

Andrzej URBANIAK

Instytut Informatyki
Politechnika Poznańska
Poznań

INTELIĞENTNE SYSTEMY W WODOCIĄGACH I KANALIZACJI

INTELLIGENT SYSTEMS IN WATERWORKS AND SEWERAGE

In the paper there is presented the application of the artificial intelligence (AI) methods in the water supply and wastewater treatment systems. At the beginning there is a short history of intelligent systems' development in the light of future vision of waterworks and sewage systems. There is characterized the utilization of artificial intelligence in the fields of sensors, actuators and control algorithms. There is briefly collected the review of intelligent methods' application in the sanitary engineering (i.e. fuzzy control and artificial neural networks). Also, there are described the decision support systems (DSS) for water treatment and wastewater treatment plants operators, where the construction rules are developed using knowledge based systems and expert systems.

1. Wprowadzenie

Według Newella i Olssona w 2025 roku będziemy mieli do czynienia z tak zwanym systemem wodnym, który będzie obejmował łącznie system zaopatrzenia w wodę pitną oraz dla celów sanitarnych jak również system odprowadzania i unieszkodliwiania wód zużytych [20]. Można przewidywać, że system wodny będzie charakteryzował się specyficznymi cechami, różniącymi go od współczesnych systemów zaopatrzenia w wodę i oczyszczania ścieków. Można przewidywać, że będzie to system *holistyczny*, w którym szeroko rozumiane wodociągi i kanalizacja stanowią jedną całość. Inną cechą będzie *pełny zwrot kosztów* systemu. Oznacza to, że użytkownicy wody będą pokrywać pełny koszt produktu, który otrzymają. Nie przewiduje się żadnego subsydiowania kosztów użytkowania wody. Przewidywany niedobór surowej wody spowoduje stosowanie *systemów zamkniętych*. Wystąpi pełny recykling wody zużytej. W zakresie eksploatacji przewiduje się *pracę systemu bez ciągłego nadzoru*. Kontrola pracy systemu będzie realizowana poprzez systemy monitorowania i sterowania z dowolnego miejsca z przenośnego komputera pracującego w sieci bezprzewodowej. *Czynności obsługowe wykonywane będą okresowo*, np. co tydzień, w celu napraw bieżących. Nad

jakością pracy systemu będzie czuwał zespół mający pod swoją opieką kilka lub kilkanaście obiektów. **Kontrola jakości** będzie zatem realizowana przez wykwalifikowany, specjalizowany zespół. Obiekty systemu będą **zarządzane w scentralizowany sposób**. Informacje o systemie i stanach obiektów systemu będą możliwe do uzyskania poprzez ogólnodostępną sieć komputerową, natomiast zarządzanie możliwe będzie z jednego miejsca i **decyzje mogą być w pełni scentralizowane**.

Oczywiście, jak każda wizja może się sprawdzić w pełni lub w niewielkim stopniu, jednakże nie sposób oprzeć się wrażeniu, że jest ona możliwa. Warunkiem realizacji systemu o opisanych powyżej cechach jest rozwój pokrewnych dyscyplin naukowych związanych w szczególności z zastosowaniami teleinformatyki i telesterowania. Dziedziny te łączą w sobie osiągnięcia informatyki i teorii sterowania oraz nowe możliwości transmisji informacji, głównie bezprzewodowej.

Obserwowany współcześnie intensywny rozwój tych dziedzin prowadzi do powstania systemów sterowania i nadzoru nowej generacji, określanej najczęściej mianem systemów inteligentnych.

2. Systemy inteligentne

Powstanie nowych sposobów komunikowania oraz możliwości przesyłania olbrzymich ilości informacji na dowolne odległości spowodowało konieczność poszukiwania nowych sposobów przetwarzania informacji. Z jednej strony obserwuje się niezwykłą szybkość komputerów w zakresie przetwarzania informacji liczbowych, a z drugiej zaś strony ich wręcz nieudolność w kojarzeniu faktów, oceny obrazów i w syntetyzowaniu wniosków. Wymienione niedogodności próbuje się rozwiązywać stosując sposoby zapożyczone z obserwacji świata ożywionego, przyrody a w szczególności człowieka. Nowe odkrycia nauk biologicznych i medycyny wyjaśniających coraz dokładniej procesy zachodzące w przyrodzie, począwszy od prostych (podziały komórek, procesy chemiczne i organiczne) do najbardziej złożonych (procesy genetyczne i procesy myślowe u człowieka), zaowocowały próbami tworzenia komputerowych modeli tych procesów. Na tym gruncie rodzą się zagadnienia, które określa się mianem sztucznej inteligencji. Początków sztucznej inteligencji można się doszukiwać bardzo wcześnie szczególnie jeśli zaliczyć do nich wszelkie próby automatyzacji procesów myślowych człowieka [6]. W tym kontekście, formalny opis procesów myślowych znaleźć można u myślicieli greckich Sokratesa, Platona i Arystotelesa. Natomiast próby zbudowania pierwszej myślącej maszyny pojawiają się w wieku XIX. Związane one były z osiągnięciami mechaniki klasycznej. Pierwszy mechaniczny komputer zaprojektował Charles Babbage w 1834 roku i nazwał go silnikiem analitycznym. W zaproponowanej strukturze znalazły się takie znane dziś elementy jak pamięć (ang.: store) oraz procesor nazwany przez Babbage'a młynem (ang.: mill). W swoim rozwiązaniu zaproponował koncepcję wykonywania serii operacji kodowanych na dziurkowanych kartach. Współpracownica Babbage'a Ada Lovelace (nota bene: córka poety Lorda Bayrona) opracowała programy dla tej maszyny i stąd też można ją uważać za pierwszą historycznie programistkę. Projekt Babbage'a nie doczekał się jednakże realizacji technicznej.

Istotnym krokiem w kierunku formalizacji i rozwoju opisu procesów myślowych były osiągnięcia George'a Boole'a twórcy logiki obliczeniowej i symbolicznej. Wprowadzony przez niego rachunek operatorów logicznych został rozbudowany przez Got-

łoba Frege o tzw. rachunek predykatów. Na tej podstawie opracowano już w XX wieku język PROLOG powszechnie używany w dziedzinie sztucznej inteligencji.

Sztuczna inteligencja znalazła nowe impulsy z chwilą powstania elektronicznych maszyn liczących w okresie II wojny światowej oraz po jej zakończeniu. 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.: 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.

Wprowadzone przez Boole'a reguły logiki okazały się zbyt „ostre” do opisu rzeczywistych sytuacji decyzyjnych stąd też nowym impulsem dla rozwoju sztucznej inteligencji stało się opracowanie tzw. logik alternatywnych lub wielowartościowych. Niezwykle istotnym elementem tych badań było wprowadzenie przez L. Zadeha teorii zbiorów rozmytych i powiązanej z nią logiki rozmytej (ang.: fuzzy logic). Najwięcej aplikacji wykorzystującej logikę rozmytą obserwuje się w dziedzinie diagnostyki (zarówno medycznej jak i urządzeń technicznych) oraz interpretacji złożonych struktur (np. obrazów oraz mowy).

Metody sztucznej inteligencji znalazły również szerokie zastosowanie w dziedzinie sterowania. Dotyczy to zarówno urządzeń automatyki (inteligentne czujniki i urządzenia wykonawcze) jak również w jeszcze większym stopniu w algorytmach sterowania.

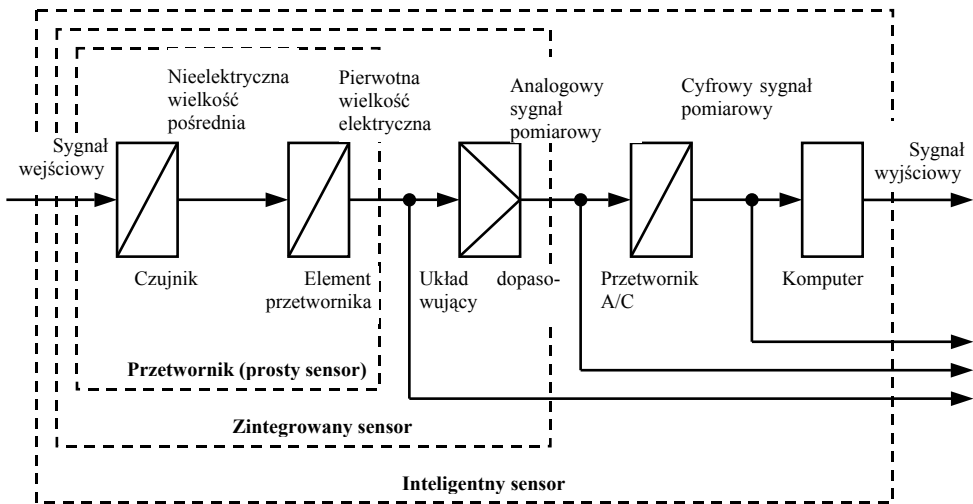
3. „Inteligencja” w wodociągach i kanalizacji

3.1. Inteligentne systemy pomiarowe

Skuteczna automatyzacja procesu wymaga dobrze zaprojektowanego systemu zbierania danych. Dotyczy to w równym stopniu monitorowania procesów i obiektów. Źródłem informacji o stanie obiektu są czujniki i przetworniki pomiarowe (sensory). Ogólnie można funkcje pomiarowe opisać jako przyporządkowanie zmian użytecznego sygnału elektrycznego analizowanej wielkości fizycznej. Czujnik pomiarowy stanowi nieodzowny element każdego układu regulacji, pozwala bowiem na uzyskanie informacji o stanie obiektu (procesu) niezbędnej do podjęcia właściwej decyzji odnośnie do dalszych losów obiektu. Pomiar interesującej nas wielkości fizycznej może stanowić istotny problem, szczególnie gdy istnieje konieczność wielostopniowego przekształcania

wielkości mierzonej na szereg wielkości pośrednich zanim uzyskamy pożądany sygnał elektryczny. Niezwykle rzadko udaje się zrealizować to przyporządkowanie w „jednym kroku”, to znaczy za pomocą urządzenia bezpośrednio wiążącego analizowaną wielkość fizyczną z elektryczną wielkością wyjściową. Najczęściej dokonuje się tej operacji w dwóch krokach. Pierwszy polega na związaniu badanej wielkości fizycznej z inną wielkością fizyczną (łatwą do dalszego przetwarzania), a następnie uzyskaną wielkość fizyczną przetwarza się na sygnał elektryczny. Kolejne etapy przekształcania sygnału pomiarowego podano na rys.1 [11]. Powyższe rozróżnienie wprowadza funkcjonalny podział na element zwany czujnikiem i przetwornikiem. Konstrukcje czujników oparte są na wykorzystaniu różnych zjawisk fizycznych, często opisywanych za pomocą złożonych formuł matematycznych. Szereg tych zależności było znanych fizykom od dawna, lecz ich złożoność nie pozwalała na efektywne ich wykorzystanie. Możliwości obliczeniowe jakie daje dziś informatyka (a ściślej mikroinformatyka) pozwalają na skuteczne wykorzystanie tych zjawisk w układach technicznych. Powstała nowa generacja sensorów zwanych inteligentnymi ze względu na wykorzystane w nich informatyczne narzędzia [27,28].

Stopień automatyzacji pośrednich elementów przekształcania sygnału określa poziom integracji urządzenia pomiarowego, począwszy od prostego sensora do czujnika inteligentnego.



Rys. 1. Schemat inteligentnego sensora

Fig. 1. Scheme of intelligent sensor

Niezależnie od stopnia integracji, stawia się sensorom określone wymagania, do których należą [11]:

- jednoznaczne odwzorowanie wielkości wejściowej,

- wyłączna zależność wielkości wyjściowej od wielkości wejściowej,
- pomijalnie małe oddziaływanie zwrotne,
- liniowość,
- nieczułość na zakłócenia,
- normalizacja sygnału wyjściowego,
- zasilanie energią elektryczną,
- samodiagnostyka.

Obecnie producenci oferują bardzo różnorodny zestaw urządzeń, w praktyce umożliwiający efektywny pomiar niemal wszystkich wielkości fizycznych niezbędnych do sterowania procesami.

Dzięki technice mikroprocesorowej szeroko rozwijają się czujniki i przetworniki pomiarowe oparte na technice ultradźwiękowej. Dodatkową pożądaną cechą tych urządzeń jest ich bezinwazyjność, czyli brak ingerencji w badany ośrodek i praktycznie zerowa zmiana energii badanego ośrodka (pomijalnie oddziaływanie zwrotne). Zbliżamy się zatem do koncepcji pomiaru idealnego – bezenergetycznego, w którym uzyskanie informacji nie wymaga nakładu dodatkowej energii.

Nowym nurtem rozwiązań stosowanych w technice automatycznych pomiarów dla celów monitorowania i sterowania jest wykorzystanie specjalizowanych układów mikroprocesorowych „wbudowanych” w urządzenia pomiarowe [43].

Systemy wbudowane to komponenty łączące w sobie sprzęt i oprogramowanie, zaprojektowane w celu nadania urządzeniom pożądaných cech funkcjonalnych. Znajdują zastosowanie prawie w każdej dziedzinie naszego życia. Choć większość z nich jest na tyle uniwersalna, że znajduje zastosowanie w kilku z nich to inne są bardziej wyspecjalizowane. Występują w takich urządzeniach jak: pralka, radio, ekspres do kawy, samochód, telewizor i wiele innych [12].

Wykorzystanie systemów wbudowanych w technice pomiarowej doprowadziło do powstania nowej generacji urządzeń pomiarowych (sensorów), w których wbudowany procesor realizuje wszystkie (a przynajmniej większość!) funkcje wstępnej obróbki sygnału. Sygnał uzyskiwany na wyjściu takiego sensora posiada pożądanę przez projektanta cechy umożliwiające wykorzystanie go w złożonych układach monitorowania i sterowania. W rozbudowanej sieci pomiarów istnieje konieczność zorganizowania komunikacji pomiędzy poszczególnymi sensorami i regulatorami. Niezwykle przydatne w takich systemach są techniki komunikacji bezprzewodowej [14,15]. Urządzenia pomiarowe wyposażone w mikroprocesory stanowią inteligentne węzły sieci komunikacyjnej, dla której opracowano efektywne standardy komunikacji zarówno na małe jak i duże odległości [14,15].

Przykłady wykorzystania systemów wbudowanych w pomiarach wielkości fizykochemicznych w systemach wodociągowych i kanalizacyjnych zaprezentowano w pracach [8, 19, 21, 28, 43]

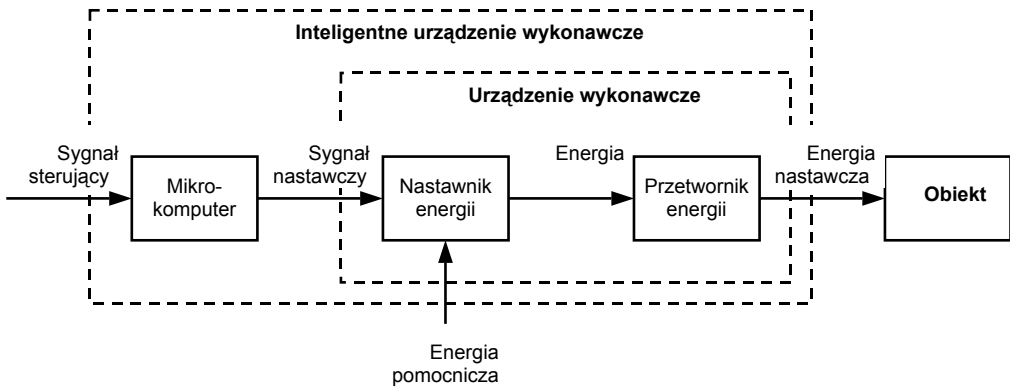
3.2. Inteligentne urządzenia wykonawcze

Całościowa ocena jakości procesu sterowania wymaga nie tylko dobrej informacji pomiarowej ale również efektywnego sposobu wyprowadzenia wyznaczonych sygnałów sterujących do zmiany stanu obiektu lub procesu. Podobnie jak w przypadku elementów pomiarowych można mówić o inteligentnych urządzeniach wykonawczych [21, 27].

Urządzenia wykonawcze (actuators) są niezwykle ważnymi elementami sterowania, zastępują bowiem człowieka przy wykonywaniu uciążliwych czynności umożliwiając zastosowanie dużo większych mocy bez narażania człowieka na działania niebezpieczne i ryzykowne. Struktura typowego urządzenia wykonawczego oraz jego specyficzna rozbudowa umożliwiająca konstrukcję inteligentnego urządzenia wykonawczego pokazana została na rys. 2. Wykonanie określonej akcji przez urządzenie wykonawcze jest możliwe poprzez dostarczenie do układu dodatkowej energii. Energia ta po przetworzeniu może być wykorzystana do efektywnego oddziaływania na obiekt w celu zmiany jego stanu fizycznego zgodnie z sygnałem sterującym.

Realizowane układy sterowania w różnych środowiskach technicznych (mechaniczne, elektryczne, hydrauliczne, pneumatyczne) implikują różnorodność stosowanych urządzeń wykonawczych.

Podobnie jak to ma miejsce w przypadku sensorów, tak i w zakresie urządzeń wykonawczych mamy do czynienia z niezwykle bogatą ofertą.



Rys. 2. Schemat inteligentnego urządzenia wykonawczego

Fig.2. Scheme of intelligent actuator

Układy sterowania coraz częściej zawierają w swojej strukturze procedury optymalizujące oparte na systemie eksperckim wykorzystującym metody sztucznej inteligencji. Zastosowanie tych systemów przedstawiono w pracach [5, 18, 22, 24, 26]. Postęp w rozwoju metod sterowania pozwala obecnie zastosować technikę sterowania rozmytego w odniesieniu do bardzo skomplikowanych procesów, również w zakresie ochrony środowiska [32, 33, 34]. W dalszej części posłużono się przykładami związanymi z uzdatnianiem wody pitnej i oczyszczaniem ścieków, jako typowymi zastosowaniami nowoczesnej techniki sterowania procesami, jakością produktów i poborem energii, związanymi jednocześnie z naturalnym środowiskiem człowieka [31].

3.3. Inteligentne systemy sterowania

Strukturę logiczną układu sterowania projektuje się w taki sposób, że obsługa oczyszczalni [stacji uzdatniania] może wpływać na przebieg sterowania procesem przez zmianę wartości zadanych oraz zmianę stanu pracy urządzeń instalacji w dowolnym stadium procesu. Taki sposób postępowania jest stosowany zarówno dla tradycyjnych układów automatyki jak i dla układów zawierających regulator rozmyty (FKBC - Fuzzy Knowledge Base Controller). W tym drugim przypadku, obsługa chętniej akceptuje wymagania urządzeń automatyki ponieważ podanie nastaw jako wartości rozmytych odpowiada operatorowi bardziej niż podawanie konkretnej wartości jakiej wymaga np. tradycyjny regulator PID dla określenia stałej całkowania T_i albo czasu wyprzedzenia T_D .

Wybrane procesy oczyszczania mogą być zrealizowane przez sterownik PLC, który spełnia funkcje regulatora sekwencyjnego [9,13]. Istotnym parametrem każdej stacji SUW i SOŚ jest retencja, zależna od przyjętych rozwiązań technologicznych i sposobu sterowania. Zagadnienie sterowania natężeniem przepływu przez dławienie i zmienną wydajność pompy zostało omówione w pracy [10] w odniesieniu do sieci wodociągowej na terenie wiejskim. Przystosowanie wydajności stacji pomp do zmiennego rozbioru wody, przez optymalne sterowanie zespołem pomp w SUW omawia praca [1].

Kompleksowe ujęcie sterowania zapewniające optymalną jakość wody w zmiennych warunkach narzuconych przez wymagania użytkowników stanowi zadania systemu zarządzania przedsiębiorstwem. Propozycje opartą na zastosowaniu metody programowania z ograniczeniami (constraint programming) do wspomaganie decyzji menedżera przedstawiono w pracy [2].

Rozbudowane układy sterowania procesami oczyszczania ścieków wykorzystujące metody sterowania predykcyjnego zaproponowano w pracy [3]. Wprowadzona hierarchiczna struktura systemu sterowania pozwoliła na modernizację istniejącego rozwiązania bez konieczności rezygnacji z działającego tradycyjnego systemu sterowania opartego na sterownikach logicznych PLC.

W pracy [25] przedstawiono koncepcję automatycznego sterowania procesem uzdatniania wody za pomocą sterowników PLC pracujących w sieci. Operacje technologiczne mogą się zmieniać w zależności od potrzeb badawczych. Urządzenia wykonawcze przypisano do sekcji sterowanych lokalnie i nadrzędnie.

Reakcja operatora stacji oczyszczania ścieków (SOŚ) jest wspomagana przez zaproponowany system doradczy wykorzystujący dostępne instrumentarium informatyki: modelowanie dynamiki procesów, symulowanie i sztuczną inteligencję [17]. Struktura omawianego systemu pozwala optymalnie prowadzić procesy w SOŚ. W pracy omówiono podstawowe moduły oprogramowania i zakres spełnianych przez nie funkcji.

Pilotowy system opracowany dla potrzeb projektowania i eksploatacji sieci wodociągowej, opisanej w pracach [37, 38] zawiera moduły: mapy numerycznej sieci, modelu hydraulicznego, monitorowania sieci i programu optymalizacji jednokryterialnej. Branżowa Baza Danych stanowiąca element GIS jest źródłem danych niezbędnych do uzyskania optymalnego, w danych warunkach, rozwiązania.

Technika wykorzystania drzewa uszkodzeń [44] do opisu zachowania się badanego systemu pochodzi z lat 60 -tych. Jest efektywna w zastosowaniu do obliczania wskaźnika niezawodności analizowanych systemów złożonych, tym samym może stanowić moduł badający stan wydajności systemu wodociągowego.

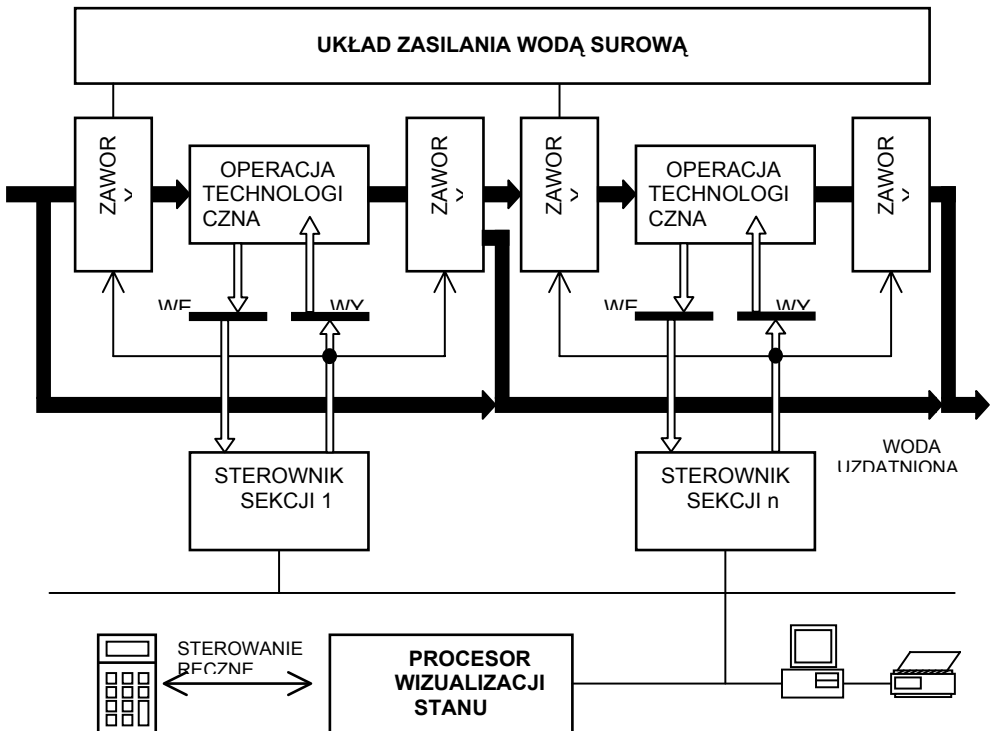
W pracy [22] opisano możliwość zastosowania systemu eksperckiego opartego na bazie wiedzy (KBS - Knowledge Base System), analizie znanych przypadków (CBR

Case Base Recognition), inteligentnych bazach danych (IDBS - Intelligent Data Base System) oraz sieci neuronowych (ANN - Artificial Neural Network).

Prognozowanie zapotrzebowania na wodę, istotne dla wyprzedzającego działania układów automatyki optymalizujących pracę sieci wodociągowej jest przedmiotem rozważań w pracach [23, 24].

Zastosowanie zbiorów rozmytych coraz częściej wspiera tradycyjne techniki sterowania procesów [45]. Proces „rozmywania” (fuzzyfication), będący istotą działania układów z logiką rozmytą, został uzupełniony przez procedury „precyzowania” (defuzzyfication). Problemy zastosowania tych narzędzi w technice regulacji opisuje praca [4]. W odniesieniu do sterowania procesami w SOŚ i SUW pewne zastosowania logiki rozmytej opisano w pracach [31, 34].

Sterowanie procesem w SUW zaprezentowane w pracy [25] jest przykładem zastosowania współczesnych technik kompleksowej automatyzacji. Strukturę sterowania przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Ogólna struktura systemu sterowania procesem uzdatniania wody

Fig. 3. General control system structure of water treatment process

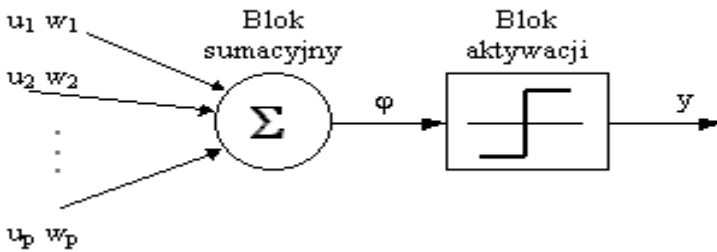
Metody sztucznej inteligencji [5, 39] w połączeniu z logiką rozmytą [4, 45], zastosowane do sterowania procesami uzdatniania wody, pozwalają realizować wielokryterialną optymalizację pracy układów SUW.

Stosowanie techniki symulacji układów technologicznych oczyszczania ścieków jest przedmiotem pracy [7]. Wykorzystanie środowiska symulatora pozwala uprościć proces

przygotowania danych i interpretacji uzyskanych wyników. Podczas projektowania układów technologicznych i układów sterowania stosuje się uniwersalne języki symulacji, bądź opracowane dla danej klasy zagadnień. Przykładem może być symulacja procesów zachodzących w reaktorze podczas chemicznego podczyszczania ścieków. Zastosowanie środowiska symulacyjnego pozwoliło również opisać między innymi proces oczyszczania ścieków w zbiornikach części biologicznej. Technikę symulowania stosuje się również do badania procesów cząstkowych, np. strat ciśnienia na szybkim filtrze grawitacyjnym oraz całych systemów np. dystrybucji w systemie wodociągowym [7, 40]. Symulacja procesów w SUW i SOŚ jest przydatna również w procesie nauczania i treningu operatorów [26, 29, 30, 35, 36].

Odkrycie wiedzy o sposobie ludzkiego myślenia i rozpoznanie elementów realizujących ten proces doprowadziło do syntezy sztucznych sieci neuronowych [5,39].

W żywym organizmie impuls pobudzający przechodzi z aksonów jednej komórki do drugiej poprzez synapsy. W sieci neuronowej impuls dociera do neuronu (rys. 4) z wejść do niego połączonych i dalej przekazywany jest do kolejnego neuronu (albo wielu neuronów), przypisanego do kolejnej warstwy neuronów.



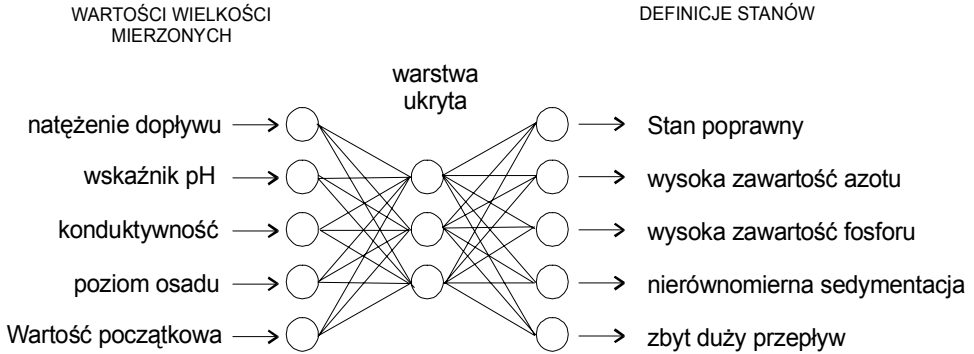
Rys. 4. Struktura pojedynczego neuronu

Fig. 4. Single neuron structure

Sygnal wyjściowy neuronu y jest sumą sygnałów wejściowych x_i , dodawanych z uwzględnieniem wag w_i . Wartości wag są wyznaczane w kolejnych iteracjach tzw. procesu uczenia sieci. W przypadku, kiedy nie są określone stany wejść albo ich suma jest większa od 1 dla danego zestawu wag (w j -tym kroku uczenia się sieci), wtedy na wyjście neuronu podawany jest sygnał $w_{p+1} = 1$ – nazywany sygnałem bias – podkładu. Proces uczenia się sieci neuronowej związany jest z doбором wag poszczególnych wejść pobudzających neuron.

Impulsy pobudzające, które są doprowadzone z wybranych wyjść warstwy poprzedniej stanowią sygnały wejściowe warstwy następnej. Każdy neuron wykonuje identyczną operację-przetwarza sygnały wejściowe na sygnał wyjściowy według określonej zależności funkcyjnej. Istnieje wiele możliwości budowy architektury sieci neuronowej, najczęściej wykorzystywaną strukturą w sterowaniu jest struktura zawierająca trzy warstwy neuronów: wejściową, ukrytą i wyjściową. Warstwa ukryta i wyjściowa realizują właściwy tok przetwarzania informacji.

Strukturę sieci neuronowej, którą można zastosować do opisu diagnostycznego stanu procesu technologicznego w oczyszczalni ścieków pokazano na rys. 5 [31].



Rys. 5. Struktura sieci neuronowej stosowanej do diagnozowania procesu technologicznego chemicznego podczyszczania ścieków

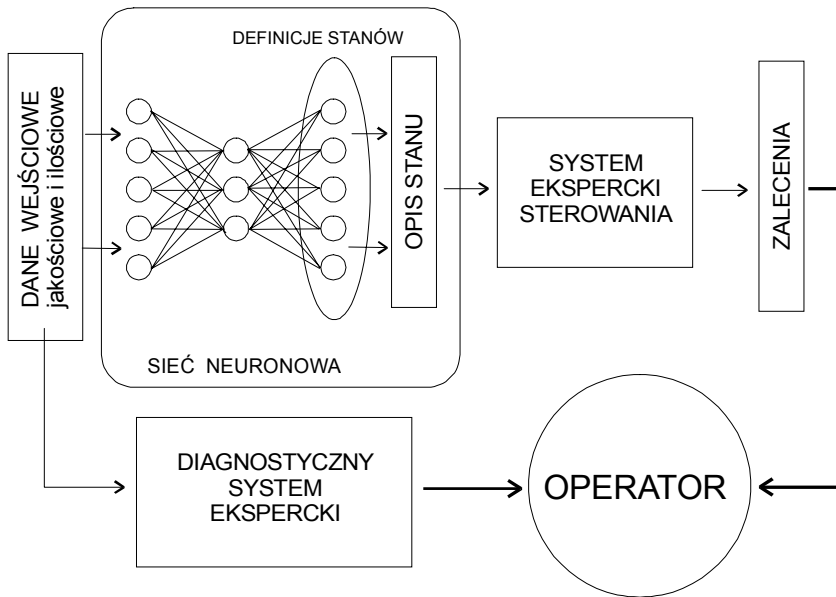
Fig. 5. Neural network structure for diagnosis of technological process of chemical sewage treatment

Wyniki pomiarów charakteryzujące jakość przebiegu procesu oczyszczania ścieków doprowadzone do warstwy wejściowej sieci neuronowej (rys.5) są przetwarzane w warstwie ukrytej. Rezultatem przetwarzania jest opis stanu procesu zdefiniowany w oparciu o stan obecny procesu i wiedzę zgromadzoną w minionym okresie obserwacji. Biorąc pod uwagę dynamikę procesu, można przewidzieć wartości skrajne, w tym również początkowe, stosowane w pierwszym okresie po uruchomieniu instalacji technologicznej. Jednak wprowadzanie wartości początkowych nie jest zawsze konieczne, ponieważ sieć neuronowa może „uczyć się” procesu w oparciu o wartości bieżące, bez wiedzy eksperta (operatora) instalacji oczyszczania.

Może się zdarzyć, iż pewna kombinacja wartości sygnałów wejściowych nie pozwoli określić żadnego z oczekiwanych stanów wejściowych. Problem ten wiąże się bezpośrednio z zagadnieniem uczenia się sieci neuronowej oraz współpracy sieci neuronowej z systemem eksperckim.

Zmiana wag oraz określone powiązania między neuronami pozwalają utworzyć strukturę, która jest zdolna do wygenerowania sygnału opisującego stan procesu, z uwzględnieniem zawczasu zdefiniowanych okoliczności (rys.5).

Architekturę systemu wspomagania decyzji operatora, którego częścią jest sztuczna sieć neuronowa identyfikująca stan procesu, przedstawiono na rys. 6. Struktura proponowanego systemu eksperckiego zawiera niezależne sieci neuronowe realizujące diagnostykę sterowanego systemu i wspomagające decyzje operatora.



Rys. 6. Struktura systemu eksperckiego wspomagającego proces sterowania stacją oczyszczania ścieków

Fig. 6. Expert system structure supporting control system for wastewater treatment plant

Operator stacji uzdatniania wody albo stacji oczyszczania ścieków jest wspomagany systemem komputerowym zawierającym w swej strukturze sieć neuronową oraz system ekspercki. Stanu procesu określony przez sieć neuronową stanowi zbiór danych wejściowych, które są analizowane przez system ekspercki układu sterowania. Niezależnie od analizy opartej na wiedzy eksperta prowadzona jest diagnostyka procesu również wykorzystująca bazę wiedzy eksperta, określoną na podstawie dotychczas gromadzonego doświadczenia. Oba tory analizy stanu procesu pozwalają operatorowi podjąć optymalną (w określonych warunkach) decyzję.

Połączenie niezależnych systemów eksperckich i sieci neuronowej stwarza system komputerowy zdolny do przejęcia sterowania w dowolnych warunkach (dowolnym stanie procesu) z jednym zastrzeżeniem – baza wiedzy musi obejmować analizowane zdarzenia. Częściowo wymaganie to spełnia wprowadzenie wartości początkowych do wszystkich warstw sieci neuronowej.

3.4. Systemy wspomaganie decyzji

Technologia oczyszczania ścieków zależy w istotny sposób od rodzaju i stężenia zanieczyszczeń występujących w wodach zużytych. Trudno zatem mówić o typowych procesach oczyszczania ścieków i typowych rozwiązaniach technologicznych. Szczególnie istotne różnice występują w przypadku ścieków powstających w różnych procesach przemysłowych. Rodzaje użytych surowców do produkcji oraz sposób ich przetwarzania mają decydujący wpływ na pozostałości poprodukcyjne, które najczęściej zbierane są w postaci ścieków lub rzadziej masy stałej. W nowoczesnych stacjach oczyszczania ścieków łączy się procesy biologicznego oczyszczania z procesami chemicznymi, co wymaga dokładnego sterowania tymi procesami

Różnorodność procesów oczyszczania wymaga wszechstronnego przygotowania obsługi do prowadzenia technologii oczyszczania i jest to najczęściej przygotowanie specjalistyczne do podjęcia zadań eksploatacyjnych w danej oczyszczalni. 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 w oczyszczalni ścieków. 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 umożliwienia 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 symulacyjnych modeli obiektów oczyszczalni ścieków.

Proces szkolenia operatorów można podzielić na dwa zasadnicze etapy [26, 29, 30, 35, 36]. W pierwszym etapie realizowane jest szkolenie operatorów w zakresie podstaw obsługi eksploatacyjnej oczyszczalni ścieków. Opracowany system komputerowego szkolenia operatorów wykorzystuje reguły nauczania programowane opracowane na początku 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 oczyszczalni ścieków. Oba nurty przygotowania operatora oczyszczalni ścieków wymagają opracowania modelu symulacyjnego obiektu oczyszczalni. 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.

W procesie szkolenia nie jest możliwe przetrenowanie wszystkich możliwych sytuacji eksploatacyjnych, stąd też powstaje konieczność wspomaganie decyzji operatora w trakcie realizacji procesu, na bieżąco.

Szerokie zastosowanie komputerów do sterowania procesami w oczyszczalniach ścieków daje możliwość ich wykorzystanie do innych celów niż tylko samo sterowanie procesami. Dynamika procesów występujących w oczyszczalniach ścieków powoduje niską czasową zajętość komputera, tym samym czas wolny może być wykorzystany na realizację innych procesów. Jednym z nich może być proces komputerowego wspomagania decyzji operatora. Możliwość jakie daje do dyspozycji współczesna informatyka skłaniają do zainteresowania się procesem szkolenia z wykorzystaniem komputerów, chociaż nie oznacza to eliminacji kontaktu z nauczycielem, który oprócz wiedzy prezentuje jeszcze określoną postawę i wzór dla uczestników szkolenia. Wykorzystanie komputerów w procesie szkolenia należy zatem uznać za kolejny przykład systemu wspomagania wybranych procesów, a nie konkurencji w stosunku do ludzkiej działalności decyzyjnej.

Uczenie i trenowanie operatorów w systemie OPTRAIN

Głównym celem treningu jest uzyskanie przez operatora umiejętności pewnego i precyzyjnego działania w stanach wymagających jego interwencji, pamiętając przy tym, iż złe ustawienie regulatorów, układów i elementów wykonawczych może doprowadzić do awarii, a w przypadku OŚ np. do zniszczenia złoza w sekcji oczyszczania biologicznego. Komputerowy system uczenia i trenowania (OPTRAIN) operatorów SUW i OŚ jest zaprojektowany do indywidualnego stosowania przez operatorów w celu przyswojenia wiedzy wynikającej z postępu technicznego i podniesienia swoich kwalifikacji [29, 30].

Opracowany system programów spełnia następujące wymagania:

- zapewnia przejrzysty i przyjazny sposób komunikacji użytkownika z komputerem,
- rozdziela dostęp ucznia-operatora i trenera (nauczyciela) do baz systemu,
- baza wiedzy jest zgodna z podręcznikiem operatora SUW/OŚ,
- proces nauki i trenowania jest realizowany dwustopniowo: I-nauka, II-test sprawdzający wiedzę,
- przerwadagowanie i aktualizacja baz jest możliwa w dowolnym momencie,
- budowa systemu jest modułowa, z czego wynika programowa możliwość zmian symulatora SUW/OŚ,
- pełna realizacja zarządzania sprawami administracyjnymi kursu operatorskiego.

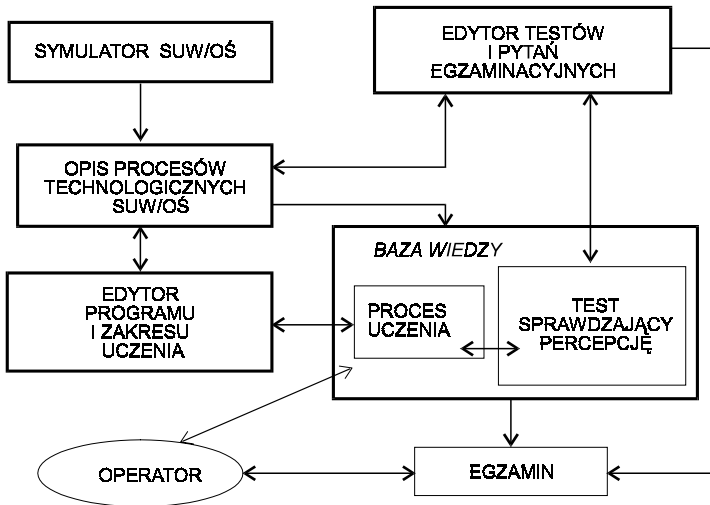
Kontrola wiedzy po danym etapie nauczania jest przeprowadzana w systemie OPTRAIN w oparciu o zestaw pytań generowany dla danego tematu i trenowanego operatora. Zestaw tworzony jest dynamicznie, po uwzględnieniu dotychczasowych odpowiedzi kursanta.

Celem takiego postępowania jest upewnienie się trenera o poprawności rozumowania w dziedzinach słabo opanowanych przez kursanta i jednocześnie istotnych dla jakości procesów w symulowanej stacji. Do realizacji takiego działania niezbędne jest wykorzystanie sztucznej inteligencji systemu rozpoznającego jakość odpowiedzi operatora [35, 36]. Jedną z możliwości realizacji tego zadania jest wykorzystanie sieci neuronowej do pozyskiwania wiedzy. Problem dotyczy zarówno wiedzy o procesie, którego tajniki poznać ma trenowany operator jak i bazy pytań oraz zagadnień kontrolujących przyswajanie wiedzy przez kursanta. Ponadto musi być odświeżana baza danych opisujących stan technologiczny symulowanej SUW/OŚ. Tak zdefiniowany zakres działania systemu OPTRAIN wymaga zastosowania oddzielnych narzędzi do tworzenia, konserwacji i modyfikacji systemu. Powiązania funkcjonalne elementów systemu pokazano na rys. 7.

Moduł zawierający bazę wiedzy jest podzielony na dwie części. W pierwszej (merytorycznej) zawarty jest opis wiedzy związanej z procesami technologicznymi i zasadami eksploatacji, w tym z procedurami sterowania. W drugiej części zawarte są pytania związane z zagadnieniami opisywanymi w części pierwszej. Podstawowy zakres materiału jaki jest opisany w części merytorycznej zawiera się w pozycji [46] stanowiącej kompendium wiedzy na temat OŚ.

Wykorzystanie systemu OPTRAIN do trenowania operatora możliwe jest dzięki wprowadzeniu interaktywnego symulatora OŚ/SUW jako elementu zmieniającego parametry ciągu technologicznego omawianej stacji [29]. Zdarzenia generowane przez symulator są omawiane przez uczestników szkolenia. Decyzje podjęte przez operatora powinny być zgodne z ze stanem wiedzy przyswojonej w danym etapie nauki (treningu). Konsekwencje podejmowanych decyzji są prezentowane i oceniane przez system komputerowego nauczania. Takich sytuacji może być wiele, mogą być generowane z uwzględnieniem specyfiki danej SUW/OŚ oraz powtarzane według określonego scenariusza, np. w celach porównawczych

Sieć neuronowa opracowana dla potrzeb szkolenia bazuje na danych historycznych uzyskanych z procesu, pozwalających opracować prognozę parametrów wyjściowych (ex post), podobnie jak czyni się to wykorzystując model procesu. Ta właściwość sieci jest wykorzystana do szkolenia z uwzględnieniem: bazy wiedzy, funkcji jakie spełnia sztuczna inteligencja w adaptacji nastaw regulatorów, techniki szkolenia i badania percepcji (testowania) oraz doświadczenia szkolonych operatorów.



Rys. 7. Struktura systemu komputerowego uczenia i trenowania operatora

Fig. 7. Computer learning and training systems' structure for operators

Decyzja podjęta przez system ekspertowy (rys. 7.) jest oceniana arbitralnie albo porównywana z modelem teoretycznym bądź danymi statystycznymi. Opracowanie wyniku następuje przy wykorzystaniu drzewa decyzyjnego wygenerowanego dla omawianego zdarzenia i parametrów procesu. W kolejnym etapie następuje przekształcenie drzewa w zbiór reguł opisujących algorytm rozwiązania postawionego problemu. Zastosowany w algorytmie mechanizm wnioskowania korzysta z bazy wiedzy i bazy danych wykorzystując operatory: *jeżeli to, w przeciwnym razie, oraz (i), albo, jest*.

Baza wiedzy opisująca procesy w SUW i OŚ

Baza wiedzy dla potrzeb systemu ucząco-treningowego zawiera bazę tekstów, bazę danych, zbiór reguł i mechanizm wnioskowania zdrowo-rozsądkowego. Struktura bazy tekstowej jest skonfigurowana w sposób zapewniający łatwość modyfikacji, wymiany treści oraz rozbudowy. Ostatni czynnik jest bardzo istotny ponieważ współczesne instalacje SUW i OŚ korzystają z nowości technicznych, które pojawiają się, wymuszając równoległe ich uwzględnianie zarówno w nowych projektach jak i podczas modernizacji. Oznacza to również, że obszar przeznaczony dla bazy tekstów nie jest ograniczony. Obszar bazy danych jest zdefiniowany, co wynika z ich specyfiki, zależnej od konfiguracji SUW/OŚ. Dla OŚ najistotniejsze są: model i wnioskowanie zdrowo-rozsądkowe.

Zbiór modeli zawiera opis matematyczny głównych stanów i interakcji procesów zachodzących w stacji. Jeżeli model istnieje, możliwa jest dzięki niemu prognoza wektora stanu w oparciu o aktualne dane, a także określenie możliwości dalszej pracy urządzeń w nowych okolicznościach. Dla systemu ekspertowego, stanowiącego integralną część omawianego systemu, możliwość pozyskiwania danych z modelu stanowi o jego przydatności dla gromadzenia nowej wiedzy o procesie. Bez tej możliwości system ekspertowy nie wygeneruje oryginalnej hipotezy, przydatnej w dalszym toku szkolenia. Wiedza zdrowo-rozsądkowa jest obecnie intensywnie badana przez wiele grup badaczy, ponieważ pozwala rozwiązać problem podstawowy – osiągnięcie diagnozy na drodze intuicyjnej (rutynowo), tak jak to czyni człowiek z bogatym doświadczeniem zawodowym. W procesie szkolenia operatorów SUW/OŚ czynnik ten ma fundamentalne znaczenie.

4. Podsumowanie

Niewątpliwym elementem przyszłościowego systemu wodociągowego i kanalizacyjnego jest wzrost znaczenia efektywnego wykorzystania wody jako produktu niezbędnego dla wszystkich form życia na ziemi, niezależnie od tego, w jakim kierunku rozwinię się proces integracji systemów zaopatrzenia w wodę i oczyszczania ścieków. W tym kontekście, przedstawiony w pracy skrótowy i arbitralny przegląd zastosowań metod sztucznej inteligencji w systemach wodociągowych i kanalizacyjnych pozwala sformułować ogólne uwagi istotne dla dalszego postępu w zakresie wykorzystania nowoczesnych metod informatycznych w tych systemach.

1. Intensywność rozwoju metod informatycznych i coraz szersze ich zastosowania w wielu dziedzinach działalności człowieka odnosi się również do systemów wodno-kanalizacyjnych. Wskazano w pracy na reprezentatywne przykłady zastosowań tych metod.

2. Wykorzystanie szerokiego spektrum narzędzi informatycznych pozwoliło w wielu przypadkach na uzyskanie efektywnych rozwiązań w odniesieniu do urządzeń pomiarowych, które wykorzystują znane teoretycznie i opisane wcześniej zjawiska fizyczne, lecz ich aplikacje nie były możliwe ze względu na dużą złożoność obliczeniową i sprzętową.
3. Unifikacja komunikacji między elementami sieci sensorów i urządzeń wykonawczych zapewnia niezawodną i kompletną wymianę informacji między nimi. Stanowi to podstawowy i niezbędny czynnik zwiększenia efektywności procesów technologicznych w systemach zaopatrzenia w wodę i oczyszczania ścieków.
4. Oprócz klasycznych algorytmów sterowania, szczególną uwagę zwraca się na algorytmy sterowania wykorzystujące elementy sztucznej inteligencji umożliwiające osiąganie lepszych wskaźników sterowania w warunkach niepełnej informacji o obiekcie sterowania oraz występujących zakłóceniach.
5. Obserwuje się liczne aplikacje komputerowych systemów wspomaganie decyzji operatorskich w realizacjach systemów monitorowania, sterowania i akwizycji danych (SCADA) w złożonych procesach technologicznych. W aplikacjach tych wykorzystuje się często rozwiązania stosowane w systemach eksperckich z bazą wiedzy.

Sformułowane powyższe uwagi nie pretendują do miana wyczerpującej listy istotnych cech zastosowań inteligentnych systemów w wodociągach i kanalizacji, mogą jedynie stanowić pewne odniesienie w przypadku poszukiwania nowych atrakcyjnych rozwiązań aplikacyjnych.

Wydaje się, że warto na koniec podkreślić istotny fakt stanowiący warunek konieczny efektywnej realizacji zaprezentowanych w pracy rozwiązań. Jest nim autentyczna i merytoryczna współpraca technologów procesów (specjalistów technologii wody i ścieków oraz sieci wodociągowych i kanalizacyjnych) z zespołami automatyków i informatyków. Pod pojęciem współpracy merytorycznej należy rozumieć fakt posiadania przez członków współpracujących zespołów podstawowej wiedzy dziedzinowej z zakresu partnerskiej dyscypliny. Może to być również postulat skierowany do warstwy edukacji, aby w procesie kształcenia specjalistów w zakresie wodociągów i kanalizacji uwzględniać treści związane z automatyką i informatyką, natomiast w kształceniu automatyków i informatyków umieścić treści dotyczące procesów technologicznych spotykanych w inżynierii środowiska. Tak przygotowane zespoły projektantów i technologów pozwolą na osiągnięcie efektu synergii, który jeszcze silniej wyupukli korzyści zastosowania współczesnych metod i narzędzi informatycznych w wodociągach i kanalizacji.

Bibliografia

- [1] Andrzejewski M., Tendencje rozwojowe urzędów firmy Grundfos zaopatrujących w wodę gospodarstwa indywidualne, w: *Zaopatrzenie w wodę miast i wsi*. Red. M. Sozański. Wyd. PZiITS Poznań, 1994, 737-745.
- [2] Brdyś M., Puta A., Chen K., Hopfgarten S., Operational control of integrated quality and quantity in water systems. In: *Large scale system: Theory and Applications* ed. by P.D. Roberts and J.E. Ellis, IFAC/IFORS/IMACS Symposium 2, 1995, 715-722.
- [3] Brdyś M., Ewald G., Sieć SSWN w oczyszczalni ścieków, *Wodociągi i kanalizacja*, nr 2/2008, 21-23
- [4] Driankov D., Palm R., (ed.) *Advances in fuzzy control*, Springer Verlag Comp, Heidelberg, 1998
- [5] Duch W., Korbicz J., Rutkowski L., Tadeusiewicz R., *Sieci Neuronowe*, Akad. Ofic. Wyd. Exit. Warszawa, 2000
- [6] Durkin J., History and application, in: *Expert systems*, C.T. Leondes (eds.), Academic Press, New York, 2000, 1-22
- [7] Gabrys H., Bargiela A., Simulation of water distribution systems. in: *Simulation Technology: Science and Art*. Editors: by Bargiela A. Kerckhoffs E. Publ. of Society for Computer Simulation International, 1998, 273-277.
- [8] Giera P., Urbaniak A., Zdalny mikroprocesorowy czujnik poziomu cieczy, w: *Water Supply and Water Quality*, Poznań – Zakopane, 2006, 445-452
- [9] Góra P., Sroczan E., Urbaniak A., Programmable Logic Control (PLC) for small water demineralisation plant, IFAC Symp. "Low Cost Automation LCA '92", Vienna, 1992, 305-310.
- [10] Grabarczyk Cz., Nowakowski J., Automatyizacja wiejskich stacji wodociągowych. W: *Zaopatrzenie w wodę miast i wsi*. Red. M. Sozański. Wyd. PZiITS Poznań, 1994, 692-716.
- [11] Heimann B., Gerth W., Popp K., *Mechatronika - Komponenty, metody, przykłady*, Wyd. Naukowe PWN, Warszawa, 2001
- [12] Juzwa M., Urbaniak A., Systemy wbudowane – nowy nurt kształcenia na kierunku informatyka, w: *Efektywność wdrażania technologii informatycznych*, A. Urbaniak (ed.), Wyd. PZiITS nr 842, Poznań 2005, (83-90), ISBN 83-60055-07-6
- [13] Klaus R. Sozański M., Sroczan E., Urbaniak A., Algorithms and PLC System for Fuzzy Control of Experimental Water Reprocessing Plant, 5th International Symposium on Methods and Models in Automation and Robotics. MMAR'98, Międzyzdroje 25-29 Aug. 1998,
- [14] Kubiak Z., Urbaniak A., Standardy komunikacji w systemach monitorowania, Materiały II Konferencji Naukowo-Technicznej PZiITS nt.: GIS modelowanie i monitoring w zarządzaniu systemami wodociągowymi i kanalizacyjnymi, Warszawa, 29 marca 2007, 127-144

- [15] Kubiak Z., Urbaniak A., Bezprzewodowy dostęp do urządzeń pomiarowych, w: Systemy czasu rzeczywistego - SCR'2005, P. Gaj (red.), Wyd. Komunikacji i łączności, Warszawa, 2005, 257 – 268
- [16] Nowak M., Urbaniak A., Rozproszone sterowanie i monitorowanie w systemach wodno-kanalizacyjnych, w: Water Supply and Water Quality, Poznań – Zakopane, 2006, 539-548
- [17] Oborzyński K., Integration of artificial intelligence methods for management and control of complex processes, PhD Dissertation, Poznań University of Technology, Poznań, 2003
- [18] Oborzyńska A., Oborzyński K., Urbaniak A., An integrated system for management and control wastewater treatment plants, IASTED Conference on Modelling and Simulation – MS'2000, Pittsburgh –PA (USA), 2000, 265-271.
- [19] Olsson G., et al., Measurements, data analysis and control methods in wastewater treatment plants - State of the art and future trends, Water Science and Technology 21, 1989, 1333-1345.
- [20] Olsson G., Newell B., Wastewater treatment Systems. Modelling, diagnosis and control, IWA Publishing, London, 1999
- [21] Olsson G., Piani G., Computer system for automation and control, Prentice Hall, London, 1990
- [22] Rodriguez M.J., Serodes J-B., 1996, Emergent Computing Technology Applied to the Water Supply Field: The Case of Artificial Intelligence (AI). w: Zaopatrzenie w wodę miast i wsi. M.M.Szoński. (ed.) Wyd. PZiITS Poznań. 211-224.
- [23] Siwoń Z., Cieżak W., Cieżak J., Użytkowe metody bieżącego prognozowania krótkotrwałego poboru wody w systemach wodociągowych, w: Water Supply and Water Quality – WODA, Poznań – Zakopane, 2006, 119-155
- [24] Słomiński T., Duzinkiewicz K., Kwiesielewicz M., Trawicki D., 1999, Analiza możliwości zastosowania sztucznych sieci neuronowych do prognozowania zapotrzebowania na wodę w miejskich sieciach wodociągowych. III Konf. Nauk-Techn. Technologia i automatyzacja systemów wodociągowych i kanalizacyjnych TiA-SWiK '99", Politechnika Gdańska.-Stawiska 23-25 czerwca 1999. 235-242.
- [25] Sozański M., Sroczan E., Urbaniak A., Automatyzacja badań w naukowo-doświadczalnej stacji uzdatniania wody. w: Zaopatrzenie w wodę miast i wsi, M.M.Szoński (ed.), Wyd. PZiITS Poznań, 1998, 33-42
- [26] Sozański M.M., Sroczan E.M., Urbaniak A., Application of AI methods in computerized system of training wastewater treatment plant operators, Proc. of 7th Speciality Conference on Environmental Engineering of CSCE, Victoria - BC, May 30 - June 3, 2001, (Kanada), CD-ROM, E-21
- [27] Sroczan E., Urbaniak A., Ultradźwiękowe pomiary przepływów wody i ścieków z wykorzystaniem przelewów niezatopionych. Materiały VII Ogólnopolskiej Konferencji Naukowo-Technicznej p.t.: *Energooszczędność w procesach gospodarki wodnej i ściekowej*, Białowieża, 6- 8 czerwca 1993, 147-159

- [28] Sroczan E., Urbaniak A., Nowe konstrukcje czujników do pomiaru wielkości fizykochemicznych wody w zakładach wodociągowych. W: *Zaopatrzenie w wodę miast i wsi*. Red. M. Sozański. Wyd. PZiITS Poznań, 1994, 347-360.
- [29] Sroczan E., Urbaniak A., Decision Support System for Operators Training of Wastewater Treatment Plant. In: *CSCE-ASCE Environmental Engineering Conf. Edmonton (Kanada)*, 1997, 1347-1355.
- [30] Sroczan E.M., Urbaniak A., Operators training of wastewater treatment plant, *Proc. of 10th European Simulation Simposium, Nottingham (Anglia), October 26-28, 1998*, (687-691)
- [31] Sroczan E., Urbaniak A., Sterowanie rozmyte w stacjach uzdatniania wody i oczyszczalniach ścieków. w: *Ochrona zasobów i jakości wód powierzchniowych i podziemnych*. Wyd. *Ekonomia i Środowisko*, Augustów 1999. *Mat. X Międzynar. Konf. Nauk.-Techn. "Problemy gospodarki wodno-ściekowej w regionach rolniczo-przemysłowych"* Augustów, 1999, 133-140.
- [32] Sroczan E., Urbaniak A., Komputerowe sterowanie procesami oczyszczania wody i ścieków, *Przegląd Komunalny*, 3, 2000, 91-94.
- [33] Sroczan E., Urbaniak A., Sterowanie procesami uzdatniania i dystrybucji oparte na logice rozmytej, w: *Zaopatrzenie w wodę, jakość i ochrona wód*, M. M. Sozański. (ed.), *IV Międzynar. Konf. "Zaopatrzenie w wodę, jakość i ochrona wód"* Kraków 11-13 września 2000, 951- 960.
- [34] Sroczan E., Urbaniak A., Simulation of fuzzy logic operation of water pre-processing and waste water treatment plant. In: *Simulation in Industry*. Ed. by: Moeller D. *Publ. of Society for Computer Simulation International*. 509-511, 2000
- [35] Sroczan E.M., A. Urbaniak, Komputerowy system trenowania operatorów stacji uzdatniania wody i oczyszczania ścieków bazujący na sztucznej inteligencji, *Zaopatrzenie wodę i jakość wód*, J.A.Oleszkiewicz, M.M. Sozański (eds.), Wyd. PZiITS, Gdańsk - Poznań, 2002 r. , 1003 - 1014
- [36] Sroczan E.M., Urbaniak A., P. Zakrzewski, Internetowy system szkolenia operatorów oczyszczalni ścieków , *Przegląd Komunalny*, nr 10/2002, Dodatek Specjalny - Narzędzia informatyczne w ochronie środowiska, (-)
- [37] Straubel R., Studziński J., Systemy komputerowe wspomaganie decyzji projektantów i operatorów sieci wodociągowych w Koenigswusterhausen i Rzeszowie. w: *Zaopatrzenie w wodę, jakość i ochrona wód*, ed. M. M. Sozański. *IV Międzynar. Konf. "Zaopatrzenie w wodę, jakość i ochrona wód"* Kraków 11-13 września 2000. *Supl.* 43-54.
- [38] Studziński J., Bogdan L., Control of wastewater treatment plants using neural networks for decision making and forecasting, in: *Simulation Technology: Science and Art*. Editors: by Bargiela A. Kerckhoffs E. *Publ. of Society for Computer Simulation International, Delft*, 1998, 633-637.
- [39] Tadeusiewicz R., *Sieci neuronowe*, Akademicka Oficyna Wydawnicza, Warszawa, 1993

- [40] Urbaniak A., Informatyczne narzędzia monitorowania i sterowania procesami oczyszczania ścieków. Konferencja Naukowo-techniczna, EKO-TECH, Poznań, luty 2005
- [41] Urbaniak A., Monitorowanie i sterowanie procesami wodociągowymi, *Wodociągi i Kanalizacja* 7/8, 2006, 36-39
- [42] Urbaniak A., Zakrzewski P., Monitorowanie i sterowanie w systemach kanalizacyjnych, *Wodociągi i Kanalizacja* 7/8, 2006, 39-41
- [43] Urbaniak A., Możliwości zastosowań systemów wbudowanych w inżynierii środowiska, *WODA'2006*
- [44] Wiczysty A., Kąpcia J., Ocena niezawodności systemów zaopatrzenia w wodę przy wykorzystaniu metody drzewa uszkodzeń. w: *Zaopatrzenie w wodę, jakość i ochrona wód*, ed. M. M. Sozański. IV Międzynar. Konf. "Zaopatrzenie w wodę, jakość i ochrona wód" Kraków 11-13 września 2000. 991-1001.
- [45] Zadeh L. A. , Fuzzy Sets as a Basis for Theory of Possibility. *Fuzzy Sets and Systems* 1, 1978, 3-28.
- [46] Poradnik eksploatatora oczyszczalni ścieków, Praca zbiorowa pod redakcją: Z. Dymaczewskiego, J. Oleszkiewicza, M. Sozańskiego, Wyd. PZITS Poznań – LEM Kraków, 1997