ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1982

Seria: AUTOMATYKA z. 65 Nr kol. 738

Krzysztof GDULA

Politechnika Śląska

ZASTOSOWANIE PROGRAMOWANIA LINIOWEGO DO DETEKCJI BŁĘDÓW GRUBYCH PRZYRZĄDÓW POMIAROWYCH I PRZECIEKÓW BILANSOWANYCH PROCESÓW PRZEMYSŁOWYCH

Streszczenie. Rachunek wyrównawczy służy do takiego korygowania danych, aby były spełnione równania bilansu masowego i energetycznego. Problem ten może być przedstawiony jako zadanie programowania liniowego, jeżeli jako funkcji celu, którą należy minimalizować, użyje się sumy ważonych bezwzględnych wartości poprawek wyników pomiarów. W artykule rozważono możliwość wykrywania błędów grubych przyrządów pomiarowych oraz przecieków instalacji.

1. Wstęp

Pomiary zmiennych procesowych mają podstawowe znaczenie dla automatyzacji procesów przemysłowych. Niedokładne dane pomiarowe mogą doprowadzić do błędnych ocen i decyzji dotyczących sposobu prowadzenia procesu. Te oceny i decyzje wynikają ze znajomości przepływów kumulatywnych masy lub energii między instalacjami. Przepływem kumulatywnym masy lub energii między dwiema instalacjami za dany okres czasu, np. zmianę lub dobę, nazywa się całkowitą ilość masy lub energii przekazanej z jednej instalacji do drugiej w ciągu tego czasu. Kumulatywne natężenia przepływów, otrzymane w wyniku pomiarów i przetwarzania podstawowego zebranych zmiennych procesowych, na ogół nie bilansują się. Brak zbilansowania spowodowany może być przez:

a) małe błędy przypadkowe wynikające z klasy dokładności przyrządów pomiarowych,
b) błędy grube wynikające z uszkodzenia przyrządów lub braku skorygowania błędów systematycznych,
c) przecieki instalacji.

W obszernej literaturze dotyczącej zagadnienia bilansowania strumieni materiałowych i energetycznych problem detekcji błędów grubych przyrządów pomiarowych i przecieków instalacji jest na ogół pomijany. Autorowi, jak dotąd, udało się dotrzeć do 3 artykułów ([4], [5], [8]), w których problem ten jest rozważany.

W [5] i [8] rozpatrywana jest tylko detekcja błędów grubych, przy czym nie bierze się pod uwagę możliwości istnienia cykli przepływów, których pomiary obarczone są tymi błędami.

W [8] nie proponuje się żadnego testu do wykrywania błędów grubych (podejrzane przepływy ma wskazać operator procesu), natomiast w [5] stwierdza się, że niespodziewanie wysoka wartość funkcji celu (będącej miarą odchyłek wartości zmierzonych od skorygowanych) wskazuje, że pewne pomiary są obarczone błędami grubymi. Wadą tego testu jest trudność w stwierdzeniu, czy ta wysoka wartość pochodzi od wielu błędów przypadkowych czy kilku grubych.

W [4] proponowany jest podobny test, ale stosowany dla każdego węzła oddzielnie, co zmniejsza (ale nie eliminuje) niebezpieczeństwo nieodróżnienia błędu grubego od kilku przypadkowych. Dla celów detekcji przecieków i przepływów, których pomiary są obarczone błędami grubymi, opracowano w tym artykule algorytm analizy grafu procesu przemysłowego. W algorytmie tym testuje się zagregatyzowane węzły (bloki kilku węzłów traktowanych jako jeden węzeł). Obliczenia wyrównawcze wykonuje się korzystając z mnożników Lagrange'a dla funkcji celu będącej sumą ważonych kwadratów odchyłek wartości zmierzonych od skorygowanych. Brak ograniczeń na natężenia przepływów skorygowanych może doprowadzić do nadania tym przepływom wartości ujemnych.

2. Zastosowanie programowania liniowego w rachunku wyrównawczym

Zależność

$$\underline{A}_z \cdot \underline{m} = \underline{0} \tag{2.1}$$

gdzie $\underline{m}$ - wektor natężeń przepływów, $\underline{A}_z$ - zredukowana macierz incydencji (patrz załącznik I), jest układem równań bilansowych dla wszystkich węzłów sieci otwartej. W rzeczywistych procesach przepływy są mierzone (do tej grupy zaliczane są przepływy, których natężenia są mierzone bezpośrednio lub wyznaczane na podstawie przetwarzania zbioru innych, pomiarowo dostępnych zmiennych procesowych) i wówczas

$$\underline{A}_z \cdot \underline{m} = \underline{\delta} \neq \underline{0} \tag{2.2}$$

gdzie δ_i - niezbilansowanie i-tego węzła.

Sieć, dla której słuszna jest zależność (2.2), nazywa się siecią niezbilansowaną. Celem obliczeń wyrównawczych jest znalezienie takiego wektora przepływów $\underline{M}$, aby były spełnione równania bilansowe, a jednocześnie był minimalizowany wskaźnik będący miarą odchyłek wartości mierzonych od skorygowanych. Gdy niezbilansowanie sieci spowodowane jest również błędami grubymi przyrządów pomiarowych i przeciekami instalacji, nadrzędnym celem staje się wykrycie uszkodzonych przyrządów i instalacji. Jeżeli nie wszystkie przepływy są mierzone (niepełna informacja pomiarowa), to z grafu usuwa się odpowiadające im łuki poprzez agregatyzację węzłów incydentnych z tymi łukami. Otrzymuje się w ten sposób graf zredukowany, dla którego dokonuje się obliczeń wyrównawczych. W oparciu o skorygowane wartości przepływów mierzonych wyznacza się natężenia przepływów niemierzonych (szersze omówienie tego problemu zamieszczono w [3]).

Dalsze rozważania dotyczą grafu zredukowanego, w którym wszystkie przepływy są mierzone.

Problem korekcji przepływów kumulatywnych można sformułować następująco: dla wszystkich łuków sieci bilansowej należy wyznaczyć takie wartości skorygowane przepływów kumulatywnych, by były spełnione równania bilansowe tej sieci

$$\underline{A}_z \cdot \underline{M} = \underline{0} \qquad (2.3)$$

oraz by zminimalizować ważoną sumę bezwzględnych wartości odchyleń natężeń przepływów zmierzonych od skorygowanych

$$\min_{M_i} \sum_{i \in L} \frac{1}{t_i} \left| M_i - m_i \right| \qquad (2.4)$$

gdzie:

t_i – współczynnik tolerancji dla zmierzonego przepływu kumulatywnego, będący miarą możliwego odchylenia wartości zmierzonej od rzeczywistej,

L – zbiór łuków grafu.

Zależność między wektorem przepływów zmierzonych i skorygowanych można zapisać w postaci

$$\underline{M} = \underline{m} + \underline{P} - \underline{N} \qquad (2.5)$$

gdzie:

$\underline{P}$ – wektor dodatnich poprawek dla przepływów zmierzonych,

$\underline{N}$ – wektor ujemnych poprawek dla przepływów zmierzonych.

Po podstawieniu (2.5) do (2.3) i (2.4) otrzymuje się problem optymalizacyjny w postaci:

$$\min_{P_i, N_i} \sum_{i \in L} \frac{1}{t_i} \left| P_i - N_i \right| \qquad (2.6)$$

przy ograniczeniach:

$$\underline{A}_z \underline{P} - \underline{A}_z \underline{N} = - \underline{A}_z \underline{m} \tag{2.7}$$

$$\underline{P} \geq \underline{0}, \quad \underline{N} \geq \underline{0} \tag{2.8}$$

Można również wprowadzić dodatkowe ograniczenia nierównościowe na poprawki:

$$\underline{P} \leq \underline{M} \tag{2.9}$$

$$\underline{N} \leq \underline{L}, \tag{2.10}$$

określające maksymalne możliwe odchylenie wartości zmierzonej od rzeczywistej, a zależące od klasy przyrządów pomiarowych i dokładności przetwarzania.

Przy założeniu, że:

$$\bigwedge_{i \in L} \left\{ (P_i \neq 0 \wedge N_i = 0) \vee (P_i = 0 \wedge N_i \neq 0) \vee (P_i = 0 \wedge N_i = 0) \right\} \tag{2.11}$$

problem optymalizacyjny związany z obliczeniami wyrównawczymi przyjmuje postać

$$\underset{P_i, N_i}{\mathrm{Min}} \sum_{i \in L} (P_i + N_i) \frac{1}{t_i} \tag{2.12}$$

przy ograniczeniach (2.7), (2.8), (2.9), (2.10).

3. Detekcja i identyfikacja błędów grubych przyrządów pomiarowych i przecieków bilansowanych procesów przemysłowych

3.1. Założenia upraszczające

Dalsze rozważania będą słuszne po przyjęciu następujących założeń upraszczających:

a) każde niezbilansowanie wynikłe z przecieków lub błędów grubych jest dla węzła większe niż maksymalne możliwe, wynikłe z błędów przypadkowych przyrządów pomiarowych,

b) nie występuje przypadkowe zmeszenie się błędów grubych i błędów grubych z przeciekami,

c) między dwoma węzłami jest tylko jeden przepływ.

3.2. Test niezbilansowania wynikłego z błędów grubych przyrządów pomiarowych i przecieków instalacji

Test ten należy przeprowadzić przed przystąpieniem do wyrównywania pomiarów. Dla każdego węzła sieci bilansowej zamkniętej sprawdza się istnienie rozwiązania dopuszczalnego dla zagadnienia

$$\min_{P_j, N_j} \sum_j (P_j + N_j) \tag{3.1}$$

przy ograniczeniach

$$\sum_j a_{ij} P_j - \sum_j a_{ij} N_j = -\sum_j a_{ij} m_j \tag{3.2}$$

$$P_j \leq H_j \tag{3.3}$$

$$N_j \leq L_j \tag{3.4}$$

$$P_j \geq 0, \quad N_j \geq 0 \tag{3.5}$$

$$i \in V, \quad j \in Ł_i$$

gdzie:

V - zbiór węzłów,

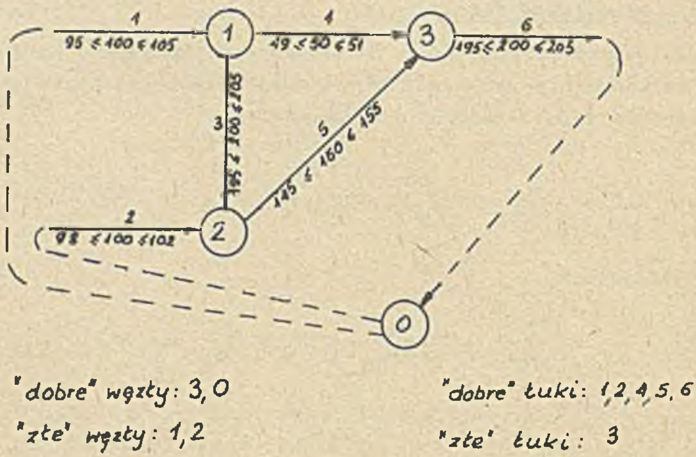
$Ł_i$ - zbiór łuków incydentnych z i-tym węzłem.

Pozytywny wynik testu (istnienie rozwiązania) świadczy o tym, że niezbilansowanie i-tego węzła jest spowodowane tylko błędami przypadkowymi przyrządów pomiarowych. Węzeł taki będzie dalej nazywany "dobrym" węzłem. Negatywny wynik testu (brak rozwiązania dopuszczalnego) sygnalizuje niezbilansowanie węzła i-tego spowodowane błędami grubymi lub przeciekami. Węzeł taki będzie dalej nazywany "złym" węzłem. Pozytywny wynik testu dla węzła otoczenia świadczy o braku przecieków instalacji, natomiast negatywny sygnalizuje wystąpienie przecieków instalacji lub błędów grubych pomiaru strumieni wejściowych i wyjściowych. Wszystkie łuki incydentne z węzłami "dobrymi" są łukami "dobrymi". Łuki skojarzone ze "złymi" węzłami, po wyłączeniu spośród nich łuków uznanych za "dobre", stanowią zbiór "złych" łuków (rys. 1).

3.3. Sformułowanie problemu

Przepływ w każdym łuku jest opisany zależnością

$$M_j = m_j + P_j - N_j \tag{3.6}$$



Rys. 1. Przykład zastosowania testu niezbilansowania

przy czym:

a) dla łuków "dobrych" obowiązują ograniczenia na P_j i N_j przedstawione zależnościami (2.9) i (2.10),

b) dla łuków "złych" na poprawki P_j nie nakłada się górnych ograniczeń, natomiast $N_j \leq m_j$, aby uniknąć ujemnych wartości przepływów,

c) jeżeli test z punktu 3.2 wypadł dla węzła otoczenia negatywnie, łączy się z tym węzłem każdy "zły" węzeł dodatkowym łukiem zaliczonym do "złych" łuków, przypisując temu łukowi przepływ mierzony $m_j = 0$.

Ostatecznie problem można sformułować następująco:

$$\min_{P_j, N_j} \left[\sum_{j \in DŁ} \frac{1}{t_j} (P_j + N_j) + K \sum_{j \in ZŁ} (P_j + N_j) \right] \qquad (3.7)$$

przy ograniczeniach:

$$\sum_{j \in Ł'} (a_{ij} P_j - a_{ij} N_j) = - \sum_{j \in L'} a_{ij} m_j, \quad i \in V' \qquad (3.8)$$

$$P_j \leq H_j \qquad (3.9)$$

$$j \in DŁ$$

$$N_j \leq L_j \qquad (3.10)$$

$$j \in ZŁ$$

$$N_j \leq m_j \qquad (3.11)$$

$$P_j \geq 0, \quad N_j \geq 0 \qquad (3.12)$$

gdzie:

DŁ - zbiór indeksów "dobrych" łuków,

ZŁ - zbiór indeksów "złych" łuków (łącznie z indeksami łuków dodatkowych, wprowadzonych w punkcie 3.3o),

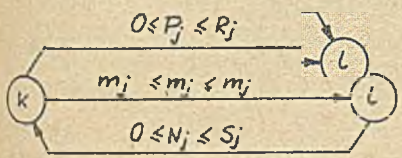
Ł' - zbiór indeksów wszystkich łuków (Ł = ZŁ + DŁ),

V' - zbiór węzłów sieci otwartej,

K - stały współczynnik

3.4. Rozwiązanie zadania

Rysunek 2 ukazuje sposób przedstawienia każdego przepływu w sieci bilansowej, zgodnie z założeniami punktu 3.3. Wartości ograniczeń R_j i S_j dane są zależnościami (3.9), (3.10), (3.11); dla $j \in ZŁ$, dla których poprawki P_j nie są ograniczone od góry, przyjmuje się $R_j = \infty$. Zmiennymi zadania programowania liniowego (ZPL) sformułowanego w punkcie 3.3 są poprawki P_j i N_j, czyli macierz ograniczeń jest macierzą incydencji grafu zbudowanego z łuków odpowiadających tym poprawkom. Z twierdzeń 2 i 3 (załączniki I i II) wynika wniosek, że poprawki, które tworzą bazę rozwiązania optymalnego ZPL, stanowią dendryt tego grafu.



Rys. 2. Zmodyfikowany sposób przedstawienia przepływu mierzonego

Wobec tego, jeżeli w sieci przepływowej wystąpiłby cykl "złych" przepływów, to zgodnie z twierdzeniem 3 i zależnością (2.11) poprawki dla jednego z przepływów tego cyklu przyjęłyby wartości:

$$(N_j = 0 \wedge P_j = 0) \vee (N_j = 0 \wedge P_j = \infty) \vee (N_j = m_j \wedge P_j = 0).$$

Ponieważ drugie rozwiązanie jest nierealne, przepływ ten nie zostałby więc skorygowany lub zostałaby mu nadana wartość zero. Konsekwencją tego jest fakt, że "złe" przepływy, których poprawki są w bazie rozwiązania, nie byłyby na ogół poprawnie skorygowane. Rozważania te prowadzą do wniosku końcowego:

Jeżeli "zły" łuk nie znajduje się w cyklu "złych" łuków, to będzie on wykryty, a odpowiadający mu przepływ zostanie skorygowany do wartości zgodnej z rzeczywistym przepływem.

Wniosek ten dotyczy oczywiście również przecieków, zaliczonych w punkcie 3.3o do "złych" łuków.

Bazując na zamieszczonych w artykule rozważaniach opracowano algorytm ([2]), umożliwiający wykrycie przepływów, których pomiary obarczone są błędami grubymi i przecieków instalacji, a w przypadku tworzenia się cykli, wyszczególniający numery tworzących je "złych" łuków. Pozwala to na znaczna zmniejszenie ilości przyrządów, rurociągów itp., które należy skontrolować, aby znaleźć powód niezbilansowania procesu.

4. Uwagi końcowe

Algorytm opracowany w [2], oparty na przedstawionych w niniejszym artykule założeniach, niewątpliwie góruje nad tymi, które opracowano w [5] i [8]. Natomiast jego zaletą w stosunku do algorytmu przedstawionego w [4] jest:

a) mniejszy obszar pamięci operacyjnej zajmowanej przez program (wszystkie problemy są sprowadzone do postaci ZPL i rozwiązywane za pomocą jednego podprogramu),

b) detekcja przecieków i przepływów obarczonych błędami grubymi jest wykonywana jednocześnie z obliczeniami wyrównawczymi,

c) dzięki wprowadzeniu ograniczeń nierównościowych na wartości poprawek nie grozi nadanie przepływom skorygowanym ujemnych wartości.

Z a ł ą c z n i k I

Wybrane zagadnienia z teorii grafów skierowanych

Używane w artykule pojęcia, które znalazły szerokie zastosowanie przy badaniu grafów, zdefiniowano w [3]. Zbiór zawartych tam informacji zostanie uzupełniony jedną definicją i dwoma twierdzeniami.

Definicja: Drzewo nazywa się dendrytem grafu, jeżeli jest ono częścią (podgrafem) tego grafu i zawiera wszystkie jego węzły.

Twierdzenie 1: Jeśli $\underline{A}$ jest macierzą incydencji grafu spójnego o n węzłach, to rząd macierzy $\underline{A}$ jest równy n-1 (dowód w [1]).

Tak więc potrzeba tylko n-1 wierszy macierzy incydencji, aby opisać w pełni odpowiedni graf. Taka podmacierz o n-1 wierszach, nie obejmująca węzła otoczenia, nazywa się zredukowaną macierzą incydencji $\underline{A}_z$.

Twierdzenie 2: Niech $\underline{A}$ jest macierzą incydencji grafu spójnego o n wierszach. Podmacierz o wymiarach (n-1) x (n-1) macierzy $\underline{A}$ jest nieosobliwa wtedy i tylko wtedy, gdy n-1 łuków odpowiadających n-1 kolumnom tej macierzy tworzy dendryt tego grafu (dowód w [1]).

Z a ł ą c z n i k II

Wybrane zagadnienia zadań programowania liniowego

Rozpatrywane jest tzw. ograniczone zadanie programowania liniowego w formie standardowej:

$$\underset{\underline{x}}{\mathrm{Min}}\ \underline{c}^T\ \underline{x} \tag{II.1}$$

przy ograniczeniach:

$$\underline{W}\,\underline{x} = \underline{a} \qquad (\underline{a} \geq \underline{0}) \tag{II.2}$$

$$\underline{x} \geq \underline{0} \tag{II.3}$$

$$\underline{I}\ \underline{x} \leq \underline{D} \qquad (\underline{D} > \underline{0}) \tag{II.4}$$

gdzie:

$x \in R^r$, $\underline{W} = [w_{ik}]$ $i = 1,2,\ldots,p$ $k = 1,2,\ldots,r$

$r(w) = p$ (rząd macierzy $\underline{W}$)

$\underline{I}$ - macierz jednostkowa.

Twierdzenie 3: Jeżeli $r(\underline{W}) = p$, to rozwiązanie bazowe zadania ograniczonego musi posiadać p zmiennych bazowych o wartościach dodatnich mniejszych od ograniczenia górnego, tzn. $0 < x_j < D_j$, a pozostałych r-p zmiennych przyjmuje wartości 0 lub D_j (dowód w [7]).

Gdy $r(\underline{W}) = p$, to istnieje taka podmacierz $\underline{B}$ stopnia p, że det $\underline{B} \neq \underline{0}$.

Układ równań (II.2) można wtedy zapisać w postaci:

$$\underline{B}\,\underline{x}_B + \underline{P}_G\,\underline{x}_G + \underline{P}_Z\,\underline{x}_Z = \underline{a} \tag{II.5}$$

gdzie:

$\underline{W} = [\underline{B}\ \underline{P}_G\ \underline{P}_Z]$, $x^T = [\underline{x}_B^T\ \underline{x}_G^T\ \underline{x}_Z^T]$

$\underline{x}_B$ - wektor zmiennych bazowych,

$\underline{x}_G$ - wektor zmiennych niebazowych przyjmujących wartości górnych ograniczeń,

$\underline{x}_Z$ - wektor zmiennych niebazowych zerowych.

Zależność zmiennych bazowych od niebazowych ma postać:

$$\underline{x}_B = \underline{B}^{-1}\,\underline{a} - \underline{B}^{-1}\,\underline{P}_G\,\underline{x}_G \tag{II.6}$$

Optymalne rozwiązanie nadaje minimalną wartość formie liniowej (II.1).

LITERATURA

[1] Deo N.: Teoria grafów i jej zastosowania w technice i informatyce. PWN, Warszawa 1980.

[2] Gdula K.: Algorytm wykrywania błędów grubych przyrządów pomiarowych i przecieków bilansowanych instalacji przemysłowych. Referat na Seminarium Identyfikacji Procesów. Gliwice 1982 (niepublikowane).

[3] Gomółka W., Gdula K.: O wykorzystaniu teorii grafów w obliczeniach wyrównawczych dla bilansów masowych. Zeszyty Naukowe Pol.Śl., Seria Automatyka, nr 61, 1982.

[4] Mah R., Stanley D., Downing G.: Reconciliation and Rectyfication of Process Flow and Invertory Data" I.E.C. Process. Des.Dev. Vol.15, No 1, 1976.

[5] Mathiesen N.: Adjustment of Incosistent Sets of Measurements Using Linear Programming. Automatica., Vol. 10. Pergamon Press, 1974.

[6] Niederliński A.: Systemy cyfrowe automatyki przemysłowej. T. 2. WNT, Warszawa 1977.

[7] Nykowski I.: Programowanie liniowe. PWE, Warszawa 1980.

[8] Ripps D.L.: Adjustment of Experimental Data. Chem.Eng.Progr.Symp. Series No 55, Vol. 61.

[9] Simmonard M.: Programowanie liniowe. PWN, Warszawa 1967.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Antoni Niederliński

ПРИМЕНЕНИЕ ЛИНЕЙНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ ДЛЯ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ГРУБЫХ ОШИБОК ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ И ТЕЧЕНИ БАЛАНСОВАННЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Р е з ю м е

Уравнительное вычисление применяется к такому корректированию данных, чтобы были выполнены уравнения массового и энергетического баланса. Эта проблема может быть преобразованная в проблему линейного програмирования, когда сумма взвешенных абсолютных поправок результатов измерений используется в качестве целовой функции, подлежащей минимизации. В статье рассмотрено возможность детектирования грубых ошибок измерений и течи установок.

DETECTION OF GROSS MEASUREMENT ERRORS AND LEAKS OF BALANCED PROCESS PLANT USING LINEAR PROGRAMMING

S u m m a r y

Adjustment of process data is often necessary to close material and energy balances. This problem can be transformed into a linear programming problem using the sum of the absolute values of weighted adjustments as the object function to be minimized. The possibility of gross errors and leaks detection with the aid of this method is discussed.