

# Zastosowanie metodologii FMECA do budowy struktur systemów mechatronicznych, zorientowanych na predykcję stanów

Mariusz Piotr Hetmańczyk

Instytut Automatykacji Procesów Technologicznych i Zintegrowanych Systemów Wytwarzania,  
Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska, Gliwice

**Streszczenie:** Artykuł przedstawia ocenę wykorzystania metodologii FMECA do analizy pracy rozproszonych systemów przemysłowych, w których występuje możliwość zdefiniowania jednorodnej struktury zależności pomiędzy bieżącymi stanami, a wywoływanymi przez nie skutkami. Opisywany sposób zastosowania metodologii FMECA, w przypadku przedstawionych kryteriów, odbiega od tradycyjnego ujęcia metody. Pozwala jednak na zbudowanie modelu prognostycznego, bazującego na wiedzy eksperckiej, w odniesieniu do opracowanych już aplikacji. Ponadto proponowana koncepcja stanowi spójny element z prezentowanym przez autora Komputerowym Systemem Sterowania i Diagnostyki Napędów Rozproszonych [1–3], który stanowi podbudowę do opracowania opisywanej koncepcji.

**Słowa kluczowe:** diagnostyka, monitorowanie, predykcja stanów, systemy rozproszone, metodologia FMECA

## 1. Wprowadzenie

Metoda FMEA (Failure Modes and Effects Analysis) znalazła zastosowanie w identyfikacji wielu cech obiektów przemysłowych na etapach opracowania koncepcji projektowej, użytkowania, szacowania cech procesów generacji oraz charakteru błędów pracy [4].

**Tab. 1.** Porównanie metodologii FMEA oraz FMECA

**Tab. 1.** A comparison of FMEA and FMECA methodologies

FMEA (Failure Modes and Effects Analysis)	FMECA (Failure Mode, Effects and Criticality Analysis)
pkt. I–VII (rys. 1)	
	pkt. VIII (analiza krytyczności, rys. 1)

Kolejnym etapem rozwoju metodologii FMEA była metodologia FMECA (Failure Mode, Effects and Criticality Analysis) poszerzona o analizę krytyczności, opartą na zdefiniowanych poziomach krytyczności oraz prawdopodobieństwach ich wystąpienia.

Metodologia FMEA została opracowana w kilku wariantach, różniących się podmiotem analizy [4, 7]:

- **System FMEA** – identyfikacja skutków awarii na etapie projektu systemu oraz skupienie uwagi na najbardziej zawodnych elementach,

- **Design FMEA** – identyfikacja skutków konkretnych defektów (etap projektowania) komponentów lub podsystemów, a następnie zdefiniowanie akcji do zarządzania oraz kontroli ryzyka zidentyfikowanych defektów,
- **Process FMEA** – identyfikacja skutków awarii spowodowanych pominięciem na etapie projektu procesu, a następnie zdefiniowanie akcji do zarządzania oraz kontroli ryzyka zidentyfikowanych defektów.



**Rys. 1.** wSchemat metodologii FMECA

**Fig. 1.** A scheme of the FMECA methodology

Analiza krytyczności, zaimplementowana w ramach metodologii FMECA, pozwala na zastosowanie w wielu aplikacjach (innych niż zdefiniowanych w pierwotnym brzmieniu jej definicji).

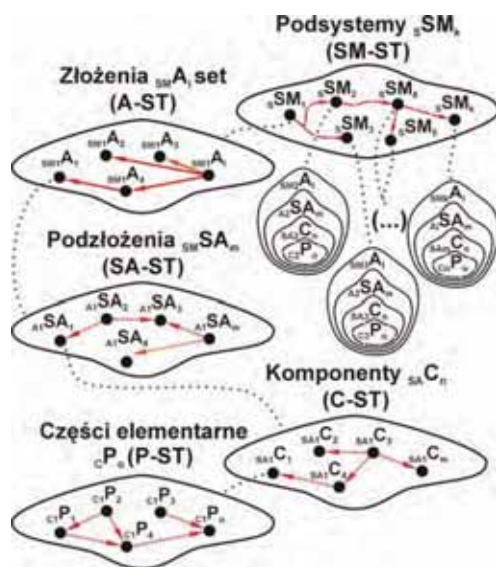
## 2. Modyfikacje proponowanej metody

### 2.1. Zapis struktur systemów mechatronicznych

Podział oraz sposób zapisu zależności pomiędzy elementami systemu mechatronicznego [11], zgodny z metodologią FMECA, jest stosunkowo oczywisty oraz wynika z reguł stosowanych od wielu lat.

Uporządkowany sposób określenia wzajemnych zależności oraz podział strukturalny znacznie ułatwiają analizę niesprawności układów, jednak dominującą tendencją pozostaje zapis w formie schematu blokowego. Schemat najczęściej nie jest poddawany dalszej analizie, a służy jedynie do graficznej interpretacji zasad działania środka technicznego. Trudności w realizacji komputerowej analizy strukturalnego schematu blokowego doprowadziły do stopniowego odchodzenia od metodologii FMECA lub szukania elementów zastępczych służących celom zapisu propagacji błędów (np. drzew błędów).

W opisywanym podejściu strukturę schematu blokowego zastąpiono grafowym zapisem zależności pomiędzy poszczególnymi elementami (rys. 2), ze względu na prostotę przetwarzania struktury zbudowanej w oparciu o metody macierzowe.



Rys. 2. Schemat zależności strukturalnej pomiędzy elementami systemu mechatronicznego

Fig. 2. A scheme of dependencies between isolated elements of a mechatronic system

Zastąpienie schematu strukturalnego grafem (opracowanym pod kątem różnych analiz) pozwala na uproszczenie procedur wykorzystujących komputerowe przetwarzanie danych, co umożliwia opracowanie dedykowanego narzędzia współpracującego z systemami automatyki przemysłowej.

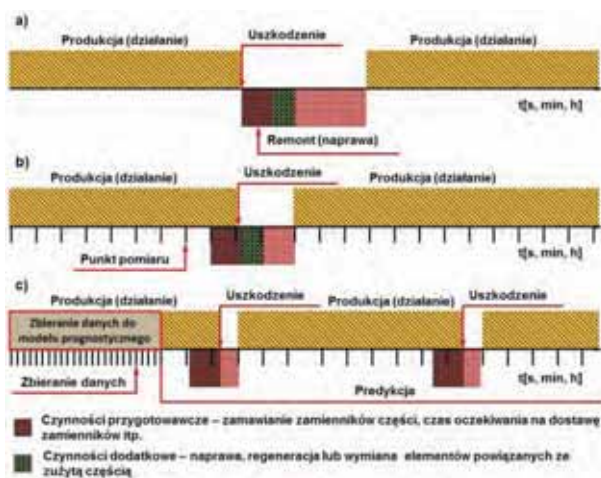
## 2.2. Stopień zbieżności z istniejącymi odmianami obsługi technicznej maszyn

Proponowana metoda budowy struktur systemów mechatronicznych musi być zbieżna z przyjętymi modelami obsługi technicznej maszyn.

Opisywana w niniejszym artykule metoda jest zbieżna z modelem predykcyjnym proaktywnie zapobiegawczym, co implikuje się w następujących cechach:

- występuje śledzenie awarii w celu określenia jej źródła, następnie eliminacja skutków oraz samego źródła nieprawidłowości,
- zachodzi konieczność ścisłej współpracy wielu działów (szczególnie jednostek eksploatacyjnych oraz konstrukcyj-

nych), ponieważ istnieje możliwość wprowadzenia zmian konstrukcyjnych jednostki będącej przedmiotem diagnozy (na bazie wzajemnej wymiany informacji pomiędzy wytwórcą, a użytkownikiem).



Rys. 3. Typy eksploatacji: a) bez nadzoru diagnostycznego, b) z nadzorem diagnostycznym, c) z nadzorem diagnostycznym oraz predykcją stanów

Fig. 3. Types of operation: a) without diagnostic supervision, b) with diagnostic supervision, c) with diagnostic supervision and states prediction

Modele eksploatacji (rys. 3) można scharakteryzować za pomocą następujących cech, w przypadku typu eksploatacji [5, 8, 9, 10]:

- **bez nadzoru** – urządzenie lub proces nie jest naprawiany do czasu jego awarii, co powoduje wydłużenie czasu remontu o ewentualne okresy dostarczenia części zamiennych,
- **z nadzorem diagnostycznym** – użytkownik rejestruje wartości poszczególnych symptomów zgodnie z określonym planem, na bazie wartości bieżących podejmowana jest decyzja o ewentualnym procesie naprawy lub wymiany elementów,
- **z nadzorem diagnostycznym oraz predykcją stanów** – z rejestracją wartości wybranych symptomów, prognozowaniem czasu do awarii oraz walidacją wpływu bieżącego stanu na rozwój ilościowy i jakościowy błędów lub zużycia (wywołanych zidentyfikowanymi nieprawidłowościami).

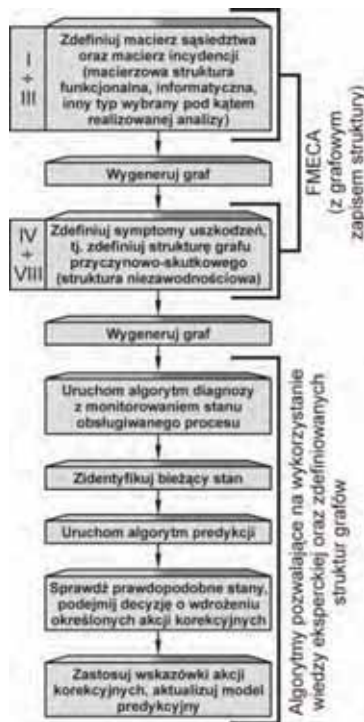
## 2.3. Fazy budowy modelu

Analiza dowolnego systemu technicznego zgodnie z przedstawionymi założeniami (rys. 4) umożliwia sprawdzenie zależności w odniesieniu do struktury fizycznej (analiza wpływu propagacji uszkodzeń w odniesieniu do wiązań fizycznych pomiędzy elementami).

Wprowadzenie do rozważań reprezentacji grafowej oraz zapisu macierzowego nie jest sprzeczne z metodologią FMECA, a powoduje jedynie zmiany w sposobie odwzorowania elementów odpowiedzialnych za definicję rozważanego systemu.

W celu jednoznacznego zdefiniowania sposobu postępowania w fazach określania zależności funkcjonalnych opracowano schemat formalizacji działań, dotyczących

budowy systemu predykcji opartej na digrafach oraz macierzowych metodach przetwarzania sygnałów (rys. 4).



Rys. 4. Schemat kroków niezbędnych do opracowania systemu prognozy stanów opartego na digrafach oraz macierzowym zapisie zależności funkcjonalnych, zgodnym z metodologią FMECA

Fig. 4. A scheme of steps necessary to an execution in case of an elaboration of states prognosis based on digraphs and functional representation taking advantage of matrixes, consistent with the FMECA methodology

Zapis grafowy pozwala na wybór zapisu różnego typu powiązań pomiędzy jego składowymi elementami, w postaci struktur:

- **funkcjonalnej** (w dowolnym stopniu uszczegółowienia rozpatrywanego systemu oraz w ramach wyszczególnionych struktur) – możliwość sprawdzenia wzajemnych relacji (np. parametrów montażowych w postaci siły lub momentu dokręcenia), w aspekcie poprawnej współpracy poszczególnych struktur funkcjonalnych, określenie cech montażowych, warunków tarcia, ubytków struktur powierzchniowych itp.,
- **informatycznej** – sposób, kierunek oraz zależności definiujące charakter przekazywania sygnałów między elementami składowymi danego systemu,
- **prognostycznej** – graf przyczynowo-skutkowy zawierający podstawowe elementy pozwalające na definicję stanów (awarii lub sprawności), a także wzajemnych zależności pomiędzy poszczególnymi stanami (krawędzie definiujące system powiązań w postaci struktury grafu), charakter ilościowy rozpatrywanych przejść pomiędzy zdefiniowanymi stanami jest określony za pomocą wag poszczególnych krawędzi.

Dodatkową zaletą metody jest możliwość zbudowania grafowych modeli tego samego systemu, na różnych poziomach funkcjonalności działania, a następnie połączenie opracowanych modeli w jeden spójny i kompleksowy system. Dodatkowo żadna ze struktur nie koliduje z relacjami zawartymi w innych modelach, ponieważ struktury te operują na zupełnie innych wartościach zależności pomiędzy ich elementami. Należy jednak pamiętać o ustaleniu wspólnego podziału funkcjonalnego, który określa podstawowe zależności funkcjonalne danego systemu na poziomie konstrukcyjnym.

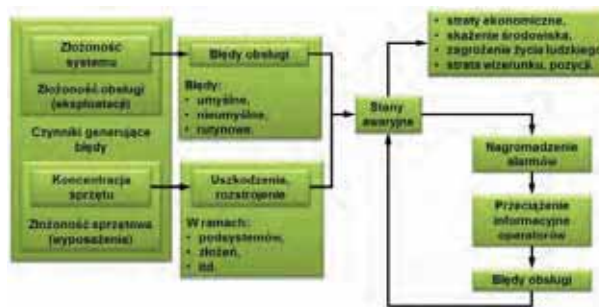
Każdy z wymienionych sposobów wymaga pozyskania określonych danych, pozwalających na opracowanie struktury zależności pomiędzy składowymi podsystemu. W większości przypadków wystarczające jest wykorzystanie standardowych danych, wymaganych w modelu eksploatacji predykcyjnej proaktywnie zapobiegawczej (rys. 5).



Rys. 5. Podstawowe elementy wymagane w fazie budowy modelu prognostycznego, bazujące na diagnostycznych metodach pozyskiwania informacji

Fig. 5. Basic elements required at a phase of building of predictive model, based on diagnostic methods of data acquisition

Każdy z wymienionych sposobów zapisu danych definiujących rozpatrywany system pozwala na analizę jednego systemu pod względem różnych kryteriów, co stanowi o uniwersalności metody. Prezentowane podejście oraz metody pozwalają na wspomaganie pracy konstruktorów (pierwotna funkcja metodologii FMECA), inżynierów utrzymania ruchu, informatyków, automatyków, mechaników, diagnostów oraz wielu innych osób odpowiedzialnych za poprawność pracy systemów technicznych (traktowanych, jako zbiór wzajemnie współdziałających podsystemów).



Rys. 6. Źródła błędów występujących w systemach technicznych

Analiza krytyczności jest szczególnie potrzebna w systemach charakteryzujących się dynamiczną zmianą struktury, m.in. rozproszone systemy sterowania, napędy przemysłowe, sieci przemysłowe z urządzeniami typu MASTER i SLAVE. Ogólnie struktur pozwalających na łatwą konfigurację oraz dodanie nowych elementów, bez konieczności wprowadzania znaczących zmian w strukturze opracowanego środka technicznego.

Dodatkowo metodologia FMECA umożliwia implementację procedur pozwalających na identyfikację oraz eliminację większości błędów występujących w zagadnieniach związanych z eksploatacją [6] współczesnych maszyn i urządzeń (rys. 6).

### 3. Wnioski

Metoda analizy FMECA stanowi cenne źródło informacji dotyczącej możliwości eliminacji przyczyn i potencjalnych skutków awarii środków technicznych, nie tylko na etapie projektowania, ale także na etapie związanym z eksploatacją danej maszyny lub procesu.

Uniwersalność oraz prostota metody pozwalają na identyfikację źródeł nieprawidłowości, a także (przy odpowiednim podejściu) opracowanie ścieżki wpływu danego uszkodzenia na inne elementy maszyny. Co przy założeniu znajomości ścieżek propagacji skutków oraz prawdopodobieństw następstw pozwala na zbudowanie modelu prognostycznego, mogącego zostać sprzężonym z urządzeniami automatyki przemysłowej w warstwie sprzętowej.

### Bibliografia

1. Świder J., Hetmańczyk M., *Adaptation of the expert system in diagnosis of the connection of the PLC user interface system and field level*, "Solid State Phenomena", Volume 164 (Mechatronic Systems and Materials: Mechatronic Systems and Robotics), 2010, 201–206.
2. Świder J., Hetmańczyk M., *Method of indirect states monitoring of dispersed electric drives*. BINDT, 2009, 1171–1179.
3. Świder J., Hetmańczyk M., *Komputerowo zintegrowany system sterowania i diagnostyki napędów rozproszonych*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2011.
4. Praca zbiorowa zespołu Room Laboratory. *Rome Laboratory Reliability Engineer's Toolkit*. Systems Reliability Division Rome Laboratory Air Force Materiel Command (AFMC), 1993, 77–128
5. Bloom N. B.: *Reliability Centered Maintenance (RCM) Implementation Made Simple*, McGraw-Hill, USA, 2006.
6. Korbicz J., Kościelny J, M., Kowalczyk Z., Cholewa W.: *Diagnostyka procesów: modele, metody sztucznej inteligencji, zastosowania*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2002.
7. Mc Dermott R., Mikulak R.J., Beauregard M.R., *The basics of FMEA*, CRC Press, New York 2009, 23–38.
8. Nakagawa T., *Maintenance Theory of Reliability*, Springer-Verlag, London, 2005.
9. Bloch H. P., Geitner F. K., *Practical Machinery Management for Process Plants –Machinery Component Maintenance and Repair (vol. 3)*, Elsevier Linacre House, USA, 2005.
10. Dhillon B. S., *Engineering Maintenance - A Modern Approach*, CRC Press, USA, 2002.
11. De Silva C. W., *Mechatronics: an integrated approach*, CRC Press LLC, USA, 2005. ■

### An application of the FMECA methodology to build of structures of mechatronic systems oriented on states prediction

**Abstract:** The paper presents an evaluation of the FMECA methodology used to analysis of a course of the work of distributed industrial systems, where exist the possibility of a definition of a uniform structure of relationships between the current states, and effects caused by them. Described manner of utilization of the FMECA methodology, in case of selected criterions, differs from the traditional consideration of the method. It allows, however, to evaluation of a predictive model, based on expert knowledge in relation to the already developed applications.

In addition, the proposed approach is element consistent with presented by the author Computer Control and Diagnostics System of Distributed Drives, which is the foundation for the development of the described method.

**Keywords:** diagnosis, monitoring, states prediction, distributed systems, FMECA methodology

---

#### dr inż. Mariusz Hetmańczyk

Otrzymał tytuł doktora inżyniera w 2011 roku na Wydziale Mechanicznym Technologicznym Politechniki Śląskiej. Obecnie jest pracownikiem naukowo-dydaktycznym Instytutu Automatykacji Procesów Technologicznych i Zintegrowanych Systemów Wytwarzania. Naukowe zainteresowania skupione są wokół zagadnień automatyki, sterowania, mechatroniki, diagnostyki przemysłowej, predykcji stanów bazującej na metodach grafowych oraz technologii MEMS. Jest autorem wielu publikacji związanych z komputerowym wspomaganem diagnozy oraz prognozy rozproszonych systemów mechatronicznych.



e-mail: [mariusz.hetmanczyk@polsl.pl](mailto:mariusz.hetmanczyk@polsl.pl)

---