

Semantyczna reprezentacja systemu bezpieczeństwa. Metoda analizy rezonansu funkcjonalnego FRAM

Jan Andreasik

Wyższa Szkoła Informatyki i Zarządzania w Rzeszowie

Streszczenie

Artykuł prezentuje opis metody funkcjonalnego rezonansu FRAM (Functional Resonance Analysis Method) opracowanej przez Hollnagela. W artykule przedstawiono model reprezentacji systemu bezpieczeństwa oraz procedury agregacji zmienności funkcji. Podano szereg przykładów wykorzystania metody FRAM w analizie bezpieczeństwa systemów technicznych i przedsiębiorstw. Artykuł ma charakter kompilacyjny.

Słowa kluczowe: FRAM, model reprezentacji systemu bezpieczeństwa

1. Opis modelu Functional Resonance Analysis Method (FRAM)

Haavik (2014) przedstawił trzy teorie dotyczące analizy bezpieczeństwa:

- NAT (Normal Accident Theory) — normalna teoria wypadków,
- HRO (High Reliability Organisations) — organizacja o wysokiej niezawodności,
- RE (Resilience Engineering) — inżynieria odporności systemu.

Te trzy teorie stanowią mają charakter ontologii, która jest rozumiana jako oryginalny sposób ujęcia systemu bezpieczeństwa w ramach zdefiniowanej teorii i z uwzględnieniem określonego aparatu pojęciowego. Wg autora niniejszej pracy do analizy semantycznej nadaje się przede wszystkim trzecia teoria, w ramach której opracowano model FRAM (Hollnagel i inni 2014). Model FRAM stanowi sieć semantyczną definiowaną poprzez zidentyfikowane funkcje systemu i relacje pomiędzy nimi.

Podstawą do analizy funkcjonalnej systemu bezpieczeństwa są następujące założenia:

- Bezpieczeństwo i podstawowy model działalności przedsiębiorstwa są ze sobą silnie powiązane. Dlatego w jednym modelu powinny być ujęte podstawowe funkcje działalności przedsiębiorstwa, których wzajemne oddziaływanie wpływa na bezpieczeństwo całego przedsiębiorstwa.
- Istotą funkcjonowania systemu bezpieczeństwa jest takie dopasowywanie różnych parametrów (aspektów) funkcji aby wpływać na poziom lokalnych zaburzeń, które są reprezentowane charakterystyką zmienności funkcji.

Analiza FRAM ujęta jest w czterech krokach:

- Model FRAM konstytuują funkcje (funkcjonalności), które identyfikują ważne systemowe zależności. Każda funkcja jest opisana sześcioma parametrami, które są nazwane aspektami.
- W modelu FRAM analizowana jest zmienność funkcji.
- Model FRAM określa wystąpienie możliwego rezonansu funkcjonalnego na podstawie analizy połączeń między funkcjami oraz aktualnych stanów zmienności funkcji.
- Efektem analizy jest przedstawienie rekomendacji dotyczącej monitorowania zmienności funkcji oraz wpływania na zmienność celem otrzymania pożądanego wyniku.

W dotychczasowych modelach systemu bezpieczeństwa przyjmowano następujące założenia:

- Systemy mogą być podzielone na określone elementy (typowe składowe lub działania). To założenie nazywa się zasadą dekompozycji.
- Funkcjonujący system jest bimodalny. Oznacza to, że składowe są w jednym z dwóch stanów, albo w stanie pracy (realizacji funkcji) albo w stanie uszkodzenia (awarii).

- Sekwencja zdarzeń jest przewidywalna (zdeterminowana). Zdarzenie zachodzi jako efekt stosowania określonej reguły przyczynowo – skutkowej.
- Kombinacje (złożenia) zdarzeń są logiczne i zrozumiałe. Złożenia zdarzeń mogą być opisane logicznymi relacjami (koniunkcji, dysjunkcji lub negacji).



Rys. 1. Ilustracja funkcjonalnego rezonansu

Źródło: Opracowanie na podst. The functional resonance analysis method. [@:] <http://www.functionalresonance.com/>

Funkcjonalny rezonans jest definiowany jako wykryty sygnał pochodzący z niezależnych (nieoczekiwanych) interakcji wielu sygnałów o przewidywalnej (normalnej) zmienności. Złożenie (superpozycja) zmienności sygnałów „środowiska” może prowadzić do rezonansu, stąd wynika „sygnał ostrzegawczy”. Rysunek 1 ilustruje rezonans funkcjonalny.

Hollnagel (2012) dokonał rewizji powyżej przedstawionych założeń w sposób następujący:

- Systemy nie mogą być dekomponowane w istotny sposób, gdyż nie można wyodrębnić względnie odizolowanych elementów lub części.
- Funkcja systemu nie jest bimodalna. Każdy wynik jest i musi być zmienny.
- Parametry wyjścia węzłów funkcyjnych są lepiej określane przez relacje niż przez czynniki, lepiej przez zmienność wyników niż przez prawdopodobieństwo uszkodzeń (usterek).
- Wiele zdarzeń niekorzystnych może stanowić warunki uszkodzeń i defektów w normalnie przebiegających funkcjach. Wiele z tych zdarzeń musi być rozumiane jako wynik kombinacji (superpozycji) zmienności zwykłych (normalnie identyfikowanych) wyników.
- Analiza ryzyka i bezpieczeństwa powinna być prowadzona jako analiza ważności zmienności codziennych wyników i jako analiza wpływu warunków, które przekładają te zmienności na pozytywne lub negatywne rezultaty.

Zasady FRAM:

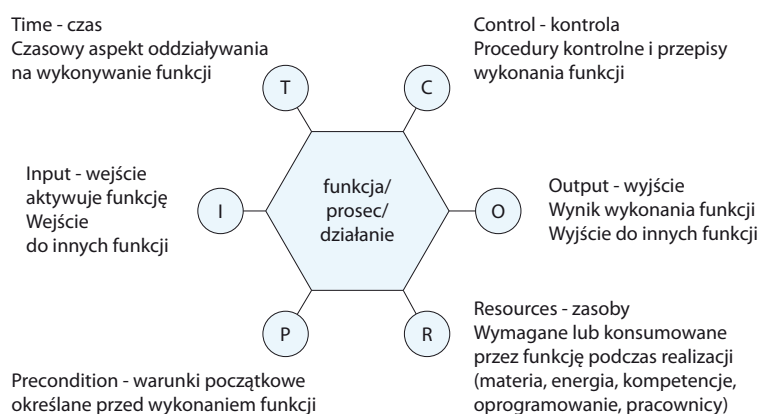
- Zasada ekwiwalentności sukcesów i porażek. Jest to przypuszczenie, że różne rodzaje następstw (konsekwencji) nie wymagają koniecznie różnych rodzajów przyczyn wyjaśniających. Te same wyjaśnienia mogą być stosowane w wielu przypadkach.
- Zasada przybliżonego dostosowania. Pracownicy ciągle dopasowują warunki do prowadzonych czynności. Odbywa się to w sposób przybliżony.
- Zasada emergencji (stanu nagłego). Nie wszystkie wyniki mogą być wyjaśnione ich specyfiką a jakimś niezidentyfikowanym przypadkiem.
- Zasada rezonansu. W przypadku, w którym niemożliwe jest lub bezsensowne wyjaśnienie na podstawie zasady przyczynowości; do opisu i wyjaśnienia nieliniowych interakcji i wyników może być stosowany rezonans funkcjonalny.

Definicja funkcji:

Funkcja w modelu FRAM reprezentuje treści, które są konieczne do osiągnięcia zamierzonego celu. Funkcja reprezentuje akty lub działania, proste lub kompleksowe, które są potrzebne do osiągnięcia pewnego wyniku. Funkcja opisuje to co pracownicy mogą indywidualnie lub kolektywnie wykonać aby otrzymać określone rezultaty. Funkcja wskazuje również na to, co organizacja lub system techniczny wykonuje.

Funkcje FRAM są opisane sześcioma parametrami (aspektami):

- Wejście — „coś (był)” co jest transformowane przez funkcję do wyjścia, np. materia, energia, informacja. Wejście aktywuje początek wykonania funkcji. Wejście w tym sensie może być instrukcją do rozpoczęcia wykonywania czegoś co musi być wykryte i rozpoznane przez funkcję. Wejście może być formą danych lub informacją. Może być stanem zmiany, który jest rozpoznawany przez funkcję jako sygnał do rozpoczęcia realizacji zadania. Formalnie wejście jest zawsze stanem zmiany czegoś, tj. energii, informacji, pozycji itp.
- Wyjście — jest opisem wyniku realizacji funkcji. Wyjście reprezentuje materia, energia lub informacja. Wyjście opisuje zmianę stanu systemu lub jeden albo więcej parametrów. Wyjście może być sygnałem stanu funkcji.
- Warunki początkowe — w wielu przypadkach funkcja nie może się wykonywać jeżeli jeden lub więcej warunków początkowych nie będzie spełnionych. Warunki początkowe mogą być rozumiane jako stany systemu, które muszą być prawdziwe, lub które muszą być spełnione lub zweryfikowane przed wykonaniem funkcji. Wyjście z innej strony może aktywować inną funkcję. Warunek początkowy musi być wyjściem z innej funkcji.
- Zasób — zasób jest wymagany lub konsumowany podczas wykonania funkcji. Zasób może reprezentować materię, energię, informację, kompetencje, oprogramowanie, narzędzia, pracowników itd. Czas może być także rozważany jako zasób.
- Kontrola — kontrola może być planem, harmonogramem, procedurą, zbiorem przewodników lub instrukcji, programem (algorytmem) mierzącym lub korygującym funkcjonalność. Kontrola jest kontrolą warunków socjalnych lub oczekiwaniami jak praca powinna być wykonana. Kontrola warunków socjalnych może być zewnętrzna, tj. dotycząca oczekiwania innych (zarządzanie organizacją, oczekiwania personalne, współpracownicy). Kontrola warunków socjalnych może być wewnętrzna dt. komunikacji między pracownikami, harmonogramu czynności itp.
- Czas — ten aspekt reprezentuje różne warianty wykonywania funkcji w czasie. Aspekt czasowy reprezentuje sekwencję warunków z warunkiem początkowym.

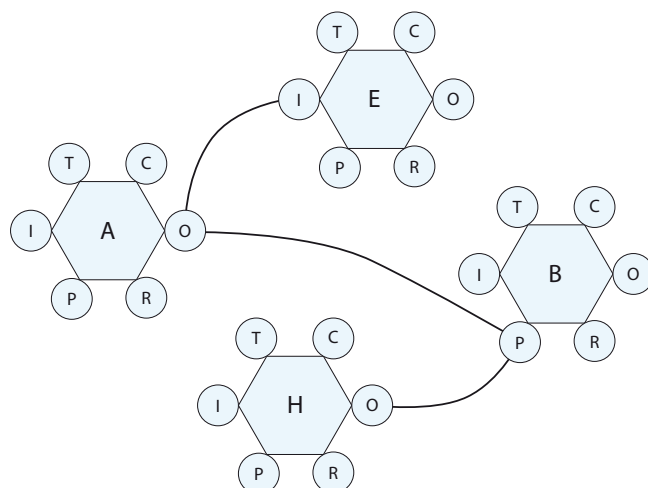


Rys. 2. Struktura węzła sieci funkcji. Parametry (aspekty) funkcji

Model FRAM przedstawia sieć funkcji, którą tworzą węzły reprezentujące funkcję oraz połączenia pomiędzy odpowiednimi parametrami (aspektami) różnych funkcji. Rysunek 3 przedstawia przykładową sieć funkcji z odpowiednimi połączeniami. Wyjście funkcji A jest definiowane jako warunek początkowy funkcji B. Dwie funkcje są połączone. Funkcja B wykorzystuje wejście funkcji A jako warunek początkowy. Wyjście funkcji A jest wejściem funkcji E. Warunek początkowy funkcji B jest wyjściem funkcji H. Rodzaje połączeń: typu n–n lub typu 1–1.

Model systemu utworzony na podstawie metody FRAM może być podstawą do analizy zdarzeń, analizy ryzyka lub oceny projektu. W modelowaniu istotne są dwa postępowania: opis zmienności funkcji (funkcjonalności) i opis zależności funkcji od innych funkcji.

Analiza zmienności funkcji koncentruje się na określeniu zmienności wyjścia funkcji. Są trzy powody zmienności wyjścia funkcji:



Rys. 3. Przykładowy model FRAM

- Zmienność wyjścia może być wynikiem zmienności samej funkcji wynikającej z jej charakterystycznego przebiegu (unikalności).
- Zmienność wyjścia może być spowodowana zmiennością oddziaływania środowiska, tj. warunkami, w których funkcja działa. Jest to nazywane zewnętrzną lub egzogeniczną zmiennością.
- Zmiany na wyjściu danej funkcji mogą być spowodowane zmianami wyjścia innych funkcji mających wpływ na daną funkcję. Ten typ połączenia funkcji jest podstawą wystąpienia rezonansu funkcjonalnego. Występuje tutaj połączenie funkcji typu: poprzednia funkcja-następująca funkcja.

Zmienność funkcji może być także spowodowana kombinacją tych trzech przyczyn. Istnieją charakterystyczne różnice w zmienności funkcji typu technologicznego, organizacyjnego i funkcji realizowanych przez człowieka.

W modelu FRAM definiowane są następujące typy zmienności funkcji:

- V+ oznacza, że dana zmienność najprawdopodobniej wzrośnie,
- V- oznacza, że dana zmienność najprawdopodobniej zostanie zredukowana,
- V+- oznacza, że najprawdopodobniej zmienność będzie niezmienną.

W pierwszej wersji modelu FRAM zastosowano metodę CPC (Common Performance Conditions) do szacowania zmienności wyniku funkcji.¹ Ideą metodologii było to, że szkodliwe warunki wywołują wzrost zmienności wyników podczas gdy sprzyjające warunki powodują spadek zmienności. Opracowano listę 11 podstawowych warunków wpływających na zmienność wyjścia funkcji:

- Dostępność zasobów. Adekwatne do realizacji funkcjonalności zasoby są konieczne do osiągnięcia stabilnego wyniku. Niedostateczne zasoby są przyczyną wzrostu zmienności. Przykładami zasobów są; personel, wyposażenie i materiały.
- Szkolenie i doświadczenie (kompetencje). Poziom i jakość przeszkolenia wraz z doświadczeniem operacyjnym, ma bezpośredni wpływ na zmienność wyniku.
- Jakość komunikacji. Rozpatruje się w aspekcie punktualności i dokładności. Obydwa aspekty dotyczą funkcji technologicznych (działania aparatury, dostarczania środków zabezpieczających) oraz funkcji wykonywanych przez człowieka (socjalnych).
- Interakcje człowiek-maszyna i doradztwo. Rozpatrywane jest działanie interfejsów i formy wspomagania operacyjnego.
- Dostępność procedur i planów. Oceniana jest dostępność planów, procedur i formy doradztwa i wspomaganie.
- Warunki pracy. Analiza dotyczy środowiska pracy: oświetlenie, hałas, temperatura, ergonomia itp.
- Liczba celów i konflikt rozwiązań. Analiza dotyczy określenia przydziału ludzi do zadań i realizowanych celów. Analizowane są sytuacje konfliktowe w różnych scenariuszach rozwiązań.

1. Zob. The functional resonance analysis method. [@:] <http://www.functionalresonance.com/>.

- Dostępność czasu i presja czasu. Brak poczucia czasu, nawet jeżeli jest subiektywny, jest źródłem psychologicznego stresu pracowników i może prowadzić do obniżenia jakości wyniku.
- Regularny rytm i stres. Ocena dotyczy dopasowania człowieka do bieżącej sytuacji. Brak snu, asynchroniczność działań może być przyczyną złego wyniku.
- Jakość współpracy w zespole. Ocenie podlega poziom współpracy członków zespołów, grup formalnych i nieformalnych, poziom zaufania i ogólny klimat pracy.
- Poziom jakości i doradztwa w organizacji. Ocenie podlega struktura obowiązków służbowych, zakresy odpowiedzialności, systemy bezpieczeństwa, instrukcje, regulaminy, instrukcje działań w ekstremalnych warunkach, rola zewnętrznych instytucji.

W tabeli 1 przedstawiono wpływ warunków CPC na podstawowe rodzaje funkcji w układzie Człowiek–Technologia–Organizacja (MTO — HuMan–Technology–Organisation).

Do oszacowania prawdopodobieństwa zmienności każdej funkcji, każdy z 11 warunków CPC jest oceniany z trzech punktów widzenia: adekwatności, nieadekwatności i nieprzewidywalności.

Do oceny zmienności wyniku funkcji, konieczna jest charakterystyka jakości wszystkich jej aspektów. Każdy aspekt może być charakteryzowany za pomocą cech jakości: dokładności i punktualności:

- wartości cechy „dokładność”:
 - precyzyjna,
 - odpowiednia,
 - nieprecyzyjna;

Tab. 1. Wpływ warunków na funkcje MTO (człowiek – technologia – organizacja)

Warunki wpływające na funkcje	Funkcje		
	człowieka	maszyny	organizacji
Dostępność zasobów	×	×	
Kompetencje	×		
Jakość komunikacji	×	×	
Interfejsy człowiek-maszyna		×	
Dostępność procedur i planów	×		
Warunki pracy		×	×
Liczba celów i konflikt rozwiązań	×		×
Dostępność czasu i presja czasu	×		
Rytm i stres	×		
Współpraca w zespole	×		
Jakość i doradztwo			×

Tab. 2. Oszacowania zmienności funkcji w zależności od oceny warunków

Warunki zmienności funkcji	Adekwatność	Nieadekwatność	Nieprzewidywalność
Dostępność zasobów	mała	zauważalna	wysoka
Kompetencje	mała	wysoka	wysoka
Jakość komunikacji	mała	zauważalna	wysoka
Interfejsy człowiek-maszyna	mała	zauważalna	wysoka
Dostępność procedur i planów	mała	zauważalna	wysoka
Warunki pracy	mała	zauważalna	wysoka
Liczba celów i konflikt rozwiązań	mała	wysoka	wysoka
Dostępność czasu i presja czasu	mała	wysoka	bardzo wysoka
Rytm i stres	mała	zauważalna	wysoka
Współpraca w zespole	mała	zauważalna	wysoka
Jakość i doradztwo	mała	zauważalna	wysoka

- wartość cechy „punktualność”:
 - za wcześnie,
 - w czasie,
 - za późno.

Tab. 3. Charakterystyka zmienności wyników funkcji typu człowiek–technologia–organizacja

Typ funkcji	Funkcje		
	zależne od człowieka	technologiczne	organizacyjne
Charakterystyka wyniku	Dopasowanie wyniku do bieżących warunków pracy	Stabilność funkcji Niezawodność, przewidywalność	Wspomaganie i wartościowanie funkcji technologicznych i zależnych od człowieka
Zmienność wyniku	Zmienny (duża częstotliwość)	Stabilny, powolne obniżanie	Zmienny (duża inercja)
Potencjał tłumienia zmienności	Istnieje potencjał do tłumienia zmienności wyniku	Nie ma potencjału do tłumienia zmienności wyniku	Prowadzi do podniesienia znaczenia tłumienia zmienności wyniku

2. Procedury agregacji oceny wyjścia funkcji

2.1. Procedura kodowania oceny jakości parametrów funkcji

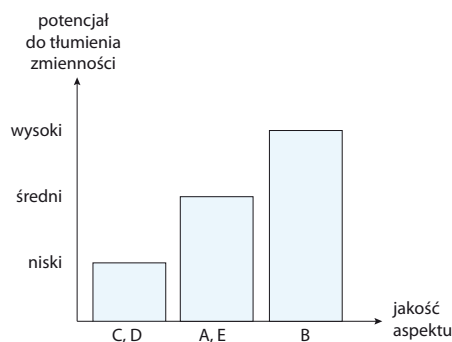
Macchi (2010) przedstawił procedurę kodowania oceny jakości parametrów funkcji oraz agregacji oceny wyjścia funkcji. Dla wyjścia funkcji poprzedzającej określono dwie cechy jakości: punktualność i dokładność. Wartościami (lingwistycznymi) cech są odpowiednio określenia punktualności: za wcześnie, w czasie, za późno oraz dokładności: precyzyjna, odpowiednia, nieprecyzyjna. W tabeli 4, przedstawiono dziewięć typów jakości parametrów funkcji: A, B, C, D, E, F, G, H, I.

Tab. 4. Charakterystyka wyjścia funkcji w relacji do wartości cech dokładności i punktualności

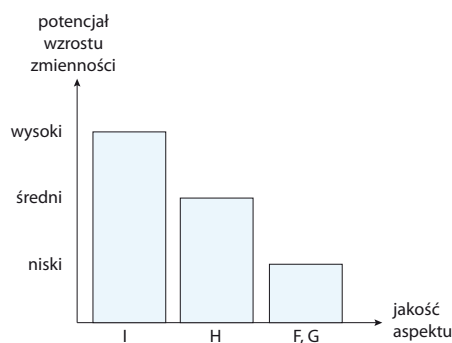
		Punktualność		
		za wcześnie	w czasie	za późno
Dokładność	precyzyjna	A: wyjście do następnej funkcji jest precyzyjne lecz „za wcześnie”	B: wyjście do następnej funkcji jest precyzyjne, „w dobrym czasie”	C: wyjście do następnej funkcji jest precyzyjne lecz opóźnione — redukcja dostępnego czasu
	odpowiednia	D: wyjście do następnej funkcji jest odpowiednie lecz „za wcześnie”	E: wyjście do następnej funkcji jest odpowiednie „w dobrym czasie”	F: wyjście do następnej funkcji jest odpowiednie lecz opóźnione — redukcja dostępnego czasu
	nieprecyzyjna	G: wyjście do następnej funkcji jest nieprecyzyjne i „za wcześnie”	H: wyjście do następnej funkcji jest nieprecyzyjne — następuje korekta czasu	I: wyjście do następnej funkcji jest nieprecyzyjne i opóźnione — redukcja dostępnego czasu.

Każdy parametr (aspekt) wpływa na efekt wyniku zmienności następnej funkcji zależnej od jego jakości. Dobra jakość parametrów (aspektów) kreuje warunki do tłumienia zmienności następnej funkcji. Zła jakość aspektów kreuje warunki do wzrostu zmienności wyniku. Potencjalny wpływ jakości parametru (aspektu) na zmienność wyniku może być ujęty następująco:

- Jakość aspektu: B (precyzyjny i w czasie) → wysoki potencjał do tłumienia zmienności.
- Jakość aspektu: A (precyzyjny i za wcześnie) → średni potencjał do tłumienia zmienności.
- Jakość aspektu: E (odpowiedni i w czasie) → średni potencjał do tłumienia zmienności.
- Jakość aspektu: C (precyzyjny i za późno) → niski potencjał do tłumienia zmienności.
- Jakość aspektu: D (odpowiedni i za wcześnie) → niski potencjał do tłumienia zmienności.
- Jakość aspektu: F (odpowiedni i za późno) → niski potencjał do wzrostu zmienności.
- Jakość aspektu: G (nieprecyzyjny i za późno) → niski potencjał do wzrostu zmienności.
- Jakość aspektu: H (nieprecyzyjny i w czasie) → średni potencjał do wzrostu zmienności.
- Jakość aspektu: I (nieprecyzyjny i za późno) → wysoki potencjał do wzrostu zmienności.



Rys. 4. Efekt dobrej jakości aspektu tłumienia zmienności wyniku funkcji



Rys. 5. Efekt niewłaściwej jakości aspektu na wzrost zmienności wyniku funkcji

Celem dokonania agregacji ocen aspektów funkcji przyjmuje się następujące wartości liczbowe do określenia wartości lingwistycznych ocen potencjału tłumienia/wzrostu zmienności wyniku funkcji.

Oceny liczbowe potencjału do tłumienia zmienności wyniku funkcji:

- niski = +1
- średni = +2
- wysoki = +3

Oceny liczbowe potencjału do wzrostu zmienności wyniku funkcji:

- niski = -1
- średni = -2
- wysoki = -3

Takie podejście ułatwia złożenie efektów jakości aspektów funkcji.

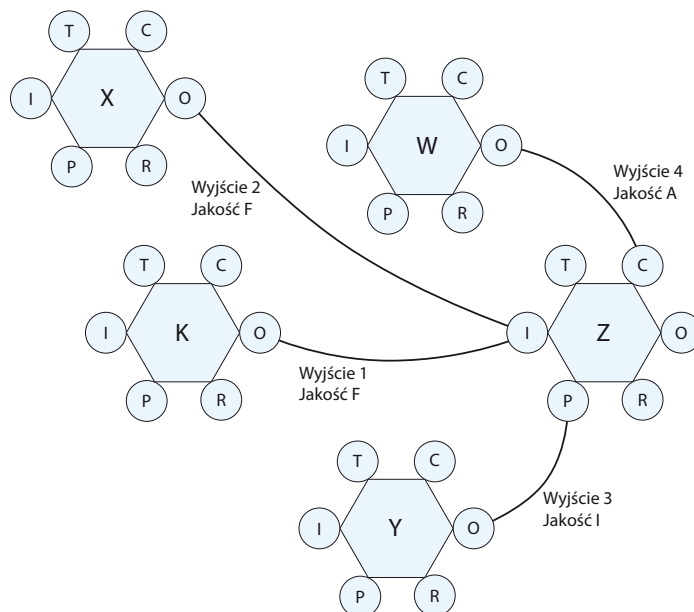
Jako przykład agregacji ocen jakości aspektów funkcji rozważmy funkcję Z (rys. 6 na następnej stronie), która jest połączona z czterema poprzedzającymi funkcjami. Połączenia wiążą cztery aspekty: dwa wejścia, aspekt kontroli i aspekt: warunki początkowe. Jakość parametrów (aspektów) funkcji Z jest następująca:

- Wejście I: jakość F (odpowiednio i za wcześnie),
- Kontrola C: jakość A (precyzyjnie i za wcześnie),
- Warunki wstępne P: jakość I (nieprecyzyjnie i za późno).

W tabeli 5 przedstawiono poszczególne wartości jakości aspektów dla funkcji Z. Do określenia jakości wyjścia funkcji przyjęto następującą zasadę: mediana jakości aspektów jest wartością jakości wyjścia funkcji. W przedstawionym przykładzie mediana wynosi -1, co oznacza jakość wyjścia typu F lub G, co oznacza niski potencjał do wzrostu zmienności funkcji Z.

2.2. Metoda tabel zmienności

W pracach (Hollnagel 2012; Hollnagel i inni 2014) przedstawiono metodę identyfikacji i agregacji zmienności funkcji na podstawie analizy połączeń (relacji) pomiędzy poszczególnymi parametrami dwóch funkcji, z których jedna jest „poprzednikiem” a druga „następnikiem” w układzie przyczynowo-skutkowym. Wyjście funkcji jest charakteryzowane cechami jakości relacji pomiędzy



Rys. 6. Przykład do agregacji zmienności wyniku funkcji Z

Tab. 5. Wartości jakości aspektów funkcji Z

Funkcja Z	Wyjście	Jakość	Wartość jakości
Wejście: I	1	F	-1
	2	F	-1
Wyjście: O			
Kontrola: C	4	A	+2
Warunki wstępne: P	3	I	-3
Zasoby: R			

poszczególnymi parametrami funkcji poprzedzającej i następującej. Cechami jakości połączenia są: punktualność, dokładność, szybkość, rozpoznawalność obiektu, uporządkowanie, siła oddziaływania, ocena działania. Np. jeżeli „poprzednikiem” jest funkcja wysyłania sygnału przez pilota, celem wysunięcia podwozia w samolocie w fazie lądowania, a „następnikiem” funkcja uruchomienia serwo mechanizmu otwierania osłony zabezpieczającej, to jakość relacji wyjście funkcji poprzedzającej a warunek początkowy funkcji następującej ma duże znaczenie na wystąpienie ewentualnej usterki. Ta jakość relacji (połączenia) może być analizowana poprzez podanie wartości (lingwistycznych) cech jakości: punktualności wysłanego sygnału oraz dokładności sygnału, która to cecha określa reakcję serwo mechanizmu na otrzymany sygnał.

W tabelach 6–11 przedstawiono wpływ zmienności różnego typu połączeń pomiędzy dwoma funkcjami. Jedna funkcja jest poprzednikiem a druga następnikiem. Połączenia są realizowane pomiędzy wyjściem funkcji poprzedzającej a poszczególnymi aspektami (parametrami) funkcji następującej. Metoda FRAM zakłada, że model bezpieczeństwa jest ściśle powiązany z modelem funkcjonalnym działalności przedsiębiorstwa. Bezpieczeństwo jest funkcją kontroli zmienności funkcji. Utrzymanie bezpieczeństwa wymaga dopasowywania zmienności (tłumienia zmienności). Rysunek 7 przedstawia schemat pokazujący miejsce modelu FRAM w analizie bezpieczeństwa organizacji.

Przedstawione dwie metody agregacji zmienności parametru wynikowego funkcji stanowią podstawowy element wyznaczania tzw. rezonansu funkcjonalnego w systemie bezpieczeństwa. Według autora metody Hollnagela ocena bezpieczeństwa systemu (przedsiębiorstwa) powinna uwzględniać model funkcjonalności systemu wynikający z analizy jego funkcji zadaniowych. Te funkcje wyróżnia zestaw sześciu grup parametrów opisanych w rozdziale pierwszym. Poziom bezpieczeństwa systemu technicznego lub całego przedsiębiorstwa określany jest zmiennością wyniku funkcji. Rezonans funkcjonalny może pojawić się w różnych węzłach sieci powiązań funkcji. Istotą analizy bezpieczeństwa systemu jest więc monitorowanie zmienności funkcji pod kątem wystąpienia rezonansu funkcjonalnego.

Tab. 6. Efekty zmienności funkcji poprzez połączenie wyjścia funkcji poprzedzającej z warunkiem początkowym funkcji będącej następnikiem

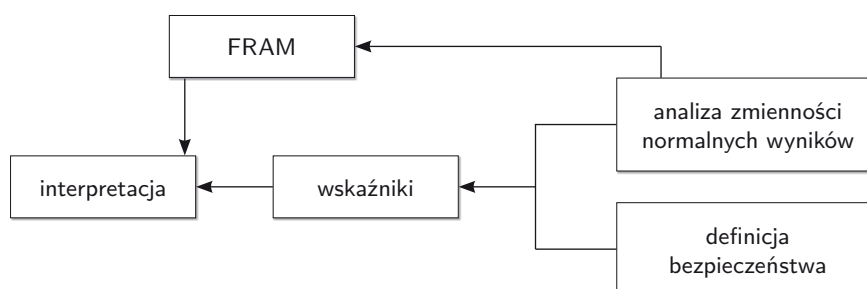
Cechy jakości wyjścia funkcji poprzedzającej	Jakość połączenia	Możliwe efekty zmienności funkcji następującej poprzez połączenie z warunkiem początkowym	Symbol zmienności
Punktualność	za wcześnie	korekta startu, ponieważ oczekuje się na wykonanie — rezerwa czasowa	V+
	w czasie	możliwe stłumienie zmienności	V-
	za późno	możliwe opóźnienia w czasie	V+
	przeoczenie	możliwe opóźnienie czasowe	V+
Dokładność	niedokładnie	możliwe opóźnienie w czasie możliwe niezrozumienie	V-
	akceptacja	bez zmian	V+-
	dokładnie	możliwe tłumienie	V-

Tab. 7. Efekty zmienności funkcji poprzez połączenie wyjścia funkcji poprzedzającej z zasobami funkcji następującej

Cechy jakości wyjścia funkcji poprzedzającej	Jakość połączenia	Możliwe efekty zmienności funkcji następującej poprzez połączenie z zasobami	Symbol zmienności
Punktualność	za wcześnie	bez efektu lub możliwe tłumienie zmienności	V+- V-
	w czasie	możliwe tłumienie zmienności	V-
	za późno	możliwe opóźnienie w czasie	V+
	przeoczenie	możliwa improwizacja, mogą być stosowane alternatywne rozwiązania	V+
Dokładność	niedokładnie	niedostateczna lub redukowalna funkcjonalność	V+
	akceptacja	bez efektu	V+-
	dokładnie	możliwe tłumienie	V-

Tab. 8. Efekty zmienności funkcji poprzez połączenie wyjścia funkcji poprzedzającej z parametrem kontroli funkcji następującej

Cechy jakości wyjścia funkcji poprzedzającej	Jakość połączenia	Możliwe efekty zmienności funkcji następującej w wyniku połączenia z parametrem kontroli	Symbol zmienności
Punktualność	za wcześnie	instrukcje/regulaminy mogą nie uwzględniać sytuacji	V+
	w czasie	możliwe tłumienie zmienności	V-
	za późno	brak lub kontrola ad hoc	V+
	pominięcie	jeżeli jest to możliwe zalecana jest alternatywna procedura kontroli	V+
Dokładność	niedokładnie	usunięcie barier niedokładności	V+
	akceptacja	nie ma efektu	V+-
	dokładnie	możliwe stłumienie zmienności	V-



Rys. 7. Model FRAM w analizie bezpieczeństwa organizacji

Źródło: (Macchi 2010)

Tab. 9. Efekty zmienności funkcji poprzez połączenie wyjścia funkcji poprzedzającej z parametrem ograniczenia czasu funkcji następującej

Cechy jakości wyjścia funkcji poprzedzającej	Jakość połączenia	Możliwe efekty zmienności funkcji następuj. w wyniku połączenia z parametrem ograniczenia czasu	Symbol zmienności
Punktualność	za wcześnie	za wczesny start funkcji, złe uwarunkowania	V+
	w czasie	możliwe tłumienie zmienności	V-
	za późno	problemy z koordynacją, brak synchronizacji, wprowadzenie szybkich decyzji ograniczających	V+
	pominięcie	błędy w ograniczeniach czasu, korekcja startu i zakończenia wykonywania funkcji	V+
Dokładność	niedokładnie	wzrost zmienności	V+
	akceptacja	bez efektu	V+—
	dokładnie	możliwe tłumienie zmienności	V-

Tab. 10. Efekty zmienności funkcji poprzez połączenie wyjścia funkcji poprzedzającej z wejściem funkcji następującej

Cechy jakości wyjścia funkcji poprzedzającej	Jakość połączenia	Możliwe efekty zmienności funkcji następującej w wyniku połączenia z wejściem	Symbol zmienności
Punktualność	za wcześnie	przedwczesny start, wejście może być przeoczone	V+
	w czasie	nie ma efektu lub możliwe tłumienie	V-
	za późno	usunięcie lub przejście do wzrostu przez zastosowanie cięć	V+
	ominięcie	funkcja nie jest wykonywana lub sygnałnie usunięta	V+
Dokładność	niedokładnie	strata czasu, strata dokładności, błędy w rozumieniu	V+
	akceptacja	bez efektu	V+—
	dokładnie	możliwe tłumienie	V-

Tab. 11. Zestawienie zmienności funkcji w wyniku realizacji połączeń

Cechy jakości wyjścia funkcji poprzedzającej	Jakość połączenia	Warunki				Czas
		Wejście	początkowe	Zasoby	Kontrola	
Punktualność	za wcześnie	V+	V+	V+—	V+	V+
	w czasie	V-	V-	V-	V-	V-
	za późno	V+	V+	V+	V+	V+
	ominięcie	V+	V+	V+	V+	V+
Dokładność	niedokładnie	V+	V+	V+	V+	V+
	akceptacja	V+—	V+—	V+—	V+—	V+—
	dokładnie	V-	V-	V-	V-	V-

3. Przykłady modelowania systemów bezpieczeństwa za pomocą modelu FRAM

Metoda rezonansu funkcjonalnego FRAM została wykorzystana do analizy wypadków w transporcie lotniczym, kolejowym, w logistyce przewozów niebezpiecznych materiałów, w analizie zagrożeń w systemach ochrony przeciwpożarowej, w analizie niezawodności urządzeń technicznych i złożonych systemów technicznych. Metoda FRAM została wykorzystana do analizy zagrożeń w procesie badania wypadków lotniczych w Centrum Nawigacji międzynarodowej linii lotniczej (Frost i Mo 2014). Każda funkcja reprezentuje zbiór określonych działań (aktywności) dotyczących koordynacji planu analizy zakłóceń. Poszczególnymi parametrami funkcji są: wejście: start zarządzania planem analizy zakłóceń, wyjście: efekt zarządzania planem analizy zakłóceń, czas: priorytetowe czynności, sterowanie: szkolenie i nabywanie doświadczenia, warunki początkowe: autoryzacja planu, zasoby: zespół kontroli planu.

De Carvalho (2011) przedstawił analizę katastrofy lotniczej w Brazylii. Wypadek dotyczył kolizji lotu GLO 1907 samolotu Boeing 737–800 oraz lotu N600XL samolotu EMBRAER E-145, 29 września 2006 r. W pracy (Alvarenga i inni 2014) przedstawiono układ sieci funkcji w modelu FRAM do analizy systemu bezpieczeństwa w przedsiębiorstwie. Schemat tworzą funkcje: przegląd procedur, aktualizacja funkcji bezpieczeństwa, monitorowanie funkcji bezpieczeństwa, weryfikacja operacji planowanych i powrót do normalnych warunków. W pracy (Oedewald i inni 2012) przedstawiono wyniki projektu MeReMO, którego celem było praktyczne wdrożenie metody FRAM w analizie systemu bezpieczeństwa utrzymania i eksploatacji agregatów prądotwórczych w elektrowni atomowej. Zidentyfikowano 25 funkcji podzielonych na podstawowe i drugoplanowe. W pracy (Belmonte i inni 2011) przedstawiono metodę FRAM do analizy bezpieczeństwa transportu kolejowego. Model zastosowano do analizy automatycznego systemu kontroli ruchu ATS (Automatic Train Supervision System). Model FRAM zastosowano do interpretacji badań eksperymentalnych otrzymanych z symulacji systemu ATS w sytuacjach z wypadkami kolejowymi. Pereira (2013) dokonał analizy bezpieczeństwa przewozu farmaceutycznych materiałów radioaktywnych. Zidentyfikowano 8 funkcji obejmujących przygotowanie radioaktywnych materiałów medycznych do transportu. Funkcje dotyczą monitorowania opakowania po załadowaniu materiałem radioaktywnym oraz kontroli radioaktywności samochodu po zapakowaniu. Analizie zmienności poddawane są połączenia pomiędzy funkcjami. Zmienność wyjścia analizowanej funkcji jest zależna od jakości powiązania pomiędzy funkcjami poprzedzającymi. W raporcie przedstawiono analizę zmienności sześciu połączeń.

Tab. 12. Możliwe efekty zmienności funkcji <pakowanie medycznych materiałów radioaktywnych>

Funkcja wpływająca poprzednik	Połączenie wyjście→ warunki wstępne	Analizowana funkcja	Efekt wpływający na zmienność funkcji		
			Punktualność	Dokładność	
Włączenie miernika radioaktywności na 15 min. przed rozpoczęciem procesu monitorowania	Urządzenie włączone na 15 min. Przed operacją lecz niewłaściwie funkcjonujące	Pakowanie materiałów radioaktywnych, miernik w pełni działający, ukończona dokumentacja transportu	Za wcześnie lub w czasie	niedokładnie	Możliwe tłumienie, zmienność funkcji V–

Zakończenie

W artykule przedstawiono podstawowe definicje modelu funkcjonalnego rezonansu FRAM. Następnie podano dwie procedury analizy zmienności funkcji w sieci powiązań między funkcjami definiowanymi zestawem sześciu parametrów <Wejście, Wyjście, Zasoby, Warunki początkowe, Czas, Kontrola>. Analiza zmienności funkcji polega na agregacji ocen jakości relacji pomiędzy poszczególnymi parametrami powiązanych ze sobą funkcji. W ten sposób poszukuje się rezonansu funkcjonalnego zilustrowanego na rys.1. Autor metody FRAM z zespołem współpracowników tworzy międzynarodowy zespół naukowo- ekspercki. Prace zespołu publikowane są na portalu www.functionalresonance.com. Na portalu jest umieszczone oprogramowanie FRAM Model Builder do opracowania sieci semantycznej modelu FRAM. Za pomocą tego oprogramowania można dokonać symulacji zmienności funkcji.

Literatura

- ALVARENGA M.A.B., MELO P.F.F.E., FONSECA R.A. (2014): *A Critical Review of Methods and Models for Evaluating Organizational Factors in Human Reliability Analysis*. „Progress in Nuclear Energy”, nr 75, s. 25–41.
- BELMONTE F., SCHÖN W., HEURLEY L., CAPEL R. (2011): *Interdisciplinary Safety Analysis of Complex Socio-Technological Systems Based on the Functional Resonance Accident*

- Model: An Application to Railway Traffic Supervision*. „Reliability Engineering and System Safety” (96), s. 237–249.
- DE CARVALHO P.V.R. (2011): *The Use of Functional Resonance Analysis Method (FRAM) in a mid-Air Collision to Understand Some Characteristics of the Air Traffic Management System Resilience*. „Reliability Engineering & System Safety”, nr 96 (11), s. 1482–1498.
- FROST B., MO J.P.T. (2014): *System Hazard Analysis of a Complex Socio-Technical System: The Functional Resonance Analysis Method in Hazard Identification*. [w:] T. Cant (red.): *Conferences in Research and Practice in Information Technology (CRPIT)*. nr 156, Melbourne.
- HAAVIK T.K. (2014): *On the Ontology of Safety*. „Safety Science”, nr 67, s. 37–43.
- HOLLNAGEL E. (2012): *FRAM, the Functional Resonance Analysis Method. Modelling Complex Socio-Technical Systems*. Farnham, Surrey, UK England – Burlington, VT, Ashgate.
- HOLLNAGEL E., HOUNSGAARD J., COLLIGAN L. (2014): *FRAM — the Functional Resonance Analysis Method — a Handbook for the Practical Use of the Method*. Centre for Quality.
- MACCHI L. (2010): *A Resilience Engineering Approach for the Evaluation of Performance Variability: Development and Application of the Functional Resonance Analysis Method for air Traffic Management Safety Assessment*. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, Paris.
- OEDEWALD P., MACCHI L., AXELSSON C., EITRHEIM M.H.R. (2012): *Intermediate Report of MoReMO. Modelling Resilience for Maintenance and Outage*. www.iaea.org, Nordic nuclear safety research, [dostęp: 2015.11.21], [[:] http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/43/046/43046502.pdf.
- PEREIRA A.G.A.A. (2013): *Introduction to the Use of FRAM on the Effectiveness Assessment of a Radiopharmaceutical Dispatches Process*. International Nuclear Atlantic Conference — INAC 2013, 2013.11.24–29, Recife, PE, Brazil.