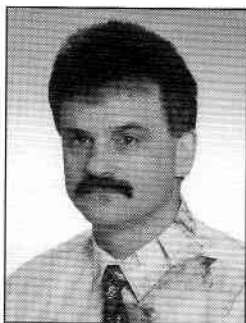


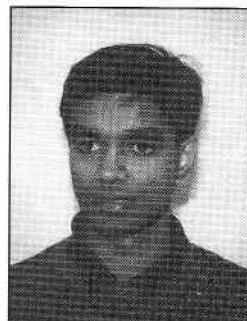
Zdzisław KOWALCZUK, Keerthi GUNAWICKRAMA
POLITECHNIKA GDAŃSKA
WYDZIAŁ ELEKTRONIKI, TELEKOMUNIKACJI I INFORMATYKI
KATEDRA SYSTEMÓW AUTOMATYKI

Wykrywanie przecieków w rurociągach przemysłowych metodą korelacyjno-modelową

Dr hab. inż. Zdzisław KOWALCZUK – studia na Wydziale Elektroniki Politechniki Gdańskiej ukończył w 1978 r., a tytuł doktora nauk technicznych uzyskał w 1986 r. Tytuł doktora habilitowanego został mu nadany w 1993 r. przez Wydział Automatyki Elektroniki i Informatyki Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Od roku 1978 pracuje na Wydziale Elektroniki Telekomunikacji i Informatyki Politechniki Gdańskiej; obecnie zajmuje stanowisko profesora nadzwyczajnego. Jego główne zainteresowania naukowe są związane z projektowaniem komputerowych układów sterowania.



Mgr inż. Keerthi GUNAWICKRAMA – ukończył St. Aloysius College w Galle (Sri Lanka) w 1988 r. W latach 1990-1995 studiował na Wydziale Elektroniki Politechniki Gdańskiej kierunku elektroniki. W lutym 1996 roku ukończył studia o specjalności automatyka. Od 1 października 1996 roku uczestniczy w Studium Doktoranckim prowadzonym przez Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki Politechniki Gdańskiej.



Rozważono metodę korelacyjno-modelową (z zastosowaniem modelu przepływu i adaptacyjnych obserwatorów stanu) do detekcji i lokalizacji małego wycieku w długim rurociągu. W celu kompensacji niedokładności modelowania zastosowano wyniki estymacji współczynnika tarcia (niemierzalnego parametru modelu). Poprawność działania zintegrowanego algorytmu estymacji i detekcji zilustrowano metodą symulacyjną.

ABSTRACT

In the paper a model-based cross-correlation method is applied (with the use of the flow model and adaptive state observers) for localisation of small leakages in a long pipeline utilised for transportation of petrol products. In order to compensate for modelling errors a procedure of estimation of an unmeasurable friction coefficient, has been used. Applicability of the integral estimation and detection algorithm has been illustrated by simulation means.

W trakcie ostatnich dziesięcioleci zbudowano wiele rozległych sieci rurociągów do transportu gazów i cieczy (od miejsca produkcji do miejsca konsumpcji). Bezpieczeństwo i niezawodność działania takich sieci są szczególnie istotne ze względu na zagrożenie życia ludzkiego oraz koszty ekonomiczne i ekologiczne.

W szeroko pojętej detekcji wycieków są zawarte następujące elementy:

- decyzja o alarmie – wykrycie faktu pojawienia się wycieku, który może mieć miejsce w dowolnym czasie i miejscu;
- lokalizacja wycieku – ocena współrzędnej miejsca wystąpienia przecieku;
- ocena ilościowa intensywności wycieku.

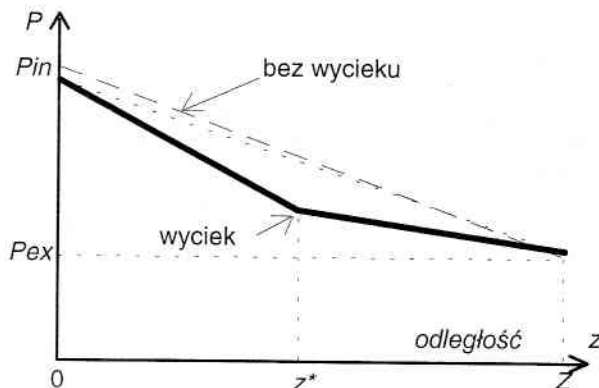
W prezentowanej pracy rozważa się metodę korelacyjno-modelową detekcji ubytków masy medium transportowanego za pomocą długiego rurociągu. W metodzie tej stosuje się model matematyczny przepływu medium w rurociągu oraz adaptacyjny (zrealizowany metodą rekursywną bądź nierekursywną) obserwator prędkości przepływu masowego. Elementy te stanowią podstawę analitycznej redundancji i filtracyjnej generacji sygnału resztowego.

Wpływ wycieku na pomiary

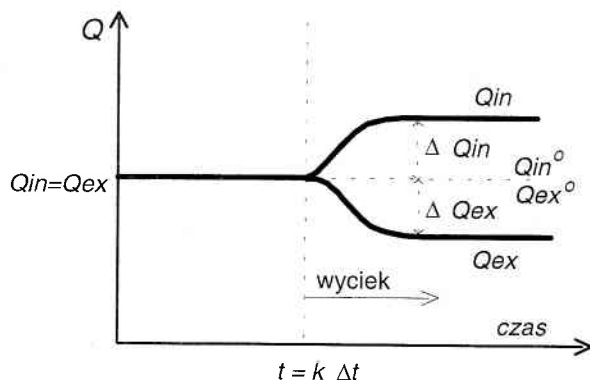
Ponieważ długie odcinki rurociągów służących do transportu gazów i cieczy są zwykle [1, 6+9] oprzyrządowane jedynie na wlocie i wylocie, procedura wykrywania przecieków musi opierać się na danych pomiarowych prędkości przepływu masowego [kg s^{-1}] i ciśnienia [Nm^{-2}], osiąganych tylko na wejściu i wyjściu rurociągu, oraz na informacji o dynamice procesu i parametrach rurociągu.

Wyciek w jednej z sekcji odcinka rurociągu wywołuje zmianę w procesie przepływu medium określaną jako tzw. *fala rozprężeniowa* [2]. Prowadzi ona do nowego stanu ustalonego wywołując jednocześnie zmiany następujących parametrów przepływu na wlocie i wylocie obserwowanego rurociągu [8]:

- przepływ masowy na wlocie Q_{in} wzrasta,



Rys. 1. Rozkład ciśnienia w poziomym rurociągu



Rys. 2. Ewolucja prędkości przepływu na wejściu i wyjściu rurociągu po pojawieniu się wycieku: ΔQ_{in} i ΔQ_{ex} – przyrosty przepływu oraz Q_{in}° Q_{ex}° – parametry stanu ustalonego na wejściu i wyjściu; $t = k \Delta t$ – dyskretne momenty czasu; Δt – okres próbkowania

- przepływ na wlocie Q_{ex} zmniejsza się,
- ciśnienie wlotowe P_{in} nieco się zmniejsza,
- ciśnienie wylotowe P_{ex} może podnieść się.

Na rys. 1 przedstawiono wpływ wycieku w odległości z^* na rozkład ciśnienia wzdłuż rurociągu po osiągnięciu nowego stanu ustalonego. Widać, że linia (o stałym nachyleniu) wskutek wycieku „zmienia się” w łamaną, którą wyznaczają dwie linie (o odmiennym nachyleniu) przecinające się w miejscu wycieku. Z kolei zmiany wielkości przepływu masowego Q na wlocie i wylocie rurociągu zachodzące w czasie przedstawiono na rys. 2.

Teoretyczne podstawy detekcji wycieków

Widać zatem, że pomiary wielkości przepływu i ciśnienia mogą być podstawą analizy prowadzącej do detekcji i lokalizacji przecieków w rurociągach. Oceny wielkości wycieku można dokonać na podstawie różnicy przepływów pomiędzy wejściem i wyjściem w dyskretnych momentach czasu $t = k\Delta t$

$$\hat{q}^*(k) \equiv Q_L(k) = Q_{in}(k) - Q_{ex}(k) \quad (1)$$

Położenie miejsca wycieku natomiast można wyznaczyć na podstawie oceny punktu przecięcia dwu linii spadku ciśnienia w rurociągu (rys. 2) lub za pomocą odpowiedniej relacji związanej z ΔQ_{in} i ΔQ_{ex} [por. wzór (12)], która wynika bezpośrednio z dynamicznych (czasowych) charakterystyk fali rozprężeniowej [2] – rys. 2. Ponieważ bezpośrednie skorzystanie z ww. obserwacji nie jest możliwe ze względu na dynamikę obserwowanego procesu oraz towarzyszące mu zakłócenia i szumy, zachodzi konieczność zastosowania odpowiednich metod detekcji opierających się na dostępnych danych oraz filtracji.

Model rurociągu

Matematyczny opis dynamiki przepływu jest oparty na analizie zjawisk w rurociągach gazowych [1, 9] i cieczowych [7].

Dynamikę elementarnej sekcji rurociągu, scharakteryzowanej w tabeli, można wyrazić za pomocą układu cząstkowych równań różniczkowych, które można wywieść z zasad zachowania masy oraz pędu [1, 6]:

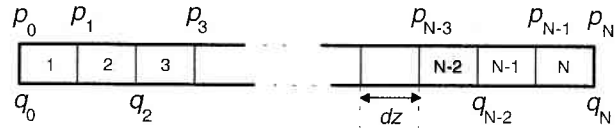
$$\frac{A_F}{c_F^2} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{1}{A_F} \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial z} = -\frac{\lambda c_F^2}{2d_F A_F^2} \frac{q|q|}{p} - \frac{g \sin \alpha_F}{c_F^2} p \quad (3)$$

Parametry rurociągu

Znaczenie	Symbol	Jednostka
Współrzędne wysokości	h	m
Współrzędne długości	z	m
Zmienna czasu	t	s
Średnica sekcji	d_F	m
Przekrój sekcji	$A_F = \pi d_F^2 / 4$	m ²
Wysokość sekcji	h_F	m
Ciśnienie	$p(z, t)$	Nm ⁻²
Gęstość	$\rho(z, t)$	kgm ⁻³
Prędkość masowa	$q(z, t) = dM/dt$	kg s ⁻¹
Prędkość dźwięku	$c_F = \sqrt{p/\rho}$	ms ⁻¹
Współczynnik tarcia	λ	–

Podział odcinka rurociągu o długości Z na N (parzystą) liczbę sekcji o długości $\Delta z = Z/N$ (rys. 3) oraz przyjęcie centralnych różnic skończonych w miejsce różniczek [1]



Rys. 3. Podział rurociągu i jego zmienne stanu

$$\left. \frac{\partial x}{\partial t} \right|_{z=n\Delta z, t=k\Delta t} = \frac{3x_n^{k+1} - 4x_n^k + x_n^{k-1}}{2\Delta t} \quad (4)$$

$$\left. \frac{\partial x}{\partial z} \right|_{z=n\Delta z, t=k\Delta t} = \frac{x_{n+1}^{k+1} - x_{n-1}^{k+1} + x_{n+1}^k - x_{n-1}^k}{4\Delta z} \quad (5)$$

pozwała na określenie przestrzenno-stanowego dyskretnego modelu przepływu dowolnego medium w rurociągu [1, 6]

$$\mathbf{A}\mathbf{x}^{k+1} = \mathbf{B}\mathbf{x}^{k-1} + \mathbf{C}(\mathbf{x}^k, \lambda, \mathbf{h})\mathbf{x}^k + \mathbf{D}(\mathbf{h})\mathbf{u}^k + \mathbf{E}\mathbf{u}^{k+1} \quad (6)$$

gdzie:

$$\mathbf{x}^k = [q_0^k \ q_2^k \ \dots \ q_N^k \ p_1^k \ p_3^k \ \dots \ p_{N-1}^k]^T$$

$$\mathbf{u}^k = [p_0^k \ p_N^k]^T$$

oraz \mathbf{x}^{k+1} i \mathbf{u}^{k+1} oznaczają odpowiednio wektor stanu i wektor wejściowy w k -tym momencie czasu, macierze $\mathbf{A} + \mathbf{E}$ są funkcjami parametrów $A = A_F$, $c = c_F$, Δt oraz Δz . Macierze \mathbf{C} i \mathbf{D} zależą od wektorów współczynnika korekcji wysokościowej rurociągu \mathbf{h} , a \mathbf{C} zależy od wektora współczynników tarcia λ i wewnętrzny stanu (q_i^k i p_i^k) poszczególnych sekcji [6].

W przypadku wycieku o stałym wydatku q^* w n -tej sekcji stosuje się model

$$\mathbf{x}^{k+1} = \mathbf{A}^{-1}[\mathbf{B}\mathbf{x}^{k-1} + \mathbf{C}\mathbf{x}^k + \mathbf{D}\mathbf{u}^k + \mathbf{E}\mathbf{u}^{k+1}] - \mathbf{f}_n q^* \quad (7)$$

w którym wektor \mathbf{f}_n zależy od miejsca wycieku oraz parametrów A , c , Δt i Δz .

Metody modelowe

Biorąc pod uwagę model (7) całego rurociągu (wszystkich jego sekcji) z wyciekami włącznie, wektor oddziaływania wycieku (\mathbf{f}_n) może być oceniony metodą filtrów modelujących błąd (*fault model*) poprzez odwrotne wyznaczenie wektora stanu lub bezpośrednio zastosowanie filtrów stanowych. W warunkach szumowych można tego dokonać na przykład za pomocą baterii filtrów modelujących różne lokalizacje wycieku [1, 10]. Jest to jednak związane ze znaczną złożonością obliczeniową.

W metodzie analitycznej redundancji [3, 9] filtry residualne (*fault sensitive*) pozwalają na analizę i nadzór reszt będących różnicami pomiędzy pomierzonymi Q_{in} i estymowanymi \hat{Q}_{in} prędkościami przepływu masowego

$$\Delta Q_{in} = Q_{in} - \hat{Q}_{in} \quad \text{i} \quad \Delta Q_{ex} = Q_{ex} - \hat{Q}_{ex}$$

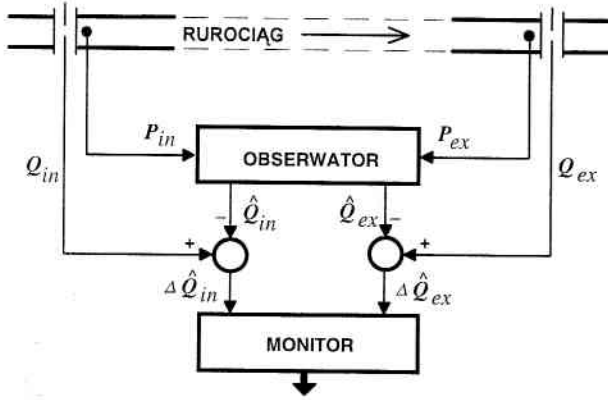
W przypadku przecieku residua zmieniają się w określonym kierunku. Jednak po pewnym czasie, wskutek kompensacji wycieku przez filtr stanowy sygnał residualny może zaniknąć [4]. W podstawowej postaci stosuje się liniowe filtry stanowe oparte na zlinearyzowanym modelu (7). Dlatego też takie podejście jest odpowiednie tylko dla warunków ustalonych.

Do wykrywania wycieków przy transporcie rozmaitych mediów (gazów i cieczy) w różnych warunkach pracy bardziej stosowne są nieliniowe obserwatory opierające się na nieliniowych modelach procesu przepływu medium. W modelu (6) większość współczynników może być określona z wystarczającą dokładnością, z wyjątkiem współczynników tarcia λ (związanych z dys-

krętną przestrzenią, tj. z poszczególnymi sekcjami rurociągu), które mogą się zmieniać w czasie. Dlatego współczynniki te powinny być estymowane na bieżąco.

Metoda korelacyjno-modelowa

Opierając się na przedstawionym uprzednio rozumowaniu dochodzi się do metody detekcji wycieków z zastosowaniem adaptacyjnego nieliniowego obserwatora [1], służącego do wyznaczenia residuów ΔQ_{in} i ΔQ_{ex} w strukturze pokazanej na rys. 4. Dodatkową zaletą takiego podejścia jest to, że estymowane współczynniki tarcia nie zmieniają równania bilansowego masy (2) rozważanej sekcji. Dzięki temu skutki wycieku nie są kompensowane przez obserwator, a równanie bilansowe pędu (3) jest wykorzystywane do estymacji wartości współczynników λ .



Rys. 4. Monitoring z zastosowaniem obserwatora

Na podstawie (6) można określić równanie nieliniowego adaptacyjnego obserwatora

$$\hat{x}^{k+1} = A^{-1} [B\hat{x}^k + C(\hat{x}^k, \hat{\lambda}, h)\hat{x}^k + D(h)u^k + E u^{k+1}] \quad (8)$$

$$\hat{y}^{k+1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 1 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \hat{x}^{k+1}$$

oraz wartość resztową (residuum)

$$e^k = y^{k+1} - \hat{y}^{k+1} \quad (9)$$

gdzie

$$\begin{aligned} u^k &= [p_0^k \ p_N^k]^T = [P_{in}(k) \ P_{ex}(k)]^T \\ \hat{y}^k &= [\hat{q}_0^k \ \hat{q}_N^k]^T = [\hat{Q}_{in}(k) \ \hat{Q}_{ex}(k)]^T \\ y^k &= [q_0^k \ q_N^k]^T = [Q_{in}(k) \ Q_{ex}(k)]^T \\ e^k &\triangleq [\Delta \hat{Q}_{in}(k) \ \Delta \hat{Q}_{ex}(k)]^T \end{aligned} \quad (10)$$

Widać, że oceniany wektor prędkości przepływu \hat{y} (oraz wektor resztowy e) jest wyznaczany za pomocą nieliniowej funkcji wektorów ostatnich stanów x i wejść u oraz wektora korekcji wysokości h i wektora współczynników tarcia λ .

Wystarczająco wrażliwy algorytm detekcji wycieku można oprzeć [8] na rekursywnej wersji metody korelacji wzajemnej w odstępnie κ -krokowym dla sygnałów $\Delta \hat{Q}_{in}$ i $\Delta \hat{Q}_{ex}$ ze stałą zapominania μ oraz na dodatkowym nierekursywnym uśrednianiu (które również służy filtracji szumów):

$$\hat{\Phi}_{ie}(\kappa, k) = \mu \hat{\Phi}_{ie}(\kappa, k-1) + (1-\mu) \Delta \hat{Q}_{in}(k) \Delta \hat{Q}_{ex}(k+\kappa)$$

$$\bar{\Phi}_{ie}(k) = \frac{1}{2M+1} \sum_{\kappa=-M}^M \hat{\Phi}_{ie}(\kappa, k) \quad (11)$$

gdzie M – parametr określający przedział uśredniania.

W przypadku bezawaryjnej pracy rurociągu wartość funkcji autokorelacji $\bar{\Phi}_{ie}(k)$ jest bliska zeru. Wystąpienie wycieku natomiast powoduje zmianę tej funkcji w kierunku ujemnym. Zatem decyzję o alarmie podejmuje się wówczas, gdy $\bar{\Phi}_{ie}(k)$ przekracza pewien próg alarmowy Φ_e zdefiniowany *a priori*.

Po wykryciu alarmu (wycieku) zamarza się wartość estymowanego parametru λ , a następnie dokonuje się:

– oceny miejsca wycieku

$$\hat{z}_L(k) = Z \{1 - [\bar{\Phi}_{in}(k) / \bar{\Phi}_{ex}(k)]\}^{-1} \quad (12)$$

na podstawie funkcji autokorelacji wyznaczonej odpowiednio dla wejścia *in* i wyjścia *ex*

$$\hat{\Phi}_{nn}(\kappa, k) = \mu \hat{\Phi}_{nn}(\kappa, k-1) + (1-\mu) \Delta \hat{Q}_{nn}(k) \Delta \hat{Q}_{nn}(k+\kappa)$$

$$\bar{\Phi}_{nn}(k) = \sum_{\kappa=-M}^M \hat{\Phi}_{nn}(\kappa, k) \quad (13)$$

– oceny prędkości wycieku masowego

$$\hat{Q}_L(k) = \beta \hat{Q}_L(k-1) + (1-\beta) \tilde{Q}_L(k) \quad (14)$$

$$\tilde{Q}_L(k) = \Delta \hat{Q}_{in}(k) - \Delta \hat{Q}_{ex}(k)$$

Ocena współczynników tarcia

Ponieważ wartość niemierzalnego współczynnika tarcia λ zależy zarówno od lokalizacji danej sekcji rurociągu, jak i od zmiennych w czasie warunków zewnętrznych (temperatury, rodzaju powierzchni ścian rurociągu itd.), najbardziej wskazana jest estymacja jego wartości na bieżąco. Znany jest jedynie przedział (0,02+0,06), w którym mieszczą się wartości współczynników tarcia.

Przy podziale odcinka rurociągu na parzystą liczbę N sekcji elementarnych, współczynniki λ – służąc do wyznaczania wartości przepływu masowego na podstawie równania bilansowego pędu (3) – występują tylko w liczbie $(N/2 + 1)$ równań odnoszących się do pierwszej części wektora stanu x modelu rurociągu (6).

Wyrażając model (6) w postaci

$$x^{k+1} = A^{-1} [Bx^k + C_1(h)x^k + C_2(x^k, \lambda)x^k + D(h)u^k + E u^{k+1}] \quad (15)$$

uzyskuje się proste statyczne równanie liniowe

$$x^{k+1} = x_0^{k+1} + M^{k+1} I^{k+1} \quad (16)$$

gdzie:

$$\begin{aligned} x_0^{k+1} &= A^{-1} [Bx^{k-1} + C_1(h)x^k + D(h)u^k + E u^{k+1}] \\ M^{k+1} &= A^{-1} C_2(x^k) \end{aligned} \quad (17)$$

$$I^{k+1} = [\lambda_0^{k+1} \ \lambda_2^{k+1} \ \dots \ \lambda_N^{k+1}]^T$$

Równanie (16) przedstawione w postaci równania regresji

$$v^{k+1} = M^{k+1} I^{k+1} \quad (18)$$

gdzie $v^{k+1} = x^{k+1} - x_0^{k+1}$ pozwala na identyfikację wektora I odpowiednimi metodami nierekursywnej lub rekursywnej estymacji parametrycznej (np. metodami LS lub RLS).

Wybór metody estymacji λ . W celu uzyskania najbardziej odpowiedniej metody identyfikacji zbadano działanie różnych estymatorów (rekursywnych i nierekursywnych opartych na metodzie najmniejszych kwadratów). Identyfikacja współczynni-

ków λ we wszystkich elementarnych sekcjach wymaga dużej złożoności obliczeniowej, która jest związana z koniecznością zastosowania estymatorów równoległych lub estymatorów wielowymiarowych.

Przy tym, ze względu na dynamikę procesu estymacji parametrycznej, potrzebny jest również odporny system nadzorowania wyników estymacji ($\hat{\lambda}$) o specjalnych własnościach zapewniających: ograniczenie zakresu zmian $\hat{\lambda}$, ograniczenie maksymalnego skoku zmian $\hat{\lambda}$ w każdej z iteracji algorytmu estymacji, dodatkową filtrację pomiarów itp., aby zminimalizować niepewność wyniku estymacji. Niepewność ta może być przyczyną niestabilnego wyniku obserwacji stanów. Wprowadzenie tego rodzaju „ostrożnego” systemu nadzorowania w równoległych ważonych (rekursywnych) algorytmach nie umożliwiło jednak skutecznej detekcji, gdyż zrealizowany (na podstawie zidentyfikowanych wartości współczynników $\hat{\lambda}$) obserwator stanów stał się układem niestabilnym lub na granicy stabilności.

Dlatego, aby uprościć obliczenia i uzyskać skuteczną detekcję oraz jednocześnie uwzględnić dopasowanie estymatora do zmieniających się warunków pracy, proponuje się:

- przyjęcie założenia o jednakowej wartości współczynnika λ we wszystkich elementarnych sekcjach rurociągu;
- przyjęcie założenia, które pozwala na zastosowanie (w bieżącym $(k+1)$ -szym momencie czasu na podstawie bieżących danych) estymacji nierekursywnej (w sensie przestrzennym, tj. wzdłuż długości rurociągu);
- zawarcie dynamiki (tj. zmian w czasie uwzględniających historię) przebiegu estymat $\hat{\lambda}$ w odrębnym filtrze rekursywnym o ograniczonej pamięci.

Metoda estymacji uogólnionego λ

Zakładamy zatem, że w danej chwili współczynniki tarcia w każdej sekcji rurociągu są takie same (niezmienne w przestrzeni, choć zmienne w czasie) i przyjmują wartość uogólnionego współczynnika tarcia λ . Wektor l^{k+1} w (17) uzyskuje wówczas postać

$$l^{k+1} = [\lambda_0^{k+1} \lambda_1^{k+1} \dots \lambda_N^{k+1}]^T = [\lambda^{k+1} \lambda^{k+1} \dots \lambda^{k+1}]^T \quad (19)$$

Założenie powyższe wydaje się słuszne tym bardziej, że celem bieżącej oceny współczynników tarcia jest przede wszystkim eliminacja błędów modelowania przepływu w rurociągu.

Syntezy dwu niezależnych nierekursywnych (sub-)algorytmów oceny λ w bieżącym momencie $k+1$ można dokonać biorąc pod uwagę to, że wektor x^{k+1} zawiera dwie prędkości przepływu (wejściową i wyjściową), [6]

$$y^{k+1} = [q_0^{k+1} q_N^{k+1}]^T = [Q_{in}(k+1) Q_{ex}(k+1)]^T$$

które stanowią dwie osiągalne wielkości pomiarowe, oraz przyjmując kryterium optymalizacji (funkcję strat) w postaci kwadratu residuum, odpowiednio dla wejścia ΔQ_{in} i wyjścia ΔQ_{ex} – por. też wzór (9),

$$\begin{aligned} I_0^{k+1}(\lambda) &= \Delta \hat{Q}_{in}^2(k+1) = (q_0^{k+1} - \hat{q}_0^{k+1})^2 \\ I_N^{k+1}(\lambda) &= \Delta \hat{Q}_{ex}^2(k+1) = (q_N^{k+1} - \hat{q}_N^{k+1})^2 \end{aligned} \quad (20)$$

gdzie

$$\begin{aligned} \hat{q}_0^{k+1} &= x_0^{k+1} [1, 1] + \hat{\lambda}^k \sum_i^{N/2+1} M[1, i] \\ \hat{q}_N^{k+1} &= x_N^{k+1} [N/2 + 1, 1] + \hat{\lambda}^k \sum_i^{N/2+1} M[N/2 + 1, i] \end{aligned} \quad (21)$$

a q_0^{k+1}, q_N^{k+1} są pomiarami przepływu w chwili $k+1$.

Minimalizacja funkcji (20) prowadzi do układu równań

$$\frac{\partial I_j^{k+1}(\lambda)}{\partial \lambda} = 0; \quad j = 0, N \quad (22)$$

Dwie optymalne wartości współczynnika tarcia λ uzyskane w wyniku rozwiązania (22) pozwalają (po arytmetycznym uśrednieniu) na jednoznaczne określenie wartości uogólnionego współczynnika tarcia rurociągu λ w chwili bieżącej. Poza tym w celu uwzględnienia dynamiki zmian tego parametru w czasie przyjmujemy się, że ostateczny wynik śledzenia λ jest zrealizowany za pomocą filtru rekursywnego (uśrednienia z zapamiętaniem). Zatem ostateczna wersja estymatora ma postać

$$\hat{\lambda}^{k+1} = \eta \hat{\lambda}^{k+1} + (1 - \eta)(w_0^{k+1} + w_N^{k+1})^{0,5} \quad (23)$$

gdzie:

$$\begin{aligned} w_0^{k+1} &= v_0^{k+1} [1, 1] / \sum_i^{N/2+1} M^{k+1} [1, 1] \\ w_N^{k+1} &= v_N^{k+1} [N/2 + 1, 1] / \sum_i^{N/2+1} M^{k+1} [N/2 + 1, 1] \end{aligned}$$

a parametr η jest odpowiednio dobranym współczynnikiem zapominania.

Po sygnalizacji wykrycia wycieku wartość λ jest zamrażana – poprzez nadanie współczynnikowi wartości uzyskanej w poprzedniej iteracji algorytmu estymacji.

Faza inicjalizacji detekcji. Bezpośrednio po rozpoczęciu działania algorytmu detekcji, z powodu niedokładności estymacji parametru λ , dokładność obserwatora jest niewystarczająca, a wyniki detekcji nieakceptowalne – aż do zakończenia fazy inicjalizacyjnej. Jako kryterium zakończenia fazy inicjalizacji i rozpoczęcia detekcji można przyjąć warunek

$$|\hat{\lambda}_{Avr}^{k+1} - \hat{\lambda}^{k+1}| \approx 0 \quad (24)$$

gdzie

$$\hat{\lambda}_{Avr}^{k+1} = 0,99 \hat{\lambda}_{Avr}^k + (1 - 0,99) \hat{\lambda}^{k+1}$$

lub

$$\bar{\Phi}_{ie}(k) \approx 0 \quad (25)$$

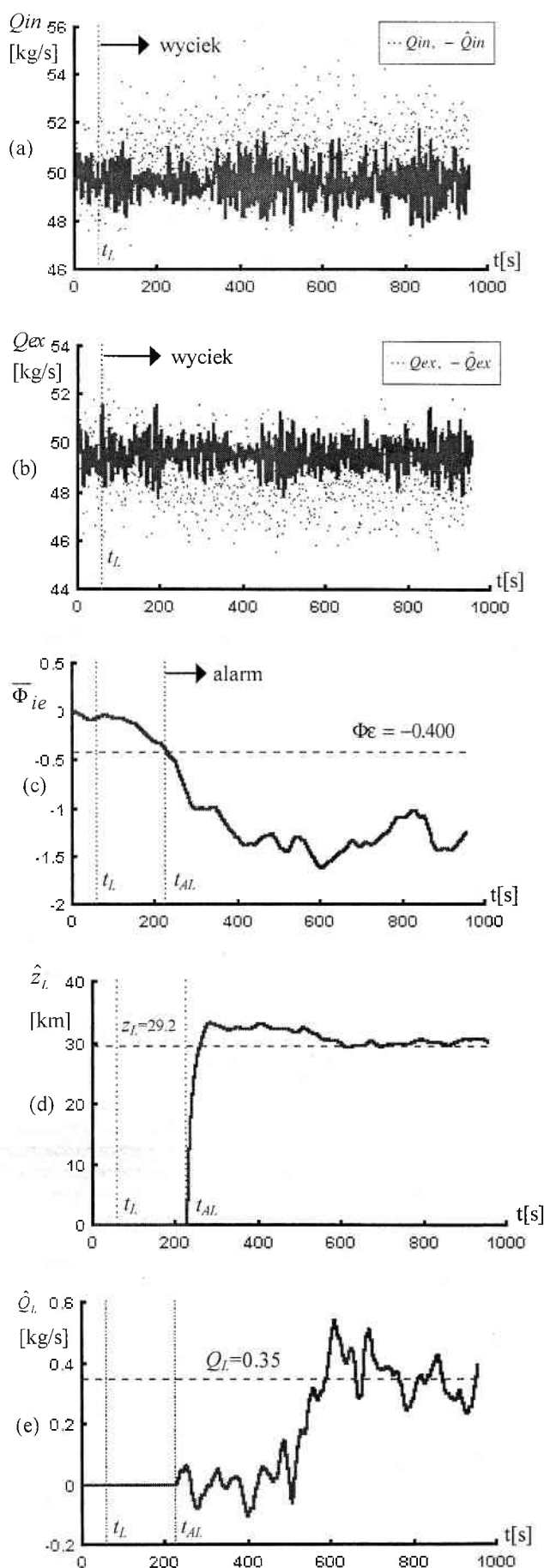
Kryterium (25) wydaje się bardziej odpowiednie, gdyż uwzględnia również procesy przejściowe zachodzące w całym algorytmie detekcji.

Wyniki symulacji

Weryfikacji poprawności działania omawianego algorytmu dokonano opierając się na symulatorze, w którym symuluje się odcinek rurociągu (opisany za pomocą parametrów fizycznych i warunków początkowych ciśnienia) i generuje pomiary ciśnienia i przepływu masowego na obu krańcach symulowanego odcinka. Wysyłane na bieżąco przez symulator pomiary są udostępniane algorytmowi detekcji poprzez mechanizm DDE w systemie WINDOWS. Pomiary zostały zaburzone białym szumem gaussowskim o zerowej wartości średniej i o zmiennej dyspersji równej 4%- wartości każdego z poszczególnych pomiarów.

W rozważanym przypadku symulator generuje pomiary z rurociągu, który jest opisany następującymi parametrami: $Z = 65$ km, $d = 1,79$ m, $\rho = 966,65$ kgm⁻³ i $c = 1441$ ms⁻¹. W celu uproszczenia badań przyjęto, że uogólniony współczynnik tarcia symulowanego rurociągu ma wartość $0,0300 \pm 5\%$, a wektor korekcji wysokościowej jest zerowy $h = 0$ (6).

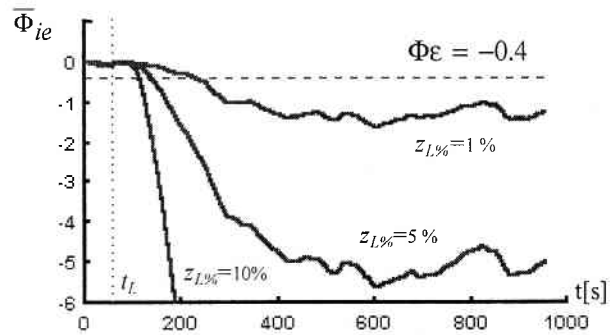
Poprawność algorytmu detekcji. Na rys. 5 przedstawiono przebiegi czasowe wartości pomiarów Q_{in} , Q_{ex} oraz wartości estymat \hat{Q}_{in} , \hat{Q}_{ex} , $\bar{\Phi}_{ie}$, $\hat{\lambda}$, \hat{Q}_L . Wyciek o wartości średniego natężenia $Q_L = 0,35$ kgs⁻¹ (0,7%) został zasymulowany w czasie $t_L = 60$ s, w odległości $z_L = 29,25$ km od początku modelowanego odcinka rurociągu. Symulację prowadzono z ustaloną *a priori* (po-

Rys. 5. Wyniki estymacji dla ustalonego λ

przez wcześniejsze estymacje) wartością λ i przy założeniu, że nie ma błędów modelowania (pozostałe parametry rurociągu są dokładnie znane). A zatem estymator współczynnika tarcia jest wyłączony.

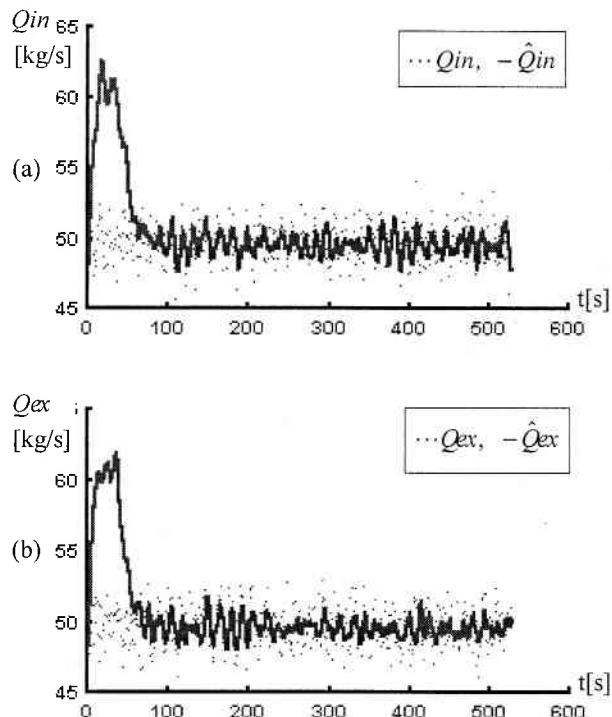
Przebiegi w rys. 5a-e potwierdzają poprawność działania algorytmu detekcji. Przy $\Phi_{ie} = -0,400$ wyciek został wykryty po 166 s, w momencie $t_{AL} = 227$, a estymaty natężenia wycieku \hat{Q}_L i lokalizacji wycieku \hat{z}_L zbiegły do wartości rzeczywistych w ciągu kilku minut.

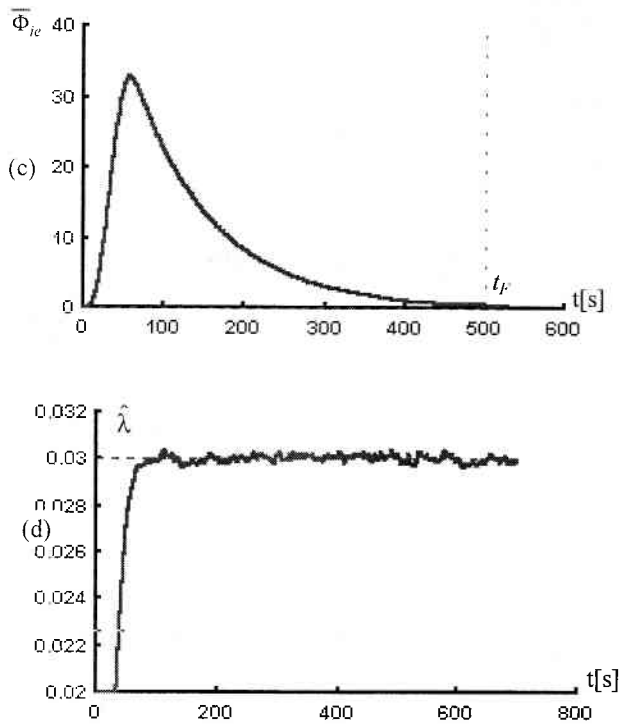
Wybór progu alarmowego Φ_{ie} Z analizy pokazanych na rys. 6 charakterystyk Φ_{ie} przy różnych intensywnościach wycieków ($z_{L\%} = 1\%, 2\%, 5\%$) dla tego samego rurociągu można wnioskować, iż wybór Φ_{ie} zależy nie tylko od poziomu szumów, ale również od progu minimalnej intensywności wycieku, który ma być przez algorytm detekcji wykrywany. Im mniejsza jest wartość Φ_{ie} tym większe jest ryzyko fałszywych alarmów, natomiast większa wartość Φ_{ie} może powodować znaczne opóźnienie momentu wykrycia przecieków.



Rys. 6. Wybór progu alarmowego w zależności od wielkości wycieku

Faza inicjalizacji. Na rys. 7 zostały przedstawione przebiegi pomiarów Q_{in} , Q_{ex} i estymat \hat{Q}_{in} , \hat{Q}_{ex} , $\hat{\Phi}_{ie}$, $\hat{\lambda}$ w fazie inicjalizacji. W fazie tej, w celu uniknięcia nagłych zmian estymat stanu lub niestabilności obserwatora, w układzie identyfikacji λ , ograni-

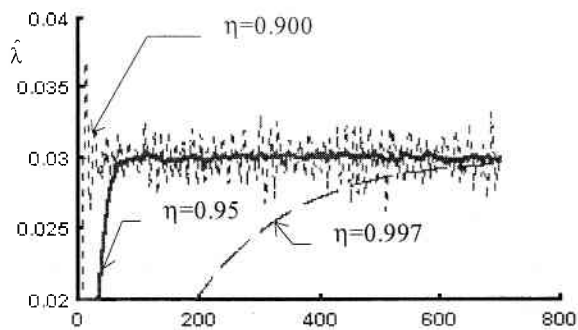
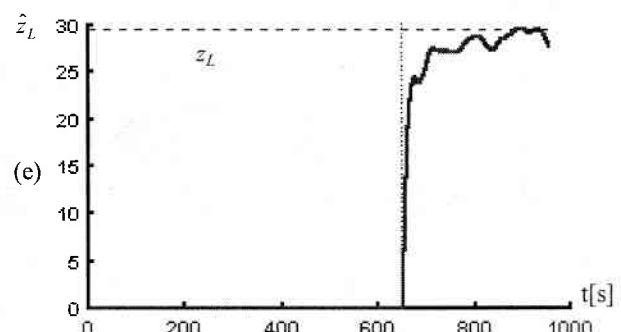
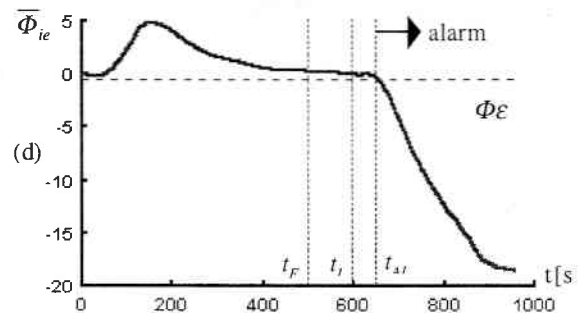
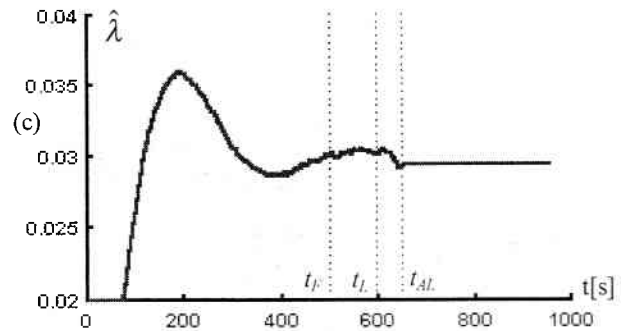
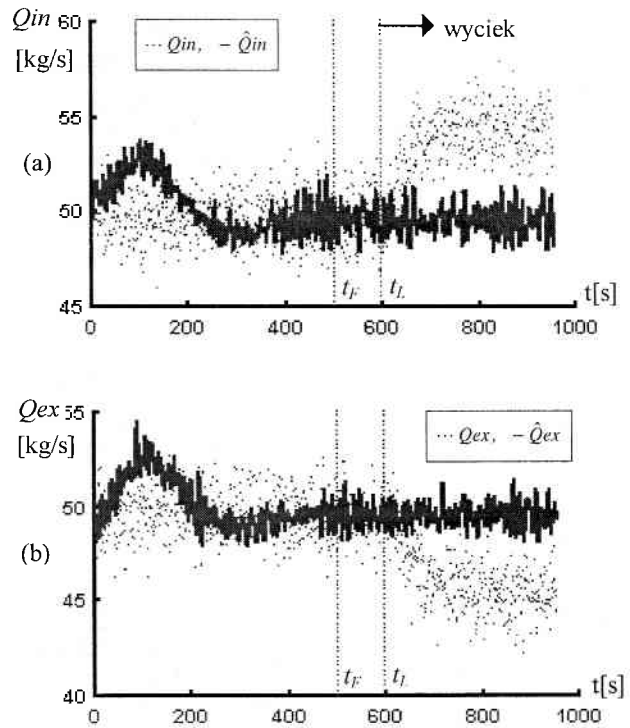




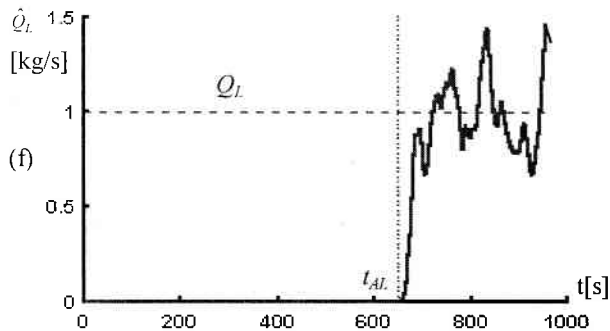
Rys. 7. Przebiegi w fazie inicjalizacji

czono wielkość zmian wartości $\hat{\lambda}$ do zakresu (od 0,0200 do 0,0600). Jak wyidać na rys. 7a, b, d, wielkości \hat{Q}_{in} i \hat{Q}_{ex} oraz $\hat{\lambda}$ uzyskiwały stabilne wartości w ciągu ok. 100 s. Natomiast, jak widać na rys. 7c, według kryterium (25) wyników detekcji nie można było akceptować do chwili $t_F = 500$ s. Do tego momentu układ detekcji dostarczał nieprawidłowe estymaty \hat{Q}_L i \hat{z}_L .

Wpływ η (stałej zapominania estymatora $\hat{\lambda}$). Na rys. 8 zostały przedstawione przebiegi $\hat{\lambda}$ (w fazie inicjalizacji) przy różnych η z (23). Zbyt mała wartość η ($\eta = 0,900$) prowadzi do niestabilnego przebiegu estymaty $\hat{\lambda}$ i do oscylacyjnej pracy obserwatora stanów – z powodu niespełnienia kryteriów (24) i (25). Zbyt duża wartość ($\eta = 0,997$) jest powodem bardzo długiego czasu fazy inicjalizacji. Należy zatem wybrać optymalną $\hat{\lambda}$, która pozwala spełnić kryterium końca w możliwie najkrótszym czasie.

Rys. 8. Wpływ stałej zapominania η na estymację $\hat{\lambda}$ 

Detekcja z bieżącą estymacją $\hat{\lambda}$. Na rys. 9 zostały przedstawione wyniki symulacyjnego działania układu detekcji począwszy od fazy inicjalizacji do momentu detekcji wycieku. Fazę inicjalizacji zakończono w $t_F = 500$ s, a w $t_L = 600$ s zasymulowano wyciek o intensywności $Q_L = 1$ kgs⁻¹ (o średniej wartości 2%)



Rys. 9. Przebieg detekcji wycieku z estymacją współczynnika tarcia λ

w $z_L = 29,25$ km od początku wybranej sekcji rurociągu. Przy wartości $\Phi_e = -0,4$ w ciągu 55 s ($t_{AL} = 655$ s) uzyskano alarm o wykryciu wycieku, po czym został zamrożony współczynnik λ (rys. 9c).

Podsumowanie

Stosując matematyczny model przepływu i adaptacyjny obserwator stanu opracowano algorytmiczną metodę korelacyjno-modelową do detekcji i lokalizacji małego wycieku w długim rurociągu. W celu kompensacji niedokładności modelowania zastosowano ocenę niemierzalnego współczynnika tarcia, którą uzyskuje się w wyniku estymacji parametrycznej. Modelową poprawność działania zintegrowanego algorytmu estymacji i detekcji zilustrowano metodą symulacyjną.

Właściwe działanie algorytmu detekcji wymaga zastosowania odpowiednich procedur strojenia. Model matematyczny procesu

przepływu medium w rurociągu powinien być tak dobrany, aby poprawnie określał stan bezawaryjnej pracy układu, a algorytm detekcji powinien być tak dostrójony, aby był wrażliwy na pojawiające się wycieki i jednocześnie odporny na zakłócenia. Dobór wartości parametrów przetwarzania musi być zatem związany z kompromisem między dokładnością i szybkością ocen parametrów detekcji diagnozowanego procesu.

LITERATURA

- [1] L. BILLMANN, R. ISERMANN: Leak detection methods for pipelines. *Automatica* 1987, t. 23, nr 3, s. 381–385.
- [2] E. FARMER: Pressure point analysis – a new leak detection tool. API Pipeline Conf. (American Petroleum Institute). Dallas 1989.
- [3] J. GERTLER, M. COSTIN, X-W. FANG, R. HIRA, Z. KOWALCZUK, Q. LUO: Model-based on-board fault detection and diagnosis for automotive engines. *Control Engineering Practice* 1993, t. 1, nr 1, s. 3–17.
- [4] R. ISERMANN: Process fault detection based on modelling and estimation methods – A survey. *Automatica* 1984, t. 20, nr 4, s. 387–404.
- [5] Z. KOWALCZUK, J. GERTLER: Generating analytical redundancy for fault detection systems using flow graphs. IFAC Symp. Low Cost Automation. Vienna 1992, s. 385–390.
- [6] Z. KOWALCZUK, K. GUNAWICKRAMA: Wykrywanie przecieków w transporcie gazów i płynów. I Kraj. Konf. Naukowa: „Diagnostyka Procesów Przemysłowych”. Podkowa Leśna 1996, s. 147–154.
- [7] W. KRASS, A. KITTLE, A. UHDE: Pipelinetechnik. Verlag TUV Rheinland, Köln 1979.
- [8] H. SIEBERT, T. KLAIBER: Testing a method for leakage monitoring of a gasoline pipeline. *Process Automation* 1980, s. 91–96.
- [9] A. WEIMANN: Modellierung und Simulation der Dynamik von Gasverteilnetzen im Hinblick auf Gasnetzführung und Gasnetzüberwachung. Dissertation TU München. 1978.
- [10] A. S. WILSKY: A survey of design methods for failure detection in dynamic systems. *Automatica* 1976, t. 12, s. 601–611.