

DIAGNOZOWANIE WYCIEKÓW METODĄ SŁABYCH INTERAKCJI MIĘDZYOBIEKTOWYCH NA PRZYKŁADZIE RUROCIĄGU MODELOWEGO

Paweł OSTAPKOWICZ

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

Streszczenie

Praca dotyczy diagnozowania wycieków z rurociągów. Rurociągi są obiektami trudnymi do diagnozowania, zwłaszcza w stanie z wyciekami. Powstaje zatem problem polepszenia ich podatności diagnostycznej, która ma zasadniczy wpływ na skuteczność realizowanej działalności diagnostycznej. Pokazano, że polepszenie podatności diagnostycznej rurociągów można osiągnąć dzięki nowej opracowanej metodzie, umownie nazwanej metodą słabych interakcji międzyobiektowych. Metoda ta polega na pozyskiwaniu nowej cennej informacji diagnostycznej. Informacją tą są sygnały interakcji, wynikające z pracy obiektu badawczego (korektora) – dołączonego do badanego (diagnozowanego) rurociągu. W pracy przedstawiono wyniki eksperymentalnej weryfikacji proponowanej metody, przeprowadzonej na stanowisku badawczym z rurociągiem modelowym.

Słowa kluczowe: rurociągi, diagnozowanie wycieków, podatność diagnostyczna.

LEAK DETECTION BASED ON THE METHOD OF WEAK INTEROBJECT INTERACTIONS FOR EXAMPLE PIPELINE MODEL STATION

Summary

This work concerns diagnosing of leaks from pipelines. Pipelines are difficult objects to diagnosing, especially in state with leak. Therefore, there is a problem of improving their diagnostic susceptibility, which has significant influence on the efficacy of the executed diagnostic activity. There is shown that it is possible to improve diagnostics susceptibility thanks to a new elaborated method, conventionally named the method of weak interobject interactions. This method consists in acquiring a piece of new valuable diagnostic information, which are signals of interactions, resulted from work of a testing object (corrector) – specially joined to a tested (diagnosed) pipeline. In this work the results of experimental verification of the proposed method, conducted on a special pipeline model station are presented.

Keywords: pipeline, leak detection, diagnostic susceptibility.

1. WSTĘP

Diagnozowanie nieszczelności i wycieków stanowi istotne zagadnienie eksploatacji wielu obiektów technicznych. Szczególne znaczenie nabiera w przypadku takich obiektów jak rurociągi, a zwłaszcza te typu przesyłowego.

Spośród wielu rozwiązań powszechnie zastosowanych na rurociągach znalazły głównie metody oparte o wykorzystanie standardowych sygnałów pomiarowych wewnętrznych parametrów przepływu (ciśnienia, natężenia przepływu i temperatury), określane w literaturze jako metody wewnętrzne.

Należy mieć jednak na uwadze, że praktyczna realizacja takiego procesu diagnozowania wycieków jest problemem złożonym i skomplikowanym, a to ze względu m.in. na duże rozmiary rurociągów oraz złożoną dynamikę procesu tłoczenia. Na skuteczność

diagnozowania istotny wpływ ma ponadto podatność diagnostyczna badanego obiektu, która jest ściśle powiązana z możliwością pomiaru dostępnej informacji diagnostycznej.

Jeżeli zatem, w dotychczasowej działalności diagnostycznej zakłada się, że ocena stanu eksploatowanych obiektów związana jest jedynie z sygnałami diagnostycznymi, które są bezpośrednio z nimi (z ich działaniem) związane – oznacza to, że często pojawia się niedobór informacji powodujący zmniejszenie skuteczności diagnozowania. Podobna sytuacja ma miejsce w przypadku diagnozowania wycieków z rurociągów przy użyciu metod wewnętrznych (opartych o sygnały diagnostyczne bezpośrednio wynikające z pracy obiektów). Potwierdzają to uzyskiwane wyniki, gdzie dla istniejących rozwiązań (metod) diagnozowania możliwe jest identyfikowanie jedynie znacznych wycieków i lokalizowanie ich ze zgrubną

dokładnością. Powstaje zatem problem polepszania podatności diagnostycznej rurociągów.

Efektywnym sposobem polepszania podatności diagnostycznej rurociągów może być nowa opracowana metoda, nazwana metodą słabych interakcji między obiektowych. Idea proponowanej metody zakłada pozyskiwanie nowych sygnałów diagnostycznych (informacji diagnostycznej), które nie są z obiektem (jego działaniem) bezpośrednio związane. Dzięki tej nowej informacji diagnostycznej zaistniała realna możliwość zwiększenia skuteczności diagnozowania wycieków, realizowanego dotychczasowymi metodami.

2. METODA SŁABYCH INTERAKCJI MIĘDZYOBIEKTOWYCH

2.1. Idea metody

Proponowana metoda opiera się na wykorzystaniu zasad funkcjonowania układów korekcyjnych stosowanych w automatyce.

Zgodnie z zasadami automatyki, działanie wielu złożonych obiektów technicznych (w tym rurociągów), w praktyce może być opisane – transmitancją [3, 7, 9].

Oznacza to, że dla takich obiektów można otrzymać następującą zależność:

$$Y = H Z \quad (1)$$

gdzie: H – transmitancja obiektu; Z – transformata zakłócenia z wynikającego z oddziaływania otoczenia na obiekt; Y – transformata sygnału wyjściowego (użytkowego) y obiektu.

Analizując wzór (1) nietrudno dojść do wniosku, że praktycznie rzecz biorąc zmiany dostępnego sygnału Y mogą wynikać ze zmian stanu technicznego obiektu opisanego parametrami transmitancji H 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.

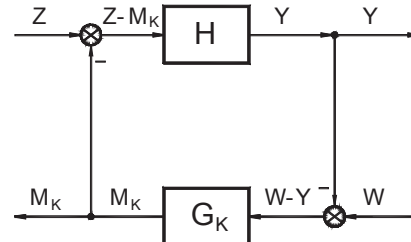
Na rys. 1 pokazano ten sam obiekt techniczny z dołączonym elementem korekcyjnym – korektorem (o transmitancji G_K). Przy poprawnym dobraniu i dołączeniu do badanego obiektu, korektor będzie reagował na każdą zmianę parametrów konstrukcyjnych obiektu (wynikającą z zaistniałych uszkodzeń lub jego zużycia) odpowiednią zmianą funkcjonowania (przebiegu i kształtu sygnału M_K). Stąd na podstawie badania tylko zmian funkcjonowania korektora możliwa staje się ocena różnorodnych zmian zachodzących w obiekcie.

Zgodnie z zasadami automatyki dla układu (rys. 1) otrzymuje się następujące relacje między sygnałami:

$$\begin{aligned} Y &= (Z - M_K)H \\ M_K &= (W - Y)G_K \end{aligned} \quad (2)$$

które po przekształceniach można doprowadzić do postaci:

$$\begin{aligned} Y &= ZH - WG_K H + YG_K H \\ M_K &= WG_K - ZG_K H + M_K G_K H \end{aligned} \quad (3)$$



Rys. 1. Układ z badanym obiektem o transmitancji H i dołączonym korektorem o transmitancji G_K : W – transformata wartości zadanej; M_K – transformata sygnału wyjściowego z korektora (sygnał słabej interakcji – oddziaływania G_K na H); Z – transformata zakłócenia wynikającego z oddziaływania otoczenia na obiekt; Y – transformata sygnału wyjściowego (użytkowego) obiektu

Wyznaczając H z (2) i po podstawieniu do (3) uzyskuje się zależność (4) opisującą zakłócenie Z działające na obiekt (którym w tym przypadku jest wyciek) w funkcji dostępnych sygnałów: Y , W , M_K .

$$Z = \frac{G_K(G_K W^2 - YW - Y M_K - W M_K + Y M_K)}{G_K W - G_K Y - M_K} \quad (4)$$

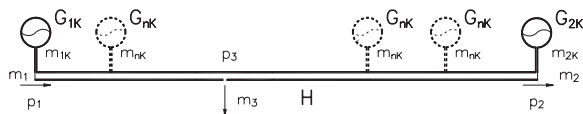
Zgodnie z powyższą zależnością i po uwzględnieniu, że sygnałem zadanym do korektora W jest wartość sygnału wyjściowego Y w chwili poprzedniej, zakłócenie (wyciek) może być identyfikowany bez znajomości transmitancji obiektu H , która wskutek powstałego uszkodzenia uległa zmianie i jest nieznaną.

2.2. Koncepcja praktycznej realizacji metody

Praktyczna realizacja proponowanej metody polega na dołączeniu na początku i końcu diagnozowanego rurociągu dwóch korektorów badawczych o odpowiednio dobranych transmitancjach G_{1K} i G_{2K} . Dodatkowo dopuszcza się rozmieszczenie kilku takich korektorów wzdłuż rurociągu. Ich liczba będzie zależna m.in. od wielkości rurociągu. Schemat rurociągu z dołączonymi korektorami pokazano na rys. 2.

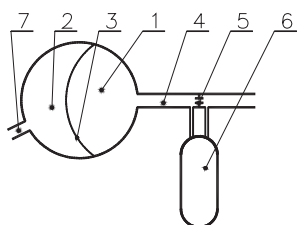
Schemat rozwiązania konstrukcji korektorów przedstawia rys. 3. Układy pomiarowe korektorów mierzą fluktuację przepływu pomiędzy badanym obiektem a korektorem. Pomiar ten dokonywany jest na elemencie typu kryza z użyciem czujnika różnicy ciśnień. Nastawa punktu pracy korektora (dostrajanie do sygnału z rurociągu) realizowana jest

poprzez odpowiedni dobór: średnicy kryzy pomiarowej, przepony, ciśnienia w zasobniku, średnicy kryzy w kanale do zasobnika powietrzego.



Rys. 2. Schemat diagnozowanego rurociągu z dołączonymi obiektami badawczymi (korektorami)

Taka konstrukcja korektora powoduje znaczącą reakcję (zadziałanie korektora) w przypadku pojawienia się takich zjawisk, jak towarzyszące wyciekom zjawisko rozchodzenia się fal rozprężeńowych ciśnienia, szczególnie zaś fal o wyraźnie widocznych czołach, co ma miejsce w odniesieniu do nagle, jak i też tych nieco wolniej pojawiających wycieków.



Rys. 3. Schemat konstrukcji korektora:
1 – komora z ciecżą; 2 – komora z powietrzem;
3 – przepona; 4 – kanał pomiarowy;
5 – kryza pomiarowa; 6 – czujnik różnicy ciśnień; 7 – kanał do zasobnika powietrza

Według przyjętych założeń, w oparciu o pozyskane sygnały słabych interakcji zostaną opracowane nowe procedury diagnostowania wycieków. Procedury te mają stanowić uzupełnienie już istniejących procedur bazujących na sygnałach ciśnienia, i mają być ukierunkowane na wykrywanie i lokalizowanie wycieków.

3. EKSPERYMENTALNA WERYFIKACJA METODY SŁABYCH INTERAKCJI MIĘDZYOBIEKTOWYCH

3.1. Harmonogram prac

W przypadku metody słabych interakcji między obiektowych podjęto decyzję, że jej eksperymentalna weryfikacja zostanie przeprowadzona w warunkach laboratoryjnych na stanowisku badawczym z rurociągiem modelowym.

Przyjęto, że sam przebieg weryfikacji będzie zgodny z ogólnymi zasadami diagnostyki, i obejmie zarówno etap badania diagnostycznego (pozyskiwanie sygnałów słabych interakcji), jak i etap wnioskowania diagnostycznego (ocenę możliwości zastosowania nowo pozyskanych sygnałów do diagnostowania symulowanych wycieków).

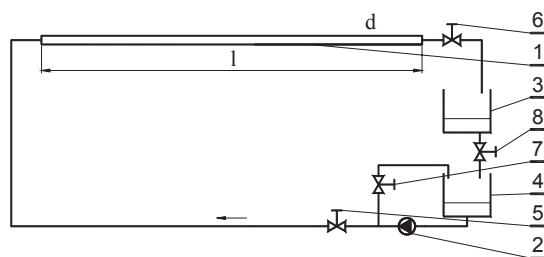
Co się tyczy harmonogramu prac w zakresie badania diagnostycznego, to został on określony następująco:

- budowa stanowiska badawczego z rurociągiem modelowym,
- opracowanie konstrukcji korektorów (kształt, wielkość, sposób podłączenia do rurociągu modelowego),
- zamontowanie dwóch korektorów badawczych, po jednym na początku i na końcu rurociągu modelowego,
- dostrojenie korektorów do pracy rurociągu modelowego,
- przeprowadzenie badań z symulowanymi wyciekami (kilkusetapowych).

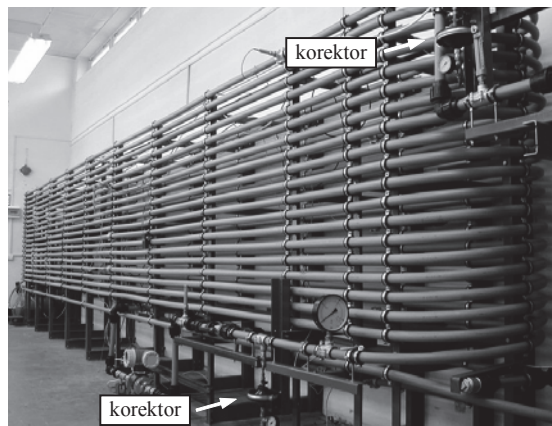
Po zrealizowaniu wyżej wymienionych zadań przystąpiono do weryfikacji metody (pozyskanych sygnałów słabych interakcji) w zakresie wnioskowania diagnostycznego.

3.2. Stanowisko badawcze

Schemat stanowiska badawczego pokazano na rysunku 4. Zasadniczym elementem stanowiska jest rurociąg modelowy o średnicy 34 mm i długości 380 m, którego widok przedstawiono na rys. 5.



Rys. 4. Schemat stanowiska badawczego:
1 – rurociąg modelowy; 2 – pompa o zmiennym wydatku; 3, 4 – zbiorniki;
5, 6 – stacje zaworów regulacyjnych;
7 – zawór regulacyjny małego biegu;
8 – zawór regulacyjny upustu



Rys. 5. Widok rurociągu modelowego i zamontowanych korektorów

Rurociąg modelowy, podobnie jak rzeczywiste obiekty wyposażono w odpowiednie standardowe przyrządy i przetworniki, umożliwiające pomiar ciśnienia, natężenia przepływu i temperatury. Przy czym pomiar tych wielkości dokonywany jest na wlocie i wylocie rurociągu, a w przypadku ciśnienia dodatkowo w czterech punktach wzdłuż jego długości.

Korektory badawcze do wywoływania sygnałów słabych interakcji zostały zamontowane na początku i na końcu rurociągu, w bliskim sąsiedztwie punktów pomiaru ciśnienia.

Informacje na temat poszczególnych urządzeń pomiarowych i ich lokalizacji zestawiono w tabeli 1.

Na bazie zastosowanych przetworników zbudowano komputerowy system pomiarowy. System działa w trybie off-line. Końcowym jego elementem (torów pomiarowych systemu) jest karta pomiarowa o zakresach wejść: $0 \div 10$ V, $-5 \div 5$ V, dokładności: 0,16 % zakresu dla poszczególnego wejścia, max. częstotliwości próbkowania: do 100 kHz na jeden kanał pomiarowy.

Tab. 1. Charakterystyki standardowych urządzeń pomiarowych i korektorów badawczych

Rodzaj urządzenia /charakterystyka	Współrzędna wzdłuż rurociągu [m]
PRZETWORNIKI CIŚNIENIA zakres pomiar.: $0 \div 10$ [bar] dokładność: 0,1 [%] zakresu	$P_1 = 1$ $P_3 = 75$ $P_4 = 141$ $P_5 = 281$ $P_6 = 355$ $P_2 = 378$
PRZEPLYWOMIERZE ELEKTROMAGNETYCZNE zakres pomiar.: $0 \div 200$ [l/min] dokładność: 0,2 [%] zakresu	$Q_1 = -6$ $Q_2 = 382,2$
KOREKTORY BADAWCZE czujniki różnicy ciśnień: MK1 zakres pomiar.: $-0,5 \div 0,5$ [bar] dokładność: 0,2 [%] zakresu MK2 zakres pomiar.: $-0,2 \div 0,5$ [bar] dokładność: 0,2 [%] zakresu	$M_{K1} = -3$ $M_{K2} = 379,2$
MANOMETRY zakres pomiar.: $0 \div 16$ [bar] dokładność 1 [%] zakresu	$P_{m1} = -4$ $P_{m2} = 380,2$
TERMOMETRY dokładność: 0,5 [°C]	$T_1 = 7,5$ $T_2 = 382,8$

3.3. Badania diagnostyczne z symulowanymi wyciekami

Zgodnie z przyjętym programem badań, po optymalnym dostrojeniu zamontowanych na rurociągu modelowym korektorów, przeprowadzono kilka serii eksperymentów diagnostycznych z symulowanymi wyciekami.

Prezentowane w pracy wyniki dotyczą zasadniczej serii badań, przeprowadzonej przy następujących warunkach pracy rurociągu:

- stabilnym ustalonym przepływie medium,
 - 90 % wydatku pompy,
 - dławieniu przepływu na końcu rurociągu;
- oraz niżej określonych nominalnych wartościach parametrów przepływu:
- ciśnieniu na wlocie rurociągu - około 5,7 bar,
 - ciśnieniu na wylocie rurociągu - około 2,2 bar,
 - natężeniu strumienia - około 95 l/min,
 - temperaturze medium - w przedziale $19 \div 24,5$ °C.

Badania w tej serii obejmowały symulowanie wycieków o wielkościach $1 \div 8$ % nominalnego natężenia przepływu, w pięciu wybranych punktach rurociągu modelowego o współrzędnych: 115, 155, 195, 235, 275 m. Przy czym były to wycieki nagle, zadawane poprzez bardzo szybkie otwarcie zaworu kranika upustowego.

3.4. Nowo pozyskane sygnały diagnostyczne – sygnały słabych interakcji między obiektowych

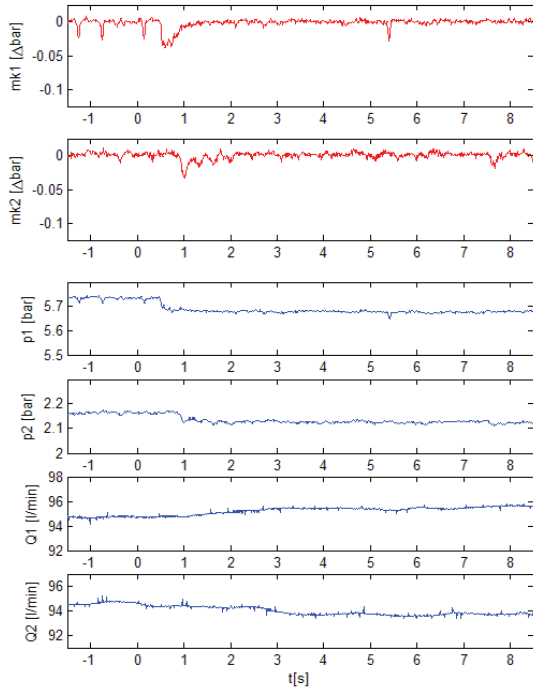
Przykładowe przebiegi nowych sygnałów diagnostycznych – sygnałów słabych interakcji, uzyskane dla 2 % i 4 % wielkości wycieków, symulowanych w punktach o współrzędnych 115 i 275 m pokazano na rysunkach 6÷9. Dodatkowo, celem porównania, na każdym z rysunków przedstawiono przebiegi standardowych sygnałów ciśnienia i natężenia przepływu (zmierzone w najbliższym sąsiedztwie punktów zamontowania korektorów).

W trakcie przeprowadzonych badań diagnostycznych ustalono, że pozyskiwanie sygnałów słabych interakcji jest łatwe do realizacji, a dołączenie do rurociągu korektorów nie wpływa na poprawność funkcjonowania samego rurociągu.

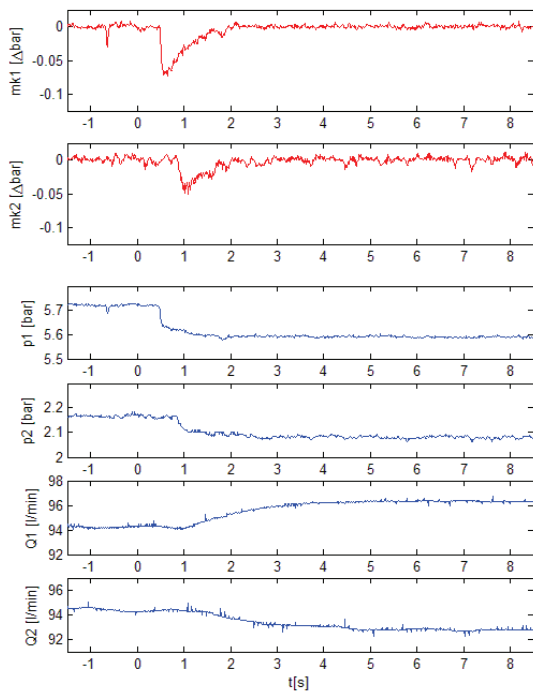
Ponadto dokonana analiza sygnałów słabych interakcji, oparta na ich porównaniu z sygnałami ciśnienia – potwierdziła, że cechuje je pełna wiarygodność.

3.5. Możliwość zastosowania sygnałów słabych interakcji między obiektowych w diagnostyce wycieków z rurociągów

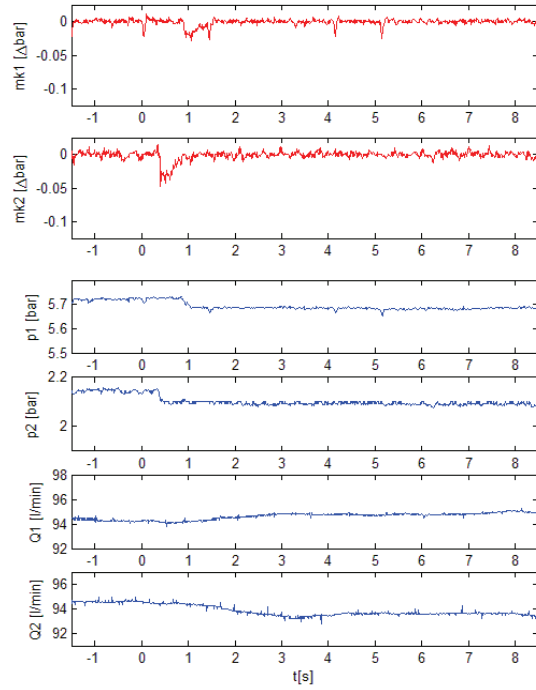
Celem weryfikacji pozyskanych sygnałów słabych interakcji w zakresie wnioskowania diagnostycznego jest ocena możliwości ich zastosowania w diagnostyce wycieków do realizowania określonych zadań, tj.: wykrywania, lokalizowania lub szacowania wielkości powstałego wycieku. Na rys. 6-9 przedstawiono przebiegi czasowe zarejestrowanych sygnałów.



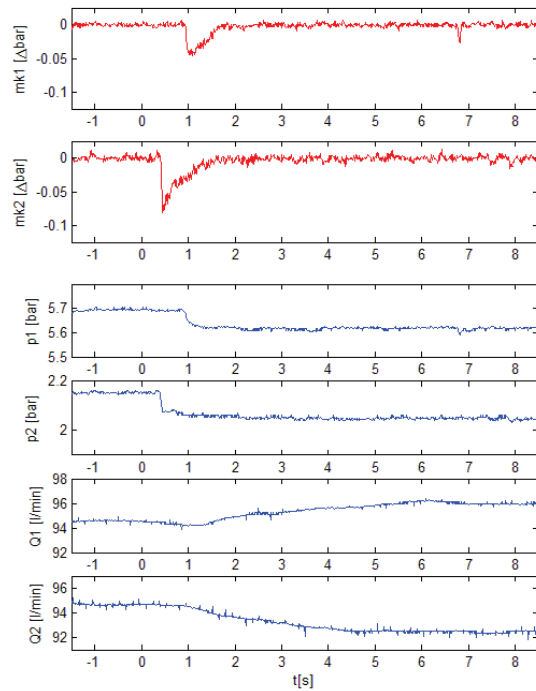
Rys. 6. Przebiegi sygnałów m_{K1} , m_{K2} , p_1 , p_2 , Q_1 , Q_2 dla 2% wycieku zadanego na 115 m



Rys. 7. Przebiegi sygnałów m_{K1} , m_{K2} , p_1 , p_2 , Q_1 , Q_2 dla 4% wycieku zadanego na 115 m



Rys. 8. Przebiegi sygnałów m_{K1} , m_{K2} , p_1 , p_2 , Q_1 , Q_2 dla 2% wycieku zadanego na 275 m



Rys. 9. Przebiegi sygnałów m_{K1} , m_{K2} , p_1 , p_2 , Q_1 , Q_2 dla 2% wycieku zadanego na 275 m

Zasadniczym elementem takiej weryfikacji było opracowanie odpowiednich procedur i technik przetwarzania sygnałów słabych interakcji, zawierających odpowiednie algorytmy detekcyjne, które pozwalałyby na jak najszybsze wykrywanie wycieków, i o jak najmniejszej wielkości. Weryfikację przeprowadzono w oparciu o następujące założenia:

- porównanie wyników (czasów wykrycia symulowanych wycieków¹) uzyskanych przy użyciu sygnałów słabych interakcji z wynikami uzyskanymi przy użyciu sygnałów ciśnienia i natężenia przepływu,
- wykrywanie symulowanych wycieków jedynie w oparciu o sygnały pomiarowe z dwóch urządzeń (czujników) rozmieszczonych na początku i końcu rurociągu,
- próbkowanie sygnałów z częstotliwością 100 Hz,
- ustalenie wartości progów alarmowych dla poszczególnych porównywanych sygnałów w sposób zapewniający niewystępowanie alarmu dla stanów bez wycieku (w całej rozpatrywanej serii przeprowadzonych badań),
- możliwość użycia dotychczas wykorzystywanych procedur detekcji wycieków lub ich modyfikacja,
- uwzględnienie występowania zakłóceń – zaszumienie porównywanych sygnałów szumem gaussowskim o odchyleniu standardowym równym 0,2 % i 0,5 % wielkości zakresu pomiarowego, i wynikająca stąd konieczność zmiany przyjętych progów alarmowych.

Uzyskane wyniki (czasy wykrycia symulowanych wycieków) dla przypadku użycia sygnałów ciśnienia Q_1 i Q_2 zamieszczono w tabeli 2. Przy czym zastosowano dotychczas wykorzystywaną procedurę [1], opartą o:

- filtrowanie rekursywne sygnałów, określane w literaturze przez *recursive averaging with fading memory (exponential smoothing)*; gdzie przyjęta nastawa współczynnika korekcyjnego dla filtra wynosiła $\alpha=0,995$,
- funkcje korelacji residuów sygnałów, obliczane rekursywnie dla poszczególnych przesunięć czasowych $\tau=1 \dots \tau_{max}$; gdzie przyjęta nastawa współczynnika korekcyjnego dla filtra wynosiła $\beta=0,900$, a przesunięcia $\tau_{max}=100 \text{ sec}$,
- sumę obliczonych funkcji korelacji dla zakresu przesunięcia czasowego opisanego przez τ_{max} , która gdy przekroczy wartość progów alarmowych informuje o pojawieniu się wycieku.

Uzyskane wyniki (czasy wykrycia symulowanych wycieków) dla przypadku użycia sygnałów ciśnienia p_1 i p_2 zamieszczono w tabeli 3.

Natomiast w tabeli 4 przedstawiono wyniki (czasy wykrycia symulowanych wycieków) uzyskane dla przypadku użycia sygnałów słabych interakcji m_{K1} i m_{K2} .

Przy czym w odniesieniu do sygnałów ciśnienia, i sygnałów słabych interakcji zastosowano następującą opracowaną procedurę, opartą o:

- filtrowanie rekursywne sygnałów; gdzie przyjęto identyczne nastawy współczynników korekcyjnych dla filtrów $\alpha=0,995$,
- obliczanie maksimum funkcji korelacji residuów sygnałów dla zakresu przesunięcia czasowego τ_{max} ; gdzie przyjęto $\tau_{max}=100 \text{ sec}$,
- filtrowanie rekursywne obliczonych maksimum funkcji korelacji, która gdy przekroczy wartość progów alarmowych informuje o pojawieniu się wycieku; gdzie przyjęte nastawy współczynników korekcyjnych dla filtrów wynosiły $\gamma=0,900$.

Czasy wykrycia symulowanych wycieków zamieszczone w tabelach zostały podane w sekundach, a fakt braku wykrycia określonej wielkości wycieku oznaczono przez „-”. Każda z tabel zawiera ponadto informacje o przyjętych wartościach progów alarmowych, zapewniających niewystępowanie alarmu w stanach bez wycieku (w całej rozpatrywanej serii przeprowadzonych badań).

Analiza wyników (czasów wykrycia symulowanych wycieków i wielkości wykrywanych wycieków) potwierdza, że przy użyciu sygnałów słabych interakcji m_{K1} i m_{K2} możliwe jest prowadzenie zadawalająco skutecznej działalności diagnostycznej w kierunku wykrywania wycieków.

Co istotne, w odróżnieniu od dotychczas stosowanych sygnałów ciśnienia i natężenia przepływu, sygnały słabych interakcji są bardziej odporne na zakłócenia i wynikającą stąd konieczność zmiany wartości progów alarmowych. W przypadku zaszumienia sygnałów słabych interakcji wartości progów alarmowych nie uległy zmianie, gdzie dla porównania w przypadku sygnałów ciśnienia i natężenia przepływu po identycznym ich zaszumieniu wartości progów alarmowych należało zmienić na kilkukrotnie większe. Jak pokazano w tabelach 2 i 3, zastosowanie tej samej wartości progów alarmowych, uzyskanych przykładowo przy zaszumieniu sygnałów ciśnienia i natężenia przepływu szumem o odchyleniu standardowym równym 0,5 % wielkości zakresu pomiarowego, w przypadku sygnałów niezaszumianych skutkowałoby wydłużeniem czasów wykrycia oraz nie wykryciem wielu wycieków.

¹ Czas wykrycia symulowanego wycieku, traktowany jako przekroczenie przyjętej wartości progów alarmowych, obliczany był względem początku wycieku (określonego przez moment otwarcia zaworu kranika upustowego).

Tab. 2. Zestawienie czasów wykrycia symulowanych wycieków dla przypadku użycia sygnałów przepływu Q_1 i Q_2 ; gdzie: C – wielkość progu, zapewniająca nie wystąpienie alarmu dla stanu bez wycieku, D – wielkość progu uzyskana dla sygnałów zaszumianych szumem o odchyleniu standardowym 0,5 % wielkości zakresu pomiarowego

miejsce [m]	wielk. [%] Q_0	nie zaszumiane		szum _{0,2}		szum _{0,5}	
		C	D	C	C	C	C
		-0,014	-0,055	-0,026	-0,055		
115	1,0	2,25	–	2,37	2,69		
	1,5	2,91	–	3,35	3,76		
	2,0	2,43	3,47	2,60	2,67		
	2,5	1,98	2,56	2,18	2,50		
	3,0	1,81	2,26	1,89	2,10		
	3,5	1,71	2,01	1,82	2,01		
	4,0	1,72	2,04	1,84	1,96		
	6,0	1,60	1,79	1,65	1,76		
	8,0	1,53	1,69	1,63	1,69		
	155	1,0	2,34	–	–	–	
1,5		2,56	4,41	2,75	3,28		
2,0		2,22	3,75	2,36	2,80		
2,5		0,97	1,29	1,01	1,19		
3,0		1,81	2,28	2,03	2,24		
3,5		1,91	2,39	2,11	2,32		
4,0		1,71	1,98	1,82	1,91		
6,0		1,46	1,75	1,59	1,72		
8,0		1,41	1,63	1,50	1,62		
195		1,0	–	–	–	–	
	1,5	2,04	–	2,59	2,66		
	2,0	1,96	2,98	2,26	2,46		
	2,5	2,26	2,89	2,46	2,78		
	3,0	1,82	2,47	1,98	2,33		
	3,5	1,74	2,13	1,86	2,09		
	4,0	1,68	1,97	1,81	1,96		
	6,0	1,66	1,91	1,76	1,91		
	8,0	1,31	1,62	1,42	1,58		
	235	1,0	–	–	–	–	
1,5		2,35	–	–	–		
2,0		2,01	2,95	2,43	2,85		
2,5		2,09	2,74	2,26	2,67		
3,0		1,95	2,64	2,15	2,65		
3,5		1,89	2,24	2,10	2,22		
4,0		1,97	2,31	2,05	2,29		
6,0		1,79	2,00	1,87	2,01		
8,0		1,61	1,84	1,69	1,79		
275		1,0	–	–	–	–	
	1,5	3,11	–	3,72	–		
	2,0	2,34	3,34	2,70	3,44		
	2,5	2,00	2,66	2,30	3,16		
	3,0	2,21	2,56	2,36	2,50		
	3,5	2,09	2,45	2,21	2,48		
	4,0	2,11	2,47	2,22	2,46		
	6,0	1,95	2,16	2,04	2,18		
	8,0	1,54	1,80	1,65	1,82		

Tab. 3. Zestawienie czasów wykrycia symulowanych wycieków dla przypadku użycia sygnałów ciśnienia p_1 i p_2 ; gdzie: C – wielkość progu, zapewniająca nie wystąpienie alarmu dla stanu bez wycieku, D – wielkość progu uzyskana dla sygnałów zaszumianych szumem o odchyleniu standardowym 0,5 % wielkości zakresu pomiarowego

miejsce [m]	wielk. [%] Q_0	nie zaszumiane		szum _{0,2}	szum _{0,5}
		C	D	C	C
		0,005	0,092	0,018	0,092
115	1,0	1,16	–	1,35	–
	1,5	0,82	–	0,98	1,48
	2,0	0,84	1,87	0,93	1,31
	2,5	1,01	1,62	1,09	1,31
	3,0	0,79	1,33	0,96	1,11
	3,5	0,63	1,21	0,83	1,08
	4,0	0,60	1,16	0,82	1,03
	6,0	0,75	1,00	0,78	0,93
	8,0	0,58	1,00	0,61	0,84
	155	1,0	1,20	–	1,39
1,5		0,95	–	1,02	1,71
2,0		1,12	2,26	1,19	1,51
2,5		0,40	0,67	0,42	0,51
3,0		0,91	1,32	0,94	1,13
3,5		0,87	1,19	0,92	1,05
4,0		0,74	1,02	0,79	0,90
6,0		0,71	0,92	0,76	0,87
8,0		0,72	0,90	0,75	0,85
195		1,0	1,03	–	1,14
	1,5	0,85	–	0,93	1,28
	2,0	0,83	1,65	0,90	1,26
	2,5	0,77	1,29	0,82	1,03
	3,0	0,77	1,15	0,82	0,94
	3,5	0,74	1,06	0,76	0,88
	4,0	0,70	0,93	0,72	0,81
	6,0	0,72	0,87	0,75	0,82
	8,0	0,65	0,77	0,67	0,73
	235	1,0	1,03	–	1,28
1,5		0,90	–	1,01	1,74
2,0		0,86	1,64	0,87	1,05
2,5		0,73	1,40	0,84	1,04
3,0		0,73	1,29	0,85	0,97
3,5		0,83	1,14	0,80	1,00
4,0		0,59	1,08	0,69	0,92
6,0		0,77	0,99	0,74	0,86
8,0		0,78	1,00	0,70	0,87
275		1,0	1,12	–	1,26
	1,5	0,92	–	0,95	1,44
	2,0	0,79	–	0,97	1,18
	2,5	0,78	1,72	0,91	1,12
	3,0	0,71	1,37	0,72	1,14
	3,5	0,76	1,30	0,81	1,00
	4,0	0,83	1,25	0,93	1,02
	6,0	0,44	1,07	0,57	0,78
	8,0	0,50	1,01	0,46	0,62

Tab. 4. Zestawienie czasów wykrycia symulowanych wycieków dla przypadku użycia sygnałów słabych interakcji m_{K1} i m_{K2} ; gdzie: C – wielkość progu, zapewniająca nie wystąpienie alarmu dla stanu bez wycieku; D – wielkość progu uzyskana dla sygnałów zaszumianych szumem o odchyleniu standardowym 0,5 % wielkości zakresu pomiarowego

miejsce [m]	wielk. [%] Q_0	nie zaszumiane	szum _{0,2}	szum _{0,5}
		C = D	C	C
		0,570	0,570	0,570
115	1,0	–	–	–
	1,5	1,11	1,10	1,09
	2,0	1,04	1,04	1,02
	2,5	1,04	0,94	0,91
	3,0	0,82	0,82	0,80
	3,5	0,90	0,89	0,88
	4,0	0,81	0,81	0,80
	6,0	0,64	0,63	0,61
155	8,0	0,60	0,59	0,58
	1,0	–	–	–
	1,5	1,12	1,10	1,06
	2,0	1,16	1,16	1,15
	2,5	0,41	0,41	0,41
	3,0	0,91	0,92	0,91
	3,5	0,87	0,87	0,86
	4,0	0,75	0,74	0,73
195	6,0	0,71	0,71	0,71
	8,0	0,74	0,74	0,73
	1,0	–	–	–
	1,5	0,94	0,94	0,92
	2,0	0,87	0,87	0,86
	2,5	0,81	0,81	0,80
	3,0	0,80	0,80	0,80
	3,5	0,76	0,76	0,75
235	4,0	0,71	0,71	0,71
	6,0	0,72	0,72	0,71
	8,0	0,66	0,66	0,65
	1,0	–	–	–
	1,5	1,02	1,01	0,97
	2,0	0,91	0,90	0,90
	2,5	0,87	0,86	0,85
	3,0	0,74	0,74	0,75
275	3,5	0,86	0,86	0,85
	4,0	0,61	0,61	0,60
	6,0	0,81	0,81	0,81
	8,0	0,80	0,79	0,78
	1,0	–	–	–
	1,5	1,02	1,03	1,03
	2,0	1,06	1,05	1,04
	2,5	1,00	1,00	0,77
3,0	0,74	0,74	0,74	
	3,5	1,00	1,00	1,00
	4,0	0,98	0,98	0,98
	6,0	0,44	0,44	0,45
	8,0	0,50	0,57	0,51

PODSUMOWANIE

Prezentowane etapowe wyniki eksperymentalnej weryfikacji proponowanej metody słabych interakcji między obiektowych, przeprowadzonej na stanowisku badawczym z rurociągiem modelowym, potwierdzają, że odpowiednio dobrane i dołączone do diagnozowanych rurociągów korektory, spełniające rolę obiektów badawczych, stwarzają możliwość pozyskiwania cennej informacji diagnostycznej, pozwalającej na polepszenie podatności diagnostycznej rurociągów, a stąd zwiększenie skuteczności diagnozowania wycieków.

LITERATURA

- [1] Billman L., Isermann R.: *Leak detection methods for pipelines*; Automatica, vol. 23, no. 3, pp. 381-385, 1987.
- [2] Korbicz J. i inni: *Diagnostyka procesów. Modele, metody sztucznej inteligencji, zastosowania*; WNT, Warszawa 2002.
- [3] Lindstedt P.: *Praktyczna diagnostyka maszyn i jej teoretyczne podstawy*; Wydawnictwo Naukowe Askon, Warszawa 2002.
- [4] Lindstedt P.: *Element korekcyjny jako źródło informacji diagnostycznej*; ZEM PAN, zeszyt 2, 1995.
- [5] Lindstedt P., Ostapkowicz P.: *Diagnosing of the leakages from pipelines based on signals of weak interobject interactions*; Archiwum Transportu, Komitet Transportu PAN, tom 2, str. 17-31, Warszawa 2004.
- [6] Niederliński A.: *Systemy komputerowe automatyki przemysłowej*; tom 2, WNT, Warszawa 1985.
- [7] Skinners S.: *Modern control system. Theory and application*; Addison Wesley 1972.
- [8] Sobczak R.: *Lokalizacja wycieków z rurociągów*; Pomiar Automatyka Robotyka, nr 3, str. 11-16, 1999.
- [9] Söderström T., Stoica P.: *Identyfikacja systemów*; PWN, Warszawa 1997.

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



Mgr inż. **Paweł OSTAPKOWICZ** – w 1998 roku ukończył studia na Wydziale Mechanicznym Politechniki Białostockiej, gdzie obecnie pracuje jako asystent, i ma otwarty przewód doktorski. Tematyka badawcza: budowa i eksploatacja maszyn, automatyka, miernictwo dynamiczne, diagnostyka maszyn. Prace naukowe dotyczą głównie: diagnozowania wycieków z rurociągów, polepszania podatności diagnozowanych obiektów technicznych, wibroakustyki.