

Dr inż. Paweł Ostapkowicz

Politechnika Białostocka
Wydział Mechaniczny
ul. Wiejska 45C, 15-351 Białystok
E-mail: p.ostapkowicz@pb.edu.pl

Diagnozowanie nieszczelności w rurociągach przesyłowych cieczy z wykorzystaniem zmodyfikowanej metody opartej na detekcji fal ciśnienia

Słowa kluczowe: rurociągi, wykrywanie i lokalizowanie wycieków, detekcja fal ciśnienia

Streszczenie: Artykuł dotyczy zagadnień diagnozowania wycieków z rurociągów przesyłowych cieczy. Skupia się na polepszaniu skuteczności metody opartej na detekcji fal ciśnienia. Zaproponowano nowy algorytm do monitorowania fal ciśnienia. Algorytm jest ukierunkowany na precyzyjną identyfikację charakterystycznych punktów na przebiegach sygnałów ciśnienia reprezentujących fale wywołane przez zaistniały wyciek. Działanie algorytmu jest oparte o filtrację medianową residuów wyznaczanych dla sygnałów ciśnienia mierzonych wzdłuż rurociągu. Zastosowano adaptacyjne progi alarmowe, obliczane na podstawie analizy statystycznej. Dodatkowo, algorytm wspomagany jest przez wykorzystanie zbioru funkcji korelacji wzajemnej pomiędzy obliczonymi residuami reprezentującymi sygnały ciśnienia z sąsiednich przetworników pomiarowych. Zaproponowane rozwiązanie zostało przetestowane na fizycznym modelu rurociągu, którym tłoczono wodę. Rurociąg ma 380 m długości, średnicę wewnętrzną 34 mm i został wykonany z rur z polietylen (PEHD). Wyniki badań udowodniły, że proponowane rozwiązanie jest wrażliwe na małe wycieki i odporne na fałszywe alarmy (występujące zakłócenia). Pozwala na zadawalająco dokładną lokalizację wycieku, bez znaczących opóźnień czasowych.

1. Wprowadzenie

Nawet poprawnie zaprojektowany, wybudowany i eksploatowany rurociąg przesyłowy do transportu cieczy narażony jest na ryzyko wystąpienia nieszczelności. W celu zminimalizowania skutków i zagrożeń powodowanych przez wycieki, na tego typu rurociągach instalowane są systemy diagnostyczne wycieków (z ang. LDS – leak detection systems). Zadaniem takich systemów jest wykrycie, zlokalizowanie oraz oszacowanie wielkości zaistniałego wycieku. Powszechnie i najczęściej stosowanym 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, 9].

W praktyce, realizacja procesu diagnozowania wycieków stanowi dość złożony i skomplikowany problem. Poszczególne istniejące metody diagnozowania wycieków, których przegląd można odnaleźć w opracowaniach [3, 9], nie są w stanie samodzielnie zapewnić realizacji wszystkich zadań diagnostycznych. Pojedyncze metody są użyteczne tylko w odniesieniu do określonych stanów operacyjnych rurociągu i charakterystyk zaistniałych wycieków. Stąd opracowanie efektywnego i niezawodnego systemu typu LDS wymaga zastosowania minimum kilku współbieżnie funkcjonujących metod wewnętrznych.

Metody uruchamiane są przez odpowiednie algorytmy synchronizujące, które stosuje się w celu śledzenia zmian stanów operacyjnych rurociągu, o czym wspomina się w pracy [9].

W przypadku funkcjonowania rurociągów przesyłowych cieczy w stanach ustalonych, wykrycie i lokalizacja wycieków mogą być przeprowadzone przy zastosowaniu metody opartej na detekcji fal ciśnienia. Dzięki wielu jej zaletom jest jedną z najpowszechniej stosowanych obecnie metod. Jednak dość często okazuje się zbyt mało skuteczna. Stąd zaproponowano rozwiązanie (algorytm), które ma poprawić skuteczność tej metody.

Istotnym elementem badań nad nowymi rozwiązaniami diagnozowania wycieków jest ich weryfikacja. Optymalnym rozwiązaniem byłoby przeprowadzenie takiej weryfikacji na obiekcie typu rzeczywistego. W przypadku opracowanego rozwiązania wykorzystano obiekt typu rurociąg modelowy, z wodą jako tłoczonym medium. Na modelowym rurociągu przeprowadzono szeroki program badań z symulowanymi wyciekami. Pod uwagę brano różne punkty pracy obiektu oraz miejsca, wielkości oraz sposób narastania wycieku (wycieki nagłe i powolne). Przeprowadzenie tak szerokiego programu badań na obiekcie typu rzeczywistego wiązałoby się z dużymi kosztami i oznaczałoby czasowe jego wyłączenie z normalnej eksploatacji.

Uzyskane wyniki badań wykazały, że opracowane rozwiązanie (algorytm) pozwala polepszyć skuteczność metody opartej na detekcji fal ciśnienia. Dotyczy to w szczególności następujących elementów: polepszenia poziomu wykrywalności wycieków oraz poprawy dokładności identyfikacji czoła fali ciśnienia, a stąd zwiększenia dokładności lokalizacji wycieków.

Opracowane rozwiązanie (algorytm) może być zastosowane na obiektach typu rzeczywistego, jako jeden z elementów systemu LDS, który będzie współodpowiedzialny za wykrycie i lokalizację wycieków. Pod uwagę brane są rurociągi do transportu cieczy (w tym ropy naftowej i jej produktów) i gazów.

2. Metoda oparta na detekcji fal ciśnienia

2.1. Opis zjawiska wycieku

Zakładając, że szczelny rurociąg funkcjonuje w zakresie stanu ustalonego, ciśnienie wzdłuż rurociągu ma ustabilizowane wartości, z niewielkimi poziomymi fluktuacjami.

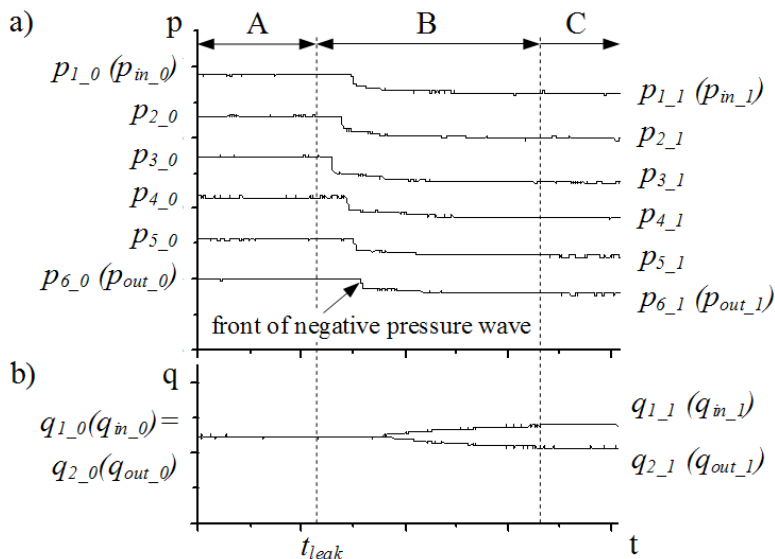
Przykładowy przebieg sygnałów ciśnienia i strumienia w rurociągu, odpowiadających stanom bez i z wyciekem, przedstawiono na rysunku 1a i 1b. Są to sygnały mierzone na wlocie i wylocie, a w przypadku pomiaru ciśnienia, jeszcze dodatkowo w kilku punktach wzdłuż rurociągu. Zgodnie z rysunkiem 1a, stan bez wycieku obejmuje przedział „A”. Indeksy „0” przy oznaczeniach poszczególnych sygnałów ciśnienia wskazują na ich średnie wartości w tym przedziale. Koniec tego przedziału określa moment początku wycieku.

Gdy pojawia się wyciek, powoduje to zmiany ciśnienia w rurociągu. W początkowym momencie, w miejscu wystąpienia wycieku dochodzi do nagłego spadku ciśnienia. Powstały spadek ciśnienia w postaci fali rozchodzi się następnie w obu kierunkach rurociągu. Czoło fali na przebiegach sygnałów ciśnienia jest rozpoznawalne jako charakterystyczny impuls. W przypadku nagłych wycieków (których natężenie przepływu osiąga wartość nominalną w krótkim czasie od momentu ich powstania) fale ciśnienia mają wyraźnie widoczne czoła. Natomiast dla wycieków narastających powoli, z uwagi na łagodniejszy przebieg zmian ciśnienia, czoła fal mają bardziej wygładzony kształt. Za czołem fali ciśnienie w rurociągu maleje o tym mniejszą wartość, im większa jest odległość danego punktu od miejsca wycieku (Rys. 1a). Obserwowane spadki ciśnienia zależne są od wielkości wycieku, jego położenia i warunków przepływu.

Po pewnym czasie od zaistnienia wycieku następuje stabilizacja przepływu w rurociągu. Zgodnie z rysunkiem 1a, takiemu nowemu stanowi ustalonemu odpowiada

przedział „C”. Średnie wartości poszczególnych sygnałów ciśnienia w tym przedziale, które oznaczono indeksami „1”, różnią się od tych sprzed wycieku.

Wystąpienie wycieku poza zmianami ciśnienia skutkuje również zmianą przepływu w rurociągu. W porównaniu do stanu sprzed wycieku, strumień na odcinku od wlotu do miejsca wycieku wzrasta, a na odcinku od miejsca wycieku do wylotu rurociągu maleje (Rys. 1b).



Rys. 1. Sygnały w rurociągu przed i po wystąpieniu wycieku: a) ciśnienia, b) strumienia; gdzie: t_{leak} – początek wycieku

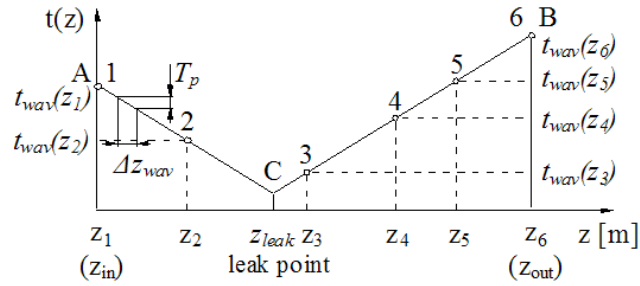
Należy tu dodać, że relacje pomiędzy zmianami ciśnienia i strumienia przyjmują określone wartości dla różnych rurociągów. Należy również zaznaczyć, że zmiany ciśnienia i strumienia mogą być spowodowane wieloma innymi zjawiskami, nie związanymi bezpośrednio z wyciekami.

2.2. Ogólna charakterystyka metody

Istotą metody opartej na detekcji fal ciśnienia jest monitorowanie powyżej opisanego zjawiska propagacji fal ciśnienia. Metoda jest ukierunkowana na wykrywanie i lokalizowanie wycieków. W praktyce dotyczy to wycieków pojedynczych.

Podstawę metody stanowią pomiary ciśnienia w rurociągu. Celem pomiarów jest wykrycie czoł propagujących fal ciśnienia, wiedząc, że takie fale pojawiają się najpierw w punktach pomiarowych znajdujących się najbliżej punktu wycieku, potem z pewnym opóźnieniem w kolejno odległych punktach pomiarowych [8, 9].

Lokalizacja wycieku dokonywana jest na podstawie ustalonych chwil $t_{wav}(z_n)$ detekcji przejść czoł fal ciśnienia przez poszczególne punkty pomiarowe z_n . Pomocny jest tu wykres przedstawiony na rysunku 2. Znając 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. 2. 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 pomiaru ciśnienia z_{in} i z_{out}); $t_{wav}(z_{in})$, $t_{wav}(z_{out})$ - ustalone chwile dotarcia czół fal ciśnienia do punktów $z_{in} = 0$, $z_{out} = l$.

Należy tu dodać, że oprócz standardowego rozwiązania metody, stosowane są również techniki oceny kształtu fal ciśnienia. Ten sposób diagnozowania daje dodatkową możliwość oszacowania wielkości (natężenia) wycieku. Szacowania dokonuje się na podstawie analizy wartości amplitudy zaobserwowanej fali, przy znanych wielkościach tłumienia na danym odcinku rurociągu. Tego typu techniki nie są jednak w obszarze zainteresowania niniejszego opracowania.

2.3. Wymagania, zalety i wady metody

Metoda jest łatwa i relatywnie tania w zastosowaniu. Może być realizowana nawet w oparciu o dwa czujniki ciśnienia, rozmieszczone na wlocie i wylocie rurociągu. W tym wariancie prędkości fal ciśnienia c_p i c_k (odpowiednio w postaci współczynników a_p i a_k), uwzględniane w zależności (1), muszą być oszacowane analitycznie, np. według zależności (2) podanej w pracy [4]. Lepszym rozwiązaniem jest zastosowanie większej liczby czujników ciśnienia, regularnie rozmieszczonych wzdłuż rurociągu. Ten wariant pozwala skrócić czas wykrycia i polepszyć dokładność lokalizacji wycieku. W tym przypadku prędkości fal ciśnienia c_p i c_k , uwzględniane w zależności (1), są określane doświadczalnie, z dużo większą dokładnością. Podstawą takiego oszacowania jest pomiar opóźnienia przy przejściu fali pomiędzy określonymi punktami pomiaru ciśnienia na danym odcinku rurociągu, znając odległość pomiędzy tymi punktami.

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

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.

Istotnym wymogiem metody odnośnie 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 sygnałów. Okres próbkowania T_p decyduje o minimalnym błędzie Δz_{wav} , z jakim śledzone jest położenie czoła fali ciśnienia (Rys. 2). Zależnie od długości rurociągu, okres próbkowania powinien wynosić dziesiątne, setne, a nawet tysięczne części sekundy.

Warto podkreślić dużą szybkość metody. Przy rozmieszczonych co kilka - kilkanaście kilometrów, bezinercyjnych przetwornikach ciśnienia, czas wykrycia i lokalizacji wycieków wynosi zazwyczaj kilka sekund. Odwołując się do rysunku 1, wykrycie i lokalizacja wycieku następują zazwyczaj w czasie nie wykraczającym poza zakres przedziału „B”. W przypadku innych metod jest to trudne do osiągnięcia. Na przykład metoda gradientowa, którą opisano w pracy [7], wymaga użycia danych pomiarowych z przedziału „C”, co znacząco wydłuża czas uzyskania diagnozy.

Należy jednak pamiętać, że jeżeli wyciek nie zostanie od razu zauważony (np. wskutek chwilowego zawieszenia lub wyłączenia systemu typu LDS), nigdy już nie zostanie wykryty tą metodą.

Pomimo niewątpliwych zalet metody, jej skuteczność często jednak jest mało zadawalająca. 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 zgrubnie dokładna, z błędami rzędu od kilkuset metrów, nawet do kilkunastu kilometrów.

2.4. Problemy do rozwiązania

W zakresie realizacji metody podstawowym problemem do rozwiązania jest wykrycie propagacji fal ciśnienia jako symptomu zaistniałego wycieku oraz dokładna identyfikacja czoła fali przy jej przechodzeniu przez poszczególne punkty pomiaru ciśnienia z_n .

Przy wykrywaniu fal ciśnienia należy uważać na ryzyko wystąpienia fałszywych alarmów oraz możliwość przeoczenia wycieku. Trudności przy identyfikacji czoła ujemnej fali ciśnienia polegają na poprawnym uchwyceniu na przebiegach sygnałów charakterystycznych punktów, które odpowiadają początkowi impulsu obserwowanej zmiany ciśnienia. 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). O poziomie trudności identyfikacji czoła fali zasadniczo decydują jej kształt i amplituda. Takie parametry, charakteryzujące przebieg zjawiska propagacji fal ciśnienia, są zależne od umiejscowienia wycieku, jego wielkości i sposobu narastania (wynikającego z rozwoju uszkodzenia przewodu). Najlepszą podatność diagnostyczną wykazują fale ciśnienia o wyraźnie widocznych czołach, które powstają wskutek nagłych wycieków (których natężenie przepływu osiąga wartość nominalną w krótkim czasie od momentu ich powstania). Dla wycieków narastających powoli, z uwagi na łagodniejszy przebieg zmian ciśnienia, czoła fal mają bardziej wygładzony kształt, co utrudnia ich identyfikację. Natomiast dla wycieków bardzo wolno narastających, identyfikacja czoł fal ciśnienia może nie być już możliwa. Wymagane jest, aby na przebiegach analizowanych sygnałów, ujemne fale ciśnienia charakteryzowały się odpowiednio dużą wartością amplitudy, w stosunku do istniejącego poziomu fluktuacji ciśnienia, występujących zakłóceń i szumów pomiarowych oraz zakresu dokładności czujnika.

W celu identyfikacji czoła fali ciśnienia, z określeniem chwil czasowych $t_{wav}(z_n)$, stosuje się różne techniki przetwarzania mierzonych wzdłuż rurociągu sygnałów ciśnienia. 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 fali ciśnienia, przy zachowaniu jego oryginalnych cech. W praktyce okazuje się, że wymienione techniki wykazują zadawalającą skuteczność w odniesieniu do dużych wycieków. Jednak przy dużym poziomie zakłóceń i zaszumienia sygnałów, w przypadku małych wycieków – mniejszych nawet od 2 % nominalnego natężenia przepływu, okazują się mało skuteczne [2].

Rozwiązanie, które miałyby polepszyć skuteczność metody opartej na detekcji fal ciśnienia, powinno być ukierunkowane na:

- jak najszybsze wykrywanie wycieku i o jak najmniejszej wielkości,
- uzyskanie dużej dokładności lokalizacji wycieku, poprzez bardziej precyzyjne określenie chwil $t_{wav}(z_n)$,
- maksymalne rozszerzenie stosowalności, poza diagnozowaniem nagłych wycieków, do diagnozowania wycieków o wolniejszym stopniu narastania,
- osiągnięcie dużej odporności na występowanie fałszywych alarmów w stanach bez wycieku.

Należy tu dodać, że propagacji fal ciśnienia mogą również towarzyszyć inne zjawiska przepływowe, których oddziaływanie może spowodować zmiany w jego przebiegu. Są to np.: zakłócenia przepływu, przepływy wielofazowe, niepełne wypełnienie przewodu, brak ciągłości strugi. Niekorzystnie uwarunkowany przebieg zjawiska propagacji fal ciśnienia może oznaczać występowanie zmian prędkości fali, poziomu tłumienia oraz zniekształceń czoła fali. Stąd, gdy istnieje taka konieczność, standardowe rozwiązanie metody, z wykorzystaniem zależności (1), powinno być poddane odpowiedniej korekcji.

Należy tu również wspomnieć, że fale ciśnienia wywołane przez wyciek może cechować duże podobieństwo do zmian ciśnienia, które mogą być następstwem operacji technologicznych, takich jak: otwieranie i zamykanie zaworów, rozruch i zatrzymanie pomp, czy zmiana punktu pracy rurociągu. Wymagane jest zatem zastosowanie algorytmów, które niezawodnie odróżniałyby pojawienie się wycieku od innych przypadków operacyjnych, jak zauważają [9]. Tego typu algorytmy nie są jednak w obszarze zainteresowania niniejszego opracowania.

3. Charakterystyka opracowanego rozwiązania

Proponowane rozwiązanie uwzględnia uprzednio zdefiniowane wymogi w zakresie poprawy skuteczności metody. Zakłada ono wykorzystanie sygnałów ciśnienia p_n z przetworników pomiarowych rozmieszczonych na wlocie i wylocie oraz w kilku dodatkowych punktach wzdłuż rurociągu. Liczba przetworników ciśnienia równa jest j . Rozwiązanie obejmuje procedurę wykrywania i lokalizowania wycieku. Jej zasadniczym elementem jest algorytm, który ma za zadanie wykryć wyciek na podstawie wykrycia zjawiska propagacji fal ciśnienia oraz dostarczyć informacji o przebiegu zjawiska, tj. określić chwile $t_{wav}(z_n)$. Na podstawie otrzymanych chwil $t_{wav}(z_n)$ dokonywana jest następnie lokalizacja wycieku, zgodnie z formułą (1). Algorytm działa w cyklu ciągłym i generuje wynik diagnozy po każdorazowym pozyskaniu sygnałów p_n , próbkowanych z okresem T_p . Działanie algorytmu jest oparte o analizę zmiennych Δp_n , które odpowiadają

poszczególnym mierzonym sygnałom ciśnienia p_n . Zmienne Δp_n reprezentują odchylenia (residua), obliczane jako [3, 8]:

$$\Delta p_n^k = p_n^k - \bar{p}_n^k, \quad (3)$$

gdzie: p_n^k - wartość mierzzonego sygnału ciśnienia w chwili k , \bar{p}_n^k - wartość odniesienia dla chwili k .

Wartość odniesienia \bar{p}_n^k obliczana jest poprzez zastosowanie filtracji opartej o filtr rekursywny (4), określanej jako *recursive averaging with fading memory (exponential smoothing)*.

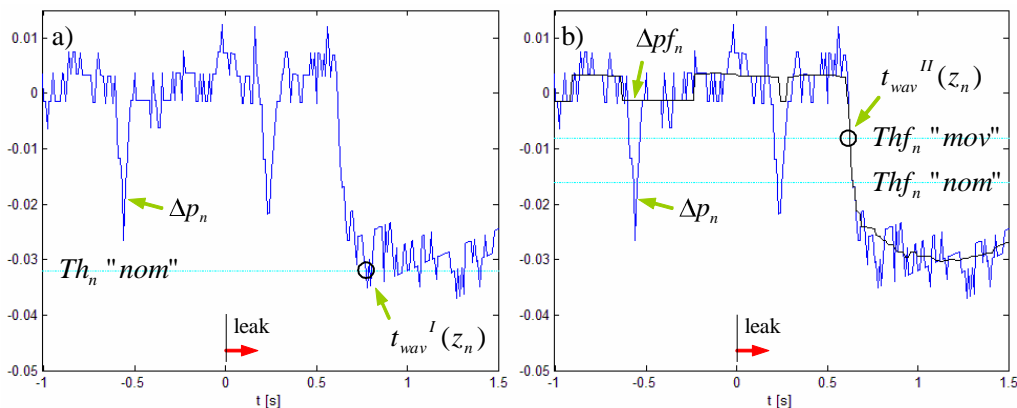
$$\bar{p}_n^k = (\alpha \cdot \bar{p}_n^{k-1}) + ((1-\alpha) \cdot p_n^k) \quad (4)$$

gdzie: \bar{p}_n^{k-1} - wartość odniesienia w chwili $k-1$ wynikającej z przyjętego okresu próbkowania T_p , p_n^k - wartość mierzzonego sygnału ciśnienia w chwili k , α - współczynnik korekcyjny filtra $0 < \alpha < 1$.

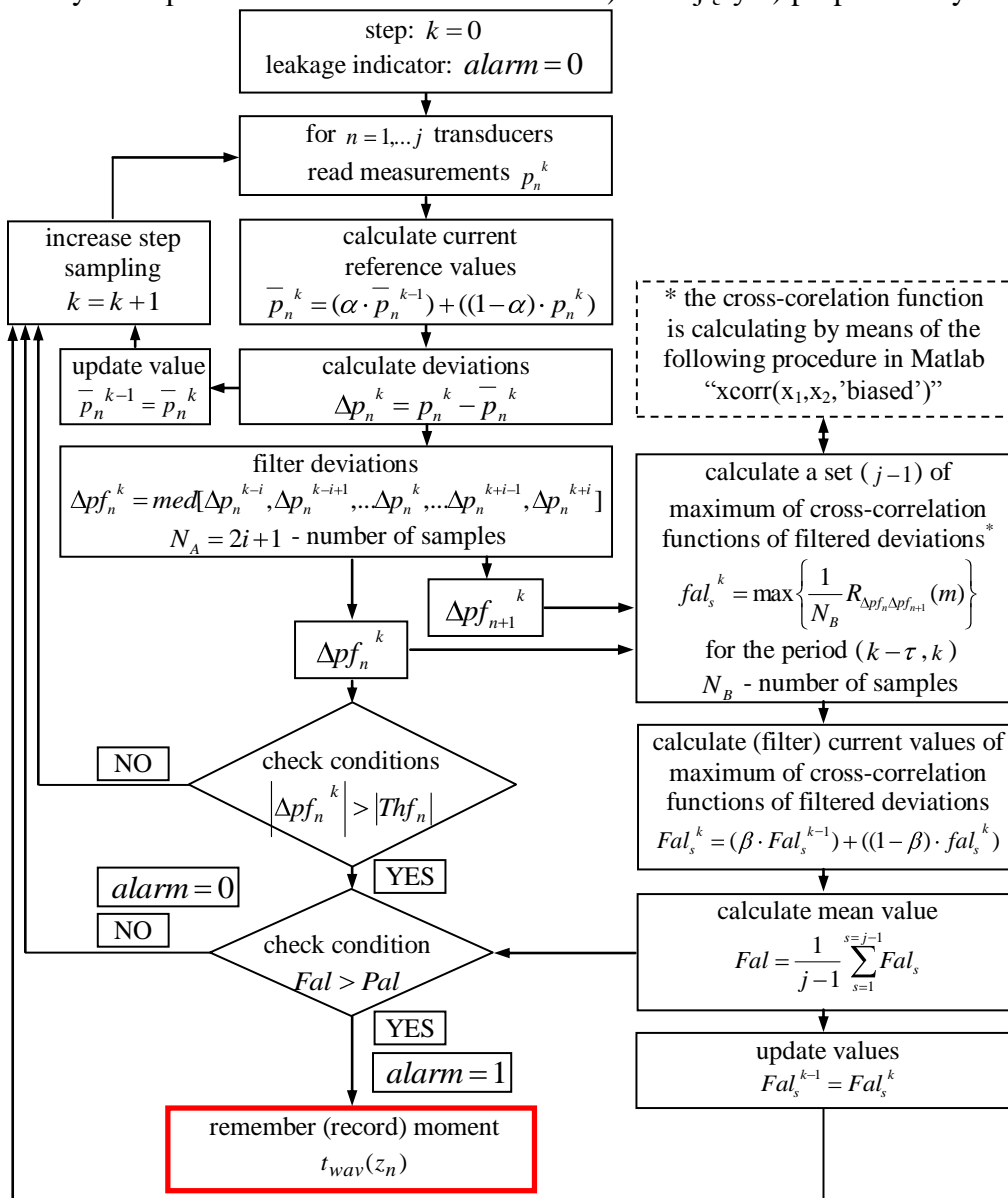
W dotychczasowym podejściu, stosowanym m.in. przez autora [8], wykrycie czoła fali było realizowane na podstawie wykrycia przekroczeń zmiennych Δp_n poza przyjęte progi alarmowe Th_n , na rysunku 3a oznaczone jako "nom". Z uwagi na występujące zakłócenia i szумы pomiarowe, progi alarmowe Th_n ustalane były z odpowiednio dużymi marginesami. Z jednej strony zapobiegało to generowaniu przypadkowych alarmów w stanach bez wycieku. Powodowało to jednak opóźnienia w wykryciu czoła fali, która była wykrywana dopiero w chwili $t_{wav}^I(z_n)$ (Rys. 3a). Określone z opóźnieniem chwile $t_{wav}^I(z_n)$ skutkowały następnie najczęściej błędami w lokalizacji wycieku. Duże marginesy progów alarmowych często uniemożliwiały wykrycie małych wycieków, nawet tych nagłych, nie mówiąc już o wyciekach wolno narastających.

Istotą proponowanego rozwiązania jest ulepszony sposób określania chwil $t_{wav}^{II}(z_n)$ (Rys. 3b). W tym celu opracowano algorytm, który został przedstawiony na rysunku 4. Algorytm zawiera następujące główne elementy:

- filtrację medianową zmiennych Δp_n , której wynikiem są zmienne Δpf_n ,
- nowy sposób ustalania progów alarmowych Thf_n , z obniżonymi marginesami,
- obliczanie dodatkowej funkcji Fal .



Rys. 3. Sposób określania chwil $t_{wav}(z_n)$: a) istniejący b) proponowany



Rys. 4. Algorytm wykrywania wycieku, z określeniem chwil $t_{wav}(z_n)$

Adn. a) Filtracja medianowa jest szczególnie użyteczna, gdy analizowany sygnał używany jest do synchronizacji czasowej. Tego typu problem występuje w przypadku analizy, która ma na celu wykrycie czoła fali ciśnienia. Filtr medianowy szczególnie dobrze nadaje się do usuwania z sygnału zakłóceń lub szumów typu impulsowego, które są charakterystyczne dla pomiarów ciśnienia. Jednocześnie filtr zachowuje zbrocza sygnału i poprawnie „śledzi” jego trend. Filtr medianowy implementowany jest za pomocą ruchomego okna o długości $N_A = 2i + 1$ próbek sygnału wejściowego. Im dłuższe jest N_A , tym dłuższe impulsy jest w stanie „usuwać” filtr medianowy.

Adn. b) Zastosowano adaptacyjne progi alarmowe Thf_n , które obliczane są na podstawie analizy statystycznej zmiennych Δp_n^k . Na rysunku 3b, który przedstawia przebieg przykładowej zmiennej Δp_n^k , pokazano standardowy próg alarmowy oznaczony jako „nom”. Jego wartość określana jest w ten sposób, że zapewnia on nie występowanie alarmu

w stanie bez wycieku. Natomiast próg alarmowy z obniżonym marginesem oznaczono jako "mov". Obniżenie marginesów progów alarmowych Thf_n pomaga uzyskać poprawę dokładności detekcji czoła fali, z reprezentującymi ją chwilami $t_{wav}^{II}(z_n)$. Dzięki temu możliwe jest następnie polepszenie precyzji lokalizacji wycieku.

Adn. c) Zastosowanie obniżenia 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. Stąd, aby niezawodnie odróżnić stany z wyciekiem, algorytm jest wspomagany przez wyznaczenie dodatkowej funkcji Fal . Wartość tej funkcji jest średnią wartością dla zestawu funkcji $\{Fal_s\}_{s=1, \dots, j-1}$ (gdzie j oznacza ilość wszystkich użytych przetworników ciśnienia), które bazują na obliczaniu korelacji wzajemnej zmiennych Δp_n . Poszczególne funkcje Fal_s w zestawie obliczane są zgodnie z opracowanym czułym algorytmem, przedstawionym w pracach [5, 6]. Funkcje Fal_s są wynikiem filtracji funkcji fal_s , opartej o filtr rekursywny, określanej jako *recursive averaging with fading memory (exponential smoothing)*. Poszczególne funkcje fal_s są to maksymalne wartości funkcji korelacji wzajemnej, odpowiadającej korelowaniu zmiennej Δpf_n reprezentującej dany punkt pomiaru ciśnienia ze zmienną Δpf_{n+1} reprezentującą sąsiedni punkt pomiaru ciśnienia wzdłuż rurociągu. Funkcje korelacji wzajemnej obliczane są przy zakresie przesunięcia czasowego $k - \tau$. Zakres przesunięcia τ , ustalany jest na podstawie znajomości prędkości propagacji fali ciśnienia, z uwzględnieniem odległości pomiędzy punktami pomiaru ciśnienia, które odpowiadają zmiennym Δpf_n i Δpf_{n+1} . Wystąpienie wycieku potwierdza przekroczenie przez funkcję Fal jej progu alarmowego Pal .

4. Weryfikacja opracowanego rozwiązania

4.1. Stanowisko badawcze

Przedstawione powyżej rozwiązanie zostało poddane badaniom eksperymentalnym. Zostały one przeprowadzone na stanowisku badawczym z modelem fizycznym rurociągu (Rys. 5). Medium tłoczonym rurociągiem była woda.



Rys. 5. Rurociąg modelowy

Rurociąg ma długość 380 m. Został on wykonany z rur z polietylenu (PEHD) o średnicy zewnętrznej 40 mm i średnicy wewnętrznej 34 mm. Do budowy rurociągu użyto trzech ponad stumetrowej długości odcinków rur. Poszczególne odcinki o przedziałach długości: 0÷140 m, 140÷280 m, 280÷380, połączono za pomocą specjalnych złączek, zachowując w miejscach połączeń identyczną średnicę przewodu. Na rurociągu modelowym zainstalowano standardowe oprzyrządowanie pomiarowe: dwa przepływomierze elektromagnetyczne (na wlocie i wylocie), sześć przetworników ciśnienia, dwa czujniki temperatury. Czujniki ciśnienia zamontowano w punktach o współrzędnych: 1, 75, 141, 281, 335 i 378 m. Czujniki podłączono do komputera PC wyposażonego w 12-bitową kartę pomiarową A/C. Do symulowania wycieków zastosowano ręcznie sterowane zawory z wymiennymi krzywami o różnej średnicy otworów.

4.2. Warunki badań

Przed każdorazowym symulowaniem wycieków rurociąg działał w zakresie stanu ustalonego. Badania obejmowały różnie symulowane wycieki, od bardzo szybkiego do powolnego otwarcia zaworów. Prezentowane w pracy wyniki dotyczą następujących nastaw punktu pracy rurociągu: ciśnienia na wlocie $p_{in_0} \approx 5,7$ bara, ciśnienia na wylocie $p_{out_0} \approx 2,2$ bara, nominalnego strumienia objętości $q_{in_0} \approx 95$ l/min oraz temperatury tłoczonej wody w przedziale zmian od 18°C do 22°C. Wycieki o wielkościach 1-10 % nominalnego natężenia przepływu q_{in_0} były symulowane w wybranych punktach rurociągu, które znajdowały się pomiędzy pierwszą i końcową trójką czujników ciśnienia, o współrzędnych: 155, 195 i 235 m. Dla danej wielkości wycieku przeprowadzono po trzy eksperymenty. Pomiarów sygnałów były dokonywane z nominalną częstotliwością $f_p = 100$ Hz. Podstawą takiego doboru była prędkość propagacji fal ciśnienia w rurociągu, z uwzględnieniem błędu śledzenia czoła fali oraz wzajemnego usytuowania punktów pomiaru ciśnienia.

4.3. Wyniki badań z symulowanymi wyciekami

Istotnym elementem przeprowadzonych badań było porównanie wyników diagnozowania symulowanych wycieków, uzyskanych przy użyciu dotychczas stosowanego algorytmu, z wynikami uzyskanymi przy użyciu opracowanego algorytmu.

Zasadniczym elementem poprawnego działania obu porównywanych algorytmów był odpowiedni dobór poszczególnych progów alarmowych Th_n i Thf_n . Podstawą doboru była przeprowadzona analiza statystyczna poszczególnych zmiennych Δp_n i Δpf_n , w stanach bez wycieku. Takim stanom pracy modelowego rurociągu odpowiadały ustabilizowane wartości mierzonych sygnałów ciśnienia, z określonymi poziomami fluktuacji i szumów, powodowanych przepływem medium w przewodzie rurociągu i pomiarem sygnałów. Inne dodatkowe zakłócenia nie były symulowane.

Przeprowadzona analiza obejmowała całą serię przeprowadzonych eksperymentów, gdzie dla każdego z eksperymentów, w identycznej długości oknie czasowym, określone były następujące parametry statystyczne: „min” – wartość minimalna zmiennej, „mean” – wartość średnia zmiennej i „std” – odchylenie standardowe dla zmiennej. Następnie dokonano określenia wartości średniej „ μ ” i odchylenia standardowego „ σ ” z rozkładów „mean” i „std” uzyskanych dla poszczególnych eksperymentów. Wyniki takiej analizy przedstawiono w formie tabeli 1.

Analizując uzyskane wyniki, jako podstawę doboru poszczególnych progów alarmowych Th_n i Thf_n przyjęto wartości średnie „ μ ” z odchylen standardowych „std”. Wartości poszczególnych progów wyznaczano według następującej zależności:

$$Th_n = -b \times \mu(std) \Delta p_n \quad ; \quad Thf_n = -b \times \mu(std) \Delta pf_n \quad (5)$$

gdzie: b - współczynnik określany eksperymentalnie.

Przy określaniu wartości poszczególnych progów alarmowych Thf_n założono użycie identycznych wartości współczynników b (Tabela 2). Standardowe wartości progów alarmowych Thf_n , oznaczone jako „nom”, określono w ten sposób, aby przekraczając zaobserwowane minimalne wartości zmiennych Δpf_n zapewniały one nie występowanie alarmu w stanie bez wycieku. Taką sytuację uzyskano, dla wartości współczynników $b = 6,5$. Następnie określono wartości progów alarmowych Thf_n z obniżonymi marginesami, oznaczone jako „mov”. Przy ich obliczaniu przyjęto wartości współczynników $b = 5,0$.

Pewne problemy napotkano przy określaniu wartości poszczególnych progów alarmowych Th_n . Wynikały one z dużych różnic pomiędzy zaobserwowanymi minimalnymi wartościami poszczególnych zmiennych Δp_n . Zakładając nie występowanie fałszywych alarmów w stanach bez wycieku oraz użycie identycznej wartości współczynników b , oznaczałoby to, że wartość takich współczynników powinna wynosić aż $b = 20,5$. To z kolei mogłoby skutkować nie wykryciem wielu wycieków. Stąd, w celu porównania działania obu algorytmów w zakresie dokładności wykrycia czół fal ciśnienia, a pomijając aspekt możliwości występowania fałszywych alarmów, przy obliczaniu poszczególnych progów alarmowych Th_n wykorzystano identyczne wartości współczynników $b = 5,0$, jak dla progów alarmowych Thf_n .

Identyczną analizę statystyczną przeprowadzono w celu określenia progów alarmowych Pal , którego wartość ustalono na $Pal = 0,0000115$.

Dla obu porównywanych algorytmów, zastosowano następujące wartości nastaw parametrów: $\alpha = 0,995$; $\beta = 0,900$; $N_A = 35$; $N_B = 25$ i $\tau = 0,25$ sek. Wartości zostały ustalone eksperymentalnie.

Tabela. 1. Parametry statystyczne zmiennych Δp_n i Δpf_n

variables		Δp_1	Δp_2	Δp_3	Δp_4	Δp_5	Δp_6
–	min	-0,03682	-0,09311	-0,02935	-0,02645	-0,06246	-0,02769
μ	mean	-0,00004	-0,00004	-0,00002	-0,00003	-0,00003	-0,00003
	std	0,00522	0,00461	0,00427	0,00487	0,00520	0,00597
σ	mean	0,00042	0,00038	0,00035	0,00034	0,00034	0,00035
	std	0,00078	0,00067	0,00056	0,00070	0,00067	0,00066
variables		Δpf_1	Δpf_2	Δpf_3	Δpf_4	Δpf_5	Δpf_6
–	min	-0,01630	-0,01091	-0,01300	-0,01377	-0,01428	-0,01356
μ	mean	0,00044	0,00025	0,00023	0,00011	0,00012	0,00017
	std	0,00253	0,00273	0,00267	0,00317	0,00312	0,00330
σ	mean	0,00051	0,00045	0,00040	0,00040	0,00041	0,00044
	std	0,00037	0,00037	0,00035	0,00047	0,00043	0,00043

Tabela. 2. Wartości progów alarmowych Th_n i Thf_n

alarm thresholds	Th_1	Th_2	Th_3	Th_4	Th_5	Th_6
b=20,5	-0,1069	-0,0946	-0,0875	-0,0999	-0,1067	-0,1224
b=6,5	-0,0339	-0,0300	-0,0277	-0,0317	-0,0338	-0,0388

b=5,0	-0,0261	-0,0231	-0,0213	-0,0244	-0,0260	-0,0298
alarm thresholds	Thf_1	Thf_2	Thf_3	Thf_4	Thf_5	Thf_6
"nom" b=6,5	-0,0165	-0,0177	-0,0174	-0,0206	-0,0203	-0,0214
"mov" b=5,0	-0,0127	-0,0137	-0,0134	-0,0159	-0,0156	-0,0165

Dokonując lokalizacji wycieków, uwzględniane we wzorze (1) prędkości fal ciśnienia c_p i c_k (odpowiednio w postaci współczynników a_p i a_k) wyznaczano w oparciu o dwa podzbiory danych: początkowy $^{(p)} \mathfrak{Z}_n, t_{wav}(z_n) \overline{\mathfrak{Z}}_{n=1,2,3}$ – dla pierwszej trójki czujników i końcowy $^{(k)} \mathfrak{Z}_n, t_{wav}(z_n) \overline{\mathfrak{Z}}_{n=4,5,6}$ – dla drugiej trójki czujników. Wykorzystano tu metodę aproksymacji średniokwadratowej, zwanej także metodą najmniejszych kwadratów.

W obliczeniach nie uwzględniano wpływu zmian gęstości tłoczonego medium, wywołanych zmianami temperatury, na zmiany prędkości propagacji fal ciśnienia w rurociągu. Zagadnienie to zostało pominięte, gdyż zakres zmian temperatury tłoczonej rurociągiem wody był niewielki i nie powodował znaczących zmian jej gęstości. W przypadku wielu cieczy, np. ropy naftowej i jej produktów, niewielkie zmiany temperatury mogą powodować znaczące zmiany gęstości, a zatem prędkości fali.

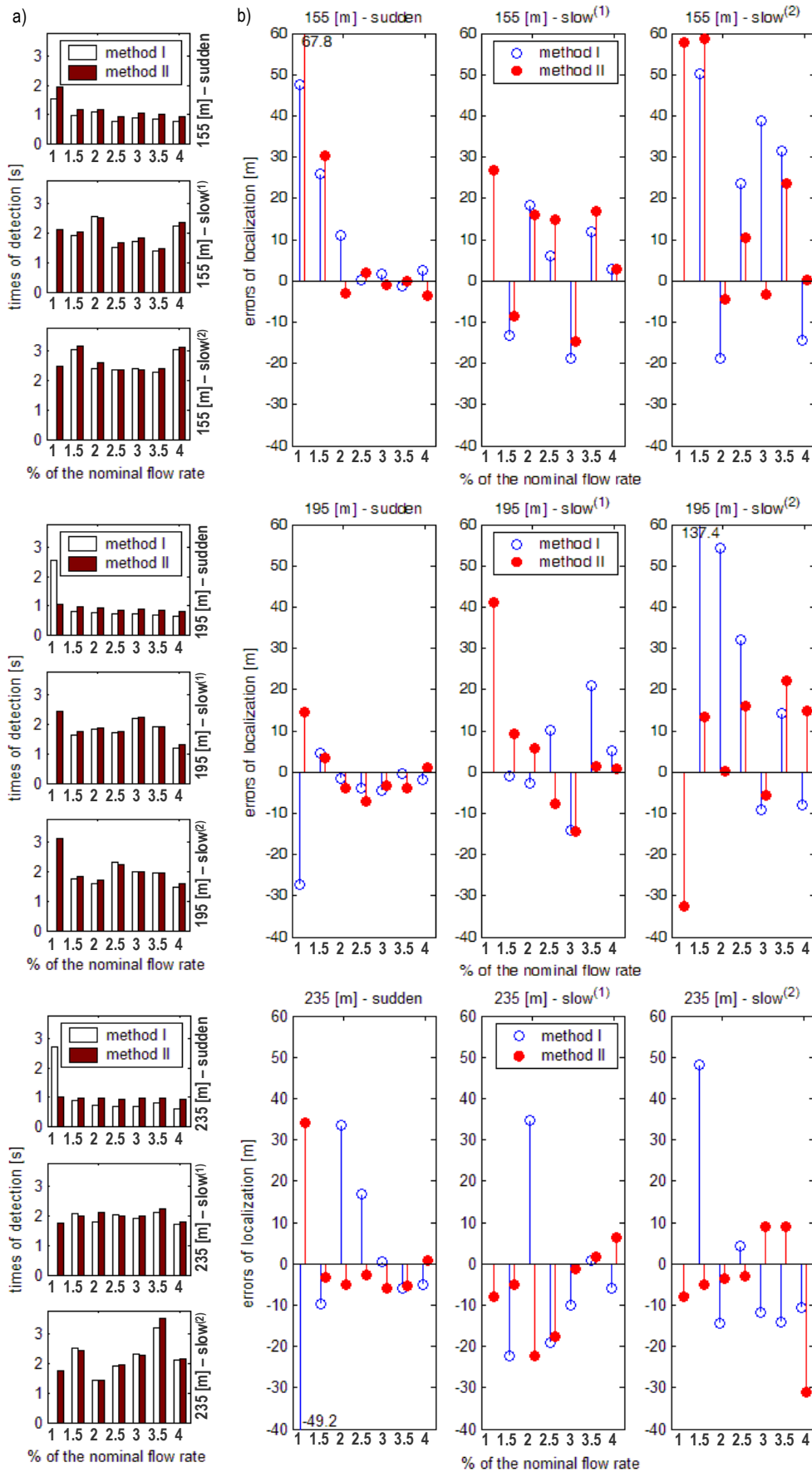
Dodatkowo opracowano również algorytm, który w oparciu o ustaloną kolejność przejść fal ciśnienia przez poszczególne punkty pomiarowe z_n (przy czym: $n=1, \dots, j \geq 2$, a skrajne punkty pomiarowe z_1 i z_j znajdują się na wlocie i wylocie rurociągu, a zatem $z_1 = z_{in}$ i $z_j = z_{out}$) określa podzbiory danych: $^{(p)} \mathfrak{Z}_n, t_{wav}(z_n) \overline{\mathfrak{Z}}_{n=1, \dots, j-r}$ i $^{(k)} \mathfrak{Z}_n, t_{wav}(z_n) \overline{\mathfrak{Z}}_{n=j-r+1, \dots, j}$ wykorzystywane do oszacowania prędkości c_p i c_k uwzględnianych w zależności (1). W przypadku, gdy dany podzbiór zawiera tylko dane z pojedynczego punktu pomiarowego z_1 lub z_j , oznacza to, że wyciek znajduje się od początku lub końca rurociągu, tylko za tym pojedynczym czujnikiem ciśnienia. Wówczas prędkość fali ciśnienia na tym odcinku obliczana jest analitycznie, w oparciu o zależność (2).

W tabeli 3 przedstawiono czasy wykrycia i wyniki lokalizacji symulowanych nagłych i powolnych wycieków, uzyskane przy zastosowaniu porównywanych algorytmów. Wyniki przedstawiono również w postaci diagramów na rysunkach 6a i 6b. Jako czas wykrycia wycieku jest tu brany pod uwagę czas, który upływa od momentu wystąpienia wycieku do momentu pozyskiwania ostatniej informacji przez dany algorytm, niezbędnej do jego wykrycia, a następnie lokalizacji. Wyniki lokalizacji wycieków podano w formie błędów, tj. różnicy pomiędzy określonym, a rzeczywistym miejscem wycieku. 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, oznaczone jako „slow⁽¹⁾” i „slow⁽²⁾”. Dodatkowo w tabeli podano czasy pełnego otwarcia zaworów w przypadku powolnych wycieków, oznaczone jako „valve”, które wynosiły od 3,50 do 10,00 sekund.

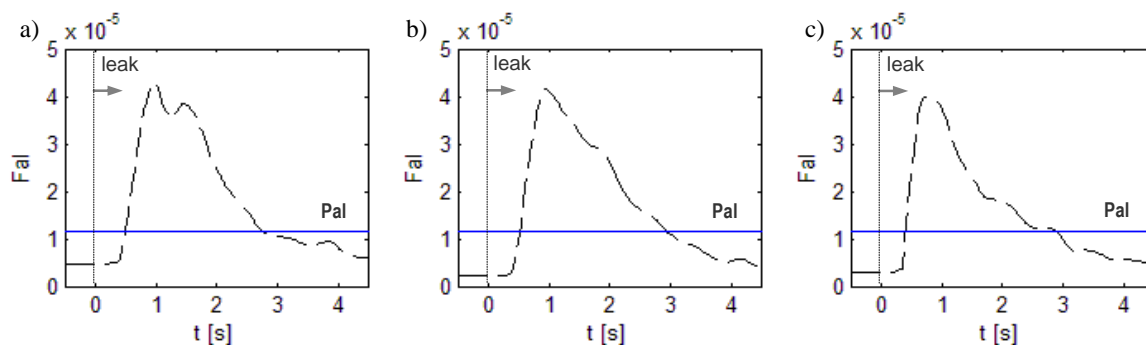
Dodatkowo, na rysunku 7 przedstawiono przebiegi przykładowych funkcji Fal , uzyskane dla wycieków o wielkości 1,5 % nominalnego natężenia przepływu, symulowanych w trzech wybranych punktach wzdłuż rurociągu.

Tabela. 3. Czasy wykrycia "RT" i błędy lokalizacji "LE" symulowanych wycieków, otrzymane przy użyciu istniejącego algorytmu "I" i opracowanego algorytmu "II"

leakages		sudden				slow ⁽¹⁾						slow ⁽²⁾			
z_{leak}	q_{leak} [%]	I		II		valve [s]	I		II		valve [s]	I		II	
		RT [s]	LE [m]	RT [s]	LE [m]		RT [s]	LE [m]	RT [s]	LE [m]		RT [s]	LE [m]	RT [s]	LE [m]
155 [m]	1,0	1,52	47,5	1,94	67,8	3,5	–	–	2,13	26,9	6,3	–	–	2,47	57,7
	1,5	0,98	26,0	1,15	30,2	3,9	1,91	-13,3	2,03	-8,7	5,0	3,06	50,1	3,17	58,8
	2,0	1,09	11,1	1,18	-2,9	5,7	2,58	18,3	2,52	16,0	7,1	2,42	-18,8	2,61	-4,4
	2,5	0,75	0,2	0,91	2,1	3,8	1,51	6,1	1,66	14,9	7,8	2,35	23,7	2,38	10,4
	3,0	0,86	1,7	1,03	-1,1	4,0	1,70	-18,7	1,84	-14,8	7,0	2,42	38,9	2,37	-3,4
	3,5	0,85	-1,3	1,01	-0,2	3,8	1,39	11,9	1,49	16,8	8,7	2,28	31,4	2,42	23,6
	4,0	0,75	2,5	0,90	-3,5	5,6	2,23	2,8	2,35	2,8	8,8	3,04	-14,3	3,15	0,2
195 [m]	1,0	2,54	-27,2	1,04	14,5	3,9	–	–	2,45	41,2	10,0	–	–	3,15	-32,5
	1,5	0,79	4,5	0,94	3,4	4,8	1,64	-1,1	1,76	9,3	8,2	1,77	137,4	1,85	13,3
	2,0	0,76	-1,5	0,92	-3,9	5,1	1,82	-2,6	1,90	5,7	9,1	1,61	54,2	1,71	0,1
	2,5	0,72	-3,8	0,84	-7,0	5,2	1,72	10,1	1,77	-7,6	8,8	2,34	32,0	2,23	16,1
	3,0	0,72	-4,6	0,86	-3,3	5,1	2,21	-14,2	2,26	-14,4	8,2	1,99	-9,1	2,00	-5,6
	3,5	0,69	-0,3	0,84	-3,9	5,2	1,91	20,9	1,94	1,4	7,6	1,97	14,3	1,96	22,1
	4,0	0,65	-1,7	0,81	1,1	3,8	1,21	5,1	1,31	0,8	8,6	1,49	-7,9	1,61	14,7
235 [m]	1,0	2,71	-49,2	1,01	34,1	4,3	–	–	1,74	-7,9	8,3	–	–	1,74	-7,9
	1,5	0,88	-9,7	0,96	-3,2	5,0	2,10	-22,3	2,01	-5,2	8,8	2,53	48,2	2,45	-5,0
	2,0	0,70	33,4	0,94	-5,2	4,3	1,78	34,8	2,13	-22,3	7,6	1,44	-14,3	1,43	-3,6
	2,5	0,66	17,0	0,93	-2,7	5,0	2,04	-19,1	2,01	-17,6	8,6	1,92	4,2	1,98	-3,1
	3,0	0,68	0,4	0,96	-5,8	3,7	1,94	-9,9	2,01	-1,2	8,9	2,32	-11,9	2,27	9,0
	3,5	0,80	-6,0	0,95	-5,3	3,9	2,11	0,9	2,26	1,7	9,9	3,22	-14,0	3,54	9,1
	4,0	0,58	-5,1	0,91	0,9	4,5	1,70	-5,8	1,78	6,3	9,2	2,11	-10,5	2,17	-31,0



Rys. 6. Czasy wykrycia (a) i błędy lokalizacji (b) symulowanych wycieków, otrzymane przy użyciu istniejącego algorytmu "I" i opracowanego algorytmu "II"



Rys. 7. Przebiegi funkcji Fal otrzymane dla nagłych wycieków o wielkości 1,5 % nominalnego natężenia przepływu, symulowanych w punktach o współrzędnych:
a) 155 m b) 195 m c) 235 m

Analizując otrzymane wyniki, w przypadku zastosowania opracowanego algorytmu można zaobserwować znaczącą poprawę dokładności lokalizacji nagłych wycieków. Uzyskano również poprawę wykrywalności i dokładności lokalizacji powolnych wycieków.

Można zauważyć, że czasy wykrycia wycieków uzyskane przy zastosowaniu opracowanego algorytmu nie odbiegają od tych, uzyskanych przy zastosowaniu istniejącego algorytmu. Uzyskano to, nawet pomimo zastosowania filtra medianowego, który wprowadza pewne opóźnienie wynikające z zastosowanego okna czasowego o długości N_A próbek, gdzie bieżąca estymacja filtra dotyczy próbki środkowej w oknie.

Ponadto, uzyskane przebiegi funkcji Fal wskazują na możliwość uzyskania dalszej poprawy wykrywalności wycieków.

5. Podsumowanie

Opracowano algorytm, który pozwala polepszyć skuteczność metody opartej na detekcji fal ciśnienia. Algorytm jest ukierunkowany na precyzyjną identyfikację charakterystycznych punktów na przebiegach sygnałów ciśnienia, które reprezentują fale ciśnienia wywołane przez zaistniały wyciek.

Proponowane rozwiązanie jest wrażliwe na małe wycieki i odporne na fałszywe alarmy (występujące zakłócenia). Pozwala na zadawalająco dokładną lokalizację wycieku, bez znaczących opóźnień czasowych.

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

Literatura

1. Billman L, Isermann R. Leak detection methods for pipelines. *Automatica* 1987; 23: 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. Kowalczyk Z, Gunawickrama K. Detecting and locating leaks in transmission pipelines, in.: Korbicz K J, Koscielny J M, Kowalczyk Z, Cholewa W (Eds.). *Fault Diagnosis: Models, Artificial Intelligence, Applications*. Berlin: Springer-Verlag, 2004; 822-864.

4. Mitosek M. *Mechanika płynów w inżynierii i ochronie środowiska*. Warszawa: Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, 2001.
5. Ostapkowicz P. Signals of weak interobject interactions in diagnosing of leakages from pipelines. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2007; 33: 31-45.
6. Ostapkowicz P. 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* 2009; 147-149: 492-497.
7. Ostapkowicz P. Lokalizacja nieszczelności w rurociągach przesyłowych cieczy z wykorzystaniem metody gradientowej – studium przypadku. *Pomiary Automatyka Kontrola – Measurement Automation and Monitoring* 2011; 57: 1311-1316.
8. Sobczak R. Lokalizacja nieszczelności w rurociągach metodą śledzenia czół fal ciśnienia. *Przemysł Chemiczny – Chemical Industry* 2004; 83: 296-299.
9. Turkowski M, Bratek A, Słowikowski M. Methods and systems of leak detection in long range pipelines. *Journal of Automation, Mobile Robotics & Intelligent Systems* 2007; 1: 39-46.