

Andrzej CZAPCZUK¹
Jacek DAWIDOWICZ²

ANALIZA PRZEPŁYWÓW W PRZEWODACH SIECI WODOCIĄGOWEJ ZA POMOCĄ SYSTEMU EKSPERTOWEGO

Projektowanie systemów dystrybucji wymaga przeprowadzenia wielu obliczeń i analiz mających na celu uzyskanie najlepszego rozwiązania. Podstawowym celem obliczeń jest wyznaczenie natężenia przepływu przez przewody oraz określenie strat ciśnienia, wysokości zbiorników, wymaganego ciśnienia na zasilaniu i ciśnienia w poszczególnych węzłach sieci. Systemy dystrybucji wody są zbudowane ze złożonych, skomplikowanych układów przewodów, w których zachodzą różnorodne przepływy. Niezwykle ważna jest analiza przepływów z punktu widzenia dobranej średnicy, prędkości przepływu, ale również położenia w strukturze układu przewodów. W przypadku gdy pojemność wewnętrzna przewodu ze względu na jego średnicę i długość jest znacznie większa niż wydatek z węzła końcowego oraz przepływ tranzytowy do dalszych przewodów, może wystąpić zjawisko przestoju wody. Zjawisko to może się pojawić w sieciach pierścieniowych oraz w końcówkach sieci. Problemem może być również wzrastający przepływ przez przewody wraz z rozbudową systemu dystrybucji wody, gdy podłączane tereny nie były wcześniej uwzględnione w planie ogólnym wodociągu. Problem rozwiązano jako klasyfikację za pomocą reguł drzewa decyzyjnego. Zdefiniowano jedną klasę QK1 odpowiadającą zakresowi odpowiednich wartości przepływu oraz sześć klas QK2÷QK7 opisujących przyczyny niepoprawnego przepływu. Zaprezentowano proces indukcji drzewa decyzyjnego metodą C4.5 przeznaczonego do oceny przepływów w przewodach wodociągowych. Reguły decyzyjne z uzyskanego drzewa pozwalają dokonać oceny przepływu poprzez wybór jednej z klas. System ekspertowy korzystający z reguł sporządzonych za pomocą indukcji drzewa decyzyjnego może być zastosowany jako dodatkowy moduł programu komputerowego.

Słowa kluczowe: system dystrybucji wody, indukcja drzew decyzyjnych, metoda C4.5, weryfikacja wyników obliczeń

¹ Andrzej Czapczuk, Politechnika Warszawska

² Autor do korespondencji/corresponding author: Jacek Dawidowicz, Politechnika Białostocka, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, 15-351 Białystok, ul. Wiejska 45A, tel. 85 7469649, j.dawidowicz@pb.edu.pl

1. Wprowadzenie

Systemy zaopatrzenia w wodę są skomplikowanymi układami obiektów inżynierskich, które pełnią różnorodną rolę w funkcjonowaniu całości. Najważniejszym elementem jest z pewnością system dystrybucji wody. Podyktowane jest to zarówno wysokimi kosztami budowy, jak i złożonym procesem eksploatacji i renowacji, gdyż niemożliwe jest przebudowanie całego systemu jednocześnie. W związku z tym projektowanie systemów dystrybucji wymaga przeprowadzenia wielu analiz i podjęcia decyzji mających doprowadzić do najlepszego rozwiązania.

Wymaga to wykonania złożonych obliczeń, które mogą być zrealizowane dla określonych warunków poborów wody, najczęściej maksymalnych. Może być także wspomagane poprzez budowę modeli komputerowych realizujących obliczenia mające na celu symulację pracy systemu w dłuższym czasie przy zmieniających się parametrach poboru i zasilania. Podstawowym celem obliczeń jest wyznaczenie natężenia przepływów przez przewody, określenie strat ciśnienia, wysokości zbiorników, wymaganego ciśnienia na zasilaniu oraz ciśnienia w poszczególnych węzłach sieci. Właściwe zaprojektowanie poszczególnych elementów systemu dystrybucji wody ma decydujący wpływ na koszty inwestycyjne oraz eksploatacyjne, a ostatecznie na ilość i jakość dostarczanej odbiorcom wody [16, 18, 23, 27].

W pracy opisano proces budowy drzewa decyzyjnego, które jest podstawą do sporządzenia zestawu reguł do systemu ekspertowego. System, analizując wyniki obliczeń, identyfikuje miejsca, w których pojawiają się utrudnienia z zakresu przepływów przez przewody systemu dystrybucji wody. Zastosowanie omawianego systemu ekspertowego pozwoli podnieść niezawodność funkcjonowania systemu dystrybucji wody, zapobiegając przestojom wody w przewodach.

2. Systemy ekspertowe w zagadnieniach zaopatrzenia w wodę

Metody sztucznej inteligencji, w tym systemy ekspertowe, znajdują coraz szersze zastosowanie w zagadnieniach zaopatrzenia w wodę. Przegląd metod w monitoringu, sterowaniu i eksploatacji systemów zaopatrzenia w wodę i ochrony wód zamieszczono w pracy [37]. Zastosowanie systemów ekspertowych i sztucznych sieci neuronowych w projektowaniu i eksploatacji systemów zaopatrzenia w wodę omówiono również w pracy [14]. Badania nad systemem ekspertowym WAMAN (ang. *WATER MANagement*) mającym za zadanie wspomaganie zarządzania systemem zaopatrzenia w wodę opisano w publikacji [20]. W pracach [29-31, 33] zaprezentowano inteligentny system wspomagania decyzji przeznaczony do sterowania i zarządzania systemem dystrybucji wody. Dane do systemu są zbierane przez monitoring w czasie rzeczywistym, stąd zapewniony jest krótki czas reakcji na zaistniałe problemy. System umożliwia opraco-

wanie scenariuszy sterowania systemem dystrybucji wody. W pracy [1] przedstawiono projekt rozwoju dwóch systemów ekspertowych do projektowania i sterowania złożonych sieci wodociągowych. Skoncentrowano się na kwestiach pozyskiwania wiedzy do systemów ekspertowych oraz ustalenia rodzaju oprogramowania i sprzętu komputerowego. System ekspertowy EXPLORE [21] został zaprojektowany do zarządzania siecią wodociagową w mieście Sewilli. System redukuje koszty związane z pompowaniem wody, prognozując zapotrzebowanie na wodę, a następnie ustalając optymalny, dzienny harmonogram pracy pomp. System umożliwił 25% redukcję kosztów pompowania. W Nowej Zelandii w New Plymouth system ekspertowy do optymalizacji dostawy wody ze stacji uzdatniania wdrożono do pięciu zbiorników sieciowych [5]. Pobiera on bieżące dane z systemu nadzorującego SCADA (ang. *Supervisory Control And Data Acquisition*) i na tej podstawie reguluje wydajność stacji uzdatniania oraz napełnienie zbiorników. W pracy [9] przedstawiono aktualną metodykę sterowania ciśnieniem w systemie dystrybucji wody Zelenograd w Moskwie poprzez zastosowanie systemu ekspertowego, wykorzystującego informacje z hydraulicznych symulacji dynamicznych oraz bieżących danych i wymagań dotyczących ciśnienia w sieci. W artykule [35] zaproponowano system ekspertowy NeMO (ang. *Network Measurement Optimisation*) pozwalający wykrywać w systemie wodomierze charakteryzujące się niewłaściwym pomiarem oraz proponujący odpowiedni harmonogram wymiany wodomierzy. System dystrybucji wody jest obiektem rozproszonym, rozmieszczonym na dużym obszarze. W związku z tym jest uważany za bardzo podatny na różnego rodzaju zagrożenia, polegającymi m.in. na możliwości skażenia wody. Prowadzone są prace mające na celu podniesienie bezpieczeństwa związanego z dostarczaniem wody, szczególnie w aspekcie optymalizacji rozmieszczenia czujników monitorujących jakość wody w sieci wodociągowej. Budowa skutecznego systemu wczesnego ostrzegania o zanieczyszczeniach wody wymaga dokładnej analizy lokalizacji czujników. W pracy [7] zaproponowano system ekspertowy współpracujący z programem EPANET w zakresie symulacji hydraulicznej i rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w sieci wodociągowej, którego celem jest ustalenie lokalizacji stacji monitorujących jakość wody.

W niektórych publikacjach do generowania reguł systemów ekspertowych zastosowano metodę indukcji drzewa decyzyjnego. W opracowaniu [10] opisano metodę indukcji drzewa decyzyjnego przeznaczonego do oceny przebiegu linii ciśnienia w systemie dystrybucji wody. W pracy [11] zaprezentowano system ekspertowy i sztuczną sieć neuronową przeznaczone do oceny wysokości ciśnienia w sieci wodociągowej. W publikacji [13] zaprezentowano metodę indukcji do generowania reguł systemu ekspertowego przeznaczonego do oceny układu systemu dystrybucji wody. W referacie [12] zamieszczono przykłady obliczeniowe z wykorzystaniem systemu ekspertowego, polegające na ocenie układu systemu dystrybucji wody.

W literaturze są dostępne również propozycje systemów ekspertowych mających na celu wspomaganie eksploatacji urządzeń stacji uzdatniania wody [43, 44] oraz przeznaczonych do realizacji komputerowego systemu uczenia i trenowania operatorów stacji uzdatniania wody i oczyszczalni ścieków (OPTRAIN), który pozwala indywidualnie sterować procesem nauki operatora bez nadzoru osoby uczącej [36].

Z przeglądu literatury z zakresu zastosowań systemów ekspertowych w zagadnieniach zaopatrzenia w wodę wynika, że są one powszechnie wykorzystywane w różnych dziedzinach. W niniejszej pracy opisano propozycję systemu ekspertowego uzyskanego metodą indukcji drzewa decyzyjnego do oceny przepływów przez przewody na etapie obliczeń hydraulicznych systemu dystrybucji wody.

3. Sztuczna inteligencja i systemy ekspertowe

Pojęcie inteligencji pojawiło się już w starożytności i miało oznaczać zdolności umysłowe człowieka [39]. Obecnie termin ten posiada wiele definicji akcentujących różne elementy ludzkiej aktywności. Można przyjąć, że jest to ogół wiedzy i doświadczenia, zdolność do skutecznego zachowania się wobec nowych sytuacji i zadań, umiejętność rozumowania w celu efektywnego rozwiązywania problemów. W filozofii mówi się o zdolności umysłu do efektywnego ujmowania zagadnień praktycznych i teoretycznych. Inteligencja jest związana z wieloma elementarnymi zdolnościami, takimi jak rozumienie, wnioskowanie, myślenie abstrakcyjne, kojarzenie, wykrywanie i odkrywanie. Pozwala to interpretować inteligencję jako zespół powiązanych ze sobą procesów. Informacje o otaczającym świecie są przez człowieka przedstawiane za pomocą symboli, najczęściej reprezentowanymi przez słowa [24]. Podlegają one przetwarzaniu w umyśle człowieka, stąd inteligencja często jest określana jako działanie polegające na manipulowaniu symbolami [15]. Pomimo że inteligencja jest przypisywana wyłącznie człowiekowi, od czasu powstania pierwszego komputera dokonywano wiele prób zbudowania maszyny, która charakteryzowałaby się tymi cechami. W latach 50. XX w. pojawiły się pierwsze prace na temat możliwości symulowania ludzkiej inteligencji. Szczególną rolę odegrały prace teoretyczne Johna von Neumanna [42] oraz Alana M. Turinga [40]. Dzisiaj wiadomo, że komputery mogą wiele problemów rozwiązać szybciej i sprawniej niż człowiek, lecz dotyczy to przede wszystkim zadań o znanych algorytmach, w których występuje znaczna powtarzalność obliczeń. Coraz częściej jednak znajdują zastosowanie również wtedy, gdy wymagane jest działanie twórcze. Komputer z pewnością nie może zastąpić człowieka, lecz w zastosowaniach, w których wiedza zawiera wiele faktów i złożonych zależności, systemy inteligentne z pewnością mogą się przyczynić do usprawnienia realizacji różnorodnych zadań. Doprowadziło to do powstania dziedziny nauki określanej jako sztuczna inteligencja (ang. *artificial intelligence*, AI) [25, 34], uważanej obecnie za część

informatyki, lecz czerpiącej wiele z innych dziedzin, jak np. matematyka, psychologia, neurofizjologia, językoznawstwo. Sztuczna inteligencja zajmuje się badaniami nad programami komputerowymi zdolnymi do rozwiązywania zadań wymagających pewnej pracy twórczej, nazywanymi systemami inteligentnymi, nad ich konstruowaniem oraz wykorzystaniem w różnych dziedzinach techniki, jak również nad programami zdolnymi do głębszego zrozumienia ludzkiego sposobu rozumowania. System inteligentny (ang. *intelligent system*) charakteryzuje się zdolnością do samodzielnego pozyskiwania danych z jego otoczenia, generowania wiedzy z pozyskanych danych oraz wykorzystania wygenerowanej wiedzy do rozwiązania postawionego mu zadania [2]. Systemy tego rodzaju są stosowane do rozwiązywania zagadnień niealgorytmizowalnych, wymagających dysponowania znaczną wiedzą i analizowania wielu faktów.

Na podstawie badań z zakresu sztucznej inteligencji wykształciło się wiele dziedzin szczegółowych, które próbują rozwiązać problemy reprezentacji wiedzy, wnioskowania i obliczeń inteligentnych w bardzo różnorodny sposób. Można tutaj wskazać sieci neuronowe, algorytmy genetyczne, algorytmy mrówkowe oraz wykorzystywane w niniejszej pracy systemy ekspertowe.

W literaturze występuje wiele definicji systemów ekspertowych, które akcentują różnorodne cechy tego typu programów [3]:

1. System ekspertowy jest złożonym programem komputerowym (systemem programowym) tak zaprojektowanym i skonstruowanym, aby mógł naśladować (symulować) zachowanie się człowieka-eksperta w stosunkowo wąskiej dziedzinie wiedzy przy rozwiązywaniu problemów z danej dziedziny.
2. System ekspertowy jest programem komputerowym, który pomaga rozwiązywać problemy rozwiązywalne przez ludzi-ekspertów posiadających wiedzę specjalistyczną nabytą w wyniku długotrwałego doświadczenia i studiów w dziedzinach słabo sformalizowanych (bez teorii formalnej dającej możliwość utworzenia algorytmów).
3. System ekspertowy jest „inteligentnym” programem komputerowym stosującym wiedzę i procedury rozumowania (wnioskowania) dla rozwiązywania problemów, które wymagają doświadczenia ludzkiego (człowieka-eksperta), nabytego przez wieloletnią działalność w danej dziedzinie.

Systemy ekspertowe, posiadając zapisaną wiedzę z wybranej dziedziny, mogą jej używać wielokrotnie. Jednocześnie pozwala to ekspertowi (człowiekowi) uwolnić się od powtarzania analogicznych analiz i zająć się bardziej twórczymi zadaniami. Panuje pogląd, że systemy ekspertowe są szczególnie predysponowane do rozwiązywania problemów o charakterze klasyfikacyjnym, diagnostycznym oraz związanych z interpretacją danych. Rozwijaniem metodologii i narzędzi realizacji systemów ekspertowych, ich projektowaniem, a szczególnie budową baz wiedzy zajmuje się inżynieria wiedzy (ang. *knowledge engineering*) [4,17].

Jedną z najważniejszych, którymi zajmuje się inżynieria wiedzy, jest problematyka reprezentacji wiedzy (ang. *knowledge representation*) [41]. Wiedza

uzyskiwana różnymi metodami musi być odpowiednio zorganizowana. Osoby rozwiązujące określone problemy nie zastanawiają się nad strukturą wiedzy, którą wykorzystują. W przypadku zastosowań numerycznych istotny jest zapis, który umożliwi wykorzystanie jej za pomocą komputera. Wśród różnych sposobów reprezentacji wiedzy najważniejszą rolę pełni metoda oparta na regułach [8, 26]. Systemy wykorzystujące reguły są nazywane regułowymi (ang. *rule-based programming*). Niniejszy sposób formalizmu wiedzy charakteryzuje się wieloma zaletami. Najważniejszymi z nich są prostota i ogólność. Właściwości te sprawiają, że ta metoda reprezentacji wiedzy jest zrozumiała nawet dla osób niebędących specjalistami w zakresie systemów ekspertowych. Pomimo to metoda oparta na regułach posiada duże walory użytkowe. Istotną zaletą tej metody jest możliwość jej zastosowania w wielu różnych dziedzinach.

Reguły stanowią podstawę funkcjonowania systemu i wynikają z wiedzy eksperta – człowieka. Uzyskanie ich stanowi podstawowy problem przy tworzeniu systemu ekspertowego. Istotną cechą systemów regułowych jest również możliwość tzw. przyrostowej rozbudowy bazy wiedzy. Właściwość ta wynika z faktu, że reguły są traktowane jako wyodrębnione fragmenty wiedzy. Pozwala to pozyskiwać wiedzę z wielu źródeł.

W procesie wnioskowania można wyróżnić dwa rodzaje reguł:

- reguły proste – uzyskane za ich pomocą wnioski mają charakter pośredni,
- reguły złożone – uzyskane wnioski mają charakter końcowej konkluzji uzyskiwanej przez system.

Głównym problemem występującym podczas budowy systemów ekspertowych jest pozyskiwanie wiedzy (ang. *knowledge acquisition*). Od jakości utworzonej bazy wiedzy zależy poprawność i efektywność systemu ekspertowego. Przez wiele lat podstawowym źródłem wiedzy były konsultacje ze specjalistami, literatura fachowa, ankiety. Tego typu akwizycja wiedzy jest jednak zadaniem trudnym, czasochłonnym i kosztownym. Ogólnie można wymienić dwie podstawowe metody pozyskiwania wiedzy: manualne i automatyczne z zastosowaniem metod uczenia maszynowego. Wśród metod uczenia maszynowego najczęściej stosowaną metodą akwizycji wiedzy opartą na strategii uczenia pod nadzorem jest tzw. wnioskowanie indukcyjne, które jest określane jako przejście „od szczegółu do ogółu”. Podstawą tej metody jest tzw. zasada indukcji, która mówi, że możliwe jest przejście od przykładów będących jednostkowymi obserwacjami danego obiektu (procesu) do praw ogólnych obejmujących również przykłady spoza zbioru uczącego. Przykłady zebrane w zbiorze uczącym powinny reprezentować charakterystyczne cechy danego zagadnienia w całym analizowanym zakresie. Mogą być one uzyskiwane różnymi metodami, m.in. poprzez generowanie za pomocą programów symulacyjnych, w wyniku odczytów urządzeń pomiarowych, opisanie faktów zdefiniowanych przez eksperta. Zdolność uogólniania informacji zebranych w przykładach uczących na wszystkie możliwe przykłady danego zagadnienia określa się zdolnością do generalizacji. Umożli-

wia to stosowanie ogólnych praw do podejmowania decyzji na podstawie nowych obserwacji [19, 38].

W przypadku uczenia indukcyjnego najczęściej stosuje się algorytm indukcji drzew decyzyjnych. Metoda ta została opracowana przez R. Quinlana. W kolejnych wersjach nosi następujące nazwy: ID3, C4, C4.5 oraz See5 [28, 32]. W niniejszej pracy wykorzystano moduł indukcyjnego pozyskiwania wiedzy DeTree [22] wchodzący w skład pakietu sztucznej inteligencji Sphinx 4.0.

4. Ocena przepływów przez przewody wodociągowe

Projektowanie i eksploatacja systemów dystrybucji wymaga przeprowadzenia wielu obliczeń. Sieci wodociągowe są zbudowane ze złożonych, skomplikowanych układów przewodów, w których zachodzą różnorodne przepływy. Niezwykle ważnym zadaniem jest przeanalizowanie przepływów z punktu widzenia dobranej średnicy, prędkości przepływu, ale również położenia w strukturze układu przewodów w celu zapobieżenia przestojom wody. Gdy pojemność wewnętrzna przewodu ze względu na jego średnicę i długość jest znacznie większa niż wydatek z węzła końcowego i przepływ tranzytowy do dalszych przewodów, może wystąpić zjawisko przestojów wody w sieci, które ma negatywny wpływ na jakość wody. Problem ten może się pojawić w sieciach pierścieniowych oraz w końcówkach sieci, gdzie występują relatywnie małe przepływy w stosunku do wymaganej średnicy z punktu widzenia ochrony przeciwpożarowej. Zdarza się również, że rozbudowując sieć wodociągową, wprowadza się dodatkowe przewody łączące układy przewodów w pierścienie, nie analizując mogących pojawić się przestojów wody. Problemem może być również wzrastający przepływ przez przewody wraz z rozbudową systemu dystrybucji wody, gdy podłączane tereny nie były wcześniej uwzględnione w planie ogólnym wodociągu.

W niniejszej pracy jest rozważana ocena przepływu na poszczególnych odcinkach z punktu widzenia dobranej średnicy, jak i położenia w systemie dystrybucji wody, co ma zapobiec zbyt długim przestojom wody oraz nadmiernym stratom ciśnienia. Oczywiście istnieje możliwość sprawdzenia bezpośrednio natężenia przepływu lub prędkości przepływu w wynikach obliczeń poszczególnych odcinków. Metoda ta nie pozwala jednak wskazać przyczyny takiego stanu. Dopiero analiza struktury sieci wodociągowej, przepływów i prędkości pozwala uzyskać odpowiedź na te pytanie i podjąć odpowiednie kroki zaradcze w przypadku niewłaściwych wartości. Zakładając, że program komputerowy do obliczeń systemów dystrybucji wody ma charakteryzować się możliwością inteligentnej analizy wyników obliczeń, powinien mieć zdolność wskazania przyczyny, dla której należy uznać, że przepływ jest niepoprawny.

Na potrzeby niniejszej pracy zdefiniowano jedną klasę QK1 odpowiadającą zakresowi odpowiednich wartości oraz sześć klas QK2÷QK7 opisujących przyczyny niepoprawnych przepływów przez przewody sieci wodociągowej (rys. 1.) [6]. Za pomocą programu Epanet wykonano obliczenia hydrauliczne wybranych

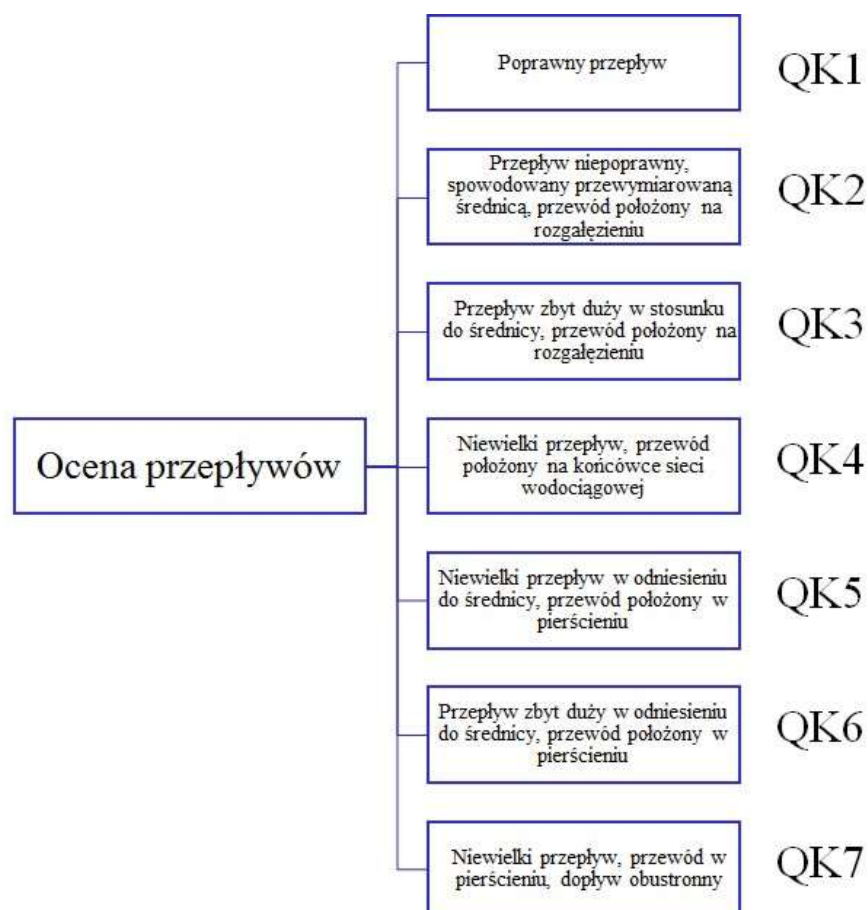
systemów dystrybucji wody i sporządzono przykłady w celu generacji drzewa decyzyjnego do oceny przepływów. Sporządzono 1178 przykładów uczących opisujących poszczególne klasy QK1÷QK7. Każdy przykład jest opisany następującymi argumentami:

- średnica wewnętrzna przewodu D_w ,
- natężenie przepływu przez przewód Q_m ,
- prędkość przepływu V ,
- STR – atrybut informujący, czy przewód jest położony na rozgałęzieniu sieci „R” czy w pierścieniu „P”,
- WK – atrybut informujący, czy w węźle końcowym odcinka obliczeniowego występuje odpływ wody do dalszych odcinków „W”, dopływ z innego przewodu „DO”, ewentualnie jedynie pobór wody z węzła końcowego (koniec sieci) „0”.

Za pomocą programu Statistica zbiór przykładów podzielono na dwa podzbiory: uczący i testowy. Wstępnie przyjęto, że w zbiorze uczącym będzie 70%, a w zbiorze testowym odpowiednio 30% wszystkich przykładów uczących. Wyboru przykładów do poszczególnych podzbiorów dokonano za pomocą próbkowania losowego warstwowego, tak aby w zbiorze uczącym i testowym znalazła się odpowiednia reprezentacja wszystkich klas. W związku z tym uzyskano podzbiór uczący zawierający 859 przykładów oraz podzbiór testowy z 319 przykładami (27,08%).

Za pomocą programu DeTreex na podstawie metody C4.5 wygenerowano drzewo decyzyjne dokonujące klasyfikacji kategorii QK1÷QK7. Schemat drzewa zamieszczono na rys. 2. – prostokątami oznaczono testy na atrybutach według metody C4.5, natomiast elipsy opisują liście, do których są przypisane odpowiednie klasy QK1÷QK7. Na podstawie eksperymentów z różnymi wartościami parametrów uczenia ostatecznie wygenerowano drzewo decyzyjne przy założeniu, że minimalna liczba przykładów tworząca liść jest nie mniejsza niż 5, natomiast zrezygnowano z przycinania drzewa, czyli przycięcie drzewa wynosi 0%. W eksperymencie parametr liczby przykładów uczących tworzących liść przyjmował wartości: 5, 20, 50, natomiast przycięcie drzewa: 80%, 50%, 25%, 15%, 5%, 0%. Przedstawione drzewo decyzyjne zawiera 17 złożonych reguł decyzyjnych.

Oceny jakości drzewa decyzyjnego dokonano, używając przykładów ze zbioru testowego. Przejście drzewa od korzenia do liścia prowadzi do przydzielenia testowego przypadku do jednej z klas QK1÷QK7. Wyniki klasyfikacji dla podzbioru testowego zamieszczono w macierzy pomyłek zamieszczonej w tab. 1. Macierz pomyłek jest macierzą kwadratową. W wierszach macierzy są zamieszczone informacje, do których klas w rzeczywistości należą odpowiednie przykłady, natomiast w kolumnach, do których klas zaliczyło poszczególne przykłady drzewo decyzyjne. Na przekątnej są umieszczone przykłady poprawnie sklasyfikowane.



Rys. 1. Klasy do oceny przepływów w przewodach systemu dystrybucji wody [6]

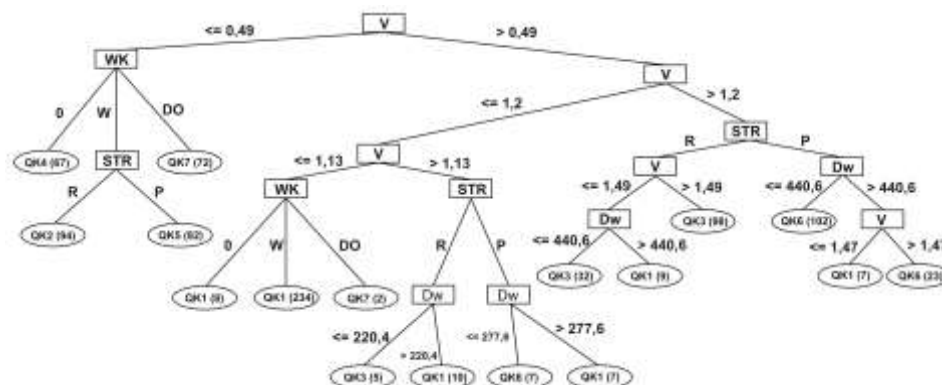
Fig. 1. Classes of flow assessment in water distribution system lines [6]

Dla podzbioru testowego liczącego 319 przykładów uczących liczba błędnie sklasyfikowanych wynosi 8 (2,51%) [6]. Uzyskano niewielki procent błędnych klasyfikacji na zbiorze testowym. Przypadki błędnie sklasyfikowane posiadają wartości atrybutów blisko granic decydujących o przydzieleniu do poszczególnych klas, stąd pojawiają się trudności z ich poprawną klasyfikacją. Większość błędnie sklasyfikowanych przypadków powinna należeć do klasy QK1, stąd wskazanie na inną klasę spowoduje dodatkową ocenę tych przypadków przez osobę realizującą obliczenia i błąd ten powinien być skorygowany. Niewątpliwie problemem jest jeden przypadek należący do klasy QK3, a sklasyfikowany jako poprawny QK1. Na tej podstawie można wnioskować, że pomimo przydziału przypadków do klasy QK1 należy dokładnie przejrzeć wyniki obliczeń i klasyfikacji.

Tabela 1. Macierz pomyłek wyników klasyfikacji dla podzbioru testowego drzewa decyzyjnego do oceny przepływów [6]

Table 1. Confusion matrix for testing subset of decision tree for flow assessment [6]

QK4	QK1	QK3	QK2	QK5	QK6	QK7	
24	-	-	-	-	-	-	QK4
-	95	1	1	1	2	-	QK1
-	1	56	1	-	-	-	QK3
-	-	-	29	-	-	-	QK2
-	-	-	-	33	-	-	QK5
-	-	-	-	1	52	-	QK6
-	-	-	-	-	-	22	QK7



Rys. 2. Schemat drzewa decyzyjnego do oceny przepływów przez przewody wodociągowe [6]

Fig. 2. Decision tree scheme for flow assessment in water-supply lines [6]

5. Podsumowanie i wnioski

Inżynieria wiedzy, w tym metody pozyskiwania wiedzy i systemy ekspertowe, jest bardzo szybko rozwijającą się dziedziną nauki. Wciąż pojawiają się nowe, ulepszone sposoby rozwiązywania różnorodnych problemów z ich zastosowaniem. Sytuacja ta stwarza ciekawą perspektywę dla inżynierów środowiska, którzy chcieliby zająć się wdrażaniem przedstawionych metod w problematyce zaopatrzenia w wodę. W pracy przeprowadzono eksperymenty numeryczne mające na celu wykazanie, że metody inżynierii wiedzy w postaci wnioskowania indukcyjnego oraz systemy ekspertowe mogą być zastosowane do wspomagania obliczeń hydraulicznych systemów dystrybucji wody.

Metoda indukcji może być zastosowana do generacji drzewa i reguł decyzyjnych w zakresie oceny przepływów przez przewody systemu dystrybucji wody. W pracy zdefiniowano klasy oraz opisujące je atrybuty, które pozwalają dokonać oceny przepływów na odcinkach obliczeniowych. Otrzymano 17 złożonych reguł decyzyjnych. System ekspertowy korzystający z reguł sporządzonych

za pomocą indukcji drzewa decyzyjnego może być zastosowany do wspomagania obliczeń hydraulicznych jako dodatkowy moduł programu komputerowego generujący informacje na temat problemów związanych z przepływami. Należy jednak pamiętać, że system ekspertowy jest narzędziem do wspomagania obliczeń i nie zwalnia osoby realizującej obliczenia z dokładnej oceny uzyskanych wyników.

Literatura

- [1] Ahmad K., Holmes-Higgin P.R., Hornsby C.P.W., Langdon A.J.: Expert systems for planning and controlling physical networks in the water industry. Knowledge-Based Systems, vol.1, issue 3, 1988, pp.153-165.
- [2] Beardon C. (ed.): Artificial Intelligence Terminology – A reference guide. John Wiley & Sons, New York 1989.
- [3] Białko M.: Sztuczna inteligencja i elementy hybrydowych systemów ekspertowych. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2005.
- [4] Bubnicki Z.: Wstęp do systemów ekspertowych. PWN, Warszawa 1990.
- [5] Bunn S., Helms S.: Application of an expert system to control treated water distribution. Proc. of the 26th Annual Water Resources Planning and Management Conference (WRPMD'99), 1999, pp.1-7.
- [6] Czapczuk A.: System ekspertowy do oceny przepływów i strat ciśnienia w układzie dystrybucji wody, dysertacja. Wydaw. Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2013.
- [7] Changa Ni-Bin, Pongsanonea N.P., Ernestb A.: Comparisons between a rule-based expert system and optimization models for sensor deployment in a small drinking water network. Expert Systems with Applications, vol. 38, issue 8, 2011, pp.10685-10695.
- [8] Cholewa W., Czogała E.: Podstawy systemów ekspertowych. Prace IBIB PAN, nr 28, Warszawa 1989.
- [9] Coulbeck B., Ulanicki B., Rance J.P., Deviatkov V.V., Kosov S., Glukhovskiy I.: Pressure control of a Moscow water supply system using expert system technology. Proc. of the 35th IEEE Conference on Decision and Control, vol. 4, 1996, pp. 4498-4499.
- [10] Dawidowicz J.: Indukcja drzewa decyzyjnego przeznaczonego do oceny przebiegu linii ciśnienia w sieci wodociągowej. Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej, Inżynieria Środowiska, z.17, 2006, s. 91-102.
- [11] Dawidowicz J.: Metody sztucznej inteligencji w diagnostyce wysokości ciśnienia w węzłach oraz układów sieci wodociągowych w procesie obliczeń hydraulicznych, [w:] Inteligentne systemy w inżynierii i ochronie środowiska. PZiTS, Poznań 2007, s. 85-94.
- [12] Dawidowicz J.: Przykłady oceny układu sieci wodociągowej przy użyciu drzewa decyzyjnego. Mat. XIV Krajowej Konferencji „Komputerowe wspomaganie badań naukowych” (KOWBAN'2007). Wrocławskie Towarzystwo Naukowe, Wrocław 2007, s. 99-104.
- [13] Dawidowicz J.: System ekspertowy do oceny układu systemu dystrybucji wody sporządzony za pomocą wnioskowania indukcyjnego. Rocznik Ochrona Środowiska, t. 14, Koszalin 2012, s. 650-659.

- [14] Dawidowicz J.: Zastosowanie systemów ekspertowych i sztucznych sieci neuronowych w projektowaniu i eksploatacji systemów wodociągowych. XV Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Inżynieria środowiska w eksploatacji kompleksów wojskowych”. Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa-Zakopane 2001, s.111-124.
- [15] Flakiewicz W.: Systemy informacyjne w zarządzaniu. Uwarunkowania, technologie, rodzaje. Wydaw. C.H. Beck, Warszawa 2002.
- [16] Gabryszewski T.: Wodociągi. Arkady, Warszawa 1983.
- [17] Kendal S., Creen M.: An introduction to knowledge engineering. Springer-Verlag, London 2007.
- [18] Knapik K., Bajer J.: Wodociągi. Podręcznik dla studentów wyższych szkół technicznych. Wydaw. Politechniki Krakowskiej, Kraków 2010.
- [19] Kubat M., Bratko I., Michalski R.S.: Review of machine learning methods, learning and data mining. John Wiley & Sons, 1998, pp. 3-70.
- [20] Kulshrestha S.: Expert system for management of water distribution network (WDN). International Journal of Engineering Science and Technology, vol. 2, no.12, 2010, pp.7401-7412.
- [21] Leon C., Martin S., Luque J., Vazques M.: EXPLORE: Expert system for water networks management. Proc. IEEE of 9th Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON '98), vol.1, 1998, pp.197-201.
- [22] Michalik K.: DeTreex 4.0 dla Windows 9x/NT/2000. Indukcyjny system pozyskiwania wiedzy. Podręcznik użytkownika. AITECH, Katowice 2003.
- [23] Mielcarzewicz W.: Obliczanie systemów zaopatrzenia w wodę, wyd. II. Arkady, Warszawa 2000.
- [24] Mulawka J.J.: Systemy ekspertowe. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1996.
- [25] Negnevitsky M.: Artificial intelligence: A guide to intelligent systems. Addison-Wesley, 2004.
- [26] Niederliński A.: Regułowe systemy ekspertowe. Wydaw. Pracowni Komputerowej Jacka Skalmierskiego, Gliwice 2000.
- [27] Petrozolin W.: Projektowanie sieci wodociągowych. Arkady, Warszawa 1974.
- [28] Quinlan J.R.: C 4.5 Program for Machine Learning. Morgan Kaufmann, San Mateo, CA 1993.
- [29] Quinlan J.R.: Improved use of continuous attributes in C4.5. Journal of Artificial Intelligence Research, vol. 4, 1996, pp.77-90.
- [30] Rojek I.: A concept of a decision support system with a knowledge acquisition module for the water supply and sewage system of a city, [in:] Studies & Proceedings Polish Association for Knowledge Management, J. Kacprzyk (eds.), vol. 9, Bydgoszcz 2007, pp. 98-104.
- [31] Rojek I.: Classifier models in intelligent support system for water network management. Polish Journal of Environmental Studies, vol. 17, no. 4C, 2008, pp. 62-66.
- [32] Rojek I.: Inteligentny system wspomagania decyzji dla sterowania siecią wodociagową. II Krajowa Konferencja Naukowa „Technologie przetwarzania danych”. Wydaw. Politechniki Poznańskiej, Poznań 2007, s. 186-194.
- [33] Rojek I.: Projektowanie systemu informatycznego zarządzania miejską siecią wodociagową. Instytut Badań Systemowych, Polska Akademia Nauk, seria Badania Systemowe – Inżynieria Środowiska, t. 57, Warszawa 2007.

- [34] Shapiro S.C.: Encyclopedia of artificial intelligence, vol. 1. Wiley, New York 1990.
- [35] Spyridakos Th., Pierakos G., Metaxas V., Logotheti S.: Supporting the management of measurement network with an expert system. The NeMO System, Operational Research, vol. 5, no. 2, 2005, pp. 273-288.
- [36] Sroczan E.M., Urbaniak A.: Komputerowy system trenowania operatorów stacji uzdatniania wody i oczyszczania ścieków bazujący na sztucznej inteligencji. Mat. V Międzynarodowej Konferencji Zaopatrzenie w Wodę Miast i Wsi. PZiTS, Poznań-Gdańsk 2002, s.1003-1014.
- [37] Sroczan E.M., Urbaniak A.: Wykorzystanie metod sztucznej inteligencji w monitorowaniu, sterowaniu i eksploatacji systemów zaopatrzenia w wodę i ochrony wód. Mat. VI Międzynarodowej Konferencji Zaopatrzenie w Wodę Miast i Wsi, PZiTS, Poznań 2004, s. 695-704.
- [38] Stefanowski J.: Algorytmy indukcji reguł decyzyjnych w odkrywaniu wiedzy. Wydaw. Politechniki Poznańskiej, Poznań 2001.
- [39] Strelau J.: O inteligencji człowieka. Wiedza Powszechna, Warszawa 1987.
- [40] Turing A.M.: Computing machinery and intelligence, Mind 59, 1950, pp. 433-460.
- [41] Van Harmelen F., Lifschitz V., Porter B.: Handbook of knowledge representation. Elsevier Science, 2008.
- [42] Von Neumann J.: The computer and the brain. Yale Univ. Press, New Haven 1958.
- [43] Zhang H., Luo D.: Application of an expert system using neural network to control the coagulant dosing in water treatment plant. Journal of Control Theory and Applications, vol. 2, 2004, pp. 89-92.
- [44] Zhu X., Simpson A.R.: An expert system for turbidity control advice in water treatment plant operations. Department of Civil Engineering, The University of Adelaide, 1991.

THE ANALYSIS OF WATER FLOW IN THE WATER SUPPLY NETWORK PIPES USING THE EXPERT SYSTEM

Summary

Designing water distribution systems requires lots of calculations and analyses aimed at finding the best possible solution. The primary purpose of the calculations is to determine the pipe flow rate, pressure loss, height of water tanks, required supply pressure and the pressure in respective nodes. Water distribution systems comprise complex pipe designs where various water flows occur. It is extremely important to analyze water flows from the standpoint a selected diameter and flow rate, but also the pipe position with respect to the structure, in order to prevent water outage. When the conductor's internal capacitance – due to its diameter and length – exceeds the output from the end node and the transit flow for subsequent pipes, water outage may occur. This can take place in ring networks and network terminals, where water flows are relatively small in relation to the required diameter in terms of fire protection. Also the increasing pipe flow, along with the expansion of the water distribution system, may turn out to be problematic when connected areas have not been previously included in the general plan of the water supply system. The issue has been resolved by means of classification based on decision tree principles. The QK1 class was introduced with respect to the range of the respective values corresponding to water flow, and six other classes, QK2-QK7, were also defined to describe the cause of improper flow through the water supply network pipes. Induction process of the decision tree was presented with the use of

the C4.5 method designed to evaluate water flow in the pipes. The principles from the resulting decision tree allow to evaluate water flow by selecting one of the classes. The expert system, using the principles developed on the basis of the decision tree induction, can be used as an additional computer program module.

Keywords: water distribution system, the induction of decision tree method C4.5, verification of calculation results

Przesłano do redakcji: 12.12.2014 r.

Przyjęto do druku: 28.03.2015 r.

DOI: 10.7862/rb.2015.2