

Ryszard SAUK¹, Filip MOSKAL²

e-mail: ryszard.sauk@udt.gov.pl

¹ Urząd Dozoru Technicznego, Oddział w Szczecinie² Instytut Inżynierii Chemicznej i Procesów Ochrony Środowiska, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny, Szczecin

Metody optymalizacji kolejności analizy węzłów HAZOP

Wstęp

Analiza zagrożeń i zdolności operacyjnych (HAZOP) jest strukturalną metodą szeroko stosowaną do identyfikacji zagrożeń występujących w procesach przemysłowych. W metodzie tej, w sposób systematyczny, bada się w węzłach będących przedmiotem analizy, odchylenia od założonych parametrów, identyfikuje ich przyczyny, skutki i zabezpieczenia, można także określać ryzyko związane z danym scenariuszem [Destree i in., 1992; Markowski, 2000; PN-IEC 61882: 2005]. W przypadku rozbudowanych instalacji technologicznych analiza HAZOP wymaga przeanalizowania często ogromnej liczby węzłów, przy czym przyczyny odchylen nie muszą znajdować się w analizowanym węźle, lecz mogą mieć źródło w innych węzłach. Sytuacja taka w znaczący sposób komplikuje i zaburza tok prac zespołu analitycznego; zwiększa także prawdopodobieństwo pominięcia przyczyn znajdujących się poza analizowanym węzłem. Można oczywiście z góry założyć transmisję odchylen z węzłów przyległych wraz z częstościami, lecz w celu zachowania rzetelności analizy wymaga to późniejszego powrotu do scenariuszy z założonymi wartościami i porównania wartości wynikowych z założonymi. By uniknąć tej swego rodzaju iteracji pożądaną jest, by węzły poprzedzające były już w pełni przeanalizowane. W tym celu konieczne jest dokonanie optymalnego wyboru kolejności analizowania węzłów, co może mieć znaczący wpływ na efektywność badania HAZOP zwłaszcza, gdy stosowana jest odmiana z rankingiem ryzyka identyfikowanych scenariuszy. Dla małych instalacji optymalną kolejność można bez trudu uzyskać polegając na doświadczeniu lidera lub zespołu analitycznego.

Jednak skomplikowane instalacje procesowe, składające się już z kilkunastu węzłów uwiadcniają potrzebę stosowania bardziej wyrafinowanych i systemowych metod [Kozak i Sauk, 2011]. Pod pewnym względem analiza HAZOP podobna jest do metody sekwencyjno-modułowej wykorzystywanej w inżynierii chemicznej i procesowej do modelowania matematycznego instalacji procesowych. Podobieństwo polega na tym, że system dzieli się na węzły-moduły, które następnie analizowane są wg ustalonej kolejności.

Podobieństwo metod pozwala na wykorzystanie technik bazujących na teorii grafów i rachunku macierzowym w metodzie sekwencyjno-modułowej do określenia optymalnej kolejności analizy węzłów w analizie HAZOP. W niniejszej pracy opisano podstawowe zagadnienia związane ze stosowaniem tych metod.

Opis systemu za pomocą macierzy relacji Boole'a i grafu skierowanego

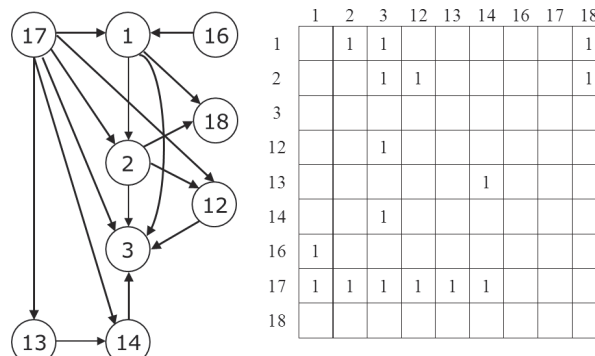
Graf przepływu informacji i macierz relacji można zastosować do odwzorowania powiązań między węzłami HAZOP, pozwala to na zastosowanie matematycznych metod optymalizacyjnych w procesie wspomagania decyzji mającym na celu wyznaczenie kolejności analizy węzłów.

Macierz relacji Boole'a (macierz przejść) – jest macierzą kwadratową, której etykiety wierszy i kolumn odpowiadają wierzchołkom grafu – elementom systemu (np. aparat, węzeł). Jeżeli strumień wypływa z elementu i oraz dopływa do elementu j to w wierszu i i kolumnie j pojawia się 1. Jeżeli w grafie istnieje skierowana krawędź o początku w wierzchołku i oraz końcu w wierzchołku j , to w macierzy relacji pojawia się 1 w wierszu i oraz kolumnie j .

Graf przepływu informacji – jest grafem skierowanym obrazującym przepływ informacji między elementami systemu. Wierzchołki grafu reprezentują elementy systemu – jednostki procesowe (np. aparaty, węzły), krawędzie grafu (żebra) reprezentują strumienie łączące. Każdy

graf przepływu informacji można zapisać w postaci macierzowej za pomocą macierzy relacji Boole'a (macierzy przejść).

Na rys. 1 przedstawiono graf przepływu informacji przestrzeni wodno-parowej kotła z cyrkulującym złożem fluidalnym CFB zaprojektowanego i wykonanego przez korporację Foster Wheeler oraz odpowiadającą mu macierz relacji.



Rys. 1. Graf przepływu informacji i macierz relacji części wodno-parowej kotła [wykonane przez autora¹ w ramach przeprowadzonej analizy HAZOP]

Węzły HAZOP: 1 – Woda zasilająca + parownik; 2 – Przegrzewacze pary; 3 – System ciągłego odmulania, odsalania i odpowietrzania; 12 – Zdmuchiwalce popiołu; 13 – Para pomocnicza; 14 – Zbiornik kondensatu; 16 – Dozowanie chemikaliów; 17 – Instalacja sprężonego powietrza; 18 – System poboru próbek

Definicja optymalnej kolejności

Prowadząc analizy HAZOP z łatwością można dostrzec, że optymalna kolejność to taka, w której węzły będące źródłem strumieni są analizowane przed węzłami, do których te strumienie wpływają; istotne jest także by unikać pozostawiania węzłów będących odnogami analizowanej gałęzi na koniec analizy, co może powodować zacieranie się w pamięci zespołu analitycznego interakcji pomiędzy węzłami pozostawionymi na koniec, a węzłami do nich przyległymi analizowanymi wcześniej.

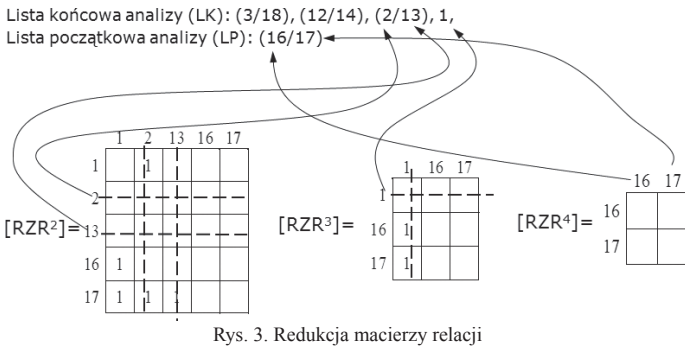
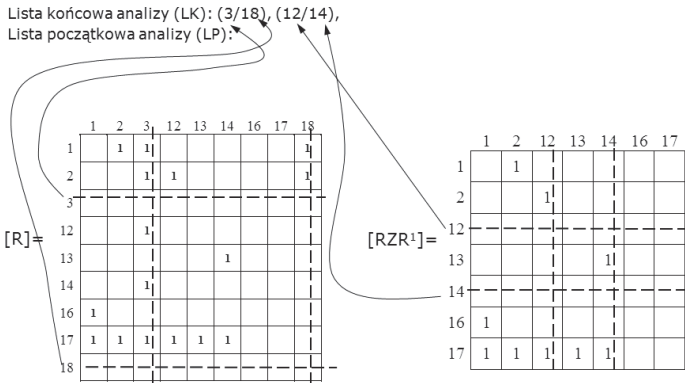
Metodyka taka jest wystarczająca dla układów acyklicznych, jednak rzeczywiste, duże systemy procesowe rzadko posiadają prostą strukturę acykliczną, często zawierają sprzężenia zwrotne tworzące cykle. W takich przypadkach dodatkowo należy wyodrębnić i uwzględnić w procesie wyznaczania kolejności węzłów układy cykliczne zawarte w analizowanym systemie.

Optymalna kolejność systemów acyklicznych

Aby określić optymalną kolejność analizowanych węzłów systemu acyklicznego tworzy się **listę końcową** (LK) oraz **listę początkową** (LP) analizy, które po złożeniu wyznaczają właściwą, optymalną kolejność. Lista końcowa analizy (LK) zawiera elementy analizowane w ostatniej kolejności, a lista początkowa analizy (LP) elementy analizowane w pierwszej kolejności [Kacperski, 2002].

Zastosowany algorytm tworzenia list polega na przeszukiwaniu macierzy relacji, w celu odnalezienia wierszy niezawierających jedynek, gdy zostanie znaleziony taki wiersz lub wiersze redukuje się macierz relacji usuwając je wraz z odpowiadającymi im kolumnami (kolumny o tych samych numerach, co wiersze), numer usuniętego wiersza zapisuje się na liście końcowej (LK). Proces powtarza się do momentu braku wierszy niezawierających jedynek. Poszukuje się wówczas kolumn

niezawierających jedynek, gdy zostanie znaleziona taka kolumna lub kolumny redukuje się macierz relacji usuwając je i odpowiadające im wiersze (wiersze o tym samym numerze, co kolumny), numery usuniętych kolumn zapisuje się na liście początkowej analizy (LP) i ponownie poszukuje się wierszy niezawierających jedynek (Rys. 2 i 3).



Dla analizowanego przypadku optymalna kolejność po złożeniu listy początkowej i końcowej analizy przedstawia się następująco: (16/17), 1, (2/13), (12/14), (3/18).

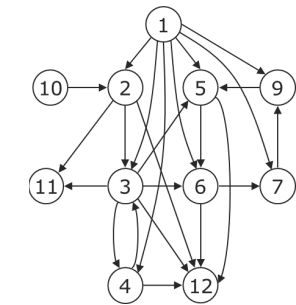
Optymalna kolejność systemów cyklicznych

Jeżeli zredukowana macierz relacji nie posiada pustych wierszy lub kolumn to znaczy, że system obejmuje co najmniej jeden *maksymalny układ cykliczny*, tzn. zawierający wszystkie układy cykliczne, oprócz tych z którymi nie ma wspólnych wierzchołków [Kacperski, 2002]. W takim przypadku postępowanie składa się z następujących etapów:

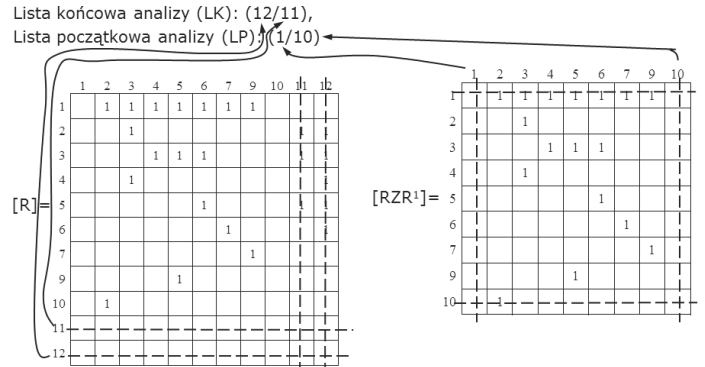
1. Opis systemu za pomocą macierzy relacji
2. Wyznaczenie kolejności analizy części acyklicznej
3. Wyodrębnienie cykli
4. Zastąpienie wyodrębnionych cykli pseudoelementami
5. Wyznaczenie kolejności analizy utworzonego układu acyklicznego zawierającego pseudoelementy
6. Wyznaczenie kolejności analizy wewnątrz układów cyklicznych

Wyznaczenie listy początkowej i końcowej analizy jest pierwszym krokiem analizy takiego systemu analogicznie jak dla układów acyklicznych (Rys. 5 i 6), następnie należy wyodrębnić cykle (maksymalne układy cykliczne).

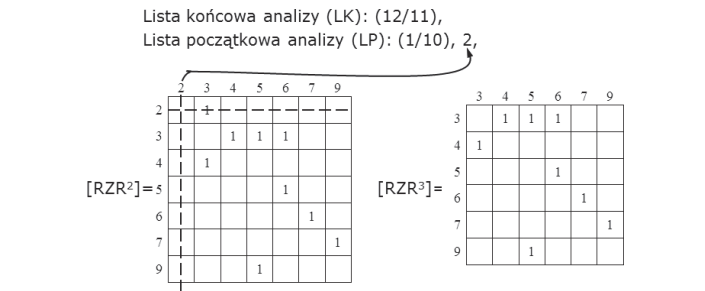
Węzły HAZOP: 1 – Stacja sprężonego powietrza; 2 – Ośrodek grupowy + Stacja rozdzielu gazu; 3 – Stacja osuszania gazu; 4 – Stacja osuszania glikolu; 5 – Stacja kompresorów; 6 – Stacja pomiarowa; 7 – Śluza odbiorcza; 9 – Stacja redukcyjno-pomiarowa; 10 – Pompownia metanolu; 11 – Zbiornik kondensatu; 12 – Kolumna wydmuchowa (Rys. 4).



Rys. 4. Graf przepływu informacji podziemnego magazynu gazu [tryb poboru wykonany przez autora w ramach przeprowadzonej analizy HAZOP]



Rys. 5. Redukcja macierzy relacji Booleana odpowiadającej grafowi przepływu informacji na rys. 4



Rys. 6. Redukcja macierzy relacji

Wyodrębnianie cykli

Jedną z metod wyodrębniania cykli jest wyznaczenie macierzy osiągalności, a z niej macierzy intersekcji.

Macierz osiągalności wskazuje, dla każdego wierzchołka grafu przepływu informacji, które wierzchołki można z niego osiągnąć po dowolnej ścieżce, a także, z których wierzchołków może być on osiągnięty (po dowolnej ścieżce). Macierz osiągalności można wyznaczyć np. w oparciu o poniższy algorytm bazujący na algorytmie zaczerpniętym z literatury [Kacperski, 2002]:

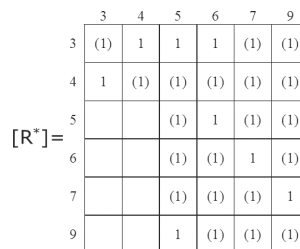
1. Wybierz pierwszy wierzchołek, przyjmij $k = 1$
2. Wyszukaj wszystkie jedynki w kolumnie o numerze k
3. Wyszukaj wszystkie jedynki w wierszu o numerze k
4. Wybierz kolumny, które mają jedynki w wierszu k
5. Wpisz jedynki w wybranych kolumnach w miejscach, w których kolumna k ma jedynki
6. Przejdź do następnego wierzchołka (przyjmij $k = k+1$) i wróć do punktu 2
7. Jeżeli przeanalizowane zostały wszystkie wierzchołki ($k =$ liczbie wierzchołków w grafie) to otrzymana macierz jest macierzą osiągalności.

Dla zredukowanej macierzy relacji [RZR³], którą tworzyły (Rys. 6) jedynki bez nawiasów macierz osiągalności ma następującą postać:

Macierz intersekcji jest iloczynem logicznym (częścią wspólną) macierzy osiągalności i transponowanej macierzy osiągalności:

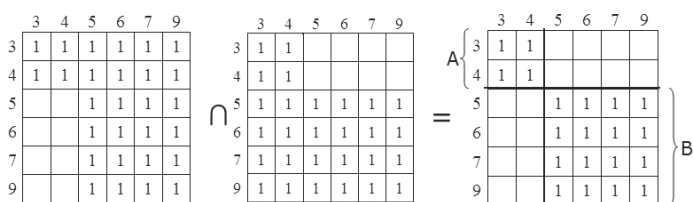
$$[R^*] \cap [R^*]^T = [I] \quad (1)$$

Identyczne, niezerowe wiersze macierzy intersekcji wyznaczają elementy tworzące maksymalne układy cykliczne. Dla macierzy osiągalności przedstawionej na rys. 7 wyznaczona na rys. 8 macierz intersekcji wskazuje, że system zawiera dwa maksymalne układy cykliczne, którym można przyporządkować etykiety np. A i B.



Rys. 7. Macierz osiągalności

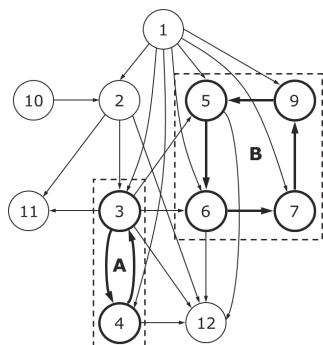
Wyznaczone układy cykliczne: A: <3,4> B: <5,6,7,9>



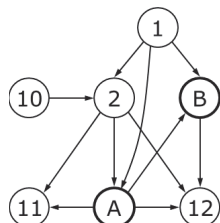
Rys. 8. Tworzenie macierzy intersekcji [I] z macierzy osiągalności wg rys. 7

Kolejność w systemie z pseudoelementami

Po wyodrębnieniu maksymalnych układów cyklicznych w macierzy relacji przyporządkowuje się im odpowiednie pseudoelementy (A,B,...), które w grafie przepływu informacji (Rys. 9) odpowiadają pseudowierzchołkom (Rys. 10). W macierzy relacji wiersze i kolumny należące do cykli sumuje się logicznie, a jedynki leżące na przekątnej macierzy usuwa. Po tych operacjach otrzymuje się macierz relacji [RZZ], którą analizuje się jak układ acykliczny usuwając odpowiednie wiersze lub kolumny (Rys. 11).

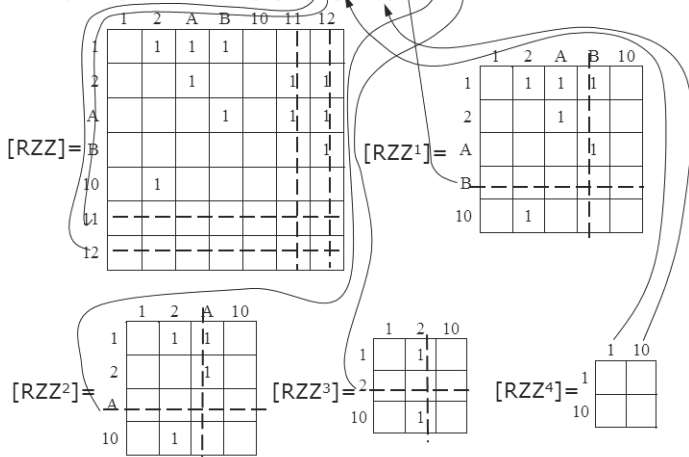


Rys. 9. Graf przepływu informacji z wyodrębnionymi cyklami A i B



Rys. 10. Graf przepływu informacji z pseudowierzchołkami A i B

Lista końcowa analizy (LK): (12/11), B, A, 2
 Lista początkowa analizy (LP): (1/10)



Rys. 11. Redukcja macierzy relacji [RZZ]

Złożenie listy początkowej (LP) i listy końcowej (LK) analizy tworzy kolejność analizy z pseudoelementami A i B. Uzyskana w ten sposób optymalna kolejność analizy z pseudoelementami A i B przedstawia się następująco: (1/10), 2, A, B, (12,11).

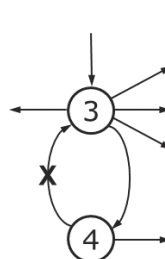
Kolejność wewnątrz cykli

Ostatnim etapem określania kolejności analizowania węzłów HAZOP jest określenie kolejności wewnątrz cykli. Aby dokonać analizy układu cyklicznego należy przekształcić go w układ acykliczny rozrywając odpowiednie strumienie. W procesie modelowania matematycznego stosuje się trzy główne kryteria rozrywania strumieni [Kacperski, 2002]:

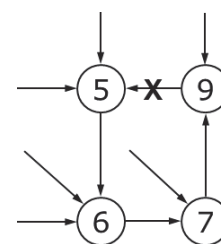
- Kryterium najmniejszej liczby rozrywanych strumieni
- Kryterium najmniejszej liczby parametrów rozrywanych strumieni
- Kryterium najmniejszej czułości rozrywanych strumieni

Doświadczenie lidera lub zespołu analitycznego, jak wskazuje praktyka, jest wystarczające do dokonania właściwego wyboru rozrywanych strumieni, dlatego też w niniejszej pracy pominięto opis algorytmów rozrywania strumieni bazujących na ww. kryteriach.

Po rozerwaniu strumieni uzyskuje się układ acykliczny. Optymalna kolejność analizy po rozerwaniu krawędzi pseudografów A i B (Rys. 12 i 13) jest następująca: (1/10), 2, (3,4), 5, 6, 7, 9, (12,11).



Rys. 12. Pseudograf cyklu A, rozrywanie krawędzi 4-3



Rys. 13. Pseudograf cyklu B, rozrywanie krawędzi 9-5

Wnioski

Opisane metody mogą mieć zastosowanie nie tylko w analizie HAZOP, lecz także we wszystkich innych rodzajach analiz, w których system dzieli się na mniejsze części, a następnie poddaje badaniu wg ustalonej kolejności.

Przedstawione metody zostały z powodzeniem zastosowane w ramach prowadzonych analiz HAZOP instalacji kotła parowego z cyrkulującym złożem fluidalnym (CFB) bloku energetycznego projektowanego i wykonanego przez korporację Foster Wheeler Energia oraz przy instalacji jednego z podziemnych magazynów gazu.

LITERATURA

Destree i in., 1992. *Guidelines for hazard evaluation procedures with worked examples*, Center for Chemical Process Safety (CCPS), Wiley-AIChE, New York, USA
 Dudczak J., 1987. *Podstawy analizy obiektów przemysłu chemicznego*. Wyd. Pol. Szczecińskiej, Szczecin
 Kacperski W.T., Kraszewski, J., Marcinkowski, R., 2002. *Inżynieria systemów procesowych. Elementy analizy procesów technologicznych*. Wyd. Pol. Warszawskiej, Warszawa
 Kozak A., Sauk R. 2011. *Wpływ niezawodności technicznej urządzeń na zapewnienie bezpieczeństwa procesowego*. Bezpieczeństwo Techniczne w Przemśle – X Jubileuszowa Konferencja Naukowo-Techniczna, Łódź (12.2013) http://e-bmp.pl/File/bmp_4e82c8055fc1d.rar
 Markowski A.S., 2000. *Zapobieganie stratom w przemyśle. Cz. III*. Wyd. Politechniki Łódzkiej, Łódź
 PN-IEC 61882: 2005. *Badanie zagrożeń i zdolności do działania (badanie HAZOP) – Przewodnik zastosowań*
 Vasudev C., 2006. *Graph theory with application*. New Age International Pvt Ltd Publishers