

Macierz przyczyna-skutek i możliwości jej wykorzystania

Zgodnie z obowiązującymi przepisami krajowymi i unijnymi, w zakładach dużego ryzyka musi być wdrożony szeroko rozumiany system bezpieczeństwa.

Jednym z ważnych elementów zapewnienia bezpieczeństwa jest macierz CEM (macierz przyczyna-skutek ang. Cause & Effect Matrix). Powyższy wykład ma na celu przedstawienie zasad budowy macierzy CEM oraz przykładów zapisu informacji ze wskazaniem ich przydatności na różnych etapach cyklu trwania bezpieczeństwa.

Elementem systemu bezpieczeństwa jest ocena jego aktualności i skuteczności, z którą wiąże się odpowiednie zarządzanie zmianami. Zakład o dużym ryzyku winien mieć możliwość udowodnienia w każdej chwili, że dokumentacja dotycząca systemu bezpieczeństwa jest aktualna. Zwykle jedną z podstawowych warstw zabezpieczeń jest system SIS (blokadowy system automatyki *ang. Safety Interlock/Instrumented/System*). Modyfikacje stanu istniejącego lub projektowanie nowych zabezpieczeń często dotyczą systemu automatyki zabezpieczeniowej.

System automatyki zabezpieczeniowej często pełni rolę najważniejszego systemu zapobiegającego powstaniu awarii. Przedstawienie zapisu zależności w postaci macierzy przyczyna-skutek (CEM) pozwala zobrazować zdarzenia inicjujące i determinujące wymagane zachowanie się systemu zabezpieczeń.

Macierz przyczyna–skutek często bywa nazywana macierzą bezpieczeństwa (Safety Matrix), a korzystanie z niej pozwala osiągnąć kilka celów jednocześnie:

- posiadamy w zwartej formie udokumentowany zapis podstawowych funkcji systemu automatyki zabezpieczających przed awarią,
- złożone zależności pomiędzy czynnikami inicjującymi i elementami wykonawczymi są proste do zrozumienia, sprawdzenia, przetestowania oraz wprowadzenia zmian.

Budując macierze przyczyna-skutek możemy syntetycznie, w jednej tabeli zawrzeć podstawowe informacje mające bezpośredni związek z bezpieczeństwem instalacji. Przedstawiając rozbudowaną macierz CEM tworzymy narzędzie, które jest wielokrotnie używane w całym cyklu realizacji systemu bezpieczeństwa.

Norma IEC 61508 narzuca konieczność analizowania całego cyklu życia bezpieczeństwa (*ang. Safety Life Cycle*) poczynwszy od koncepcji systemu bezpieczeństwa aż po jego likwidację; wymusza zarówno dokładne zdefiniowanie i udokumentowanie wymogów bezpieczeństwa jak i dokumentowanie wprowadzanych zmian w czasie projektowania, uruchamiania i eksploatacji systemu SIS. Macierz CEM stanowi niezbędne narze-

dzie poczynając od zapisu warunków prawidłowego zadziałania blokad i wymagań stawianych systemom bezpieczeństwa przez technologów, a kończąc na wytycznych dla zaprogramowania systemu bezpieczeństwa.

Budowa macierzy

Początkowo macierze przyczyna-skutek używano wyłącznie do definiowania wymagań technologów stawianym automatom. Konstrukcja najprostszej macierzy pokazana jest poniżej w Tabeli 1.

Podstawową wersję macierzy CEM można rozbudować o szczegółowe opisy umożliwiające zdefiniowanie dodatkowych parametrów stanu wejść i wyjść. Przykład macierzy rozbudowanej o wartości blokad i stany elementów wykonawczych pokazano w Tabeli 2.

Dalsza rozbudowa macierzy przyczyna-skutek może polegać na dodaniu do macierzy wymagań dla systemu automatyki zabezpieczeniowej. Macierz możemy uzupełnić o kategorię wymagań nienaruszalności bezpie-

czeństwa związaną z realizacją konkretnej funkcji blokadowej (SIL-poziom pewności bezpieczeństwa ang. *Safety Integrity Level*) i opisać sposób reakcji wejścia (inicjatora) na wyjście (skutek). Reakcja ta może być związana z opóźnieniem czasowym skutku w stosunku do przyczyny.

[illegible]

Tabela 1. Prosta macierz przyczyna-skutek

Najprostsza macierz CEM jest zapisem wymagań stawianych przez technologów układowi zapewnienia bezpieczeństwa SIS. Konstrukcja macierzy opiera się na wierszach, w których zapisane są przyczyny i kolumnach, w których zapisane są skutki. Jeśli dana przyczyna wywołuje określony skutek, to w miejscu przecięcia jest zamieszczony znak **w wejściu**, czyli w wierszu np. przez czujnik, a skutkiem jest np. wymagane działanie awaryjnych napędów, zawieszanie bezpieczeństwa.

Macierz taka pokazuje jak przyczyna oddziałuje na skutek w czasie awarii.

INSTALACJA PRODUKCJI GLIKOLU WEZEL REAKCYJNY				SKUTEK										
PRZYCZYNA					OPIS	DZIAŁANIE	OZNACZENIE ELIMINACYJNE	1	2	3	4	5	6	7
								POWRA MP-401	POWRA MP-504	ZAWÓR WODY	ZAWÓR NADOPRYWIE	ZAWÓR NADOPRYWIE	ZAWÓR PARY	ZAWÓR NADOPRYWIE
LP	NR POMIŁ	OPIS	PARAMETR	JEDN.	XS-402	XS-403	TS1-202	FS1-203	FS1-204	TS1-205	LS1-205			
1	HS-101	ZATRZYMANIE WEZŁA			X		X	X	X	X	X			
2	TSH-102	ZA WYSOKĄ TEMPERATURĄ PO R-401	155	°C								X	X	
3	PSL-103	ZA NISKIE CIŚNIENIE W R-401	240	kPa g				X	X	X	X	X	X	
4	FSL-104	BRAK PRZEPŁYWU NA DOPŁYWIE DO SA-501	40	m³/h	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
5	LSH-105	ZA WYSOKI POZIOM W C-301	70	%								X	X	
6	ESL-106	ZANIK ZASILANIA			X							X	X	
														UWAGI

Tabela 2. Macierz przyczyna-skutek rozbudowana o charakterystykę we/wy

może też definiować sposób zaniku skutku
w stosunku do przyczyny.

W powiązaniach przyczyny i skutku można zaznaczyć sposób oddziaływania inicjatora na skutek, co może być przydatne w założeniach szczegółowych przy realizacji oprogramowania. Rozróżniamy następujące typy oddziaływania: N – działanie proste – skutek zanika z chwilą ustania przyczyny;

R – działanie z resetowaniem – skutek zanika po sygnale „zresetowano”,

O – działanie nadrzędne – skutek zanika w wyniku pojawienia się nadpisania mimo trwania przyczyny

Konstrukcja takiej macierzy pokazana jest poniżej w Tabeli 3.

PRZYCZYNA					SKUTEK							
LP	NR PPOM.	OPIS	PARAMETR	JEDNOSTKA	SIL	1	2	3	4	5	6	7
1	HS-101	ZATRZYMANIE WEZŁA			1	N						
2	TSH-102	ZA WYSOKĄ TEMPERATURĄ PO R-401	155	°C	3						R	R
3	PSL-103	ZA NISKIE CIŚNIENIE W R-401	240	kPa g	3				N	N	T	R
4	FSL-104	BRAK PRZEPŁYWU NA DOPŁYWIE DO SA-501	40	m³/h	2	R	N	N	N	O	N	N
5	LSH-105	ZA WYSOKI POZIOM W C-301	70	%	2						N	O
6	ESL-106	ZANIK ZASILANIA			1	N					N	N

PRZYCZYNA					SKUTEK									
INSTALACJA PRODUKCJI GLIKOLU WEZŁ REAKCYJNY					SIL	OPIS	DZIAŁANIE	1	2	3	4	5	6	7
					OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS
					OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS
					OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS
					OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS
					OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS
					OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS
					OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS
					OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS
					OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS
					OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS
					OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS
					OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS
					OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS
					OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS
					OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS
					OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS
					OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS
					OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS
					OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS
					OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS
					OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS
					OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS
					OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS
					OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS
					OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS
					OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS
					OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS
					OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS
					OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS
					OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS
					OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS
					OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS
					OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS
					OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS
					OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS
					OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS
					OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS
					OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS
					OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS
					OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS
					OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS
					OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS
					OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS
					OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS
					OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS
					OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS
					OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS
					OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS
					OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS
					OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS
					OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS
					OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS
					OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS
					OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS
					OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS
					OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS
					OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS
					OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS
					OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS
					OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS
					OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS
					OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS
					OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS
					OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS
					OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS
					OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS
					OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS	OPIS
					OPIS	OPIS	OPIS	OPIS</						

Tabela 3. Macierz przyczyna-skutek rozbudowana o wymagania dla systemu zabezpieczeń

W Tabeli 4 przedstawiono macierz CEM uzupełnioną o dodatkowe informacje odnoszące się do możliwości zdeblokowania inicjatora do celów rozruchowych lub obsługowych.

PRZYCZYNA						SKUTEK											
LP	NR PPOM.	OPIS	PARAMETR	JEDNOSTKA	SIL	OPAKOWANIE WYKONAWCY	DZIAŁANIE	OPIS	SIL	MOS /POS	1	2	3	4	5	6	7
1	HS-101	ZATRZYMANIE WEZŁA			1		XS-402	STOP	POMPA MP-401	2	2						
2	TSH-102	ZA WYSOKĄ TEMPERATURĄ PO R-401	155	°C	3	HL-	XS-405	STOP	POMPA MP-504	2			+	-			
3	PSL-103	ZA NISKIE CIŚNIENIE W R-401	240	kPa g	3		TSV/202	OTWIERA	ZAWÓR WODY	2							
4	FSL-104	BRAK PRZEPŁYWU NA DOPŁYWIE DO SA-501	40	m³/h	2	-L	PSV/203	OTWIERA	ZAWÓR NA DOPŁYWIE	3							
5	LSH-105	ZA WYSOKI POZIOM W C-301	70	%	2	HL-	FSV/204	ZAMYKA	ZAWÓR NA DOPŁYWIE	3							
6	ESL-106	ZANIK ZASILANIA			1		TSV/205	ZAMYKA	ZAWÓR NA DOPŁYWIE	3							
												</					

Tabela 4. Macierz przyczyna-skutek dla celów zarządzania zmianami

Można wskazać, dla których obwodów istnieje możliwość blokowania sygnałów inicjujących lub wykonawczych dla celów rozruchu lub obsługi serwisowej; są to zwykle mostki bypassujące (POS – Process Override Service; MOS – Maintenance Override Service).

W uwagach mogą być także zamieszczone inne zapisy identyfikujące realizowane funkcje lub stany. Rozbudowując taką macierz o rubrykę rewizji możemy precyzyjnie aktualizować zmiany odnosząc je do określonych momentów czasowych.

Rozbudowana macierz przyczyna-skutek może służyć kilku celom jednocześnie. Jedną z możliwości jest wykorzystanie ma-

cierzy CEM do projektowania oprogramowania systemów blokadowych. Wiele firm posiada programy narzędziowe wykorzystujące automatyczne przetworzenie zapisu macierzy CEM na kod programu sterownika. Podejście to jest często rozszerzone na wykorzystanie macierzy CEM do zarządzania

bezpieczeństwem instalacji. Istnieją programy narzędziowe umożliwiające zarządzanie każdą fazą cyklu życia bezpieczeństwa. Narzędzia wspomagają nie tylko tworzenie zapisu wejść/wyjść układów zabezpiecza-

ciem CEM. Wiemy, że każda, nawet najmniejsza zmiana w systemie SIS wymaga przetestowania na nowo całego systemu zabezpieczeń, a nie tylko zmienionego elementu. Macierze CEM rozbudowane o funkcję stanów elementów wejść / wyjść mogą stanowić podstawę interfejsu operatora, zastępując złożone schematy wizualizacji.

Tak więc macierz CEM umożliwia przedstawienie wymagań względem systemu SIS, stając się jednocześnie narzędziem do tworzenia oprogramowania, do testowania w czasie prób systemu i do serwisowania systemu. Posługując się macierzą CEM ułatwiamy aktualizację zapisu stanu systemu bezpieczeństwa.

Na zakończenie warto przytoczyć kilka słów na temat realnych korzyści posługiwania się macierzami CEM. Macierze przyczyna-skutek umożliwiają bowiem łatwą aktualizację zmian mających wpływ na bezpieczeństwo oraz ułatwiają dokumentowanie zmian. **Redukują przy tym koszty** dokumentowania bezpieczeństwa, gdyż zmniejszają wysiłek tworzenia zapisu warunków działania układów blokadowych, testowania, sprawdzania czy przetwarzania danych dla celów sterowania. Wdrażaniem i rozwojem macierzy CEM powinni być więc zainteresowani wszyscy, których interesuje optymalizacja procesów związanych z zachowaniem i poprawą bezpieczeństwa na instalacjach o dużym ryzyku.



Autor artykułu
Tadeusz Kunicki

Jest absolwentem Wydziału Automatyki i Informatyki Politechniki Śląskiej, studia w zakresie automatyki przemysłowej ukończył w 1974 roku. W roku 1986 ukończył studia podyplomowe na Wydziale Chemicznym Politechniki Śląskiej w zakresie Nowoczesnych Przemysłowych Syntez Organicznych. W 2001 roku uzyskał II stopień specjalizacji zawodowej inżyniera w dziedzinie automatyka i pomiary. Od roku 2002 jest Prezesem Biura Inżynierskiego „ATECHEM” sp. z o.o. w Kędzierzynie-Koźlu (spółka GRUPY INTROL). Działa aktywnie w Komitecie Bezpieczeństwa Funkcjonalnego zajmującego się bezpieczeństwem procesowym. W swoim dorobku ma ponad 150 projektów na rzecz przemysłu chemicznego oraz kilkanaście artykułów dotyczących systemów bezpieczeństwa i automatyki.

tel. 0-48 607 274 808
tadeusz.kunicki@atechem.pl