

SIECI NEURONOWE W LOKALIZACJI AWARII W SIECI WODOCIĄGOWEJ

Izabela Rojek*, Jan Studziński**

*Uniwersytet Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy, Instytut Mechaniki i Informatyki Stosowanej

**Instytut Badań Systemowych, Polska Akademia Nauk, Warszawa

Streszczenie: W artykule przedstawiono sieci neuronowe, które są używane do lokalizacji awarii sieci wodociągowej. Obecne wykorzystanie systemów monitorowania nie odpowiada ich możliwościom. Współcześnie systemy monitoringu służą jako autonomiczne programy do zbierania informacji o przepływach i ciśnieniach wody w pompowniach źródłowych, hydroforniach strefowych i końcówkach sieci wodociągowej, dając ogólną wiedzę o stanie jej pracy, gdy jednocześnie mogą i powinny być wykorzystane jako elementy systemów zarządzania siecią, w tym w szczególności w zakresie wykrywania i lokalizacji wycieków wody. Modele lokalizacji awarii sieci zostały utworzone przy wykorzystaniu jednokierunkowych sieci neuronowych ze wsteczną propagacją błędów typu MLP.

Słowa kluczowe: Sieć wodociągowa, model hydrauliczny sieci, wykrywanie i lokalizacja wycieków wody, sieci neuronowe.

Application of neuronal nets for localization of water leaks in the water networks

Abstract: In the paper using of neuronal nets to localize the damage states in the water networks is described. Currently the monitoring systems installed on the water nets are used mainly for winning the information concerning the water flows and pressures in key elements of water network and they are operated as autonomous running programs giving only a very general knowledge about the work quality of the monitored objects. But at the same time these modern monitoring systems could be successfully used as integrated elements of IT systems supporting the complex management of communal waterworks whose one of the important tasks would be localization of hidden water leaks in the water nets. In the paper some algorithms to localize the water net damages using the MLP neuronal nets are presented.

Keywords: Water networks, water net hydraulic models, finding out and localization of water leaks, neuronal nets.

1. WSTĘP

Przedsiębiorstwo wodociągowe w zakresie sieci wodociągowej zajmuje się dystrybucją wody odpowiedniej jakości w ilości gwarantującej zaspokojenie potrzeb odbiorców, poprawną eksploatacją sieci wodociągowej zapewniającą właściwe ciśnienie w węzłach odbiorczych, sprawnym usuwaniem awarii oraz planowaniem i wykonywaniem prac związanych z konserwacją, modernizacją i rozbudową sieci [1]. Sterowanie siecią wodociągową jest trudnym i kompleksowym procesem.

Bardzo istotnym problemem w zarządzaniu przedsiębiorstwem wodociągowym jest wykrywanie i lokalizacja ukrytych wycieków wody w sieci wodociągowej. Spowodowane tym straty wody w rurociągach, dochodzące niekiedy nawet do 30%, wpływają niekorzystnie na wyniki finansowe

przedsiębiorstw wodociągowych, które utraconej wody nie mogą sprzedać. U odbiorców wody straty te odbijają się w zwiększonych opłatach za wyprodukowaną i nie użytą faktycznie wodę. Szybka lokalizacja i eliminacja ukrytych wycieków wody z nieszczelnych rurociągów przynosi zatem wymierne korzyści ekonomiczne zarówno dostawcom, jak i odbiorcom wody, czyli przedsiębiorstwu wodociągowemu i użytkownikom sieci wodociągowej. Etapy dotyczące awarii w sieci wodociągowej można określić w następujący sposób:

- wykrycie awarii – stwierdza się stan awaryjny w postaci strat wody, ale nie jest znana jego lokalizacja,
- lokalizacja awarii – stwierdza się stan awaryjny i jego dokładną lub przybliżoną lokalizację za pomocą odpowiednio opracowanych algorytmów, z wykorzystaniem systemów monitoringu, modeli

hydraulicznych sieci wodociągowej i w szczególności sieci neuronowych,

- przeciwdziałanie awarii – na podstawie danych historycznych o stanach awaryjnych następuje prognozowanie kolejnych stanów awaryjnych i opracowuje się plany rewitalizacji sieci wodociągowej.

2. ALGORYTM LOKALIZACJI AWARII WSIECI WODOCIĄGOWEJ

Istnieją różne podejścia i algorytmy obliczeniowe do wspomagania wykrywania i lokalizacji wycieku wody w sieci wodociągowej, prezentowane w literaturze. W każdym przypadku podstawą obliczeń są model hydrauliczny sieci wodociągowej i pomiary przepływu wody, względnie przepływu i ciśnienia pozyskiwane z punktów pomiarowych systemu monitoringu zainstalowanego na sieci. Oznacza to, że dla praktycznej realizacji tych algorytmów jest niezbędna odpowiednia infrastruktura informatyczna wdrożona i eksploatowana w przedsiębiorstwie wodociągowym. W skład tej infrastruktury powinny wchodzić system SCADA monitoringu sieci, skalibrowany model hydrauliczny i również system GIS generowania mapy numerycznej [2]. Taka infrastruktura pozwala nie tylko wykrywać i lokalizować awarie sieci wodociągowej, ale również zarządzać siecią, wykonując takie na przykład zadania, jak sterowanie siecią wodociągową, analiza jakości wody, optymalizacja i projektowanie sieci itp. [2, 3]. Oznacza to, że wysoko rozwinięte technologie informatyczne mogą stać się użytecznym i w przyszłości niezbędnym narzędziem dla operatora sieci wodociągowej, wspomagającym racjonalną eksploatację sieci.

Analiza obecnego stanu badań dotyczących wspomagania wykrywania i lokalizacji wycieków wody w sieci wodociągowej wykazała, że jest miejsce na kolejne badania dotyczące tego problemu. W ramach projektu rozwojowego Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego nr NR14-0011-10/2010 rozpoczęto m.in. prace dotyczące opracowania inteligentnego systemu komputerowego detekcji i lokalizacji awarii w sieci wodociągowej. Zakres tych prac jest szerszy, niż w przypadku algorytmów przedstawionych wcześniej. Przede wszystkim system będzie testowany zarówno na danych symulowanych, jak i rzeczywistych, pozyskiwanych z przedsiębiorstw wodociągowych w Rzeszowie i Głubczycach. Po drugie, do modelowania sieci wodociągowej, dla celów porównawczych i weryfikacji wyników, zostanie zastosowanych kilka modeli hydraulicznych i także

różnego typu sieci neuronowe: MLP, RBF, Kohonena oraz hybrydowe sieci neuronowe.³

Pierwszy etap prac z wykorzystaniem sieci neuronowych dotyczył opracowania samego algorytmu lokalizacji awarii sieci wodociągowej, który w przyszłości stanie się elementem tworzonego systemu komputerowego [4]. Bazując na określonej liczbie czujników przepływu zainstalowanych w przewodach sieci wodociągowej, a w drugiej wersji algorytmu wykorzystując również czujniki ciśnienia zainstalowane w węzłach, i dysponując odpowiednio wytrenowaną siecią neuronową, można pojawiające się awarie sieci szybko i w sposób automatyczny wykrywać i lokalizować.

Algorytm ten składa się z następujących kroków:

1. Wyznaczenie punktów wrażliwych sieci wodociągowej przy użyciu systemu do optymalnego planowania systemu monitoringu.
2. Wybór odpowiedniej liczby najbardziej wrażliwych punktów pomiarowych, z których pozyskuje się największy zasób informacji o występujących w sieci stanach awaryjnych.
3. Wykonanie obliczeń hydraulicznych sieci, dla zadanego poziomu obciążenia, za pomocą wybranego i odpowiednio skalibrowanego modelu hydraulicznego.
4. Zapis wartości przepływów i ciśnień w punktach pomiarowych systemu monitoringu dla wykonanych obliczeń (zapis standardowego rozkładu ciśnień i przepływów).
5. Symulacja wycieków w kolejnych węzłach sieci wodociągowej za pomocą modelu hydraulicznego.
6. Zapis wartości przepływów i ciśnień w punktach pomiarowych dla wykonanych symulacji stanów awaryjnych (zapis awaryjnych rozkładów ciśnień i przepływów).
7. Utworzenie klasyfikatora lokalizującego awarie w postaci różnego typu sieci neuronowych i wybór klasyfikatora najlepszego według kryterium największej wrażliwości.
8. Rejestracja z systemu monitoringu pomiaru odbiegającego od standardu dla zadanego poziomu obciążenia sieci, czyli w przypadku wystąpienia awarii znalezienie wśród modeli sieci neuronowych modelu takiego, który wskazuje dokładnie węzeł sieci z zaistniałym wyciekamiem.

³ Praca wykonana w ramach projektu rozwojowego NCBiR nr NR14-0011-10/2010.

9. Zmiana rodzaju modelu hydraulicznego i powrót do punktu 3.
10. Porównanie i weryfikacji wyników dla różnych modeli hydraulicznych i różnych sieci neuronowych w celu najlepszego zamodelowania sieci wodociągowej i najdokładniejszego lokalizowania awarii.

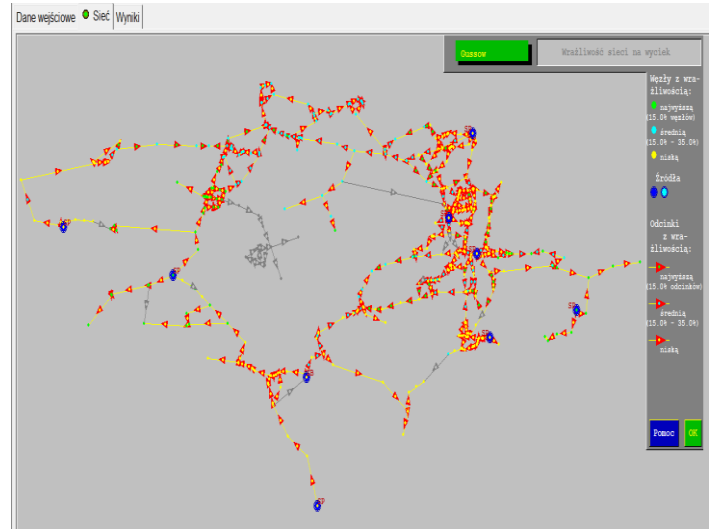
2.1. Wyznaczenie punktów wrażliwych sieci wodociągowej przy użyciu algorytmu do planowania systemu monitoringu

W celu znalezienia najlepszych lokalizacji czujników w punktach pomiarowych systemu monitoringu wyznacza się tzw. punkty wrażliwe sieci wodociągowej przy użyciu algorytmu do planowania systemu monitoringu. Aby zmaksymalizować ilość informacji przekazywanych przez punkty pomiarowe, powinny one być tak wybrane, aby przekazywały wiedzę o stanie sieci nie tylko z danego punktu, ale również z jego także dalszego otoczenia. Takie punkty charakteryzujące się dużą wrażliwością na zmiany stanu sieci nazwiemy punktami charakterystycznymi. Maksymalizacja przekazywanej informacji oznacza zwykle, w tradycyjnie planowanych systemach monitoringu, zwiększanie liczby punktów pomiarowych, a więc działanie przeciwne do opisanego powyżej. Dlatego należy podkreślić, że odpowiedni wybór stosunkowo niewielkiej liczby punktów charakterystycznych może być równoważny pod względem jakości i ilości przekazywanej wiedzy o sieci większej liczbie punktów zlokalizowanych w mniej wrażliwych miejscach sieci.

Wybór odpowiednich punktów pomiarowych do monitorowania sieci wodociągowej jest nietrywialnym zadaniem, do rozwiązania którego można stosować różne algorytmy obliczeniowe. Jednym z nich jest algorytm podany przez R. Straubela i B. Holznagela w pracy [5].

Przy tym jako miarę wrażliwości sieci na symulowane wycieki można stosować na przykład sumę różnic bezwzględnych między pomiarami ciśnienia dla standardowego stanu pracy sieci i stanów awaryjnych dla przyjmowanych różnych kombinacji liczby i lokalizacji punktów pomiarowych, w przypadku, gdy w systemie monitoringu uwzględniamy jedynie pomiary ciśnienia.

Na rys. 1 została przedstawiona sieć wodociągowa dzielnicy Rzeszowa. Za pomocą programu obliczeń hydraulicznych wyznaczono wrażliwość tej sieci na wycieki.



Rysunek 1. Wrażliwość badanej sieci wodociągowej na wyciek.

Następnym etapem algorytmu jest dodanie punktów pomiarowych przepływu. Punkty pomiarowe zostały wyznaczone w miejscach o największej wrażliwości na wycieki. Eksperymenty zostały przeprowadzone dla dwóch przypadków. Pierwszy zawierał 10 punktów pomiarowych, a drugi 20 punktów. Zwiększenie liczby punktów pomiarowych spowodowało zwiększenie dokładności lokalizacji awarii w sieci.

Na rys. 2 zostały przedstawione punkty monitoringu wyznaczone dla pierwszego eksperymentu. Na początku wartość pomiaru jest 0.

Id. PM	Rodzaj pom.	Id. odcinka	Położenie	Stan	Wart. pomiaru
PPP001	przepływ [l/s]	'3752'	na odcinku	aktywny	0.0
PPP002	przepływ [l/s]	'3758'	na odcinku	aktywny	0.0
PPP003	przepływ [l/s]	'2023'	na odcinku	aktywny	0.0
PPP004	przepływ [l/s]	'7460'	na odcinku	aktywny	0.0
PPP005	przepływ [l/s]	'5400'	na odcinku	aktywny	0.0
PPP006	przepływ [l/s]	'0689'	na odcinku	aktywny	0.0
PPP007	przepływ [l/s]	'0843'	na odcinku	aktywny	0.0
PPP008	przepływ [l/s]	'7056'	na odcinku	aktywny	0.0
PPP009	przepływ [l/s]	'0900'	na odcinku	aktywny	0.0
PPP010	przepływ [l/s]	'5839'	na odcinku	aktywny	0.0

Rysunek 2. Punkty monitoringu na badanej sieci dla pierwszego eksperymentu.

2.2 Wykonanie obliczeń hydraulicznych sieci, dla zadanego poziomu obciążenia, za pomocą wybranego modelu hydraulicznego

Wykonanie obliczeń hydraulicznych sieci, zapis wartości przepływów i ciśnień w punktach pomiarowych systemu monitoringu dla wykonanych obliczeń (zapis standardowego rozkładu ciśnień i przepływów), symulacja wycieków w kolejnych węzłach sieci wodociągowej za pomocą modelu hydraulicznego w miejscach wrażliwych oraz zapis wartości przepływów i ciśnień w punktach pomiarowych dla wykonanych symulacji stanów awaryjnych (zapis awaryjnych rozkładów ciśnień i przepływów) służą do przygotowania plików uczących dla sieci neuronowych, które posłużą z kolei jako modele do lokalizacji awarii w sieci wodociągowej.

Wykonanie obliczeń hydraulicznych sieci powoduje pojawienie się określonych wartości pomiaru w punktach pomiarowych (rys. 3).

Id. p.pom	Typ p.pom.	Id. odcinka	Polozenie	Ciśn.m. [mSW]	Ciśn. obl.	Różnica	Prz.m. [l/s]	Prz. obl.	Różnica
PPFP001	przepływ	'3752'	na odc.				0.0	-0.066	-0.066
PPFP002	przepływ	'3758'	na odc.				0.0	-0.066	-0.066
PPFP003	przepływ	'2023'	na odc.				0.0	0.588	0.588
PPFP004	przepływ	'7460'	na odc.				0.0	-0.768	-0.768
PPFP005	przepływ	'5400'	na odc.				0.0	0.035	0.035
PPFP006	przepływ	'0689'	na odc.				0.0	0.166	0.166
PPFP007	przepływ	'0843'	na odc.				0.0	0.166	0.166
PPFP008	przepływ	'7056'	na odc.				0.0	2.655	2.655
PPFP009	przepływ	'0900'	na odc.				0.0	0.886	0.886
PPFP010	przepływ	'5839'	na odc.				0.0	-0.886	-0.886

Rysunek 3. Wartości pomiaru w punktach pomiarowych – stan normalny sieci.

W ten sposób dokonano zapisu standardowego rozkładu ciśnień i przepływów oraz wykonano szereg symulacji wycieków w różnych węzłach sieci wodociągowej za pomocą modelu hydraulicznego w miejscach wrażliwych. Symulację awarii wykonano w następujący sposób:

- zwiększono kilkakrotnie wartość przepływu wody w wybranym węźle,
- obliczono hydraulicznie sieć wodociągowej z awarią,
- obliczono różnicę przepływów w sieci w normie i stanie awarii,
- określono punkt pomiarowy, który zareagował na awarię węzła.

Następnie dokonano zapisu wartości przepływów i ciśnień w punktach pomiarowych dla wykonanych symulacji stanów awaryjnych.

Mając dane wartości przepływu wody generowane przez model hydrauliczny sieci, skalibrowany na podstawie rzeczywistych pomiarów, można przystąpić do budowy klasyfikatora w postaci sieci neuronowej, który będzie sygnalizował wystąpienie awarii w sieci wodociągowej oraz podawał jej lokalizację.

2.3 Utworzenie i wybór najlepszego klasyfikatora lokalizującego awarie w postaci sieci neuronowych typu MLP

Modele lokalizacji awarii sieci zostały utworzone przy wykorzystaniu sieci neuronowych typu MLP. Sieci MLP niezmiennie są najbardziej rozpowszechnionymi i uniwersalnymi sieciami neuronowymi stosowanymi do rozwiązywania różnych problemów.

W sieci neuronowej jednokierunkowej wielowarstwowej ze wsteczną propagacją błędów (MLP) dobór liczby neuronów w warstwie wejściowej jest uwarunkowany wymiarem wektora danych x . Model neuronu składa się z elementu sumacyjnego, do którego dochodzą sygnały wejściowe x_1, x_2, \dots, x_N , tworzące wektor wejściowy $x = [x_1, x_2, \dots, x_N]^T$, pomnożone przez przyporządkowane im wagi $w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{iN}$, tworzące wektor wag i -tego neuronu $w_i = [w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{iN}]^T$, oraz dochodzi wartość w_{i0} zwana progami. Sygnał wyjściowy sumatora oznaczono u_i , przy czym sygnał

$$u_i = \sum w_{ij}x_j + w_{i0} \quad (1)$$

jest podawany na blok realizujący nieliniową funkcję aktywacji $f(u_i)$. Najczęściej funkcja ta przyjmuje postać sigmoidalną lub tangensa hiperbolicznego. Postać funkcji stanowi ciągle przybliżenie funkcji skokowej, przy której sygnał wyjściowy neuronu y_i przyjmuje dowolne wartości z przedziału $[0,1]$ dla funkcji unipolarnej.

Funkcja sigmoidalna unipolarna, to:

$$f_u(u) = \frac{1}{1 + \exp(-\beta u)} \quad (2)$$

Parametr β pozwala regulować pochyłość sigmoidy, co bywa bardzo użyteczne pod względem obliczeniowym. W ramach prowadzonych badań zostały wykonane eksperymenty z różnymi sieciami neuronowymi.

Pierwszy etap badań został wykonany z wykorzystaniem 10 punktów pomiarowych oraz 36 węzłów sieci wodociągowej, w których symulowano awarie. Cała sieć wodociągowa zawierała 390 węzłów. W drugim etapie zwiększono liczbę punktów pomiarowych do 20 i węzłów z symulacją awarii do 44.

Klasyfikator jest tworzony według opracowanej wcześniej metodyki i umieszczony w specjalnej bazie modeli [6].

Ekspertyzy związane z tworzeniem modeli sieci neuronowych typu MLP były parametryzowane dwoma parametrami: liczbą neuronów w warstwie ukrytej oraz liczbą epok uczących. W eksperymencie parametr 'liczba neuronów w warstwie ukrytej' przyjmował wartości od 5 do 25, natomiast drugi parametr 'liczba epok uczących' przyjmował wartości 200, 500 i 1000. Po zakończeniu każdego eksperymentu przeprowadzone były testy, które dostarczały informacji na temat błędnie zakwalifikowanych decyzji. Liczba neuronów w warstwie ukrytej została dobrana eksperymentalnie. Wejścia sieci zawierają wartości przepływów wody w wybranych węzłach sieci wodociągowej. Wyjście sieci wskazuje punkt pomiarowy, który lokalizuje awarię.

Na rys. 4 pokazano fragment danych, które posłużyły jako wejścia i wyjścia sieci neuronowych.

22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37
1963	2046	2168	2186	2447	2740	2779	3028	6144	3587	3596	4138	4181	4250	4411	Punkt pom.
-7.82	-8.45	-5.74	-4.2	-4.83	-5.04	-94.46	-2.71	-2.79	-3.1	-8.43	-6.31	-2.2	-1.69	-4.76	0
-7.82	-8.45	-5.74	-4.2	-4.83	-5.04	-94.46	-2.71	-2.79	-3.1	-8.43	-6.31	-2.2	-1.69	-4.76	PPPP03
-7.82	-8.45	-5.74	-4.2	-4.83	-5.04	-94.46	-2.71	-2.79	-3.1	-8.43	-6.31	-2.2	-1.69	-4.76	PPPP03
-7.82	-8.45	-5.74	-4.2	-4.83	-5.04	-94.46	-2.71	-2.79	-3.1	-8.43	-6.31	-2.2	-1.69	-4.76	PPPP08
-7.82	-8.45	-5.74	-4.2	-4.83	-5.04	-94.46	-2.71	-2.79	-3.1	-8.43	-6.31	-2.2	-1.69	-4.76	PPPP03
-7.82	-8.45	-5.74	-4.2	-4.83	-5.04	-94.46	-2.71	-2.79	-3.1	-8.43	-6.31	-2.2	-1.69	-4.76	PPPP08
-7.82	-8.45	-5.74	-4.2	-4.83	-5.04	-94.46	-2.71	-2.79	-3.1	-8.43	-6.31	-2.2	-1.69	-4.76	PPPP08
-7.82	-8.45	-5.74	-4.2	-4.83	-5.04	-94.46	-2.71	-2.79	-3.1	-8.43	-6.31	-2.2	-1.69	-4.76	PPPP03
-7.82	-8.45	-5.74	-4.2	-4.83	-5.04	-94.46	-2.71	-2.79	-3.1	-8.43	-6.31	-2.2	-1.69	-4.76	PPPP03
-7.82	-8.45	-5.74	-4.2	-4.83	-5.04	-94.46	-2.71	-2.79	-3.1	-8.43	-6.31	-2.2	-1.69	-4.76	PPPP08
-7.82	-8.45	-5.74	-4.2	-4.83	-5.04	-94.46	-2.71	-2.79	-3.1	-8.43	-6.31	-2.2	-1.69	-4.76	PPPP03
-7.82	-8.45	-5.74	-4.2	-4.83	-5.04	-94.46	-2.71	-2.79	-3.1	-8.43	-6.31	-2.2	-1.69	-4.76	PPPP08

Rysunek 4. Fragment danych pliku uczącego sieci neuronowej.

Plik uczący zawiera 70% przykładów, plik testowy 15%, a plik walidacyjny kolejne 15%. Liczba przykładów wyniosła w pierwszym przypadku dla 10 punktów pomiarowych 304 przykłady, a w drugim 360.

Tabela 1. Wyniki obliczeń eksperymentu pierwszego.

Id sieci	Nazwa sieci	Jakość uczenie	Jakość testowanie	Jakość walidacja
1	MLP 36-9-11	97,66355	97,77778	95,55556
2	MLP 36-17-11	94,39252	97,77778	93,33333
3	MLP 36-20-11	97,19626	97,77778	97,77778

Tabela 2. Wyniki obliczeń eksperymentu drugiego.

Id sieci	Nazwa sieci	Jakość uczenie	Jakość testowanie	Jakość walidacja
1	MLP 44-22-21	100,0000	100,0000	100,0000
2	MLP 44-10-21	85,3175	83,3333	81,4815
3	MLP 44-21-21	94,4444	88,8889	92,5926
4	MLP 44-17-21	90,8730	88,8889	94,4444
5	MLP 44-21-21	97,2222	100,0000	98,1481

Tabela 1 ilustruje parametry opisujące eksperymenty dla różnych struktur sieci MLP w przypadku 10 punktów pomiarowych. Natomiast tabela 2 przedstawia wyniki eksperymentu dla różnych struktur sieci MLP w przypadku 20 punktów pomiarowych.

Najlepszą siecią MLP dla 10 punktów pomiarowych okazała się sieć z 9 neuronami w warstwie ukrytej. Natomiast dla 20 punktów pomiarowych najlepsza jest sieć z 22 neuronami w warstwie ukrytej.

3. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Wykorzystanie metod sztucznej inteligencji, w tym sieci neuronowych, umożliwia utworzenie komputerowego systemu wspomaganego decyzji, który w sposób automatyczny pozyskuje wiedzę i ma właściwość adaptacji. Jest to szczególnie ważne przy opracowywaniu systemu wspomaganego decyzji dla złożonych systemów technicznych, w których następują ciągłe zmiany, jedne podprocesy zależą od innych, wiele czynników zależy jeden od drugiego i każda zmiana systemu powoduje kolejne zmiany. Do takich systemów technicznych należą miejskie sieci wodociągowe.

Wszystkie opisane tu algorytmy mają na razie przede wszystkim wartość akademicką, ponieważ, jak wspomniano wcześniej, ich praktyczna realizacja wymaga dosyć zaawansowanej infrastruktury informatycznej zainstalowanej na sieci wodociągowej, co w przypadku krajowych przedsiębiorstw wodociągowych obecnie nie ma miejsca. Przy tym poszczególne elementy tej infrastruktury powinny ze sobą ściśle współpracować, co tym bardziej nie jest jeszcze praktykowane w krajowych wodociągach.

Zastosowanie metod sztucznej inteligencji we wspomaganie detekcji i lokalizacji awarii na miejskich sieciach wodociągowych wprowadza nową jakość do sterowania siecią wodociągową oraz może stać się podstawą algorytmizacji nowych systemów zarządzania miejskimi systemami zaopatrzenia w wodę, zwanych „systemami inteligentnymi”.

Literatura

1. Studziński J., Bogdan L., „Informatyczny system wspomaganie decyzji do zarządzania, sterowania operacyjnego i planowania miejskiego systemu wodno-ściekowego”, W: Studziński J., Drelichowski L., Hryniewicz O. (Red.): *Rozwój i zastosowania metod ilościowych i technik informatycznych wspomagających procesy decyzyjne*, IBS PAN, Seria Badania Systemowe 49, Warszawa 2006.
2. Studziński J., „Innowacje XXI wieku – nowoczesne techniki informacyjne wspomaganie zarządzania w przedsiębiorstwach sieciowych” W: *Innowacyjne Mazowsze* (A. Straszak, red.) Wyd. SWPW w Płocku, Płock 2010.
3. Farmani R., Ingeduld P., Savic D., Walters G., Svitak Z., Berka J., “Real-time modeling of a major water supply system”, *International Conference on Computing and Control for the Water Industry*, N^o 8, Exeter, ROYAUME-UNI, vol. 160, no 2, 103-108, 2007.
4. Rojek I., Studziński J., “Algorytmy lokalizacji awarii w sieci wodociągowej przy użyciu sieci neuronowych”, *Studia i Materiały Polskiego Stowarzyszenia Zarządzania Wiedzą*, Tom 8, Bydgoszcz 2011, 146-156.
5. Straubel R., Holznagel B., „Mehrkriteriale Optimierung fuer Palnung und Steuerung von Trink- und Abwasser-Verbundsystemen“, *Wasser•Abwasser*, 140, Nr. 3, 1999, 191-196.
6. Rojek I., „Wspomaganie procesów podejmowania decyzji i sterowania w systemach o różnej skali złożoności z udziałem metod sztucznej inteligencji“, Wyd. Uniwersytetu Kazimierza Wielkiego, 212 stron, Bydgoszcz 2010.