

Wojciech Cieżak, Zbigniew Siwoń, Jan Cieżak

Zastosowanie sztucznych sieci neuronowych do prognozowania szeregów czasowych krótkotrwałego poboru wody w wybranych systemach wodociągowych

Bieżące (o krótkim horyzoncie) prognozy poboru wody z miejskich sieci wodociągowych są obecnie wykorzystywane przede wszystkim do [1]:

- komputerowych badań symulacyjnych, których celem jest wszechstronna analiza działania systemu zaopatrzenia w wodę,

- optymalizacji sterowania szeroko pojętymi procesami zaopatrzenia w wodę (ujmowanie, oczyszczanie i dystrybucja wody) w zadanym horyzoncie optymalizacji, przy zachowaniu między innymi wymagań ilościowych dotyczących przewidywanego zapotrzebowania na wodę,

- wyznaczania optymalnych poleceń operacyjnych w procesach oczyszczania i dystrybucji wody oraz oczyszczania ścieków [2]; w systemach automatycznego sterowania procesem oczyszczania wody i jej dystrybucją, układ regulacji odbiera zmiany poboru wody lub zapotrzebowania na nią jako zakłócenia, które powinny być kompensowane zmianami wielkości sterującej.

W sterowaniu dystrybucją wody konieczne jest między innymi dysponowanie skalibrowanym modelem hydraulicznym, a także modelem prognostycznym zapotrzebowania na wodę. Należy zauważyć, że – jak dotychczas – przeważająca większość prac z zakresu metodologii bieżącego i krótkoterminowego prognozowania poboru wody dotyczy szeregów czasowych poboru dobowego [3–7], a nie godzinowego lub o krótszym czasie trwania [8–16]. W pracach [9, 10, 12–14, 16] zostały zaprezentowane wyniki weryfikacji metod prognozowania krótkotrwałego poboru wody przy wykorzystaniu modeli ARIMA i dwóch metod wykładniczego wygładzania szeregów czasowych. W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań nad możliwością wykorzystania perceptronowych sieci neuronowych do prognozowania krótkotrwałego poboru wody.

Dane wyjściowe do analizy

Do identyfikacji i weryfikacji modeli prognostycznych wykorzystano wyniki ciągłych pomiarów całkowitego poboru wody w systemie wodociągowym Brzegu oraz w wydzielonym rejonie sieci wodociągowej we Wrocławiu. System zaopatrzenia w wodę Brzegu jest zasilany tylko z jednego źródła. Woda jest dostarczana do miejskiej sieci wodociągowej z pompowni drugiego stopnia dwoma rurociągami tłocznymi (śr. 350 mm i 500 mm), z ciągłym przekazem wyników pomiarów natężeń przepływu do dyspozytorni. Wydzielona

strefa sieci wodociągowej we Wrocławiu, obejmująca dzielnice mieszkaniowe Nowy Dwór i Gądów wraz z usługami podstawowymi, jest zasilana z pompowni strefowej przy pomocy dwóch rurociągów, na których są zainstalowane przepływomierze elektromagnetyczne z ciągłą rejestracją wskazań. Chronologicznie uszeregowane wyniki pomiarów poboru wody przez wszystkich jej konsumentów (w czasie od 2 stycznia 2001 r. do 31 października 2002 r. w Brzegu i od 25 kwietnia 2001 r. do 15 października 2001 r. we Wrocławiu) stanowiły wyjściowe szeregi czasowe poddane analizie. Pierwszym krokiem w tej analizie był podział całego zbioru obserwacji na szeregi czasowe grupujące wyniki pomiarów w dniach roboczych oraz oddzielnie w soboty i niedziele wraz z dniami świątecznymi. Każdy analizowany szereg czasowy poddano badaniom statystycznym mającym na celu wyeliminowanie błędów grubych, spowodowanych awariami w systemie dystrybucji wody oraz oczywistymi błędami pomiarów.

Zgodnie z procedurą zaproponowaną w pracach [9, 10], kolejnym etapem analizy, umożliwiającym minimalizację błędów modeli, było wygładzenie empirycznego szeregu czasowego $\{q_j\}$ za pomocą funkcji drgań harmonicznich (szeregu Fouriera) w celu dekompozycji empirycznego szeregu czasowego zawierającego składniki cykliczne na r funkcji sinusoidalnych o określonych długościach fal. Do wyrównania periodogramów zastosowano transformację ważonej średniej ruchomej (transformację Hamminga), w której wagi oblicza się wg zależności:

$$w_j = 0,54 + 0,46 \cos\left(\frac{\pi j}{p}\right) \quad (\text{dla } j=0 \rightarrow p) \quad (1)$$

$$w_{-j} = w_j \quad (\text{dla } j \neq 0) \quad (2)$$

$$p = \frac{m-1}{2} \quad (3)$$

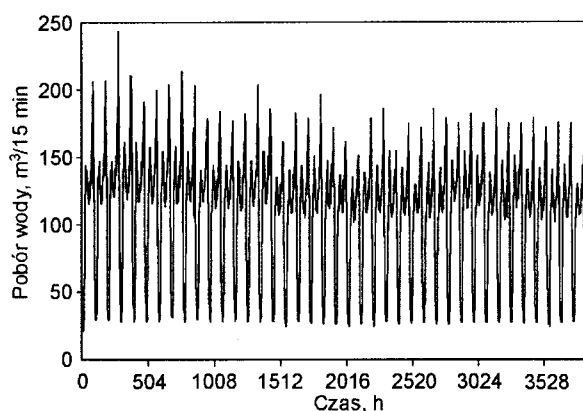
w których:

m – szerokość okna (przyjęto $m=3$)

Przykład surowego szeregu czasowego 15-minutowych poborów wody w wydzielonym rejonie sieci wodociągowej we Wrocławiu pokazano na rysunku 1.

Wyniki modelowania

Sieci neuronowe mają szereg cech, dzięki którym mogą stanowić przydatne narzędzie do analizy i prognozowania szeregów czasowych. Ich atrakcyjność wynika przede wszystkim z możliwości aproksymacji dowolnych nieliniowości oraz dostrajania przyjętej struktury na podstawie danych eksperymentalnych. Co więcej, proces budowy modelu neuronowego



Rys. 1. Przykładowy surowy szereg czasowy piętnastominutowego poboru wody w wydzielonym rejonie sieci wodociągowej we Wrocławiu (od 18-06-2001 do 10-08-2001, dni robocze)

polega na eksploracji dostępnych zbiorów danych i prowadzi do całkowitego 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 czego modele neuronowe mogą znaleźć zastosowanie wszędzie tam, gdzie nie jest znane dokładne prawo opisujące kształtowanie się badanych zależności.

Dodatkową zaletą sieci neuronowych jest łatwość ich adaptacji do zmiennych warunków środowiska. Cecha ta predysponuje je do opisu zależności i systemów zmieniających się w czasie. Nieustanna ewolucja zmian dynamiki procesu poboru wody oraz wpływ warunków zewnętrznych znacząco utrudniają stosowanie wszelkich metod obliczeniowych opartych na koncepcji modelu stacjonarnego [15]. Tymczasem w przypadku 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.

Znanych jest wiele typów i rodzajów sieci neuronowych, różniących się między sobą strukturą i działaniem. Obecnie najpopularniejszym i najlepiej opisanym teoretycznie jest perceptron wielowarstwowy, składający się z trzech lub więcej warstw (wejściowej, ukrytych i wyjściowej) oraz zawartych w nich neuronów. W artykule zaprezentowano wyniki analiz skuteczności prognozowania szeregów czasowych poboru wody za pomocą tego typu sieci neuronowych.

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 oraz Quasi-Newtona (BFGS), Levenberga-Marquardta i Delta-bar-delta. Proces uczenia (doboru wag dla poszczególnych neuronów) jest ważnym zadaniem, ponieważ od niego zależy w znacznej mierze to, czy wyznaczony model będzie dobrze opisywał wartości przyszłe (nie znane dla modelu). Na obecnym etapie rozwoju teorii sztucznych sieci neuronowych proces ten nie jest sformalizowany, bowiem nie

ma jednoznacznej metody optymalnego doboru zarówno liczby warstw neuronów, jak i wag oraz progów w taki sposób, aby zapewnić minimalizację błędów działania sieci. Należy przeprowadzić szereg eksperymentów, uwzględniając różne wartości parametrów i wybrać na ich podstawie model optymalny.

Zbiory wyników pomiarów krótkotrwałego poboru wody, przyjęte do analizy i uczenia wielowarstwowych sieci perceptronowych, podzielono na szeregi czasowe zawierające odpowiednio obserwacje poboru wody w dni robocze, soboty oraz dni wolne od pracy (niedziele i święta) w czasie od 2 stycznia do 31 października 2001 roku (miasto Brzeg) oraz w czasie od 25 kwietnia do 16 września 2001 r. (wydzielony rejon sieci wodociągowej we Wrocławiu). Przedziały czasu od 1 listopada 2001 r. do 31 października 2002 r. (Brzeg) oraz od 17 września do 15 października 2001 r. (wydzielony rejon sieci wodociągowej we Wrocławiu) zostały wydzielone w celu sprawdzenia jakości prognoz generowanych przez wybrane optymalne modele prognostyczne.

Dla każdego z trzech szeregów przeprowadzono analizy mające na celu wstępne określenie:

- opóźnienia (5 d, 10 d i 15 d),
- liczby warstw ukrytych (1 lub 2 warstwy),
- liczby neuronów w poszczególnych warstwach ukrytych (1+25 neuronów)

W analizach wykorzystano jedno- lub dwuetapowy proces uczenia (wsteczną propagację błędów i gradienty sprzężone) oraz zastosowano funkcje aktywacji, w warstwach wejściowej i wyjściowej – liniową, w warstwach ukrytych – hiperboliczną, natomiast wybór zbiorów uczącego, walidacyjnego i testowego został przeprowadzony w taki sposób, aby zapewnić w każdym z nich dane z całego zakresu analizowanego szeregu czasowego poboru wody. 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).

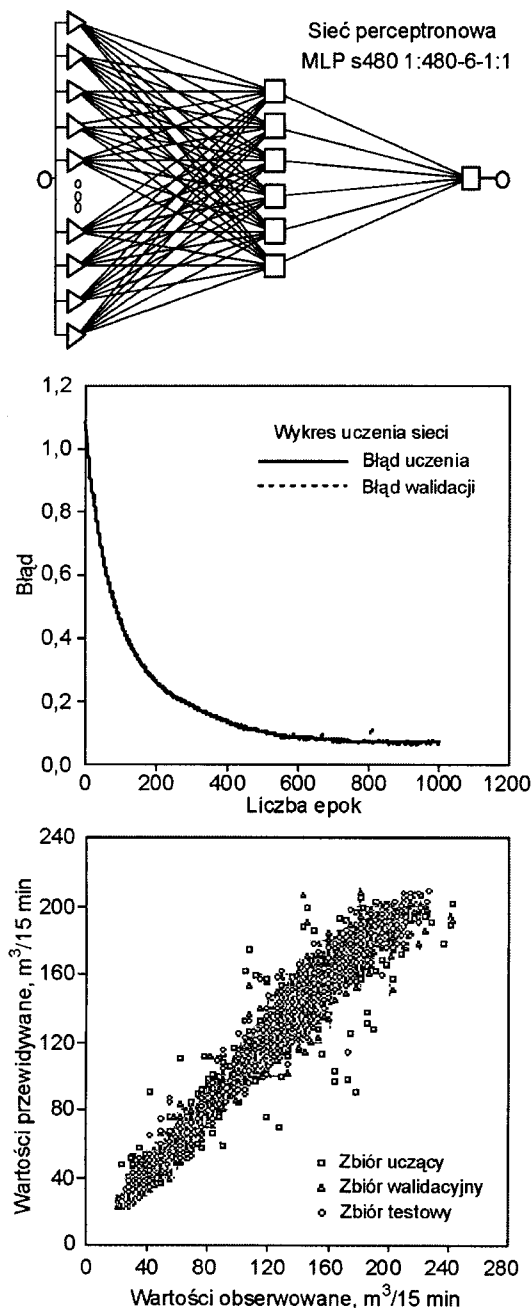
Po przeprowadzeniu analiz dla każdego szeregu wybrano po jednej strukturze sieci perceptronowej wykazującej wstępnie najmniejsze względne średniokwadratowe błędy modelu. Modele charakteryzujące się najmniejszymi względnymi średniokwadratowymi błędami poddano dokładnej analizie, aby w konsekwencji zminimalizować błędy prognoz. W tym celu zastosowano:

- jedno- lub dwuetapowy proces uczenia z zastosowaniem różnych metod uczenia, m.in. wsteczną propagację błędów, gradienty sprzężone oraz Quasi-Newtona (BFGS),
- redukcję wag metodą Weigenda w celu uniknięcia przeuczenia sieci,
- różną liczbę epok (50+2000) oraz powtórnie przeanalizowano wartości opóźnień czasowych,
- funkcję aktywacji, w warstwach wejściowej i wyjściowej – liniową, w warstwie ukrytej – hiperboliczną.

Rezultatem tych analiz było uzyskanie struktur sieci perceptronowych wykazujących najmniejsze błędy średniokwadratowe w modelowaniu i prognozowaniu. W tabeli 1 zestawiono przykładowe struktury optymalnych sieci, a także metody ich uczenia i błędy średniokwadratowe, a przykład schematu optymalnej sieci neuronowej oraz wykres jej uczenia pokazano na rysunku 2.

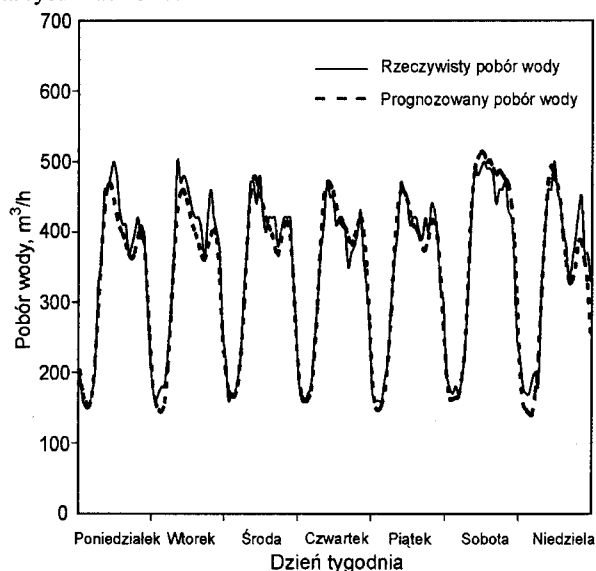
Tabela 1. Wyniki analiz dotyczących wyboru optymalnych struktur sieci perceptronowych dla szeregu czasowego 15-min poboru wody, przyjętych do generowania prognoz (wydzielony rejon sieci wodociągowej we Wrocławiu)

Dzień	Struktura modelu	Średni pobór wody m^3/h	Bezwzględny średniokwadratowy błąd modelu m^3/h	Względny średniokwadratowy błąd modelu %	Współczynnik korelacji
Roboczy	MLP s480 1:480-6-1:1	111,9	7,23	6,46	0,9874
	metoda uczenia: wsteczna propagacja błędów, 1000 epok				
Sobota	MLP s240 1:240-5-1:1	126,26	7,01	5,55	0,9921
	metoda uczenia: wsteczna propagacja błędów, 2000 epok				
Niedziela i dni świąteczne	MLP s480 1:480-6-1:1	115,83	9,05	7,82	0,9861
	metoda uczenia: wsteczna propagacja błędów, 1700 epok				

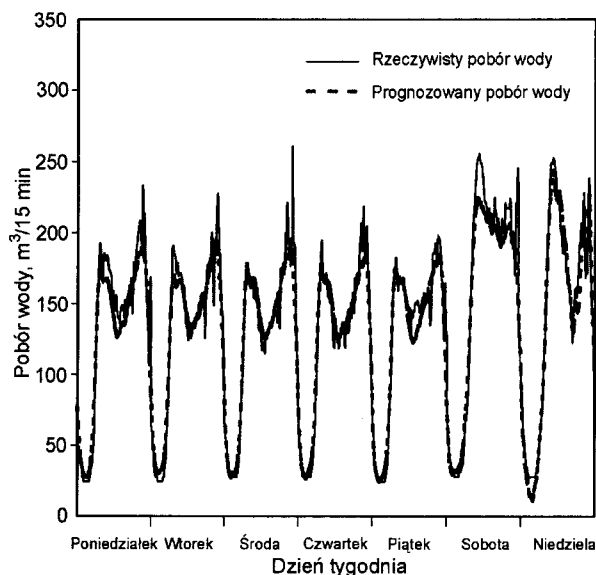


Rys. 2. Struktura optymalnej sieci perceptronowej wraz z wykresem jej uczenia oraz analizą jakościową modelu prognostycznego (piętnastominutowy pobór wody w dniach roboczych w czasie od 25-04-2001 do 16-09-2001 w wydzielonym rejonie sieci wodociągowej we Wrocławiu)

Przykładem praktycznej skuteczności prognozowania przy wykorzystaniu wielowarstwowych perceptronowych sieci neuronowych są wyniki analiz zamieszczone w tabelach 2 i 3 oraz na rysunkach 3–7.



Rys. 3. Rzeczywisty i prognozowany według optymalnych sieci perceptronowych godzinowy pobór wody w Brzegu w czasie od 04-02-2002 do 10-02-2002 (horyzont prognozy równy jednej dobie)



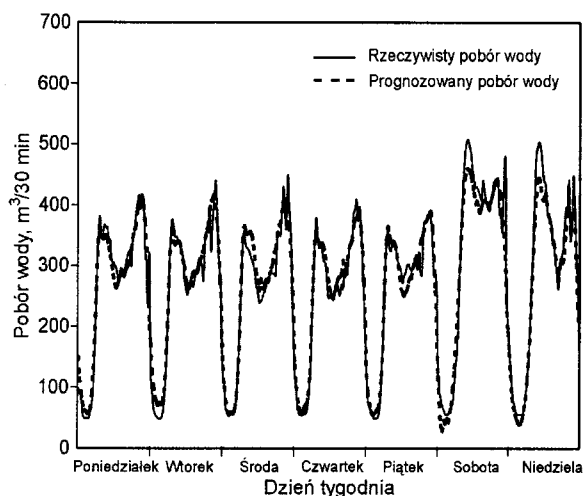
Rys. 4. Rzeczywisty i prognozowany według optymalnych sieci perceptronowych 15-min pobór wody w wydzielonym rejonie sieci wodociągowej we Wrocławiu w czasie od 08-10-2001 do 14-10-2001 (horyzont prognozy równy jednej dobie)

Tabela 2. Analiza jakości prognozy wg optymalnych sieci perceptronowych (godzinowy pobór wody, Brzeg, horyzont prognozy równy jednej dobie)

Dzień tygodnia	Data	Średni pobór wody m^3/h	Bezwzględny średniokwadratowy błąd prognozy m^3/h	Względny średniokwadratowy błąd prognozy %
			Godzinowy pobór wody	
Poniedziałek	04-02-2002	344,17	22,62	6,57
Wtorek	05-02-2002	354,17	29,59	8,36
Środa	06-02-2002	351,67	17,40	4,95
Czwartek	07-02-2002	336,25	18,90	5,62
Piątek	08-02-2002	343,33	17,88	5,21
Sobota	09-02-2002	365,42	21,59	5,91
Niedziela	10-02-2002	340,00	32,63	9,60

Tabela 3. Analiza jakości prognozy wg optymalnych sieci perceptronowych (krótkotrwały pobór wody, wydzielony rejon sieci wodociągowej we Wrocławiu, horyzont prognozy równy jednej dobie)

Dzień tygodnia	Data	Średni pobór wody m^3/h	Bezwzględny średniokwa- dratowy błąd prognozy m^3/h	Względny średniokwa- dratowy błąd prognozy %	Bezwzględny średniokwa- dratowy błąd prognozy m^3/h	Względny średniokwa- dratowy błąd prognozy %	Bezwzględny średniokwa- dratowy błąd prognozy m^3/h	Względny średniokwa- dratowy błąd prognozy %
			piętnastominutowy pobór wody		półgodzinny pobór wody		godzinowy pobór wody	
Poniedziałek	08-10-2001	539,06	65,20	12,09	51,44	9,54	37,01	6,86
Wtorek	09-10-2001	519,17	48,56	9,35	46,34	8,92	37,84	7,29
Środa	10-10-2001	509,10	53,84	10,57	45,56	8,95	37,90	7,44
Czwartek	11-10-2001	498,31	41,40	8,31	33,66	6,76	29,93	6,01
Piątek	12-10-2001	514,94	52,32	10,16	43,62	8,47	46,48	9,03
Sobota	13-10-2001	636,64	73,60	11,56	72,12	11,33	66,17	10,39
Niedziela	14-10-2001	569,41	52,68	9,25	53,98	9,48	37,65	6,61

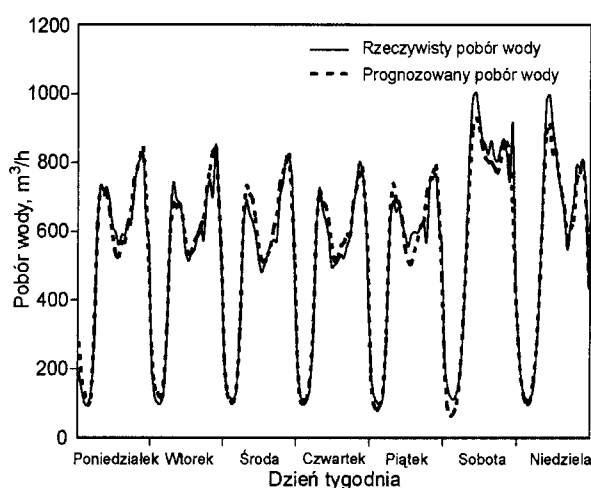


Rys. 5. Rzeczywisty i prognozowany według optymalnych sieci perceptronowych półgodzinny pobór wody w wydzielonym rejonie sieci wodociągowej we Wrocławiu w czasie od 08-10-2001 do 14-10-2001 (horyzont prognozy równy jednej dobie)

Wskazują one na względnie dobrą jakość prognozy, porównywalną lub lepszą od jakości prognozy wg modeli klasy ARIMA i metod wykładniczego wygładzania szeregów czasowych, omówionych w pracach [9,10,12–14,16].

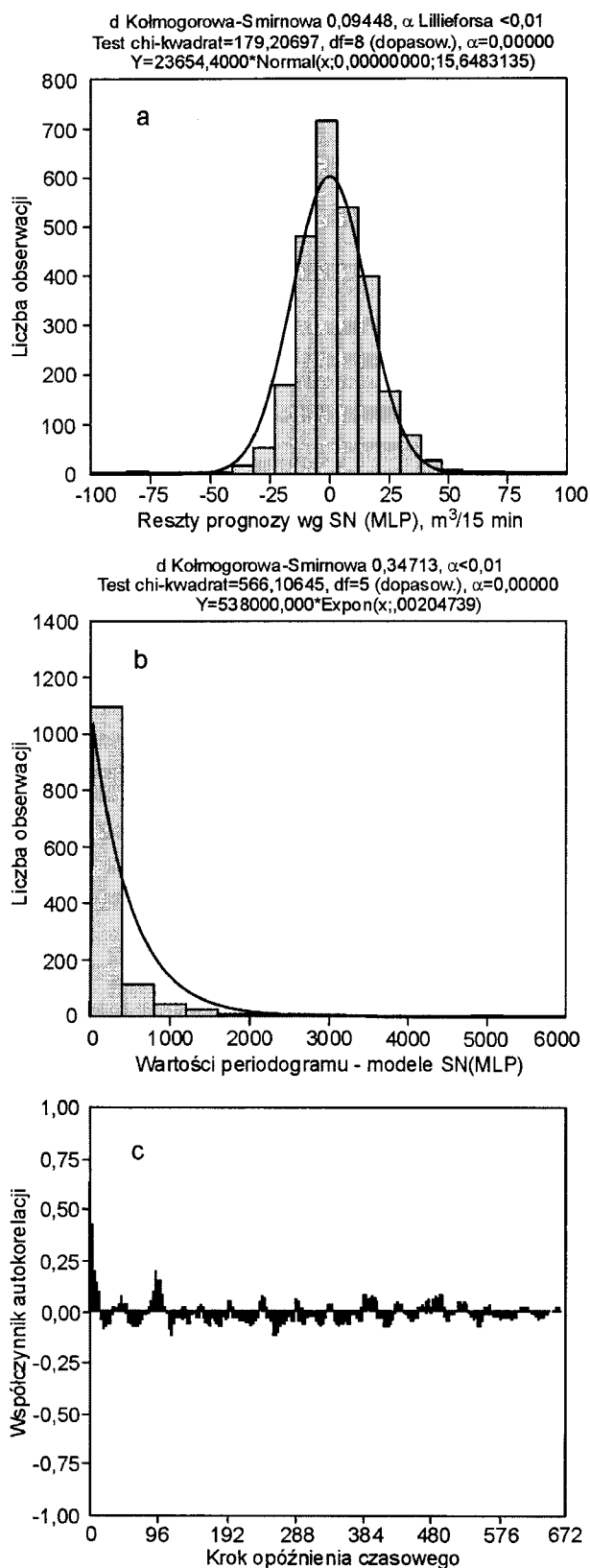
Podsumowanie

Analiza skuteczności stosowania sztucznych sieci neuronowych w bieżącym prognozowaniu szeregów czasowych poboru wody uśrednionych w piętnastominutowych oraz



Rys. 6. Rzeczywisty i prognozowany według optymalnych sieci perceptronowych godzinowy pobór wody w czasie od 08-10-2001 do 14-10-2001. Wydzielony rejon sieci wodociągowej we Wrocławiu, horyzont prognozy równy jednej dobie

półgodzinnych i godzinnych przedziałach czasu wskazuje, że optymalne struktury sieci perceptronowych nie są skomplikowane, przez co proces ich douczania lub uczenia od nowa nie wymaga długotrwałych obliczeń. W praktyce błędy prognozowania przy wykorzystaniu wielowarstwowych perceptronowych sieci neuronowych okazały się porównywalne lub mniejsze od błędów prognoz wg modeli klasy ARIMA i metod wykładniczego wygładzania szeregów czasowych. Zbiór przeszłych obserwacji poboru wody, niezbędny do wyuczenia sieci, powinien zawierać wyniki pomiarów z co najmniej jednego okresu sezonowego.



Rys. 7. Wyniki analiz statystycznych reszt dobrych prognoz 15-min poboru wody wg optymalnych sieci perceptronowych w wydzielonym rejonie sieci wodociągowej we Wrocławiu w czasie od 17-09-2001 do 14-10-2001 (a – rozkład częstości reszt dobrych prognoz 15-min poboru wody wraz z wynikami testów zgodności z rozkładem normalnym, b – rozkład częstości wartości periodogramu reszt dobrych prognoz 15-min poboru wody wraz z wynikami testów zgodności z rozkładem wykładniczym, c – wykres funkcji autokorelacji reszt dobrych prognoz 15-min poboru wody)

LITERATURA

1. Z. SIWOŃ: Metody stochastyczne w prognozowaniu poboru wody i odpływu ścieków. Stan aktualny i kierunki rozwoju techniki. Ekspertyza KILiW PAN, Warszawa 2003 (praca nie publikowana).
2. P. LICZNAR, J. ŁOMOTOWSKI, S. KOTOWSKA: Prognozowanie dobrych wartości dopływów do oczyszczalni ścieków przy wykorzystaniu sztucznych sieci neuronowych o radialnych funkcjach bazowych. Mat. konf. „Problemy gospodarki wodno-ściekowej w regionach rolno-przemysłowych”. Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska PAN, 2005, nr 30, ss. 581–592.
3. T. SŁONIMSKI, K. DUZINKIEWICZ, M. KWIESIELEWICZ, D. TRAWICKI: Analiza możliwości zastosowania sztucznych sieci neuronowych do prognozowania zapotrzebowania na wodę w miejskich sieciach wodociągowych. Mat. konf. „Technologia i Automatyzacja Systemów Wodociągowych i Kanalizacyjnych – TiASWiK’99”, Stawiska 1999, ss. 235–242.
4. A. JAIN, L.E. ORMSBEE: Evaluation of short-term water demand forecast modeling techniques: Conventional methods versus AI. Journal AWWA, 2002, No. 94(7), pp. 64–72.
5. J. ŁOMOTOWSKI: Prognozowanie rozbiórów wody metodą wykładniczą. Mat. konf. „Zastosowanie technik informatycznych w zarządzaniu systemami wodno-kanalizacyjnymi”, Poznań–Wągrowiec 2003, ss. 19–25.
6. P. LICZNAR, J. ŁOMOTOWSKI: Prognozowanie dobrych rozbiórów wody przy wykorzystaniu sztucznych sieci neuronowych. Mat. konf. „Zapotrzenie w wodę, jakość i ochrona wód”, PZITS, Poznań 2004, ss. 175–183.
7. P. LICZNAR: Wykorzystanie sztucznych sieci neuronowych do prognozowania zużycia wody w zakładach wodociągowych. Instal, 2005, nr 11, ss. 16–22.
8. Z. SIWOŃ: Stochastyczne modelowanie procesu zużycia wody i prognozowanie zapotrzebowania na wodę w miastach. Prace Naukowe Instytutu Inżynierii Ochrony Środowiska Politechniki Wrocławskiej nr 56, Monografie nr 25, Wrocław 1986.
9. Z. SIWOŃ, J. STANISŁAWSKI: Über Prognose von Zeitreihen des Stundenwasserbedarfs in Städten und Regionen. Das Gas und Wasserfach, 1991, Nr. 6, S. 322–329.
10. Z. SIWOŃ, J. STANISŁAWSKI: Modelowanie i prognozowanie szeregów czasowych godzinowego poboru wody w miastach i regionach wiejskich. Instytut Budownictwa Wodnego PAN, Rozprawy Hydrotechniczne, 1993, zeszyt 56, ss. 3–32.
11. J.T. DUDA, M. KLEMIATO: Klasyczne i nieklasyczne algorytmy prognozowania zakłóceń w systemach wodociągowych. Mat. konf. „Technologia i Automatyzacja Systemów Wodociągowych i Kanalizacyjnych – TiASWiK’99”, Stawiska 1999, ss. 79–86.
12. Z. SIWOŃ: Problemy krótkoterminowego prognozowania poboru wody w miejskich systemach wodociągowych. Mat. konf. „Aktualne zagadnienia w uzdatnianiu i dystrybucji wody”, Szczyrk 2003, ss. 323–332.
13. Z. SIWOŃ, W. CIEŻAK, J. CIEŻAK: Stochastyczne modele godzinowego poboru wody w wybranym systemie wodociągowym. Ochrona Środowiska, 2005, nr 1, ss. 7–13.
14. Z. SIWOŃ, W. CIEŻAK, J. CIEŻAK: Prognozowanie szeregów czasowych krótkotrwałego poboru wody na przykładzie wybranego systemu wodociągowego. Mat. konf. „Aktualne zagadnienia w uzdatnianiu i dystrybucji wody”, Szczyrk 2005, ss. 329–338.
15. W. CIEŻAK, P. MALINOWSKI, Z. SIWOŃ: Metodologia budowy neuronowego modelu prognostycznego godzinowego rozbioru wody. Gaz Woda Technika Sanitarna, 2005, nr 9, ss. 9–12.
16. W. CIEŻAK: Analiza efektywności metod statystycznych i sztucznych sieci neuronowych w bieżącym prognozowaniu poboru wody w miejskich systemach wodociągowych. Rozprawa doktorska, PWR., Wrocław 2005 (praca nie publikowana).

Cieřak, W., Siwoń, Z., Cieřak, J. Artificial Neural Networks for Predicting Water Demand Time Series in Municipal Water Supply Systems of Choice. *Ochrona Środowiska* 2006, Vol. 28, No. 1, pp. 39–44.

Abstract: Water demand time series were modeled and forecast for the purpose of optimal control of water supply processes in municipal water supply systems. The verification of the artificial neural network models involved a separate water supply subsystem for Wrocław and the water supply system for Brzeg. A structure of artificial neural networks is proposed for

water demand prediction. Methods of statistical data processing for further use with neural networks for water demand prediction are also discussed. The strengths and weaknesses of this approach are pointed out along with its efficiency and accuracy. The results show that the efficiency of neural networks in forecasting the water demand time series is comparable with the efficiency of ARIMA models. Hence, the neural networks can be used as an alternative to the ARIMA models.

Keywords: water-supply system, water demand, forecasting, artificial neuron networks.