2</sub> na wlocie do węzła. Temperatury i pozostałe parametry wyświetlane są w odpowiednich miejscach schematu. Menu tego ekranu pozwala na wybór numeru zmiany roboczej, dla której wyświetlane są wartości średnie parametrów, a także wybór średnich wartości dobowych. Dla każdego wymiennika ciepła wywołać można "okienko" z parametrami tego wymiennika.

Ważną funkcją tego ekranu jest komunikacja z częścią obliczeniową (symulacyjną) systemu ekspertowego "OPERATOR". Przygotowuje on tzw. plik Eksportu i Importu danych, przy pomocy którego można przekazać rzeczywiste średnie wartości parametrów z wybranych zmian roboczych lub całych dób i wykorzystać je jako dane wejściowe do obliczeń w części symulacyjnej.

Wybierając z menu opcję "Import" wczytuje się wartości parametrów wyliczanych przez model matematyczny węzła kontaktowego. Parametry te wyświetlane obok odpowiednich średnich wartości mierzonych. Opcja "Eksport" umożliwia natomiast wysłanie do części symulacyjnej tych parametrów, które są niezbędne do zapoczątkowania obliczeń. Bardziej szczegółowy opis tego modułu znaleźć można w [7].

### 4.2. Program NEURON

Przebieg sygnałów w ciągu jednej zmiany stanowi podstawę oceny poprawności prowadzenia procesu. Oceny takiej, stosując odpowiednią skalę, dokonuje zwykle ekspert - technolog. Odbywa się to poprzez przeglądnięcie przebiegów dowolnie wybranych przez niego

sygnałów. Należy zwrócić uwagę, że przebieg wszystkich wpływających na ocenę parametrów jest zmienny w czasie, podczas gdy ekspert wystawia "ocenę" dla całej zmiany roboczej. Może się zdarzyć, że przez kilka godzin w czasie trwania zmiany przebieg parametrów jest całkowicie odmienny niż w pozostałych godzinach. Biorąc pod uwagę, że wspomniana ocena wymaga żmudnego przeglądania przebiegu parametrów procesu w trakcie ocenianej zmiany roboczej, podjęto próbę automatyzacji tej czynności. W tym celu zastosowano algorytm Sztucznej Sieci Neuronowej (SSN), który "uczy się" naśladować eksperta w formułowaniu ocen. Tę część systemu OPERATOR traktowano jedynie jako pewien eksperyment naukowy.

Ekspert wystawia "ocenę" wg sobie tylko znanych i nie zawsze do końca sprecyzowanych kryteriów, ocenia jednocześnie całą zmianę, a nie tylko chwilowe wartości parametrów. Dla testów SSN przyjęto, że ekspert wystawia 9 ocen według odpowiednio zdefiniowanej skali, stosując jednak zupełnie subiektywne i w zasadzie nie znane kryteria. Zadaniem algorytmu SSN było dokonanie rozpoznania stanu instalacji tzn. wystawienie wymienionych powyżej 9 ocen za jedną zmianę w taki sposób, by oceny możliwie najdokładniej pokrywały się z ocenami eksperta. Sieć "uczono" zestawem ocen eksperta z 27 zmian roboczych a następnie testowano poprzez porównanie ocen łącznie z 63 różnych zmian roboczych. Uzyskane wyniki testów (ok. 75% ocen eksperta i SSN "całkowicie zgodnych" i "zbliżonych") wskazują na możliwość rozpoznawania stanu instalacji technologicznej za pomocą sieci neuronowej. Osiągnięta zgodność klasyfikacji stanów była jednak zbyt niska, by mogła mieć praktyczne znaczenie aplikacyjne. Wyniki wstępnych prób metody są jednak zachęcające do prowadzenia dalszych badań.

## 5. PODSUMOWANIE

System OPERATOR zdaniem autorów winien stanowić przydatne w praktyce narzędzie do analizy pracy metalurgicznej fabryki kwasu siarkowego. Ze względu na złożony schemat technologiczny, i dużą ilość mierzonych parametrów zarówno wykonywanie kompleksowych symulacji jak i przegląd i ocena parametrów procesu bez specjalnych narzędzi komputerowych byłoby praktycznie bardzo trudne, a czasem wręcz niemożliwe.

Pracę wykonano w ramach projektu badawczego Nr 7 S203 036 06 finansowanego przez Komitet Badań Naukowych

## LITERATURA

- [1] G. Stephanopoulos, J. Johnston, T. Kriticos, R. Lakshman, M. Mavrouniotis, C. Siletti *Design-Kit: an Object Oriented Environment for Process Engineering* Computers in Chem. Engng. **11** (1987). str. 655 - 674
- [2] W.R. Becraft, P.L. Lee *An integrated Neural Network/Expert System Approach for Fault Diagnosis* Computers in Chem. Engng. **17** (1993) str. 1001 - 1014
- [3] S. Saelid, A. Mjaawatten, K. Fjalestad *An object oriented operator support system on process models and an expert system shell* Materiały European Symposium on Computer Aided Process Engineering - 1 ESCAPE - 1 (Suppl. to Computers in Chem. Engng) (1992) str. S97 - S108
- [4] B. Dębska *Struktura baz wiedzy systemu doradczco - decyzyjnego sterowania produkcją amoniaku*. II Krajowa Konferencja Naukowa: Inżynieria wiedzy i systemy ekspertowe - Mat. Konferencyjne Wrocław (1993) str. 314 - 321
- [5] K. Gosiewski, R. Marczycki *Część symulacyjna systemu ekspertowego wspomagania pracy operatora procesu metalurgicznej fabryki kwasu siarkowego* Inż. i Ap. Chemiczna **35** Nr. 5 s. 23 ÷ 28 (1996).
- [6] K. Gosiewski, Z. Ogonowski, J. Paradowski *Rozpoznawanie i ocena stanów instalacji technologicznej za pomocą sieci neuronowej* Inżynieria Chem. i Proc. **17** Nr 1. s. 61-77 (1996)
- [7] K. Gosiewski, B. Zagata *Zastosowanie arkusza kalkulacyjnego do przetwarzania danych archiwalnych sterowni komputerowej procesu technologicznej* Pomiary Automatyka Kontrola XLII Nr 3 **53 - 56** (1996)