

Andrzej URBANIAK

INSTYTUT INFORMATYKI
POLITECHNIKA POZNAŃSKA

INTELIGETNE SYSTEMY WSPOMAGANIA DECYZJI W INŻYNIERII ŚRODOWISKA

INTELLIGENT DECISION SUPPORT SYSTEMS FOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

Modern computer systems are applicable in almost every kind of human activity. The possibility of processing big volume data, generating a large number of alternative solutions, graphical presentations' support, processes simulation's research – these are only few examples supporting creative, engineering activities. This broad and highly effective support, however, cannot replace decision-making, which always remains in human hands, and for which human is responsible. Thus, one of the most anticipated features of computer systems is process support of decision making, named DSS - Decision Support Systems. In common use there are various branch decision support systems known as CAD (Computer Aided Design) to support the search for optimal design solutions. Decision support systems are used less in relation to investment decisions, mostly because of their diverse and multi-attribute criteria. Major opportunities are associated with the use of multicriteria decision support methods on the basis of operational research. A specific class of DSS are solutions that support the operators of complex processes who often have to take important decisions within limited information about a process state, in a short time and without complete knowledge about their decisions' consequences. These kind of systems utilize the latest informatics' achievements connected with on-line process diagnosis and artificial intelligent methods. Knowing the solutions and latest research results it becomes clear that the decision support systems will be increasingly used in many fields, including environmental engineering. The paper presents assumptions for DSS synthesis and its history development. What is more, in the paper there are presented the DSS for investment processes and for operators' training. It also focuses on the use of the elements of artificial intelligence as an important tool for the DDS in the conditions of uncertain information. Finally, the summary indicates the development tendencies in modern DSS construction.

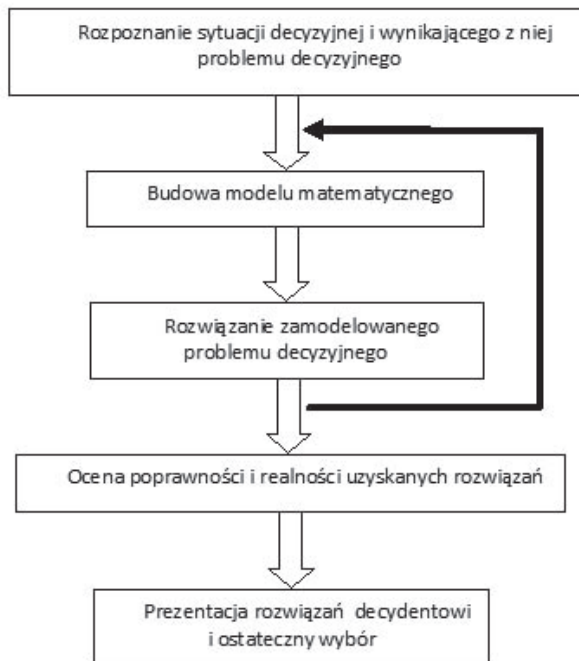
1. Wprowadzenie

Systemy Wspomagania Decyzji – SWD (ang.: Decision Support Systems - DSS) obejmują klasę problemów związanych z wyborem najlepszych rozwiązań w różnych sytuacjach decyzyjnych. Sytuację decyzyjną należy rozumieć jako ogół czynników, które w sposób bezpośredni wyznaczają postępowanie decydenta (osoby podejmującej decyzję). Decydent stara się uwzględnić możliwie najwięcej czynników mających wpływ na efekty jego decyzji, zdając sobie równocześnie sprawę, że nie jest w stanie rozpatrzyć ich wszystkich. Naturalnym następstwem sytuacji decyzyjnej jest próba jej opisu w formie problemu decyzyjnego. Często opis problemu decyzyjnego nie ma charakteru formalnego, co uniemożliwia wykorzystanie wprost znanych metod badań operacyjnych. Opisany problem decyzyjny należy zatem sformułować w formie modelu matematycznego [6]. Poszczególne etapy rozwiązania problemu decyzyjnego przedstawiono na rys. 1.

Powszechnie uważa się, że konstrukcja modelu matematycznego opisującego problem decyzyjny jest najtrudniejszym etapem w procesie podejmowania decyzji. Wynika to z kilku istotnych czynników. Przede wszystkim, jest to konieczność formalnego zapisu sytuacji decyzyjnej mającej zwykle charakter opisu słownego i zawierającego często szereg nieścisłych sformułowań charakterystycznych dla języka potocznego. Równocześnie, dbałość o precyzję opisu powoduje wprowadzenie dużej liczby elementów opisu, co do których trudno o ocenę ich znaczenia na obecnym etapie analizy. Kolejnym czynnikiem jest trudność formalnego opisu oczekiwań w zakresie jakości rozwiązania, w szczególności gdy dotyczy ona wskaźników, których nie można wyrazić w postaci wymiernych kosztów lub zysków. Należy również uwzględnić zmiany w ocenie różnych wielkości, a wynikające ze zmian w strukturze cen oraz rozwoju technologicznego. Powyższe przykłady nie wyczerpują wszystkich występujących trudności etapu konstrukcji modelu, stanowią jedynie ich przykłady.

Sformułowanie matematycznego modelu problemu decyzyjnego w postaci zadania optymalizacyjnego pozwala na poszukiwanie metody jego rozwiązania. Problematyka ta jest przedmiotem zainteresowania badań operacyjnych. Na gruncie badań operacyjnych opracowano wiele metod rozwiązania zadań optymalizacyjnych dedykowanych do charakteru sformułowanych modeli matematycznych. Wybór odpowiedniej metody rozwiązania zależy przede wszystkim od charakteru zależności użytych w sformułowaniu modelu matematycznego (np. liniowe-nieliniowe, jeden lub wiele wskaźników jakości rozwiązania, sposób zapisu ograniczeń) oraz oczekiwań odnośnie do uzyskiwanych rozwiązań (jedno rozwiązanie lub kilka równoważnych wariantów). Uzyskane rozwiązanie (lub rozwiązania) wymaga oceny z punktu widzenia jego poprawności oraz możliwości praktycznej realizacji. Oznacza to, że uzyskane rozwiązanie zadania optymalizacji niekoniecznie musi być przez decydenta przyjęte do realizacji. Atrybut podejmowania decyzji należy do decydenta, a wykorzystywane metody badań operacyjnych jedynie wspomagają decydenta w podejmowaniu decyzji, stąd też ich wykorzystanie w Systemach Wspomagania Decyzji (SWD)[17].

Podejmując problematykę SWD wyróżnimy dwie podstawowe klasy decyzji. Do pierwszej klasy zaliczymy decyzje podejmowane w oparciu o ustalone warunki i zakończone wyborem rozwiązania do realizacji. Przykładem takich rozwiązań są SWD o charakterze projektowym (inwestycyjnym, planistycznym), problemy harmonogramowania operacji technologicznych, problemy projektowania tras przejazdów, problemy wyboru rozwiązań konstrukcyjnych, itp. Do drugiej klasy zaliczymy decyzje podejmowane „na bieżąco” i wynikające z aktualnej sytuacji zmieniającej się dynamicznie, dla których istotnym warunkiem jest termin uzyskiwanego rozwiązania. Szeroką klasę takich SWD stanowią rozwiązania wykorzystywane w systemach sterowania oraz wspomagające pracę operatorów złożonych procesów. Poszukując optymalnych decyzji korzysta się z różnych metod poszukiwania rozwiązań, właściwych w zależności od sformułowanych problemów. Odpowiednio do opisanych wyżej dwóch charakterystycznych klas problemów stosuje się metody optymalizacji statycznej, optymalizacji dynamicznej oraz - coraz częściej - tzw. metody optymalizacji globalnej wykorzystujące podejścia związane ze sztuczną inteligencją [4,6].



Rys. 1. Etapy rozwiązywania problemu decyzyjnego
Fig. 1. Stages of a decision problem's solution

Ogólna problematyka optymalizacji dotyczy odpowiedzi na pytanie: jak zrealizować postawiony problem decyzyjny w najlepszy sposób, mając do dyspozycji jego opis matematyczny? Doprowadzenie do tego etapu zostało opisane i schematycznie zilustrowane na rys. 1. W każdym sformułowaniu problemu optymalizacji można wyróżnić następujące elementy:

- \mathbf{x} – wektor zmiennych decyzyjnych – opisuje wielkości, których wartości optymalnych poszukujemy;
- $\{F(\mathbf{x})\}$ – zbiór funkcji określających jakość rozwiązania (zbiór funkcji celu, zbiór kryteriów jakości rozwiązania);
- X – przestrzeń rozwiązań;
- D – zbiór rozwiązań dopuszczalnych (zdefiniowany przez ograniczenia);
- \mathbf{x}^* – rozwiązanie optymalne (wartości optymalne składowych wektora zmiennych decyzyjnych).

Przyjmując powyższe oznaczenia możemy sformułować w sposób opisowy zadanie optymalizacyjne:

Znaleźć wartości składowych wektora \mathbf{x}^ , należącego do zbioru rozwiązań dopuszczalnych D , które ekstremalizują (minimalizują lub maksymalizują) wartości funkcji ze zbioru funkcji celu $\{F(\mathbf{x})\}$.*

Standardowy zapis zadania optymalizacyjnego, opowiadający powyższemu opisowi słownemu ma postać:

$$\begin{aligned} & \text{Ekstremalizować } \{F(\mathbf{x})\} \\ & \text{przy ograniczeniach} \\ & \mathbf{x} \in D \subseteq X \end{aligned}$$

Tak sformułowany problem wymaga poszukiwania rozwiązania, dla którego poszczególne funkcje kryterialne przyjmują wartości ekstremalne (minima lub maksima w zależności od ich charakteru). Kryteria opisują stopień spełnienia różnych oczekiwań decydenta i najczęściej są to oczekiwania przeciwstawne, np. maksymalna wydajność vs. minimalne nakłady finansowe vs. wysoka niezawodność vs. wysoki poziom estetyki, itp.

Sytuacja, w której każda funkcja osiąga swoje ekstremum jest zatem mało realna, a rozwiązanie – zwane rozwiązaniem idealnym - znajduje się zwykle poza obszarem dopuszczalnym. W problemie optymalizacji wielokryterialnej poszukuje się zbioru rozwiązań zwanych rozwiązaniami Pareto-optymalnymi¹.

Rozwiązaniem optymalnym w sensie Pareto nazywamy takie rozwiązanie $\mathbf{x} \in D$, że nie istnieje żadne inne rozwiązanie $\mathbf{x}' \in D$ dające poprawę wartości chociaż jednej funkcji celu, nie powodując pogorszenia wartości innych funkcji celu. Rozwiązanie optymalne w sensie Pareto nazywane jest również rozwiązaniem **sprawnym** lub **efektywnym**.

¹ Pojęcie optymalności dla przypadku wielu funkcji kryterialnych sformułował włoski ekonomista Pareto na przełomie XIX i XX wieku.

Niezbędny komentarz należy odnieść do sformułowania zbioru ograniczeń zadania optymalizacyjnego. Definicja zbioru ograniczeń jest de facto formalnym opisem tej części przestrzeni X (oznaczonej jako D), w której poszukiwane jest rozwiązanie optymalne. Można wyobrazić sobie również przypadek, w którym poszukuje się optymalnych wartości wektora zmiennych decyzyjnych przy braku ograniczeń. Jest to jednak w praktyce sytuacja niezwykle rzadka. W zależności od charakteru elementów opisu zadania optymalizacyjnego można dokonać ich klasyfikacji [4].

Zakres wykorzystania metod rozwiązywania zadań optymalizacyjnych w SWD zależy przede wszystkim od charakteru problemu decyzyjnego i jest w pewnym stopniu odzwierciedleniem klasyfikacji zadań optymalizacyjnych (szczególnie w zakresie charakteru zależności opisujących funkcje jakości oraz ograniczenia). W odniesieniu do SWD dotyczących rzeczywistych problemów zazwyczaj mamy do czynienia z wieloma kryteriami oceny. Stąd też na szczególną uwagę zasługują te metody, w których uwzględnia się wiele ocen i zwykle takich, które trudno jest wyrazić w tych samych jednostkach. Stosuje się niekiedy rozwiązanie, w których wszystkie kryteria oceny wyraża się w formie kosztów. Wówczas możliwe jest sformułowanie problemu wyboru decyzji w postaci zadania optymalizacji z jednym kryterium. Przed podjęciem ostatecznej decyzji wymagana jest wówczas analiza polegająca na ocenie innych istotnych wskaźników, nie występujących w formalnym sformułowaniu zadania optymalizacji.

Odnosząc powyższe uwagi do sytuacji SWD o charakterze inwestycyjnym i projektowym mamy do czynienia z zadaniami optymalizacji statycznej, z wieloma kryteriami oceny i różnorodnymi typami ograniczeń. W tej grupie należy wyróżnić problemy poszukiwania rozwiązania o charakterze ciągłym oraz dyskretnym. Rozwiązanie, których zmienne decyzyjne przejmują wartości ze zbioru liczb rzeczywistych, nie nadają się zwykle wprost do realizacji. Wymagają poszukiwania rozwiązania leżącego najbliżej uzyskanego wyniku, lecz spełniającego warunki dostępności elementów np. określone typoszerzegiem produkowanych urządzeń. Innym podejściem jest poszukiwanie rozwiązania, które wybierane jest ze zbioru produkowanych elementów (urządzeń). Mamy wówczas do czynienia z zadaniem optymalizacji dyskretniej.

W przypadku SWD operatorskich uwarunkowania są odmienne. Ważnym elementem podejmowania decyzji jest jej poprawność oraz czas reakcji operatora na zaistniałą sytuację. Znaczenia szczególnego nabierają elementy wiedzy o sterowanym procesie i możliwości szybkiej analizy skutków podejmowanych decyzji, najlepiej przed jej wprowadzeniem w czyn. Zasadnicze czynniki warunkujące wspomaganie decyzji operatorskich stanowią zatem możliwości skutecznej współpracy operatora z SWD (innymi słowy komunikacji z komputerem) oraz dostępność wiedzy o procesie i sposób jej prezentacji.

2. System Wspomagania Decyzji o charakterze projektowym

2.1 Charakterystyka ogólna

Początki rozwoju problematyki SWD dotyczyły w szczególności decyzji inwestycyjnych. Wynikało to było głównie z kilku czynników powiązanych ze sobą. Podstawowym był problem wielkości nakładów finansowych na realizację projektów inwestycyjnych i niemożność wygenerowania i analizy wielu wariantów rozwiązania w klasycznych podejściach. Zwykle wybór był ograniczany do dwóch wariantowych rozwiązań. Decyzje inwestycyjne w inżynierii środowiska odnoszą się do okresów rzędu kilkudziesięciu lat. Zakłada się bowiem, że planowane obiekty powinny być użytkowane 20 lat i więcej. Z tego względu, ważnym czynnikiem, który należało uwzględnić, była niepewność i niedokładność oceny kosztów realizacji inwestycji w długim horyzoncie czasu. Niezależnie od finansowych aspektów oceny przedsięwzięć inwestycyjnych, należy również wziąć pod uwagę czynniki techniczne, takie jak zastosowania nowych rozwiązań i technologii nieznanymi w chwili przygotowania projektu. Istotnym elementem są również zmienne czynniki społeczno-ekonomiczne oraz zmiany środowiska naturalnego. Jest to jedynie bardzo ogólny wykaz czynników mających wpływ na podejmowanie decyzji inwestycyjnych w zakresie inżynierii środowiska. W każdej konkretnej sytuacji w grę mogą wchodzić specyficzne czynniki właściwe i istotne tylko danej sytuacji decyzyjnej.

Jednym z bardzo ważnych elementów w SWD inwestycyjnych jest konieczność analizy rozwiązań ze względu na wiele różnych wskaźników oceny, zwykle nie dających się sprowadzić do jednego zagregowanego wskaźnika (np. kosztów). Uwaga ta w szczególności sposób odnosi się do decyzji w inżynierii środowiska ponieważ nie sposób wyrazić kosztowo ważnych wskaźników oceny takich jak: zmiany jakości środowiska naturalnego, walory krajobrazowe środowiska, zmiany w zakresie fauny i flory, czynniki społeczno-kulturowe, itp. Zdecydowanie mniejsze znaczenie ma w tym przypadku czas rozwiązania zadania optymalizacyjnego, tym bardziej że zwykle uzyskiwane rozwiązanie stanowi podstawę do podjęcia decyzji jednakże nie musi być równoznaczne z ostateczną decyzją. Wobec powyższych uwarunkowań, istotnym wsparciem podejmowania decyzji jest możliwość wygenerowania wielu dopuszczalnych rozwiązań wraz z ich oceną według przyjętego zbioru kryteriów [7,8,11,17].

W odniesieniu do SWD inwestycyjnych należy uwzględnić jeszcze jeden istotny czynnik. Jest on związany z perspektywą czasową analizowanej decyzji. Decyzje inwestycyjne dotyczą zwykle długiego horyzontu czasowego rzędu kilku a często nawet kilkudziesięciu lat. Formułowanie zadań optymalizacyjnych w długich horyzoncie czasu wymaga stosowania znanych w ekonomii zależności pozwalających uwzględnić koszty zamrożenia kapitału oraz sprowadzenia ocen kosztowych do porównywalnych wielkości z uwzględnieniem czynnika czasu.

Przewidywanie wskaźników - szczególnie kosztowych - jest również niezwykle trudne. SWD muszą zatem uwzględniać niepewność i nieoznaczoność danych wykorzystywanych w modelu matematycznym, która wynika zarówno z zmienności rynku jak również z rozwoju technologii [16].

2.2 Wybrane przykłady

2.2.1. Optymalizacja korekty odczynu pH ścieków (problem inwestycyjny)

PW pracy [5] zaproponowano metodę optymalizacji procesu korekty odczynu pH ścieków przemysłowych z uwzględnieniem dwóch przeciwstawnych kryteriów: kosztów inwestycyjnych związanych z budową zbiornika o określonej pojemności oraz kosztów eksploatacyjnych związanych z zakupem reagentów niezbędnych do korekty pH. Problem związany jest ściśle z charakterystyką procesu przemysłowego, w którym występuje wyraźna cykliczność produkcji ścieków na przemian o silnie zasadowym lub silnie kwaśnym odczynie. Problem korekty można zatem w skrajnym przypadku rozwiązać na dwa sposoby:

Sposób 1: wybudować zbiornik uśredniający o takiej pojemności, aby przetrzymując ścieki o skrajnym odczynie (uzyskane w jednym cyklu produkcji) następnie wymieszać ze ściekami o przeciwnym odczynie pH uzyskując żądany poziom pH.

Rozwiązanie takie wymaga dużych nakładów inwestycyjnych na budowę zbiornika i zapewnienie warunków technicznych realizacji inwestycji (m.in. odpowiedni teren i jego zabezpieczenie).

Sposób 2: wybudować zbiornik wystarczający do gromadzenia ścieków z jednego cyklu i następnie dokonać korekty pH za pomocą środków chemicznych. W tym przypadku budowa mniejszego zbiornika ścieków zmniejszy koszty inwestycyjne, jednakże należy się liczyć z koniecznością zakupu na bieżąco środków chemicznych do korekty odczynu.

Każde z opisanych powyżej skrajnych rozwiązań może być nie do przyjęcia w przypadku występowania wielu ograniczeń, np. z jednej strony - ograniczonych środków inwestycyjnych czy niedostatecznej powierzchni na realizację zbiornika, a z drugiej - ograniczonych środków na zakup reagentów w najbliższej perspektywie czasowej eksploatacji. Ułatwieniem w rozwiązaniu powyższego problemu jest fakt, iż oba kryteria wyrazić można kosztowo uwzględniając jednak różny charakter kosztów (inwestycyjne i eksploatacyjne). W rachunku ekonomicznym znane są metody sprowadzania kosztów eksploatacyjnych i inwestycyjnych do jednej miary uwzględniającej koszty zamrożenia nakładów.

Pytanie, na które należy udzielić odpowiedzi dotyczy poszukiwania takiej objętości zbiornika, która przy spełnieniu narzuconych ograniczeń pozwoli na korektę odczynu pH ścieków zgodnie z wymaganiami oraz zapewni minimum sumarycznych kosztów równoważnych. W rozpatrywanym przypadku posłużono się zmodyfikowaną metodą programowania parametrycznego opisaną szczegółowo w pracy [5].

2.2.2. Problem wyboru oprogramowania do modelowania sieci wodociągowej

W pracach [1,2] zaproponowano metodę postępowania przy wyborze oprogramowania do modelowania sieci wodociągowych. Wybrany przykład zawiera wiele odmiennych aspektów podejmowania decyzji w stosunku do przykładu przedstawionego w poprzednim rozdziale, na które warto zwrócić uwagę. Problem polega na wyborze oprogramowania do ściśle określonych celów (w tym przypadku do modelowania sieci wodociągowych) spośród bogatej oferty dostępnych produktów programowych uwzględniając narzucone wymagania funkcjonalne, m.in. możliwości ewentualnego wykorzystania dodatkowych funkcji, zachowania szans na rozwój oprogramowania, efektywną pracę pod różnymi systemami operacyjnymi i na posiadanym sprzęcie komputerowym. Jednym z kryteriów wyboru jest oczywiście koszt zakupu, aktualizacji i konserwacji oprogramowania.

Pełne doprecyzowanie stawianych wymagań nie jest zadaniem łatwym. Wynika to co najmniej z dwóch istotnych przyczyn. Pierwszą z nich jest konieczność nowego spojrzenia na realizowane zadania eksploatacyjne wynikające z wysokich wymagań jakościowych oraz rosnących oczekiwań odbiorców. Stosowane dotychczas sprawdzone metody rozwiązywania problemów eksploatacyjnych, w nowych warunkach, okazują się niewystarczające. Druga przyczyna trudności leży poza obszarem wiedzy technologicznej. Jest nią fakt niepełnego rozeznania szybko rozwijających się narzędzi programowych oraz wzrost zdolności obliczeniowych komputerów. Po prostu trudno jest nadążyć za niezwykle szybkim rozwojem tej dziedziny, gdyż nowe rozwiązania metodyczne i obliczeniowe oraz ich modyfikacje powstają z miesiąca na miesiąc.

Wypracowanie specyfikacji wymagań odnoszącej się do analizowanego problemu decyzyjnego wymaga ścisłej współpracy technologa procesu, który potrafi zdefiniować oczekiwania związane z realizowanymi zadaniami oraz informatyka, który z kolei potrafi we właściwy sposób odczytać opisy funkcjonalności pakietów programowych.

Możliwości rozwoju oprogramowania stają się z każdym dniem coraz większe, głównie dzięki coraz szerzej wykorzystywanym narzędziom jakie oferuje Geographic Information Systems (GIS). Rozwój techniki, który przynosi nowe narzędzia informatyczne pozwala na rozszerzenie funkcjonalności aplikacji GIS. Dalszy ich rozwój w obszarze zastosowań w branży wodociągowo-kanalizacyjnej, w dużej mierze zależy również od modernizacji i poziomu informatyzacji przedsiębiorstw sieciowych tak w Polsce jak i na świecie.

W analizie należy uwzględnić również nowe trendy, do których należą między innymi:

- wykorzystanie technologii GSM i GPRS, komunikacji radiowej i bezprzewodowej transmisji danych,
- możliwości zdalnego gromadzenia i przetwarzania danych w czasie rzeczywistym,
- rozwój sieci Internet,
- możliwości wizualizacji obszarów i powierzchni sieci w postaci trójwymiarowej wraz z wykorzystaniem technologii ekranów dotykowych,
- nowoczesne technologie tworzenia map topologicznych z wykorzystaniem zdjęć satelitarnych.

Uwzględnienie wielu tak różnorodnych aspektów wyboru oprogramowania wymaga przyjęcia pewnej hierarchii kryteriów akceptowalnej przez użytkowników oprogramowania. Na podstawie doświadczeń z wykorzystaniem oprogramowania oraz przeprowadzonych badań sondażowych przyjęto poniżej wyszczególnioną listę kryteriów, poczynając od najważniejszych. W zestawieniu znalazło się 7 kryteriów oceny oprogramowania.

1. Doświadczenie na rynku (ilość wdrożonych projektów, dostępne języki,...)
2. Integracja z GIS (sposób połączenia baz danych i ich przetwarzania)
3. Wymagania techniczne komputera
4. Moduły (hydrauliczny, jakościowy, dynamiczny)
5. Import/export danych (możliwości i sposób)
6. Narzędzia dodatkowe (weryfikacja geometrii, aktualizacja danych,...)
7. Koszt oprogramowania(licencja, szkolenia, materiały szkoleniowe)

Jak łatwo zauważyć, znalezienie jednej wspólnej miary do wszystkich sformułowanych powyżej kryteriów oceny, jest niemożliwe. Nie można zatem sformułować jednego superkryterium i poszukiwać rozwiązania znanymi metodami optymalizacji jednokryterialnej. Część z kryteriów może być traktowana na zasadzie: występuje/nie występuje, inne można wyrazić przyjmując skalę punktacji np. od 0 – 10, jeszcze inne można wyrazić kosztowo. Ważną cechą tej klasy problemów decyzyjnych jest fakt niewielkiej liczby możliwych wariantów (w tym przypadku kilkadziesiąt). W pracy [10] zaproponowano wybór rozwiązania za pomocą metody AHP (Analytic Hierachy Process), która obejmuje dwie zasadnicze fazy: tworzenie hierarchii oraz ocenę. W fazie tworzenia hierarchii można wyróżnić następujące etapy:

- Hierarchizacja problemu – określenie celu wspomaganie decyzji, zdefiniowanie kryteriów oceny, wyznaczenie zbioru wariantów;
- Określenie ważności poszczególnych kryteriów-ustalenie względnych relacji pomiędzy kryteriami na zasadzie porównania parami; finalnie powstaje macierz wektora względnej ważności kryteriów oraz uogólnionego wektora wag;
- Określenie preferencji wariantów względem każdego kryterium-konstrukcja macierzy względnej preferencji wariantów, wyznaczenie uogólnionej preferencji czyli wartości własnej macierzy;
- Wyznaczenie uogólnionej miary – synteza, na podstawie której możliwe jest dokonanie interpretacji otrzymanych wyników.

Faza oceny jest wykonywana poprzez porównywanie parami poszczególnych elementów (zarówno wszystkich wariantów jak i kryteriów oceny). Elementy porównuje się za pomocą ich wartości np. monetarnej (jeśli jest to możliwe dla danego podmiotu) lub liczbowej dowolnie skonstruowanej przez decydenta. Dodatkowo można posługiwać się skalą stworzoną przez twórcę metody Saaty'ego, wyrażonej w postaci wartości liczbowych, które odpowiadają werbalnym sądom:

- równoważność wariantów -1,
- umiarkowane przewyższanie- 3,
- silna przewaga-5,
- bardzo silna przewaga-7,
- krytyczna przewaga -9,
- wartości pośrednie -2,4,6,8.
-
-
-

Zaletą metody AHP jest łatwość dokonania oceny poprzez porównywanie parami, które stanowi najczęstszy podświadomy sposób porównań wykorzystywany przez człowieka. Również oceny zawierające subiektywne i obiektywne odczucia, umożliwiają pełne odzwierciedlenie oceny danego decydenta zawierające jego osobiste preferencje.

3. System Wspomagania Decyzji operatorskich

3.1 Charakterystyka ogólna

Decyzje podejmowane przez operatora procesu charakteryzują się przede wszystkim określoną dynamiką wynikającą z dynamiki procesu i stąd problematyka wspomagania decyzji operatorskich wymaga odmiennego podejścia metodologicznego. Metodologia właściwa do poszukiwania najlepszych rozwiązań o charakterze optymalizacyjnym, mających charakter zadań statycznych, nie nadaje się do rozwiązywania problemów decyzyjnych pojawiających się w bieżącej eksploatacji złożonych obiektów lub procesów [12,17].

Różnorodność procesów uzdatniania wody i oczyszczania ścieków wymaga wszechstronnego przygotowania obsługi do prowadzenia technologii procesów i jest to najczęściej przygotowanie specjalistyczne do podjęcia zadań eksploatacyjnych w danym obiekcie. Indywidualizacja szkolenia prowadzi do wielu uproszczeń i z konieczności ogranicza się do sytuacji typowych z pominięciem sytuacji wyjątkowych, które zwykle są najbardziej niebezpieczne. Ważnym problemem staje się więc właściwa selekcja zdarzeń zachodzących na obiekcie. Wiele zakłóceń w przebiegu procesów może być obsłużonych przez układ sterowania procesem i nie wymaga interwencji operatora. Przy znacznych odchyleniach od zadanych wartości, jak i szybkich zmianach wielkości charakteryzujących proces mamy do czynienia ze stanami, które określa się mianem stanów (sytuacji) awaryjnych. Takie sytuacje wymagają interwencji operatora. Operator oczyszczalni ścieków jest zwykle przygotowany na taką sytuację wyłącznie teoretycznie, ponieważ są to sytuacje niezwykle rzadkie, nawet dla doświadczonego operatora. Niezbędne jest zatem przygotowanie operatora do podjęcia działań w sytuacjach awaryjnych oraz umożliwienie mu skorzystania z pomocy systemu komputerowego spełniającego rolę systemu eksperckiego. Przygotowanie operatora do właściwego reagowania w sytuacjach awaryjnych może mieć miejsce w trakcie szkolenia z wykorzystaniem modeli symulacyjnych [17].

W proponowanym rozwiązaniu przyjęto dwuetapowy proces przygotowania operatora. W pierwszym etapie realizowane jest szkolenie operatorów w zakresie podstaw obsługi eksploatacyjnej obiektu (stacji uzdatniania wody lub oczyszczalni ścieków). Opracowany system komputerowego szkolenia operatorów wykorzystuje reguły nauczania programowanego opracowane na przełomie ubiegłego wieku. W zakresie doboru treści nauczania w poszczególnych krokach uczenia wykorzystano elementy sztucznej inteligencji. Tym samym fragmenty materiału, które nie zostały w pełni opanowane pojawiają się w procesie powtarzania w innej konfiguracji i często prezentowane są zupełnie inaczej. Uniemożliwia to zapamiętywanie materiału w sposób mechaniczny, bez zrozumienia istoty problemu.

Drugi etap szkolenia związany jest z rozwiązywaniem sytuacji eksploatacyjnych w analizowanych obiektach systemu zaopatrzenia w wodę i oczyszczania ścieków. Obaj nury przygotowania operatora oczyszczalni ścieków wymagają opracowania modelu symulacyjnego obiektów. Modułowa struktura oprogramowania symulatora pozwala na sprawną i szybką jego konfigurację. Wybrane sytuacje eksploatacyjne generowane są w symulatorze zdarzeń w sposób losowy. Jakość modelu symulacyjnego stanowi w istotny sposób o prawidłowości pracy systemu wspomaganie operatora oraz o jego skuteczności.

3.2 SWD operatora oczyszczalni ścieków

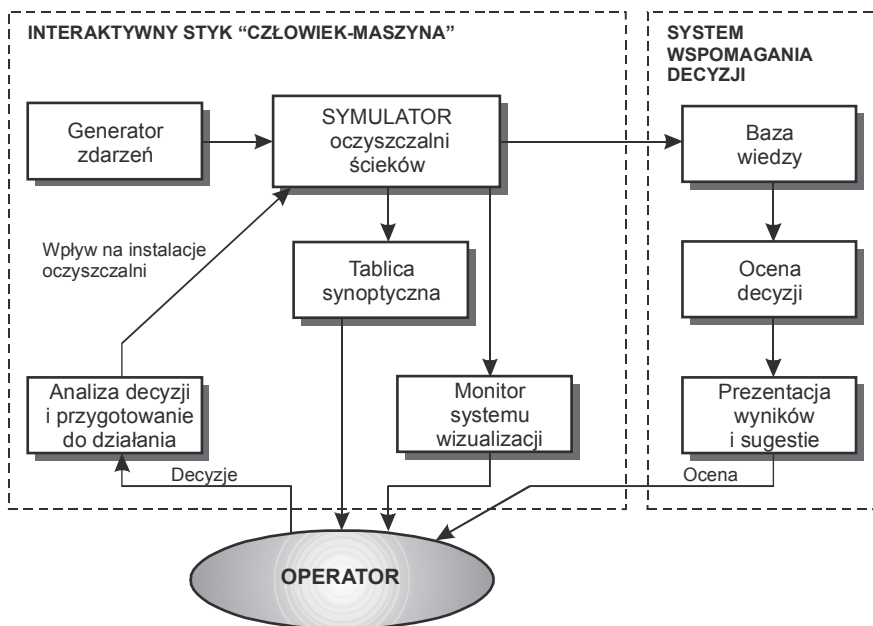
3.2.1. Trening operatorski

W opisie przykładowego systemu wspomaganie decyzji operatora oczyszczalni ścieków pominięto zagadnienia związane z tzw. etapem szkolenia, który polega na indywidualnym przygotowaniu ogólnym operatora i sprawdzeniu jego wiedzy. Szczegółowo został on przedstawiony w pracy [17]. W pracy [14] zaprezentowano również jego wersję internetową.

Poniżej zajmujemy się drugim etapem, w którym na pierwszy plan wysuwa się zagadnienie podejmowania decyzji operatorskich. Przetrenowanie operatora w zakresie podejmowania decyzji winno się odbywać w warunkach maksymalnie zbliżonych do warunków występujących w rzeczywistych obiektach. Stąd też często w tego typu systemach stosuje się aranżację pomieszczenia zbliżoną do dyspozytorski obiektu. Strukturę systemu opracowanego pod nazwą OPTRAIN przedstawiono na rys. 2. System powstał jako wynik współpracy interdyscyplinarnego zespołu, w skład którego wchodził technolodzy (inżynierowie środowiska) oraz automatycy i informatycy [12,15].

Opracowana architektura systemu wykorzystuje wiele możliwości jakie dają nowoczesne narzędzia informatyczne, takie jak losowe generatory zdarzeń, możliwości interaktywnego styku człowiek-komputer, modele symulacyjne procesów oraz elementy sztucznej inteligencji. Ogólna idea systemu OPTRAIN polega na prezentacji operatorowi różnych (losowo wybieranych) zdarzeń na monitorze systemu wizualizacji procesu wymagających jego decyzji. Podjęta przez operatora decyzja implementowana jest na symulatorze procesu zmieniając stan procesu. Operator ma możliwość obserwacji efektów swojej decyzji na tablicy synoptycznej.

Podjęta decyzja podlega również ocenie przez System Wspomaganie Decyzji zawierający bazę wiedzy o procesie. Wygenerowany wynik zawiera ocenę decyzji operatora oraz ewentualne sugestie w odniesieniu do podjętej przez operatora decyzji.



Rys. 2. Struktura etapu treningu w systemie OPTRAIN [17]
 Fig. 2. Structure of a training step in OPTRAIN system

Tak skonstruowany proces szkolenia operatora pozwala na przetrenowanie (bez skutków szkodliwych dla procesu!) wiele różnorodnych zdarzeń, jakie mogą wystąpić w czasie eksploatacji oczyszczalni ścieków. Efektywność procesu treningu operatorskiego zależy przede wszystkim od jakości symulatora oczyszczalni oraz bazy wiedzy zaimplementowanej w Systemie Wspomagania Decyzji.

3.2.2. Struktura SWD

Dobrze zaprojektowany proces szkolenia operatora oczyszczalni ścieków jest ważnym elementem jego przygotowania do pracy na obiekcie rzeczywistym, jednakże doświadczenie eksploatacyjne uczy, że rzeczywistość jest bogatsza i nie wszystkie sytuacje da się przewidzieć i przetrenować. Istnieje zatem potrzeba skonstruowania takiej struktury systemu wspomagania operatora, który mógłby stanowić dla niego wsparcie w sytuacji niewystępującej w procesie treningu. Rozwiązania tak postawionego problemu należy poszukiwać w obszarze metod sztucznej inteligencji, chodzi bowiem o uzyskanie odpowiedzi będącej wynikiem wielu operacji logicznych na danych wprowadzonych do systemu.

Za moment narodzin pojęcia sztucznej inteligencji (ang.: AI – artificial intelligence) przyjmuje się konferencję w Darmouth College w 1956 roku. Autorzy McCulloch i Pitts użyli pojęcia sztucznej inteligencji w pracy zainspirowanej badaniami nad biologiczną i fizjologiczną funkcją neuronów w mózgu. Zaproponowany przez nich model sztucznego neuronu stał się wzorem opisu ludzkiego myślenia.

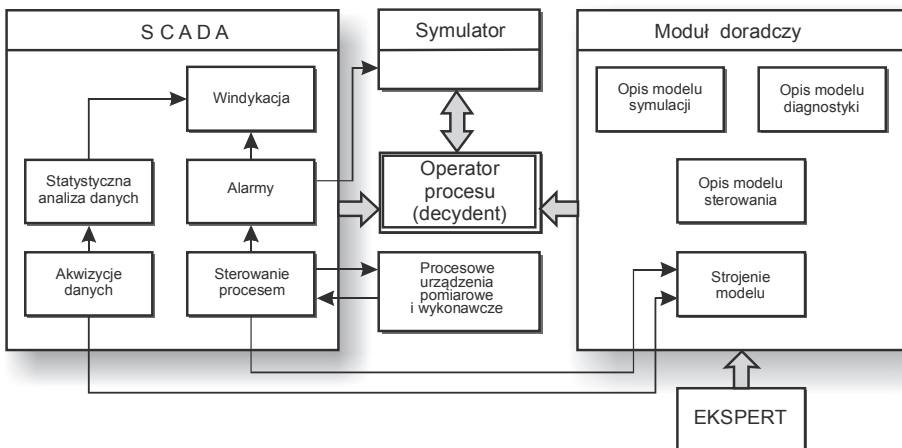
W latach 50-tych i 60-tych zaczęto wyraźnie identyfikować pojęcie sztucznej inteligencji i wiązać je najczęściej z wykorzystaniem w grach, w tym głównie w grze w szachy.

Opracowywano programy, które testowano urządzając spektakularne mecze komputerów z uznanymi mistrzami gry w szachy. Rozwój i wykorzystanie metod sztucznej inteligencji poza sferą gier rozpoczęło się od zastosowań w technice satelitarnej (m.in. programy NASA) oraz diagnostyce medycznej (znany system MYCIN). W odniesieniu do tych rozwiązań pojawiły się nowe pojęcia: systemy z bazą wiedzy (ang.: data knowledge-based system) oraz systemy eksperckie (ang.: expert system). Z punktu widzenia zastosowań najwięcej aplikacji systemów eksperckim obserwuje się w dziedzinie biznesu i organizacji produkcji [17].

Ogólną strukturę systemu wspomagania decyzji operatorskich wykorzystującego elementy sztucznej inteligencji zaprezentowano w pracy [9]. Na rys.3 przedstawiono rozwinięcie tej propozycji w formie struktury oprogramowania systemu wspomagania decyzji operatorskich [17]. Prezentowane rozwiązanie wykorzystuje różnorodne źródła wiedzy o systemie, zarówno te zbierane na bieżąco przez system SCADA, jak również zapisane w module doradczym pochodzące od eksperta.

Operator procesu podejmując decyzje korzysta z symulatora procesu, który umożliwi mu sprawdzenie efektów podejmowania decyzji przed jej realizacją na procesie. System SCADA pozwala na bieżąco obserwować zmiany zachodzące na obiekcie. Działający równoległe moduł doradczy służy do wypracowania ewentualnych skorygowanych wartości nastaw regulatorów i innych urządzeń na obiekcie. Wypada jeszcze raz podkreślić istotny fakt, że operator procesu jest ośrodkiem decyzyjnym w tej strukturze, a pozostałe jej elementy mają charakter wspomagający jego decyzje.

W uzupełnieniu opisu możliwości jakie dają systemy wspomagania decyzji warto zwrócić uwagę na fakt ich wykorzystania na różnych poziomach decyzyjnych [17].



Rys. 3. Struktura oprogramowania systemu wspomagania decyzji operatorskich [17]

Fig. 3. Software structure in a decision support system for operators

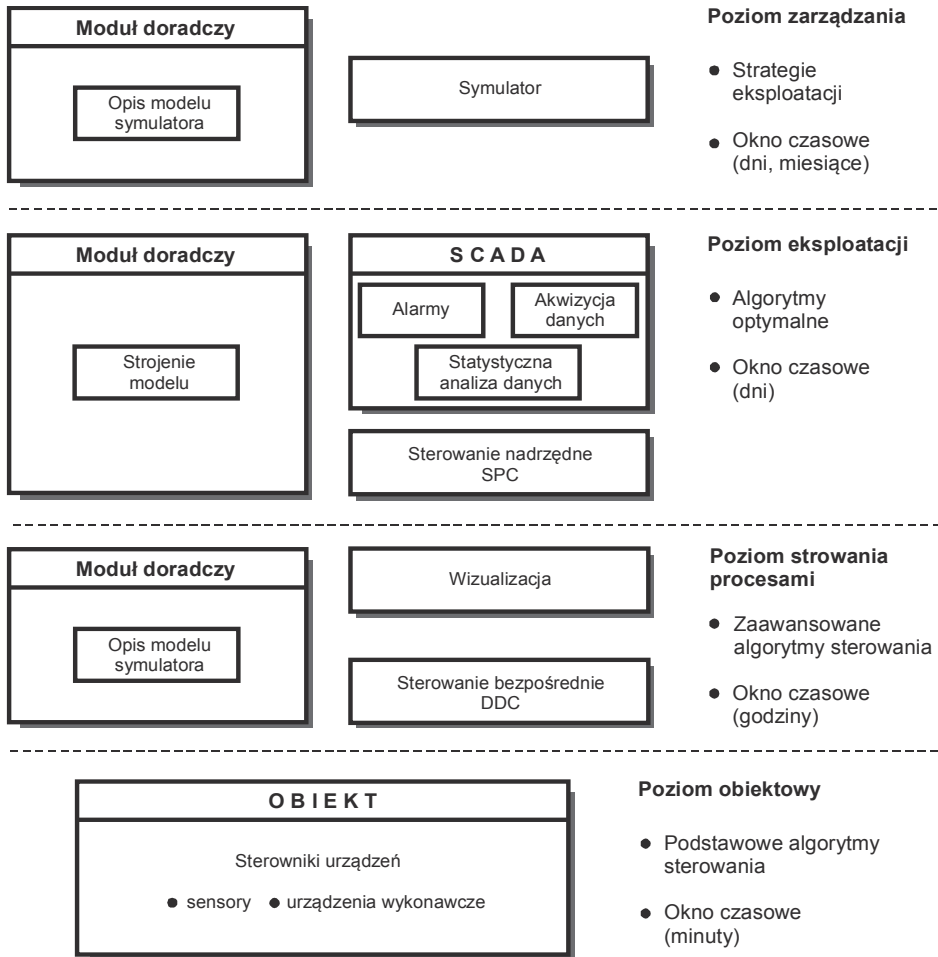
Prezentowany system wspomagania decyzji operatora funkcjonuje na poziomie eksploatacji obiektu oraz na poziomie sterowania procesami, zgodnie z hierarchią przedstawioną na rys. 4. Na każdym z wyróżnionych poziomów możliwe jest wspomaganie decyzji w zakresie właściwym dla danego poziomu integralnego sterowania obiektem. Na poszczególnych poziomach zaznaczono charakterystyczne algorytmy oraz okna czasowe określające orientacyjne czasy realizacji decyzji.

Ze względu na zróżnicowaną funkcjonalność modułów doradczych na poszczególnych poziomach hierarchii, niezwykle istotnym problemem jest wybór właściwych narzędzi wspomagających procesy podejmowania decyzji. W pracy [10] przebadano wybrane metody sztucznej inteligencji uzyskując wskazania w zakresie ich wykorzystania na wybranych etapach rozwiązywania problemów podejmowania decyzji dotyczących zarządzania i sterowania złożonymi obiektami. Badanie te przeprowadzono dla standardowych danych (tzw. benchmark data) udostępnionych przez COST 624 Working Group².

4. Podsumowanie

Podjęta w referacie tematyka systemów wspomagania decyzji jest niezwykle rozległa [6,17]. Wymaga interdyscyplinarnego podejścia obejmującego zarówno elementy nauk opisowych (np. nauki o zarządzaniu), jak również nauk ścisłych (badania operacyjne, teoria optymalizacji). W warstwie implementacyjnej, efektywne rozwiązania analizowanych problemów uzyskuje się stosując wybrane narzędzia informatyczne. Przedstawiona w pracy charakterystyka systemów wspomagania decyzji odniesiona została do zastosowań możliwych do wykorzystania w inżynierii środowiska.

² <http://www.ensic.inpl-nancy.fr/COSTWWTP/Benchmark/Benchmark1.htm>



Rys. 4. Hierarchiczna struktura systemu zarządzania i sterowania złożonym obiektem [17]

Fig. 4. Hierarchical structure of management and control system of a complex object

1. Wyróżniono dwie podstawowe grupy zagadnień: problemy SWD o charakterze projektowym (planistycznym) oraz operatorskim.
2. Zagadnienia SWD o charakterze projektowym mogą być formułowane w postaci zadań optymalizacji z jedną lub wieloma funkcjami kryterialnymi. Główna trudność polega na właściwym sformułowaniu problemów optymalizacyjnych i wyborze metod ich rozwiązania. Szeroka gama dostępnych i profesjonalnych narzędzi programowych pozwala na uzyskiwanie efektywnych rozwiązań.
3. W praktyce, wybór rozwiązania projektowego polega często na generacji wielu (kilku lub więcej) możliwych wariantów i przypisaniu im ocen zgodnie z ustalonymi kryteriami. Wybór rozwiązania do realizacji dokonywany jest za pomocą wybranej metody klasyfikacji wariantów rozwiązań.
4. Systemy Wspomagania Decyzji operatorskich stawiają przed ich twórcami znacznie trudniejsze wymagania. Związane są one głównie z koniecznością uzyskania rozwiązania w czasie rzeczywistym, tzn. przed upływem określonego terminu reakcji operatora.
5. Istotnym elementem warunkującym efektywność SWD operatorskich jest jakość symulacyjnego modelu prowadzonego procesu (obiektu). Wykorzystywany model symulacyjny winien w możliwie najlepszy sposób odwzorowywać zachowanie procesu. Uzyskuje się to poprzez walidację i weryfikację modelu [3].
6. Wstępne pozytywne wyniki uzyskano wykorzystując wybrane metody sztucznej inteligencji, na etapie treningu operatora. W rozwinięciu proponowanego rozwiązania SWD operatorskich wskazano na szersze możliwości wykorzystania wyżej wspomnianych metod [10].

Zaprezentowana w referacie ogólna charakterystyka Systemów Wspomagania Decyzji w inżynierii środowiska pozwala sądzić o wielu możliwych kierunkach rozwoju tej problematyki mieszczącej się na pograniczu trzech wzajemnie przenikających się dyscyplin: inżynierii środowiska, automatyki i informatyki. Efektywne rozwiązania uwarunkowane są w dużej mierze poziomem integracji tych środowisk poczynając już od etapu edukacji technicznej.

Bibliografia

- 1) Bałut A., Urbaniak A., Kryteria wyboru informatycznych narzędzi modelowania sieci wodociągowych, *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, nr 6, 2009 (11-20)
- 2) Bałut A., Metodyka wyboru oprogramowania do modelowania i analizy sieci wodociągowych, *Rozprawa doktorska, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Poznańskiej, Poznań 2010 (promotor: A. Urbaniak)*
- 3) Bałut A., Urbaniak A., Weryfikacja i walidacja jako niezbędne etapy tworzenia modelu symulacyjnego sieci wodociągowych, *Gaz. Woda i Technika Sanitarna*, nr 4, 2012 (160-164)
- 4) Findeisen W., Szymanowski J., Wierzbicki A., *Teoria i metody obliczeniowe optymalizacji*, PWN, Warszawa 1980
- 5) Góra W., Optymalizacja procesu korekty odczynu ścieków przemysłowych, *Rozprawa doktorska, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Poznańskiej, Poznań 2014 (promotor: M.M. Sozański)*
- 6) Józefowska J., *Badania operacyjne I teoria optymalizacji*, Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań 2012
- 7) Kwiatkowski J., *Zaawansowane systemy wspomaganie decyzji i sterowania, Wodociągi – Kanalizacja*, nr 11, 2007
- 8) Miłaszewski R., *Zastosowanie modeli decyzyjnych w programowaniu inwestycji ochrony wód*, Wyd. IMGW, Warszawa 1993
- 9) Oborzyńska A., Oborzyński K., Urbaniak A., *An integrated system for management and control wastewater treatment plant*, IASTED Conference on Modelling and Simulation, Pittsburgh –PA (USA), 2000 (265-271)
- 10) Oborzyński K., *Integration of artificial intelligence methods for management and control of complex processes*, PhD Dissertation, Poznań University of Technology, Poznań 2003 (promotor: A. Urbaniak)
- 11) Słowiński R., Urbaniak A., Węglarz J., *Multicriteria capacity expansion planning of a supply and wastewater treatment system*, *International Journal of Modelling and Simulation*, vol.5, no.4, 1985 (124-127)
- 12) Sozański M.M., Urbaniak A., *Informatyczne systemy w eksploatacji zakładów uzdatniania wody i oczyszczania ścieków*, *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, nr 9, 2001 (323-328)
- 13) Sozański M.M., Sroczan E.M., Urbaniak A., *Komputerowe systemy wspomaganie decyzji w inżynierii środowiska*, *Przegląd Komunalny*, nr 3/2000 (94-98)
- 14) Sroczan E.M., Urbaniak A., Zakrzewski P., *Internetowy system szkolenia operatorów oczyszczalni ścieków*, w: *Komputer w ochronie środowiska*, E.M. Sroczan (ed.), Poznań – Ostróda, 2001 (125-136)
- 15) Sroczan E.M., Urbaniak A., *Komputerowy system trenowania operatorów stacji uzdatniania wody i oczyszczania ścieków bazujący na sztucznej inteligencji*, w: *Zaopatrzenie w wodę i jakość wód*, J.A. Oleszkiewicz, M.M. Sozański (eds), Wyd. PZITS, Gdański – Poznań, 2002 (1003-1014)
- 16) Urbaniak A., *Planowanie rozwoju systemu zaopatrzenia w wodę i oczyszczania ścieków*, seria: *Rozprawy nr 230*, Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań 1990
- 17) Urbaniak A., *Komputerowe wspomaganie eksploatacji obiektów i procesów w systemach zaopatrzenia w wodę i oczyszczania ścieków*, *Studia z zakresu inżynierii nr 93*, Wyd. PAN, Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej, Warszawa 2016

