

## **Dr inż. Paweł Ostapkowicz**

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

## **Mgr inż. Andrzej Bratek**

Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów  
Al. Jerozolimskie 202, 02-486 Warszawa, Polska  
E-mail: abratek@piap.pl

### **Weryfikacja możliwego poziomu wykrywalności wycieków w zakresie zastosowania zmodyfikowanych uproszczonych metod diagnostycznych**

**Słowa kluczowe:** wykrywanie uszkodzeń, rurociągi, metody wykrywania wycieków, poziom wykrywalności wycieków

**Streszczenie:** Artykuł dotyczy zagadnień diagnozowania wycieków z rurociągów przesyłowych cieczy z wykorzystaniem metod, które bazują na pomiarach wewnętrznych parametrów przepływu (zmiennych procesowych), tj.: strumienia i ciśnienia. Artykuł prezentuje porównanie trzech zmodyfikowanych uproszczonych technik, tj.: analizy korelacyjnej sygnałów ciśnienia i przepływu, monitorowania zmian ciśnienia i bilansu strumieni. Oprócz uprzednio znanych rozwiązań autorzy proponują również rozwiązanie algorytmu detekcyjnego o nowej strukturze zmiennych i o dwóch wariantach funkcji wynikowych. Metody nie wymagają zastosowania skomplikowanych modeli rurociągu, cechuje je niski koszt w sensie wymagań dotyczących urządzeń pomiarowych oraz łatwa realizacja i obsługa.

Obszarem zainteresowania niniejszego artykułu jest określenie dla proponowanych metod wskaźników jakościowych, w przypadku diagnozowania pojedynczych wycieków w stanach ustalonych. Taka ocena dotyczy w szczególności ustalenia możliwego poziomu wykrywalności wycieku, tj. minimalnej wielkości wycieku, który może być wykryty. Innym określanym parametrem jest tzw. czas odpowiedzi, tj. czas od momentu wystąpienia wycieku do jego wykrycia. Podstawę weryfikacji stanowiły badania eksperymentalne przeprowadzone na stanowisku z modelem fizycznym rurociągu. Uzyskane wyniki potwierdziły wysoką skuteczność proponowanych technik wykrywania wycieków.

## **1. Wstęp**

Rurociągi przesyłowe cieczy narażone są na awarie, których następstwem mogą być wycieki. Stąd niezbędnym wyposażeniem tego typu instalacji są systemy diagnostyczne wycieków (z ang. LDS – leak detection systems). Głównym zadaniem tych systemów jest wykrycie, zlokalizowanie oraz oszacowanie wielkości zaistniałego wycieku.

Większość LDS jest opracowywanych z wykorzystaniem metod diagnostycznych, które bazują na pomiarach wewnętrznych parametrów przepływu, tj. strumienia, ciśnienia i temperatury tłoczonego medium. W literaturze takie metody są określane jako *wewnętrzne (analityczne, pośrednie)* [2, 11, 17].

Implementacja procesu diagnozowania wycieków stanowi dość skomplikowane zagadnienie. Istniejące metody wewnętrzne, których przegląd można odnaleźć w pracach [4,

10, 11, 17, 19], samodzielnie nie są w stanie zapewnić realizacji wszystkich wspomnianych zadań diagnostycznych. Ich użyteczność jest ograniczona tylko do określonych stanów operacyjnych rurociągu i charakterystyk zaistniałych wycieków. Stąd opracowanie efektywnego i niezawodnego LDS wymaga zastosowania minimum kilku metod wewnętrznych [17].

Mając na uwadze, że na samym początku system diagnostyczny powinien wykryć zaistniały wyciek, metody odpowiedzialne za realizację tego zadania nabierają szczególnego znaczenia. W praktyce stosuje się jedną lub kilka takich metod. Ma to na celu zwiększenie solidności systemu, rozumianej jako stopień zaufania osób obsługujących system, a oznaczającej brak fałszywych alarmów i wykrywanie przez system zaistniałych wycieków.

Najbardziej zaawansowane rozwiązania ukierunkowane na wykrywanie wycieków bazują na dynamicznych modelach procesu. Jako przykład takich metod można tu wymienić *metody analizy odwrotnej* (z ang. *inverse analysis methods*) [9, 19] oraz metody w kontekście tzw. *podejścia odpowiadającego automatyce* (z ang. *automatic control approach*) [1, 2, 10, 11, 16, 18]. Niewątpliwą zaletą obu grup metod jest możliwość wykrywania wycieków w stanach ustalonych, a także w stanach przejściowych, które są następstwem takich zmian operacyjnych, jak: zmiana punktu pracy, otwieranie i zamykanie zaworów, rozruch i zatrzymanie pomp. Jednak są to dość złożone metody, a ich praktyczna realizacja oznacza konieczność rozwiązania wielu problemów, które dotyczą takich zagadnień, jak: opracowanie matematycznego modelu rurociągu i poszukiwanie rozwiązań takiego modelu, ścisłe przestrzeganie metodyki procesu diagnozowania, zastosowanie odpowiednich środków diagnozowania.

W przypadku *metod analizy odwrotnej* ich ogólna idea polega na porównywaniu wyników generowanych przez model z danymi pomiarowymi, a minimalizowanie uzyskiwanych odchyłeń poprzez odpowiednie dopasowanie modelu prowadzi do wykrycia wycieku oraz jego lokalizacji. Modelowanie dynamiki przepływu w przewodzie rurociągu najczęściej bazuje na zastosowaniu niestacjonarnych równań zachowania masy i pędu dla płynów. Praktyczna realizacja takich metod może wymagać przeprowadzania specjalnych testów, które polegają na wymuszaniu stanów przejściowych w formie impulsów ciśnienia generowanych przez zamykanie zaworu, zamontowanego na skrajnym odcinku rurociągu [19]. Testy z wykorzystaniem zaworu znacząco upraszczają opis dynamiki rurociągu, z uwzględnieniem modelowania samego wycieku oraz ułatwiają rozwiązywanie układów równań poprzez uzyskaną (znacząco polepszoną) znajomość warunków brzegowych. Poprawne przeprowadzenie takich testów wymaga jednakże właściwego sterowania procesem zamykania zaworu, na co zwraca uwagę [9]. Zamykanie zaworu na działającym rurociągu zawsze jednak stwarza pewne zagrożenie. Stąd może być konieczne wprowadzenie pewnych ograniczeń w normalnej eksploatacji rurociągu, tj. obniżenie wartości ciśnienia, a stąd ilości przetłaczanego medium.

W przypadku metod w kontekście tzw. *podejścia odpowiadającego automatyce* matematyczny model dynamiki przepływu płynu jest zazwyczaj zapisywany w przestrzeni stanów. Powszechnym rozwiązaniem jest zastosowanie obserwatorów stanu, które estymują wartości zmiennych procesowych, na przykład strumień przepływu na wlocie i wylocie rurociągu [1, 2, 10, 11] lub inne parametry opisujące przepływ, np. współczynnik tarcia [2, 10, 11]. W kolejnym kroku stosując określony algorytm detekcyjny możliwe jest uzyskanie diagnozy, z wygenerowaniem alarmu o zaistniałym wycieku.

Realizacja obu powyżej wspomnianych grup metod wnosi wysokie wymagania względem układów pomiarowych. To skutkuje wysokimi kosztami LDS, które wynikają z potrzeby użycia odpowiedniej ilości bardzo dokładnych urządzeń pomiarowych, układów transmisji danych o wysoce rygorystycznej synchronizacji czasowej i komputerów o dużych

mocach obliczeniowych. Taki LDS powinien być również obsługiwany przez operatorów o bardzo wysokich kwalifikacjach.

Dlatego też, zamiast takich metod, stosowane są prostsze rozwiązania, w tym np.: bilans masy, monitorowanie ciśnienia/przepływu, detekcja fal ciśnienia, analiza korelacyjna mierzonych sygnałów. W ogólności, każda metoda uwzględnia zazwyczaj pojedyncze zjawisko hydrauliczne związane z wystąpieniem wycieku, co stanowi podstawę do opracowania odpowiednich algorytmów detekcyjnych. Tego typu uproszczone algorytmy detekcyjne (z ang. SLDA – simplified leak detection algorithms), ukierunkowane na wykrywanie pojedynczych wycieków z rurociągów przesyłowych cieczy, stanowią obszar zainteresowania niniejszej pracy.

Niewątpliwą zaletą SLDA są relatywnie niskie koszty i łatwość ich implementacji. Uwzględniając inne cechy, w tym: czas trwania testu, ingerencję w normalne działanie systemu, złożoność oprzyrządowania, które według [3] razem stanowią kryterium porównawcze dla różnych metod diagnozowania wycieków, w przypadku SLDA również należy ocenić zadawalająco. Warto jeszcze zwrócić uwagę na aspekt dotyczący praktycznego zastosowania SLDA, jako elementów LDS. Konfigurując LDS, może być zastosowany nawet pojedynczy SLDA, na przykład na bazie zasady bilansu masy lub objętości. Częściej jednak stosuje się kilka SLDA, które poprzez ich odpowiednią synchronizację powinny się wzajemnie weryfikować i/lub uzupełniać. W rezultacie ma to umożliwiać wykrywanie wycieków nie tylko w stanach ustalonych, ale nawet w zakresie innych warunków operacyjnych (charakteryzujących się niewielkimi poziomami stanów przejściowych). SLDA mogą być elementami bardziej zaawansowanych procedur diagnozowania wycieków, które wykorzystują wcześniej wspomniane matematyczne modele dynamiki przepływu płynu. Te ostatnie rozwiązania można odnaleźć w pracach [1, 2, 10, 11]. Według porównania dwóch zaawansowanych algorytmów, które można odnaleźć w pracy [1], algorytm skonfigurowany według powyżej wspomnianego schematu dzięki jego dobrym osiągom, wysokiej niezawodności i faktu, że jest bardziej odpowiedni do implementacji na sterownikach przemysłowych został ogólnie lepiej oceniony, niż drugi algorytm, który był jeszcze dużo bardziej zaawansowany w aspekcie złożoności obliczeniowej.

Oprócz wspomnianych cech, niezależnie od zastosowania zaawansowanych czy uproszczonych technik detekcji wycieku, o ich praktycznej przydatności decyduje zasadniczo skuteczność. Jest ona definiowana jako możliwość wykrycia danej wielkości wycieku, przy określonych ograniczeniach czasowych, z minimalnym poziomem fałszywych alarmów. Według [18], operatorzy rurociągów są zainteresowani rozwiązaniami LDS, które pozwalałyby na wykrywanie wycieków o intensywności mniejszej niż 1% nominalnego strumienia przepływu. Najlepiej aby takie osiągi dotyczyły zarówno stanów ustalonych, jak i stanów nieustalonych. Operatorów interesuje również ocena (oszacowanie) najmniejszej wielkości wykrywanego wycieku, jaki można uzyskać dla określonego rozwiązania algorytmu detekcyjnego.

Skuteczność SLDA jest zależna o wielu czynników. Można tu wskazać na strukturę samego algorytmu. Pod pojęciem struktury algorytmu jest tu całościowo rozumiana opracowana realizacja wybranej metody diagnozowania, która uwzględnia użycie określonej konfiguracji urządzeń pomiarowych (liczba, rozmieszczenie), ich charakterystyki metrologiczne (dokładność), nastawy transmisji danych (próbkiowanie), warunki podczas pomiarów (poziom zakłóceń i szumów pomiarowych) oraz zastosowane techniki przetwarzania i analizy mierzonych sygnałów, w tym również dobór progów alarmowych. W przypadku danego rurociągu istotne są: topografia (w tym średnica i długość), stan przewodu (chropowatość), rodzaj tłoczonego medium (gęstość, prędkość fali ciśnienia), warunki przepływu (strumień i ciśnienie). Ponadto istotne są parametry wycieku, tj.: miejsce,

intensywność, charakter wystąpienia i narastania, a także rozmiary uszkodzenia przewodu. Analizę takich zagadnień można odnaleźć w pracach [3, 7].

Niestety, skuteczność wielu obecnie używanych SLDA często jest zbyt mało zadawalająca. Interesuje tu nas przypadek zastosowania SLDA do diagnozowania pojedynczych wycieków z rurociągów przesyłowych cieczy w stanach ustalonych. Przykładowy SLDA, który wykorzystuje metodę bazującą na detekcji ujemnych fal ciśnienia można odnaleźć w [7]. Algorytm przetwarza dane z dwóch pojedynczych czujników ciśnienia montowanych na wlocie i wylocie rurociągu. Podstawą oceny jego skuteczności, która uwzględnia określenie najmniejszej wielkości wykrywanego wycieku, są wykonane obliczenia symulacyjne, gdzie wykorzystano matematyczny opis zmian amplitudy fali ciśnienia w odniesieniu do zadanych parametrów rurociągu. Uzyskana najmniejsza wielkość wykrywanego wycieku, która wynosi około 1,4% masowego przepływu nominalnego, przekracza jednak wartość referencyjną. Inny SLDA, który wykorzystuje metodę masowego bilansowania wycieku, w połączeniu z analizą korelacyjną, został przedstawiony w [10]. Algorytm działa w oparciu o pomiar strumieni masowych na wlocie i wylocie. Poddano go testom eksperymentalnym na rurociągu do transportu benzyny. Przedstawione wyniki dotyczą tylko pojedynczego eksperymentu, gdzie intensywność wykrytego wycieku wynosi 0,19% masowego przepływu nominalnego.

Należy tu dodać, że SLDA są prezentowane lub wzmiankowane w wielu innych publikacjach naukowych [5, 12]. Jednak nie zawsze zawierają one pełne informacje na temat ich szczegółowych rozwiązań oraz skuteczności, z określeniem najmniejszej wielkości wykrywanego wycieku, co istotnie utrudnia ich ewentualne modyfikacje i wdrożenia.

Analizując istniejące SLDA, warto zauważyć, że skuteczność rozwiązań podobnych w sensie ich ogólnej metodyki może się znacząco różnić. Autorzy zakładają zastosowanie odpowiednich rozwiązań struktury SLDA jako sposobu uzyskania poprawy ich skuteczności.

Stąd głównym celem pracy jest całościowe zaprezentowanie kilku zmodyfikowanych SLDA oraz ich porównanie, w zakresie oceny skuteczności. Prezentowany zbiór algorytmów detekcyjnych charakteryzuje się tym, że wykorzystują one różne kombinacje standardowych dla rurociągów przesyłowych mierzonych sygnałów zmiennych procesowych, tj. sygnałów strumienia i ciśnienia. Oprócz uprzednio znanych rozwiązań autorzy proponują rozwiązanie algorytmu o nowej strukturze zmiennych i o dwóch wariantach funkcji wynikowych. Wszystkie prezentowane rozwiązania SLDA są ukierunkowane na wykrywanie pojedynczych wycieków z rurociągów przesyłowych cieczy, w warunkach stanu ustalonego.

Należy tutaj wyjaśnić, że autorzy w niniejszej pracy koncentrują się w szczególności na zagadnieniu wykrywania wycieku. Temu zagadnieniu poświęcono wiele uwagi. Zadanie to jest uważane za najważniejsze z punktu widzenia działania LDS, jako pierwszy obowiązkowy etap, który musi być zakończony w celu przeprowadzenia lokalizacji wycieku i oszacowania jego wielkości. Nie mniej jednak, w pracy uwzględniono również lokalizację, pomijając natomiast oszacowanie wielkości wycieku.

Algorytmy zostały poddane eksperymentalnej weryfikacji, wykorzystując fizyczny model rurociągu, na którym przeprowadzono szeroki program badań z symulowanymi wyciekami. Podstawę oceny algorytmów stanowiło określenie dwóch podstawowych wskaźników jakościowych: *najmniejszego poziomu wykrywalności* i *czasu wykrycia* wycieku. Te parametry są bezpośrednio związane z zagadnieniem wykrywania wycieku. W przypadku lokalizacji wycieku jako parametr określający dokładność takiego oszacowania uwzględniono błąd lokalizacji.

Najmniejsze wielkości wykrywalnych wycieków, które uzyskano dla opracowanych algorytmów, były poniżej przyjętej wartości referencyjnej. Autorzy zakładają, że

przedstawione w artykule rozwiązania zmodyfikowanych SLDA oraz wyniki ich zastosowania mogą dostarczyć cennych informacji dla operatorów rurociągów.

Artykuł podzielono na następujące części: drugi rozdział opisujący typowe wyposażenie pomiarowe rurociągów przesyłowych; trzeci rozdział zawierający opis zjawisk hydraulicznych związanych z wystąpieniem wycieku; czwarty rozdział z omówieniem podstawowych problemów dotyczących wykrywania wycieków; piąty rozdział ze szczegółowym opisem proponowanych algorytmów; szósty rozdział prezentujący opis laboratoryjnego rurociągu i programu badań; siódmy rozdział dotyczący aspektów praktycznej realizacji proponowanych algorytmów; ósmy rozdział prezentujący uzyskane wyniki diagnozowania symulowanych wycieków, z ich analizą oraz podsumowanie z sugestią przyszłych prac badawczych.

## 2. Wyposażenie pomiarowe rurociągów

Rurociągi przesyłowe cieczy są zazwyczaj wyposażone w przepływomierze i przetworniki ciśnienia, zamontowane na wlocie i wylocie. Ponadto, dodatkowe czujniki ciśnienia często montowane są wzdłuż rurociągu. Celem zamontowania tych czujników jest skrócenie czasu wykrycia i zwiększenie dokładności lokalizacji wycieku.

Zważywszy że układy pomiarowe stanowią podstawę systemów SCADA (z ang. supervisory control and data acquisition), które są stosowane na rurociągach do monitorowania i sterowania procesem tłoczenia, system typu LDS jest zazwyczaj ich dodatkowym modułem.

Układy pomiarowe powinny pozyskiwać i dostarczać do systemów diagnostycznych wycieków określone informacje diagnostyczne, tj. mierzone sygnały ciśnienia i strumienia, w sposób ciągły (według przyjętych okresów próbkowania  $T_p$ ), bez znaczących opóźnień czasowych. Ponadto układy pomiarowe powinny być odporne na błędy i zakłócenia. Jednak powyżej wspomniane niekorzystne uwarunkowania dotyczące zakłóceń w przypadku rurociągów przesyłowych dalekiego zasięgu mogą występować. Według [20], przypadki dostępności tylko części użytecznych danych pomiarowych są dość częste.

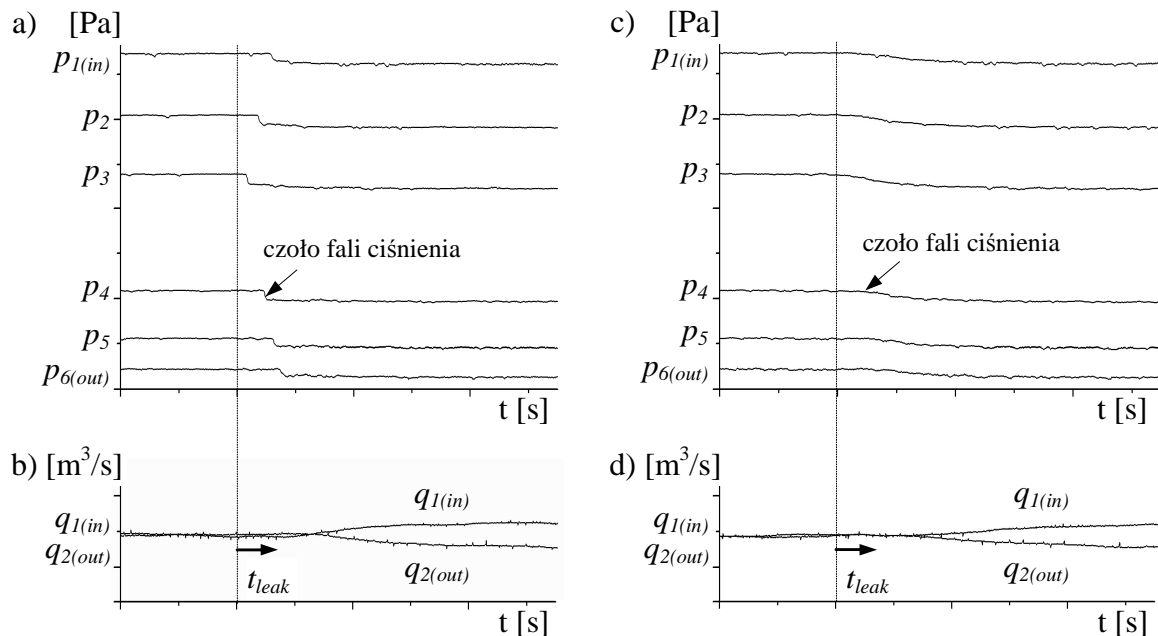
## 3. Opis zjawiska wycieku

Typowe zależności pomiędzy sygnałami ciśnienia (mierzonego na wlocie i wylocie, oraz w kilku punktach wzdłuż rurociągu) i sygnałami strumienia (mierzonego na wlocie i wylocie) dla rurociągu przesyłowego cieczy, przed i po wystąpieniu wycieku, zostały przedstawione na rysunku 1.

Zakładając, że szczelny rurociąg funkcjonuje w zakresie stanu ustalonego, pomiary ciśnienia i strumienia wykazują ustabilizowane wartości z niewielkimi poziomami fluktuacji. Wystąpienie wycieku skutkuje zmianami ciśnienia i strumienia w rurociągu. Na początku, w miejscu wystąpienia wycieku dochodzi do nagłego spadku ciśnienia, który następnie propaguje od tego punktu w obu kierunkach wzdłuż rurociągu jako ujemne fale ciśnienia. Takie fale rozchodzą się z prędkością dźwięku specyficzną dla tłoczonego medium. W mierzonych sygnałach ciśnienia falę można rozpoznać jako zmianę, która w czasie swoją formą przypomina zbocze opadające, zazwyczaj o krzywoliniowym kształcie i różnym stopniu jego nachylenia. Początek takiej zmiany odpowiada czołu fali ciśnienia. Czoła fal ciśnienia są wyraźnie widoczne w przypadku nagłych wycieków (Rys. 1a). Są to wycieki, do których dochodzi w następstwie szybkiego rozwoju uszkodzenia przewodu, a ich intensywność (natężenie) osiąga wartość nominalną w krótkim czasie. W przypadku wycieków narastających powoli, z uwagi na łagodniejszy przebieg zmian ciśnienia, fale ciśnienia mają bardziej wygładzony kształt czoł (Rys. 1b). Za czołem fali spadek ciśnienia

w rurociągu jest największy w pobliżu miejsca wycieku, a wraz ze wzrostem odległości od tego miejsca maleje. Obserwowane spadki ciśnienia zależą od wielkości wycieku, jego położenia oraz warunków przepływu.

Po pewnym czasie od wystąpienia wycieku przepływ w rurociągu stabilizuje się, a stan przejściowy przemienia się w nowy stan ustalony. Porównując do stanu sprzed wycieku, strumień na odcinku pomiędzy wlotem a miejscem wycieku wzrasta, a strumień na odcinku od miejsca wycieku do wylotu maleje (Rys. 1).



Rys. 1. Przebiegi sygnałów z czujników laboratoryjnego rurociągu, z pojedynczym wyciekem:  $p_1, \dots, p_6$  - ciśnienie wzdłuż rurociągu,  $q_{in}$ ,  $q_{out}$  - strumień na wlocie i wylocie.

Wyraźne zmiany w trendach mierzonych sygnałów są spowodowane przez duży wyciek symulowany w chwili  $t = t_{leak}$ . Odpowiadają one przypadkowi nagłego wycieku:

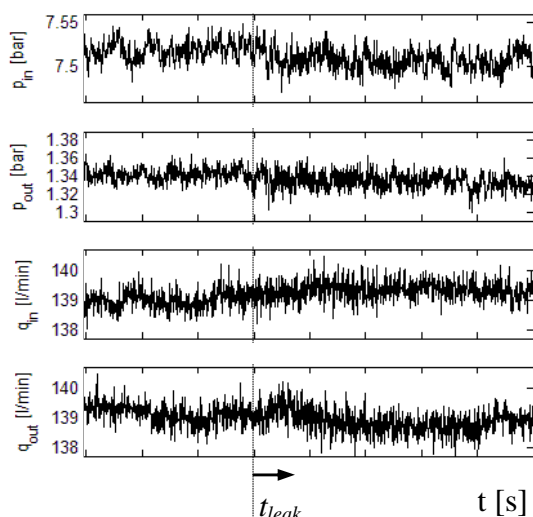
a) ciśnienie, b) strumień; i powolnemu wyciekowi: c) ciśnienie, d) strumień.

#### 4. Występujące problemy w wykrywaniu wycieków

O stopniu (poziomie) wykrywalności wycieków zasadniczo decydują charakter i czytelność zmian mierzonych sygnałów ciśnienia i przepływu (wynikające z przebiegu zjawiska wycieku i charakterystyk metrologicznych urządzeń pomiarowych).

Taka przykładowa sytuacja została przedstawiona na rysunku 2. Przebiegi tych sygnałów zarejestrowano na eksperymentalnym rurociągu (którego opis można odnaleźć w rozdziale 6), gdzie na początku odpowiadają one normalnemu działaniu rurociągu, tj. w warunkach stanu ustalonego. Następnie był symulowany pojedynczy nagły wyciek o wielkości 0.45% nominalnego przepływu, w punkcie bliskim połowy długości rurociągu. Można zauważyć, że w przebiegach sygnałów ciśnienia i przepływu trudno jest dostrzec zmiany spowodowane przez zaistniały wyciek, z powodu znacznego poziomu szumów.

Należy tu wyjaśnić, że ciśnienie i strumień na rysunku 2 nie zostały wyrażone w jednostkach układu SI. Podano je natomiast w jednostkach, które czytelniej reprezentują charakterystykę przepływu w tym rurociągu (operatorzy rurociągów powszechniej używają jednostek spoza układu SI – na przykład m<sup>3</sup>/h). Jednostki widoczne na rysunku 2 są również stosowane w dalszej części pracy.



Rys. 2. Przebiegi sygnałów pomiarowych pozyskanych z laboratoryjnego rurociągu, z symulowanym małym nagłym wyciekami o wielkości 0.45% nominalnego przepływu, w punkcie bliskim połowy długości rurociągu; gdzie:  $p_{in}$ ,  $p_{out}$  - ciśnienie na wlocie i wylocie,  $q_{in}$ ,  $q_{out}$  - strumień na wlocie i wylocie,  $t_{leak}$  - początek wycieku

## 5. Charakterystyki teoretyczne porównywanych metod

Proponowane zmodyfikowane rozwiązania SLDA bazują na zastosowaniu sygnałów pomiarowych, o których wspomniano w rozdziale 2. Uwzględniają one następujące metody:

- analizy korelacyjnej (oznaczenie „metoda I”),
- monitorowania ciśnienia (oznaczenie „metoda II”),
- bilansu objętości (oznaczenie „metoda III”).

Prezentowane opisy proponowanych rozwiązań mogą stanowić podstawę ich praktycznej aplikacji.

### 5.1. Metoda I

Proponowana technika bazuje na zastosowaniu analizy korelacyjnej. W odróżnieniu od podobnych rozwiązań odnajdywanych w pracach [1, 2, 10, 11], proponujemy zastosować analizę korelacyjną nie tylko w odniesieniu do sygnałów przepływu, ale również do sygnałów ciśnienia [14, 15].

Użycie sygnałów ciśnienia ma na celu skrócenie czasu wykrycia wycieku. Uwzględniając dynamikę przewodu rurociągu, sygnały ciśnienia mogą wcześniej dostarczyć informacje o zaistnieniu wycieku, niż sygnały przepływu. Jest to dobrze widoczne na rysunku 1, gdy porównamy sygnały mierzone na wlocie i wylocie. Uwzględniając dodatkowe czujniki ciśnienia zamontowane wzdłuż rurociągu, istnieje możliwość jeszcze szybszego wykrycia wycieku.

Algorytm bazujący na zastosowaniu sygnałów ciśnienia może działać samodzielnie. Należy jednak pamiętać, że zmiany ciśnienia w rurociągu nie zawsze są następstwem wystąpienia wycieku. Podobne symptomy, jak dla zjawiska propagacji fal, które towarzyszy wyciekom, można zaobserwować dla innych warunków przepływu spowodowanych nastawami zaworów. Ich rozróżnienie jest bardzo trudne, o czym wspomina [12]. Chcąc zabezpieczyć się przed generowaniem fałszywych alarmów i zwiększyć wiarygodność diagnozy, oprócz algorytmu, który bazuje na zastosowaniu sygnałów ciśnienia można zastosować drugi równoległe działający algorytm, ale oparty o sygnały przepływu.

Uwzględniając powyższe założenia, opracowano kilka wariantów SLDA. Wykorzystują one następujące konfiguracje sygnałów diagnostycznych:

- a) dwa sygnały strumienia mierzonego na wlocie i wylocie rurociągu,
- b) dwa sygnały ciśnienia mierzonego na wlocie i wylocie rurociągu,
- c) dwa sygnały ciśnienia mierzonego na wlocie i wylocie, i dodatkowo w kilku punktach wzdłuż rurociągu.

Struktury poszczególnych algorytmów, oprócz ogólnego ich podobieństwa, charakteryzują się zastosowaniem istotnych odmiennych elementów. Podstawę ich działania stanowi analiza korelacyjna. Taka analiza w kolejnych krokach obliczeń dotyczy wektorów danych, które tworzy się w oparciu o zastosowanie przesuwanych okien czasowych. Danymi w oknach są obliczane zmienne (tj. residua), zamiast mierzonych wartości sygnałów diagnostycznych. Proponowane rozwiązania algorytmów uwzględniają dwie konfiguracje okien czasowych, o różnych krokach ich przesuwu definiowanych określoną ilością kolejnych próbek sygnałów. Opracowując obie konfiguracje okien, z jednej strony brano pod uwagę szybkość wykrycia wycieku, a z drugiej zapotrzebowanie na moc obliczeniową. Szczegółowe rozwiązania poszczególnych algorytmów zostały opisane w dalszej części tego podrozdziału.

Na początku, wybrane do analizy mierzone sygnały diagnostyczne  $x_n$  (odpowiednio:  $q_n$  - sygnały strumienia,  $p_n$  - sygnały ciśnienia; gdzie:  $n = 1, \dots, j$  - numer punktu,  $j$  - liczba punktów pomiarowych) zostają zastąpione przez zmienne  $\Delta x_n$ .

Zmienne  $\Delta x_n$  reprezentują odchylenia (residua). Są one obliczane jako różnice pomiędzy bieżącą wartością danego sygnału  $x_n^k$ , a wartością odniesienia  $\bar{x}_n^k$ , zgodnie z zależnością (1). Wartość odniesienia jest wynikiem zastosowania filtracji rekursywnej o charakterystyce dolnoprzepustowej typu *recursive averaging with fading memory* (*exponential smoothing*), opisaną przez zależność (2).

$$\Delta x_n^k = x_n^k - \bar{x}_n^k \quad (1)$$

gdzie:  $x_n^k$  - wartość mierzzonego sygnału w chwili  $k$ ,  $\bar{x}_n^k$  - wartość odniesienia w chwili  $k$ ,

$$\bar{x}_n^k = (\alpha \cdot \bar{x}_n^{k-1}) + ((1-\alpha) \cdot x_n^k) \quad (2)$$

gdzie:  $\bar{x}_n^{k-1}$  - wartość odniesienia w chwili  $k-1$  wynikającej z zastosowanego okresu próbkowania  $T_p$ ,  $x_n^k$  - wartość mierzzonego sygnału w chwili  $k$ ,  $\alpha$  - współczynnik korekcyjny filtra  $0 < \alpha < 1$ .

Zastosowanie do analizy zmiennych  $\Delta x_n$  zamiast  $x_n$  pozwala uniknąć koniecznego przystosowania stosunkowo dużych zmian progów alarmowych, wynikających z nieuniknionych zmian dynamiki przepływu, które dotyczą np. zmiany punktu pracy rurociągu. Sposób ich obliczania jest dość prosty, uwzględniając że wartości odniesienia są uzyskiwane wykorzystując opisaną filtrację dolnoprzepustową. Jak dowodzi praktyka [10], takie podejście jest skuteczne w odniesieniu do stanów ustalonych. Potencjalnie może być też zastosowane do określonych (niewielkich) zakresów stanów przejściowych. Zastosowana filtracja umożliwia również częściowe wyeliminowanie efektów zaszumienia i powolnego dryftu sygnałów (dryftu pomiarowego), o czym wspomina [10]. Dla porównania, algorytm odnajdywany w pracy [1], który wykorzystuje residua określone na podstawie sygnałów przepływu mierzonych na wlocie i wylocie rurociągu, wymaga już bardziej skomplikowanych obliczeń, gdyż wartości odniesienia estymowane są wykorzystując matematyczny model



dynamiki przepływu. Zastosowanie takiego podejścia na potrzeby diagnozowania wycieków w stanach ustalonych nie jest konieczne. Warto jeszcze dodać, że residua są również wykorzystywane w metodach diagnozowania wycieków dedykowanych dla sieci rurociągów, w szczególności sieci dystrybucji wody [8]. Sposób ich obliczania jest inny, gdyż są to różnice pomiędzy wartościami mierzonymi, a wartościami referencyjnymi, ale te drugie dotyczą aproksymowanych stanów bez wycieków.

Następnie tworzone są pary zmiennych (3). Poszczególne pary odpowiadają kolejnym wzdłuż rurociągu punktom pomiarowym  $\Delta x_n$  wraz z ich sąsiednim punktem  $\Delta x_{n+1}$ , odliczając w kierunku końca rurociągu.

$$U_{xs=1,\dots,j-1} = \{\Delta x_{n=s}, \Delta x_{n+1=s+1}\} \quad (3)$$

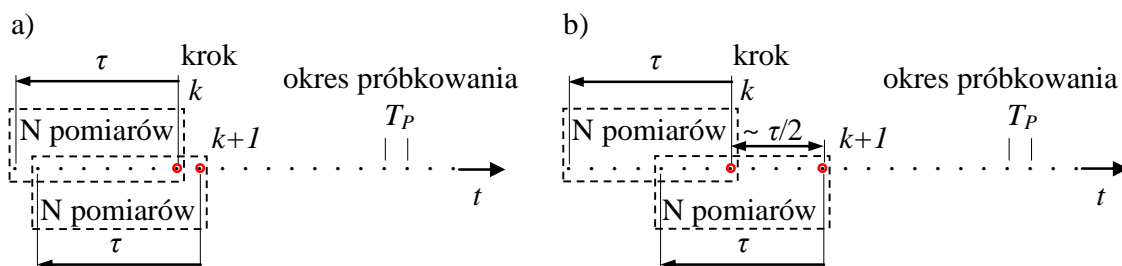
gdzie:  $s$  - liczba par zmiennych,  $j$  - łączna liczba punktów pomiarowych  $z_n$  (analizowanych sygnałów  $x_n$ ).

Dla poszczególnych par zmiennych  $U_{xs}$  wyznaczane są funkcje ich korelacji wzajemnej. Pod uwagę brane są tu funkcje przy zmiennym czasie opóźnienia, tzw. inter-korelogramy (z ang. *cross-correlograms*) (4), dodatkowo estymowane. Funkcje te, które są wektorami o  $2N - 1$  elementach, wyznaczane są dla wektorów danych (okien czasowych), które zawierają  $N$  próbek sygnałów  $\Delta x_n$  i  $\Delta x_{n+1}$ . Ilość próbek  $N$  w oknie czasowym obejmuje przedział czasu  $\langle k - \tau, k \rangle$ . Zakres przesunięcia czasowego  $\tau$  ustalany jest na podstawie znajomości dynamiki zjawiska wycieku (pod uwagę brana jest tu prędkość propagacji fali ciśnienia na danym odcinku rurociągu obejmującym analizowane punkty pomiarowe) oraz odległości pomiędzy punktami pomiarowymi, które odpowiadają analizowanym zmiennym  $\Delta x_n$  i  $\Delta x_{n+1}$ . W przypadku sygnałów przepływu, z uwagi na bardziej powolny charakter ich zmian, należy dobrać większy zakres  $\tau$  niż dla sygnałów ciśnienia.

Mogą tu być zastosowane okna czasowe, które różnią się sposobem ich przesuwania, co zostało przedstawione na rysunku 3. W przypadku obu rodzajów okien, bieżąca ocena w zakresie wykrywania wycieków, tj. odpowiednio w chwilach  $k$  i  $k+1$  dotyczy próbki końcowej w oknie.

$$R_{\Delta x_n \Delta x_{n+1}}(m)_s = \frac{1}{N} \hat{R}_{\Delta x_n \Delta x_{n+1}}(m - N)_s \quad (4)$$

gdzie:  $m = 1, 2, \dots, 2N - 1$ .



Rys. 3. Schematy użytych okien czasowych

Następnie, dla otrzymanych funkcji (4), jeżeli analizowane są sygnały strumienia – wówczas wyliczana jest wartość średnia (5a), a jeżeli analizowane są sygnały ciśnienia – wyliczana jest wartość maksymalna (5b).

$$\hat{R}_{qs}^k = \frac{1}{2N+1} \sum_{m=k-\tau}^{m=k+\tau} R_{\Delta q_n \Delta q_{n+1}}(m)_s \quad (5a)$$

$$\hat{R}_{ps}^k = \max\{R_{\Delta p_n \Delta p_{n+1}}(m)_s\} \quad (5b)$$

W celu eliminacji zakłóceń obliczona wartość  $\hat{R}_{xs}^k$  zostaje poddana filtracji. Zastosowano tu filtrację z filtrem rekursywnym, według zależności (6).

$$\hat{Rf}_{xs}^k = (\beta \cdot \hat{Rf}_{xs}^{k-1}) + ((1-\beta) \cdot \hat{R}_{xs}^k) \quad (6)$$

gdzie:  $\hat{Rf}_{xs}^{k-1}$  - wartość odniesienia w chwili  $k-1$  wynikającej z zastosowanego okresu próbkowania  $T_p$ ,  $\beta$  - współczynnik korekcyjny filtra  $0 < \beta < 1$ .

W stanach bez wycieku wartości poszczególnych funkcji  $\hat{Rf}_{xs}$  są bliskie zeru.

Jeżeli analiza dotyczy tylko dwóch sygnałów przepływu  $q_{n(in)}$  i  $q_{n+1(out)}$  ( $s=1$ ), w następstwie wystąpienia wycieku wartość funkcji  $\hat{Rf}_q$  maleje i staje się ujemna, z powodu  $+\Delta q_{n(in)}$  i  $-\Delta q_{n+1(out)}$ . Alarm jest generowany, gdy funkcja  $\hat{Rf}_q$  przekroczy odpowiadający jej próg alarmowy  $Pal_q$ , zgodnie z warunkiem (7).

$$\hat{Rf}_q < Pal_q \quad (7)$$

Jeżeli analiza dotyczy tylko dwóch sygnałów ciśnienia  $p_{n(in)}$  i  $p_{n+1(out)}$  ( $s=1$ ), w następstwie wystąpienia wycieku wartość funkcji  $\hat{Rf}_p$  rośnie i staje się dodatnia, z powodu  $-\Delta p_{n(in)}$  i  $-\Delta p_{n+1(out)}$ . Alarm jest generowany, gdy funkcja  $\hat{Rf}_p$  przekroczy odpowiadający jej próg alarmowy  $Pal_p$ , zgodnie z warunkiem (8).

$$\hat{Rf}_p > Pal_p \quad (8)$$

Jeżeli natomiast analiza dotyczy większej liczby sygnałów ciśnienia  $p_n$  ( $s>1$ ), w oparciu o zbiór poszczególnych obliczonych wielkości  $\hat{Rf}_{ps}$ , obliczana jest ich średnia wartość (9).

$$\hat{Rf}_{pall} = \frac{1}{j-1} \sum_{s=1}^{s=j-1} \hat{Rf}_{ps} \quad (9)$$

Następnie sprawdzany jest warunek (10), który wskazuje na możliwość wystąpienia wycieku.

$$\hat{R}f_{pall} > Pal_{pall} \quad (10)$$

Poniżej przedstawiono rozwiązanie innego algorytmu, który zakłada nieco inny wariant obliczeń w odniesieniu do zastosowania mierzonych sygnałów przepływu. Zasadniczo ma to na celu polepszenie poziomu wykrywalności wycieków poprzez rozwiązanie pewnych problemów, z którymi można się spotkać, uwypuklonych w rozdziale 8.

Nowością proponowanego rozwiązania algorytmu jest wykorzystanie zamiast pary zmiennych  $U_q$  (3) w postaci residuów  $\Delta q_{in(1)}$  i  $\Delta q_{out(2)}$  (1) nowych zmiennych  $dq$  i  $d\bar{q}$  obliczanych według (11) i (12).

$$dq^k = q_{1(in)}^k - q_{2(out)}^k \quad (11)$$

$$d\bar{q}^k = \bar{q}_{1(in)}^k - \bar{q}_{2(out)}^k \quad (12)$$

gdzie:  $dq^k$  - różnica pomiędzy sygnałami strumieni mierzonych na wlocie i wylocie rurociągu,  $d\bar{q}^k$  - różnica pomiędzy wartościami odniesienia na wlocie i wylocie rurociągu, obliczanymi według (2).

Kolejne kroki obliczeń odpowiadają wcześniejszym zależnościom (4), (5a) i (6), które można zapisać jako (13), (14) oraz (15).

$$R_{dq d\bar{q}}(m) = \frac{1}{N} \hat{R}_{dq d\bar{q}}(m - N) \quad (13)$$

gdzie:  $m = 1, 2, \dots, 2N - 1$ .

$$\hat{R}'_q{}^k = \frac{1}{2N + 1} \sum_{m=k-\tau}^{m=k+\tau} R_{dq d\bar{q}}(m) \quad (14)$$

$$\hat{R}'_q{}^k = (\beta \cdot \hat{R}'_q{}^{k-1}) + ((1 - \beta) \cdot \hat{R}'_q{}^k) \quad (15)$$

Proponowany algorytm zakłada, że za wykrycie wycieku mogą być odpowiedzialne dwie funkcje:  $\hat{R}'_q$  uzyskiwana w oparciu o zależność (15) lub wynik jej filtracji medianowej, tj.  $\hat{R}''_q$ , co odpowiada zależności (16).

$$\hat{R}''_q{}^k = med[\hat{R}'_q{}^{k-i}, \hat{R}'_q{}^{k-i+1}, \dots, \hat{R}'_q{}^k, \dots, \hat{R}'_q{}^{k+i-1}, \hat{R}'_q{}^{k+i}] \quad (16)$$

gdzie:  $N_A = 2i + 1$  - liczba próbek.

W stanach bez wycieku wartości obu funkcji  $\hat{R}'_q$  i  $\hat{R}''_q$  są bliskie zeru. Alarm o wycieku jest generowany, gdy poszczególne funkcje  $\hat{R}'_q$  i  $\hat{R}''_q$  przekroczą odpowiadające im progi alarmowe  $Pal'_q$  i  $Pal''_q$ , według warunków (17) i (18).

$$\hat{R}f'_q > Pal'_q \quad (17)$$

$$\hat{R}f''_q > Pal''_q \quad (18)$$

Wstępnie można zauważyć, że proponowane rozwiązanie algorytmu może nie wymagać zmiany progów alarmowych w przypadku powolnych zmian warunków przepływu w rurociągu. Zmiana progów alarmowych może nie być również konieczna w przypadku zmiany punktu pracy rurociągu. Konieczne jest tu jednak sygnalizowanie takiej zmiany, aby zapobiec generowaniu przez algorytm fałszywych alarmów w warunkach stanu przejściowego. Po osiągnięciu przez rurociąg nowego punktu pracy, tj. warunków nowego stanu ustalonego, funkcje  $\hat{R}f'_q$  i  $\hat{R}f''_q$  powinny być obliczane ponownie. Jeżeli będą one znowu bliskie zeru, będzie to oznaczało brak wycieku. Przeciwnie, odpowiednio większe wartości tych funkcji mogą wskazywać na wystąpienie wycieku.

Implementacja algorytmu w przypadku funkcji  $\hat{R}f'_q$  może dotyczyć dwóch wariantów okien czasowych, które przedstawiono na rysunku 3. Natomiast w przypadku funkcji  $\hat{R}f''_q$ , która wykorzystuje filtr medianowy, lepszym rozwiązaniem będzie wykorzystanie okien czasowych przedstawionych na rysunku 3a.

## 5.2. Metoda II i III

Algorytmy przedstawione w poprzednim podpunkcie, bazujące na analizie korelacyjnej, wymagają określonej częstotliwości skanowania czujników pomiarowych. Akwizycja pomiarów powinna zapewnić uwidocznienie dynamiki sygnałów (tj. zmiany trendu) w odniesieniu do wystąpienia wycieku, co podnosi efektywność metody. Konieczne jest również stosowanie okien czasowych o znacznej szerokości i odpowiednim przesunięciu wzajemnym (okien nakładających się na siebie). Algorytmy detekcyjne przedstawiane poniżej nie podlegają tym ograniczeniom, w szczególności w odniesieniu do częstotliwości próbkowania mierzonych sygnałów.

W pierwszym z dwóch prezentowanych algorytmów zakłada się możliwość pomiaru ciśnienia  $p_n$  w kilku punktach wzdłuż rurociągu, gdzie  $n = 1, \dots, j$  jest oznaczeniem punktu pomiarowego ( $j$  - liczba czujników ciśnienia zainstalowanych na rurociągu). Algorytm w swej idei odwołuje się do metody detekcji PPA (z ang. *pressure point analysis*) [6], jednakże z modyfikacją jej struktury i wprowadzeniem nowego podejścia ukierunkowanego na wszystkie punkty pomiaru ciśnienia.

Zamiast analizować pojedynczy punkt pomiarowy, dane zbierane ze wszystkich czujników ciśnienia brane są jednocześnie pod uwagę. Takie rozwiązanie powinno istotnie uniezależnić zdolność do wykrywania wycieków od usytuowania miejsca wycieku względem czujników pomiarowych.

Drugi algorytm, oparty o metodę *bilansu objętości* (z ang. *volume balance approach*) [13], zakłada, że strumienie objętościowe tłoczonego medium  $q_{1(in)}$ ,  $q_{2(out)}$  mierzone są na wlocie i wylocie rurociągu. Przedstawiane rozwiązania w obu przypadkach charakteryzują się użyciem funkcji wskaźnikowych  $IF$ , które tworzą podstawę do wygenerowania alarmu po rozpoznaniu wycieku.

W podejściu przyjętym w pierwszej funkcji wskaźnikowej  $IF_p$ , poszukującej spadku ciśnienia wywołanego przez wyciek, skupiono się na porównywaniu ciśnień w stałym interwale czasu.

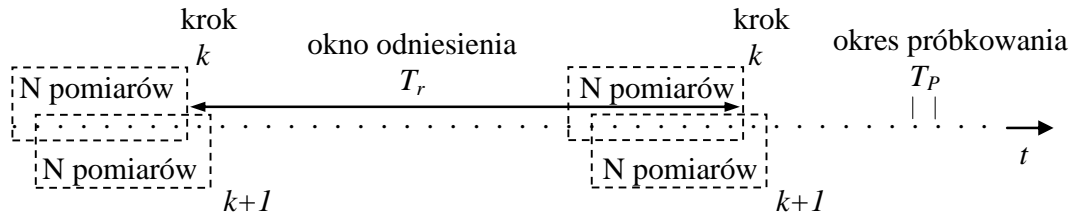
Na wstępie, diagnostyczne zmienne procesowe  $p_n$  przekształcane są w zmienne  $\bar{p}_n$  przez uśrednienie w obrębie okna czasowego o szerokości odpowiadającej  $N$  pomiarom:

$$\bar{p}_n(t_i) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} p_n(t_{i-k}), \quad (19)$$

gdzie:  $t_i$  - czas odczytu kolejnych pomiarów.

W następnym kroku wyznaczane są różnice  $\Delta\bar{x}_n$  pomiędzy wartościami  $\bar{p}_n$  na krańcach okna odniesienia o szerokości  $T_r$  (Rys. 4), które podlega kroczącemu przesuwaniu w czasie wraz z dopływem kolejnych próbek pomiarowych.

$$\Delta\bar{x}_n(t_i) = \bar{p}_n(t_i) - \bar{p}_n(t_i - T_r) \quad (20)$$



Rys. 4. Schemat okien z danymi pomiarowymi zastosowany w funkcji  $IF_p$

Funkcja  $IF_p$  określona jest jako minimum odchyłek  $\Delta\bar{x}_n$  według zależności:

$$IF_p(t_i) = \min\{\Delta\bar{x}_n(t_i); n = 1, \dots, j\}. \quad (21)$$

Druga funkcja wskaźnikowa  $IF_Q$  korzysta z zasady zachowania masy. W tym przypadku, będącym uproszczoną formą bilansu objętości bez kompensacji [13], funkcja wskaźnikowa wyrażona jest przy pomocy następującej zależności:

$$IF_Q(t_i) = \sum_{i=0}^{N-1} q_{2(out)}(t_i) - \sum_{i=0}^{N-1} q_{1(in)}(t_i). \quad (22)$$

W stanach bez wycieku funkcje  $IF$  osiągają wartości bliskie zeru. W wyniku pojawienia się wycieku funkcja wskaźnikowa maleje i przyjmuje tylko wartości ujemne. Głębokość jej spadku zależna jest od wielkości wycieku. Biorąc pod uwagę, że obie funkcje wyznaczane są na podstawie uśrednianych danych procesowych w określonych przedziałach czasowych, należy mieć na uwadze, by horyzont tych przedziałów był wystarczająco duży, aby uzyskać odpowiednią precyzję obliczeń oraz właściwie ograniczyć niekorzystny wpływ szumu i zakłóceń pomiarów. Po przekroczeniu przez wskaźnik wartości progowej  $P$ , generowany jest alarm zgodnie z warunkiem:

$$IF < P. \quad (23)$$

## 6. Stanowisko badawcze i scenariusz badań eksperymentalnych

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

Główny odcinek rurociągu ma długość 380 m. Rurociąg został wykonany z rur z polietylenu (PEHD) o średnicy zewnętrznej 40 mm i średnicy wewnętrznej 34 mm. Składa się z trzech ponad stumetrowej długości odcinków rur. Poszczególne odcinki: 0÷140 m, 140÷280 m, 280÷380, połączone za pomocą specjalnych złączy, zachowując w miejscach połączeń identyczną średnicę przewodu.

Rurociąg wyposażono w standardowe urządzenia pomiarowe: dwa przepływomierze elektromagnetyczne (na wlocie i wylocie), sześć przetworników ciśnienia (na wlocie i wylocie oraz w kilku punktach wzdłuż rurociągu) i dwa czujniki temperatury. Czujniki podłączono do komputera PC wyposażonego w 16-bitową kartę pomiarową A/C. Więcej informacji na temat lokalizacji i charakterystyk metrologicznych urządzeń pomiarowych i układu pomiarowego przedstawiono w tabeli 1.



Rys. 5. Widok modelowego rurociągu

Do symulowania wycieków zastosowano automatycznie sterowane proporcjonalne zawory elektromagnetyczne.

Symulowanie pojedynczych wycieków przeprowadzono podczas działania rurociągu w warunkach stanu ustalonego. Wyniki przeprowadzonych eksperymentów, które przedstawiono w dalszej części pracy, dotyczyły następującego scenariusza:

- nastawy punktu pracy rurociągu, który charakteryzują: ciśnienie na wlocie  $p_{in} \approx 7,50$  bar, ciśnienie na wylocie  $p_{out} \approx 1,35$  bar, nominalny strumień objętości  $q_{nom(in=out)} \approx 140$  l/min, temperatura tłoczonej wody w zakresie od 15 °C do 25 °C;
- nagłych wycieków o wielkościach 0,1% - 10% nominalnego strumienia  $q_{nom(in=out)}$ , symulowanych w wybranych punktach rurociągu, o współrzędnych: 75, 155 i 235 m;
- dwóch eksperymentów przeprowadzanych dla danej lokalizacji i wielkości wycieku.

Mierzone sygnały ciśnienia i strumienia były pozyskiwane z częstotliwością próbkowania  $f_p = 100$  Hz.

Tab. 1. Charakterystyka układu pomiarowego

urządzenia	czujniki ciśnienia	czujniki przepływu
lokalizacja [m]	$p_{1(in)}=1$ $p_2=61$ $p_3=141$ $p_4=201$ $p_5=281$ $p_{6(out)}=341$	$q_{1(in)}=-6,5$ $q_{2(out)}=382,2$
zakres	0÷10 [bar]	0÷200 [l/min]
dokładność	0,1% zakresu	0,2% zakresu
niepewność pomiaru*	±0,012 [bar]	±0,44 [l/min]
* niepewność pomiaru = czujnik + 16-bit karta pomiarowa		

## 7. Aspekty zastosowania porównywanych rozwiązań podczas badań eksperymentalnych

### 7.1. Założenia ogólne

Porównanie i ocena przedstawionych w rozdziale 5 rozwiązań, zostały przeprowadzone w oparciu o ich praktyczne zastosowanie do diagnozowania symulowanych wycieków.

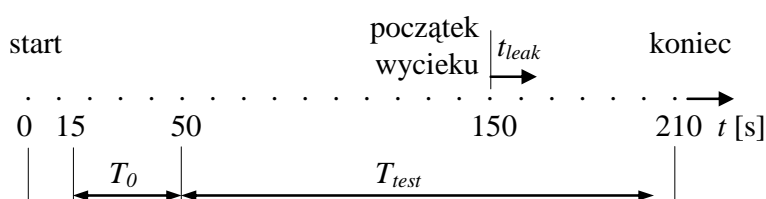
W przypadku poszczególnych rozwiązań określano następujące wskaźniki jakościowe: *poziom wykrywalności wycieku* i *czas wykrycia wycieku*. Istotnym kryterium oceny była możliwość wykrywania wycieku o jak najmniejszej wielkości, w jak najkrótszym czasie, przy zachowaniu odpowiednio dużej odporności na występowanie fałszywych alarmów.

Dla wykonanych eksperymentów, źródłem fałszywych alarmów mogą być fluktuacje i zakłócenia mierzonych sygnałów powodowane przepływem medium w przewodzie rurociągu i pomiarem. Inne dodatkowe zakłócenia nie były symulowane.

Dokonując określenia poziomu wykrywalności wycieków dla porównywanych metod, należy pamiętać, że jest on m.in. zależny od uzyskanego przebiegu funkcji diagnostycznej (odpowiednio:  $\hat{R}f_q$ ,  $\hat{R}f'_q$ ,  $\hat{R}f''_q$ ,  $\hat{R}f_p$ ,  $\hat{R}f_{pall}$ ,  $IF_p$ ,  $IF_Q$ ). Przebiegi tych funkcji powinny się charakteryzować odpowiednio dużą zmianą wartości dla stanu z wyciekem w porównaniu do stanu bez wycieku.

Ponadto jednym z istotnych elementów poprawnego działania poszczególnych rozwiązań jest zagadnienie odpowiedniego doboru progów alarmowych. Wartości progów alarmowych należało dobrać w taki sposób, aby zapewniały one niewystępowanie alarmów dla stanów bez wycieku. Aby spełnić przyjęte kryterium, progi alarmowe z jednej strony powinny być mieć odpowiednio duże marginesy co zapobiegałoby generowaniu przypadkowych alarmów w stanach bez wycieku. Z drugiej strony zbyt duże marginesy mogłyby uniemożliwić wykrycie małych wycieków.

W celu wiarygodnego porównania metod, każdy eksperyment był analizowany według schematu przedstawionego na rysunku 6. Diagnozowanie symulowanych wycieków dotyczyło przedziału czasowego  $T_{test}$ . Przedział  $T_0$  wykorzystano natomiast w celu ustalenia progów alarmowych.



Rys. 6. Schemat czasowy eksperymentów, gdzie:  $T_0$  - przedział do określenia marginesów progów alarmowych,  $T_{test}$  - przedział wykrywania symulowanych wycieków

## 7.2. Metoda I

Badanie metody, obejmujące różne jej konfiguracje oraz nastawy istotnych parametrów, dotyczyły:

- zastosowania wszystkich wymienionych w rozdziale 5.1 konfiguracji sygnałów diagnostycznych (oznaczonych jako „ $q$ ”, „ $p$ ”, „ $pall$ ”);
- obliczania zmiennych  $\Delta x_n$  (odpowiednio:  $\Delta q_n$  - dla sygnałów przepływu,  $\Delta p_n$  - dla sygnałów ciśnienia) co okres odpowiadający okresowi próbkowania  $T_p$ ;
- zastosowania dwóch rodzajów okien czasowych, które przedstawiono na rysunku 3a i 3b. Standardowe okna czasowe (oznaczone jako „A”) były przesuwane co jedną kolejną próbkę sygnału. Niestandardowe okna czasowe (oznaczone jako „B”) przesuwano kolejno o  $N/2$  próbek sygnału, gdzie  $N$  oznacza ilość próbek sygnału w oknie;
- zastosowania dla poszczególnych konfiguracji sygnałów diagnostycznych okien czasowych o różnych długościach:  $N_q = 500$ ,  $N_p = 200$ ,  $N_{pall} = 50$ ;
- obliczania *cross-correlograms* (4) zmiennych  $\Delta x_n$  i  $\Delta x_{n+1}$  w programie Matlab, wykorzystując procedurę „`xcorr( $\Delta x_n, \Delta x_{n+1}, 'biased'$ )`”;
- następujących wartości współczynników korekcyjnych filtrów:  $\alpha = 0,995$ ,  $\beta = 0,900$ .

W przypadku proponowanego rozwiązania algorytmu, dla którego w oparciu o mierzone sygnały przepływu obliczane są funkcje  $\hat{R}f'_q$  i  $\hat{R}f''_q$ , również zastosowano powyżej wymienione wartości nastaw parametrów  $N_q$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ . Dotyczyło to także kroków czasowych przy obliczaniu zmiennych  $dq$  i  $d\bar{q}$  oraz procedury w programie Matlab do obliczania *cross-correlogram* (13). Filtracja medianowa (16) była realizowana z wykorzystaniem  $N_A = 3001$  próbek danych.

Dobór progów alarmowych  $Pal_q$ ,  $Pal'_q$ ,  $Pal''_q$ ,  $Pal_p$ ,  $Pal_{pall}$  opierał się na analizie statystycznej poszczególnych funkcji  $\hat{R}f_q$ ,  $\hat{R}f'_q$ ,  $\hat{R}f''_q$ ,  $\hat{R}f_p$ ,  $\hat{R}f_{pall}$  w stanie bez wycieku, tj. w przedziale  $T_0$  widocznym na rysunku 6. Jednocześnie przyjęto tu warunek, aby dobrane progi zapewniały nie występowanie fałszywych alarmów w przedziale  $T_{test}$ , tj. przed wystąpieniem wycieku.

Wartości poszczególnych progów alarmowych wyznaczano w oparciu o średnią wartość odchylenia standardowego dla wszystkich eksperymentów dotyczących danego punktu symulowania wycieków, według poniższych zależności:

$$\begin{aligned}
 Pal_q &= -b_q \cdot std\{\hat{R}f_q\} \\
 Pal'_q &= b'_q \cdot std\{\hat{R}f'_q\} \\
 Pal''_q &= b''_q \cdot std\{\hat{R}f''_q\} \quad , \\
 Pal_p &= b_p \cdot std\{\hat{R}f_p\} \\
 Pal_{pall} &= b_{pall} \cdot std\{\hat{R}f_{pall}\}
 \end{aligned} \tag{24}$$

gdzie:  $b_q$ ,  $b'_q$ ,  $b''_q$ ,  $b_p$ ,  $b_{pall}$  - współczynniki określone eksperymentalnie.



### 7.3. Metoda II i III

W badaniach przeprowadzono obliczenia dla obu funkcji wskaźnikowych  $IF_p$  i  $IF_Q$ . W przypadku funkcji  $IF_p$  wzięto pod uwagę wszystkie z 6-ciu dostępnych w eksperymencie punktów pomiaru ciśnienia. Uśrednianie ciśnienia  $p_n$  prowadzono na podstawie 100 próbek pomiarowych mieszczących się w jedno-sekundowym oknie  $N=100$ , ponadto przyjęto porównawczy przedział czasu  $T_r$  o odstępnie 10 sekund.

Funkcja  $IF_Q$  uwzględnia jedynie strumień objętości na wlocie i wylocie rurociągu i również opiera się na jedno-sekundowym oknie uśredniania danych pomiarowych  $N=100$ .

Podstawą doboru progów alarmowych była analiza statystyczna przebiegu funkcji wskaźnikowych w przedziale  $T_0$  przed wyciekami (Rys. 6). Horyzont ten określa dwie populacje  $IF_p^0$  i  $IF_Q^0$  obserwowanych wartości, jakie przyjmują poszczególne funkcje w 1-sekundowych odstępach. Na podstawie tak określonych populacji, progi alarmowe przyjęto według zależności:

$$P = E\{IF^0\} - b \cdot std\{IF^0\}. \quad (25)$$

Należy zaznaczyć, że ta sama wartość współczynnika  $b$  przyjęta została dla obu funkcji wskaźnikowych w odniesieniu do każdego z eksperymentów wycieku.

### 8. Wyniki

W tabeli 2 przedstawiono czasy wykrycia symulowanych nagłych wycieków, uzyskane dla porównywanych metod. Czasy wykrycia podano w sekundach. Wyniki reprezentują wartości średnie z dwóch eksperymentów.

Niewykrycie danej wielkości wycieku w przypadku dwóch eksperymentów oznaczone zostało przez „-”. Jeżeli dla jednego z dwóch eksperymentów było możliwe wykrycie wycieku, zostało to oznaczone przez „-/+”.

Ponadto w tabeli 2 przedstawiono wyniki lokalizacji symulowanych wycieków, uzyskane poprzez zastosowanie metody opartej na detekcji fal ciśnienia (NPWM) i metody gradientowej (GM).

Do lokalizacji wycieków za pomocą NPWM zastosowano procedurę przedstawioną w [15]. Pierwsza część procedury obejmuje algorytm detekcyjny rozpatrywany w niniejszej pracy (tj. obliczający funkcje  $\hat{R}f_p$  i  $\hat{R}f_{pall}$ ). Drugą częścią procedury jest inny algorytm, ukierunkowany na wykrywanie przejść czoł fal ciśnienia przez poszczególne punkty pomiarowe  $z_n$ . Po wykryciu wycieku przez pierwszy algorytm i na podstawie ustalonych przez drugi algorytm chwil czasowych  $t_{wav}(z_n)$  następuje lokalizacja wycieku, w oparciu o zależność (26).

$$z_{leak} = \frac{a_k}{a_p + a_k} \cdot l + \frac{t_{wav}(z_{in}) - t_{wav}(z_{out})}{a_p + a_k} \quad (26)$$

gdzie:  $a_p = 1/c_p$ ,  $a_k = 1/c_k$  - współczynniki;  $c_p$ ,  $c_k$  - 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 przypadku GM, po wykryciu wycieku, lokalizacja przeprowadzana jest w oparciu o zależność (27). W tym celu wykorzystywane są dane pomiarowe odpowiadające zidentyfikowanym stanom ustalonego działania rurociągu – z i bez wycieku. Zbiory tych danych były pozyskiwane z czterech czujników ciśnienia, tj.  $p_{1(in)}$  i  $p_2$  znajdujących się przed miejscem oraz  $p_5$  i  $p_{6(out)}$  za miejscem wycieku.

$$z_{leak} = \frac{l \cdot dg_{out}}{dg_{out} - dg_{in}} + \frac{dp_{in} - dp_{out}}{dg_{out} - dg_{in}} \quad (27)$$

gdzie:  $l$  - długość rurociągu;  $dg_{in}$ ,  $dg_{out}$  - średnie przyrosty gradientów ciśnienia na odcinku od początku rurociągu do miejsca wystąpienia wycieku i na odcinku od miejsca wystąpienia wycieku do końca rurociągu;  $dp_{in}$ ,  $dp_{out}$  - średnie przyrosty ciśnienia dla początkowego i końcowego przekroju rurociągu.

Tab. 2. Czasy wykrycia i błędy lokalizacji symulowanych wycieków uzyskane dla porównywanych rozwiązań

zadanie		wykrycie [s]										lokalizacja [m]	
metoda		I								II	III	NPWM	GM
sygnały		$q_{in}, q_{out}$				$p_{in}, p_{out}$		$p_{all}$		$p_{all}$	$q_{in}, q_{out}$	$p_{all}$	
symulowane wycieki		funkcje diagnostyczne (zastosowane okna czasowe)								funkcje diagnostyczne		błędy $ER = \hat{L} - L$	
[m]	[% $q_{nom}$ ]	$\hat{R}f_{qA}$	$\hat{R}f'_{qA}$	$\hat{R}f''_{qA}$	$\hat{R}f_{qB}$	$\hat{R}f_{pA}$	$\hat{R}f_{pB}$	$\hat{R}f_{pallA}$	$\hat{R}f_{pallB}$	$IF_P$	$IF_Q$		
75	0.09	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.29	-	37.34	37.77	-	-	-	-/+	-/+	0.97	-	-	10.0
	0.55	-	7.77	19.35	-	1.96	-/+	0.34	0.49	0.91	4.88	190.7	-12.0
	0.84	4.08	5.90	17.89	6.24	0.98	1.49	0.30	0.49	0.61	2.64	0.3	-2.7
	1.17	2.98	4.82	19.22	4.99	0.90	0.99	0.27	0.49	0.63	2.77	-4.0	-0.5
	1.30	3.05	3.92	18.18	4.99	0.83	0.99	0.25	0.36	0.53	2.28	-5.7	-2.3
	1.94	2.73	3.71	17.05	4.99	0.82	0.99	0.26	0.36	0.39	2.00	-0.6	-4.7
155	0.06	-	-	-	-	-	-	0.34	-/+	-	-	-	-92.7
	0.25	-	14.05	-/+	-	-	-	0.32	1.12	2.30	-	-	-3.9
	0.45	5.59	6.55	20.57	-/+	-/+	-	0.24	0.61	0.70	-/+	-62.6	1.9
	0.78	3.46	4.68	18.94	6.24	0.74	1.99	0.20	0.49	0.68	4.12	25.7	-4.3
	1.19	2.42	4.45	17.54	3.74	0.66	0.99	0.20	0.36	0.52	2.56	0.4	-0.1
	1.43	2.62	4.09	18.69	4.99	0.67	0.99	0.21	0.36	0.56	2.43	-3.7	-2.4
	1.99	2.63	4.13	18.74	4.99	0.64	0.99	0.19	0.36	0.42	2.44	0.4	-0.8
235	0.17	-	-	-/+	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0.37	-	-	17.39	-	-	-	-	-	-	-	-	-14.9
	0.54	-/+	-	21.17	-/+	-	-	-/+	-	1.20	-	45.4	11.1
	0.88	3.67	9.35	19.33	6.24	-	-	0.58	0.86	1.84	4.47	-14.9	-3.4
	1.28	2.36	5.67	17.05	3.74	0.95	1.99	0.38	0.61	0.91	2.06	-0.4	-3.9
	1.41	3.79	6.35	17.98	4.99	0.97	1.99	0.41	0.61	0.91	2.67	-1.6	-4.2
	1.86	1.97	5.13	16.45	2.49	0.94	0.99	0.34	0.49	0.73	2.00	3.3	0.2

Analizując uzyskane wyniki można stwierdzić, że:

- *poziom wykrywalności* symulowanych wycieków jest różny dla porównywanych rozwiązań. Zależnie od metody i miejsca wycieku możliwe było wykrycie wycieków, których wielkości wynosiły na poziomie 0,1–1,3 % nominalnego przepływu  $q_{nom(in=out)}$ . Biorąc pod uwagę rodzaj wykorzystywanych do diagnozowania sygnałów diagnostycznych, najlepsze rezultaty uzyskano w przypadku zastosowania kompletu mierzonych sygnałów ciśnienia (metody I -  $\hat{R}f_{pall}$  i II -  $IF_p$ ). Jeszcze lepszy poziom wykrywalności wycieków uzyskano dla proponowanego rozwiązania algorytmu, który bazuje na dwóch sygnałach przepływu oraz ich przetwarzaniu z użyciem filtracji medianowej (metoda I -  $\hat{R}f''_q$ ). Porównując ten algorytm z innymi, należy mieć na uwadze, że jako jedyny miał on zastosowany filtr medianowy. Taki filtr zauważalnie wydłuża czas wykrycia wycieku. Z drugiej strony, filtracja medianowa umożliwiła eliminowanie wpływu zakłóceń przepływu, które w przypadku innych rozwiązań algorytmów wymusiły zastosowanie odpowiednio szerokich marginesów progów alarmowych. Pomimo, że szerokie marginesy progów alarmowych zapobiegały generowaniu fałszywych alarmów, jednak powodowały one pogorszenie poziomu wykrywalności wycieków.

Całkiem dobre wyniki uzyskano również w przypadku zastosowania dwóch sygnałów przepływu, które analizowano za pomocą proponowanego algorytmu bez filtracji medianowej (metoda -  $\hat{R}f'_q$ ). Następne w kolejności są rozwiązania, które także wykorzystują sygnały przepływu, mierzone na wlocie i wylocie (metody I -  $\hat{R}f_q$  i III -  $IF_Q$ ). Najgorsze wyniki uzyskano w przypadku wykorzystania tylko dwóch sygnałów ciśnienia, mierzonych na wlocie i wylocie (metoda I -  $\hat{R}f_p$ ).

Należy tu jeszcze raz podkreślić, że poziom wykrywalności wycieków był zależny od miejsca wycieku. Jest to w szczególności zauważalne w przypadku użycia sygnałów ciśnienia. Uwzględniając to kryterium, najlepsze wyniki uzyskano dla wycieków, które wystąpiły w środkowej części rurociągu. Wraz z przybliżaniem się do obu końców rurociągu poziom wykrywalności wycieków ulegał pogorszeniu (wielkość wykrywanych wycieków stawała się większa). Uzyskane wyniki odpowiadają rozkładowi wykrywalności wycieków w funkcji ich położenia, który przedstawiono w [7]. W przypadku użycia sygnałów przepływu taka zależność nie jest już tak bardzo zauważalna. Ponadto, w przypadku metody I, dla której badano zastosowanie różnych okien czasowych, nie zauważono znaczących różnic pomiędzy oknami typu „A” i „B”. Zastosowanie okien czasowych typu „B”, przy ich niekorzystnym położeniu względem obszaru czasowego, który obejmuje zmiany mierzonych sygnałów wywołane wystąpieniem wycieku, może jednak skutkować pogorszeniem poziomu wykrywalności;

- *czasy wykrycia* symulowanych wycieków są znacząco różne dla porównywanych metod. Zauważalne różnice dotyczą zastosowania różnego rodzaju sygnałów diagnostycznych. Najlepsze (najkrótsze) czasy uzyskano w przypadku sygnałów ciśnienia (metody I i II), a najgorsze (dłuższe) w przypadku sygnałów przepływu (metody I i III). Jest to uwarunkowane przebiegiem zjawiska wycieku, które charakteryzuje różna dynamika zmian poszczególnych zmiennych procesowych (ciśnienia, strumienia). W przypadku zastosowania większej liczby sygnałów ciśnienia niż tylko dwóch mierzonych na wlocie i wylocie rurociągu, można uzyskać znacząca poprawę czasu wykrycia wycieku. Porównując wyniki odpowiadające zastosowaniu sygnałów przepływu, czasy wykrycia uzyskane dla proponowanego rozwiązania

algorytmu w wariancie bez filtracji medianowej (metoda I -  $\hat{R}f_q$ ) były nieco dłuższe niż dla znanych rozwiązań (metody I -  $\hat{R}f'_q$  i III -  $IF_Q$ ). Najdłuższe czasy wykrycia zaobserwowano natomiast dla proponowanego rozwiązania algorytmu z zastosowaną filtracją medianową (metoda I -  $\hat{R}f''_q$ ). Wynika to ze specyfiki zastosowanego filtra medianowego. Uzyskanie dla bieżącej chwili estymaty filtra oznacza tu konieczność uwzględnienia dodatkowego czasu, który odpowiada połowie przyjętej długości wektora danych  $N_A$ .

W przypadku metody I, dla której badano zastosowanie różnych okien czasowych, różnice w czasach wykrycia wycieku nie wykraczały poza wartości wynikające z przyjętych sposobów przesuwania okien;

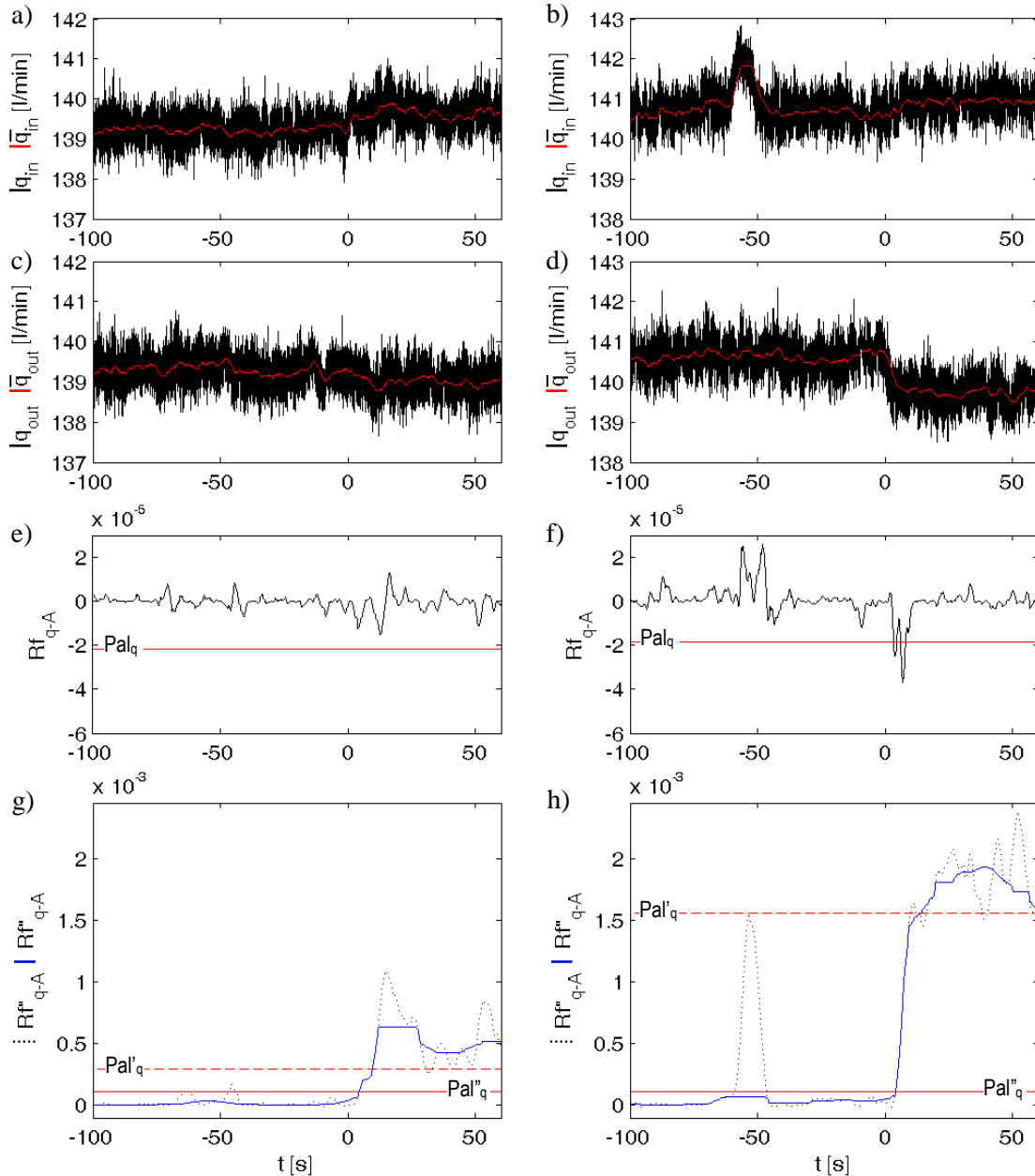
- błędy lokalizacji symulowanych wycieków były większe dla najmniejszej wielkości wycieków i ulegały one zmniejszeniu dla większych wycieków. Porównując obie zastosowane metody, znacząco mniejsze błędy uzyskano dla metody gradientowej. Dokładność lokalizacji wycieków mogłoby tu jeszcze poprawić uwzględnienie innej konfiguracji czujników, tj. położonych bliżej miejsca wycieku. W przypadku metody opartej na detekcji fal ciśnienia błędy lokalizacji wycieków były większe, a dla części wycieków nie była możliwa ich lokalizacja. Jako powód należy tu wskazać na problemy związane z wykryciem i identyfikacją czoła fali ciśnienia. Warto tu zauważyć, że eksperymenty dotyczyły tylko symulowania nagłych wycieków. W przypadku powolnych wycieków wyniki ich lokalizacji mogłyby być zapewne jeszcze gorsze.

Ponadto, na rysunkach 7e-h przedstawiono przykładowe porównanie funkcji  $\hat{R}f_q$  uzyskanych za pomocą znanego rozwiązania algorytmu z funkcjami  $\hat{R}f'_q$  i  $\hat{R}f''_q$  uzyskanymi za pomocą algorytmu proponowanego w niniejszej pracy. Takie porównanie dotyczy dwóch różnych eksperymentów z symulowanymi wyciekami. Dodatkowo, na rysunkach 7a-d przedstawiono mierzone sygnały przepływu  $q_{in}$  i  $q_{out}$  oraz zmienne odniesienia  $\bar{q}_{in}$  i  $\bar{q}_{out}$ , na podstawie których uzyskano poszczególne funkcje  $\hat{R}f_q$ ,  $\hat{R}f'_q$  i  $\hat{R}f''_q$ .

Analizując rysunek 7e można zauważyć, że dotychczasowe rozwiązanie algorytmu nie zapewniło wykrycia wycieku. Taki problem wynika z niekorzystnego kształtu (formy) funkcji  $\hat{R}f_q$ . Wykrycie wycieku było natomiast możliwe za pomocą proponowanego rozwiązania algorytmu (Rys. 7g), co dotyczyło obu funkcji  $\hat{R}f'_q$  i  $\hat{R}f''_q$ , których formy są dużo bardziej zadowalające.

Na rysunku 7b widoczne jest zakłócenie mierzonego strumienia przepływu  $q_{in}$ . Powoduje ono zauważalną zmianę w funkcji  $\hat{R}f_q$ , która jednak nie skutkuje generowaniem fałszywego alarmu oraz nie wymaga zmiany marginesów progów alarmowych (Rys. 7f). Można również zauważyć, że impuls funkcji  $\hat{R}f_q$  sygnalizujący wystąpienie wycieku nie zawsze przyjmuje bardzo korzystną formę, w tym wartość amplitudy. Uwzględniając proponowane rozwiązanie algorytmu, wspomniane zakłócenie przepływu w przypadku funkcji  $\hat{R}f'_q$  mogłoby skutkować generowaniem fałszywego alarmu (Rys. 7h). Aby temu zapobiec konieczne było znaczące zwiększenie marginesu progów alarmowych. Taki problem nie wystąpił w przypadku funkcji  $\hat{R}f''_q$  i został wyeliminowany przez zastosowaną filtrację medianową.

Generalnie można również zauważyć, że funkcje  $\hat{R}f'_q$  i  $\hat{R}f''_q$  generowane przez proponowane rozwiązanie algorytmu, w następstwie wystąpienia wycieku charakteryzują się dużą zmianą amplitudy w stosunku do stanu bez wycieku. To ułatwia istotnie wykrycie wycieku.



Rys. 7. Przebiegi sygnałów strumieni i funkcji diagnostycznych uzyskane dla eksperymentów z symulowanymi nagłymi wyciekami o wielkości 0,55%  $q_{in=out}$  w punkcie o współrzędnej 75 m (lewa strona) i wielkości 0,88%  $q_{in=out}$  w punkcie o współrzędnej 235 m (prawa strona); gdzie: a), b) - sygnały przepływu; c), d) - zmienne odniesienia; e), f) - funkcje generowane przez uprzednio znany algorytm; g), h) - funkcje generowane przez nowo proponowany algorytm; „0” oznacza początek wycieku

Reasumując, w porównaniu do wyników, tj. poziomu wykrywalności wycieków odnajdywanych w [5], uzyskane wyniki reprezentują wysoce zadawalający poziom. Należy jednak pamiętać, że odnoszą się one do modelowej instalacji. W przypadku rzeczywistych

rurociągów, przy zastosowaniu zaproponowanych rozwiązań należy się spodziewać nieco gorszych wyników. Z uwagi na większe długości rzeczywistych rurociągów, *czasy wykrycia* zaistniałych wycieków będą dłuższe.

Należy również podkreślić, że analizowane wyniki odnoszą się do wycieków nagłych. W przypadku diagnozowania wycieków wolniej narastających, *poziom wykrywalności* wycieków byłby gorszy, a *czasy wykrycia* wycieków dłuższe.

Ponadto należy dodać, że przeprowadzone badania ukierunkowano w szczególności na wykrywanie wycieków o jak najmniejszej wielkości, jednocześnie zakładając nie występowanie alarmów dla stanów bez wycieku. Istotnym zagadnieniem był tu uzyskiwany przebieg analizowanych funkcji diagnostycznych oraz sposób doboru progów alarmowych. Zaproponowane rozwiązanie tego problemu jest dość proste i przy tym skuteczne. Można jednak założyć, że zastosowanie jeszcze bardziej zaawansowanego rozwiązania tego zagadnienia może stwarzać możliwości dalszej poprawy *poziomu wykrywalności* wycieków.

## 9. Podsumowanie

W pracy dokonano porównania kilku ulepszonych (zmodyfikowanych) uproszczonych algorytmów wykrywania wycieków. Porównywane metody bazowały na zastosowaniu różnych sygnałów diagnostycznych i ich konfiguracji. W oparciu o uzyskane wyniki diagnozowania symulowanych wycieków z instalacji z modelowym rurociągiem dokonano oceny przydatności poszczególnych rozwiązań.

Uzyskane wyniki potwierdziły, że przy pomocy prostych metod diagnostycznych istnieje możliwość wykrywania wycieków, uzyskując wysoko zadawalającą skuteczność diagnozowania (uwzględnianą jako zdolność wykrycia bardzo małych wycieków w krótkim czasie).

Zaproponowane rozwiązanie algorytmu detekcyjnego, z dwoma funkcjami diagnostycznymi, umożliwi polepszenie poziomu wykrywalności wycieków. Obie funkcje cechują się wyrazistym kształtem i wartościami amplitud sygnalizujących wystąpienie wycieku.

Opisane metody mogą być wykorzystane do budowy systemów diagnozowania wycieków (LDS), jako uzupełnienie bardziej zaawansowanych rozwiązań, bazujących na wykorzystaniu dynamicznych modeli obiektów (rurociągów).

Wskazano również na potrzebę prowadzenia dalszych prac nad prostymi metodami wykrywania wycieków, dzięki czemu można będzie jeszcze bardziej poprawić ich skuteczność.

**Finansowanie:** Praca naukowa finansowana ze środków budżetowych na naukę w latach 2010-2015 jako projekt badawczy Nr N N504 494439.

## Literatura

1. Begovich O, Navarro A, Sanchez E N, Besancon G. Comparison of two detection algorithms for pipeline leaks. Proceedings of 16th IEEE International Conference on Control Applications, 1-3 October 2007. Singapore; 777-782. <http://dx.doi.org/10.1109/CCA.2007.4389327>
2. Billman L, Isermann R. Leak detection methods for pipelines. Automatica 1987; 23: 381-385. [http://dx.doi.org/10.1016/0005-1098\(87\)90011-2](http://dx.doi.org/10.1016/0005-1098(87)90011-2)

3. Brunone B, Ferrante M. Detecting leaks in pressurised pipes by means of transients. *Journal of Hydraulic Research* 2001; 39(5): 539-547. <http://dx.doi.org/10.1080/00221686.2001.9628278>
4. Colombo A F, Lee P, Karney B W. A selective literature review of transient-based leak detection methods. *Journal of Hydroenvironment Research* 2009; 2(4): 212-227. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jher.2009.02.003>
5. da Silva H V, et al. Leak detection in petroleum pipelines using a fuzzy system. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 2005; 49(3): 223-238. <http://dx.doi.org/10.1016/j.petrol.2005.05.004>
6. Farmer E. System for monitoring pipelines. US Patent 4,796,466, 1989.
7. Ge Ch, Wang G, Ye H. Analysis of the smallest detectable leakage flow rate of negative pressure wave-based leak detection systems for liquid pipelines. *Computers and Chemical Engineering* 2008; 32: 1669-1680. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compchemeng.2007.08.011>
8. Gertler J, Romera J, Puig V, Quevedo J. Leak detection and isolation in water distribution networks using principal component analysis and structured residuals. *Proceedings of Conference on Control and Fault Tolerant Systems*, 6-8 October 2010. France Nice; 191-196. <http://dx.doi.org/10.1109/SYSTOL.2010.5676043>
9. Haghghi A, Covas D, Ramos H. Direct backward transient analysis for leak detection in pressurized pipelines: from theory to real application. *Journal of Water Supply: Research and Technology – AQUA* 2012; 63(3): 189-200. <http://dx.doi.org/10.2166/aqua.2012.032>
10. Isermann R. Leak detection of pipelines, in.: *Fault-Diagnosis Applications: Model-Based Condition Monitoring: Actuators, Drives, Machinery, Plants, Sensors and Fault-tolerant Systems*. Berlin: Springer-Verlag, 2011. [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-12767-0\\_7](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-12767-0_7)
11. 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. [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-18615-8\\_21](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-18615-8_21)
12. Li Y, Sun L. Leakage detection and d for long range oil pipeline using negative pressure wave technique. *Proceedings of 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, May 25-27 2009. China Xi'an; 3220-3224. <http://dx.doi.org/10.1109/ICIEA.2009.5138796>
13. Liou C. Pipeline leak detection based on mass balance. *Proceedings of the International Conference on Pipeline Infrastructure II*, ASCE, 1993.
14. 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.  
<http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.147-149.492>

15. Ostapkowicz P. Leakage detection from liquid transmission pipelines using improved pressure wave technique. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2014; 16(1): 9-16.
16. Siebert H, Isermann R. Leckerkennung und Lokalisierung bei Pipelines durch on-line Korrelation mit einem Prozesrechners. *Regelungstechnik* 1977; 25: 69-74.  
<http://dx.doi.org/10.1524/auto.1977.25.112.69>
17. Turkowski M, Bratek A, Slowikowski M. Methods and systems of leak detection in long range pipelines. *Journal of Automation, Mobile Robotics & Intelligent Systems* 2007; 1: 39-46. ISSN 1897-8649
18. Verde C, Molina L, Carrera R. Practical issues of leaks diagnosis in pipelines. *Proceedings of 18th IFAC World Congress, 28 August - 2 September 2011. Italy Milano; 12337-12342.* <http://dx.doi.org/10.3182/20110828-6-IT-1002.01688>
19. Wang X J, Simpson A R, Lambert M F, Vítkovsky J P. Leak detection in pipeline systems using hydraulic methods: a review. *Proceedings of the Conference on Hydraulics in Civil Engineering, The Institution of Engineers, 23-30 November 2001. Australia Hobart; 391-400.*
20. Zhang J. Statistical pipeline leak detection for all operating conditions. *Pipeline & Gas Journal* 2001; 228(2): 42-45.