

**Adam RAK**

*Politechnika Opolska  
PM Ltd. Dublin/o we Wrocławiu*

## **PROGNOZOWANIE KRYTERIALNYCH WSKAŹNIKÓW JAKOŚCI WODY RETENCJONOWANEJ W ZBIORNIKU DLA POTRZEB ZAKŁADU UZDATNIANIA**

### **FORECASTING CRITICAL QUALITY INDICATORS OF THE WATER RETAINED AT THE RESERVOIR, KEPT FOR THE WATER TREATMENT PLANT'S PURPOSES**

*The article focuses on establishing availability of Sosnówka reservoir water, which is kept for consumption purposes. The reservoir resources supply raw water to the water treatment plant of 25000 m<sup>3</sup>/day capacity. There were 27 quality indicators of the water retained at the reservoir at its tributaries examined. The examinations led to a conclusion that the water was of a large variety within colour, turbidity and pH. The analysed water was of an aggressive and unsteady character.*

*Limit values of the critical water quality indicators were established upon examining of the technology system of the water treatment process. The acquired results of the analysis carried out in the latter conditions allowed for establishing optimal technology systems to use while the water treatment plants operates.*

*Use of a certain type of the technology system requires afore-forecasted information on critical quality indicators of the water. In order to assess it a model of neural network was established. It was the one of Flexible Bayesian Models type. The target variables applied to colour, turbidity, pH and water hardness whereas the 4 input variables concerned time, reservoir capacity, fall amount at the reservoir site and water temperature.*

*The established neural network model allows for complying at least 90% within the analysed indicators. The acquired results underlined the fact that the neural network may be also used within the environment engineering to forecast water quality indicators.*

## 1. Wprowadzenie

Procesy i systemy uzdatniania wody powierzchniowej klasyfikują się do systemów będących pod istotnym wpływem otoczenia. Szczególnie znaczący jest wpływ warunków klimatycznych i antropogenicznych na zmiany właściwości i składu wody. Dostarczenie informacji o jakości wody w zbiorniku retencyjnym umożliwia podjęcie decyzji związanych z użytkowaniem wody oraz sporządzenie strategii ochrony zasobów wodnych. Ma to szczególne znaczenie w przypadku wód pochodzących z niewielkich zlewni górskich. Stąd coraz istotniejszą rolę odgrywać będzie prognozowanie zmian składu jakościowego wody, jako informacji niezbędnych do projektowania i eksploatacji obiektów gospodarki wodnej i współczesnych zakładów wodociągowych.

Dyspozycyjne zasoby wód stanowią różnicę pomiędzy zasobami całkowitymi a zasobami nienaruszalnymi wyznaczonymi według kryterium biologicznego. W ujęciu klasycznym zasoby wody dyspozycyjne ( $Z_d$ ) dla danego przekroju są funkcją przepływu i czasu:  $Z_d = f(Q,t)$ . W przypadku określenia zasobów wodnych z uwzględnieniem jakości wody, do ich wyznaczania dodatkowo niezbędne są dane dotyczące zmienności jakości wody wielu wskaźników w rozpatrywanym przekroju rzeki. Bartoszewski [1], sformułował następującą definicję zasobów wodnych z uwzględnieniem jakości: „Zasoby wody z uwzględnieniem jakości  $Z_d(S_d)$ , to taka objętość wody, którą można wykorzystać w określonym miejscu i czasie przy założeniu, że ujmowana woda zawierać będzie zanieczyszczenia w wielkości mniejszej od wymaganej przez użytkownika”. Uwzględniając jakość wody, zasoby dyspozycyjne będą dodatkowo funkcją stężenia zanieczyszczeń:  $Z_d(S_d) = f(Q,t,S)$ . W rzeczywistości w celu określenia właściwej technologii uzdatniania wody musimy dysponować pomiarami  $n$  wskaźników. Tym samym będziemy dysponować  $n$  zależnościami  $S=f(Q,t)$ . Wyznaczając dla każdego wskaźnika zasób dyspozycyjny otrzymujemy zbiór  $n$  wartości  $Z_d(S_d)$ . Wartość minimalna  $Z_d(S_d)$  z tego zbioru określa miarodajną wartość zasobu dyspozycyjnego danego przekroju.

Z punktu widzenia operatora zarządzającego systemem oczyszczania i dystrybucją wodą istotna jest nie tylko jakość wody dostarczaj użytkownikowi, ale także wysokość kosztów operacyjnych funkcjonowania tego systemu. Wysokość kosztów operacyjnych zarządzania i oczyszczania systemem zależeć będzie od konfiguracji układu technologicznego, który ma gwarantować oczekiwaną jakość wody z punktu widzenia jej przeznaczenia przy określonych parametrach wody surowej poddawanej uzdatnieniu. W zależności od czasu trwania określonych parametrów jakościowych wody surowej wybrany układ technologiczny generował będzie określone koszty operacyjne uzdatniania.

Coraz szersze zastosowanie sztucznych sieci neuronowych (SSN) w badaniach i analizach procesów jednostkowych i technologicznych związanych z gospodarką wodną, uzdatnieniem i dystrybucją wody było powodem badania możliwości ich zastosowania przy prognozowaniu jakości wody i projektowania modelu umożliwiającego takie prognozowanie. Siwoń i Łomotowski [2] dokonując przeglądu badań gdzie zastosowano SSN wskazali, że pierwsze zastosowanie SSN dla potrzeb modelowania i prognozowania funkcjonowania sieci wodociągowej datuje się od początku lat 90 zeszłego stulecia. SSN znalazły zastosowanie do prognozowania zapotrzebowania wody. Wiele prac dotyczyło analizy, czy SSN sprawdzają się w modelowaniu i prognozowaniu rozbiorów, sprzedaży i produkcji wody. Podobne analizy wykorzystania SSN w prognozowaniu zapotrzebowania wody prowadził Bardossy z współpracownikami [3]. Dodatkowo badacze opracowali oprogramowanie VISIT (*Variable Input Spread Inference Training*), które automatycznie testuje (uczy) przyjęty model SSN.

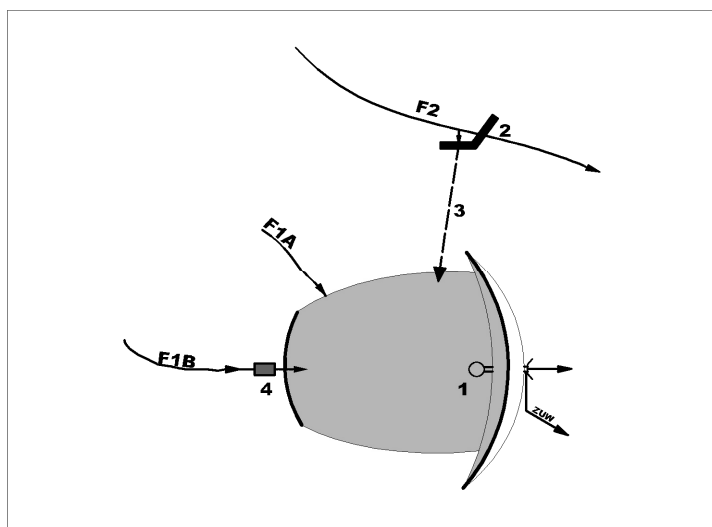
SSN znalazły zastosowanie także do ustalania niezbędnych dawek chloru do wody w dużych systemach wodociągowych oraz prognozowania stężeń chloru pozostałego. Wykorzystanie SSN do określenia pozostałości stężenia chloru w sieciach wodociągowych analizował także Koo z współpracownikami [4]. Sporządzono model SNN na którym analizowano pięć scenariuszy zużycia chloru w zależności od dawki chloru dozowanej do sytemu wodociągowego tak, aby osiągnąć zmniejszenie chloru pozostałego do  $0,2 \text{ mgCl}_2 \cdot \text{dm}^{-3}$ .

W ostatnich latach SSN wprowadza się także do zagadnień eksploatacji wodociągów. Tendencja ta jest widoczna nie tylko w fachowej literaturze zagranicznej [5,6,7], ale także coraz wyraźniej w badaniach krajowych. Przykładowo Sroczan i Urbaniak [8] oraz Zimoch i Kłos [9] sugerują szerokie wykorzystanie SSN w monitoringu, sterowaniu i eksploatacji systemów zaopatrzenia w wodę i ochrony wód. Natomiast Dawidowicz [10] przeprowadził liczne eksperymenty numeryczne weryfikujące możliwość stosowania SSN do oceny średnic przewodów w sieci wodociągowej oraz do obliczeń hydraulicznych. Licznar i Łomotowski [11] osiągnęli bardzo dobre wyniki prognozowania dobowych rozbiórów wody w skali dużego wodociągu przy wykorzystaniu technik SSN różnego typu. Natomiast w pracy [12], autorzy przedstawili wyniki badań z zastosowania SSN w prognozowaniu zużycia koagulantu w procesie uzdatniania wody powierzchniowej. Zaprojektowano model, który pozwolił na określenie optymalnej dawki koagulantu w zależności od parametrów wody surowej. Prototyp modelu został wdrożony na pełną skalę uzdatniania wody w jednym z zakładów we Francji. Z kolei Cougnaud [13] wykorzystał SSN do opracowania prognozy zdolności absorpcyjnej węgla aktywnego w zależności od stężenia pestycydów w wodzie. Zbudowany model sieci neuronowych pozwolił określić związki pomiędzy właściwościami węgla aktywnego a wielkością adsorpcji pestycydów. W warunkach eksploatacyjnych prowadzonego procesu uzdatniania ustalono wzajemną zależność stężenia pestycydów, prędkości i czasu filtracji. Otrzymano wyniki przy wysokiej zgodności,  $R^2 = 0,985$ . SSN zostały wykorzystane także do określenia maksymalnego skażenia wody. Brion i Lingireddy, w pracy [14] wykazali, że SNN mogą być pożyteczne do badania zmian mikrobiologicznych wody. Zastosowanie modelowania z wykorzystaniem SSN, pozwoliło na poznanie najwyższego skażenia mikrobiologicznego wody z dokładnością ponad 90%. Gavin z współpracownikami [15], wykorzystali SNN do modelowania zasobów wodnych. Sieci neuronowe wykorzystano do prognozowania zasolenia rzek w południowej Australii. Ustalono prognozę zasolenia z 14-dniowym wyprzedzeniem przy użyciu modelu liniowego. Natomiast Strugholtz [16] wykorzystał sieci neuronowe do badania procesu uzdatniania wody w zależności od jakości wody surowej oraz rodzaju operacji technologicznych. Zastosowanie sieci neuronowych pozwoliło na optymalizację procesu technologicznego oraz do prognozowania przebiegu procesu uzdatniania wody. Sieci pozwoliły na ustalenie parametrów filtracji oraz optymalizowanie dawek reagentów prowadząc do obniżenia kosztów operacyjnych o 15%.

## 2. Charakterystyka obiektu badawczego, metodyka badań

### 2.1. Charakterystyka obiektu

Dla celów zaopatrzenia w wodę miasta Jelenia Góra w latach dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku wykonano zbiornik zaporowy „Sosnówka”. Zasoby wodne zbiornika są źródłem wody surowej dla zakładu uzdatniania wody (ZUW). Zbiornik „Sosnówka” retencjonuje wody zlewni potoku Czerwonka i Sośniak i jego niewielkiego dopływu Sosnówka o łącznej powierzchni zlewni 15,3 km<sup>2</sup>. Przepływ potoku Czerwonki w przekroju zapory wynosi odpowiednio  $Q_{SN} = 0,038 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $Q_{SR} = 0,192 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Zlewnia Potoku Czerwonka o powierzchni 5,5 km<sup>2</sup>, rozdzielona od potoku Sośniak zalewem zbiornika stanowi bezpośrednie zasilanie w wodę analizowany obiekt (Rys.1).



Rys.1 Schemat rozrządu wody zbiornika „Sosnówka”. F1A – Zlewnia potoku Czerwonka; F1B – Zlewnia potoku Sośniak; F2 – Zlewnia rzeki Podgórną; 1 – Budowla upustowa zbiornika z ujęciem wody; 2 - Budowla rozrządu wody na rzece Podgórną; 3- Kanał przerzutowy; 4- zbiornik wstępny z przepompownią.

Fig. 1. Distribution system of Sosnówka reservoir. F1A – Catchment area of Czerwonka stream; F1B – Catchment area of Sośniak stream; F2 – Catchment area of Podgórną river; 1 – Extraction construction of the reservoir and water catchment area; 2 – Distribution centre at Podgórną river; 3- Transfer channel; 4- Introductory chamber including a pumping station

Na obszarze zlewni brak jest antropogenicznych źródeł zanieczyszczeń. Jest to obszar użytków leśnych i łąk, na którym zalegają niewielkie złoża torfów górskich [17].

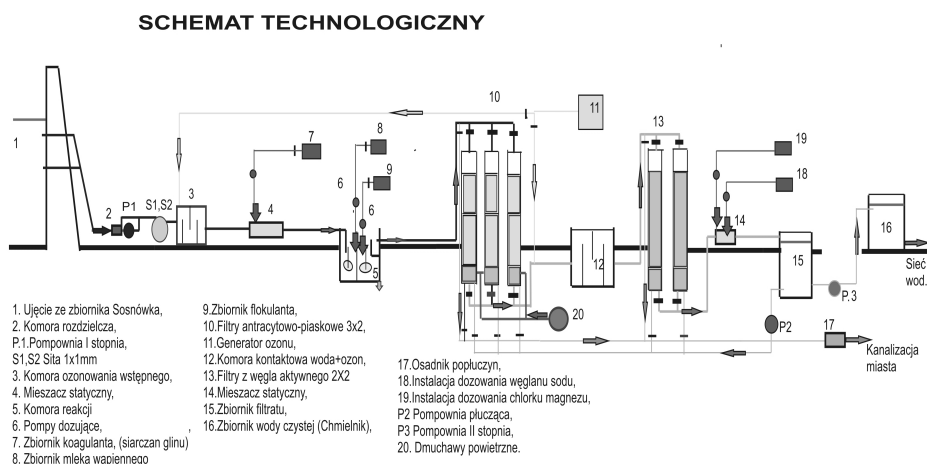
Przy maksymalnej powierzchni zalewu wynoszącej 178 ha, głębokości wody przy zaporze dolnej 13,5 m i średniej głębokości 8,15 m, pojemność całkowita zbiornika wynosi 15,4 mln m<sup>3</sup>. Pojemność użytkowa zbiornika przeznaczona dla celów wodociągowych

wynosi 11 mln m<sup>3</sup>. Przewiduje się, że w przypadku pełnego planowanego poboru wody ze zbiornika retencyjnego „Sosnówka” dla celów wodociągowych konieczne jest jego zasilanie nawet do 70% zapotrzebowania ze zlewni rzeki Podgórną. Stąd rzeka Podgórną będzie w przyszłości stanowić główne źródło zasilania zbiornika [18].

Wysoki wskaźnik lesistości zlewni, niski stopień wymiany wody w roku i brak bezpośrednich źródeł zanieczyszczenia w zlewni, są czynnikami korzystnymi z punktu widzenia zmian jakości wody w zbiorniku. Wartość współczynnika Schindlera wynosząca 1,39 pozwala zaliczyć zbiornik do I kategorii podatności na degradację. Jednak w miarę zwiększania się poboru wody dla celów komunalnych, a w związku z tym konieczność dodatkowego zasilania ze zlewni rzeki Podgórną spowoduje zmianę wskaźników wymiany wody i wzrost współczynnika Schindlera do 4,62. Warunki te będą kwalifikować zbiornik do II kategorii podatności na degradację.

## 2.2. Metodyka badań

W ramach automatycznego monitoringu wody surowej i uzdatnionej na ZUW prowadzony jest ciągły pomiar temperatury wody, odczynu, mętności, barwy oraz przewodności. Ponadto w pierwszym okresie eksploatacji ZUW od listopada 2007 do października 2008 wykonano analizy fizykochemiczne wody w cyklach kilkudniowych. Zakres analizy obejmował pomiar takich wskaźników jak: temperatura wody, mętność, barwa, odczyn, twardość ogólna, zasadowość, twardość ogólna, żelazo, mangan, chlorki, azot amonowy i azotanowy, utlenialność, tlen rozpuszczony, przewodność i fosforany. Eksploatowany układ technologiczny umożliwił badanie następujących procesów jednostkowych: cedzenie, ozonowanie wstępne, koagulacja, korekta odczynu, flokulacja, filtracja pośpieszna przez złożo antracytowo-piaskowe, ozonowanie wtórne, sorpcja na węglu aktywnym, końcowa korekta odczynu i twardości oraz dezynfekcja uzdatnionej wody (Rys.2).



Rys.2 Schemat technologiczny układu uzdatniania wody

Fig. 2 Technology system of the water treatment process

Eksplloatowany ciąg technologiczny pozwala na wielowariantową kombinację układów technologicznych w zależności od jakości ujmowanej wody w poszczególnych okresach roku hydrologicznego. W aspekcie przeprowadzonej analizy zmian jakości wody surowej oraz wyników badań technologicznych wydzielono eksploatacyjne układy technologiczne, które zestawiono w tabeli nr 1.

Wyniki badań technologicznych z pierwszego okresu eksploatacji ZUW pozwoliły na zaproponowanie układu technologicznego W2 obejmującego takie procesy jednostkowe jak: cedzenie, ozonowanie wstępne, filtracja pośpieszna na filtrach antracytowo-piaskowych, ozonowanie wtórne, sorpcja na węglu aktywnym, końcowa korekta jakości wody i dezynfekcja. W przypadku wystąpienia niskiego odczynu wprowadzono układ technologiczny W3 obejmujący dodatkowo korektę odczynu wody.

Tab. 1. *Procesy jednostkowe wydzielonych układów technologicznych*

Tab. 1. *Unit processes of chosen technology systems*

Procesy jednostkowe	Układ technologiczny				
	W1	W1A	W1B	W2	W3
Cedzenie przez sito o prześwicie 1mmx1mm	+	+	+	+	+
Ozonowanie wstępne	+	+	+	+	+
Koagulacja siarczanem glinu	+	+	+		
Flokulacja	+	+	+		
Korekta odczynu	+	+			+
Filtracja przez złożo antracytowo-piaskowe	+	+	+	+	+
Ozonowanie wtórne	+		+	+	+
Filtracja przez złożo węgla aktywnego	+	+	+	+	+
Końcowa korekta jakości wody	+	+	+	+	+
Dezynfekcja	+	+	+	+	+

### 3. Wyniki badań

Analizy wody pobranej ze zbiornika sporządzone w okresie wstępnej eksploatacji ZUW pozwoliły na określenie charakteru wody surowej w tym okresie. Poniżej w tabeli nr 2 zestawiono charakterystyczne wartości minimalne, maksymalne i średnie wskaźników zanieczyszczeń, dla których badano charakter retencjonowanej wody.

Tab. 2. Charakterystyczne wartości wybranych wskaźników jakościowych badanej wody w okresie wstępnej eksploatacji (badania w skali technicznej)

Tab. 2. Typical values of the chosen water quality indicators during the first phase of operating (in a technical scale)

Wskaźniki badanej wody	jednostka	Zbiornik „Sosnówka”			
		S <sub>min</sub>	S <sub>max</sub>	S <sub>SR</sub>	odch.stand.(σ)
Temperatura wody	°C	3	15	9,2	1,620
Mętność	mgSiO <sub>2</sub> ·dm <sup>-3</sup>	0,57	3,81	1,56	1,052
Barwa	mgPt·dm <sup>-3</sup>	5,0	14,9	8,21	2,791
Odczyn	pH	7,2	8,4	7,63	0,366
Twardość ogólna	mval·dm <sup>-3</sup>	0,62	1,03	0,85	0,072
Azot azotanowy	mgN·dm <sup>-3</sup>	0,01	0,11	0,05	0,004
Azot azotanowy	mgN·dm <sup>-3</sup>	2,0	5,0	2,44	1,300
Chlorki	mgCl·dm <sup>-3</sup>	4,0	6,8	4,95	1,321
Utlenialność	mgO <sub>2</sub> ·dm <sup>-3</sup>	1,0	5,22	3,458	1,532
Przewodność	μs·cm <sup>-1</sup>	98,28	122,50	110,88	6,692
Tlen rozpuszczony	mgO <sub>2</sub> ·dm <sup>-3</sup>	9,4	12,4	11,18	1,172
Żelazo	mgFe·dm <sup>-3</sup>	0,05	0,136	0,066	0,027
Mangan	mgMn·dm <sup>-3</sup>	0,012	0,036	0,021	0,007

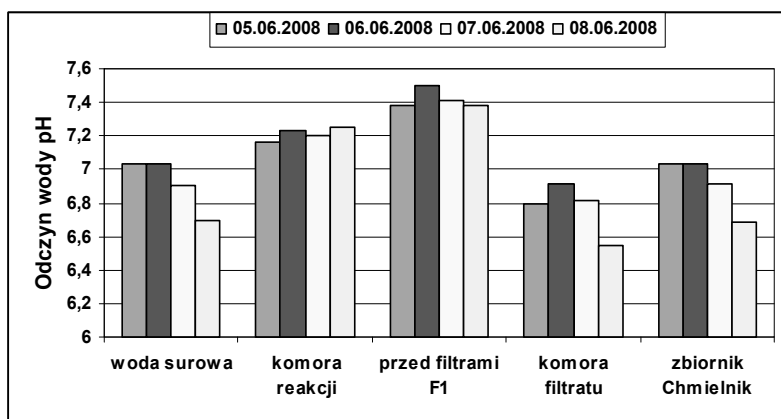
W pierwszym okresie eksploatacji ZUW, biorąc po uwagę stosunkowo dobrą jakość wody surowej testy technologiczne prowadzono na układzie technologicznym obejmującym: cedzenie, ozonowanie wstępne, filtrację pośpieszną na filtrach antracytowo-piaskowych, ozonowanie wtórne, sorpcję na węglu aktywnym (*W2A* - bez korekty odczynu i stabilizacji). W drugiej fazie układ technologiczny poszerzono o końcową korektę jakości wody oznaczonym jako *W2*. W tym okresie uzdatniano wodę na każdym ciągu technologicznym o przepływie 172÷202 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup> przy tej samej prędkości filtracji na filtrach antracytowo-piaskowych i węgla aktywnego w wysokości 4,9÷5,7 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup> oraz dozowano do układu technologicznego:

- w procesie ozonowania wstępnego: ozon - dawka 1÷2 mgO<sub>3</sub>·dm<sup>-3</sup>,
- w procesie ozonowania wtórnego: ozon - dawka do 1 mgO<sub>3</sub>·dm<sup>-3</sup>,
- do korekty odczynu uzdatnionej wody: węglan sodu - dawka 1,0 mgNa<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>·dm<sup>-3</sup>,
- do stabilizacji uzdatnionej wody: chlorek magnezu ; dawka 1,0 mgMgCl<sub>2</sub>·dm<sup>-3</sup>,
- w procesie dezynfekcji: podchloryn sodu: dawka; -0,8÷0,9 Cl<sub>2</sub>·dm<sup>-3</sup>.

Wyniki pomiarów wody surowej i uzdatnionej pozwoliły określić stopień redukcji monitorowanych wskaźników, uwzględniając wpływ temperatury wody i dawki względnej ozonu w stosunku do barwy wody surowej. W okresie badawczym na układzie technologicznym *W2*, przy temperaturze badanej wody 4÷15 °C redukcja barwy wody wносиła od 65% do 98%. Średnio uzyskano redukcję barwy w wysokości 80%. Wyraźnie zauważono zależność wysokości redukcji barwy wody od temperatury uzdatnianej wody. Przy niższych temperaturach wody osiągnięto obniżenie barwy wody w wysokości 60%. Przy temperaturze wody powyżej 6°C wyraźnie widoczny jest wzrost redukcji barwy wody do 80%. Dalszy wzrost redukcji barwy wody obserwuje się dopiero przy temperaturze ponad 14°C. Możliwość prowadzenia ciągłego monitoringu pozwoliła na analizę przebiegu zmian temperatury wody i odczynu w cyklach tygodniowych. W okresie wiosennym, w czasie podwyższonego dopływu wody ze zlewni obserwowano dość wysoki odczyn wody w zbiorniku. Przy stosunkowo niskiej temperaturze badanej wody (6÷7 °C) w miesiącu kwietniu zanotowano wysoki odczyn (pH > 8,85). Wysoki

odczyn wody pozwolił na prowadzenie procesu technologicznego bez konieczności stosowania korekty odczynu. W miesiącu maju, gdy temperatura wzrosła do 15 °C nastąpiła stabilizacja warunków klimatycznych, odczyn wody surowej wyraźnie się obniżył lecz był na tyle był wysoki, przeto nie była konieczna korekta odczynu w procesie technologicznym.

W procesie uzdatniania widoczne są zmiany odczynu wody po kolejnych procesach jednostkowych. W każdym przeprowadzonym teście odnotowano wzrost odczynu wody nawet o 10% po ozonowaniu wstępnym. Natomiast po procesach filtracyjnych odczyn wody obniża się do wartości pH 6,55÷6,9 (Rys.3).



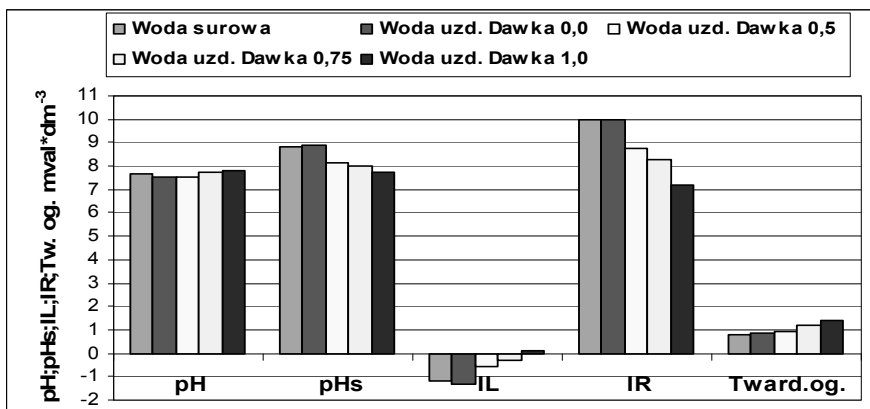
Rys.3 Przebieg zmian odczynu wody w procesie uzdatniania

Fig. 3 Course of pH change within the water treatment process

W aspekcie obserwowanych zmian odczynu wody w procesie uzdatniania, niskiej twardości ogólnej i zasadowości wody dokonano analizy stabilności i agresywności uzdatnionej wody, obliczając indeksy pH<sub>s</sub>, Langeliera (I<sub>L</sub>) i Reznera (I<sub>R</sub>). Obliczone indeksy (Rys. 4) wskazują, że w warunkach prowadzenia procesu na układzie technologicznym W2A, zarówno woda surowa jak i uzdatniona w całym okresie badawczym wykazuje własności agresywne. Znaczne zróżnicowanie tych wskaźników obserwowano szczególnie w okresie miesiąca maja, gdy temperatura wody wzrosła z 8 °C do 15 °C. Do tego czasu przy temperaturze wody 4÷8 °C obserwowano nieznaczny wzrost agresywności wody uzdatnionej w stosunku do wody surowej. Natomiast przy wyższych temperaturach oraz wzrastającym odczynie wody do pH=8,4 woda uzdatniona cechowała się brakiem stabilności i wzrostem agresywności. W tym okresie indeks I<sub>L</sub> był ujemny i wynosił -1,6, natomiast indeks I<sub>R</sub> =10,5.

Wyniki badań były podstawą do uruchomienia procesu stabilizacji wody poprzez dozowanie chlorku magnezu i węgla sodu do wody uzdatnionej przed procesem dezynfekcji. Testy na układzie technologicznym W2 przeprowadzono stosując tej samej wielkości dawki MgCl i Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> odpowiednio: 0,5 0,75 i 1,0 mg·dm<sup>-3</sup>.



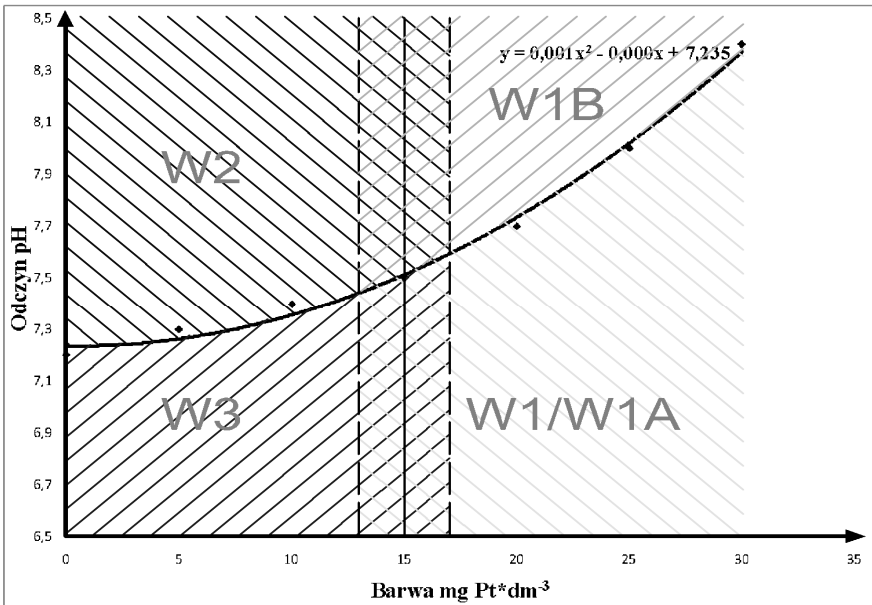


Rys.4 Zmienność odczynu wody, twardości ogólnej i indeksów pHs, IL, IR, w zależności od dawki chlorku magnezu i węglanu sodu

Fig. 4 Variability of water pH, general hardness and pHs, IL, IR indices as subject to a dose of magnesium chloride and sodium carbonate

Uzyskane wyniki (Rys.4) wskazują, że wzrost dawki chlorku magnezu i węglanu sodu stabilizuje uzdatnioną wodę. Stosując dawkę w wysokości  $0,75 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$  obu reagentów, woda uzdatniona uzyskała twardość ogólną ponad  $1,2 \text{ mval} \cdot \text{dm}^{-3}$ . Obliczone indeksy  $I_L$  i  $I_R$  wynosiły odpowiednio  $-0,3$  i  $8,3$ . Wzrost dawki tych reagentów do  $1,0 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$  spowodował zmianę tych indeksów do  $0,1$  i  $7,2$ .

W aspekcie przeprowadzonych badań technologicznych określono obszary wynikające z granicznych wielkości barwy i odczynu wody surowej poddawanej uzdatnieniu. Obszary te zobrazowano na rys. 5. Sporządzony „nomogram”, pozwala na dobranie układu technologicznego w zależności od barwy i odczynu wody pobieranej ze zbiornika. Każdy z wydzielonych układów technologicznych W1, W2 i W3, może być modyfikowany procesem ozonowania wtórnego w zależności od temperatury wody. W okresach zimowych, gdy temperatura wody będzie poniżej  $9-12 \text{ }^\circ\text{C}$ , można zrezygnować z ozonowania wtórnego.



Rys.5 Nomogram do wyznaczania układu technologicznego uzdatniania w zależności od barwy i odczynu wody surowej

Fig. 5. Nomogram of indication of a technology system of the water treatment process as subject to colour and pH of raw water

#### 4. Dyskusja wyników badań

W wyniku przeprowadzonych badań ustalono, że kryterialnymi wskaźnikami wpływającymi na wybór układu technologicznego jest barwa wody, odczyn i temperatura wody. Pozostałe wskaźniki zanieczyszczeń nie wywierają istotnego wpływu na układ technologiczny uzdatniania wody. Badania wykazały, że zarówno woda surowa jak i uzdatniona ma właściwości agresywne i jest nie stabilna. Stąd w każdym z wnioskowych układów technologicznych przewidziano procesy stabilizujące i podnoszące twardość wody. W zbiorniku nie odnotowano zjawisk wywołujących eutrofizację wody. Zbiornik jest mało podatny na degradację. Zawartość związków biogenych w zbiorniku i jego dopływow jest bardzo niska. W każdym układzie technologicznym przewidziano ozonowanie wstępne. Ozon jako silny utleniacz zapewni redukcję glonów i mikroflory, które mogą rozwijać się w okresie letnim przy wysokich temperaturach wody oraz przy niskich stanach wody w zbiorniku.

Z punktu widzenia operatora zarządzającego systemem uzdatniania i dystrybucji wody istotna jest nie tylko jakość wody dostarczanej odbiorcom. Istotne są także koszty operacyjne funkcjonowania tego systemu. Wysokość kosztów operacyjnych zależęć będzie od stosowanego układu technologicznego uzdatniania wody. W zależności od

czasu trwania określonych parametrów jakościowych wody surowej wybrany układ technologiczny generował będzie koszty operacyjne uzdatniania wody.

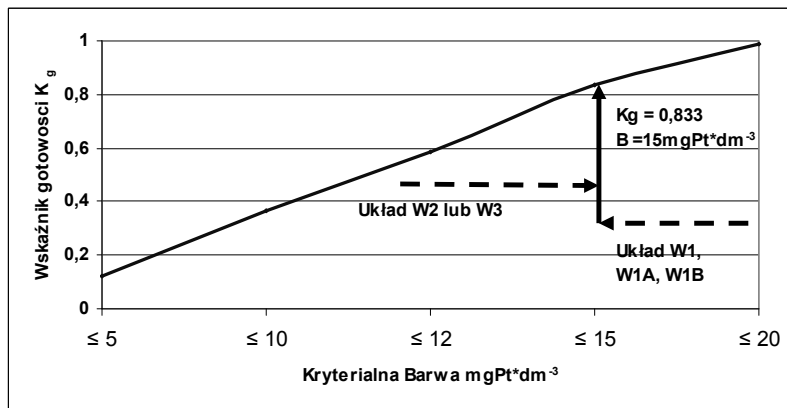
Biorąc pod uwagę powyższe uwarunkowania, o wysokości kosztów uzdatniania wody decydować będzie długość cyklu uzdatniania na wybranym układzie technologicznym. Stąd dla operatora zarządzającego ZUW wskazana jest informacja o prognozowanej wysokości wskaźników jednostkowych zanieczyszczeń wody surowej, które decydują o wyborze określonego układu technologicznego. Wskaźniki te oznaczono jako kryterialne dla analizowanego ZUW. Prognozowany czas trwania kryterialnego wskaźnika można wyznaczyć, wykorzystując metodykę zaproponowaną przez Pawełka i Bergela [19] poprzez określenie tzw. wskaźnika gotowości  $K_g$  dla ustalonych kryterialnych wskaźników jakościowych ujmowanej wody. Wskaźnik ten autorzy proponują określić zależnością:

$$K_g = \frac{T - \sum t_i}{T} \quad (1)$$

gdzie:  $T$  – czas rozpatrywanego okresu. Dla potrzeby określania kosztów eksploatacji, można przyjąć 365 dni,

$\sum t_i$  – sumaryczny czas wystąpienia wartości granicznych wskaźników kryterialnych wyznaczonych do określonego układu technologicznego.

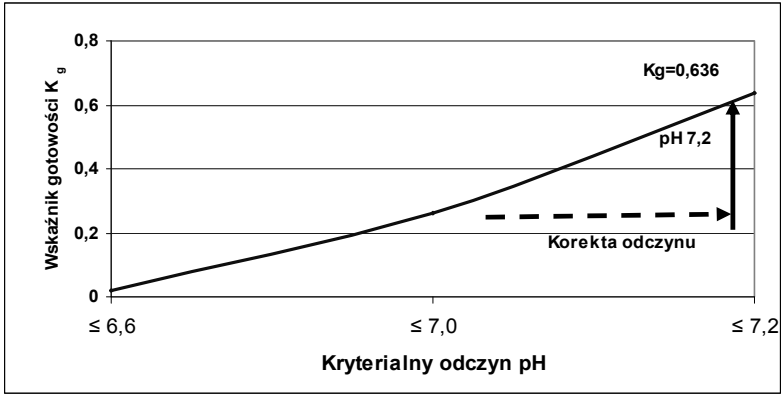
W oparciu o formułę 1, dla wskaźników kryterialnych tj. barwy wody, odczynu i temperatury wody obliczono odpowiednio wskaźniki gotowości ( $K_g$ ). Sumaryczny czas wystąpienia granicznych wartości obliczono sporządzając dla każdego wskaźnika kryterialnego krzywe sumy czasów trwania w roku badawczym (rys. 6, 7 i 8).



Rys. 6 Wskaźnik gotowości dla barwy wody

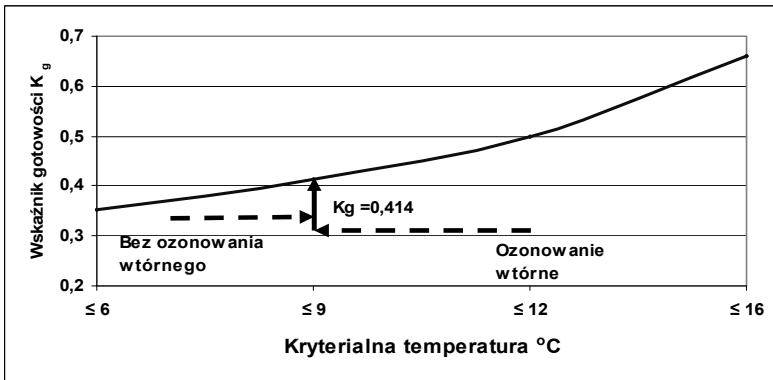
Fig.6 Readiness indicator of water colour

Wskaźniki gotowości obliczone dla barwy wody informują, że przez okres 302 dni w roku (83%) możemy zastosować układ technologiczny W2 lub W3 (Rys.6). W pozostałych okresie roku należy stosować układ W1, wprowadzając dodatkowo proces koagulacji. Układ technologiczny W2 i W3 może być modyfikowany korektą odczynu.



Rys. 7 Wskaźnik gotowości dla odczynu wody

Fig. 7 Readiness indicator of water pH



Rys. 8 Wskaźnik gotowości dla temperatury wody

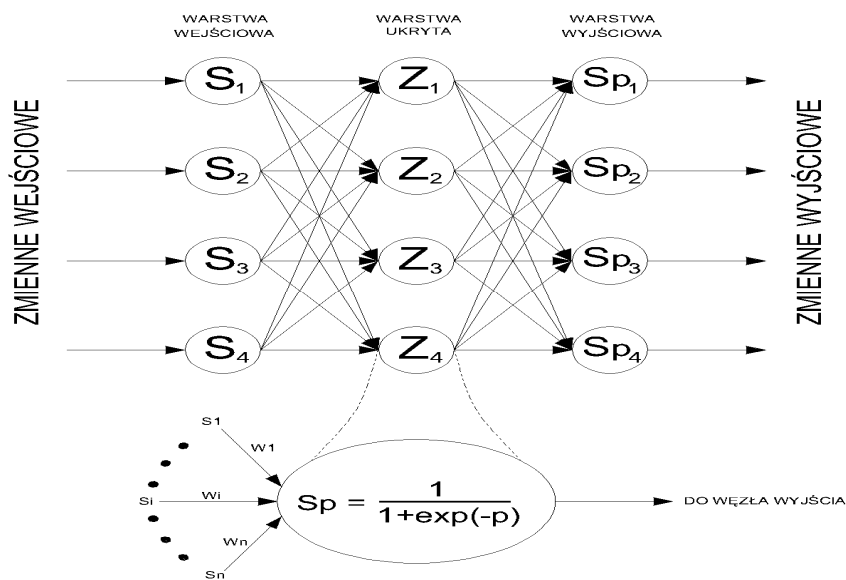
Fig. 8 Readiness indicator of water temperature

Jak zobrazowano na rys.7, korekta odczynu wody prowadzona będzie przez okres 232 dni w roku (63%). Proponowane układy technologiczne W1, W2 i W3 mogą być modyfikowane w zależności temperatury uzdatnianej wody. Natomiast z wykresu 8 wynika, że proces uzdatniania bez ozonowania wtórnego będzie prowadzony nie dłużej niż 151 dni w roku.

Dla operatora ZUW istotne są informacje o prognozowanych parametrach jakościowych wody warunkujących uruchomienie określonego układu technologicznego. Krótkoterminowa prognoza jakości wody w zbiorniku może być wykorzystana do opracowania modelu zarządzania gospodarką wodną zbiornika w różnych sytuacjach wynikających z

warunków hydrologicznych, stanu ekologicznego dopływów i wielkości pobieranej wody dla celów komunalnych. Do prognozowania zmian wskaźników jakości wody w zbiorniku wodnym posłużono się siecią neuronową typu Flexible Bayesian Models (FBM) [20]. Do analizy numerycznej wykorzystano model regresyjny, w którym zmiennymi objaśnianymi (tzw. *target variable*) są zmienne ciągle: barwa wody, mętność, odczyn i twardość ogólna oraz cztery zmienne objaśniające: czas, stan wody w zbiorniku, opad i temperatura wody – tzw. *input variables*. Uczenie sieci oparto na zgromadzonych danych historycznych dla 365 kompletnie opisanych przypadków od listopada 2007r do 31 października 2008. Weryfikację modelu numerycznego przeprowadzono na tej samej grupie badawczej. Parametry architektury sieci określono dla poziomów zapewniających najmniejszą wartość uzyskiwanych w predykcji błędów poprzez kontrolę tzw. wskaźnika odrzutu (*rejection rate*), uzyskanego na poziomie bliskim 0,5 i wybranych hiper-parametrów (*hyperparameters*), optymalizujących proces uczenia sieci. Symulację numeryczną przeprowadzono dla 250 kroków iteracji po odrzuceniu pierwszych 20 % kroków tzw. rozruchowych (tzw. *burn-in*) [20]. Przyjęto dwa kryteria wyboru ostatecznych parametrów sieci neuronowej. Pierwszym jest pierwiastek błędu średniokwadratowego (Root-Mean-Square-Error, RMSE). Drugim kryterium było określenie współczynników korelacji *R* pomiędzy wskaźnikami prognozowanymi a obserwowanymi.

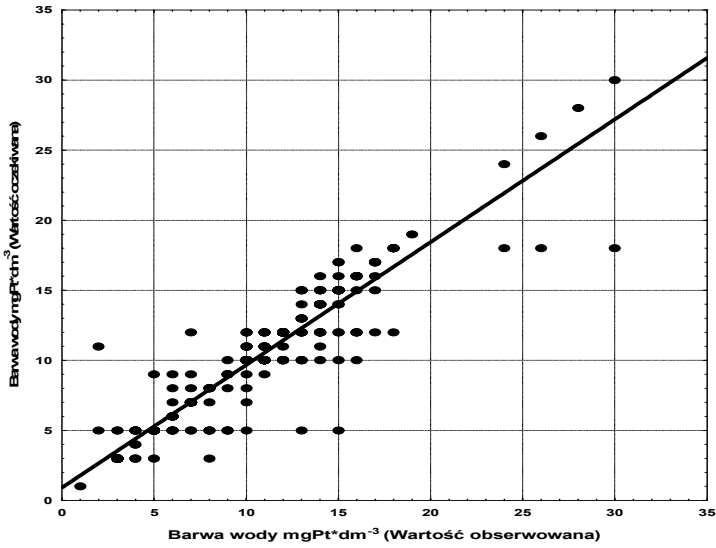
Schemat sieci neuronowej z warstwą wejściową, pojedynczą warstwą ukrytą oraz warstwą wyjściową przedstawiono na rys.9.



Rys. 9 Schemat architektury sieci dla modelu SSN FBM,

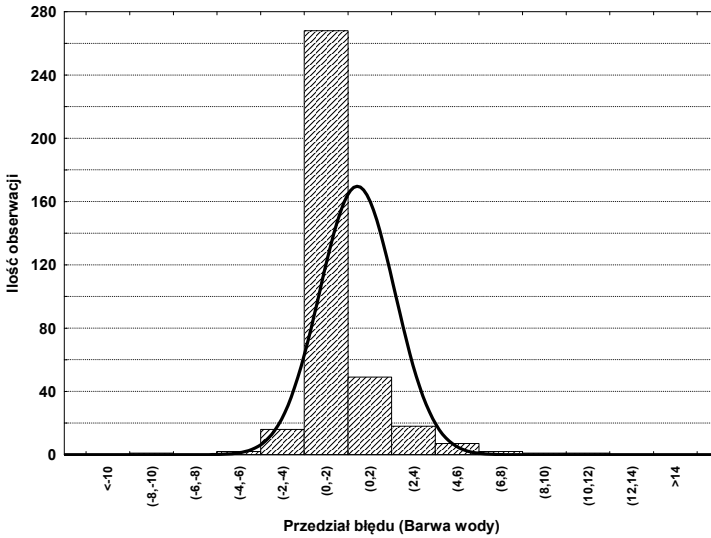
Fig. 9 Architecture model draft for a SSN FBM model

Poniżej, kolejno na rys. 10,11,12 i 13 przedstawiono wybrane wyniki prognozowanych wskaźników z wykorzystaniem SSN FMB.



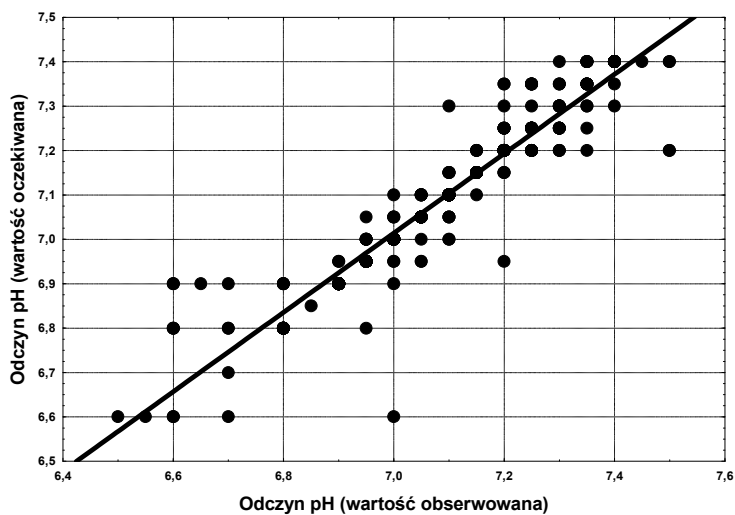
Rys. 10 Wykres korelacji pomiędzy wartościami prognozowanymi i obserwowanymi dla barwy wody

Fig. 10 Chart of correlation between forecasted and observed values of the water colour



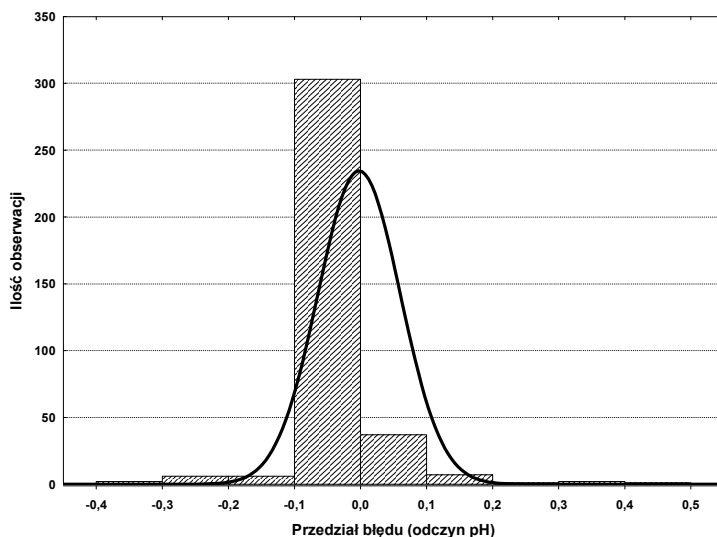
Rys. 11 Histogram błędów prognozy dla barwy wody

Fig. 11 Histogram of prognosis' errors of the water colour



Rys. 12 Wykres korelacji pomiędzy wartościami prognozowanymi i obserwowanymi dla odczynu wody

Fig. 12 Chart of correlation between forecasted and observed values of the water pH



Rys. 13 Histogram błędów prognozy dla odczynu wody

Fig. 13 Histogram of prognosis' errors of the water pH

Obliczone wartości RMSE wynoszą odpowiednio: dla barwy wody  $1,69 \text{ mgPt}\cdot\text{dm}^{-3}$ , mętności wody  $0,83 \text{ mgSiO}_3\cdot\text{dm}^{-3}$ , odczynu  $0,062 \text{ pH}$  i dla twardości ogólnej wody  $1,38 \text{ mgCaCO}_3\cdot\text{dm}^{-3}$ . Współczynniki korelacji  $R$  pomiędzy wskaźnikami oszacowanymi a obserwowanymi wynoszą odpowiednio: dla barwy wody  $0,9318$ , mętności wody  $0,9448$ , odczynu wody  $0,9475$  i twardości ogólnej wody  $0,9177$ .

## 5. Podsumowanie i wnioski

Coraz szersze zastosowanie sztucznych sieci neuronowych (SNN) w badaniach i analizach procesów jednostkowych i technologicznych związanych z gospodarką wodną, uzdatnieniem i dystrybucją wody było powodem badania możliwości ich zastosowania przy prognozowaniu jakości wody i projektowania modelu umożliwiającego takie prognozowanie.

Przeprowadzona analiza efektywności SSN FBM w prognozowaniu kryterialnych wskaźników zanieczyszczeń wody w zbiorniku wykazała relatywnie dobrą jakość predykcji. Wybrany do prognozowania model SNN FBM pozwolił na utworzenie bazy prognozowanych, kryterialnych wskaźników jakości wody w zbiorniku. W bazie danych Microsoft Access 2007 dla analizowanego modelu SNN FBM zdeponowano zmienne obserwowane i prognozowane analizowanych wskaźników jakości wody. Użycie funkcji „filtrowanie” pozwala poszukiwać wartości prognozowanych wybranego wskaźnika jakości wody w zbiorniku po uprzednim określeniu zmiennych obserwowanych.

Wybrany model sztucznych sieci neuronowych powinien uzupełniać algorytmy systemów informatycznych projektowanych i modernizowanych systemów zarządzających gospodarką wodną na zbiornikach retencyjnych oraz systemów sterujących procesami ujmowania i uzdatniania wody wykorzystywanych dla celów komunalnych, przemysłowych lub rolniczych.

Sporządzenie modelu do prognozowania wskaźników jakościowych wymaga przeprowadzenia szeregu badań i analiz indywidualnie dla każdego obiektu gospodarki wodnej. Wynikiem tych badań powinno być wyznaczenie kryterialnych wskaźników jakościowych wody określających charakter badanej wody i determinujące oczekiwane własności w aspekcie jej aktualnego lub planowanego użytkowania.

W aspekcie przeglądu wyników badań publikowanych w literaturze krajowej i zagranicznej oraz wyników badań i analiz przeprowadzonych na obiekcie badawczym można sprecyzować następujące wnioski:

1. Zarządzanie procesami uzdatniania wody powierzchniowej wykorzystywanej do celów użytkowych wymaga ciągłego optymalizowania z uwagi na dużą zmienność wskaźników kształtujących jakość wody. W tym celu konieczne jest sporządzenie modelu, który umożliwi prognozowanie kryterialnych wskaźników jakości wody decydujących o wyborze układu technologicznego uzdatniania wody,
2. Duża zmienność wybranych kryterialnych wskaźników jakości wody nie pozwoliła na wybór jednego układu technologicznego uzdatniania wody. W warunkach analizowanego zbiornika retencyjnego takimi wskaźnikami kryterialnymi są: temperatura wody, barwa wody, odczyn i twardość ogólna wody.
3. Zaproponowana metodyka projektowania i weryfikacji modelu sztucznych sieci neuronowych pozwala na optymalizację procesu konfiguracji określonego typu sztucznych sieci neuronowych do prognozowania wskaźników jakości wody reten-



cjonowanej w zbiorniku. Wybrany model sztucznych sieci neuronowych powinien uzupełniać algorytmy systemów informatycznych zarządzania procesami uzdatniania wody projektowanych i modernizowanych zakładów uzdatniania wody.

## Bibliografia

- [1] Bartoszewski K., 1992: Wyznaczanie zasobów wodnych z uwzględnieniem ich jakości; *Ochrona Środowiska* 2-3, PZITS/Oddz. Dolnośląski, ss.46-47,
- [2] Siwoń Z., Łomotowski J., Cieżak W., Licznar P., Cieżak J., 2008: Analizy i prognozowanie rozbiórów wody w systemach wodociągowych. PAN Komitet Inżynierii Łądowej i Wodnej, Instytut Podstawowych Problemów Techniki; Nr 61, ss. 32-38,
- [3] Bardossy G., Halasz G., Winter J., 2009: Prognosis of urban water consumption using hybrid fuzzy algorithms. *Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA* Vol 58 No 3 pp. 203–211,
- [4] Koo J., Inakazu T., i in., 2008: Application of Artificial Neural Network for reducing of chlorine residual concentration in water distribution network. *Water Practice & Technology* Vol.3 No 2, 2008.032,
- [5] Camarinha-Matos L.M., Martinelli F.J., 1998: Application of machine learning in water distribution networks. *Intelligent Data Analysis*, 2 pp.311-332,
- [6] Zhou S.L., Macmahont T.A., Walton A., Lewis J., 2000: Forecasting daily urban water demand : a case study of Melbourne. *Journal of Hydrology*, 235, pp.153-164,
- [7] Zhou S.L., Macmahon T.A., Walton A., Lewis J., 2002: Forecasting operational demand for an urban water supply zone. *Journal of Hydrology*, 259, pp. 189-202,
- [8] Sroczan E.M, Urbaniak A., 2004: Wykorzystanie metod sztucznej inteligencji w monitorowaniu, sterowaniu i eksploatacji systemów zaopatrzenia w wodę i ochrony wód. *Mat. Kon. „WATER SUPPLY AND WATER QUALITY* Poznań 6-8 September 2004, ss. 695-704,
- [9] Zimoch I., Kłos M., 2003: Zastosowanie technik komputerowych do prognozowania eutrofizacji wód powierzchniowych na przykładzie zbiornika zaporowego „Dobczyce”. *Ochrona Środowiska* Vol.25, Nr 3, ss. 73-76, wyd. PZITS O/Wrocław,
- [10] Dawidowicz J., 2005: Metoda oceny średnic rurociągów wodociągowych przy użyciu sztucznych sieci neuronowych. *Mat. Kon. „Problemy gospodarki wodno-ściekowej w regionach rolniczo-przemysłowych”*, *Mon. Kom. Inż. Środ. PAN*, vol. 30 ss.345-360,
- [11] Licznar P., Łomotowski J., 2004: Prognozowanie dobowych rozbiórów wody przy wykorzystaniu sztucznych sieci neuronowych. *Mat. Konf. „WATER SUPPLY AND WATER QUALITY* Poznań 6-8 September 2004, ss. 175-183,
- [12] Deveughèle S., Do-Quang Z., 2005: Neural networks: an efficient approach to predict on-line the optimal coagulant dose. *Water Supply* Vol 4 No 5-6 pp. 87–94,

- [13] Cougnaud A., Faur-Brasquet C., Le Cloirec P., 2005: Neural networks modelling of pesticides removal by activated carbon for water treatment. *Water Supply* Vol 4 No 5-6 pp. 9–19,
- [14] Brion G.M., Lingireddy S., 2003: Artificial neural network modelling: a summary of successful applications relative to microbial water quality. *Water Science & Technology* Vol 47 No 3 pp. 235–240,
- [15] Gavin J., Graeme C., Dandy, Holger R., 2003: Data transformation for neural network models in water resources applications. *Journal of Hydroinformatics* 5 pp 245-258,
- [16] Strugholtz S., Panglisch S., Gimbel R., Gebhardt J., 2009: Neural networks and genetic algorithms in membrane technology modelling. *Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA* Vol 57 No 1 pp 23–34,
- [17] Rak A., 2008: Zmiany jakości wody zlewni górskiej retencjonowanej do celów wodociągowych. *Gospodarka Wodna* nr 3(711), ss. 115-121,
- [18] IMGW, 1986. Instytut Ochrony Środowiska – oddział we Wrocławiu: Badania jakościowe i technologiczne oraz prognoza jakości wody z planowanego zbiornika „Sosnówka” na rzekach Czerwonca i Czerwonym Potoku dla potrzeb zaopatrzenia w wodę Jeleniogórskiego Zespołu Miejskiego,
- [19] Pawełek J., Bergel T., 2008: Charakterystyka zdarzeń podwyższonych mętności wody w małych potokach górskich. *Gaz Woda i Technika Sanitarna* nr 9/2008, s. 25-29,
- [20] Neal R., 2000; *Flexible Bayesian Models on Neural Networks, Gaussian Processes and Mixtures* v 2000-08-13, University of Toronto, Toronto.