

Zbigniew SIWOŃ, Wojciech CIEŻAK,
Jan CIEŻAK

*Instytut Inżynierii Ochrony Środowiska
Politechnika Wrocławska*

WYBRANE MODELE NEURONOWE DOBOWYCH PROFILI GODZINOWEGO ROZBIORU WODY

CHOSEN NEURAL MODELS OF HOURLY WATER CONSUMPTION PROFILES DURING THE DAY

The separate areas of municipal water supply systems in Wrocław and Kłodzko were used in the efficiency analysis of hourly water demand forecasting over the 24h time span. The predictive power of linear and perceptron networks turned out to be relatively good. The research results indicate that the usability of networks based on radial functions is limited and lower than that of linear and perceptron networks, as well as ARIMA class models and exponential smoothing methods presented in the monograph [6].

1. Wprowadzenie

Procesy zużycia (poboru, rozbioru) wody i zapotrzebowania na nią przez jej konsumentów, dopływu ścieków z miast i aglomeracji miejsko-przemysłowych do oczyszczalni, czy zmian jakości ścieków oczyszczonych odpływających z oczyszczalni, mają charakter złożony: deterministyczno-losowy. Podlegają one zatem pewnym prawidłowościom (np. cykliczności), na które nakładają się czynniki losowe. Ich próbkowymi realizacjami są zaobserwowane w przeszłości lub prognozowane szeregi czasowe wartości procesów. Do ich analizy i prognozowania mogą być wykorzystywane niestacjonarne modele stochastyczne. Opisują one rzeczywisty proces na podstawie pomiarów wejścia i wyjścia z obiektu, obciążonych szumem, z wykorzystaniem metod interpolacyjnych, aproksymacyjnych, analizy szeregów czasowych, modeli neuronowych etc. Są to najczęściej modele czarnej skrzynki (ang. black-box), które ustala się z wykorzystaniem metod parametrycznych ARIMA lub ARIMAX, metod wygładzania szeregu czasowego, sieci neuronowych, modeli rozmytych oraz analizy falkowej.

2. Możliwości praktycznego wykorzystania rezultatów analiz

Stochastyczne modele szeregów czasowych wartości poboru wody z sieci wodociągowych w miastach i aglomeracjach miejsko-przemysłowych, w wydzielonych ich rejonach oraz przez określone grupy odbiorców wody, mogą być wykorzystywane między innymi [3]:

- w procesach kalibracji i weryfikacji modeli przepływów w systemach dystrybucji wody oraz w komputerowych badaniach symulacyjnych działania owych systemów, szczególnie w warunkach kolejno pojawiających się prognozowanych stanów rozbioru wody,
- w optymalnym sterowaniu dystrybucją wody i procesami jej oczyszczania,
- do wyznaczenia optymalnych poleceń operacyjnych w procesach produkcji, oczyszczania i dystrybucji wody. Rozpoznanie zmienności poboru wody w poszczególnych dniach tygodnia pozwala zrationalizować gospodarkę reagentami chemicznymi stosowanymi w procesach uzdatniania wody, ustalić harmonogram płukań filtrów w okresach minimalnych rozbiorów wody, racjonalnie zaprojektować i eksploatować dolne i górne zbiorniki wodociągowe,
- do wyznaczenia wzorcowych histogramów chwilowych (najczęściej uśrednianych w przedziałach 15, 30 lub 60 minutowych) rozbiorów wody w czasie doby przez określone grupy jej odbiorców oraz przez wszystkich odbiorców. Owe histogramy stanowią między innymi jeden z elementów procesów kalibracji i weryfikacji modeli hydraulicznych oraz dynamicznego modelowania przepływów w systemach dystrybucji wody zarówno dla potrzeb ich bieżącej eksploatacji, jak i programowania modernizacji i rozbudowy. Są również przydatne w wykrywaniu nieprawidłowości w bieżącym funkcjonowaniu systemu dystrybucji wody. Umożliwiają bowiem diagnozowanie odstępstw od stanu uznawanego za normalny stan eksploatacyjny i w konsekwencji podejmowanie działań lub sygnalizowanie obsłudze, że ma miejsce przypadek pracy systemu technicznego wymagający nadzoru lub natychmiastowej reakcji.

Należy zauważyć, że diagnozowanie z wykorzystaniem analizy szeregów czasowych będzie tylko wtedy możliwe, gdy na podstawie wstępnych obserwacji ustali się stany uznawane za normalne stany eksploatacyjne oraz charakterystyczne stany wywołane zjawiskami losowymi lub awariami urządzeń technicznych [3].

3. Materiał badawczy

Do modelowania i prognozowania dobowych profili godzinowych poborów wody przy użyciu sieci neuronowych zostały wykorzystane szeregi czasowe wyników pomiarów zużycia wody przez jej odbiorców w osiedlach mieszkaniowych zaopatrywanych w wodę z wydzielonych rejonów sieci wodociągowych we Wrocławiu i w Kłodzku. Osiedla charakteryzują się zasadniczo odmiennymi ilościami mieszkańców.

Wydzielona strefa sieci wodociągowej we Wrocławiu, z której zaopatrywanych jest w wodę ok. 100.000 mieszkańców osiedli: Nowy Dwór, Kozanów, Gądów i Muchobór Mały (w przeważającej większości z budynkami 11-kondygnacyjnymi) z kompletem usług, jest zasilana z jednego źródła (pompowni strefowej przy ul. Bystrzyckiej), a woda jest tłoczona

dwoma rurociągami, na których są zamontowane przepływomierze elektromagnetyczne z ciągłą rejestracją wskazań.

Wydzielony rejon sieci wodociągowej w Kłodzku obejmuje osiedle im. Leona Kruczkowskiego o zabudowie wielorodzinnej z budynkami 5 i 11 kondygnacyjnymi oraz osiedle z zabudową 1-rodzinną w rejonie ulic: Św. Wojciecha, Korytowskiej, Zajęczej, Noworudzkiej, Kromera, Długosza i Objazdowej, zwyczajowo nazywane „osiedlem Św. Wojciecha”. Łączna liczba mieszkańców osiedli wynosi ok.10.000. Źródłem zasilania sieci jest pompownia przy ul. Dusznickiej. Pomiary globalnego poboru wody przez wszystkich jej odbiorców na terenie wymienionych osiedli są dokonywane za pomocą przepływomierza elektromagnetycznego oraz wodomierza, z ciągłymi rejestracjami wskazań.

W analizach ilustrujących metodykę modelowania i prognozowania dobowych histogramów chwilowych rozbiorów wody wykorzystano chronologicznie uszeregowane wyniki pomiarów godzinowego zużycia wody w wydzielonych rejonach sieci wodociągowej w okresach: od 25.04.2001 do 15.10.2001 we Wrocławiu i od 01.06.2006 do 11.02.2007 w Kłodzku.

Zbiory wyników pomiarów podzielono na szeregi czasowe zawierające odpowiednio zbiory obserwacji w dniach roboczych, sobotach oraz dniach wolnych od pracy (niedzielach i świątach) w okresie od 25 kwietnia do 16 września 2001 roku (wydzielony rejon sieci wodociągowej we Wrocławiu) oraz od 01.06.2006 do 31.12.2006 r. (wydzielony rejon sieci wodociągowej w Kłodzku). Okresy od 17.09 do 15.10.2001 r. (wydzielony rejon sieci wodociągowej we Wrocławiu) oraz od 01.01.2007 r. do 11.02.2007 r. (wydzielony rejon sieci wodociągowej w Kłodzku) zostały wyodrębnione w celu sprawdzenia jakości prognoz generowanych przez wybrane optymalne modele prognostyczne.

Wybór zbiorów: uczącego (50% ogólnej ilości obserwacji), walidacyjnego i testowego (odpowiednio po 25% ilości obserwacji), został przeprowadzony w taki sposób, aby zapewnić w każdym z nich dane z całego zakresu analizowanego szeregu czasowego. Przed podaniem na wejście sieci zmienne zostały przekonwertowane za pomocą metody „minimax”: wartości przeskalowano liniowo tak, że najmniejsza wartość ze zbioru uczącego przyjęła wartość 0, a największa 1.

4. Wyniki badań

Z doświadczeń autorów niniejszego artykułu, a także z informacji literaturowych (np.: [2]) wynika, że spośród znanych metod analizy i prognozowania statystycznych szeregów czasowych do badań i prognozowania procesów poboru wody i odpływu ścieków w praktyce są wykorzystywane: scałkowane modele autoregresji i średniej ruchomej ARIMA i ARIMAX, metody wykładniczego wygładzanie szeregów czasowych (w szczególności metoda wygładzania potrójnie wykładniczego oraz addytywny i multiplikatywny model Wintersa), modele regresyjne oraz sztuczne sieci neuronowe. Atrakcyjność sieci neuronowych wynika przede wszystkim z możliwości aproksymacji dowolnych nieliniowości oraz dostrajania przyjętej struktury na podstawie danych eksperymentalnych. Co więcej, proces budowy modelu neuronowego polega na eksploracji dostępnych zbiorów danych i prowadzi do całkowicie automatycznego oszacowania na tej podstawie modelu opisującego stwierdzone prawidłowości i współzależności. Stosowanie modeli neuronowych nie wymaga w związku z tym znajomości postaci funkcji opisującej istniejącą prawidłowość. W efekcie modele neuronowe mogą znaleźć zastosowanie wszędzie tam, gdzie nie jest znane dokładne prawo opisujące kształtowanie się badanych zależności. Dodatkową zaletą sieci neuron-

wych jest łatwość ich adaptacji do zmiennych warunków środowiska. Cecha ta predestynuje je do opisu zależności zmieniających się w czasie. Ewolucja zmian dynamiki procesów poboru wody i odpływu ścieków oraz wpływ warunków zewnętrznych utrudniają stosowanie wszelkich metod obliczeniowych opartych na koncepcji modelu stacjonarnego. Tymczasem dla sieci neuronowej zmiany zachodzące w modelowanym obiekcie nie stanowią zwykle przeszkody. W chwili pojawienia się nowych danych przeprowadzony może zostać zawsze proces douczenia sieci (lub uczenia od nowa), co umożliwi uwzględnienie w tworzonym modelu informacji zawartych także w najnowszych obserwacjach.

W praktyce sieci neuronowe są aktualnie wykorzystywane do [3]:

- prognozowania rozbiorów wody, w tym szczególnie w warunkach dużej zmienności czynników losowych, np. w miejscowościach letniskowych,
- identyfikacji wzorcowych histogramów rozbiorów wody w systemach wodociągowych oraz natężeń dopływu ścieków do oczyszczalni w czasie bezdeszczowej pogody,
- prognozowania ilości ścieków dopływających do oczyszczalni w okresach deszczowych oraz w czasie trwania roztopów,
- sterowania pracą przelewów burzowych i zbiorników retencyjnych,
- sterowania systemami napowietrzania ścieków,
- prognozowania jakości ścieków oczyszczonych,
- sterowania pracą urządzeń do dozowania reagentów chemicznych,
- predykcji szybkości zaniku chloru (dwutlenku chloru) w sieci wodociągowej w różnych warunkach jej eksploatacji.

Rezultaty badań nad możliwościami praktycznego wykorzystania w analizie danych pochodzących z monitoringu systemów wodociągowo-kanalizacyjnych różnych metod prognozowania są zaprezentowane w pracy Siwon i in. [6]. Wskazują one, że w praktyce w większości przypadków najwyższą efektywnością wykazują się modele neuronowe, które posiadają szereg cech, dzięki którym mogą stanowić przydatne narzędzie do analizy i prognozowania szeregów czasowych. W tym kontekście w niniejszej pracy zbadano i porównano praktyczną efektywność w prognozowaniu dobowych histogramów godzinowego poboru wody sztucznych neuronowych sieci liniowych oraz sieci perceptronowych i radialnych.

Sieć liniowa

Model liniowy jest reprezentowany przez sieć nie posiadającą warstw ukrytych, zaś znajdujące się w warstwie wyjściowej neurony są w pełni liniowe. Sieci liniowe stanowią dobry punkt odniesienia, z którym porównuje się jakość innych sieci neuronowych. Często-kroć problem, który uważany był za bardzo złożony, może zostać w rzeczywistości rozwiązany równie dobrze przez sieć liniową, jak i przez inną sieć neuronową, o złożonej nieliniowej strukturze. W takim przypadku należy wykorzystywać model liniowy, bowiem ogólna zasada stosowana w nauce głosi, że w przypadku gdy istnieje możliwość wyboru pomiędzy modelem prostym i bardziej złożonym, należy zawsze preferować model prostszy - o ile oczywiście ten drugi nie dopasowuje się znacząco lepiej do posiadanych danych [5].

Wyboru optymalnych struktur sieci liniowej (tabela 1 i 2) dokonano analizując kilkadziesiąt różnych modeli oraz optymalizując liczbę wejść sieci (od 1 do 240). Praktyczną efektywność modelowania i prognozowania przy wykorzystaniu liniowych sieci neuronowych ilustrują wyniki analiz zamieszczone w tabelach 3 i 4 oraz na rysunkach 1 i 2. Jakości prognoz generowanych przez sieci liniowe i perceptronowe (omówione w dalszej części niniejszego artykułu) okazały się porównywalne.

Tab. 1. Wyniki analiz dotyczących wyboru optymalnych struktur sieci liniowych dla szeregów czasowych godzinowego poboru wody w wydzielonym rejonie sieci wodociągowej w Kłodzku, przyjętych do generowania prognoz

Tab. 1. Analysis of the choice of optimal linear network structures for the time series of 1-hour water demands within a separate water supply subsystem in Kłodzko, assumed for the generation of forecasts

Typ dnia	Struktura modelu	Średni pobór wody [m ³ /h]	Bezwzględny średniokwadratowy błąd modelu [m ³ /h]	Względny średniokwadratowy błąd modelu [%]	Współczynnik korelacji
Robocze	Liniowa s144 1:144-1:1	54,77	2,81	5,13	0,9898
	metoda uczenia: Pseudoinwersji (PI) (optymalizacja liniowa najmniejszych kwadratów)				
Soboty	Liniowa s30 1:30-1:1	58,34	3,34	5,73	0,9896
	metoda uczenia: Pseudoinwersji (PI) (optymalizacja liniowa najmniejszych kwadratów)				
Niedziele wraz z dniami świątecznymi	Liniowa s60 1:60-1:1	51,86	3,71	7,15	0,9846
	metoda uczenia: Pseudoinwersji (PI) (optymalizacja liniowa najmniejszych kwadratów)				

Tab. 2. Wyniki analiz dotyczących wyboru optymalnych struktur sieci liniowych dla szeregów czasowych godzinowego poboru wody w wydzielonym rejonie sieci wodociągowej we Wrocławiu, przyjętych do generowania prognoz

Tab. 2. Analysis of the choice of optimal linear network structures for the time series of 1-hour water demands within a separate water supply subsystem in Wrocław, assumed for the generation of forecasts

Typ dnia	Struktura modelu	Średni pobór wody [m ³ /h]	Bezwzględny średniokwadratowy błąd modelu [m ³ /h]	Względny średniokwadratowy błąd modelu [%]	Współczynnik korelacji
Robocze	Liniowa s133 1:133-1:1	448,02	26,10	5,83	0,9894
	metoda uczenia: Pseudoinwersji (PI) (optymalizacja liniowa najmniejszych kwadratów)				
Soboty	Liniowa s47 1:47-1:1	501,17	25,86	5,16	0,9932
	metoda uczenia: Pseudoinwersji (PI) (optymalizacja liniowa najmniejszych kwadratów)				
Niedziele wraz z dniami świątecznymi	Liniowa s108 1:108-1:1	466,38	37,78	8,10	0,9841
	metoda uczenia: Pseudoinwersji (PI) (optymalizacja liniowa najmniejszych kwadratów)				

Tab. 3. *Przykładowa analiza jakości prognozy wg optymalnych sieci liniowych dla wybranego tygodnia w wydzielonym rejonie sieci wodociągowej w Kłodzku. Horyzont prognozy równy jednej dobie*

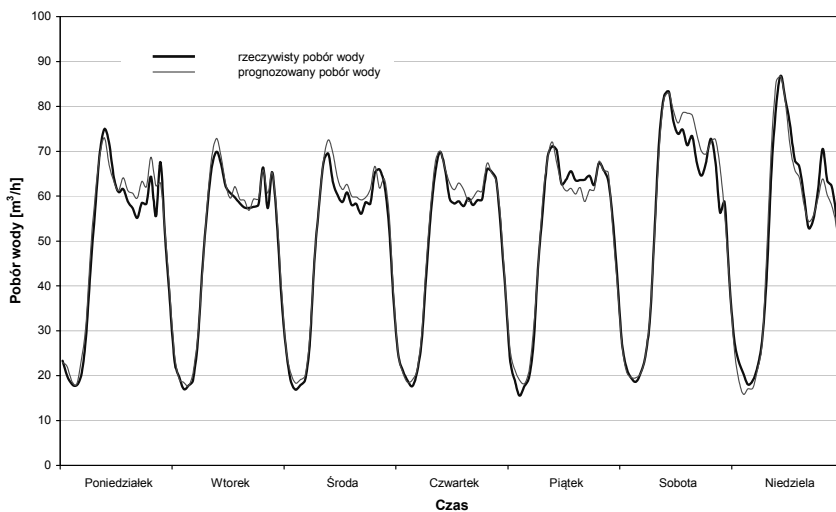
Tab. 3. *Example analysis of the forecast quality according to an optimal linear network for a selected week within a separate water supply subsystem in Kłodzko. Forecast horizon: 24 h*

Dzień tygodnia	Data	Średni pobór wody [m ³ /h]	Bezwzględny średniokwadratowy błąd prognozy [m ³ /h]	Względny średniokwadratowy błąd prognozy [%]
Poniedziałek	2007-02-05	49,77	3,22	6,47
Wtorek	2007-02-06	49,10	1,60	3,27
Środa	2007-02-07	49,19	2,46	5,00
Czwartek	2007-02-08	49,47	1,92	3,87
Piątek	2007-02-09	51,47	2,33	4,52
Sobota	2007-02-10	55,15	3,62	6,57
Niedziela	2007-02-11	51,55	3,35	6,49

Tab. 4. *Przykładowa analiza jakości prognozy wg optymalnych sieci liniowych dla wybranego tygodnia w wydzielonym rejonie sieci wodociągowej we Wrocławiu. Horyzont prognozy równy jednej dobie*

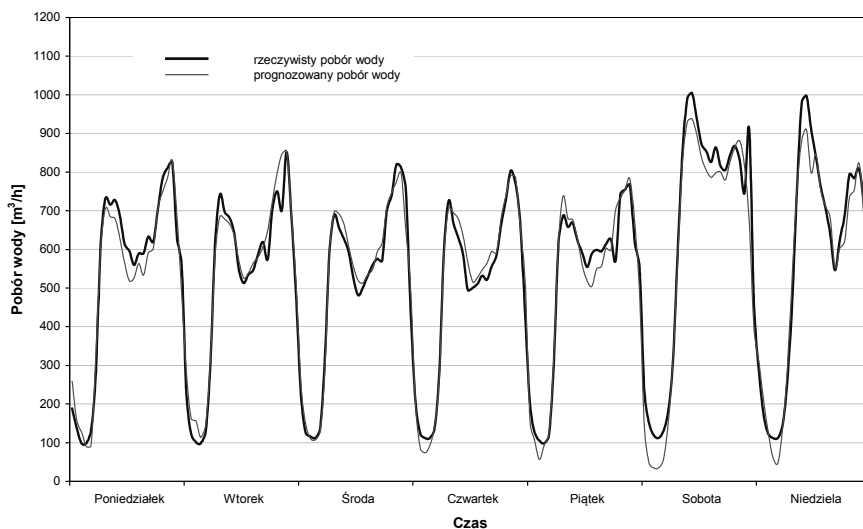
Tab. 4. *Example analysis of the forecast quality according to an optimal linear network for a selected week within a separate water supply subsystem in Wrocław. Forecast horizon: 24 h*

Dzień tygodnia	Data	Średni pobór wody [m ³ /h]	Bezwzględny średniokwadratowy błąd prognozy [m ³ /h]	Względny średniokwadratowy błąd prognozy [%]
Poniedziałek	2001-10-08	539,06	42,49	7,88
Wtorek	2001-10-09	519,17	43,50	8,38
Środa	2001-10-10	509,10	33,52	6,58
Czwartek	2001-10-11	498,31	33,71	6,76
Piątek	2001-10-12	514,94	44,38	8,62
Sobota	2001-10-13	636,64	73,87	11,60
Niedziela	2001-10-14	569,41	48,59	8,53



Rys. 1. Rzeczywiste i prognozowane wg optymalnych sieci liniowych godzinowe pobory wody w czasie od 05.02.2007 do 11.02.2007 w wydzielonym rejonie sieci wodociągowej w Kłodzku. Horyzont prognozy równy 1 dobie

Fig. 1. Real and forecasted (according to the optimal linear networks) hourly water demands in the time span of 5 to 11 February 2007 within a separate water supply subsystem in Kłodzko. Forecast horizon: 24 h



Rys. 2. Rzeczywiste i prognozowane wg optymalnych sieci liniowych godzinowe pobory wody w czasie od 08.10.2001 do 14.10.2001 w wydzielonym rejonie sieci wodociągowej we Wrocławiu. Horyzont prognozy równy 1 dobie

Fig. 2. Real and forecasted (according to the optimal linear networks) hourly water demands in the time span of 8 to 14 October 2001 within a separate water supply subsystem in Wrocław. Forecast horizon: 24 h

Perceptron wielowarstwowy MLP

Są to sieci jednokierunkowe składające się z warstw: wejściowej, ukrytych i wyjściowej. W sieci perceptronowej każdy z neuronów oblicza ważoną sumę swoich wejść, a wyznaczony w ten sposób poziom pobudzenia staje się argumentem funkcji aktywacji (najczęściej jest to funkcja liniowa lub hiperboliczna), za pomocą której jest obliczana wartość wyjściowa neuronu. Następnie w każdej warstwie należy dobrać wartości wag i wartości progowe (bias) wszystkich neuronów. Proces ten jest realizowany za pomocą algorytmu uczenia. Najczęściej stosowanymi algorytmami uczenia są: wsteczna propagacja błędów, gradienty sprzężone, Quasi-Newtona (BFGS), Levenberga-Marquardta, Delta-bar-delta [5].

Dla obu rejonów sieci wodociągowej i dla każdego z trzech określonych poprzednio zbiorów (uczącego, walidacyjnego i testowego) przeprowadzono analizy mające na celu wstępne wyznaczenie: wielkości opóźnienia (5, 10 i 15 dni), ilości warstw ukrytych (1 lub 2 warstwy), ilości neuronów w poszczególnych warstwach ukrytych (1–25 neuronów). W analizach wykorzystano jednoetapowy proces uczenia (Quasi-Newtona - BFGS) oraz zastosowano różne funkcje aktywacji w warstwie wejściowej i wyjściowej (liniową, logistyczną, tangens hiperboliczny, wykładniczą i sinusoidalną).

Po przeprowadzeniu analiz dla każdego szeregu wybrano po jednej strukturze sieci perceptronowej, wykazującej wstępnie najmniejsze względne średniokwadratowe błędy modelu. Modele charakteryzujące się najmniejszymi względnymi średniokwadratowymi błędami poddano dokładnym analizom, aby zminimalizować błędy prognoz.

Rezultatem owych analiz było uzyskanie struktur sieci perceptronowych wykazujących najmniejsze średniokwadratowe błędy w modelowaniu i prognozowaniu dobowych profili godzinowych rozbiorów wody. W tabelach 5 i 6 zestawiono przykładowe struktury optymalnych sieci, a także metody ich uczenia i błędy średniokwadratowe. Do opisu struktury sieci zastosowano oznaczenia stosowane w programie STATISTICA.

Praktyczną efektywność modelowania i prognozowania przy wykorzystaniu perceptronowych sieci neuronowych ilustrują wyniki analiz zamieszczone w tabelach 7 i 8 oraz na rysunkach 3 i 4.

Tab. 5. Wyniki analiz dotyczących wyboru optymalnych struktur sieci perceptronowych dla szeregów czasowych godzinowego poboru wody w wydzielonym rejonie sieci wodociągowej w Kłodzku, przyjętych do generowania prognoz

Tab. 5. Results of the analysis of optimal perceptron network structures choice for the time series of 1-hour water demands within a separate water supply subsystem in Kłodzko, assumed for the generation of forecasts

Typ dnia	Struktura modelu	Średni pobór wody [m ³ /h]	Bezwzględny średniokwadratowy błąd modelu [m ³ /h]	Względny średniokwadratowy błąd modelu [%]	Współczynnik korelacji
Robocze	MLP s120 1:120-14-1:1	55,08	2,91	5,29	0,9888
	metoda uczenia: Quasi-Newtona (BFGS)				
Soboty	MLP s60 1:60-13-1:1	58,73	3,04	5,18	0,9907
	metoda uczenia: Quasi-Newtona (BFGS)				
Niedziele wraz z dniami świątecznymi	MLP s120 1:120-11-1:1	51,86	3,53	6,80	0,9854
	metoda uczenia: Quasi-Newtona (BFGS)				

Tab. 6. Wyniki analiz dotyczących wyboru optymalnych struktur sieci perceptronowych dla szeregów czasowych godzinowego poboru wody w wydzielonym rejonie sieci wodociągowej we Wrocławiu, przyjętych do generowania prognoz

Tab. 6. Results of the analysis of optimal perceptron network structures choice for the time series of 1-hour water demands within a separate water supply subsystem in Wrocław, assumed for the generation of forecasts

Typ dnia	Struktura modelu	Średni pobór wody [m ³ /h]	Bezwzględny średniokwadratowy błąd modelu [m ³ /h]	Względny średniokwadratowy błąd modelu [%]	Współczynnik korelacji
Robocze	MLP s120 1:120-9-1:1	447,59	25,68	5,74	0,9896
	metoda uczenia: I etap - Quasi-Newtona (BFGS), II etap - gradienty sprzężone				
Soboty	MLP s60 1:60-6-1:1	505,03	25,59	5,07	0,9933
	metoda uczenia: Quasi-Newtona (BFGS)				
Niedziele wraz z dniami świątecznymi	MLP s120 1:120-9-1:1	463,30	33,03	7,13	0,9893
	metoda uczenia: Quasi-Newtona (BFGS)				

Tab. 7. *Przykładowa analiza jakości prognozy wg optymalnej sieci perceptronowej dla wybranego tygodnia w wydzielonym rejonie sieci wodociągowej w Kłodzku. Horyzont prognozy równy jednej dobie*

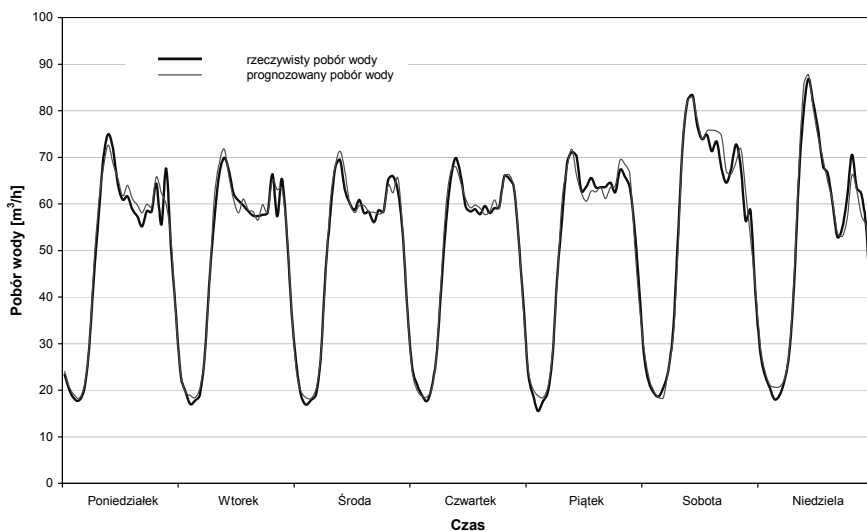
Tab. 7. *Example of the analysis of a forecast quality according to optimal perceptron network for a selected week within a separate water supply subsystem in Kłodzko. Forecast horizon: 24 h*

Dzień tygodnia	Data	Średni pobór wody [m ³ /h]	Bezwzględny średniokwadratowy błąd prognozy [m ³ /h]	Względny średniokwadratowy błąd prognozy [%]
Poniedziałek	2007-02-05	49,77	2,72	5,47
Wtorek	2007-02-06	49,10	1,97	4,02
Środa	2007-02-07	49,19	1,67	3,40
Czwartek	2007-02-08	49,47	1,37	2,77
Piątek	2007-02-09	51,47	2,20	4,28
Sobota	2007-02-10	55,15	2,97	5,39
Niedziela	2007-02-11	51,55	2,48	4,82

Tab. 8. *Przykładowa analiza jakości prognozy wg optymalnej sieci perceptronowej dla wybranego tygodnia w wydzielonym rejonie sieci wodociągowej we Wrocławiu. Horyzont prognozy równy jednej dobie*

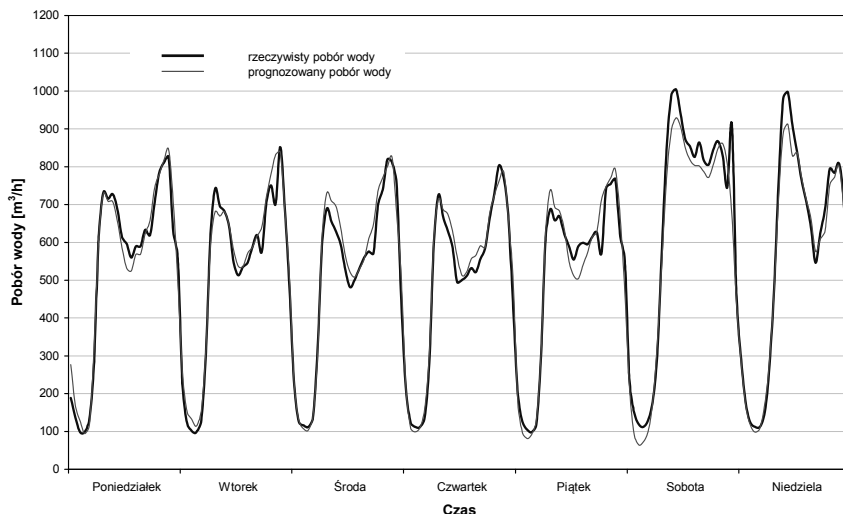
Tab. 8. *Example of the analysis of a forecast quality according to optimal perceptron network for a selected week within a separate water supply subsystem in Wrocław. Forecast horizon: 24 h*

Dzień tygodnia	Data	Średni pobór wody [m ³ /h]	Bezwzględny średniokwadratowy błąd prognozy [m ³ /h]	Względny średniokwadratowy błąd prognozy [%]
Poniedziałek	2001-10-08	539,06	37,01	6,86
Wtorek	2001-10-09	519,17	37,84	7,29
Środa	2001-10-10	509,10	37,90	7,44
Czwartek	2001-10-11	498,31	29,93	6,01
Piątek	2001-10-12	514,94	46,48	9,03
Sobota	2001-10-13	636,64	66,17	10,39
Niedziela	2001-10-14	569,41	37,65	6,61



Rys. 3. Rzeczywiste i prognozowane wg optymalnych sieci perceptronowych godzinowe pobory wody w czasie od 05.02.2007 do 11.02.2007 w wydzielonym rejonie sieci wodociągowej w Kłodzku. Horyzont prognozy równy 1 dobie

Fig. 3. Real and forecasted (according to the optimal perceptron networks) hourly water demands in the time span of 5 to 11 February 2007 within a separate water supply subsystem in Kłodzko. Forecast horizon: 24 h



Rys. 4. Rzeczywiste i prognozowane wg optymalnych sieci perceptronowych godzinowe pobory wody w czasie od 08.10.2001 do 14.10.2001 w wydzielonym rejonie sieci wodociągowej we Wrocławiu. Horyzont prognozy równy 1 dobie

Fig. 4. Real and forecasted (according to the optimal perceptron networks) hourly water demands in the time span of 8 to 14 October 2001 within a separate water supply subsystem in Wrocław. Forecast horizon: 24 h

Sieci o radialnych funkcjach bazowych RBF

Sieci o radialnych funkcjach bazowych (RBF) mają pojedynczą warstwę ukrytą z neuronami radialnymi i liniową warstwę wyjściową (z iloczynem skalarnym). Neurony warstwy ukrytej funkcjonują jako centra skupień podobnych przypadków (uczących). Warstwa wyjściowa tworzy funkcję dyskryminacyjną lub regresyjną (zależnie od problemu). Wyboru optymalnych struktur sieci RBF (tabele 9 i 10) dokonano analizując kilkadziesiąt różnych modeli i optymalizując:

- liczbę wejść sieci (od 1-240),
- liczbę neuronów w warstwie ukrytej (od 1-180).

Uczenie sieci przeprowadzono metodami:

- KM – K - średnich (Means) - określanie wag neuronów radialnych,
- KN – K - najbliższych sąsiadów - określanie promienia (odchylenia),
- PI - Pseudoinwersji (optymalizacja liniowa najmniejszych kwadratów).

Praktyczną efektywność modelowania i prognozowania przy wykorzystaniu sieci o radialnych funkcjach bazowych ilustrują rezultaty analiz zamieszczone w tabelach 9, 10, 11 i 12 oraz na rysunkach 5 i 6. Wynika z nich, że przydatność owych sieci do prognozowania dobowych histogramów godzinowego poboru wody jest ograniczona i mniejsza, niż sieci liniowych oraz perceptronowych. Jedną z przyczyn jest fakt, że sieci tego typu są wrażliwe na dużą liczbę neuronów wejściowych. Ponadto wykresy pokazane na rysunkach 5 i 6 wskazują, że prognoza nie „nadąża” za szybkimi zmianami w czasie poboru wody.

Tab. 9. Wyniki analiz dotyczących wyboru optymalnych struktur sieci o radialnych funkcjach bazowych (RBF) dla szeregów czasowych godzinowego poboru wody w wydzielonym rejonie sieci wodociągowej w Kłodzku, przyjętych do generowania prognoz

Tab. 9. Analysis of the choice of optimal networks based on radial functions structures for the time series of 1-hour water demands within a separate water supply subsystem in Kłodzko, assumed for the generation of the forecasts

Typ dnia	Struktura modelu	Średni pobór wody [m ³ /h]	Bezwzględny średniokwadratowy błąd modelu [m ³ /h]	Względny średniokwadratowy błąd modelu [%]	Współczynnik korelacji
Robocze	RBF s120 1:120-132-1:1	55,08	3,54	6,43	0,9841
	metoda uczenia: K-średnich (KM); K-najbliższych sąsiadów (KN); Pseudoinwersji (PI)				
Soboty	RBF s50 1:50-20-1:1	58,63	4,70	8,02	0,9795
	metoda uczenia: K-średnich (KM); K-najbliższych sąsiadów (KN); Pseudoinwersji (PI)				
Niedziele wraz z dniami świątecznymi	RBF s72 1:72-21-1:1	52,03	4,50	8,65	0,9774
	metoda uczenia: K-średnich (KM); K-najbliższych sąsiadów (KN); Pseudoinwersji (PI)				

Tab. 10. Wyniki analiz dotyczących wyboru optymalnych struktur sieci o radialnych funkcjach bazowych (RBF) dla szeregów czasowych godzinowego poboru wody w wydzielonym rejonie sieci wodociągowej we Wrocławiu, przyjętych do generowania prognoz

Tab. 10. Analysis of the choice of optimal networks based on radial functions structures for the time series of 1-hour water demands within a separate water supply subsystem in Wrocław, assumed for the generation of the forecasts

Typ dnia	Struktura modelu	Średni pobór wody [m ³ /h]	Bezwzględny średniokwadratowy błąd modelu [m ³ /h]	Względny średniokwadratowy błąd modelu [%]	Współczynnik korelacji
Robocze	RBF s60 1:60-37-1:1	447,95	33,06	7,38	0,9829
	metoda uczenia: K-średnich (KM); K-najbliższych sąsiadów (KN); Pseudoinwersji (PI)				
Soboty	RBF s120 1:120-7-1:1	497,93	51,00	10,24	0,9734
	metoda uczenia: K-średnich (KM); K-najbliższych sąsiadów (KN); Pseudoinwersji (PI)				
Niedziele wraz z dniami świątecznymi	RBF s120 1:120-15-1:1	463,30	51,42	11,10	0,9704
	metoda uczenia: K-średnich (KM); K-najbliższych sąsiadów (KN); Pseudoinwersji (PI)				

Tab. 11. Przykładowa analiza jakości prognozy wg optymalnych sieci o radialnych funkcjach bazowych dla wybranego tygodnia w wydzielonym rejonie sieci wodociągowej w Kłodzku. Horyzont prognozy równy jednej dobie

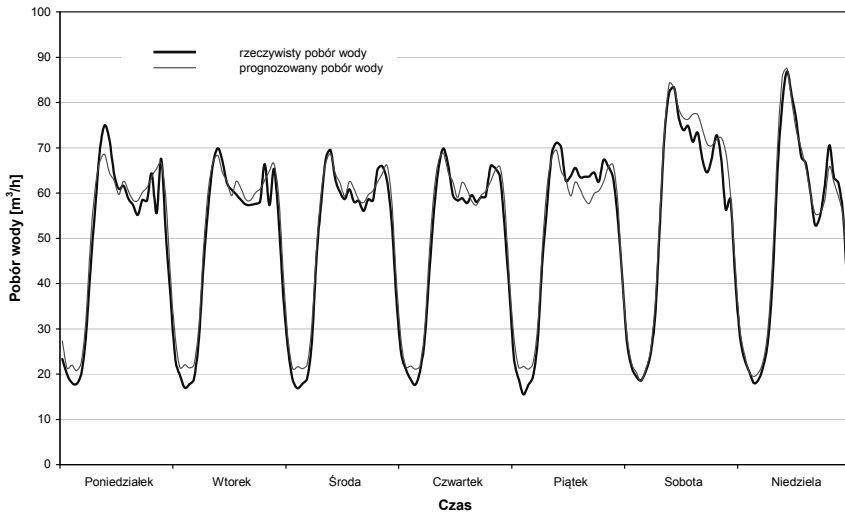
Tab. 11. Example of the analysis of a forecast quality according to optimal networks based on radial functions for a selected week within a separate water supply subsystem in Kłodzko. Forecast horizon: 24 h

Dzień tygodnia	Data	Średni pobór wody [m ³ /h]	Bezwzględny średniokwadratowy błąd prognozy [m ³ /h]	Względny średniokwadratowy błąd prognozy [%]
Poniedziałek	2007-02-05	49,77	4,24	8,52
Wtorek	2007-02-06	49,10	3,39	6,90
Środa	2007-02-07	49,19	2,67	5,44
Czwartek	2007-02-08	49,47	2,65	5,36
Piątek	2007-02-09	51,47	3,69	7,16
Sobota	2007-02-10	55,15	3,95	7,17
Niedziela	2007-02-11	51,55	2,75	5,33

Tab. 12. Przykładowa analiza jakości prognozy wg optymalnych sieci o radialnych funkcjach bazowych dla wybranego tygodnia w wydzielonym rejonie sieci wodociągowej we Wrocławiu. Horyzont prognozy równy jednej dobie

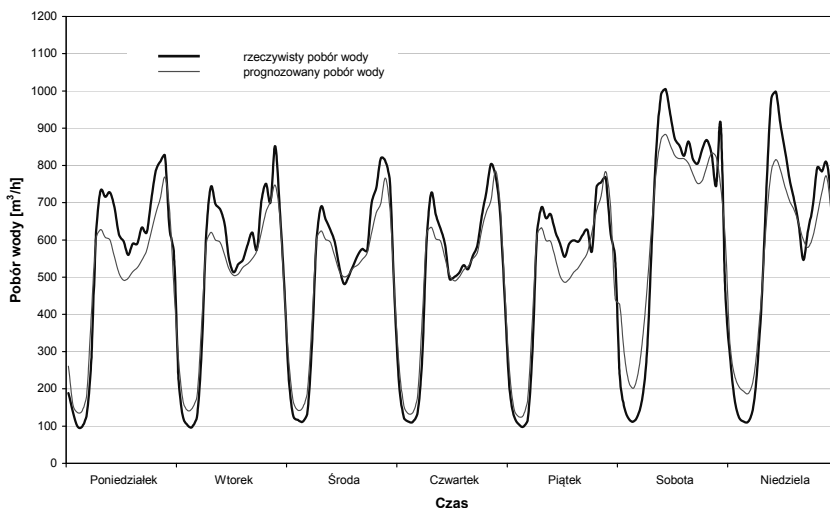
Tab. 12. Example of the analysis of a forecast quality according to optimal networks based on radial functions for a selected week within a separate water supply subsystem in Wrocław. Forecast horizon: 24 h

Dzień tygodnia	Data	Średni pobór wody [m ³ /h]	Bezwzględny średniokwadratowy błąd prognozy [m ³ /h]	Względny średniokwadratowy błąd prognozy [%]
Poniedziałek	2001-10-08	539,06	85,13	15,79
Wtorek	2001-10-09	519,17	61,53	11,85
Środa	2001-10-10	509,10	49,00	9,62
Czwartek	2001-10-11	498,31	45,42	9,12
Piątek	2001-10-12	514,94	64,10	12,45
Sobota	2001-10-13	636,64	103,95	16,33
Niedziela	2001-10-14	569,41	86,53	15,20



Rys. 5. Rzeczywiste i prognozowane wg optymalnych sieci o radialnych funkcjach bazowych godzinowe pobory wody w czasie od 05.02.2007 do 11.02.2007 w wydzielonym rejonie sieci wodociągowej w Kłodzku. Horyzont prognozy równy 1 dobie

Fig. 5. Real and forecasted (according to the optimal networks based on radial functions) hourly water demands in the time span of 5 to 11 February 2007 within a separate water supply subsystem in Kłodzko. Forecast horizon: 24 h



Rys. 6. Rzeczywiste i prognozowane wg optymalnych sieci o radialnych funkcjach bazowych godzinowe pobory wody w czasie od 08.10.2001 do 14.10.2001 w wydzielonym rejonie sieci wodociągowej we Wrocławiu. Horyzont prognozy równy 1 dobie

Fig. 6. Real and forecasted (according to the optimal networks based on radial functions) hourly water demands in the time span of 8 to 14 October 2001 within a separate water supply subsystem in Wrocław. Forecast horizon: 24 h

5. Podsumowanie i wnioski końcowe

Zaprezentowane w niniejszym artykule rezultaty oraz analiza efektywności bieżącego prognozowania dobowych profili godzinowego poboru wody z wydzielonych rejonach miejskich sieci wodociągowych w Kłodzku i we Wrocławiu wskazują na relatywnie dobrą jakość predykcji za pomocą neuronowych sieci liniowych i perceptronowych, porównywalną lub lepszą od jakości predykcji wg modeli klasy ARIMA i metod wykładniczego wygładzania szeregów czasowych, omówionych w [6]. Sieci liniowe stanowią dobry punkt odniesienia, z którym porównuje się jakość innych modeli neuronowych. Jeśli problem, który jest uważany za złożony, może zostać rozwiązany równie dobrze przez sieć liniową, jak i przez inną sieć neuronową o złożonej nieliniowej strukturze, to w takim przypadku należy wykorzystywać model liniowy, jako prostszy - o ile oczywiście ten drugi nie dopasowuje się znacząco lepiej do posiadanych danych [5].

Perceptron wielowarstwowy charakteryzuje się prostotą struktur z jedną warstwą ukrytą, przez co proces jego douczania lub uczenia od nowa nie wymaga długotrwałych obliczeń. W procedurach doboru struktur sieci perceptronowych można ograniczyć: opóźnienie do 5 dni tego samego typu (robocze, soboty oraz niedziele wraz z dniami świątecznymi), ilość warstw ukrytych - do 1 oraz ilości neuronów w warstwie ukrytej: do 15. Jakości prognoz generowanych przez sieci liniowe i perceptronowe są porównywalne.

Przydatność sieci o radialnych funkcjach bazowych do prognozowania dobowych histogramów godzinowego poboru wody jest ograniczona i mniejsza, niż sieci liniowych oraz perceptronowych. Jedną z przyczyn jest fakt, że sieci tego typu są wrażliwe na dużą liczbę

neuronów wejściowych. Ponadto wykresy pokazane na rysunkach 5 i 6 wskazują, że prognoza nie „nadaża” za szybkimi zmianami w czasie poboru wody.

Doboru optymalnych struktur sieci można dokonywać w oparciu o pakiety „sieci neuronowe” programu STATISTICA.

Bibliografia

- [1] Cieżak, W., Siwoń, Z., Cieżak, J. Zastosowanie sztucznych sieci neuronowych do prognozowania szeregów czasowych krótkotrwałego poboru wody w wybranych systemach wodociągowych. *Ochrona Środowiska*, 2006, 1, 39-44
- [2] Jain, A., Ormsbee, L. Evaluation of Short-Term Water Demand Forecast Modeling Techniques: Conventional Methods versus. *Journal AWWA*, 2002, 94 (7), 64 -72
- [3] Łomotowski, J., Siwoń, Z. Metodyka analizy danych pochodzących z monitoringu systemów wodociągowo-kanalizacyjnych. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, 2010, 3, 16-20
- [4] Osowski, S. Sieci neuronowe do przetwarzania informacji. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2000
- [5] Program STATISTICA. *Sieci Neuronowe*
- [6] Siwoń, Z., Łomotowski, J., Cieżak, W., Licznar, P., Cieżak, J. Analizy i prognozowanie rozbiórów wody w systemach wodociągowych. *PAN, Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej, Instytut Podstawowych Problemów Techniki. STUDIA Z ZAKRESU INŻYNIERII*, 2008, 61
- [7] Siwoń, Z., Cieżak, W. Wybrane problemy kalibracji modeli przepływów w systemach dystrybucji wody. *Instal*, 2008, wyd. spec., 79-85
- [8] Siwoń, Z., Cieżak, W., Cieżak, J. Modele neuronowe szeregów czasowych krótkotrwałego zużycia wody w osiedlach mieszkaniowych. *XX Krajowa, VIII Międzynarodowa Konferencja „Zaopatrzenie w wodę, jakość i ochrona wód”*, Poznań – Gniezno, 2008, t. I, 79 –92