

Postępy i problemy realizacji systemów detekcji i lokalizacji nieszczelności rurociągów

Mateusz Turkowski
Andrzej Bratek
Marcin Słowikowski
Adam Bogucki

Systemy detekcji i lokalizacji nieszczelności rurociągów odgrywają kluczową rolę, jeśli chodzi o zminimalizowanie występowania wycieków oraz ograniczenie ich skutków. W artykule przedyskutowano rozwój systemów stosowanych w rurociągach cieczy i gazów. Autorzy są zdania, że najefektywniejsze są systemy analityczne, wsparte algorytmami gradientowymi i śledzenia czoł fal ciśnienia. Intensywnie rozwijane metody statystyczne mogą w przyszłości stanowić cenne uzupełnienia istniejących systemów, jako że każdy system ma pewne wady (omówione w artykule), a idealny system jak dotąd nie został opracowany.

Uszkodzenia rurociągów mogą być spowodowane korozją lub erozją ścianek wewnętrznych i zewnętrznych, niejednorodnościami lub pęknięciami spawów, wgnieceniami ścianek, wadami materiałowymi, degradacją materiału wskutek zmian ciśnienia i deformacjami rurociągu wskutek ruchów gruntu, co prowadzi do zmęczenia materiału i powstania mikroszczelin. Uszkodzenia mogą powstawać także w wyniku działania ludzi, np. podczas nieuważnego wykonywania ziemnych prac budowlanych lub remontowych na trasie rurociągu lub nieupoważnionego poboru (kradzieży) medium. Przeciwdziałanie przyczynom uszkodzeń może polegać na zainstalowaniu systemu ochrony katodowej, pod nadzorem systemu telemetrycznego oraz na kontrolach stanu rurociągu, m. in. przy użyciu tzw. tłoków inteligentnych.

Pomimo stosowania działań zaradczych zdarzają się wycieki, co powoduje poważne straty materialne oraz zagrożenie dla bezpieczeństwa ludzi i mienia oraz skażenie środowiska. Zagrożenia te wyeliminować można poprzez szybkie wyłączenie tłoczenia, odcięcie nieszczelnego odcinka i wysłanie na miejsce wyspecjalizowanych brygad – jednak podstawą wszelkich działań jest maksymalnie szybkie wykrycie i zlokalizowanie nieszczelności.

Badania nad systemami bieżącego wykrywania i lokalizacji nieszczelności są prowadzone od kilkudziesięciu lat, jednak nie dopracowano się do tej pory całkowicie skutecznego systemu działającego w każdych warunkach ruchowych i dla każdej konfiguracji rurociągu, o czym świadczą pojawiające się co jakiś czas informacje medialne o katastrofach ekologicznych spowodowanych wyciekami. Nowo budowane rurociągi są wyposażone w nowoczesne i skuteczne syste-

my, jednak obiekty dawniej budowane ulegają powolnej degradacji, mimo stosowania różnych środków zapobiegawczych.

W [1, 2] przedstawiono obszerny przegląd metod i systemów detekcji i lokalizacji nieszczelności rurociągów. W odniesieniu do rurociągów dalekosieżnych, których dotyczy niniejszy artykuł, przeważają obecnie stale doskonalone metody analityczne, lecz obserwuje się tendencje rozwoju metod statystycznych i korzystających ze współczesnych algorytmów optymalizacyjnych na bazie inteligencji roju.

Systemy detekcji nieszczelności gazociągów powinny realizować następujące zadania:

- wykrycie nieszczelności
- wygenerowanie alarmu
- zlokalizowanie nieszczelności – ocena współrzędnej przestrzennej położenia miejsca uchodzenia
- oszacowanie strumienia objętości wyciekającego medium.

Metody analityczne w zastosowaniach do gazociągów

Metody analityczne nie wymagają wprowadzania istotnych zmian w istniejących systemach teleinformatycznych, można je więc w miarę szybko i efektywnie zastosować do istniejących rurociągów. Metody analityczne polegają na bieżącym porównaniu danych z obiektu rzeczywistego z modelem matematycznym, statycznym lub dynamicznym [1, 5].

W oparciu o model matematyczny sieci obliczany jest rozkład ciśnień w sieci na podstawie znanych, zmierzonych w rzeczywistej sieci wartości strumienia. Obliczone ciśnienia są na bieżąco porównywane ze zmierzonymi w rzeczywistej sieci. Jeżeli rozbieżności między nimi (tzw. residua) przekroczą określone wartości, uruchamiana jest procedura lokalizacji nieszczelności.

Dotychczasowe zastosowania metod analitycznych były ograniczone do stosunkowo prostych układów, tj. zwykle pojedynczych rurociągów, czasem z jed-

prof. nzw. dr hab. inż. Mateusz Turkowski
– Instytut Metrologii i Inżynierii Biomedycznej
Politechniki Warszawskiej, mgr inż. Andrzej Bratek,
mgr inż. Marcin Słowikowski – PIAP,
mgr inż. Adam Bogucki – PGNiG

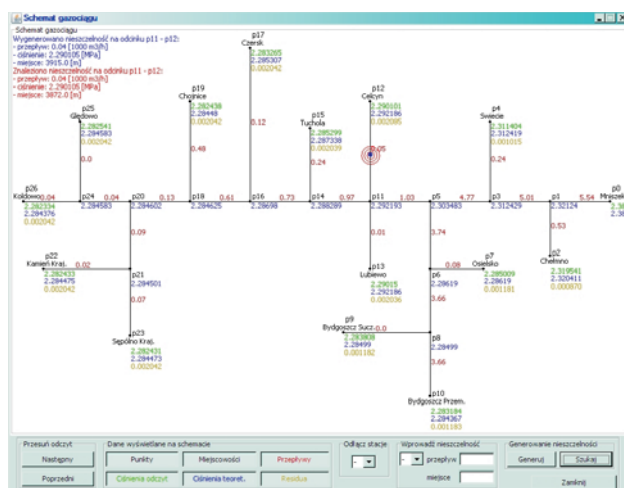
nym lub dwoma odgałęzieniami. Jest to wystarczające w przypadku rurociągów cieczy (ropy lub paliw), gdzie rzadko spotyka się bardziej skomplikowane układy [3]. Sieci przesyłowe gazu są jednak zwykle znacznie bardziej skomplikowane, gazyfikacja określonego obszaru wymaga bowiem bardziej rozbudowanych systemów [4].

W Instytucie Metrologii i Systemów Pomiarowych (obecnie Metrologii i Inżynierii Biomedycznej) Politechniki Warszawskiej (IMIŁB PW) podjęto pionierskie badania nad zastosowaniem metod analitycznych dla rozbudowanych układów gazociągów.

Do badań wykorzystano fragment rzeczywistej sieci przesyłowej. Wytypowany wycinek sieci składa się z 14 punktów wyjścia oraz jednego punktu wejścia. Na obecnym etapie badań dane z systemu telemetry były zapisywane w postaci pliku na dysku, w celu dalszej obróbki *off-line*. Opracowany model matematyczny wykorzystywał modelowanie statyczne. Wstępna ocena dynamiki układu dokonana na podstawie kryterium [1] wykazała, że wpływ zmian pędu na rozkład ciśnienia w sieci jest pomijalny. Po dostrojeniu modelu do obiektu rzeczywistego (tzw. *tuning*) przystąpiono do badań nad systemem detekcji i lokalizacji nieszczelności.

Algorytm lokalizacji nieszczelności polega, ogólnie rzecz biorąc, na wywoływaniu w modelu zjawiska uchodzenia (o wartości oszacowanej za pomocą metody bilansowej) w różnych miejscach sieci, aż do uzyskania ponownego zminimalizowania residuów (rozbieżności między ciśnieniami zmierzonymi a obliczonymi z modelu). Dokonuje się tego iteracyjnie, najpierw określa się łuk sieci, w którym uchodzenie jest najbardziej prawdopodobne, następnie poszukuje się miejsca uchodzenia na tym odcinku, dzieląc go kolejno na pół itd. Dąży się przy tym do minimalizacji funkcji celu, za jaką przyjęto sumę kwadratów residuów. Procedura jest wspierana metodą bilansowania [1], która pomaga uściślić natężenie uchodzenia, co z kolei umożliwia dokładniejszą jego lokalizację.

Na obecnym etapie nie realizowano rzeczywistych uchodzeń z uwagi na bezpieczeństwo, procedurę detekcji testowano wykonując kolejno określone działania.



Rys. 1. Przykładowy ekran programu do detekcji i lokalizacji nieszczelności

„Zamrażano” zarejestrowany obraz sieci i przykładano do niego wirtualne uchodzenie. Następnie uruchamiano dwa współbieżne modele: jeden symulujący sieć bez nieszczelności i drugi z zasymulowaną nieszczelnością (zastępujący sieć rzeczywistą). Następnie losowo generowano nieszczelność i uruchamiano procedurę jej lokalizacji. Uzyskane wyniki okazały się zaskakująco dobre, uchodzenie było lokalizowane w przeciągu kilku sekund, z błędem lokalizacji od kilku do kilkudziesięciu metrów. Przykładowy ekran programu do wykrywania nieszczelności, przedstawiono na rys. 1.

W trakcie tych symulacji przyjęto, że wyniki pomiarów ciśnienia i strumienia są bezbłędne. Wprowadzenie modułu, który generuje losowo błędy pomiarów ciśnień i strumienia pogorszyło jednak znacznie dokładność lokalizacji.

Metody analityczne w zastosowaniu do rurociągów cieczy

Według utartych poglądów systemy detekcji wycieku w pojedynczych odcinkach rurociągów w stanach ustalonych są już w zasadzie dopracowane. Pogląd ten można uznać za słuszny dla przypadku w miarę ustalonego przepływu jednego medium, przy braku operacji technologicznych w rodzaju przełączania zbiornika odbiorczego (z napełnionego na pusty), czy też w okresie po uruchomieniu i zatrzymaniu tłoczenia, a zwłaszcza postoju instalacji. Dla podobnych sytuacji nie jest to już takie oczywiste. W okresach tych system może generować fałszywe alarmy, które są o tyle niebezpieczne, że w wypadku częstego występowania mogą spowodować zubożenie dyspozytorów prowadzące do ignorowania alarmów generowanych podczas rzeczywistego zagrożenia.

Również tym zagadnieniom poświęcono w IMIŁB PW (we współpracy z PIAP) szereg prac, opartych przede wszystkim na metodzie analitycznej, zbliżonej do opisanej uprzednio w zastosowaniu do gazociągów. Skorzystano jednak, z uwagi na długotrwałe stany nieustalone po operacjach technologicznych, z modelu dynamicznego w postaci układu równań (zasada zachowania masy i pędu) (1) i (2):

$$\frac{\partial w(x,t)}{\partial x} + \frac{1}{E} \frac{\partial p(x,t)}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial p(x,t)}{\partial x} + \rho(x) \frac{\partial w(x,t)}{\partial t} = -\rho(x) g \sin \alpha - \frac{\lambda(x) \rho(x)}{2d} w(t) |w(t)| \quad (2)$$

gdzie: $E = \frac{E_C}{1 + \frac{d}{b} \frac{E_C}{E_R}}$ – moduł sprężystości układu ciecz-rurociąg w Pa

E_C – moduł sprężystości cieczy (Pa), E_R – moduł sprężystości materiału rurociągu (moduł Younga) (Pa), b – grubość ścianki rurociągu (m), d – średnica wewnętrzna rurociągu (m), $\lambda(x)$ – współczynnik tarcia (liczba bezwymiarowa), α – kąt nachylenia danego

odcinka rurociągu, λ – współczynnik strat liniowych, w – prędkość średnia, p – ciśnienie.

Wprowadzono znaczne, w stosunku do dotychczas stosowanych, ulepszenia i uzupełnienia modelu matematycznego dynamiki procesu tłoczenia cieczy, uwzględniając podstawowe elementy instalacji tłocznej, tj. pompę główną, zbiornik końcowy i zasuwy. Model pompy głównej oparto na aproksymacji katalogowych charakterystyk statycznych pomp zainstalowanych w rzeczywistym rurociągu. Ma on następującą, ogólną postać

$$p(t) = \rho g (Aq^3 + Bq^2 + Cq + D)$$
 (3)

Zmianę poziomu cieczy w zbiorniku, powodującą zmianę ciśnienia w rurociągu po stronie odbioru opisano równaniem

$$\frac{dHz}{dt} = \left(\frac{d}{Dz} \right)^2 \cdot 3600 \int w(L,t) dt$$
 (4)

gdzie: H_z – poziom w zbiorniku końcowym, D_z – średnica zbiornika, w – prędkość medium.

W modelu zasuwy powiązano prędkość medium ze spadkiem ciśnienia na zasuwie, poprzez współczynnik otwarcia zasuwy x , przyjmując liniowy tryb jej przedstawienia między skrajnymi położeniami. Model zasuwy ma postać

$$w = K(x) \cdot \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}}$$
 (5)

gdzie:

dla $x = 1$ $K(x) = 0,45$
dla $x = 0$ $K(x) = 0$
dla $0 < x < 1$
$$K(x) = 0,45 \cdot \frac{1}{\pi} \arccos(1 - 2x) - \frac{2}{\pi} (1 - 2x) \sqrt{x - x^2}$$

Szerszy opis modelu można znaleźć w [6]. Kompletny model zaimplementowano w środowisku Matlab/Simulink. W implementacji uwzględniono rozwiązania programowe, pozwalające na zmianę parametrów pompowanego produktu w trakcie symulacji, a tym samym odtwarzanie przemieszczania się mediów o różnych właściwościach fizyko-chemicznych przez rurociąg, co dobrze koresponduje z częstymi sytuacjami spotykanymi w rzeczywistych rurociągach.

Model współpracuje z pięcioma algorytmami detekcji i lokalizacji nieszczelności, uruchamianymi w różnych sytuacjach. Są to znane metody: gradientowa i śledzenia czoła fali ciśnienia [1] oraz opracowane przez autorów procedury oznaczone symbolami Z, W i P.

Na podstawie przeprowadzonych badań symulacyjnych skuteczności poszczególnych algorytmów wykrywania nieszczelności opracowano zasady synchronizacji pracy i współdziałania powyższych algorytmów w różnych sytuacjach technologicznych pracy instalacji tłocznej obejmujących: stabilne tłoczenie jednego rodzaju cieczy, stabilne tłoczenie kilku rodzajów cieczy, postój instalacji, uruchomienie tłoczenia, zmianę rodzaju tłocznej cieczy, przełączenie zbiornika końcowego. Zasady te zilustrowano w tab.

Tab. Zasady współdziałania algorytmów wykrywania i lokalizacji nieszczelności

Algorytmy		Stan obiektu				
		ustalony		nieustalony		
		a	b	c	d	e
Procedury WiLN	F	•				
	G	•				•
	Z	•		•	•	•
	W	•		•	•	•
	P		•			

Algorytmy wykrywania nieszczelności: F – śledzenie czoła fali ciśnienia, G – metoda gradientowa, Z – procedura Z, W – procedura W, P – procedura P
Stan obiektu: a – stabilne tłoczenie, b – postój instalacji, c – uruchomienie tłoczenia, d – zmiana rodzaju tłocznej cieczy, e – przełączenie zbiornika końcowego, WiLN – wykrywanie i lokalizacja nieszczelności
• – skuteczne działanie

W trakcie analizy przebiegów zarejestrowanych w stacjach pomiarowych rzeczywistego rurociągu dostrzeżono czasowo występujące istotne zakłócenia wartości pomiarów. Użycie w przedstawianych algorytmach takich wartości mogłoby prowadzić do fałszywych alarmów o pojawieniu się wycieku lub do błędnego rozpoznania jego lokalizacji. Stąd, poza rutynowymi procedurami cyfrowej filtracji pomiarów, opracowano procedury identyfikacji pomiarów do oceny ich poprawności, które polegają na badaniu chwilowych przyrostów wartości pomiaru oraz porównywaniu pomiarów z wielkościami wyznaczonymi za pomocą modelu. Pomiaru uznane jako niepoprawne eliminowane są z procesu wykrywania wycieków.

Dokładność lokalizacji wycieku zawiera się w granicach od 20 m (stany ustalone) do 200–400 m w stacjach nieustalonych, w zależności od intensywności zaburzenia.

Metody statystyczne

W ostatnich latach pojawiły się publikacje na temat metod detekcji nieszczelności, które umownie nazwano metodami statystycznymi. Polegają one na analizie wyników pomiarów parametrów istotnych z punktu widzenia funkcjonowania rurociągu (przepływy, ciśnienia, temperatura). Nie wymagają jednak żadnej istotnej wiedzy na temat rurociągu ani zjawisk w nim zachodzących.

Stosuje się tu różne narzędzia. Teoria zbiorów przybliżonych, opracowana w 1982 r. przez prof. Zdzisława Pawłaka [7] stanowi rozwinięcie klasycznej teorii zbiorów. Zbiór przybliżony (ang. *rough set*) to obiekt matematyczny zbudowany w oparciu o logikę trójwartościową. W swym pierwotnym ujęciu zbiór przybliżony to para klasycznych zbiorów: przybliżenie dolne i przybliżenie górne. Dany element może należeć do obydwu przybliżeń, do żadnego lub tylko do przybliżenia górnego. Narzędzie to służy głównie do wstępnej analizy i redukcji zbioru zebranych danych.

Do identyfikacji, czy jest wyciek czy nie, można zastosować tzw. maszynę wektorów wspierających (ang. *Support Vector Machine*). Jest to algorytm identyfikujący zależność między elementami (w tym przypadku wynikami pomiarów) na podstawie przykładów – zbiorów danych treningowych, obejmujących przypadki z wyciekami i bez wycieku [8].

Do kolejnych działań, jak lokalizacja miejsca uszkodzenia, mogą być stosowane algorytmy optymalizacyjne bazujące na sztucznych sieciach neuronowych [9] lub inteligencji roju. Inteligencja roju jest techniką sztucznej inteligencji korzystającą z obserwacji zachowań społecznych w zorganizowanych populacjach. Tego typu organizacje są tworzone przez grupy osobników, które kontaktują się między sobą. Wypadkowa tych lokalnych oddziaływań, przy równoczesnym wpływie środowiska, determinuje zachowanie całej populacji (roju), które umożliwia zapamiętywanie i powracanie do wcześniej poznanych obszarów o sprzyjających właściwościach. Algorytmy bazujące na inteligencji roju wykorzystują własność zapamiętywania przez cząstki roju położenia obszarów o sprzyjających właściwościach, co umożliwia rojowi przemieszczanie się w kierunku obszaru o właściwościach najlepszych. Przykładem takich inteligentnych rojów w świecie przyrody są: kolonie mrówek, roje pszczoł, ławice ryb itp.

Do celów lokalizacji nieszczelności stosowano m.in. algorytm optymalizacji rojem cząstek PSO (*Particle Swarm Optimization*) oraz algorytm naśladujący zachowanie roju pszczoł ABC (*Artificial Bee Colony*).

W grudniu 2008 r. w Instytucie Metrologii i Inżynierii Biomedycznej PW, we współpracy z Instytutem Automatyki Przemysłowej PW i firmą Biatel SA, podjęto badania wykorzystujące do detekcji nieszczelności modele cząstkowe (lokalne) pozyskiwane z zastosowania różnych technik modelowania na podstawie danych pomiarowych. Modele cząstkowe odzwierciedlające funkcjonowanie określonych fragmentów instalacji, będą projektowane w taki sposób, aby pokryły całą instalację i dodatkowo zapewniły największą rozróżnialność uszkodzeń. Jako uszkodzenia rozpatrywane będą nie tylko nieszczelności instalacji, ale także uszkodzenia torów pomiarowych i urządzeń wykonawczych. Wnioskowanie diagnostyczne prowadzone będzie z zastosowaniem logiki rozmytej. Do generacji residuów planowane jest wykorzystanie modeli neuronowych typu MLP (*Multilayer Perceptron*), modeli rozmytych typu TSK (*Takagi-Sugeno-Kanga*), modeli addytywnych oraz filtrów Kalmana. Zastosowanie modeli addytywnych jest nowym podejściem, oryginalnie zaproponowanym przez Friedmana i Stuetzle'a. Modele takie nie były dotychczas stosowane w diagnostyce. Podstawową zaletą tego rozwiązania jest możliwość uchwycenia trudno wyczuwalnych zależności oraz możliwość modelowania procesów z nieliniowościami o trudnej do określenia postaci.

Prezentowane są czasem opinie, że stosowanie opisanych metod wynika z obawy przed zmierzaniem się z podstawami fizycznymi zjawisk i obawy przed trudnościami związanymi z dogłębnym poznaniem skom-

plikowanych zasad funkcjonowania obiektu. Z drugiej jednak strony, dla starych rurociągów, gdy nie można dokładnie odtworzyć wymiarów geometrycznych ani chropowatości oraz dla podziemnej armatury trudnej do zidentyfikowania, zlokalizowania i zamodelowania, może to być jedyne możliwe rozwiązanie.

Główne problemy i przeszkody w realizacji skutecznych systemów detekcji nieszczelności

Ścisłość cieczy w połączeniu z odkształceniami sprężystymi rurociągu prowadzi do długotrwałych (dziesiątki minut) stanów przejściowych po operacjach technologicznych. Zjawiska te są silnie uzależnione od modułu sprężystości układu ciecz-rurociąg E , występującego w równaniu (1). Niestety, obecność wtrąceń gazowych w cieczy wpływa zasadniczo na ten moduł (1 % wtrąceń gazowych w formie równomiernie rozmieszczonych drobnych pęcherzyków może zwiększyć ścisłość takiej mieszaniny nawet kilkaset razy). Ponieważ spadek ciśnienia wzdłuż rurociągu może wynieść kilka MPa, to w końcowym jego fragmencie może dojść do wydzielenia się fazy gazowej w postaci lżejszych węglowodorów. Może to doprowadzić do znacznych rozbieżności między modelem a obiektem i spowodować trudne do oszacowania błędy detekcji lub generowanie fałszywych alarmów.

Substancje zmniejszające tarcie lepkie, stosowane ostatnio do minimalizacji ilości energii zużywanej na pompowanie powodują trudne do uwzględnienia zmiany współczynnika strat liniowych λ , występującego w równaniu (2). To również może spowodować, że wyniki otrzymane na podstawie modelu będą odbiegać od zachowania rzeczywistego rurociągu.

Zupełnie odrębnym zagadnieniem jest wpływ niepewności aparatury pomiarowej na dokładność działania systemu. Niezależnie od tego, jaki system czy algorytm detekcji i lokalizacji nieszczelności zostanie zastosowany, to będzie on tylko na tyle dobry, na ile rzeczywiste będą wykorzystane przezeń dane pomiarowe.

Po zasymulowaniu błędów przetworników w opisanym systemie opracowanym dla gazociągów okazało się, że błędy lokalizacji uchodzenia zwiększyły się z kilkunastu/kilkudziesięciu do kilkuset metrów lub nawet powyżej kilometra.

Autorzy artykułu opracowali co prawda metody wykrywania uszkodzonych przetworników i eliminowania pochodzących z nich pomiarów z dalszych obliczeń, niestety nie znaleźli jak dotąd żadnych publikacji, w których analizowano by wpływ niepewności przetworników pomiarowych na jakość systemów diagnostyki. Autorzy zamierzają takie badania wkrótce podjąć. W wyniku tych badań opracowane zostaną wytyczne doboru aparatury pomiarowej (zwłaszcza pod kątem niepewności), prowadzące do osiągnięcia założonej dokładności lokalizacji nieszczelności.

Pojawia się więc pytanie – jak wobec opisanych trudności zrealizować niezawodny system detekcji

i lokalizacji nieszczelności? Odpowiedź jest stosunkowo prosta: należy stosować dwie lub więcej różnych, współbieżnie funkcjonujących metod, np. tak, jak zaproponowano w rozdziale dotyczącym rurociągów ciecchy (zastosowano 5 współbieżnych algorytmów). Kontynuacja badań nad wszelkimi metodami, czy to opartymi na podstawach fizycznych, czy korzystającymi ze współczesnych sposobów analizy danych pomiarowych, jest więc ze wszech miar pożądana.

Podziękowania

Niniejszy artykuł jest wynikiem badań finansowanych ze środków Operatora Gazociągów Przesyłowych Gaz-System S.A. oraz prac naukowych finansowanych ze środków budżetowych, wykonanych w ramach realizacji Programu Wieloletniego PW-004 pn. Doskonalenie systemów rozwoju innowacyjności w produkcji i eksploatacji w latach 2004–2008 oraz ze środków na naukę w latach 2008 – 2010 jako projekt rozwojowy.

Bibliografia

1. Turkowski M., Bratek A., Słowikowski M.: *Methods and system of leak detection in long range pipelines*, Journal of Automation, Mobile Robotics & Intelligent Systems, 2007, 1 (3), pp. 39–46.
2. Glen N.F.: *A review of pipeline integrity systems*. Report No 2005/257, National Engineering Laboratory, East Kilbride, 2005.
3. Strona internetowa Przedsiębiorstwa Eksploatacji Rurociągów Naftowych „Przyjaźń” www.pern.com.pl
4. Strona internetowa Operatora Gazociągów Przesyłowych „Gaz-System” sp. z o.o. www.gaz-system.com.pl
5. Kowalczyk Z., Gunawickrama K.: *Detekcja i lokalizacja wycieków w rurociągach przemysłowych*. Rozdz. 21 pracy zbior. pod red. J. Korbicza i J. Kosielnego, Warszawa, WNT 2002.
6. Sobczak R., Turkowski M., Bratek A., Słowikowski M.: *Mathematical modelling of liquid flow dynamics in long range transfer pipelines*. Part 1. Problemy eksploatacji, 2007.
7. Pawlak Z.: *Rough sets*, International Journal of Computer and Informational Sciences, 1991, 11(5), pp. 341–356.
8. Chen H., Ye H., Su H.: *Application of support vector machine learning to leak detection and location in pipelines*. Proceedings of the 21st IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference IMTC 04, 18–20 May 2004, Vol. 3.
9. Arshad Ahmad Mohd., Kamaruddin Abd. Hamid: *Pipeline Leak Detection System in a Palm Oil Fractionation Plant Using Artificial Neural Network*. Proceedings of the International Conference on Chemical and Bioprocess Engineering ICCBPE 2003, Kota Kinabalu, August 2003.

