

Andrzej URBANIAK

*Institut Informatyki
Politechnika Poznańska*

INFORMATYCZNE NARZĘDZIA MODELOWANIA I SYMULACJI DLA POTRZEB STEROWANIA PROCESAMI W INŻYNIERII ŚRODOWISKA

SOFTWARE TOOLS OF MODELLING AND SIMULATION FOR PROCESSES' CONTROL OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING

In the paper there are analyzed software tools for modeling and simulation. At first, there is presented a short history concerning analog and digital modeling with its technical aspect. Next section describes chosen professional modeling and simulation software dedicated for control systems in environmental engineering (especially MATLAB/Simulink, LabVIEW, GIS technology and specialized packages). Together with that, there is discussed the proper software selection problem of the numerous possible packages respecting an user's demands. Finally, there is a short presentation of utilization examples for presented informatics tools.

1. Wprowadzenie

Modelowanie zjawisk i procesów jest jednym z najważniejszych narzędzi badawczych w nauce. Modele spełniają głównie dwie zasadnicze funkcje: edukacyjną i poznawczą. Z jednej strony opisują obiekty, procesy i zjawiska, które często trudno jest zrozumieć, a z drugiej pozwalają na poznanie ich cech i właściwości bez konieczności przeprowadzania badań doświadczalnych w rzeczywistych warunkach. Historycznie, pierwsze modele miały charakter fizyczny i badany obiekt przedstawiany (modelowany) był za pomocą innego obiektu wcześniej dobrze rozpoznanego i w skali umożliwiającej wykonywanie badań w warunkach laboratoryjnych. Modele takie spotykane były jeszcze w połowie ubiegłego stulecia¹.

¹ Przykładem takiego rozwiązania może być model hydrauliczny sieci wodociągowej miasta Poznania opracowany w latach 60-tych w ówczesnej Katedrze Automatyki Politechniki Poznańskiej przedstawiający główny szkielet sieci odwzorowany za pomocą połączeń obwodów elektrycznych, w którym charakterystyki hydrauliczne poszczególnych odcinków zamodelowano wykorzystując charakterystyki żarówek uwzględniając tym samym nieliniowości strat na poszczególnych odcinkach sieci. Fizyczne wielkości możliwe do obserwacji na modelu – prądy w obwodach oraz spadki napięć na odcinkach - odpowiadały odpowiednio wielkościom przepływów oraz stratom hydraulicznym.

Aktualnie modele fizyczne stosuje się rzadko, głównie ze względu na duże trudności w uwzględnieniu zmian struktury badanego obiektu wymagającej zwykle fizycznej przebudowy modelu. Równoległe z modelowaniem fizycznym niezwykle intensywnie rozwijano modelowanie matematyczne, polegające na opisie zachowania obiektu za pomocą pojęć abstrakcyjnych ujmowanych w zależności matematyczne. Zarówno modelowanie fizyczne jak i matematyczne wymaga przyjęcia istotnych założeń. Po pierwsze, należy określić cel modelowania, z którego wynikał będzie również poziom szczegółowości modelu. Po drugie, należy zdefiniować charakter wielkości opisujących model, co wymaga jednoznacznego rozróżnienia między wielkościami mającym charakter zmiennych (wielkości wejściowe i wyjściowe), a parametrami opisującymi fizyczne cechy analizowanego obiektu (względnie stałe w czasie). Niezbędna w tym względzie jest wiedza na temat modelowanego procesu ponieważ pozwala na wybór w modelu jak najmniejszego zbioru wielkości wejściowych, które mają najbardziej istotny wpływ na jego zachowanie.

Zamodelowanie rzeczywistego zachowania obiektu wymaga uwzględnienia czasu jako zmiennej niezależnej, od której zależą wielkości wejściowe i wyjściowe. Wymaga to wielokrotnego (iteracyjnego) rozwiązywania zależności modelu dla kolejnych chwil czasu w założonym przedziale obserwacji. Uzyskuje się wówczas model symulacyjny obiektu (procesu). Ważnym elementem procesu symulacji jest możliwość skalowania czasu. Umożliwia ono obserwacje zachowania modelowanego procesu w czasie dostosowanym do realnych możliwości percepcyjnych człowieka. Procesy trwające bardzo krótko można obserwować w dłuższym okresie czasu, natomiast procesy trwające bardzo długo (np. wieloletnie i dłuższe) w skończonym czasie obserwacji (np. w ciągu godziny).

Konstrukcja modelu matematycznego stanowi podstawowy, niezwykle istotny etap badań. Kolejnym etapem jest poszukiwanie rozwiązania sformułowanego modelu. Ze względu na złożoność opisywanych zjawisk i procesów niezwykle rzadko udaje się to zrealizować w postaci analitycznej. Wynika to z dużej liczby zmiennych, ich wzajemnych powiązań – często nieliniowych oraz występujących niejednorodności w ich opisie (zmienne deterministyczne, losowe, nieokreślone i niepewne). Finalna postać modelu procesu reprezentowana jest najczęściej w formie równań (liniowych, nieliniowych, różniczkowych zwyczajnych i cząstkowych) wiążących dużą liczbę zmiennych. Wobec trudności uzyskania rozwiązania analitycznego, poszukuje się rozwiązania metodami przybliżonymi i iteracyjnymi. Współcześnie wykorzystuje się w tym celu specjalizowane komputerowe algorytmy obliczeniowe.

Historycznie rzecz biorąc, należy wspomnieć o maszynach analogowych. Urządzenia te pozwalały na modelowanie zależności wykorzystując analogowe moduły realizujące określone operacje podstawowe (dodawanie, mnożenie, całkowanie) oraz specjalizowane (operacje logiczne, wybrane funkcje nieliniowe). Modelowanie polegało na odpowiednim połączeniu modułów maszyny zgodnie z opisującymi problem równaniami. Możliwość skalowania czasu pozwalała na obserwacje zachowania modelowanego procesu na rejestratorze lub oscyloskopie. Niezwykle istotną zaletą modelowania analogowego było natychmiastowe uzyskiwanie rozwiązania (praktycznie ograniczone jedynie czasem propagacji sygnału i bezwładnością urządzeń rejestrujących). Niestety równie istotną wadą było skuteczne ograniczenie rozmiaru modelu (ograniczenie liczby zmiennych i równań), praktycznie limitowane liczbą bloków funkcyjnych maszyny. Wydaje się, że zupełnie naturalnym procesem była próba zbudowania maszyny hybrydowej, która umożliwiała wykorzystanie zalet modelowania cyfrowego i analogowego przy równoczesnym uniknięciu ich wad. Znane są

przypadki takich rozwiązań, jednakże były one niezbyt częste. Rozwiązania takie przestały być interesujące w kontekście niezwykle intensywnego rozwoju zdolności obliczeniowych komputerów, a przede wszystkim lawinowego wzrostu wydajności procesorów przy równoczesnym spadku ich ceny.

Współcześnie w modelowaniu powszechnie wykorzystuje się komputery, wyposażone często w specjalizowane układy oraz wielofunkcyjne oprogramowanie dedykowane do zadań modelowania. Możliwość wielokrotnego wyznaczania rozwiązania dla różnych ustalonych wartości zmiennej niezależnej (czasu) pozwala uzyskać obraz zachowania się procesu w kolejnych chwilach czasu, inaczej mówiąc pozwala na symulację przebiegu zachowania się procesu w czasie. Różnorodność pakietów programowych pozwala na wybór oprogramowania dedykowanego do danego typu modelowanych problemów.

2. Wybrane narzędzia informatyczne

Różnorodność dostępnych narzędzi informatycznych przeznaczonych do modelowania i symulacji procesów wymaga przyjęcia pewnej - choćby ogólnej - ich klasyfikacji. Z punktu widzenia zastosowań, można mówić o dwóch kategoriach narzędzi: uniwersalnych (wielofunkcyjnych) oraz specjalizowanych. Narzędzia uniwersalne stanowią duże pakiety oprogramowania wykorzystywane głównie przez projektantów systemów automatyki, przemysłowe laboratoria i instytuty badawcze oraz uczelnie. Uniwersalność pozwala bowiem na opracowanie systemów automatyki dla różnych obiektów i procesów, pozwala na wielowątkowe badania modelowe i symulacyjne, a także realizować proces dydaktyczny na uczelniach. Specjalizowane narzędzia, czy wręcz dedykowane do konkretnych zastosowań, wybierają przedsiębiorstwa realizujące określony profil produkcji lub usług, zainteresowane wyłącznie swoim zakresem działalności. Istotne znaczenie ma w procesie wyboru cena produktu informatycznego. Poniżej omówiono arbitralnie wybrane pakiety oprogramowania skupiając się głównie na ich cechach funkcjonalnych, które winny stanowić najważniejszy element wyboru danego narzędzia.

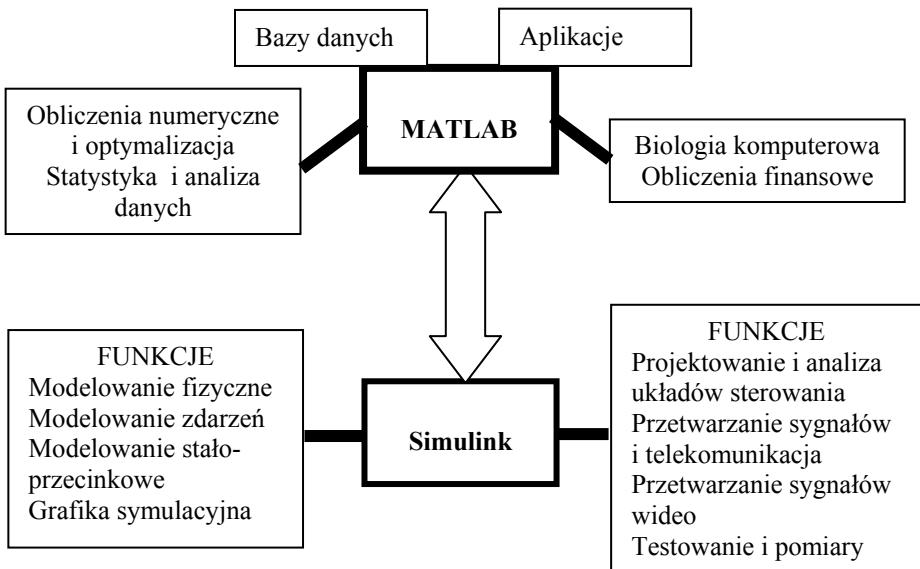
2.1. MATLAB

Niewątpliwie oprogramowanie MATLAB stanowi jeden z najczęściej wykorzystywanych pakietów oprogramowania w badaniach i różnych zastosowaniach w technice. MATLAB jest językiem programowania wysokiego poziomu, przeznaczonym głównie do obliczeń technicznych, którego polecenia, operatory i funkcje pozwalają na wykonywanie obliczeń numerycznych. Język pozwala na wykonywanie operacji na macierzach, zawiera między innymi różne algorytmy interpolacji i aproksymacji, całkowania oraz transformacje. Szerokie stosowanie pakietu wynika z kilku zasadniczych jego cech [15].

1. Oprogramowanie zostało wyposażone w szereg szczegółowych rozwiązań ułatwiających korzystanie z jego różnorodnych funkcji. Użytkownik może korzystać z tak zwanego „przyjaznego” interfejsu użytkownika (głównie graficznego) bez potrzeby stosowania specjalizowanych nazw i poleceń.

2. Pakiet posiada otwartą architekturę, która pozwala na dużą elastyczność w wykorzystaniu różnych platform sprzętowych, zarówno wcześniejszych jak i nowych. Opracowane programy w starszych wersjach można przenosić do nowszych wersji niezależnie od zmian platform sprzętowych i systemu operacyjnego. Otwartość MATLAB-a dotyczy również możliwości podłączania innych specjalizowanych pakietów oprogramowania opracowanych przez różnych producentów, którzy przygotowują swoje produkty w taki sposób by istniała pełna możliwość współpracy programów i wymiany danych.
3. MATLAB zawiera niezwykle bogate biblioteki programów. W wersji podstawowej są to biblioteki: matematyczna i graficzna, które stanowią bazę pozostałych elementów składających się na całościową propozycję rozszerzeń pakietu.

Z MATLAB-em związany jest pakiet Simulink, który stanowi specjalizowane oprogramowanie do modelowania i symulacji modeli dynamicznych różnego typu (ciągłych, dyskretnych) oraz udostępnia narzędzia do modelowania graficznego w postaci schematów blokowych (rys.1). Powiązanie to jest na tyle silne, iż w zastosowaniach z zakresu sterowania i symulacji najczęściej mówi się o wykorzystaniu pakietu MATLAB/Simulink traktując ten twór jako całość. Dostępność wybranych produktów całego pakietu jest uzależniona od przypisania ich do odpowiedniego modułu.



Rys. 1. Struktura pakietu MATLAB/Simulink

Fig. 1. Structure of MATLAB/Simulink product

Istnieje możliwość funkcjonalnego rozszerzenia pakietu o następujące elementy:

- biblioteki „toolbox”, zawierające około 40 wyspecjalizowanych pakietów oprogramowania między innymi z zakresu sterowania, przetwarzania sygnałów i obrazów, optymalizacji, obliczeń symbolicznych, logiki rozmytej i sieci neuronowych;
- narzędzia do tworzenia aplikacji: MATLAB Compiler i MATLAB Builder;
- narzędzia do obliczeń równoległych w sieci i w chmurze: Paralel Computing Toolbox oraz MATLAB Distributed Computing Server;
- narzędzia do prototypowania i implementacji systemów wbudowanych: EmbeddedMATLAB;
- narzędzia do automatycznego generowania raportów z obliczeń i symulacji: MATLABReportGenerator i SimulinkReportGenerator.

Tab. 1. Wybrane pakiety funkcjonalne oprogramowania MATLAB/Simulink

Tab. 1. Chosen functional packets of MATLAB/Simulink software

Lp	Nazwa	Funkcja
1	Control System Toolbox	Synteza, modelowanie i analiza dynamicznych systemów ciągłych i dyskretnych
2	System Identification Toolbox	Tworzenie modeli systemów dynamicznych w oparciu o dane pomiarowe
3	Optimization Toolbox	Algorytmy optymalizacji dla dużej liczby zmiennych, ciągłe i dyskretne, z ograniczeniami i bez ograniczeń
4	Data Acquisition Toolbox	Pobieranie danych pomiarowych z urządzeń zewnętrznych, archiwizacja i przetwarzanie
5	Neural Network Toolbox	Budowa i tworzenie sztucznych sieci neuronowych
6	Fuzzy Logic Toolbox	Modelowanie i projektowanie inteligentnych systemów sterowania o logice rozmytej
7	Partial Differential Equation Toolbox	Rozwiązywanie równań różniczkowych cząstkowych
8	Robust Control Toolbox	Identyfikowanie pesymistycznych scenariuszy sterowania i generowanie systemów odpornych na niepewność i błędy modelowania
9	Model Predictive Control Toolbox	Analiza i synteza algorytmów sterowania predykcyjnego
10	Instrument Control Toolbox	Odczyt danych z przyrządów pomiarowych i sterowanie przyrządami

Z punktu widzenia zastosowań pakietu MATLAB/Simulink dla potrzeb identyfikacji obiektów i procesów oraz projektowania i symulacji systemów sterowania istotne są pakiety, których ograniczoną listę zawiera Tabela 1.

Niezależnie od wyszczególnionych w Tabeli 1 pakietów dostępna jest cała rodzina specjalizowanych produktów Simulink-a ułatwiająca modelowanie, projektowanie, przetwarzanie sygnałów i wizualizację procesów [15].

Oprócz wymienionych w Tabeli 1 funkcji pakietu MATLAB/Simulink związanych ściśle ze sterowaniem, istnieje możliwość szerszego wykorzystania „toolboxów” z zakresu matematyki i optymalizacji, statystyki i analizy danych, przetwarzania sygnałów i telekomunikacji, przetwarzania obrazów i sygnałów wideo, testowania i pomiarów, biologii obliczeniowej, obliczeń finansowych, tworzenia aplikacji i baz danych oraz generowania raportów.

2.2. LabVIEW

Oprogramowanie LabVIEW stanowi narzędzie o zdecydowanie mniejszej uniwersalności w porównaniu do pakietu MATLAB, pozwala jednak na bardzo efektywne zastosowania w systemach sterowania. Główne jego funkcje związane są z możliwością tworzenia wirtualnych interfejsów urządzeń pomiarowych. Ma to szczególne znaczenie w planowaniu złożonych i długotrwałych doświadczeń oraz monitorowaniu procesów wraz z pełną dokumentacją ich przebiegu. Wyniki uzyskane za pomocą oprogramowania LabVIEW mogą być wykorzystane do bieżącej oceny i analizy procesów. Na tej podstawie można nie tylko efektywnie wpływać na przebieg procesów lecz również zmieniać ich strukturę. Oprogramowanie stanowią trzy główne moduły [13]:

- moduł interfejsu graficznego - pulpit,
- moduł diagramu struktury,
- moduł połączeń kilku urządzeń wirtualnych w jedno.

Moduł interfejsu graficznego ma wygląd panelu urządzenia pomiarowego (obiekty graficzne – pokrętła, przyciski, przełączniki, wyświetlacze numeryczne i graficzne itp.).

Diagram struktury opisany jest za pomocą dedykowanego języka graficznego G. Umożliwia on definiowanie połączeń poszczególnych bloków przez przypisanie odpowiednich wejść i wyjść fizycznie podłączonych do sterownika procesu. Język G zawiera bardzo proste elementy służące do tworzenia schematów pomiarowych, takie jak: końcówki (terminals), węzły (nodes), przewody (wires) oraz konstrukcje sterujące (structures).

Kończówki (terminals) – definiują porty wejściowe i wyjściowe przesyłające informacje między pulpitem a diagramem.

Węzły (nodes) – reprezentują funkcję, wyrażenie matematyczne lub procedurę zapisaną w języku tekstowym wykorzystywaną do przetwarzania danych.

Przewody (wires) – definiują połączenia pomiędzy składowymi diagramu.

Konstrukcje sterujące (structures) – ustalają sposób wykonywania programu.

Moduł połączeń kilku urządzeń w jedno wykorzystywany jest w celu uzyskania większej przejrzystości programu. Pozwala na utworzenie jednego urządzenia na pulpicie i zobrazowania go za pomocą ikony bez wnikania w szczegółowe rozwiązanie pomiaru, który może wymagać wielu indywidualnych urządzeń. Przykładem mogą być zagregowane wskaźniki jakości wody lub ścieków (np. CHZT, BZT), które wyznacza się w oparciu o pomiary kilku wielkości fizykochemicznych.

Opisane powyżej możliwości oprogramowania LabVIEW realizowane są w tym samym zakresie funkcjonalnym również w MATLAB-ie w pakiecie Data Acquisition Toolbox.

2.3. Technologie GIS

Systemy GIS mają już swoją historię. Pierwszy system informacji geograficznej powstał w Kanadzie w połowie lat 60-tych XX wieku – CGIS (Canada Geographic Information System) w celu określenia zasobów naturalnych – ich przestrzennego rozmieszczenia oraz przyszłego wykorzystania. W ślad za nim pojawiły się kolejne aplikacje, głównie w USA oraz Anglii. Wprowadzenie na orbitę w latach 70-tych satelitów cywilnych dawało możliwości wykorzystania danych uzyskiwanych drogą satelitarną i uaktualnianie danych w bazach systemów GIS. Spowodowało to intensywny rozwój zastosowań systemów GIS w wielu dziedzinach oraz szerokie upowszechnienie tego narzędzia poprzez rozwój ogólnodostępnej sieci internetowej. Ocenia się, że w 2000 roku liczba użytkowników systemu GIS, korzystających zawodowo z jego narzędzi wynosiła ponad 1 mln, a około 5 mln osób korzystało z niego dorywczo [14].

Systemy GIS pozwalają uzyskiwać informacje o najwyższym stopniu aktualności - mające istotne znaczenie dla bieżącej oceny wybranego obszaru oraz stanu obiektów występujących na analizowanym obszarze. Dane uzyskiwane z baz typu GIS mają ważne znaczenie w odniesieniu do obiektów i urządzeń, które wykorzystywane są w systemach charakteryzujących się ciągłością dostaw. Dotyczy to różnych sieci dostawczych: elektroenergetycznych, wodociągowych, gazowych, ciepłowniczych oraz telekomunikacyjnych. Szczególne znaczenie mają informacje o urządzeniach występujących pod powierzchnią ziemi (np. linie energetyczne kablowe, rurociągi gazowe, ciepłownice, wodociągowe, kanalizacyjne), które trudno zlokalizować poprzez prostą obserwację powierzchni. Wykorzystanie technologii GIS w zakresie systemów zaopatrzenia w wodę zaprezentowano w pracy [12].

Nie wnikając w szczegóły zastosowań technologii GIS, można stwierdzić, że dla celów sterowania ich znaczenie polega przede wszystkim na możliwości pozyskania aktualnej informacji o obiektach o charakterze rozproszonym przestrzennie. Informacje te mogą być uzyskane bez konieczności budowania uciążliwych przewodowych systemów monitorowania. Uzyskanie wiarygodnych informacji o obiektach i procesach za pomocą transmisji bezprzewodowych pozwala na efektywną reakcję na zdarzenia w nich występujące i podjęcie właściwego sterowania.

2.4. Modele wybranych procesów technologicznych

Podjęmując próbę zebrania informacji na temat różnych narzędzi informatycznych wykorzystywanych w układach sterowania nie można pominąć całej gamy komputerowych modeli procesów i obiektów opracowanych przez różnych autorów głównie dla potrzeb technologii. Poziom szczegółowości i złożoności tych modeli uwarunkowany był ich przeznaczeniem dla celów projektowania technologii, prowadzenia eksploatacji jak również w celach edukacyjnych.

Wykorzystanie tego typu oprogramowania do sterowania procesami najczęściej nie jest możliwe bez pewnych modyfikacji. Ta konieczność dyskwalifikuje do użytku w zakresie sterowania takie pakiety, w których nie przewidziano możliwości modyfikacji, głównie w kierunku uproszczenia modelu.

W badaniach przedprojektowych i analizach technologicznych szeroko wykorzystuje się modele klasy ASM (Activated Sludge Model) [9]. Opracowany pierwotny model osadu czynnego przez międzynarodową grupę ekspertów był testowany i rozwijany przez wiele lat. Powstawały kolejne wersje modelu i aktualnie można mówić o wielu modelach dostosowanych do specyficznych sytuacji technologicznych i uwzględniających różne czynniki wpływające na przebieg procesu oczyszczania. Otwartość opracowanych modeli daje możliwość rozszerzania ich funkcjonalności oraz uzupełniania o elementy szczególnie charakterystyczne dla danego rozwiązania technologicznego. Z modelem ASM kojarzony jest również model opisujący proces fermentacji beztlenowej ADM (Anaerobic Digestion Model) [16]. Przykładem udanej modyfikacji wersji modelu ASM2d dla potrzeb badań technologicznych może być jego uzupełnienie zaproponowane w pracy [21]. W celach symulacji procesów oczyszczania ścieków w obiektach o średniej wydajności wykorzystywano oprogramowanie dedykowane o ograniczonej funkcjonalności, jednak w pełni wystarczające do uzyskania oczekiwanych efektów [10].

Jak wspomniano wcześniej, modele opracowane dla potrzeb badania technologii zwykle nie mogą być wprost wykorzystywane w procesie syntezy algorytmów sterowania, stanowią jednakże istotny element szczególnie na etapie projektowania układów i algorytmów sterowania. Pozwalają bowiem na testowanie opracowanych algorytmów wykorzystując modele symulacyjne obiektów i procesów.

3. Problematyka wyboru właściwych narzędzi

Wspomniana już wcześniej niezwykła różnorodność oferowanych narzędzi programowych wymaga usystematyzowanego podejścia do problemu podjęcia decyzji o wyborze określonego oprogramowania. Postawione w tytule referatu przeznaczenie omawianych narzędzi informatycznych w sposób zasadniczy ukierunkowuje ocenę ich przydatności – chodzi o ich wykorzystanie dla potrzeb sterowania. Istotę procesu sterowania określa się często jako zadanie wyznaczenia takiego oddziaływania na proces, aby uzyskać założone cele niezależnie od występujących zakłóceń. Można by trochę przewrotnie zauważyć, że „sens istnienia” systemu sterowania tkwi w występowaniu zakłóceń. Bez nich, raz dobrane dobrze parametry pracy obiektu lub procesu gwarantowałyby jego właściwe funkcjonowanie. Projektant systemu sterowania nie musi dysponować dokładną znajomością charakterystyk technologicznych procesu. Najistotniejsza dla niego jest wiedza o dynamice procesu, czyli zdolności zmian wielkości procesu w czasie, aby system sterowania „zdążył” z reakcją na występujące zmiany jego zachowania (lub zakłócenia). W tym rozumieniu sterowania tkwi jego systemowa natura, ponieważ dla automatyka istotna jest wiedza o tym JAK proces przebiega, a nie CO się w nim produkuje. Stąd też – przykładowo - proces gromadzenia wody w zbiorniku będzie dla automatyka równoważny z procesem gromadzenia ładunku elektrycznego na kondensatorze, bowiem w obu przypadkach proces ma charakter całkujący. Z powyższych rozważań wynika jeden bardzo ogólny wniosek, że dążenie do budowania szczegółowych modeli procesów dla celów sterowania nie jest celowe. Istniejące zatem bardzo szczegółowe modele procesów w inżynierii środowiska wykorzystywane dla celów badania technologii nie zawsze będą użyteczne dla celów sterowania.

Intensywny rozwój nauk związanych z informatyką, a w szczególności sztucznej inteligencji pozwala na dalej idące stwierdzenie, że systemy sterowania mogą działać dobrze również w sytuacji niedokładnej i niepewnej wiedzy o procesie. W takich przypadkach wykorzystuje się w sterowaniu zalety sztucznych sieci neuronowych, teorii zbiorów rozmytych oraz algorytmy heurystyczne [18, 22].

Po tych uwagach wstępnych wróćmy do zasadniczego pytania o sposób wyboru informatycznego narzędzia do modelowania i symulacji procesu dla potrzeb sterowania. Problematykę wyboru informatycznego narzędzia dla określonych celów należy rozpocząć od uzyskania zbioru możliwych rozwiązań (dostępnych pakietów oprogramowania), z którego należy wybrać jedno najlepsze rozwiązanie. Może się zdarzyć (i najczęściej tak jest!), że rozwiązań spełniających wymagania (tak zwanych rozwiązań dopuszczalnych) jest więcej i wówczas spośród nich decydent wybiera rozwiązanie kompromisowe. Ogólny schemat procesu przedstawiono na rys. 2. Obok opisu poszczególnych etapów procesu wyboru zestawiono zadania, które powinny zostać zrealizowane. Blok 1 wymaga zdefiniowania klasy problemu jaki należy rozwiązać. Należy wyraźnie rozróżnić modele tworzone dla potrzeb technologii od modeli dedykowanych dla systemów sterowania. Kolejny etap to sformułowanie wymagań jakie winno spełniać wybierane oprogramowanie. Wymagania te mają charakter ograniczeń procesu decyzyjnego, określają zatem obszar dopuszczalnych decyzji. Część z nich może być wyrażona binarnie (wskazana cecha występuje – „1” lub nie występuje – „0”). W dobrze zdefiniowanym problemie wyboru już na tym etapie dokonywana jest skuteczna selekcja rozwiązań, które nie powinny być dalej brane pod uwagę. Zwykle wystąpią również wymagania niekrytyczne czyli takie, których niespełnienie nie dyskwalifikuje rozwiązania chociaż czyni je mniej atrakcyjnym. Niezbędne będzie w tym przypadku przyjęcie reguły wartościowania stopnia spełnienia danego wymagania na przykład w formie skali punktowej. Etap 3 polega na sformułowaniu zbioru kryteriów oceny rozwiązań. Jest to trudny etap, wymaga bowiem przyjęcia i opisania funkcji kryterialnych. W szczególnym przypadku można problem sprowadzić do problemu jednokryterialnego przypisując wagi poszczególnym kryteriom. Jest to jednak raczej zabieg sztuczny, gdyż rozpatrywany problem jest z natury wielokryterialny. Uwzględniając wiele kryteriów oceny można posłużyć się znanymi procedurami wyboru rozwiązania pareto-optimalnego (sprawnego) dostępnymi również w wersjach gotowych narzędzi programowych typu „open source” (etap 4). W etapie 5 definiuje się uszeregowanie rozwiązań i na tej podstawie można dokonać wyboru rozwiązania kompromisowego [4]. Pełnym uwieńczeniem procesu wyboru powinna być analiza wrażliwości uzyskiwanych rozwiązań, która w zależności od jej wyników uzasadniałaby dokonany wybór lub wskazywała na konieczność przedefiniowania problemu, w szczególności na etapie formułowania wymagań i definiowania funkcji kryteriów.

Przedstawiony proces wyboru jest możliwy w przypadku dysponowania określonym zbiorem możliwych rozwiązań (zbiorem odpowiednich pakietów programowych). Innymi słowy, warunkiem koniecznym efektywnego wyboru jest pełne rozeznanie w odniesieniu do dostępnych narzędzi informatycznych, a w szczególności uzyskanie pełnych informacji o ich możliwościach oraz wymaganiach i ograniczeniach. Te ostatnie zwykle w informacjach katalogowych są skrzętnie ukrywane.



Rys. 2. Ogólny schemat procesu wyboru właściwych narzędzi informatycznych

Rys. 2. A general diagram of choice process of proper informatics tools

Tak przedstawiony ogólny schemat wyboru właściwych narzędzi informatycznych może ulec pewnym modyfikacjom w odniesieniu do specyficznych zastosowań związanych z obiektami lub procesami o szczególnych cechach. Przykład kompleksowego rozwiązania problemu wyboru oprogramowania do celów modelowania sieci wodociągowych przedstawiono w pracy [4]. Zaproponowano tam prostą metodykę wyboru oprogramowania użytecznego dla przedsiębiorstw wodociągowych z uwzględnieniem specyfiki przedsiębiorstwa oraz zróżnicowanych wymagań funkcjonalnych. Mimo tak jednoznacznie sformułowanego celu do jakiego planowano użyć poszukiwane oprogramowanie, niełatwym zadaniem okazało się doprecyzowanie stawianych wymagań. 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. Drugą przyczyną 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.

Pokonanie obu tych trudności jest możliwe głównie na drodze partnerstwa dwóch grup zawodowych. Z jednej strony są to specjaliści od technologii i eksploatacji procesów, a z drugiej specjaliści zajmujący się problemami sterowania komputerowego. Efektem tej współpracy jest specyfikacja wymagań użytkownika oprogramowania wynikająca z dialogu obu grup, w której z jednej strony formułowane są oczekiwania użytkownika, a drugiej ukazywane możliwości jakie dają aktualnie dostępne narzędzia informatyczne. W świetle wypracowanej specyfikacji wymagań można przeanalizować produkty informatyczne przeznaczone do rozwiązywania różnych zadań projektowych, eksploatacyjnych oraz sterowania i zarządzania [11].

Niezwykle istotnym, choć bardzo pracochłonnym etapem procesu wyboru odpowiedniego narzędzia jest zebranie reprezentatywnego zbioru dostępnych narzędzi. Zadanie to wymaga pozyskania wiarygodnych informacji o możliwościach funkcjonalnych oferowanych narzędzi oraz ich ograniczeń, jak również warunków wykorzystania w określonym środowisku informatycznym. Nie zawsze te informacje są transparentnie prezentowane w opisach firmowych i dlatego do pełnej oceny często niezbędne jest pozyskanie informacji od użytkowników. Należy podkreślić znaczenie praktyczne tego typu opracowań choć nie są one częste [5].

4. Przykłady zastosowań

Poniżej scharakteryzowano pokrótce wybrane przykłady wykorzystania różnych narzędzi informatycznych do celów sterowania procesami w inżynierii środowiska. Sterowanie należy tu rozumieć w ujęciu systemowym jako celowe oddziaływanie na przebieg różnych procesów. Przedstawiony wybór w żaden sposób nie ma charakteru wyczerpującego i jest całkowicie arbitralny. Przedstawia wybrane zastosowania realizowane w zespole badawczym funkcjonującym w strukturach Zakładu Badań Operacyjnych i Sztucznej Inteligencji w Instytucie Informatyki i realizowane we współpracy z Zakładem Zaopatrzenia w Wodę i Ochrony Środowiska w Instytucie Inżynierii Środowiska Politechniki Poznańskiej. Wieloletnie doświadczenia wspólnie realizowanych badań potwierdzają w całej rozciągłości tezę o konieczności współpracy obu grup specjalistów, która skutkuje uzyskaniem ciekawych wyników w warstwie poznawczej jak również w sposób bezpośredni wpływa na rozwój naukowy uczestników badań.

4.1. Sterowanie procesem oczyszczanie ścieków

Modele typu ASM zostały wykorzystane w pracy doktorskiej [23] do syntezy algorytmów sterowania procesem oczyszczania ścieków metodą osadu czynnego. Do rozważań przyjęto najprostszy układ technologiczny obejmujący w kolejności zbiornik kontak-

towy, komorę napowietrzania oraz osadnik. Z osadnika istnieje możliwość recyrkulacji osadu oraz usuwania osadu nadmiernego.

Za pomocą pakietu oprogramowania MATLAB/Simulink zamodelowano podstawowe procesy jednostkowe [17]:

- proces mieszania,
- proces wzrostu biomasy,
- proces chemicznego usuwania fosforu,
- proces sedymentacji.

W opisie modelu wykorzystano równania bilansowe zaprezentowane w modelu ASM1 [9,16]. Syntezy algorytmów sterowania dokonano przy wymaganiach stabilnej pracy oczyszczalni ścieków w warunkach zmieniającego się dopływu ścieków do oczyszczalni zarówno w sensie ilości jak i ładunku zanieczyszczeń. Określono w procesie główne wielkości regulowane: natężenie przepływu osadu nadmiernego oraz natężenie przepływu osadu recyrkulowanego. Opracowano algorytmy regulacji wykorzystujące regulatory rozmyte typu PD (proporcjonalno-różniczkujące). Uzyskane wyniki potwierdziły poprawność przyjętych założeń i większą efektywność regulacji w stosunku do rozwiązań z klasycznymi algorytmami regulacji [23].

4.2. Neutralizacja ścieków z przemysłu spożywczego

Kolejny przykład wykorzystania efektywnych metod symulacyjnych dotyczy procesu neutralizacji ścieków [7]. Doświadczenia eksploatacyjne wielu oczyszczalni ścieków szczególnie z przemysłu spożywczego wskazują na dużą zmienność wskaźnika pH wynikającą przede wszystkim z pewnej cykliczności procesów. W tych warunkach, mamy do czynienia z okresowym występowaniem dużych ilości ścieków o skrajnie różnych wartościach wskaźnika pH, których nie można odprowadzić wprost do systemu kanalizacyjnego ze względu na określone przepisami warunku zrzutu. Oczywistym i najprostszym rozwiązaniem tego problemu jest wzajemna neutralizacja ścieków o charakterze zasadowym ściekami kwaśnymi i odwrotnie, co jednakże wymaga czasowego retencjonowania dużych ilości ścieków. Innym rozwiązaniem jest chemiczna neutralizacja ścieków poprzez dawkowanie kwasów lub zasad. Pierwsze rozwiązanie (retencjonowanie) wymaga znacznych nakładów inwestycyjnych związanych z budową dużych zbiorników retencyjnych. Stwarza również często problemy eksploatacyjne przy konieczności dłuższego przetrzymywania ścieków w oczekiwaniu na ścieki o przeciwnej charakterystyce. Drugie rozwiązanie wymaga ciągłego podawania substancji neutralizujących przed zrzutem ścieków do systemu kanalizacyjnego, co skutkuje wzrostem kosztów eksploatacyjnych procesu.

Wykorzystując pakiet oprogramowania MATLAB zamodelowano proces neutralizacji ścieków dla wybranego zakładu przemysłu spożywczego w celu określenia rozwiązania kompromisowego zapewniającego minimalne zużycie reagentów przy zadanej objętości dwóch zbiorników, z których jeden pełnił rolę zbiornika neutralizacji, a drugi zbiornika buforowego. Szczegółowe omówienie powyższego rozwiązania zaprezentowano w pracach [7,8]. Powyższe rozwiązanie dotyczy sytuacji eksploatacyjnej przy zadanych pojemnościach zbiorników. Rozwinięciem przedstawionego problemu może być sytuacja badań przedprojektowych, w których należałoby określić optymalne pojemności zbiorników gwarantujących spełnienie wymagań jakościowych jak również minimalizujących koszty eksploatacyjne procesu.

4.3. Sterowanie i eksploatacja systemów dystrybucji wody

Wykorzystanie modeli symulacyjnych w odniesieniu do systemów dystrybucji wody ma swoją bogatą tradycję. Jak wspomniano już we wprowadzeniu, złożoność systemu wodociągowego skłaniała do poszukiwania rozwiązań, które pozwoliłyby na analizę modelową różnych sytuacji eksploatacyjnych i na tej podstawie określenia najbardziej efektywnego scenariusza działań. Współczesne programowe narzędzia do modelowania hydrauliki oraz jakości wody w sieci wodociągowej pozwalają na niezwykle efektywne badania symulacyjne zachowania sieci w różnorodnych sytuacjach eksploatacyjnych. Efektywność wykorzystania modeli sieci wodociągowych dla celów sterowania i eksploatacji sieci zależy w dużej mierze od dokładności odwzorowania zjawisk hydraulicznych w sieci. Odwzorowanie sieci odbywa się zawsze dla założonego poziomu dokładności obejmującej odcinki rurociągów o określonych średnicach. Przydatność modelu ocenia się w procesie walidacji i weryfikacji [2]. Skuteczne przeprowadzenie tych procesów uwarunkowane jest wyposażeniem sieci w niezbędne urządzenia pomiarowe, w szczególności do pomiarów ciśnień i przepływów. Dobrze skalibrowany model hydrauliczny może być wykorzystany do modelowania jakości wody w sieci. Badania doświadczalne przeprowadzone w Anglii i Francji uzasadniają konieczność uzyskania dokładności modelu hydraulicznego, dla potrzeb modelowania jakości, w zakresie 90 – 95%. Modelowanie jakości wody w sieci jest zadaniem bardzo trudnym, co najmniej z dwóch powodów. Pierwszy wynika z możliwości pojawienia się różnorodnych zanieczyszczeń, których propagacja w sieci może przebiegać w różny sposób. Druga trudność polega na konieczności uzyskania miarodajnych informacji o poziomie zanieczyszczeń w wybranych punktach sieci. Ta ostatnia niedogodność wymaga zastosowania takiej metody pomiaru, która pozwalałaby na wskazanie wszystkich (lub prawie wszystkich) możliwych rodzajów zanieczyszczeń. Najczęściej przyjmuje się wskaźnik w postaci poziomu stężenia wolnego chloru jako miarę występujących zanieczyszczeń w sieci [6].

Powyższe uwagi dotyczące modelowania i symulacji procesów hydraulicznych oraz zmian jakości w sieci skłaniają do sformułowania wniosku o bardziej ogólnym znaczeniu w odniesieniu do wyposażenia sieci w urządzenia pomiarowe. Efektywne wykorzystanie modeli sieci (hydraulicznego i jakościowego) uwarunkowane jest możliwością pozyskiwania aktualnych danych o pracy sieci. Oznacza to ścisłe powiązanie procesu modelowania i symulacji z bieżącym monitorowaniem pracy sieci [6,12]. Dodatkowo, znajomość modeli rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń pozwala na skuteczne ograniczenie liczby urządzeń pomiarowych instalowanych na sieci.

Pełne informacje o pracy sieci w zakresie hydrauliki i jakości gromadzone w bazach typu GIS stanowią podstawowe dane dla służb eksploatacyjnych. Wdrożenie systemów wykorzystujących szerokie możliwości systemów typu GIS związane jest jednak z bardzo istotnym problemem jakim jest niespójność baz danych przedsiębiorstw wodociągowo-kanalizacyjnych z formatami opisu występującymi w bazach GIS. Przedsiębiorstwa wodociągowo-kanalizacyjne posiadają zwykle duże zbiory danych pozyskiwane w różny sposób i wykorzystywane w bieżącej eksploatacji. Cechuje je jednak duża niespójność, która powoduje, że pokaźne woluminy danych są dublowane, gdyż wykorzystują je różne służby przedsiębiorstwa. Niespójność wykorzystywanych baz danych rodzi poważne problemy związane z ich aktualizacją. Istnieje wiele możliwości programowego powiązania danych wykorzystywanych przez różne służby przedsiębiorstwa i utworzenia jednego spójnego systemu baz danych wykorzystując technologie GIS, lecz nie jest to sprawa prosta szczególnie w sytuacji zachowania ciągłości pracy systemu wodociągowego. Proces ten musi rozpocząć się od zdefiniowania jednego słownika opisu danych

zapewniającego jednoznaczne rozumienie nazw poszczególnych wielkości i obiektów. Uzyskane następnie zbiory danych mogą być wykorzystywane w różnie zdefiniowanych profilach w zależności od wymagań użytkowników. Również procedury aktualizacji pozwolą zachować pełną spójność wszystkich danych.

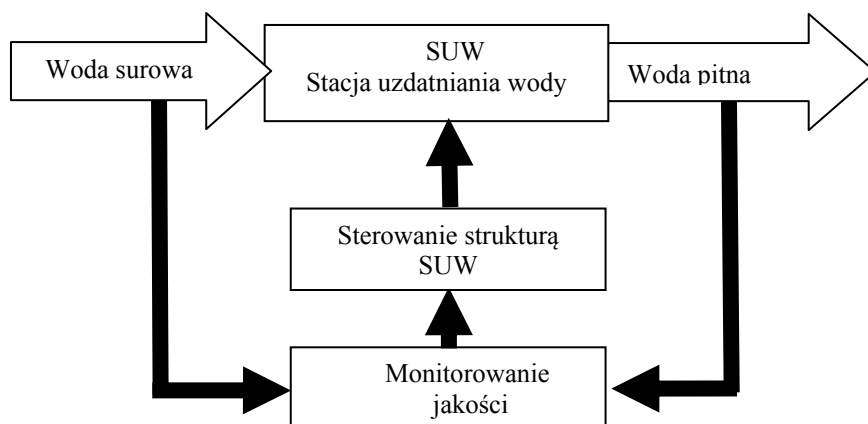
Wykorzystanie takich aktualizowanych na bieżąco i dostępnych dla poszczególnych służb przedsiębiorstwa zbiorów danych pozwala na skuteczne sterowanie procesem produkcji i dystrybucji wody i oraz optymalizację procesów zarządzania. Również wystąpienie awarii typu hydraulicznego lub zagrożenia jakości może być bezpośrednio sygnalizowane dla służb eksploatacyjnych skutecznie skracając czas reakcji na zaistniałą sytuację. Opracowany i zweryfikowany model sieci może również posłużyć do wypracowania gotowych scenariuszy działań na wypadek różnych występujących zagrożeń, w tym również ataków terrorystycznych [3].

4.4. Sterowanie procesami uzdatniania wody i oczyszczania ścieków

Wykorzystanie pakietów programowych do modelowania i symulacji procesów w inżynierii środowiska realizowane jest głównie w celu najbardziej efektywnego prowadzenia całego złożonego procesu uzdatniania wody lub oczyszczania ścieków. Zakłada się przy tym, że przyjęta technologia została poprawnie zaprojektowana i oddziaływania dotyczą jedynie doboru wartości zadanych oraz parametrów procesu sterowania i regulacji (nastawy regulatorów lub wybór algorytmów sterowania). Założenie niezmienności procesu uzdatniania lub oczyszczania jest słuszne w przypadku dużej stabilności surowego produktu poddawanego tym procesom. W okresie dłuższej eksploatacji ujęć wody mogą pojawić się istotne zmiany właściwości wody surowej. W pracy [20] zaproponowano rozwiązanie pozwalające na sterowanie procesem uzdatniania wody w zależności od efektów uzyskiwanych w modelowym rozwiązaniu. Sterowanie procesem realizowane jest w tym przypadku zarówno w odniesieniu do zmian nastaw regulatorów i algorytmów sterowania, ale również poprzez ingerencję w strukturę technologiczną procesu uzdatniania. Zakłada się możliwość włączania lub wyłączania wybranych procesów jednostkowych w zależności od monitorowanych na bieżąco zmian jakości końcowego produktu (rys.3).

Realizacja tak rozumianego sterowania jest możliwa w przypadku spełnienia kilku istotnych warunków. Należy do nich wyposażenie systemu technologicznego w efektywne układy pomiarowe zarówno prostych wielkości fizycznych (poziomy, przepływy, temperatura) jak i bardziej złożonych (wskaźnik pH, mętność, OWO). Pomiaru te powinny być realizowane na wejściu w odniesieniu do wody surowej oraz na wyjściu, ściślej w punkcie wprowadzenia końcowego produktu do sieci wodociągowej. Szczegółowe zestawienie wielkości mierzonych uzależnione będzie od charakteru procesu uzdatniania zdeterminowanego głównie źródłem pochodzenia surowca (wody podziemne lub wody powierzchniowe). Drugim elementem warunkującym efektywność proponowanego podejścia jest wyposażenie instalacji technologicznych w urządzenia wykonawcze umożliwiające dokonywanie zmian w strukturze systemu technologicznego. Proponowane rozwiązania dla przypadku zmian wybranych procesów technologicznych zaprezentowano w pracy [20]. Kolejnym elementem pozwalającym na realizację proponowanego podejścia jest opracowanie algorytmów sterowania. Ze względu na złożoność struktury systemu oraz na występujące istotne elementy niepewności danych oraz niedokładną wiedzę na temat wzajemnych powiązań poszczególnych wielkości

procesu wskazane są algorytmy wykorzystujące elementy sztucznej inteligencji. W pracach [19,20] zaprezentowano możliwości wykorzystania pakietów oprogramowania MATLAB oraz LABVIEW, dających możliwość symulacyjnego przebadania proponowanych rozwiązań.



Rys. 3. Idea sterowania strukturą procesu technologicznego

Fig.3. An control idea of technological process structure

W przedstawionej powyżej propozycji rozwiązania problemu sterowania stacją uzdatniania wody należy zwrócić uwagę na dwa istotne elementy. Po pierwsze, powyższe rozwiązanie nie jest związane z prowadzeniem doświadczeń na „żywym organizmie” jakim jest stacja uzdatniania wody. Wykorzystanie pakietów symulacyjnych pozwala na uzyskanie wyników w odniesieniu do zmian struktury SUW po uzyskaniu miarodajnych wyników symulacji opisujących efekty zastosowanych zmian. Zapewnia to pełne bezpieczeństwo w realizacji tego typu rozwiązania. Po drugie, uzyskanie żądanych efektów końcowych procesu uzdatniania wody związane jest ze ściśle określonym kosztem realizacji procesu. Stosując narzędzia symulacyjne można poszukiwać rozwiązania optymalizującego ten koszt [19]. Można również rozszerzyć proponowane podejście poszukując rozwiązania (lub rozwiązań), w którym uwzględnione zostaną również inne kryteria oceny, na przykład oprócz kosztowego również kryteria jakościowe lub środowiskowe.

5. Podsumowanie

Przedstawiony w referacie przegląd związany z wykorzystaniem informatycznych narzędzi do modelowania i symulacji obiektów i procesów w inżynierii środowiska skłania do sformułowania kilku zasadniczych uwag podsumowujących.

1. Modelowanie i symulacje stanowią niezmiennie zasadnicze narzędzie badawcze w rozwiązywaniu większości problemów naukowych, projektowych i w praktyce eksploatacyjnej.
2. W związku z rozwojem technik informatycznych modele komputerowe coraz częściej konkurują skutecznie z analitycznymi modelami teoretycznymi.
3. Oprogramowanie do modelowania i symulacji różnych obiektów i systemów stanowi istotną silnie rozwijającą się gałąź zastosowań informatyki. Stanowi to równocześnie dowód stabilizacji systemowej dyscypliny naukowej jaką jest informatyka przechodząc od etapu fascynacji jej aparatem do etapu zastosowań wypracowanych przez nią narzędzi.
4. Dostępność szerokiej gamy informatycznych narzędzi do modelowania i symulacji stwarza dużą trudność związaną z wyborem właściwego oprogramowania. W praktyce wybór ten ma zawsze charakter wielokryterialny wymagający uwzględnienia szeregu różnorodnych atrybutów.
5. Wykorzystanie do celów sterowania obiektami i procesami w inżynierii środowiska istniejących modeli opracowanych dla potrzeb technologii jest uwarunkowane możliwością ich modyfikacji, głównie pod kątem uzyskania zależności opisujących dynamikę tych procesów.
6. Profesjonalne pakiety oprogramowania do modelowania i symulacji są w pełni kompatybilne z programowymi narzędziami opracowanymi do celów symulacji i projektowania systemów sterowania i często występują w formie specjalizowanych modułów.
7. Rozwój profesjonalnych pakietów narzędziowych dedykowanych dla celów modelowania, symulacji i sterowania powoduje konieczność ciągłej edukacji kadr zaangażowanych w przedsiębiorstwach wodociągowo-kanalizacyjnych, która jest warunkiem otwartości na nowe rozwiązania w konsekwencji prowadzące do poprawienia jakości produktu (wody) jak również poprawy warunków pracy całego systemu zaopatrzenia w wodę i oczyszczania ścieków.

Na koniec można stwierdzić, że najbardziej skuteczne rozwiązanie złożonych problemów badawczych pojawiających się na styku wielu dyscyplin naukowych (w szczególności inżynierii środowiska, automatyki i informatyki) ma miejsce w przypadku podjęcia problemu przez interdyscyplinarny zespół badawczy, w którym każdy jego uczestnik postrzega swoją rolę przez pryzmat partnerskiego wkładu reprezentowanej przez siebie dyscypliny.

Bibliografia

- [1] Bałut A., *Metodyka wyboru narzędzi informatycznych do modelowania i analizy sieci wodociągowych*, (Rozprawa doktorska), Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Poznańskiej, Poznań 2010 r.
- [2] 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)
- [3] Bałut A., Urbaniak A., Management of Water Pipeline Networks Supported by Hydraulic Models and Information Systems, Proc. of ICCC'2011, Velke Karlovice, Czech Republik, 25-28 May 2011, ISBN: 978-1-61284-359-9
- [4] Bałut A., Urbaniak A., Wybór oprogramowania do modelowania sieci wodociągowej – przykład analizy wielokryterialnej, Zaopatrzenie w wodę, jakość i ochrona wód, Wielkopolski Oddział PZITS, Kołobrzeg, 2010, 131-144
- [5] Bałut A., Urbaniak A., *Wybór oprogramowania do modelowania sieci wodociągowej*, Wydawnictwo Seidel-Przywecki, Poznań 2013 (w opracowaniu)
- [6] Brdyś M.A., Modelowanie, monitorowanie i sterowanie, *Wodociągi i kanalizacja*, nr 10 (44) 2007 (22-24)
- [7] Brodziak R., Góra W., Urbaniak A., Modeling and simulation of technological wastewater neutralization system in brewing industry, in: Modelling and Simulation 2011, P.Novais, J. Machado, C. Analide, A. Abelha (eds), Publ. EUROSIS-ETI, ISBN:978-90-778381-66-3, 2011, (338-340)
- [8] Brodziak R., Góra W., Urbaniak A., Zakrzewski P., Symulacyjny model procesu neutralizacji ścieków przemysłowych, Zaopatrzenie w wodę, jakość i ochrona wód, Wielkopolski Oddział PZITS, Stare Jabłonki, 2012, 131-144
- [9] Henze M., Gujer W., Mino T., Loosdrecht M., *Activated sludge models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3*, IAWA Publishing, London 2000
- [10] Jaroszyński T., Dymaczewski Z., Ocena programu NITRODEF na przykładzie symulacji dla miejskiej oczyszczalni ścieków w Gnieźnie, Zastosowanie technik Informatycznych w zarządzaniu systemami wodno-kanalizacyjnymi, *Komputer w ochronie środowiska*, Wielkopolski Oddział PZITS, Poznań, 2003 (53-60)
- [11] Józefowska J., Urbaniak A., Nowoczesne technologie informatyczne w systemach zarządzania i sterowania procesami a kształcenie informatyków, *Ergonomia – Technika i Technologia – Zarządzanie*, Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań 2009, ISBN 978-83-7143-866-4, (179-198)
- [12] Kwietniewski M., Gębski W., Wronowicz N., Monitorowanie sieci wodociągowych i kanalizacyjnych, Wyd. PZITS, Warszawa 2005 r.
- [13] LabVIEW. Polskie Centrum LabVIEW, WWW.labview.pl
- [14] Longplay P.A., Goodchild M.F., Maquire D.J., Rhind D.W., *GIS- Teoria i praktyka*, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2006.

- [15] Mrozek B., Mrozek Z., *MATLAB i Simulink – Poradnik użytkownika*, Wyd. HELION, Warszawa 2010
- [16] Nopens I., Batstone D.J., Copp J.B., Jeppsson U., Volcke E., Alex J., Vanrolleghem P.A., An ASM/ADM model interface for dynamic plant wide simulation, *Water Research* 43, 2009 (1913-1923)
- [17] Nowak M., Zakrzewski P., Zastosowanie pakietu MATLAB do symulacji wybranych procesów wpływających na jakość środowiska, *Zastosowanie technik informatycznych w zarządzaniu systemami wodno-kanalizacyjnymi*, Wielkopolski Oddział PZITS, Poznań 2003r. (27-46)
- [18] Oborzynski K., *Integration of artificial intelligence methods in management and control systems of complex processes*, (rozprawa doktorska) Wydział Informatyki i Zarządzania Politechniki Poznańskiej, Poznań 2003 r
- [19] Sozański M.M., Urbaniak A., Technologia i sterowanie procesami chemicznymi w uzdatnianiu wody, mat. Konferencji „Woda – człowiek – środowisko”, Wrzesień – Licheń, 15 – 16 kwietnia 2010 (17-30)
- [20] Sozański M.M., Urbaniak A., Monitoring of fresh water quality for the choice of treatment technology, Proc. of 11th ICCO'2010, ISBN 978-963-06-9289-2, Eger (Węgry) May 26-29, 2010 (321-324)
- [21] Szetela R., Dymaczewski Z., Modyfikacja obecnej postaci modelu osadu czynnego ASM 2d, *Ochrona środowiska* nr 1 (84) 2002 (2-8)
- [22] Urbaniak A., *Komputerowe wspomaganie monitorowania, sterowania i eksploatacji obiektów i procesów w inżynierii środowiska*, (w opracowaniu)
- [23] Zakrzewski P., *Algorytmy zintegrowanego sterowania procesem oczyszczania ścieków metodą osadu czynnego* (Rozprawa doktorska), Wydział Informatyki i Zarządzania Politechniki Poznańskiej, Poznań 2005 r.