



Diagnozowanie nieszczelności w rurociągach przesyłowych cieczy z wykorzystaniem metody opartej na detekcji fal ciśnienia — studium zastosowania dwóch standardowych i niestandardowych urządzeń pomiarowych

PAWEŁ OSTAPKOWICZ

Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny, Katedra Automatyki i Robotyki,
15-351 Białystok, ul. Wiejska 45C, p.ostapkowicz@pb.edu.pl

Streszczenie. Artykuł dotyczy zagadnień diagnozowania wycieków z rurociągów przesyłowych cieczy. Obszarem zainteresowania jest metoda oparta na detekcji fal ciśnienia. Rozważany jest jej wariant tylko z dwoma punktami (urządzeniami) pomiarowymi, rozmieszczonymi na wlocie i wylocie rurociągu. Pod uwagę brane jest zastosowanie standardowych przetworników do pomiaru sygnałów ciśnienia oraz niestandardowej techniki pomiaru nowych sygnałów diagnostycznych. Nowe sygnały diagnostyczne, umownie nazwane sygnałami słabych interakcji, wynikają z dołączenia do rurociągu specjalnych urządzeń (korektorów). W celu porównania obu rozwiązań sprzętowych określono wskaźniki jakościowe analizowanej metody diagnozowania wycieków. Podstawę oceny stanowiły badania eksperymentalne przeprowadzone na stanowisku z modelem fizycznym rurociągu. Był to rurociąg do transportu wody, o długości 380 m i średnicy wewnętrznej 34 mm, który wykonano z rur z polietylenu (PEHD). W badaniach wykorzystano i przetestowano autorskie procedury diagnostyczne.

Słowa kluczowe: diagnostyka techniczna, rurociągi, diagnozowanie wycieków

1. Wstęp

Istotnym wymogiem eksploatacji rurociągów przesyłowych cieczy jest zastosowanie odpowiednich rozwiązań ukierunkowanych na wykrywanie stanów awaryjnych z nieszczelnościami. Zakres zadań obejmuje tu: wykrywanie, lokalizowanie i oszacowanie intensywności zaistniałych wycieków. Za praktyczną realizację tych

zadań odpowiadają systemy diagnostyczne wycieków (z ang. LDS — *Leak Detection Systems*) instalowane na rurociągach. Powszechnym i najczęstszym rozwiązaniem są systemy opracowywane w oparciu o zastosowanie metod diagnostycznych, które bazują na pomiarach wewnętrznych parametrów przepływu w rurociągu, tj. strumienia, ciśnienia, temperatury. W literaturze takie metody diagnostyczne określane są jako metody pośrednie (analityczne, wewnętrzne) [1, 3, 10].

Z punktu widzenia obsługi systemów LDS, jak również niezawodności ich działania, pożądanym rozwiązaniem powinno być ograniczenie do minimum liczby punktów (urządzeń) pomiarowych rozmieszczonych wzdłuż rurociągu. Próbując w taki sposób zwiększyć poziom niezawodności systemu LDS, nadal należy mieć na uwadze uzyskanie wysokiej wartości wskaźników jego miary jakościowej, rozumianej jako możliwość wykrywania danej wielkości wycieku, przy określonych ograniczeniach czasowych, dokładności lokalizacji, z minimalnym fałszywym alarmem.

Powyżej zdefiniowany problem odniesiono do przypadku diagnozowania wycieków przy zastosowaniu metody opartej na detekcji fal ciśnienia [3, 9, 10]. Metoda ta, z uwagi na jej wiele zalet, jest jedną z obecnie najpowszechniej stosowanych. Jednak dość często jej skuteczność jest mało zadowalająca. Jedną z istotnych przyczyn problemów jest podatność diagnostyczna obiektu, która jest ściśle związana z możliwością pomiaru ilościowo i jakościowo dostępnej informacji diagnostycznej. Do sytuacji, gdy systemy LDS dysponują tylko częścią użytecznych danych pomiarowych, może dochodzić dość często [11].

Poprawę podatności diagnostycznej rurociągów można osiągnąć poprzez zastosowanie opracowanej techniki pomiaru nowych sygnałów diagnostycznych, umownie nazwanych sygnałami słabych interakcji [4, 6, 7].

Obszarem zainteresowania niniejszej pracy jest określenie i porównanie wskaźników jakościowych metody opartej na detekcji fal ciśnienia w przypadku zastosowania różnych sygnałów diagnostycznych: ciśnienia i słabych interakcji, pozyskiwanych tylko z dwóch urządzeń pomiarowych zamontowanych na wlocie i wylocie rurociągu. Podstawę dokonanej oceny stanowiły badania eksperymentalne przeprowadzone na stanowisku z modelem fizycznym rurociągu. W badaniach wykorzystano autorskie procedury diagnostyczne.

Wyniki badań eksperymentalnych, przeprowadzonych z wykorzystaniem obiektów modelowych, mogą dostarczyć wielu cennych informacji. Mogą być one bardzo użyteczne oraz stanowić cenne wskazówki na kolejnym etapie prac, obejmującym przygotowanie opracowywanych rozwiązań do ich ewentualnego wdrożenia na obiektach typu rzeczywistego.

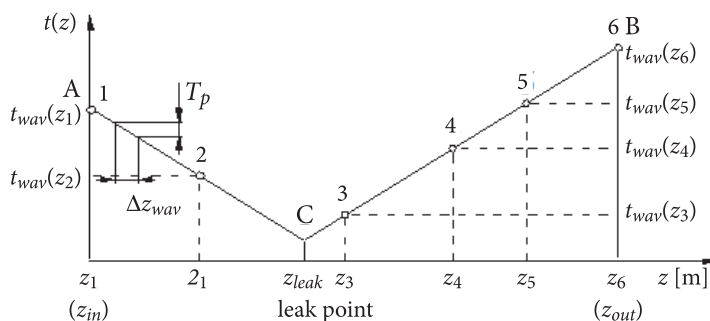
2. Metoda oparta na detekcji fal ciśnienia

Metody oparte na detekcji fal ciśnienia znajdują zastosowanie w przypadku funkcjonowania rurociągów przesyłowych cieczy w stanach ustalonych. Ich istotę

stanowi monitorowanie zmian ciśnienia w rurociągu wywołanych propagacją fal ciśnienia powstałych wskutek wystąpienia wycieku. Fale te powstają wskutek spadku ciśnienia w miejscu, w którym wystąpił wyciek, i rozchodzą się od tego miejsca w obu kierunkach rurociągu z prędkością dźwięku c . Fale pojawiają się najpierw w punktach najbliższych od miejsca wycieku, potem z pewnym opóźnieniem w kolejno odległych punktach [9, 10].

Obszarem zainteresowania niniejszej pracy jest technika ukierunkowana na wykrywanie (śledzenie) położenia czoła fal ciśnienia. Taka metoda pozwala na wykrycie i zlokalizowanie wycieków. W praktyce dotyczy to wycieków pojedynczych.

Podstawę lokalizacji wycieku stanowi detekcja przejść czoł obu fal ciśnienia przez poszczególne punkty pomiarowe z_n . Wynikiem detekcji są ustalone chwile $t_{wav}(z_n)$ (rys. 1). Znając, na podstawie chwil $t_{wav}(z_n)$, kolejność przejść fal ciśnienia przez poszczególne punkty pomiarowe i odległość pomiędzy punktami, miejsce wycieku określa się jako punkt przecięcia prostych A-C i C-B, posługując się zależnością (1). Jest ona definiowana jako formuła lokalizacji wycieku.



Rys. 1. Zależność czasowa pomiędzy wykryciem fal ciśnienia przechodzących przez poszczególne punkty pomiarowe

$$z_{leak} = \frac{a_k}{a_p + a_k} \cdot l + \frac{t_{wav}(z_{in}) - t_{wav}(z_{out})}{a_p + a_k}, \quad (1)$$

gdzie: $a_p = 1/c_p$, $a_k = 1/c_k$ — współczynniki nachylenia prostych A-C i C-B;
 c_p , c_k — średnie prędkości fal ciśnienia na odcinkach: $0 < z < z_{leak}$,
 $z_{leak} < z < l$;
 l — długość rurociągu (odległość pomiędzy skrajnymi punktami pomiarowymi z_{in} i z_{out});
 $t_{wav}(z_{in})$, $t_{wav}(z_{out})$ — ustalone chwile dotarcia czoł fal ciśnienia do punktów $z_{in} = 0$, $z_{out} = l$.

W standardowym rozwiązaniu metody jej konfiguracja sprzętowa obejmuje zastosowanie jako środków diagnozowania kilku lub kilkunastu czujników ciśnienia rozmieszczonych wzdłuż rurociągu. Pozwala to skrócić czas wykrycia i polepszyć dokładność lokalizacji wycieku. Prędkości fal ciśnienia c_p i c_k (odpowiednio w postaci współczynników a_p i a_k), uwzględniane w zależności (1), są określane doświadczalnie. Podstawą takiego oszacowania jest pomiar opóźnienia przy przejściu fali pomiędzy określonymi punktami pomiaru ciśnienia na danym odcinku rurociągu, znając odległość pomiędzy tymi punktami.

W przypadku analizowanej realizacji metody w konfiguracji sprzętowej obejmującej zastosowanie tylko dwóch urządzeń pomiarowych, rozmieszczonych na wlocie i wylocie rurociągu, prędkości fal ciśnienia c_p i c_k należy określić analitycznie. Takie oszacowanie może być wykonane w oparciu o zależność (2), odnajdywaną w pracy [5].

$$c = \frac{1}{\sqrt{\rho \left(\frac{1}{K} + \frac{d}{E \cdot e} \right)}}, \quad (2)$$

gdzie: c — prędkość fali ciśnienia;
 ρ — gęstość cieczy;
 K — moduł sprężystości cieczy;
 E — moduł sprężystości materiału przewodu (moduł Younga);
 e — grubość ścianki przewodu;
 d — średnica wewnętrzna przewodu.

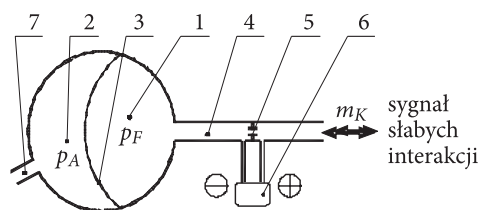
Metoda jest łatwa i relatywnie tania w zastosowaniu. Jest szczególnie przydatna do identyfikacji nagłych wycieków (których natężenie osiąga wartość nominalną w krótkim czasie od momentu pojawienia się nieszczelności). Istotnym wymogiem metody odnośnie do oprzyrządowania pomiarowego i elementów systemu telemetrycznego jest precyzyjna synchronizacja czasu przy pomiarze ciśnienia w poszczególnych punktach wzdłuż rurociągu. Wymagane jest również zastosowanie dość krótkich okresów próbkowania mierzonych sygnałów. Okres próbkowania T_p decyduje o minimalnym błędzie $\Delta z_{wav} = (1-3)c \cdot T_p$, z jakim śledzone jest położenie czoła fali ciśnienia (rys. 1). Zależnie od długości rurociągu, okres próbkowania powinien wynosić dziesiątne, setne, a nawet tysięczne części sekundy.

Pomimo niewątpliwych zalet metody, jej skuteczność często jednak jest mało zadowalająca. W praktyce pozwala ona wykrywać jedynie duże wycieki, tj. o wartości powyżej 1% nominalnego natężenia przepływu — według informacji odnajdywanych w literaturze, a nawet o wartości 3-5% — według informacji podawanych przez operatorów rurociągów. Lokalizacja miejsca wycieku jest mało dokładna, z błędami rzędu od kilkuset metrów, nawet do kilkunastu kilometrów.

3. Technika pozyskiwania nowych sygnałów diagnostycznych — sygnałów słabych interakcji

Proponowane rozwiązanie polepszania podatności diagnostycznej rurociągów zakłada zastosowanie układów korekcyjnych (opisanych i stosowanych w automatach) do pozyskiwania nowych sygnałów diagnostycznych [4, 6].

Sygnały, nazwane umownie sygnałami słabych interakcji, wynikają z dołączenia do rurociągu specjalnych urządzeń — korektorów. Schemat konstrukcji korektora przedstawiono na rysunku 2. Zasadniczym elementem korektora jest zasobnik ciśnieniowy (akumulator hydrauliczny), składający się z dwóch komór rozdzielonych przeponą. Jedna z komór korektora podłączona jest do rurociągu.



Rys. 2. Schemat konstrukcji korektora: 1 — komora podłączona do rurociągu; 2 — komora ze sprężonym powietrzem; 3 — przepona; 4 — kanał pomiarowy; 5 — kryza pomiarowa; 6 — czujnik różnicy ciśnienia; 7 — zawór

Przy wystąpieniu zaburzeń ciśnienia w rurociągu, np. wskutek wycieku, dochodzi do „zadziałania” korektora (zmiany położenia przepony) i w kanale pomiarowym pojawia się fluktuacja przepływu m_K — określana jako sygnał słabych interakcji. Wielkość tej fluktuacji jest miarą wzajemnych oddziaływań pomiędzy rurociągiem a korektorem, a jej pomiaru dokonuje się na kryzie z użyciem czujnika różnicy ciśnienia.

Do znaczącej reakcji (zadziałania) korektora dochodzi w momencie wystąpienia takich zjawisk jak towarzyszące wyciekom rozchodzenie się fal ciśnienia, szczególnie fal o wyraźnie widocznych czołach.

Korektory mogą stanowić zabezpieczenie przewodu rurociągu przed skutkami nagłego wzrostu ciśnienia, wywołanego przez zatrzymanie pomp, zamknięcie zaworów.

4. Badania eksperymentalne na stanowisku z modelem fizycznym rurociągu

4.1. Cel i zakres badań

Celem przeprowadzonych badań było określenie i porównanie wskaźników jakościowych metody opartej na detekcji fal ciśnienia w przypadku zastosowania

standardowych i niestandardowych urządzeń pomiarowych, zamontowanych tylko na wlocie i wylocie rurociągu. Porównywanymi urządzeniami były standardowe czujniki do pomiaru sygnałów ciśnienia i korektory do pomiaru sygnałów słabych interakcji.

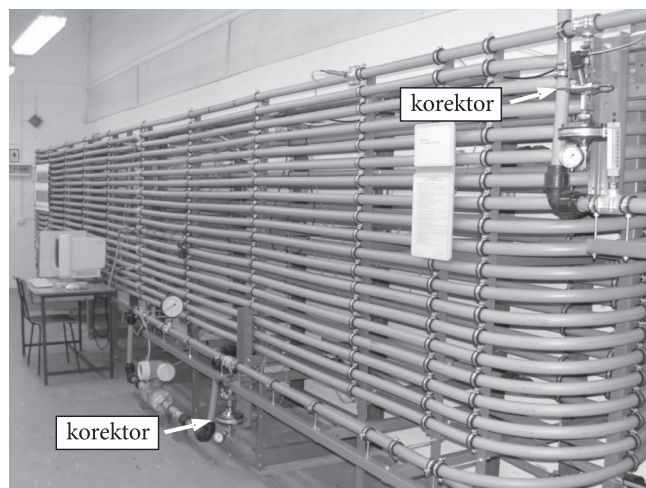
Dodatkowo, celem porównania, sprawdzono również wariant sprzętowy metody z kilkoma czujnikami ciśnienia rozmieszczonymi wzdłuż rurociągu.

Jako oceniane wskaźniki jakościowe brano pod uwagę: poziom wykrywalności, czas wykrycia i błędy lokalizacji symulowanych wycieków. Badano również odporność na zakłócenia symulowane poprzez zaszumienie sygnałów.

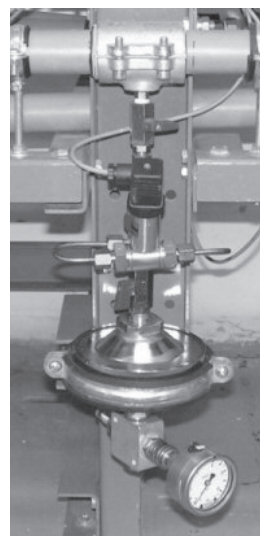
Istotnym elementem badań było także przetestowanie opracowanych autorskich procedur (algorytmów) diagnostycznych, które wykorzystano do diagnozowania symulowanych wycieków.

4.2. Stanowisko badawcze

Badania przeprowadzono na stanowisku z modelem fizycznym rurociągu (rys. 3), na którym zamontowano standardowe i niestandardowe urządzenia pomiarowe.



Rys. 3. Widok rurociągu modelowego



Rys. 4. Widok korektora

Rurociąg ma długość 380 m. Został wykonany z rur z polietylenu (PEHD) o średnicy zewnętrznej 40 mm i średnicy wewnętrznej 34 mm. Ułożono go w formie wznoszącej się w górę spirali o owalnym kształcie, z rurami zamontowanymi na kolejnych dziewiętnastu poziomach. Tłoczona jest nim woda.

Na rurociągu zainstalowano standardowe oprzyrządowanie pomiarowe: dwa przepływomierze elektromagnetyczne (na wlocie i wylocie), sześć przetworników ciśnienia (w tym dwa na wlocie i wylocie), dwa czujniki temperatury. Czujniki ciśnienia zamontowano w punktach o współrzędnych: 1, 75, 141, 281, 335 i 378 m. Korektory do pomiaru sygnałów słabych interakcji (rys. 4) zamontowano na wlocie i wylocie, w pobliżu czujników ciśnienia, w punktach o współrzędnych: -3 i 379,2 m. Oba korektory mają identyczny kształt i wielkość komór oraz takie same układy podłączeń do rurociągu. Wszystkie urządzenia pomiarowe podłączono do komputera PC wyposażonego w 12-bitową kartę pomiarową A/C. Dodatkowe informacje na temat urządzeń pomiarowych zamieszczono w tabeli 1.

Do symulowania wycieków zastosowano ręcznie sterowane zawory z wymiennymi krzycami o różnej średnicy otworów.

TABELA 1

Charakterystyki urządzeń pomiarowych

Urządzenie	Przetworniki ciśnienia	Korektory przetworniki różnicy ciśnień
Charakterystyki pomiarowe	zakres: 0-10 [bar] dokładność: 0,1% zakresu	zakres: -0,5-0,5 [Δ bar] dokładność: 0,2% zakresu
błąd*	$\pm 0,026$ [bar]	$\pm 0,0036$ [Δ bar]
błąd* = przetwornik + 12-bit A/C karta pomiarowa		

4.3. Warunki przeprowadzonych badań

Przeprowadzone na stanowisku eksperymenty, których wyniki przedstawiono w dalszej części pracy, dotyczyły następujących warunków:

- działania rurociągu w warunkach stanu ustalonego, przed każdorazowym symulowaniem wycieków,
- nastawy punktu pracy rurociągu z: ciśnieniem na wlocie $p_{in(1)} \approx 5,7$ bara, ciśnieniem na wylocie $p_{out(6)} \approx 2,2$ bara, nominalnym strumieniem objętości $q_0 \approx 95$ l/min oraz średnią temperaturą tłoczonego medium $T \approx 20^\circ\text{C}$,
- symulowania nagłych i powolnych wycieków, poprzez bardzo szybkie lub powolne otwarcie zaworów. Wycieki o wielkościach 1-10% nominalnego strumienia q_0 symulowano w wybranych punktach rurociągu o współrzędnych: 155, 195 i 235 m, które znajdowały się pomiędzy pierwszą i końcową trójką czujników ciśnienia,
- pomiaru sygnałów ciśnienia i słabych interakcji z częstotliwością $f_p = 100$ Hz,
- symulowania występowania zakłóceń poprzez zasumowanie mierzonych sygnałów ciśnienia i słabych interakcji szumem gaussowskim o zerowej

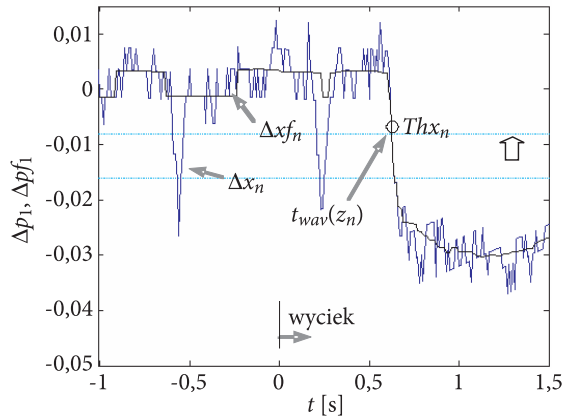
wartości średniej i odchyleniu standardowym równym 0,2% i 0,5% zakresu pomiarowego ich urządzeń pomiarowych.

4.4. Problemy dotyczące procedur diagnostycznych

Poza zagadnieniami dotyczącymi środków diagnozowania, podstawowymi problemami w realizacji metody opartej na detekcji fal ciśnienia są:

- ryzyko wystąpienia fałszywych alarmów oraz możliwość przeoczenia wycieku,
- dokładna identyfikacja czoła fali przy jej przechodzeniu przez poszczególne punkty pomiarowe.

Trudności przy identyfikacji czoła ujemnej fali ciśnienia polegają na poprawnym uchwyceniu na przebiegach mierzonych sygnałów charakterystycznych punktów, które odpowiadają początkowi zmiany ciśnienia (rys. 5). Obrazami tych punktów są chwile czasowe $t_{wav}(z_n)$. Dokładność, z jaką zostają uchwycone same punkty, a stąd chwile $t_{wav}(z_n)$, ma zasadniczy wpływ na precyzję lokalizacji wycieku, według formuły (1). Zagadnienie to szerzej zostało opisane w pracy [8].



Rys. 5. Sposób określania chwil $t_{wav}(z_n)$

W celu identyfikacji czoła fali ciśnienia, z określeniem chwil czasowych $t_{wav}(z_n)$, stosuje się różne techniki analizy sygnałów. Według [2] można tu wymienić: szybkie algorytmy różnicowe, filtry Kalmana, analizę falkową, analizę korelacyjną itp. Istotną cechą takich metod powinna być eliminacja szumu z sygnału przy zachowaniu jego oryginalnych cech reprezentujących falę ciśnienia. W praktyce okazuje się, że wymienione techniki wykazują zadowalającą skuteczność w odniesieniu do dużych wycieków. Jednak przy dużym poziomie zakłóceń i zaszumienia sygnałów, w przypadku małych wycieków — mniejszych od 2% nominalnego natężenia przepływu, okazują się mało skuteczne [2].

Reasumując, do diagnozowania wycieków (wykrycia i identyfikacji czoła fali ciśnienia) należy zastosować procedury, które powinny do maksimum wykorzystywać informacje „zapisane” w przebiegach mierzonych sygnałów.

4.5. Opis zastosowanych procedur diagnostycznych

Do diagnozowania symulowanych wycieków zastosowano autorskie procedury diagnostyczne. Mają one wykryć i zlokalizować zaistniały wyciek.

Głównym ich elementem jest algorytm, który szerzej opisano w pracy [8]. Stanowi on rozwinięcie rozwiązań autora przedstawionych w pracach [6, 7]. Przy opracowaniu algorytmu brano pod uwagę rozwiązania stosowane przez autorów [1, 3, 9].

Algorytm działa w cyklu ciągłym i generuje wynik diagnozy po każdorazowym pozyskaniu sygnałów x_n z urządzeń pomiarowych zamontowanych w punktach z_n wzdłuż rurociągu. Sygnały mierzone są z okresem próbkowania T_p .

Na wstępie pozyskane sygnały x_n zostają przetworzone na zmienne Δx_n . Zmienne Δx_n reprezentują odchylenia (residua). Są one obliczane jako różnice pomiędzy bieżącą wartością danego sygnału x_n a wartością odniesienia \bar{x}_n . Wartość odniesienia jest wynikiem zastosowania filtracji rekursywnej o charakterystyce dolnoprzepustowej typu *recursive averaging with fading memory (exponential smoothing)*. W celu usunięcia zakłóceń zmienne Δx_n są następnie poddane filtracji z wykorzystaniem filtra medianowego. Uzyskane w ten sposób zmienne Δx_n stanowią podstawę dalszej analizy. Przykładowy przebieg zmiennych Δx_n i Δx_n^f przedstawiono na rysunku 5. Są tu widoczne charakterystyczne zmiany odpowiadające czołu fali ciśnienia.

Identyfikacja czoła fali, z określeniem chwili $t_{wav}(z_n)$, odbywa się przy wykorzystaniu progów alarmowych Thx_n z obniżonymi marginesami (rys. 5). Wprowadzone obniżenie marginesów progów alarmowych może powodować generowanie fałszywych alarmów w stanach bez wycieku. Możliwość wystąpienia takich sytuacji jest tu brana pod uwagę jako normalnie występujący stan operacyjny. Stąd, aby niezawodnie odróżnić stany z wyciekami, dodatkowo zastosowano równoległą działającą drugą procedurę, ukierunkowaną tylko na wykrycie wycieku.

Procedura wykrywania wycieków działa w ten sposób, że w oparciu o pary zmiennych Δx_n^f i Δx_{n+1}^f (reprezentujące zbiór dwóch lub większej liczby $n = 2, \dots, j$ punktów pomiarowych z_n) wyznaczane są funkcje ich korelacji wzajemnej. Liczebność par zmiennych Δx_n^f i Δx_{n+1}^f wynosi $m = j - 1$. Poszczególne pary odpowiadają kolejnym punktom pomiarowym wzdłuż rurociągu wraz z ich sąsiednim punktem w kierunku końca rurociągu. Funkcje korelacji wzajemnej obliczane są przy zakresie przesunięcia czasowego τ_{max} (jego wartość ustalana jest na podstawie znajomości prędkości propagacji fali ciśnienia z uwzględnieniem odległości pomiędzy punktami pomiarowymi, które odpowiadają zmiennym Δx_n^f i Δx_{n+1}^f). Następnie obliczane są wartości maksymalne poszczególnych funkcji korelacji wzajemnej, oznaczane jako

$fxal_m$. Otrzymane wartości funkcji $fxal_m$ zostają podane filtracji z wykorzystaniem filtra rekursywnego, a wielkością wynikową są funkcje $Fxal_m$.

W przypadku zastosowania tylko dwóch punktów pomiarowych (urządzeń pomiarowych) wartość pojedynczej funkcji $Fxal$ jest porównywana z jej progiem alarmowym $Pxal$ z wygenerowaniem alarmu przy wystąpieniu przekroczenia. W przypadku zastosowania większej liczby j punktów pomiarowych (urządzeń pomiarowych) dla otrzymanego zestawu $m = j - 1$ funkcji $Fxal_m$ obliczana jest ich wartość średnia $\hat{F}xal$, która następnie jest porównywana z jej progiem alarmowym $\hat{P}xal$. Wartości progów alarmowych $Pxal$ i $\hat{P}xal$ należy dobrać w taki sposób, aby zapewniały one niewystępowanie alarmów dla stanów bez wycieku.

Po wykryciu wycieku, na podstawie ustalonych chwil czasowych $t_{wav}(z_n)$, następuje jego lokalizacja, w oparciu o zależność (1).

4.6. Wyniki badań

Przyjęte wartości progów alarmowych: $Ppal$, $Pmkal$, $\hat{P}pal$ oraz Thp_n i $Thmk_n$ zestawiono w tabeli 2. Uwzględniono tu konieczne zmiany wartości progów spowodowane wprowadzonymi zakłóceniami w postaci zaszumienia porównywanych sygnałów ciśnienia i słabych interakcji.

Podstawą doboru pierwszej grupy progów (stosowanych w celu potwierdzenia wykrycia wycieku) była analiza statystyczna funkcji: $Fpal$ (odpowiada zastosowaniu dwóch sygnałów ciśnienia mierzonych na wlocie i wylocie rurociągu), $Fmkal$ (odpowiada zastosowaniu dwóch sygnałów słabych interakcji mierzonych na wlocie i wylocie rurociągu), $\hat{F}pal$ (odpowiada zastosowaniu pakietu sześciu sygnałów ciśnienia mierzonych wzdłuż rurociągu, w tym na jego wlocie i wylocie). Progi dobrano w ten sposób, aby zapewniały one niewystępowanie alarmów w stanach bez wycieku w całej rozpatrywanej serii eksperymentów.

W przypadku drugiej grupy progów (stosowanych w celu identyfikacji czoła fali) ich wartości określono w oparciu o analizę statystyczną zmiennych: Δpf_n (odpowiadają zastosowaniu sygnałów ciśnienia) i Δmkf_n (odpowiadają zastosowaniu sygnałów słabych interakcji). Progi dobrano w ten sposób, że powodowały one generowanie alarmów w stanach bez wycieku, ale o małym natężeniu ich załączania. Wartości poszczególnych progów alarmowych Thp_n i $Thmk_n$ wyznaczano według zależności (3). Podstawą doboru były oszacowane dla całej serii eksperymentów wartości średnie odchylenia standardowego zmiennych Δpf_n i Δmkf_n w stanach bez wycieku. Progi odpowiadające poszczególnym sygnałom ciśnienia i słabych interakcji zostały obliczone przy identycznych wartościach współczynników korekcyjnych b .

$$Thp_n = -b \times \mu(std) \{ \Delta pf_n \} \quad \text{i} \quad Thmk_n = -b \times \mu(std) \{ \Delta mkf_n \}. \quad (3)$$

TABELA 2

Wartości przyjętych progów alarmowych

Zadanie	Oznaczenie progu	Dot. użycia sygnałów	Poziom zaszumiania sygnałów		
			–	s02	s05
detekcja	P_{pal}	p_{in-out}	0,0000240	0,0000770	0,0002440
	P_{mkal}	mk_{in-out}	0,0006950	0,0007740	0,0008020
	\hat{P}_{pal}	p_{all}	0,0000475	0,0001055	0,0002155
lokalizacja	$Thp_{1(in)}$	$p_1(p_{in})$	-0,0127	-0,0244	-0,0419
	Thp_2	p_2	-0,0137	-0,0241	-0,0415
	Thp_3	p_3	-0,0134	-0,0242	-0,0416
	Thp_4	p_4	-0,0159	-0,0249	-0,0423
	Thp_5	p_5	-0,0156	-0,0245	-0,0415
	$Thp_{6(out)}$	$p_6(p_{out})$	-0,0165	-0,0251	-0,0417
	$Thmk_{in}$	mk_{in}	-0,0416	-0,0492	-0,0567
	$Thmk_{out}$	mk_{out}	-0,0736	-0,0785	-0,0768

Dokonując lokalizacji wycieków, uwzględniane we wzorze (1) prędkości fal ciśnienia c_p i c_k (odpowiednio w postaci współczynników a_p i a_k) ustalano następująco:

- w przypadku zastosowania sygnałów ciśnienia i słabych interakcji, mierzonych na wlocie i wylocie rurociągu — analitycznie, w oparciu o zależność (2). Biorąc pod uwagę topografię przewodu rurociągu i sposób zamontowania rur, do obliczeń przyjęto prędkość $c = c_p = c_k = 320$ m/s,
- w przypadku zastosowania sześciu sygnałów ciśnienia, mierzonych na wlocie i wylocie oraz wzdłuż rurociągu — w oparciu o dwa podzbiory danych: początkowy $^{(p)} \{z_n, t_{wav}(z_n)\}_{n=1,2,3}$ — dla pierwszej trójki czujników i końcowy $^{(k)} \{z_n, t_{wav}(z_n)\}_{n=4,5,6}$ — dla drugiej trójki czujników. Wykorzystano tu metodę aproksymacji średniokwadratowej, zwanej także metodą najmniejszych kwadratów.

Przykładowe czasy wykrycia i wyniki lokalizacji symulowanych nagłych i powolnych wycieków, uzyskane przy zastosowaniu porównywanych sygnałów ciśnienia i słabych interakcji, przedstawiono w tabelach 3 i 4. Czasy wykrycia podano w sekundach. Jako czas wykrycia wycieku jest tu brany pod uwagę czas, który upływa

od momentu wystąpienia wycieku (początku zadawania wycieku, tj. momentu otwarcia zaworu) do momentu jego wykrycia, z uwzględnieniem opóźnienia, które wprowadza zastosowany filtr medianowy. Wyniki lokalizacji wycieków, podane w metrach, oznaczają błędy, tj. różnicę pomiędzy oszacowanym a rzeczywistym miejscem wycieku.

TABELA 3

Czasy wykrycia symulowanych wycieków otrzymane przy zastosowaniu: p_{in-out} — dwóch sygnałów ciśnienia, mk_{in-out} — dwóch sygnałów słabych interakcji, p_{all} — sześciu sygnałów ciśnienia; z uwzględnieniem zaszumienia sygnałów (s02, s05)

Wycieki		Szum	Nagłe			Powolne ⁽¹⁾				Powolne ⁽²⁾			
z_{leak} [m]	q_{leak} [%]		sygnały			zawór [s]	sygnały			zawór [s]	sygnały		
			p_{in-out}	mk_{in-out}	p_{all}		p_{in-out}	mk_{in-out}	p_{all}		p_{in-out}	mk_{in-out}	p_{all}
195	1,0	–	1,12	–	0,67	3,9	1,83	–	1,43	10,0	3,11	3,14	2,58
		s02	1,29	–	0,71		2,18	–	1,57		3,19	3,11	2,69
		s05	–	–	0,90		2,71	–	1,70		6,58	3,32	2,98
	1,5	–	1,00	1,00	0,65	4,8	1,82	1,89	1,41	8,2	1,94	2,02	1,51
		s02	1,07	1,00	0,71		2,00	1,91	1,49		2,11	2,00	1,57
		s05	1,57	0,98	0,72		2,37	1,86	1,51		2,41	2,01	1,70
	2,0	–	0,97	0,98	0,64	5,1	2,00	2,02	1,58	9,1	1,77	1,75	1,35
		s02	1,06	0,99	0,67		2,13	2,02	1,65		1,81	1,76	1,37
		s05	1,31	0,97	0,75		2,28	2,02	1,69		2,15	1,77	1,52
	2,5	–	0,91	0,92	0,58	5,2	1,87	1,89	1,50	8,8	2,30	2,41	1,97
		s02	0,97	0,91	0,61		1,98	1,89	1,53		2,41	2,44	2,04
		s05	1,06	0,90	0,65		1,98	1,89	1,58		2,65	2,41	2,02
	3,0	–	0,91	0,91	0,58	5,1	2,34	2,34	2,01	8,2	2,09	2,15	1,69
		s02	0,96	0,92	0,59		2,38	2,36	2,06		2,30	2,18	1,75
		s05	1,06	0,91	0,65		2,64	2,35	2,04		2,45	2,17	1,81

TABELA 4
 Błędy lokalizacji symulowanych wycieków otrzymane przy zastosowaniu: p_{in-out} — dwóch sygnałów ciśnienia, mk_{in-out} — dwóch sygnałów słabych interakcji, p_{all} — sześciu sygnałów ciśnienia; z uwzględnieniem zaszumienia sygnałów (s02, s05)

Wycieki		Szum	Nagłe			Powolne ⁽¹⁾			Powolne ⁽²⁾				
z_{leak} [m]	q_{leak} [%]		sygnały			zawór [s]	sygnały			zawór [s]	sygnały		
			p_{in-out}	mk_{in-out}	p_{all}		p_{in-out}	mk_{in-out}	p_{all}		p_{in-out}	mk_{in-out}	p_{all}
195	1,0	-	-23,1	108,3	14,5	3,9	-117,5	-6,9	41,2	10,0	-40,7	-	-32,5
		s02	78,5	-6,9	89,5		-5,5	-6,9	-194,0		-	-35,7	208,1
		s05	-5,5	-12,5	183,0		-5,5	-6,9	54,8		-5,5	-6,9	-194,0
	1,5	-	-1,5	7,5	3,4	4,8	-11,9	-2,1	9,3	8,2	-5,5	253,9	13,3
		s02	16,1	7,5	-9,9		-127,1	-3,7	35,7		-23,1	260,3	2,4
		s05	-	4,3	-		66,5	9,1	-58,7		333,7	29,9	216,7
	2,0	-	7,3	6,7	-3,9	5,1	-5,5	-6,9	5,7	9,1	-23,1	-10,1	0,1
		s02	6,5	5,1	-9,0		5,7	-11,7	-1,8		4,1	-13,3	5,1
		s05	-156,7	1,9	39,2		-69,5	9,1	6,2		-40,7	-14,9	34,3
	2,5	-	2,5	1,9	-7,0	5,2	-0,7	-5,3	-7,6	8,8	-16,7	-26,1	16,1
		s02	12,9	3,5	-10,6		-15,1	-5,3	-1,6		4,1	-10,1	-17,4
		s05	17,7	1,9	-6,9		53,7	-8,5	-32,2		-32,7	-21,3	14,8
	3,0	-	3,3	2,7	-3,3	5,1	4,1	-2,1	-14,4	8,2	-11,9	-18,1	-5,6
		s02	-3,1	3,5	9,0		10,5	2,7	2,4		-18,3	-22,9	-22,4
		s05	0,1	4,3	-16,6		45,7	12,3	-18,9		-80,7	1,1	24,2

Dla wycieków nagłych, które symulowano z czasami pełnego otwarcia zaworów w zakresie od 0,15 do 0,30 sekundy, wyniki reprezentują wartości średnie z trzech eksperymentów. Dla wycieków powolnych wyniki dotyczą pojedynczych eksperymentów, o różnych czasach pełnego otwarcia zaworu, oznaczonych jako „powolne⁽¹⁾” i „powolne⁽²⁾”. Dodatkowo podano czasy pełnego otwarcia zaworu, oznaczone jako „zawór”. W całej serii eksperymentów czasy te wynosiły od 3,50 do 10,00 sekund.

Niewykrycie przez algorytm określonej wielkości wycieku oznaczone zostało przez „-”. W przypadku wycieków nagłych, jeżeli nawet dla jednego z trzech identycznych eksperymentów wyciek nie został wykryty, klasyfikowano go jako niewykrywalny. W przypadku lokalizacji wycieków stosowano podobne zasady, z tym, że „-” oznacza brak możliwości lokalizacji, spowodowanej niewykryciem przez algorytm czoła fali ciśnienia lub błąd lokalizacji o wartości większej niż całkowita długość rurociągu.

4.7. Analiza wyników

Analizując uzyskane wyniki, można stwierdzić, że w przypadku zastosowania dwóch sygnałów słabych interakcji, mierzonych na wlocie i wylocie rurociągu:

- *poziom wykrywalności* symulowanych wycieków wynosi około 1,0-1,5%. Jest on nieco gorszy od wyników uzyskanych przy użyciu dwóch sygnałów ciśnienia. Najlepszą wykrywalność uzyskano w przypadku zastosowania sygnałów ciśnienia mierzonych w kilku punktach wzdłuż rurociągu;
- *czasy wykrycia wycieków* nie odbiegają od czasów uzyskanych przy zastosowaniu dwóch sygnałów ciśnienia. Wraz ze wzrostem poziomu zaszumienia porównywanych sygnałów w przypadku użycia sygnałów słabych interakcji czasy nie ulegają znaczącym zmianom, natomiast w przypadku użycia dwóch sygnałów ciśnienia zmiany są już bardziej widoczne (czasy wykrycia ulegają wydłużeniu). Najkrótsze czasy wykrycia uzyskano w przypadku zastosowania sygnałów z kilku czujników ciśnienia rozmieszczonych wzdłuż rurociągu, z ich niewielkim wydłużeniem przy wzroście poziomu zaszumienia sygnałów;
- *błędy lokalizacji* wycieków są dość znaczne. Podobnie dotyczy to zastosowania dwóch i większej liczby sygnałów ciśnienia. Wzrost poziomu zaszumienia porównywanych sygnałów powoduje dalszy wzrost błędów, ale jest on najmniejszy w przypadku sygnałów słabych interakcji;
- *wzrost poziomu zakłóceń* symulowanych stopniem zaszumienia porównywanych sygnałów spowodował konieczność zmiany przyjętych progów alarmowych. Zmiany ich wartości w przypadku sygnałów słabych interakcji obejmowały korektę rzędu jednostek, a w przypadku sygnałów ciśnienia na kilkukrotnym zwiększeniu. Brak zmiany progów alarmowych mógłby skutkować generowaniem fałszywych alarmów w zakresie zadania detekcji w stanach bez wycieku oraz dużym wzrostem natężenia fałszywych alarmów w zakresie zadania identyfikacji czoła fali.

Uzyskane wyniki diagnozowania symulowanych wycieków wskazują na możliwość realizacji metody opartej na detekcji fal ciśnienia przy wykorzystaniu sygnałów słabych interakcji, mierzonych na wlocie i wylocie rurociągu. Możliwe jest uzyskanie wzrostu odporności na fałszywe alarmy powodowane zakłóceniami.

Wyniki stanowią potwierdzenie dużej efektywności zastosowanych autorskich procedur diagnostycznych, szczególnie w zakresie detekcji wycieku.

Potwierdziły one jednak istnienie problemów przy lokalizacji wycieków. Ich przyczyn należy upatrywać w trudnościach związanych z detekcją czoła fali ciśnienia.

5. Podsumowanie

Dołączenie specjalnych urządzeń pomiarowych (korektorów) do rurociągów przesyłowych cieczy stwarza możliwość pozyskiwania cennej informacji diagnostycznej, którą są sygnały słabych interakcji. W odróżnieniu od standardowych sygnałów ciśnienia, sygnały słabych interakcji są bardziej odporne na zakłócenia i wynikającą stąd konieczność zmiany wartości progów alarmowych. Zastosowanie sygnałów słabych interakcji może stanowić uzupełnienie dotychczas stosowanych sygnałów ciśnienia.

Wyniki przeprowadzonych badań wskazują na realną możliwość zastosowania przedstawionych rozwiązań, łączących technikę pomiaru sygnałów słabych interakcji, z opracowanymi procedurami diagnostycznymi — na rzeczywistych rurociągach.

Praca naukowa finansowana ze środków budżetowych na naukę w latach 2010-2013 jako projekt badawczy Nr N N504 494439.

LITERATURA

- [1] L. BILLMAN, R. ISERMANN, *Leak detection methods for pipelines*, Automatica, 23, 1987, 381-385.
- [2] HAN LI, DE-YUN XIAO, XIANG ZHAO, *Morphological filtering assisted field-pipeline small leakage detection*, Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, San Antonio, TX, USA, October 2009.
- [3] Z. KOWALCZUK, K. GUNAWICKRAMA, *Detecting and locating leaks in transmission pipelines*, [in:] K.J. Korbicz, J.M. Koscielny, Z. Kowalczuk, W. Cholewa (eds.), *Fault Diagnosis: Models, Artificial Intelligence, Applications*, Springer-Verlag, Berlin, 2004, 822-864.
- [4] P. LINDSTEDT, P. OSTAPKOWICZ, *Zastosowanie elementów korekcyjnych automatyki w diagnostyce obiektów technicznych*, XV Krajowa Konferencja Automatyki, Wydawnictwo PAN, Warszawa, 2005, 181-186.
- [5] M. MITOSEK, *Mechanika płynów w inżynierii i ochronie środowiska*, Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2001.
- [6] P. OSTAPKOWICZ, *Improving the efficiency of diagnosing of leaks from liquid transmission pipelines by using the new diagnostic information — the signals of weak interactions between objects*, Solid State Phenomena, 147-149, 2009, 492-497.
- [7] P. OSTAPKOWICZ, *Diagnozowanie wycieków z rurociągów przesyłowych z wykorzystaniem nowej informacji diagnostycznej — sygnałów słabych interakcji międzyobektowych*, Diagnostyka, 50, 2, 2009, 99-106.
- [8] P. OSTAPKOWICZ, *Leakage detection from liquid transmission pipelines using improved pressure wave technique*, Eksploatacja i Niezawodność — Maintenance and Reliability, 16, 1, 2014, 9-16.
- [9] R. SOB CZAK, *Lokalizacja nieszczelności w rurociągach metodą śledzenia czół fal ciśnienia*, Przemysł Chemiczny, 83, 6, 2004, 296-299.
- [10] M. TURKOWSKI, A. BRATEK, M. SŁOWIKOWSKI, *Methods and systems of leak detection in long range pipelines*, Journal of Automation, Mobile Robotics & Intelligent Systems, 1, 2007, 39-46.
- [11] J. ZHANG, *Statistical pipeline leak detection for all operating conditions*, Pipeline & Gas Journal, February 2001, 42-45.

P. OSTAPKOWICZ**Leak detection from liquid transmission pipelines using pressure wave technique
— study of the use of two standard- and non-standard-measuring devices**

Abstract. This paper deals with leak detection in liquid transmission pipelines. Diagnostic method based on negative pressure wave detection is taken into account here. The paper focuses on variant of this method, related to the use of only two measurement points (devices), placed at the inlet and outlet of the pipeline. Standard transducers for measurement of pressure signals and non-standard elaborated technique for measurement of new diagnostic signals were used. New diagnostic signals, conventionally named the signals of weak interactions, result from the work of special devices (correctors) joined to the pipeline. In order to compare both hardware solutions key performance attributes for the analyzed leak detection method were determined. The bases of such assessment were experimental tests. They were conducted with the use of a physical model of a pipeline. The pipeline was 380 meters long, 34 mm in internal diameter and made of polyethylene (PEHD) pipes. The medium pumped through the pipeline was water. Carrying out such research, diagnostic procedures elaborated by the author were used and tested.

Keywords: technical diagnostics, pipelines, leak detection