

Kamil KAMIŃSKI¹, Władysław KAMIŃSKI¹ i Tomasz MIZERSKI²

ZASTOSOWANIE SZTUCZNYCH SIECI NEURONOWYCH DO OCENY STANU TECHNICZNEGO SIECI WODOCIĄGOWEJ

APPLICATION OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS TO THE ASSESSMENT OF TECHNICAL CONDITION OF WATER SUPPLY SYSTEMS

Abstrakt: Zaprezentowano metodę typowania wodociągów wymagających przeprowadzenia remontu wykorzystującą sztuczne sieci neuronowe (SSN). W badaniach zastosowano dane zawierające informacje z ostatnich 21 lat o parametrach technicznych i wskaźnikach awaryjności ponad 200 odcinków wodociągów, zarówno tych, które poddane zostały remontom w tym okresie, jak i o wodociągach nieremontowanych. Odpowiednio przygotowany zbiór danych wejściowych został wykorzystany do trenowania sieci neuronowej w postaci perceptronu wielowarstwowego. Przedstawiono analizę działania wytrenowanej sieci neuronowej, porównując jej odpowiedzi z podjętymi w przeszłości decyzjami ekspertów o remontach wodociągów. Pomimo dobrej zgodności przewidywań SSN i opinii ekspertów, w większości przypadków stwierdzono około 15% sprzecznych decyzji. Zaproponowana metoda umożliwia stworzenie systemu eksperckiego, którego wdrożenie może poprawić wykorzystanie zasobów finansowych przedsiębiorstwa, przeznaczanych na utrzymanie niezawodnej infrastruktury wodnej.

Słowa kluczowe: sieci wodociągowe, prognoza remontów wodociągów, perceptron wielowarstwowy

Wprowadzenie

Zadaniem systemów zaopatrzenia w wodę jest ujmowanie, uzdatnianie oraz dostarczanie wody do odbiorców. W skład takiego systemu wchodzi zazwyczaj następujące podsystemy: ujmowania wody, jej oczyszczania, uzdatniania i transportu, a także podsystem pompowania, gromadzenia i dystrybucji wody [1]. W Polsce za 73% zużycia wody z wodociągów miejskich odpowiedzialne są gospodarstwa domowe [2]. Istotne jest, aby końcowi odbiorcy otrzymywali wodę nie tylko wysokiej jakości, ale również aby dostawy spełniały wymagania odnośnie do parametrów technicznych, takich jak np. odpowiednie ciśnienie wody w ciągu doby, ale i na przestrzeni roku.

Wysoce awaryjnym i jednocześnie najbardziej kapitałochłonnym (nawet 70% wartości) elementem systemu zaopatrzenia w wodę, szczególnie w przypadku dużych miast, jest sieć wodociągowa [3]. Jej zadaniem jest rozprowadzanie wody z podsystemu gromadzenia wody do przyłączy wodnych, skąd dalej dostarczana jest do odbiorców. Wysoka awaryjność wynika w głównej mierze z faktu, iż relatywnie duża liczba przewodów rozdzielczych skupiona jest na stosunkowo małej powierzchni, co wpływa również na dużą kapitałochłonność. Przewody rozprowadzające wodę w mieście często poddawane są systematycznym obciążeniom mechanicznym, np. jeśli leżą one w pobliżu pasa drogi. Biorąc pod uwagę, iż ponad połowa wszystkich awarii dotyczy właśnie przewodów rozdzielczych, niezwykle istotną staje się potrzeba ich utrzymania w odpowiednim stanie technicznym. To z kolei wymaga przeprowadzania systematycznych

¹ Katedra Termodynamiki Procesowej, Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska, Politechnika Łódzka, ul. Wólczańska 213, 90-924 Łódź, tel. 42 631 37 90, e-mail: kamil.kaminski@p.lodz.pl

² Zakład Wodociągów i Kanalizacji Sp. z o.o., ul. Wierzbowa 52, 90-133 Łódź

Praca była prezentowana podczas konferencji ECOpole' 16, Zakopane, 5-8.10.2016

remontów odcinków wodociągu, aby z wyprzedzeniem przeciwdziałać awariom mogącym wyłączyć dany odcinek z eksploatacji.

Efektywnym narzędziem wspierającym podjęcie decyzji o konieczności przeprowadzenia remontu danego odcinka sieci wodociągowej wydają się sztuczne sieci neuronowe (SSN). System doradczy wykorzystujący SSN pozbawiony jest subiektywności oceny, która może mieć miejsce w przypadku analizy wykonywanej przez eksperta. Tym niemniej, aby wykorzystać możliwości modeli neuronowych, niezbędne są obszerne dane opisujące stan techniczny wodociągów na terenie miasta. Z drugiej jednak strony, jeśli taka baza danych istnieje, to nie ma potrzeby tworzenia analitycznego opisu rozpatrywanego zagadnienia. Sieć neuronowa może postulować decyzje o remoncie danego odcinka wodociągu lub o jego zaniechaniu jedynie na podstawie zależności pomiędzy wprowadzanymi do sieci danymi wejściowymi i wyjściowymi.

Cechy modelu neuronowego

W badaniach wykorzystano jednokierunkowe SSN w postaci perceptronu wielowarstwowego (*Multi-Layer Perceptron - MLP*) [4], zbudowanego z warstwy wejściowej, jednej warstwy ukrytej i jednego wyjścia. W neuronach ukrytych zastosowano sigmoidalną funkcję aktywacji, natomiast neuron wyjściowy realizował liniową funkcję przejścia. Proces trenowania SSN przeprowadzono metodą ze wsteczna propagacją błędów i z wykorzystaniem algorytmu Levenberga-Marquardta [5]. Uczenie sieci polegało na iteracyjnym doborze wag synaptycznych połączeń pomiędzy neuronami w taki sposób, aby odpowiedzi perceptronu wielowarstwowego na prezentowane dane wejściowe były zgodne z decyzjami ekspertów odnośnie do konieczności przeprowadzenia remontów danego odcinka wodociągu. W celu znalezienia najbardziej efektywnej struktury SSN testowano działanie sieci zbudowanych z różnej liczby neuronów wchodzących w skład warstwy ukrytej. Oceniano również jakość prognoz modelu neuronowego uzyskanych w przypadku różnej postaci danych wejściowych.

Charakterystyka łódzkiej sieci wodociągowej

Proponowaną metodę przetestowano na przykładzie Łodzi, będącej jednym z największych polskich miast. Na terenie miasta eksploatowanych jest obecnie ponad dwa tysiące kilometrów sieci wodociągowej, w której skład wchodzi:

- sieć magistralna - 230 km,
- sieć rozdzielcza - 1170 km,
- przyłącza wodne - 600 km.

W rozważaniach skupiono się na przewodach rozdzielczych, stanowiących najdłuższą sieć rurociągów podsystemu dystrybucji wody na terenie miasta. W 2013 r. Łódź posiadała najwięcej wodociągów żeliwnych i z polichloru winylu (PVC) - odpowiednio 48 i 32%. Pozostałe 20% stanowiły przewody z azbestocementu, polietylenu o zwiększonej gęstości oraz z żeliwa sferoidalnego. Analiza struktury wiekowej sieci rozdzielczej z 2013 roku przedstawia się następująco:

- 38,6% - przewody eksploatowane przez 31-50 lat,
- 23,6% - rurociągi w wieku 11-20 lat,
- 14,3% - przewody najstarsze, ponad 50-letnie,

- 14,0% - rurociągi w wieku 21-30 lat,
- 8,5% - przewody najmłodsze, mniej niż 10-letnie.

Zróżnicowanie struktury wiekowej oraz materiałowej łódzkiej sieci rozdzielczej pozwoliło na stworzenie rozbudowanego zbioru danych zawierającego informacje o stanie technicznym wodociągów eksploatowanych na terenie miasta.

Przeprowadzone badania

Dane o stanie technicznym wodociągowych przewodów rozdzielczych zostały przygotowane w takiej formie, aby mogły zostać wprowadzone do modelu neuronowego. Jako dane wejściowe wykorzystano rekordy zawierające elementy składowe przedstawione w tabeli 1. Na wyjściu z sieci prezentowana była wartość 1 albo 0 w zależności od tego, czy dla danego przypadku (wektora wejściowego) ekspert zalecił przeprowadzenie czy też zaniechanie remontu.

Składowe wektorów uczących

Tabela 1

Table 1

Components of the training vectors

Lp.	Składowa		Przedział zmienności
dane wejściowe			
1	średnica wodociągu	[mm]	100-250
2	materiał wykonania wodociągu 1. żeliwo 2. azbestocement 3. polichlorek winylu (PVC) 4. stal 5. polietylen o zwiększonej gęstości (HDPE)	[-]	{1,2,3,4,5}
3	lata eksploatacji	[rok]	11-94
4	awaryjność danego odcinka z 3 ostatnich lat	[awarii/km/rok]	0-8
5	awaryjność danego odcinka z 10 ostatnich lat	[awarii/km/rok]	0-3,5
6	istnienie obciążeń oddziałujących na wodociąg 1 - tak : 0 - nie	[-]	{0,1}
dane wyjściowe			
1	konieczność przeprowadzenia remontu 1 - tak : 0 - nie	[-]	{0,1}

Awaryjność infrastruktury wodociągowej jest istotnie uzależniona od rozwiązań materiałowo-konstrukcyjnych przewodów [6]. Z tego względu informacje o materiale, z jakiego wykonano dany odcinek wodociągu, uwzględniono w danych wejściowych do modelu neuronowego. Wymagało to zakodowania każdego z pięciu typów materiałów konstrukcyjnych w formie liczby całkowitej (tab. 1). Podjęto również próbę zastąpienia rodzaju materiału teoretycznym czasem jego eksploatacji, np. 80 lat dla wodociągu żeliwnego. Nie uzyskano jednak dzięki temu zabiegowi zadowalających rezultatów. Wykonano także testy, w których dodano dodatkową składową wektora wejściowego w postaci długości danego odcinka wodociągu, co jednak również nie wpłynęło na poprawę uzyskiwanych wyników. Ponieważ dane o przeprowadzanych remontach zbierane były przez ponad 20 lat, czas eksploatacji konkretnego odcinka wodociągu liczony był do

momentu podjęcia decyzji o remoncie. Ponadto z danych odrzucono przypadki, w których przeprowadzenie remontu wynikało nie tyle ze złego stanu technicznego sieci wodociągowej, co z innych uwarunkowań, jak np. planowanych przebudów i remontów arterii komunikacyjnych w mieście.

Zbiór danych przygotowanych zgodnie z opisanymi zasadami stanowił dane wejściowe do modelu neuronowego. Łącznie baza danych zawierała ponad dwieście rekordów, z czego:

- 105 dotyczyło wyremontowanych odcinków wodociągów,
- 100 obejmowało wodociągi, które nie zostały poddane renowacji.

Dane te zostały następnie podzielone losowo na zbiór treningowy, stanowiący 70% wszystkich rekordów, oraz na zbiór walidacyjny i testowy, każdy po 15% przypadków z bazy danych.

W wyniku iteracyjnego procesu trenowania, polegającego na wielokrotnym prezentowaniu wektorów wejściowych i odpowiadających im decyzji ekspertów, SSN nabyła umiejętność prognozowania konieczności przeprowadzenia remontu na podstawie informacji o stanie technicznym sieci wodociągowej. Stwierdzono, że najefektywniejsza jest sieć zawierająca 5 neuronów w warstwie ukrytej. Zastosowanie mniejszej liczby neuronów skutkowało pogorszeniem generowanych prognoz. W przypadku użycia większej liczby neuronów ukrytych następowało tzw. przeuczenie sieci, co objawiało się poprawą zgodności prognoz sieci z decyzjami ekspertów dla zbioru uczącego przy zdecydowanym pogorszeniu przewidywań dla zbioru testowego.

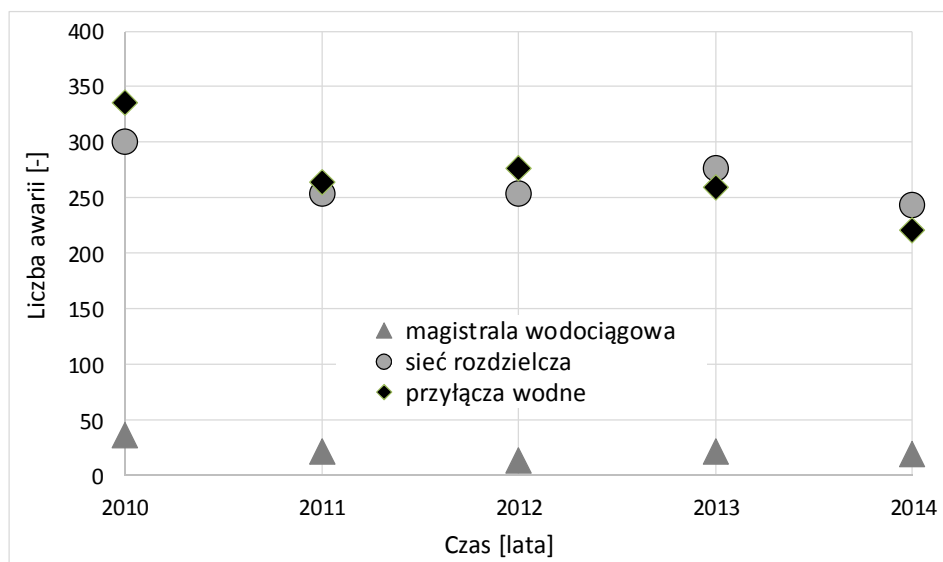
Analiza uzyskanych wyników

Analiza prognoz generowanych przez wytrenowaną sieć neuronową wykazała ich dobrą zgodność z decyzjami podjętymi przez ekspertów (dla 175 przypadków z całej bazy danych). Pomimo dobrej zgodności stwierdzono, że w 30 przypadkach otrzymano prognozy SSN sprzeczne z decyzjami ekspertów. Większość, tj. 23 przypadki, dotyczyła sytuacji, gdy sieć neuronowa kwalifikowała wodociągi do remontu, ale działania takie nie zostały podjęte. Szczegółowa analiza zbioru danych wejściowych wykazała, że 12 z tych przypadków dotyczyło wodociągów o długości mniejszej niż 250 m z przynajmniej jednym wskaźnikiem awaryjności przekraczającym wartość 1,0 [awarii/km/rok]. Tak krótkie odcinki przewodów zazwyczaj nie były rozważane przez ekspertów przy planowaniu remontów, nawet jeśli cechował je wysoki wskaźnik awaryjności. SSN wytypowała także do przeprowadzenia remontu 4 rurociągi żeliwne o okresie eksploatacji przekraczającym 65 lat ze względu na długi czas użytkowania przewodu. W 5 przypadkach dotyczących rurociągów z PVC model neuronowy zaproponował przeprowadzenie remontu ze względu na wystąpienie przynajmniej jednego wysokiego wskaźnika awaryjności, niezależnie od decyzję od okresu eksploatacji przewodu.

Dla 7 odcinków rurociągów stwierdzono przeprowadzenie w przeszłości remontów nieuzasadnionych. Zazwyczaj SSN kwestionowała przeprowadzenie remontów, jeśli wiek przewodu nie przekroczył 60 lat (z jednym wyjątkiem) oraz gdy wskaźniki awaryjności nie były szczególnie wysokie. Takie działanie modelu neuronowego wydaje się być uzasadnione, ponieważ sieci wodociągowe projektowane są na co najmniej 50-letni okres eksploatacji [2]. W 2 przypadkach sieć neuronowa zanegowała również konieczność

remontu przewodów z azbestocementu, ponieważ nie działały na nie obciążenia mechaniczne.

Należy podkreślić, że jakość prognoz modelu neuronowego zależy od rzetelności danych wykorzystanych w procesie uczenia SSN. Relatywnie niska awaryjność sieci rozdzielczej (rys. 1), kształtująca się w latach 2010-2014 na poziomie 0,21-0,26 awarii/rok/km, świadczy o przemyślanym planie remontowym łódzkiej sieci wodociągowej. Można zatem wnioskować, że decyzje ekspertów o podjętych w poprzednich latach remontach wodociągów mogły być wykorzystane jako wiarygodne dane uczące dla opracowywanego modelu neuronowego.



Rys. 1. Awaryjność sieci wodociągowej w Łodzi w latach 2010-2014

Fig. 1. Number of failures of the water supply system in Lodz in the years 2010 to 2014

Podsumowanie i wnioski

W pracy przedstawiono propozycję zastosowania sztucznych sieci neuronowych jako narzędzia wspierającego podejmowanie decyzji o konieczności przeprowadzenia remontów rozdzielczej sieci wodociągowej w dużym mieście. Opracowaną metodę przetestowano na przykładzie łódzkich wodociągów, wykorzystując dane zebrane w ciągu ponad 20 lat.

Przeprowadzono analizę działania wytrenowanej sieci neuronowej, porównując jej odpowiedzi z podjętymi w przeszłości decyzjami ekspertów. Uzyskano ogólnie dobrą zgodność przewidywań modelu neuronowego z decyzjami ekspertów, ale wykryto również podzbiór sprzecznych rozstrzygnięć. Większość z tych przypadków dotyczyła sytuacji, gdy SSN kwalifikowała wodociągi do remontu, ale działania takie nie zostały w przeszłości zarekomendowane przez ekspertów. Stwierdzono także kilka przypadków przeprowadzenia nieuzasadnionych remontów. Ze względu na zdolność SSN do uogólniania zdobytej wiedzy na nieprezentowane podczas uczenia informacje model neuronowy może być wykorzystany

także w tworzeniu bieżących planów remontowych, szczególnie w przypadku braku ekspertów.

Zaproponowana metoda umożliwia stworzenie systemu eksperckiego generującego obiektywne decyzje o remontach wodociągów w dowolnym miejskim przedsiębiorstwie z branży wodno-kanalizacyjnej. Warunkiem koniecznym jest jednak istnienie odpowiednich danych o stanie sieci wodociągowej i historii jej remontów. Wymiernym efektem wdrożenia systemu eksperckiego może być optymalizacja wykorzystania zasobów finansowych przedsiębiorstwa, przeznaczanych na utrzymanie sprawnego działania infrastruktury wodnej.

Literatura

- [1] Knapik K, Bajer J. *Wodociągi*. Kraków: Wyd Politechniki Krakowskiej; 2011.
- [2] Osuch-Pajdzińska E, Roman M. *Sieci i obiekty wodociągowe*. Warszawa: Ofic Wyd Politechniki Warszawskiej; 2015.
- [3] Hotłoś H. *Ilościowa ocena wpływu wybranych czynników na parametry i koszty eksploatacyjne sieci wodociągowych*. Wrocław: Ofic Wyd Politechniki Wrocławskiej; 2007. <http://www.dbc.wroc.pl/Content/4273/Hotlos.pdf>.
- [4] Kamiński W, Strumiło P, Tomczak E. *Zastosowanie sztucznej inteligencji w rozwiązywaniu wybranych problemów ochrony*. Łódź: PAN Oddział w Łodzi; 2005.
- [5] Osowski S. *Sieci neuronowe w ujęciu algorytmicznym*. Warszawa: WNT; 1996.
- [6] Kwietniewski M, Rak J. *Niezawodność infrastruktury wodociągowej i kanalizacyjnej w Polsce*. Warszawa: Komitet Inżynierii Łądowej i Wodnej PAN; 2010.

APPLICATION OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS TO THE ASSESSMENT OF TECHNICAL CONDITION OF WATER SUPPLY SYSTEMS

¹ Department of Process Thermodynamics, Faculty of Process and Environmental Engineering
Lodz University of Technology

² Company of Water Supply and Sewage Disposal Ltd., Lodz

Abstract: The paper explains a method for discerning the parts of a water supply system in need of renovation, based on Artificial Neural Networks (ANNs). The study uses data, collected over the last twenty-one years, containing information on condition assessment and failure indicators concerning more than two hundred sections of both renovated and nonrenovated pipelines. During the study, an appropriately prepared data set was used for training a neural network in the form of a multilayer perceptron. Further comparison of the predictions obtained using the trained ANN with the decisions made by human experts showed satisfactory consistency; however, it should be noted that for 15% of all cases from the database discrepancies were recorded. The proposed method enables creating an expert system, which implemented by a water supply company can improve its cost management and ensure failure-free operation of its water distribution system.

Keywords: water supply systems, predicting pipeline renovation, multilayer perceptron