

DIAGNOZOWANIE WYCIĘKÓW Z RUROCIĄGÓW PRZESYŁOWYCH Z WYKORZYSTANIEM NOWEJ INFORMACJI DIAGNOSTYCZNEJ – SYGNAŁÓW SŁABYCH INTERAKCJI MIĘDZYOBIEKTOWYCH

Paweł OSTAPKOWICZ

Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny, Katedra Automatyki i Robotyki
15-351 Białystok, ul. Wiejska 45C, fax.: (085)7469248, email: ostad@pb.bialystok.pl

Streszczenie

Rurociągi są obiektami, które wykazują ograniczenia lub nawet brak podatności diagnostycznej, ściśle związanej z możliwością pomiaru ilościowo i jakościowo dostępnej informacji diagnostycznej. Ma to zasadniczy wpływ na mało zadowalającą skuteczność obecnie stosowanych metod diagnozowania wycieków opartych na informacji diagnostycznej w postaci pomiarów natężenia przepływu i ciśnienia w rurociągu. Wśród takich metod można wyróżnić techniki oparte na detekcji fal ciśnienia. Ich skuteczność może ulec polepszeniu poprzez zastosowanie opracowanej metody polepszania podatności diagnostycznej rurociągów. Metodę tą umownie nazwano metodą słabych interakcji międzyobiektywnych. Ideą metody stanowi pozyskiwanie nowej informacji diagnostycznej, tj. sygnałów diagnostycznych. W niniejszym artykule poza teoretycznym opisem proponowanej metody przedstawiono wyniki badań przeprowadzonych z jej zastosowaniem na 380-cio metrowej długości laboratoryjnym rurociągu.

Słowa kluczowe: diagnostyka procesów przemysłowych, rurociągi, diagnozowanie wycieków.

DIAGNOSING OF LEAKAGES FROM TRANSMISSION PIPELINES BASED ON NEW DIAGNOSTIC INFORMATION – SIGNALS OF WEAK INTERACTIONS BETWEEN OBJECTS

Summary

Transmission pipelines are the objects showing limitations or even a partial absence of the diagnostic susceptibility, which is closely connected with a possibility of the measurement of quantitatively-available and qualitatively-available diagnostic information. It has an essential influence on a hardly satisfactory efficacy of currently used leak detection methods based on diagnostic information in the form of flow and pressure measurements in pipeline. Among such methods are techniques based on pressure wave detection. The efficacy of such techniques can be improved by the use of an elaborated method of improving the diagnostic susceptibility of pipelines. This new method has been conventionally named the method of weak interactions between objects. Its essence consists in acquiring new diagnostic information i.e. diagnostics signals. Except a theoretical description of the proposed method this paper presents the results of research conducted on a 380-metre-long laboratory pipeline.

Keywords: diagnostics of industrial processes, pipeline, leakages diagnosing.

1. WSTĘP

Diagnozowanie szczelności i wycieków z rurociągów przesyłowych obejmuje następujący zakres zadań:

- wykrycie wycieku (z wygenerowaniem alarmu),
- zlokalizowanie wycieku,
- oszacowanie natężenia wycieku (a dodatkowo ilości medium, które wypłynęło z rurociągu).

Realizacja powyższych zadań odbywa się przy użyciu odpowiednich metod diagnozowania, na podstawie których opracowuje się system diagnostyczny typu LDS (leak detection system).

Metody diagnozowania wycieków ogólnie można podzielić na dwie kategorie rozwiązań:

- metody bezpośrednie (zewnętrzne) – gdzie detekcja i lokalizacja wycieku wiąże się z ujawnieniem tłoczonego produktu na zewnątrz rurociągu, poprzez zastosowanie badań organoleptycznych lub użycie specjalnych urządzeń,
- metody pośrednie (analityczne, wewnętrzne) – gdzie diagnozowanie wycieku wynika z pomiarów i analizy parametrów przepływu (ciśnienia, natężenia/prędkości przepływu).
Ograniczając obszar zainteresowania niniejszej pracy do rurociągów przesyłowych cieczy, w przypadku tego typu obiektów powszechne zastosowanie znalazły głównie metody wewnętrzne. Wśród wielu metod wewnętrznych stosowanych do diagnozowania wycieków z rurociągów

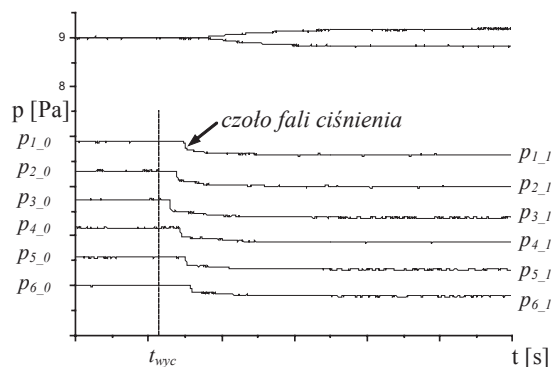
przesyłowych cieczy można wyróżnić metody oparte na detekcji fal ciśnienia. Metody takie dają możliwość bardzo szybkiego wykrycia i zlokalizowania zaistniałych wycieków. Są one szczególnie przydatne do identyfikacji nagłych wycieków¹. Ich skuteczność jest jednak mało zadowalająca. Pozwalają one wykrywać 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) i lokalizować je ze zgrubną dokładnością (rzędu od kilkuset metrów, nawet do kilkunastu kilometrów).

Przyczyn takich problemów należy upatrywać w podatności diagnostycznej rurociągu, która jest ściśle związana z możliwością pomiaru ilościowo i jakościowo dostępnej informacji diagnostycznej. Do sytuacji, gdy systemy diagnostyczne LDS dysponują tylko częścią użytecznych danych pomiarowych może dochodzić dość często [8].

Skutecznym sposobem polepszania podatności diagnostycznej rurociągów przesyłowych jest nowo opracowana metoda, umownie nazwana metodą słabych interakcji międzyobiektowych.

2. METODY OPARTE NA DETEKCJI FAL CIŚNIENIA

Metody te wykorzystują towarzyszące wyciekom zjawisko powstawania i rozchodzenia się fal ciśnienia. Fale te powstają wskutek nagłego spadku ciśnienia w miejscu, w którym wystąpił wyciek i rozchodzą się od tego miejsca w obu kierunkach rurociągu z prędkością dźwięku c . W przypadku nagłych wycieków fale mają wyraźnie widoczne czoła (rys. 1), a dla wycieków narastających powoli, z uwagi na bardziej łagodny przebieg zmian ciśnienia, mają wygładzony kształt. Za czołem fali ciśnienie w rurociągu maleje o tym mniejszą wartość, im większa jest odległość danego punktu od miejsca wycieku.



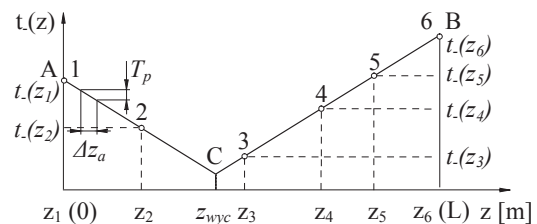
Rys. 1. Przebiegi sygnałów ciśnienia w punktach pomiarowych 1-6 rozmieszczonych wzdłuż rurociągu

¹ Nagły wyciek – jego natężenie osiąga wartość nominalną w krótkim czasie od momentu pojawienia się nieszczelności.

w stanach z wyciekem, który miał miejsce pomiędzy punktami 2 i 3; t_{wyc} – początek wycieku

Przykładem takich rozwiązań jest metoda śledzenia czoł fal ciśnienia [7]. Pozwala ona wykryć i zlokalizować wyciek w oparciu o zaobserwowane zmiany wartości ciśnienia w rurociągu wywołane propagacją fal ciśnienia powstałych wskutek wystąpienia wycieku. Takie zmiany w postaci spadków ciśnienia pojawiają się najpierw w punktach pomiaru najbliższych położonych miejsca wycieku, a następnie z pewnym opóźnieniem w kolejno odległych punktach.

Lokalizację wycieku dokonuje się na podstawie ustalonych chwil $t_-(z_n)$ detekcji przejść czoł fal ciśnienia przez poszczególne punkty pomiarowe z_n . Znacząc kolejność przejść fal ciśnienia przez poszczególne punkty pomiarowe i odległość pomiędzy punktami, miejsce wycieku można wyznaczyć na podstawie wykresu (rys. 2), jako punkt przecięcia prostych A-C i C-B, według zależności (1). Punkt A na wykresie określa czas przejścia czoła fali ciśnienia od miejsca wycieku do początku rurociągu, a punkt B czas przejścia czoła fali ciśnienia do końca rurociągu.



Rys. 2. Rozkład czasu przejścia czoł fal ciśnienia wzdłuż rurociągu po wycieku w punkcie $z = z_{wyc}$

$$z_{wyc} = \frac{a_k}{a_p + a_k} \cdot l + \frac{t_l(0) - t_l(L)}{a_p + a_k} \quad (1)$$

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 dźwięku na odcinkach: $0 < z < z_{wyc}$, $z_{wyc} < z < L$; L – długość rurociągu; $t_l(0)$, $t_l(L)$ – ustalone chwile dotarcia czoł fal ciśnienia do punktów: $z = 0$, $z = L$.

Metoda ta jest stosunkowo szybka, przy rozmieszczonych co kilka – kilkanaście kilometrów, bezinercyjnych przetwornikach ciśnienia (bez wygórowanych wymagań co do ich dokładności). Wymaga jednak precyzyjnej synchronizacji pomiaru czasu w trakcie dokonywania pomiarów ciśnienia w poszczególnych punktach rurociągu. Szczególną uwagę należy też zwrócić na okres próbkowania sygnałów T_p , który decyduje o błędzie $\Delta z_a = (1 \div 3) c \cdot T_p$, z jakim śledzone jest położenie czoła fali ciśnienia. Okres ten powinien wynosić setne, a nawet tysięczne części sekundy. Należy też pamiętać, że jeżeli wyciek nie zostanie od razu zauważony (np. wskutek chwilowego zawieszenia

lub wyłączenia systemu LDS), nigdy już nie zostanie wykryty tą metodą.

3. METODA SŁABYCH INTERAKCJI MIĘDZYOBIEKTOWYCH

W dotychczasowym podejściu, rozpatrując funkcjonowanie rurociągu zgodnie z zasadami automatyki jako obiektu regulacji – taki opis jest dokonywany z wykorzystaniem transmitancji obiektu i może tu być użyta następująca zależność:

$$Y = G Z \quad (2)$$

gdzie: G – transmitancja obiektu; Z – transformata zakłócenia (wynikającego z oddziaływania otoczenia na obiekt, takim zakłóceniem jest wyciek); Y – transformata sygnału wyjściowego obiektu (takim sygnałem jest mierzony sygnał ciśnienia).

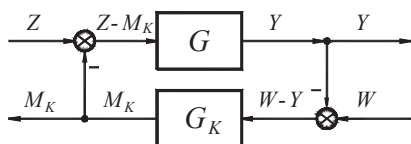
Analizując wzór (2) nietrudno dojść do wniosku, że praktycznie rzecz biorąc zmiany dostępnego sygnału Y mogą wynikać ze zmian stanu technicznego obiektu opisanego parametrami transmitancji G i/ lub ze zmian oddziaływania otoczenia na obiekt, reprezentowanego tu przez sygnał Z . Taka właśnie sytuacja jest charakterystyczna dla niepodatnych diagnostycznie obiektów technicznych (w tym rurociągów) – diagnosta dysponuje jednym równaniem z dwiema niewiadomymi, zatem problem diagnozowania takiego obiektu staje się niemożliwy do jednoznacznego rozwiązania.

3.1. Idea metody

Proponowane podejście polega na polepszaniu podatności diagnostycznej rurociągów poprzez zastosowanie układów korekcyjnych (opisanych i stosowanych w automatyce) do pozyskiwania nowej informacji diagnostycznej (sygnałów diagnostycznych) [3, 4, 5, 6].

Informacją tą, w odróżnieniu od dotychczas stosowanych sygnałów ciśnienia, są mierzalne sygnały oddziaływań, wynikające z pracy specjalnych obiektów badawczych (korektorów) dołączonych do diagnozowanego rurociągu.

Sprowadzając rurociąg do UAR i wprowadzając element korekcyjny – korektor (o transmitancji G_K), otrzymuje się układ zgodny z rys. 3.



Rys. 3. Układ z badanym obiektem (rurociągiem) o transmitancji G i dołączonym korektorem o transmitancji G_K . M_K – transformata sygnału wyjściowego z korektora

Dla układu można otrzymać następujące relacje pomiędzy sygnałami:

$$\begin{aligned} Y &= (Z - M_K)G \\ M_K &= (W - Y)G_K \end{aligned} \quad (3)$$

a po przekształceniach zależność:

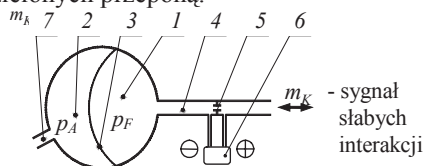
$$Z = \frac{WM_K}{W - Y}, \quad (4)$$

opisującą zakłócenie Z działające na obiekt (którym jest wyciek) w funkcji dostępnych sygnałów: Y , W , M_K . Zgodnie z powyższą zależnością i po uwzględnieniu, że sygnałem zadanym do korektora W jest wartość sygnału wyjściowego Y w chwili poprzedniej, zakłócenie (wyciek) może być identyfikowane bez znajomości transmitancji obiektu G , która wskutek powstałego uszkodzenia uległa zmianie i może być nieznana.

3.2. Praktyczna realizacja metody

Praktyczna realizacja proponowanej metody polega na dołączeniu do diagnozowanego rurociągu minimum dwóch korektorów o odpowiednio dobranych transmitancjach G_{K1} i G_{K2} : na początku i końcu rurociągu.

Schemat konstrukcji korektorów przedstawiono na rysunku 4. Zasadniczym elementem korektorów jest zasobnik ciśnieniowy (akumulator hydrauliczny), składający się z dwóch komór, rozdzielonych przeponą.



Rys. 4. Schemat konstrukcji korektora:

- 1 – komora z cieczą; 2 – komora z powietrzem;
- 3 – przepona; 4 – kanał pomiarowy; 5 – kryza pomiarowa; 6 – czujnik różnicy ciśnienia; 7 – zawór

Zastosowane na obiekcie rurociągowym korektory – jako urządzenia pomiarowe – mają służyć do obserwacji zmian ciśnienia w rurociągu, w szczególności fal ciśnienia, wywołanych przez pojawienie się wycieku. Dotyczy to fal o wyraźnie widocznych czołach, generowanych przez nagłe wycieki. Przy wystąpieniu takich zmian ciśnienia, dochodzi do „zadziałania” korektora (zmiany położenia przepony) i w jego kanale pomiarowym pojawia się fluktuacja przepływu m_K – określana jako *sygnał słabych interakcji międzyobiektywnych*. Wielkość tej fluktuacji jest miarą wzajemnych oddziaływań pomiędzy rurociągiem a korektorem, a jej pomiar dokonuje się na kryzie z użyciem czujnika różnicy ciśnienia.

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

W celu poprawy skuteczności metody w zakresie poziomu wykrywalności wycieków, skrócenia czasu ich wykrycia i poprawy błędów lokalizacji, zakłada się rozmieszczenie kilku dodatkowych korektorów wzdłuż rurociągu, np. w obrębie stacji zasuw.

4. WERYFIKACJA METODY SŁABYCH INTERAKCJI Z WYKORZYSTANIEM MODELU FIZYCZNEGO RUROCIĄGU

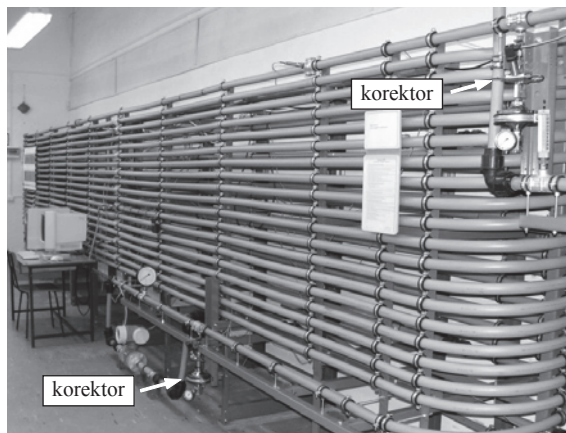
4.1. Stanowisko badawcze

Proponowana metoda została poddana weryfikacji eksperymentalnej na stanowisku badawczym z modelem fizycznym rurociągu o długości $l = 380$ m, wykonanym z rur z polietylenu PE80 DN40 o średnicy wewnętrznej $d = 34$ mm (rys. 5). Rurociągiem tłoczono wodę.

Rurociąg modelowy wyposażono w odpowiednie standardowe przyrządy i przetworniki pomiarowe, umożliwiające pomiar ciśnienia, natężenia przepływu i temperatury.

Korektory badawcze M_{K1} i M_{K2} do wywoływania sygnałów słabych interakcji zamontowano na początku i końcu rurociągu, w pobliżu punktów pomiaru ciśnienia P_1 i P_6 (rys. 5).

Informacje na temat zastosowanych przetworników ciśnienia i przetworników różnicy ciśnień zamontowanych w korektorach oraz lokalizacji tych urządzeń zestawiono w tabeli 1.



Rys. 5. Widok rurociągu modelowego i zamontowanych korektorów

Tab. 1. Lokalizacja i charakterystyki urządzeń

Urządzenie	Przetworniki ciśnienia	Korektory przetworniki różnicy ciśnień
lokalizacja [m] z_n	$P_1=1; P_2=75;$ $P_3=141; P_4=281;$ $P_5=355; P_6=378$	$M_{K1}=-3;$ $M_{K2}=379,2$
charakterystyki pomiarowe	zakres: $0 \div 10$ [bar] dokładność: $0,1\%$ zakresu	zakres: $-0,5 \div 0,5$ [Δ bar] dokładność: $0,2\%$ zakresu
błąd*	$\pm 0,026$ [bar]	$\pm 0,0036$ [Δ bar]
błąd* = przetwornik + 12-bit A/C karta pomiarowa		

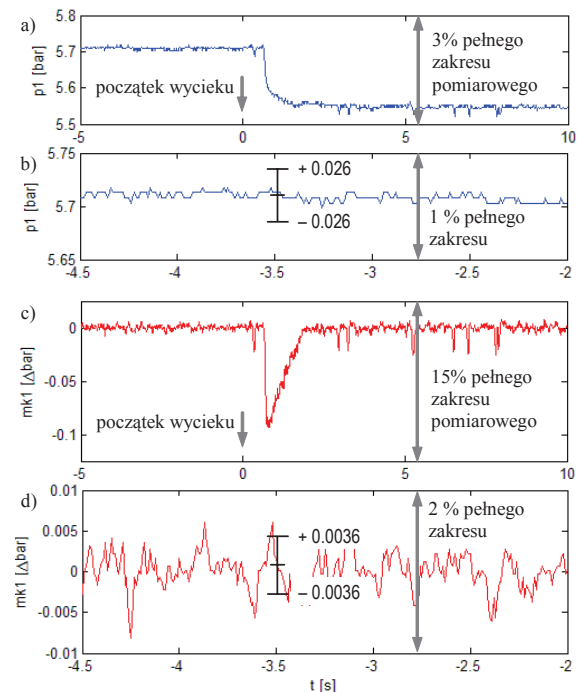
Do symulowania wycieków użyto ręcznie sterowanych zaworów kulowych wyposażonych w specjalne gniazda z wymiennymi krzami o różnych średnicach otworów. Zawory zainstalowano w kilkunastu wybranych punktach rurociągu.

Prowadzone na stanowisku eksperymenty obejmowały różne nastawy punktu pracy rurociągu oraz miejsca, wielkości i tempo symulowanych wycieków.

4.2. Charakterystyka nowo pozyskanych sygnałów. Ocena wpływu korektorów na działanie rurociągu

W trakcie badań ustalono, że w reakcji na wyciek sygnały słabych interakcji (jako różniczkowane postacie sygnałów ciśnienia) przyjmują kształt charakterystycznych impulsów (rys. 6c). Parametry takich impulsów są zależne od wielkości, położenia i tempa narastania wycieku. Osiągają one najbardziej pożądane wielkości (tj. najwyższe amplitudy i najkrótsze szerokości) dla nagłych wycieków z wyraźnie widocznymi czołami fal ciśnienia. Dla wycieków narastających wolniej parametry impulsów pogarszają się.

Na podstawie analizy przebiegów sygnałów i relacji do ich pól błędów stwierdzono, że w przypadku sygnałów słabych interakcji wykraczają one poza pola błędów (rys. 6d), czego nie można powiedzieć o sygnałach ciśnienia (rys. 6b). Pomiar sygnałów słabych interakcji jest zatem bardziej dokładny (wiarygodny) od pomiaru sygnałów ciśnienia.



Rys. 6. Porównanie przebiegu sygnału słabych interakcji m_{K1} (z pierwszego korektora) z przebiegiem sygnału ciśnienia p_1 , z zaznaczonymi polami błędów pomiaru; dla przypadku 6 % nagłego wycieku symulowanego na 195 m rurociągu

Ustalono również, że dołączenie do rurociągu korektorów nie wpływa na jakość jego funkcjonowania i jest łatwe do zrealizowania. Korektory w obszarach ich zamontowania obniżają poziom pulsacji ciśnienia w rurociągu o około 10%.

5. ZASTOSOWANIE NOWEJ INFORMACJI DIAGNOSTYCZNEJ – SYGNAŁÓW SŁABYCH INTERAKCJI DO DIAGNOZOWANIA WYCIĘKÓW

Nowo pozyskane sygnały diagnostyczne – sygnały słabych interakcji poddano ocenie w zakresie możliwości ich zastosowania do diagnozowania wycieków metodą śledzenia czoł fal ciśnienia, mając na uwadze polepszenie skuteczności tej metody.

5.1. Opracowane procedury diagnostyczne

Zasadniczym elementem takiej oceny było opracowanie algorytmów przetwarzania sygnałów słabych interakcji i sygnałów ciśnienia, które pozwalałyby wykryć zaistniały wyciek, uzyskać informacje o propagacji fal ciśnienia, a następnie zlokalizować wyciek.

Badania przeprowadzono w oparciu o następujące założenia:

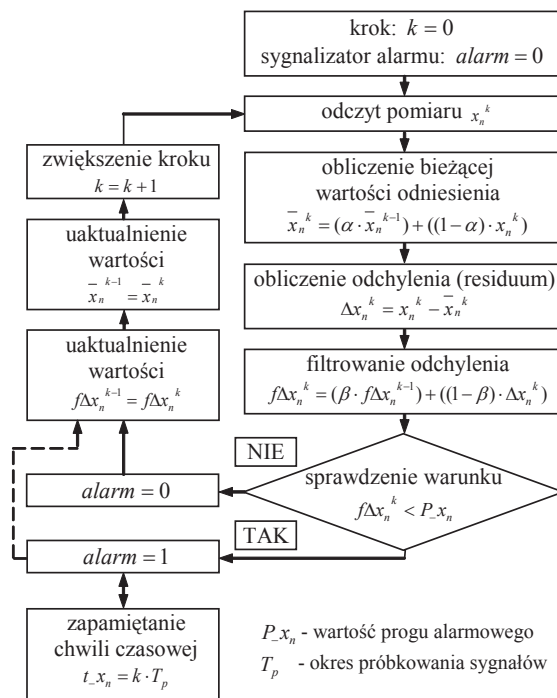
- pozyskiwanie sygnałów z okresem próbkowania $T_p = 0,01$ s,
- użycie pakietu sześciu sygnałów ciśnienia: $p_1 - p_2 - p_3 - p_4 - p_5 - p_6$ z przetworników rozmieszczonych wzdłuż rurociągu (pakiet A), a następnie dla porównania zastąpienie skrajnych sygnałów ciśnienia sygnałami słabych interakcji z korektorów, uzyskując w ten sposób kolejny pakiet sygnałów: $m_{K1} - p_2 - p_3 - p_4 - p_5 - m_{K2}$ (pakiet B),
- porównanie wyników uzyskanych przy użyciu pierwszego pakietu sygnałów z wynikami uzyskanymi przy użyciu drugiego pakietu sygnałów,
- uwzględnienie występowania zakłóceń – zaszumienie porównywanych sygnałów szumem gaussowskim o zerowej wartości średniej i odchyleniu standardowym równym 0,2 % i 0,5 % wielkości ich zakresów pomiarowych i wynikająca stąd konieczność zmiany przyjętych progów alarmowych,
- ustalenie wartości progów alarmowych dla sygnałów słabych interakcji i sygnałów ciśnienia, niezaszumianych i zaszumianych, w sposób zapewniający niewystępowanie alarmu dla stanów bez wycieku (w całej rozpatrywanej serii eksperymentów).

Do wykrywania i lokalizowania wycieków przy użyciu sygnałów słabych interakcji i sygnałów ciśnienia zastosowano identyczne procedury. Ich podstawę stanowi algorytm (rys. 7), opracowany w oparciu o rozwiązania opisane w pracach [1, 2, 7]. Służą on do wykrywania fal ciśnienia

z jednoczesnym określeniem momentów przejścia ich czoł przez poszczególne punkty pomiaru sygnałów słabych interakcji i sygnałów ciśnienia.

Działanie algorytmu oparte jest o:

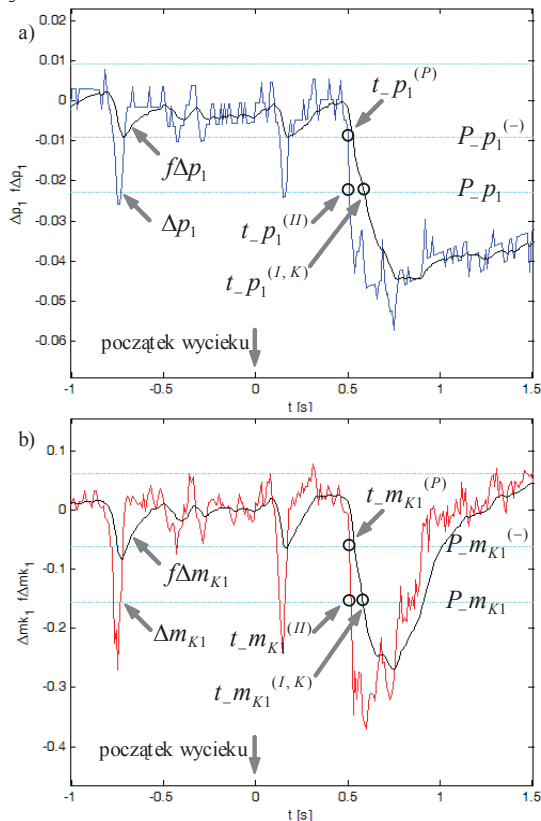
- filtrowanie rekursywne poszczególnych sygnałów x_n : $p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6, m_{K1}, m_{K2}$; gdzie przyjęto identyczne nastawy współczynników korekcyjnych dla filtrów $\alpha = 0,995$,
- obliczanie odchyłeń (residuów) Δx_n ,
- filtrowanie rekursywne obliczonych residuów z funkcjami wynikowymi $f\Delta x_n$, które po przekroczeniu wartości odpowiadającego im progu alarmowego P_{x_n} informują o pojawieniu się czoła fali ciśnienia, z jednoczesnym zapisem chwili czasowej t_{x_n} dla takiego przekroczenia; gdzie przyjęto identyczne nastawy współczynników korekcyjnych dla filtrów $\beta = 0,900$.



Rys. 7. Algorytm wykrywania czoł fal ciśnienia

Na rysunkach 8a i 8b przedstawiono przykładowe przebiegi funkcji $f\Delta x_n$ ($f\Delta p_1$ – dla sygnału ciśnienia p_1 i $f\Delta m_{K1}$ – dla sygnału słabych interakcji m_{K1}), z zaznaczonymi wartościami progów alarmowych P_{x_n} (P_{p_1} i $P_{m_{K1}}$), a dodatkowo również funkcji Δx_n (Δp_1 i Δm_{K1}). Analizując przebiegi funkcji $f\Delta x_n$ i Δx_n można zauważyć, że zastosowane filtrowanie rekursywne residuów Δx_n pozwala wyeliminować zakłócenia, dzięki czemu można zawęzić margines pola alarmowego. Wprowadza to jednak opóźnienie w wykryciu czoła fali ciśnienia, która zostaje

wykryta w chwilach $t_{x_n}^{(I)}$ ($t_{-p_1}^{(I)}$ i $t_{-m_{K1}}^{(I)}$), co może następnie skutkować błędami w lokalizacji wycieku.



Rys. 8. Przebiegi funkcji $f\Delta x_n$ i Δx_n oraz sposób określania chwil $t_{x_n}^{(I)}$ i $t_{x_n}^{(II)}$: a) dla sygnału ciśnienia p_1 , b) dla sygnału słabych interakcji m_{K1} ; 2 % nagły wyciek symulowany na 115 m rurociągu

Zaproponowano zatem modyfikację powyższych procedur. Polega ona na zastąpieniu ujawnionych chwil czasowych $t_{x_n}^{(I)}$ przez nowe chwile $t_{x_n}^{(II)}$.

Chwile $t_{x_n}^{(II)}$ dla poszczególnych sygnałów wyznaczone są w oparciu o specjalnie wydzielany przedział czasowy $T_{x_n} = \langle t_{x_n}^{(P)}, t_{x_n}^{(K)} \rangle$, jako pierwsze zaobserwowane w przedziale przekroczenie przez funkcję residuum Δx_n progu alarmowego P_{x_n} (rys. 8). Początek przedziału ustalany jest jako najbliższy wstecz względem wyznaczonej chwili $t_{x_n}^{(I)}$ moment $t_{x_n}^{(P)}$ jednoczesnego przekroczenia przez obie funkcje $f\Delta x_n$ i Δx_n poza wprowadzony dodatkowy próg $P_{x_n}^{(-)}$ – definiowany według zależności (5). Końcem przedziału jest chwila $t_{x_n}^{(K)} = t_{x_n}^{(I)}$.

$$P_{x_n}^{(-)} = b \cdot P_{x_n}, \quad (5)$$

gdzie: b – jest współczynnikiem.

Po wykryciu wycieku, na podstawie ustalonych chwil czasowych $t_{x_n}^{(I)}$ lub $t_{x_n}^{(II)}$ przejścia czoł

fal ciśnienia przez poszczególne punkty pomiarowe, następuje jego lokalizacja w oparciu o zależność (1).

5.2. Zastosowanie opracowanych procedur do diagnostowania symulowanych wycieków

Opisane procedury zostały zastosowane do diagnostowania symulowanych wycieków. Wyniki ich użycia prezentowane poniżej dotyczą serii badań przeprowadzonych przy następujących warunkach:

- funkcjonowaniu rurociągu modelowego w warunkach stanu ustalonego przed wyciekami z: ciśnieniem na wlocie $p_1 \approx 5,7$ bara, ciśnieniem na wylocie $p_6 \approx 2,2$ bara, nominalnym natężeniem przepływu $q_0 \approx 95$ l/min, średnią temperaturą tłoczonego medium $T_{wody} \approx 20$ °C,
- symulowaniu nagłych wycieków (poprzez bardzo szybkie pełne otwarcie zaworów kraników upustowych) o wielkościach 1÷8 % nominalnego natężenia przepływu q_0 w punktach o współrzędnych: 155, 195, 235 m. Istotnym elementem poprawnego działania opracowanych algorytmów wyznaczania chwil czasowych $t_{x_n}^{(I)}$ i $t_{x_n}^{(II)}$ był odpowiedni dobór wartości progów alarmowych P_{x_n} .

Dla rozpatrywanych poszczególnych sygnałów ciśnienia i sygnałów słabych interakcji, niezaszumianych i zaszumianych, doboru wartości progów alarmowych dokonano pod kątem jak najmniejszych opóźnień w wykrywaniu czoł fal ciśnienia, w oparciu o uzyskane minimalne wartości funkcji $f\Delta x_n$ w stanach bez wycieku. W przypadku sygnałów zaszumianych, w celu wyeliminowania fałszywych alarmów, dodatkowo uwzględniono ich kilkukrotne zaszumienie. Informacje na temat przyjętych wartości progów alarmowych przedstawiono w tabeli 2.

Tab. 2. Wartości przyjętych progów alarmowych

Sygnały	Zaszumienie			
	bez (A)	0,2% ($A_{0,2}$)	0,5% ($A_{0,5}$)	
ciśnienia	p_1	-0,0230	-0,0280	-0,0570
	p_2	-0,0185	-0,0255	-0,0555
	p_3	-0,0170	-0,0250	-0,0540
	p_4	-0,0180	-0,0260	-0,0550
	p_5	-0,0160	-0,0240	-0,0530
	p_6	-0,0165	-0,0245	-0,0535
słabych interakcji	m_{K1}	-0,155	-0,160	-0,170
	m_{K2}	-0,125	-0,130	-0,140

W tabeli 3 przedstawiono wyniki lokalizacji symulowanych wycieków oraz ich błędy. Wyniki dotyczą użycia standardowego pakietu sygnałów ciśnienia (pakiet A) i pakietu obejmującego sygnały słabych interakcji (pakiet B), niezaszumianych (A) i zaszumianych ($A_{0,2}$, $A_{0,5}$), z uwzględnieniem lokalizacji wycieku w oparciu o ustalone chwile czasowe $t_{x_n}^{(I)}$ (metoda I) oraz chwile czasowe $t_{x_n}^{(II)}$ (metoda II).

Tab. 3. Porównanie wyników lokalizacji symulowanych wycieków, gdzie obliczone miejsca wycieków są wartościami średnimi z trzech eksperymentów; „-” oznacza nie wykrycie i nie zlokalizowanie danej wielkości wycieku

Wycieki		Szum	Zastosowane pakiety sygnałów							
			Pakiet A: $p_1 - p_2 - p_3 - p_4 - p_5 - p_6$				Pakiet B: $m_{k1} - p_2 - p_3 - p_4 - p_5 - m_{k2}$			
[m]	[% q_0]		Metoda I		Metoda II		Metoda I		Metoda II	
		miejsce [m]	błąd [m]	miejsce [m]	błąd [m]	miejsce [m]	błąd [m]	miejsce [m]	błąd [m]	
155	1,0 %	A	-	-	-	-	-	-	-	-
		A _{0,2}	-	-	-	-	-	-	-	-
		A _{0,5}	-	-	-	-	-	-	-	-
	1,5 %	A	164,2	+9,2	172,9	+17,9	-	-	-	-
		A _{0,2}	172,2	+17,2	132,6	-22,4	-	-	-	-
		A _{0,5}	-	-	-	-	-	-	-	-
	2,0 %	A	158,6	+3,6	155,4	+0,4	161	+6	156,7	+1,7
		A _{0,2}	160,1	+5,1	164,3	+9,3	152,2	-2,8	163,2	+8,2
		A _{0,5}	-	-	-	-	147,3	-7,7	135,9	-19,1
	2,5 %	A	159	+4	158	+3	158,2	+3,2	159,3	+4,3
		A _{0,2}	158,9	+3,9	157,5	+2,5	150,8	-4,2	159,8	+4,8
		A _{0,5}	-	-	-	-	117,3	-37,7	132,9	-22,1
	3,0 %	A	153,7	-1,3	153,7	-1,3	151,2	-3,8	153	-2
		A _{0,2}	150	-5	157	+2	141,4	-13,6	154,2	-0,8
		A _{0,5}	199,8	+44,8	179,7	+24,7	151,6	-3,4	137,4	-17,6
	4,0 %	A	152,3	-2,8	151,4	-3,6	152,6	-2,4	152,9	-2,1
		A _{0,2}	157,3	+2,3	156,3	+1,3	153,2	-1,8	153,8	-1,2
		A _{0,5}	165	+10	133,5	-21,5	134,9	-20,1	136,8	-18,2
195	1,0 %	A	-	-	-	-	-	-	-	-
		A _{0,2}	-	-	-	-	-	-	-	-
		A _{0,5}	-	-	-	-	-	-	-	-
	1,5 %	A	187,9	-7,1	195,2	+0,2	-	-	-	-
		A _{0,2}	180,6	-14,4	198,5	+3,5	-	-	-	-
		A _{0,5}	-	-	-	-	-	-	-	-
	2,0 %	A	185,6	-9,4	190,5	-4,5	186,9	-8,1	192,6	-2,4
		A _{0,2}	186,6	-8,4	190,2	-4,8	175,9	-19,1	186,3	-8,8
		A _{0,5}	-	-	-	-	178	-17	192,8	-2,2
	2,5 %	A	185,7	-9,3	190,5	-4,5	184,7	-10,3	190,4	-4,6
		A _{0,2}	185,7	-9,3	190,1	-4,9	178,5	-16,5	190	-5
		A _{0,5}	208,4	+13,4	210,8	+15,8	204,2	+9,2	187,7	-7,3
	3,0 %	A	192	-3	191,1	-3,9	191,4	-3,6	191,9	-3,1
		A _{0,2}	194,7	-0,3	189,4	-5,6	191,4	-3,6	189,4	-5,6
		A _{0,5}	187,7	-7,3	181,4	-13,6	173,1	-21,9	184,6	-10,4
	4,0 %	A	193,2	-1,8	195,5	+0,5	192,6	-2,4	196,1	+1,1
		A _{0,2}	190,6	-4,4	196,7	+1,7	188,6	-6,4	194,4	-0,6
		A _{0,5}	187,9	-7,1	182,9	-12,1	189,5	-5,5	189,9	-5,1
235	1,0 %	A	-	-	-	-	-	-	-	-
		A _{0,2}	-	-	-	-	-	-	-	-
		A _{0,5}	-	-	-	-	-	-	-	-
	1,5 %	A	213,3	-21,7	225,5	-9,5	-	-	-	-
		A _{0,2}	217,6	-17,4	224,5	-10,5	-	-	-	-
		A _{0,5}	-	-	-	-	-	-	-	-
	2,0 %	A	222,1	-12,9	228,2	-6,8	222,2	-12,8	228,8	-6,2
		A _{0,2}	219,4	-15,6	224	-11	215,8	-19,2	228,1	-6,9
		A _{0,5}	-	-	-	-	-	-	-	-
	2,5 %	A	228,2	-6,8	230,7	-4,3	228,2	-6,8	232,7	-2,3
		A _{0,2}	227,3	-7,7	235,4	+0,4	227,2	-7,8	235,3	+0,3
		A _{0,5}	221	-14	224,1	-10,9	240,3	+5,3	223,6	-11,4
	3,0 %	A	226,9	-8,1	228,3	-6,7	228	-7	227,7	-7,3
		A _{0,2}	229,5	-5,5	227,7	-7,3	231,4	-3,6	227,9	-7,1
		A _{0,5}	248,8	+13,8	230,6	-4,4	259,3	+24,3	226	-9
	4,0 %	A	227,8	-7,2	226,5	-8,5	227,3	-7,7	225,4	-9,6
		A _{0,2}	232,4	-2,6	231	-4	230,5	-4,5	229,5	-5,5
		A _{0,5}	220,3	-14,7	231,9	-3,1	231,8	-3,2	237,1	+2,1

Dokonując lokalizacji wycieków, występujące we wzorze (1) współczynniki a_p i a_k nachylenia prostych wyznaczano w oparciu o dwa podzbiory danych $\{z_n, t_{x_n}\}$: początkowy – dla pierwszej trójki czujników z danego pakietu i końcowy – dla drugiej trójki czujników z danego pakietu, wykorzystując metodę aproksymacji średniokwadratowej, zwanej także metodą najmniejszych kwadratów.

Do określenia wartości progów $P_{x_n}^{(-)}$ przyjęto identyczne wartości współczynników $b = 0,4$.

Na podstawie analizy uzyskanych wyników można stwierdzić, że przy użyciu pakietu standardowych niezaszumianych sygnałów ciśnienia możliwe było wykrycie i zlokalizowanie nagłych wycieków o wielkościach 1,5 %, gdzie dla porównania przy użyciu pakietu obejmującego niezaszumiane sygnały słabych interakcji poziom wykrywalności wycieków wynosił 2 %, a błędy ich lokalizacji nie odbiegały znacząco od wyników uzyskanych dla sygnałów ciśnienia.

Wraz ze wzrostem poziomu zaszumienia sygnałów, w przypadku użycia sygnałów ciśnienia znacznemu pogorszeniu uległy poziom wykrywalności i błąd lokalizacji wycieków, gdzie dla porównania w przypadku użycia sygnałów słabych interakcji zmiany nie były aż tak znaczne.

Wzrost zaszumienia spowodował również konieczność zmiany przyjętych progów alarmowych P_{x_n} dla poszczególnych sygnałów, gdzie w przypadku sygnałów słabych interakcji poziom zmian był niewielki, a w przypadku sygnałów ciśnienia po identycznym ich zaszumieniu wartości progów należało zmienić na kilkukrotnie wyższe.

Zaobserwowano również wzrost dokładności lokalizacji wycieków, poprzez zastosowanie modyfikacji opracowanych procedur w zakresie zastąpienia ujawnionych chwil czasowych $t_{x_n}^{(I)}$ przez nowe chwile czasowe $t_{x_n}^{(II)}$.

Prezentowane wyniki potwierdziły istnienie problemów związanych z wykrywaniem i lokalizowaniem wycieków w odniesieniu do użycia standardowych sygnałów ciśnienia. Dla porównania, pomimo użycia sygnałów słabych interakcji tylko z dwóch korektorów, uzyskano większą odporność na możliwość wystąpienia zakłóceń (zaszumienie) oraz lepszy poziom wykrywalności i błędów lokalizacji wycieków.

PODSUMOWANIE

Dołączenie do rurociągów korektorów stwarza możliwość pozyskiwania cennej informacji diagnostycznej, którą są sygnały słabych interakcji międzyobiektywnych. Sygnały te mają dobre własności metrologiczne: są czułe na wycieki i odporne na zakłócenie. Dzięki tym sygnałom możliwe jest polepszenie podatności diagnostycznej rurociągów, a stąd skuteczności diagnozowania wycieków, realizowanego w oparciu o metodę

śledzenia czoł fal ciśnienia. Sygnały słabych interakcji mogą stanowić cenne uzupełnienie dotychczas stosowanych sygnałów ciśnienia.

LITERATURA

- [1] Billman L., Isermann R.: *Leak detection methods for pipelines*. Automatica, vol. 23, no. 3, 1987, pp. 381-385.
- [2] Kowalczyk Z., Gunawickrama K.: *Detekcja i lokalizacja wycieków w rurociągach przesyłowych*. Rozdział 21 pracy zbiorowej pod red. J. Korbicza, J. Kościelnego, Z. Kowalczyka i W. Cholewy: Diagnostyka procesów. Modele, metody sztucznej inteligencji, zastosowania. Warszawa, WNT, 2002.
- [3] Lindstedt P.: *Weak interactions between objects in the signal-based and parametric diagnostics of transport-dedicated complex engineering systems*. Aircraft Engineering and Aerospace Technology: An International Journal, vol.77 no.3/2005, pp. 222-227.
- [4] Lindstedt P., Ostapowicz P.: *Zastosowanie elementów korekcyjnych automatyki w diagnostyce obiektów technicznych*. XV Krajowa Konferencja Automatyki, Warszawa 27-30. czerw. 2005, Wydaw. PAN, str. 181-186.
- [5] Ostapowicz P.: *Signals of weak interobject interactions in diagnosing of leakages from pipelines*. Eksploatacja i niezawodność, nr 33, 1/2007, str. 31-45.
- [6] Ostapowicz P.: *Sygnały słabych interakcji międzyobiektywnych w diagnostyce wycieków z rurociągów*. Rozdział w pracy zbiorowej pod red. J. Korbicza, K. Patana, M. Kowala: Diagnostyka procesów i systemów. Warszawa, Wydaw. EXIT, 2007, str. 323-330.
- [7] Sobczak R.: *Lokalizacja nieszczelności w rurociągach metodą śledzenia czoł fal ciśnienia*. Przemysł Chemiczny, nr 83, 6/2004, str. 296-299.
- [8] Zhang J.: *Statistical pipeline leak detection for all operating conditions*. Pipeline & Gas Journal, February 2001, pp. 42-45.

Praca finansowana przez Politechnikę Białostocką – praca statutowa S/WM/3/06.



Dr inż. **Paweł**

OSTAPKOWICZ –

absolwent i pracownik Wydziału Mechanicznego Politechniki Białostockiej, gdzie w 1998 roku ukończył studia, a w 2007 roku uzyskał stopień doktora.

Tematyka badawcza: budowa i eksploatacja maszyn,

automatyka, miernictwo dynamiczne, diagnostyka maszyn. Prace dotyczyły głównie: diagnozowania wycieków z rurociągów, polepszania podatności diagnozowanych obiektów technicznych, wibroakustyki.