



Metodologia pożarowych analiz PSA dla elektrowni jądrowych

Narodowe Centrum Badań Jądrowych (NCBJ)

Pracownia Probabilistycznych Analiz Bezpieczeństwa (MANHAZ)

Podział obszaru elektrowni jądrowej

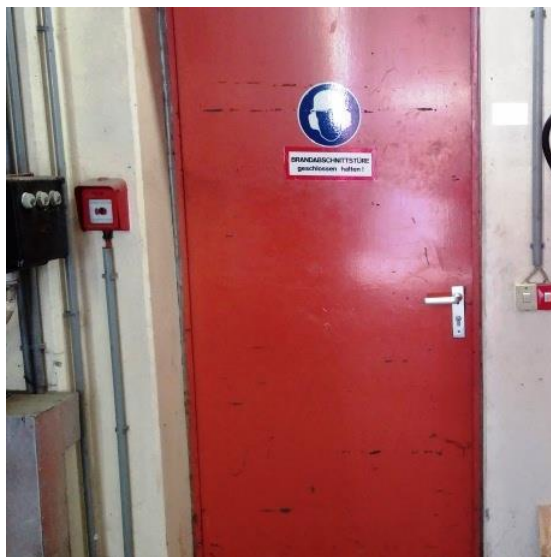
- **Cel:** Wydzielenie stref pożarowych, na terenie elektrowni, które mogą być rozpatrywane niezależnie
 - **Realizacja:** Identyfikacja barier, które mogą zapobiec rozprzestrzenianiu się pożaru poza daną strefę przez określony czas (min. 1h), np. drzwi ognioochronne lub ściana o grubości min. 10cm.
 - **Uwaga:** Należy wykluczyć elementy niesięgające stropu, ściany i bariery, nieprzesłaniające całej powierzchni między strefami, belki podwieszane, izolacje termiczne, a także elementy funkcyjne, np. rury.
1. Określenie granic elektrowni, w obrębie których rozpatrywane będą sekwencje pożarowe
 2. Podział obszaru elektrowni na strefy pożarowe składające się z 1 lub więcej pomieszczeń zamkniętych
 3. Obchód w celu identyfikacji systemów przeciwpożarowych, materiałów palnych i potencjalnych źródeł zapłonu, systemów wentylacji, dostępności dróg dojazdowych, przyległych stref pożarowych oraz komponentów ważnych dla bezpieczeństwa

Podział obszaru elektrowni jądrowej

- Przykłady niewłaściwego wyboru granic stref pożarowych [EJ Zwentendorf]



Kratownica, przez którą może dojść do propagacji pożaru pomiędzy strefami



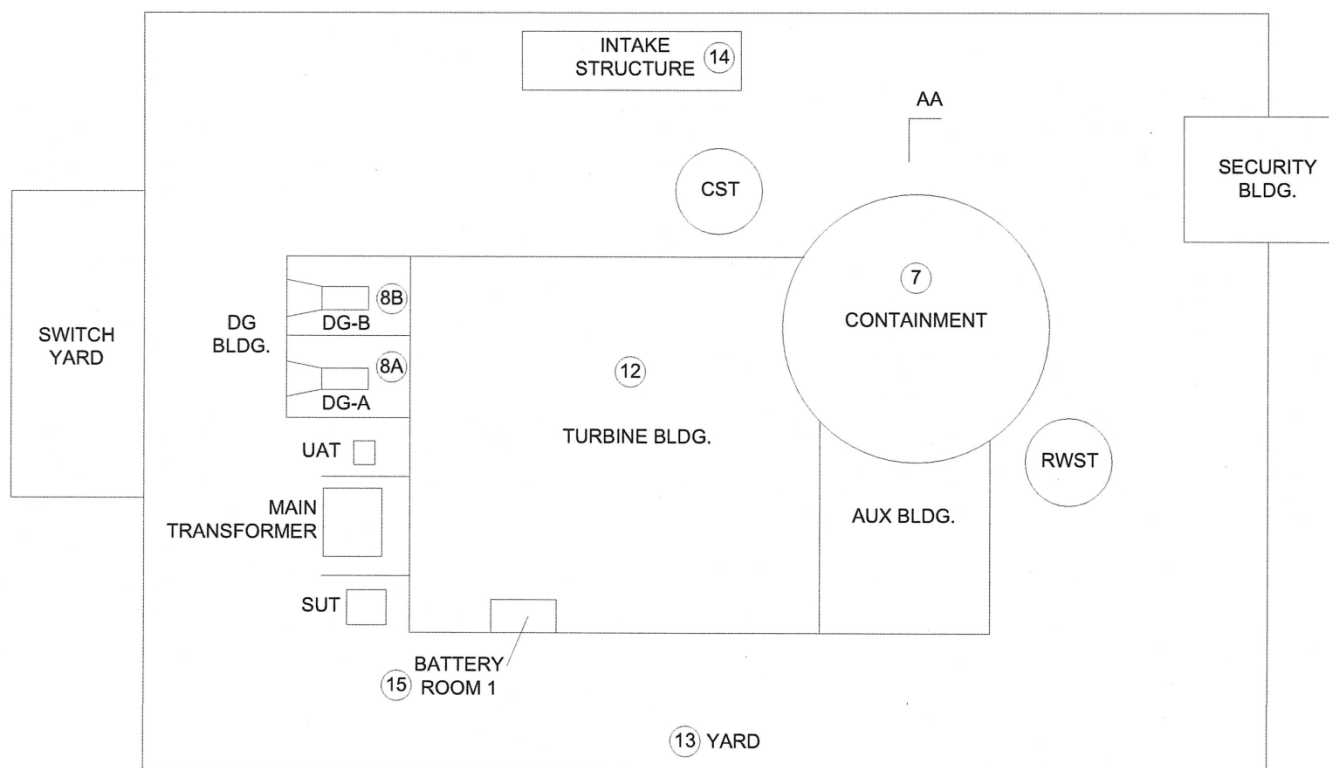
Drzwi z kablami biegnącymi wokół futryny, które mogą się zatlić i przenieść pożar dalej



Nieizolowane okablowanie biegnące przez ścianę do sąsiedniego pomieszczenia

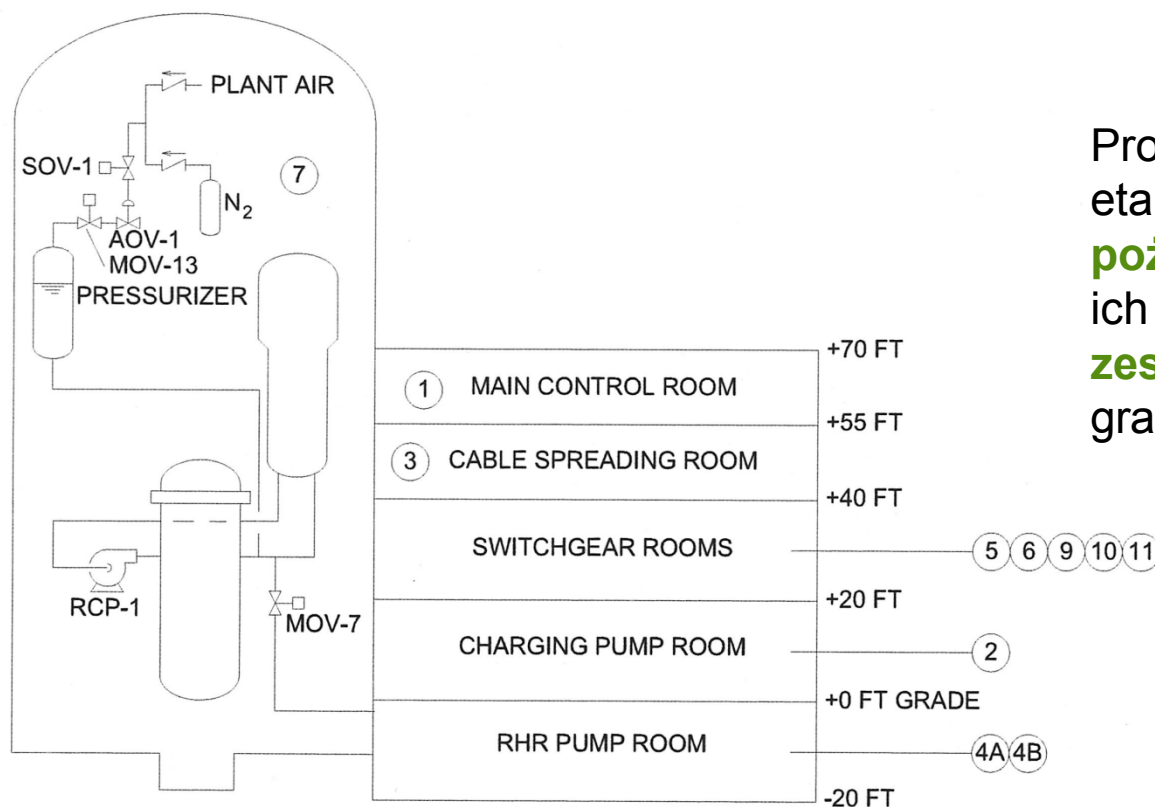
Podział obszaru elektrowni jądowej

- Przykład podziału elektrowni jądowej strefy pożarowe [U.S. NRC & EPRI]



Podział obszaru elektrowni jądrowej

- Przykład podziału elektrowni jądrowej strefy pożarowe [U.S. NRC & EPRI]



Produktem końcowym tego etapu powinna być **lista stref pożarowych**, wraz z opisem ich charakterystyki, a także **zestaw planów ze szkicami** granic poszczególnych stref



Wybór komponentów do pożarowego PSA

- **Cel:** Opracowanie listy aktywnych komponentów instalacji, które będą uwzględnione w modelu PSA pożaru
 - **Komponenty dla pożarowych analiz PSA można podzielić na trzy grupy:**
 - elementy, których awaria na skutek pożaru prowadzi do zdarzeń inicjujących,
 - sprzęt potrzebny do detekcji, gaszenia lub łagodzenia skutków pożaru,
 - oraz sprzęt, którego nieprawidłowe działanie zwiększa zagrożenie podczas pożaru
1. Identyfikacja ciągów zdarzeń wewnętrznych, które należy włączyć lub wykluczyć z modelu PSA pożaru
 2. Identyfikacja zdarzeń inicjujących wywołanych pożarem w oparciu o sprzęt dotknięty pożarem
 3. Identyfikacja urządzeń, których niepożądane działanie może wpływać na wyłączanie reaktora
 4. Opracowanie listy komponentów wraz ze wskazaniem ich lokalizacji w obrębie stref pożarowych



Wybór komponentów do pożarowego PSA

- Podczas wyboru komponentów do Fire PSA nie należy uwzględniać:
 - sekwencji zdarzeń wewn. inicjowanych uszkodzeniami mechanicznymi, których wystąpienie nie może mieć bezpośredniego związku z pożarem
 - sekwencji zdarzeń wewn., które mogą zostać wywołane przez pożar, ale są bardzo mało prawdopodobne (**przynajmniej na początkowym etapie analiz**)
 - sekwencji zdarzeń wewn., których modelowanie wymaga dużych zasobów ludzkich, obliczeniowych, czasowych (**przyjmuje się założenia konserwatywne**)
- Do listy komponentów Fire PSA należy dołączyć urządzenia, których awaria:
 - może spowodować automatyczne wyłączenie reaktora,
 - wymaga manualnego wyłączenia reaktora ze względu na obowiązujące procedury pożarowe lub inne instrukcje wewnętrzne
 - wprowadza tzw. warunki ograniczonej eksploatacji, które zgodnie ze specyfikacją techniczną wymagają wyłączenia reaktora.



Selekcja okablowania do modelu PSA pożaru

- **Cel:** Selekcja okablowania i źródeł zasilania komponentów wybranych do modelu PSA pożaru, jak również identyfikacja ścieżek przebiegu kabli w konkretnych strefach pożarowych oraz pomiędzy nimi
 - **Produktem końcowym** tego etapu powinna być lista obwodów elektr. i kabli wymaganych do prawidłowej eksploatacji komponentów Fire PSA i obwodów z nimi powiązanych.
 - Szczegółowa analiza tych obwodów jest przeprowadzana w kolejnych etapach Fire PSA
1. Zebranie wstępnych informacji
 2. Wybór obwodów i kabli do pożarowych analiz PSA
 3. Identyfikacja źródeł zasilania
 4. Przegląd obwodów powiązanych
 5. Określenie lokalizacji i ścieżek przebiegu kabli
 6. Dokumentacja i baza danych

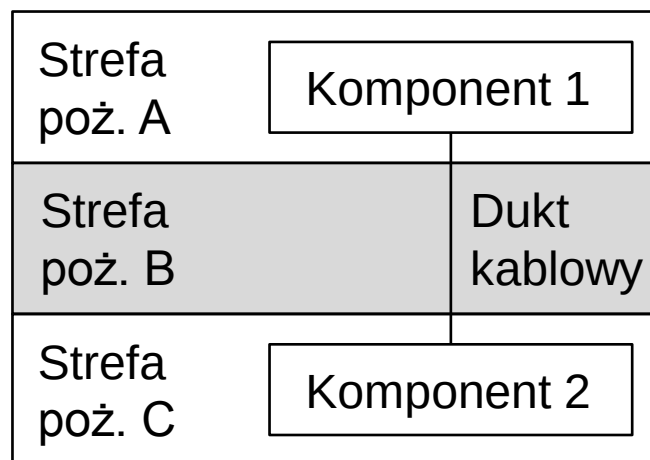
Selekcja okablowania do modelu PSA pożaru

Struktura bazy danych okablowania:

- ID kabla,
- ID powiązanego komponentu,
- funkcja kabla (zasilanie, sterowanie),
- ścieżka kabla (tj. magistrala, dukty),
- punkty wejście/wyjście kabla,
- lokalizacja magistrali,
- lokalizacja punktów końcowych.

Identyfikacja ścieżek przebiegu kabli

Nawet jeśli w strefie pożarowej nie ma komponentów Fire PSA, mogą tam być kable, które trzeba uwzględnić w modelu





Screening jakościowy

- Dana strefa pożarowa może być wyłączona z dalszej analizy (szacowania częstości zapłonu) jeśli spełnione są łącznie następujące kryteria jakościowe:
 - nie zidentyfikowano w jej obrębie żadnych komponentów Fire PSA, ani związanych z nimi obwodów elektrycznych,
 - pożar w obrębie danej strefy nie prowadzi do automatycznego wyłączenia reaktora,
 - manualne wyłączenie reaktora w przypadku pożaru w danej strefie nie jest wymagane przez procedury obowiązujące na terenie elektrowni,
 - specyfikacja techniczna elektrowni nie przewiduje kontrolowanego wyłączenia reaktora w przypadku pożaru w danej strefie,
 - ryzyko rozprzestrzeniania się pożaru na sąsiednie strefy jest relatywnie małe.



Model ryzyka spowodowanego pożarem

- **Cel:** Opracowanie modelu Fire PSA, w celu obliczenia wkładu pożarów do wartości CDF, CCDF, LERF CLERP
 - **Realizacja:** Modyfikacja istniejącego modelu PSA zdarzeń wewnętrznych
 - **Wymagania początkowe:** Model PSA dla zdarzeń wewnętrznych, lista stref zidentyfikowanych pożarowych, lista komponentów wybranych do modelu PSA pożaru, lista wymaganych akcji operatorskich, model rozmieszczenia kabli w poszczególnych strefach
1. Identyfikacja zdarzeń inicjujących jakie mogą być wywołane pożarem w poszczególnych strefach
 2. Przyporządkowanie pożarowych zdarzeń inicjujących do zdarzeń wewnętrznych, których wpływ na elektrownię jest znany
 3. Uwzględnienie awarii wywołanych pożarami w strukturze modelu PSA
 4. Identyfikacja nowych sekwencji i weryfikacja istniejących



Model ryzyka spowodowanego pożarem

- Np. pożar w rozdzielni elektrycznej może spowodować:

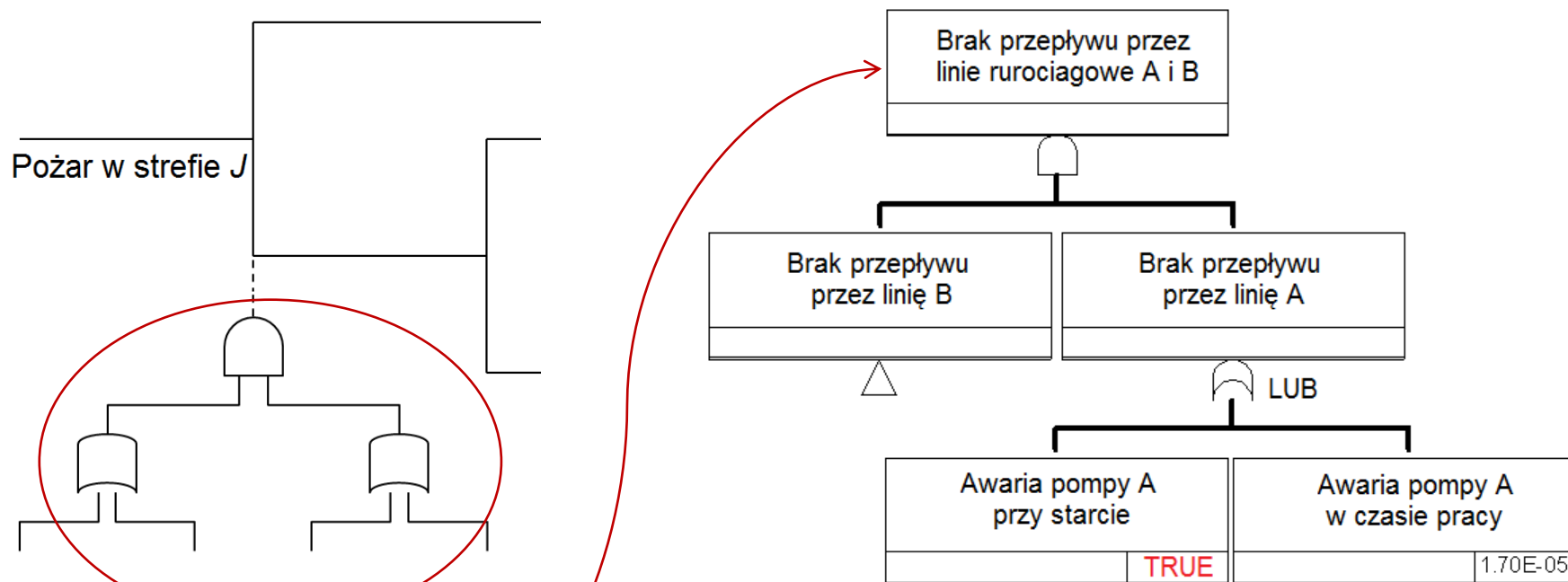
- wyłączenie reaktora
- utratę zasilania zewnętrznego
- otwarcie zaworu bezpieczeństwa
- utrata wody chłodzącej/zasilającej
- utrata możliwości chłodzenia pomp
- ...

Niektóre z skutki pożarów mogą być uwzględnione jako przyczyny zdarzeń inicjujących w istniejącej strukturze modelu PSA, inne natomiast wymagają opracowania nowych sekwencji zdarzeń

- Wywołane pożarem awarie modelowane jako zdarzenia podst.:

- niepożądane uruchomienia lub niedostępność komponentu, która ogranicza działanie systemu bezp.
- awarie aparatury kontrolno-pomiarowej, które uniemożliwiają wykrycie uszkodzeń systemów
- awarie sygnałów kontrolnych, które prowadzą do niewłaściwych akcji operatora (np. wyłączenia danego komponentu instalacji)
- błędy ludzkie charakterystyczne dla zdarzeń pożarowych (np. dotyczące postępowania wg. procedur ppoż.)

Model ryzyka spowodowanego pożarem



Jeśli pompa A, jej okablowanie, źródło zasilania lub układ sterowania leżą w strefie objętej pożarem należy przyjąć jej awarię jako zdarzenie pewne

Częstość zapłonu

- **Cel:** Oszacowanie częstości zapłonu dla analizowanych stref pożarowych
 - **Realizacja:** Identyfikacja i ocena grup częstości zapłonu dla elektrowni
 - Typowa struktura danych, np.
 - Lokalizacja: Poza obudową bezp.
 - Typ komponentu: Pompa
 - Tryb pracy: Pełna moc
 - Częstość zapłonu λ_{IS} : 2,1E-2/rok
 - Zapłon oleju: 54%
 - Zwarcia elektr.: 46%
 - Inne: 0%
1. Przegląd dostępnych danych dot. pożarów w elektrowniach jądrowych oraz ich mapowanie i aproksymacja na potrzeby konkretnego obiektu
 2. Lista komponentów, które mogą stanowić potencjalne źródło zapłonu w każdej strefie
 3. Powiązanie lokalizacji i typów komponentów, które mogą stanowić źródło zapłonu w tzw. **grupy częstości zapłonu**, uwzględniając tryb pracy oraz niepewność danych

Częstość zapłonu

Częstość zapłonu w obrębie strefy J związana ze źródłem zapłonu IS

$$\lambda_{IS,J} = \lambda_{IS} \cdot W_L \cdot W_{IS,J,L}$$

$\lambda_{IS,J}$ – częstość zapłonu związana ze źródłem IS na poziomie elektrowni

W_L – wagowy współczynnik lokalizacji źródła zależny od liczby bloków elektr.

$W_{IS,J,L}$ – wagowy współczynnik źródła określa ilość źródeł typu IS w strefie J w stosunku do ich całkowitej liczby w L

Całkowita częstość zapłonu w obrębie strefy pożarowej J wynosi:

$$\lambda_J = \sum \lambda_{IS,J}$$

Zakładając, że:

- generyczna częstość zapłonu $\lambda_{IS,J}$ jest stała w czasie
- częstość zapłonu jest taka sama dla komponentów tego samego typu
- częstość zapłonu nie uwzględnia rozmiaru, stopnia zużycia, środowiska pracy komponentu itp.

Częstość zapłonu

Przykładowe obliczenia częstości zapłonu od 3 pomp w obrębie strefy pożarowej J zlokalizowanej w pompowni (L) składającej się z 53 pomp dzielonych pomiędzy dwoma blokami elektrowni:

$$\lambda_{pomp,J} = \lambda_{pompy} \cdot W_L \cdot W_{pomp,J,L}$$

- $\lambda_{pomp} = 2,1E-2/\text{rok}$, dla pomp poza obudową bezpieczeństwa
- $W_L = 2$, gdyż pompownia jest wspólna dla dwóch bloków elektrowni
- $W_{IS,J,L} = 3/53 = 5,7E-2$, gdyż pompowni jest 53 pompy

$$\lambda_{pomp,J} = 2,1E-2/\text{rok} \cdot 2 \cdot 5,7E-2$$

$$\text{Stąd: } \lambda_{pomp,J} = 2,4E-3/\text{rok}$$

Screening ilościowy

- Na tym etapie wprowadza się do modelu dane liczbowe w celu określenia wartości CDF i LERF oraz ICDP i ILERP (skumulowane CDF i LERP)

ICDP i ILERP są obliczane jako iloczyn CDF (lub LERF) oraz maksymalnego czasu niedostępności (np. z powodu czasowego wyłączenia) jednego lub więcej systemów kluczowych dla bezpieczeństwa przeciwpożarowego

- Wg. standardów EPRI strefy pożarowe można wykluczyć z dalszej analizy (szacowania zakresu pożaru) jeśli spełnione są łącznie kryteria ilościowe:
 - $CDF < 10^{-7}/rok$ (**opcjonalnie** $ICDP < 10^{-7}$),
 - $LERF < 10^{-8}/rok$ (**opcjonalnie** $ILERP < 10^{-8}$).
 - Suma CDF stref wykluczonych $< 0,1$ sumy CDF zdarzeń wewn.,
 - Suma LERF stref wykluczonych $< 0,1$ sumy LERF dla zdarzeń wewn.,
 - **Opcjonalnie**: suma ICDP dla wykluczonych stref pożarowych $< 10^{-6}$,
 - **Opcjonalnie**: Suma ILERP dla wykluczonych stref pożarowych $< 10^{-7}$.



Analiza obwodów komponentów i prawdopodobieństwa stanu awaryjnego



Zakres

Dla przeprowadzenia szczegółowej analizy należy przeprowadzić następujące procedury:

1. Analiza obwodów komponentów
2. Analiza prawdopodobieństwa stanu awaryjnego komponentu



Analiza obwodów komponentów

Analiza obwodów komponentów składa się z 3 kroków:

Krok 1: Należy przygotować i ocenić wymagane informacje

Krok 2: Należy wykonać szczegółową analizę stanów awaryjnych obwodów / komponentów

Krok 3: Wygenerowanie raportów awaryjnych odpowiedzi komponentów

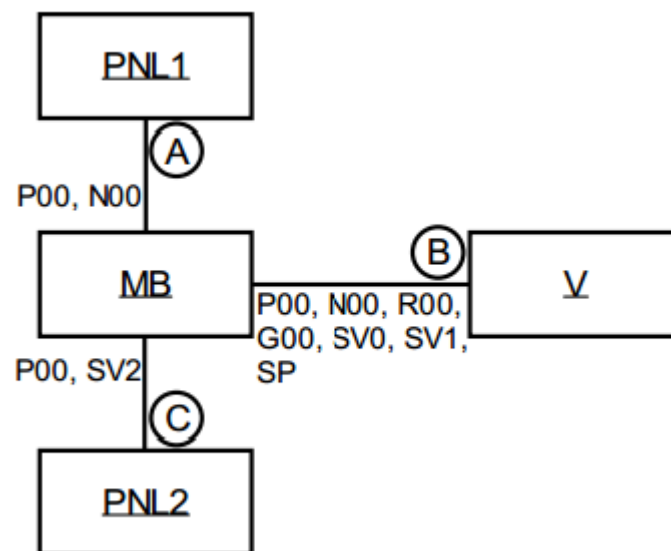
Niepewność: dot. wytycznych do analizy obwodów elektrowni oraz samego procesu analizy

Wynik: Dane do analizy prawdopodobieństwa stanu awaryjnego komponentu

Analiza obwodów komponentów

Jako przykład analizy obwodów komponentu został wybrany następujący obwód:

Typowy nieziemiony obwód DC sterowania elektromagnetycznym zaworem SOV

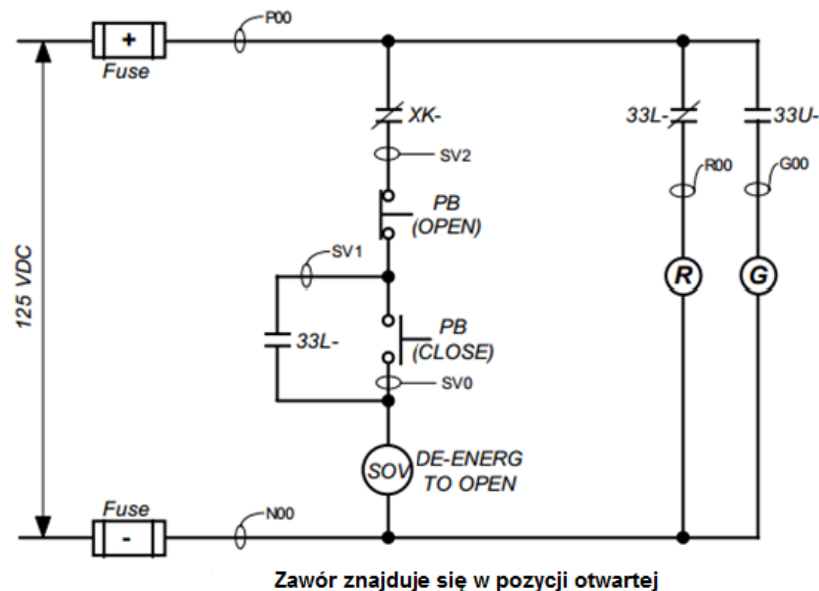


Przebieg analizy obwodu jest przedstawiony na schemacie.

Analiza obwodów komponentów

Przed przeprowadzeniem analizy należy stwierdzić jakie istnieją interesujące nas odpowiedzi na awarie komponentu. Dla zaworu SOV są one następujące:

- Utrata kontroli nad zaworem (LOC)
- Błędna sygnalizacja stanu (EI)
- Niewłaściwe zamknięcie zaworu (SO-Close)



Schemat obwodu sterowania SOV w normalnym trybie eksploatacji



Analiza obwodów komponentów

Żeby przeprowadzić analizę obwodów komponentu należy ocenić ten układ kabel po kablu przy założeniu że źródło zasilania wchodzi w kontakt z każdym przewodem w badanym kablu. W każdym przypadku określa się logiczną odpowiedź obwodu na kontakt z przewodem źródłowym (gorącą sondą).

Na przykład: kontakt źródła +125V DC z przewodem N00 może spowodować przepalenie bezpiecznika (-125V DC) powodując utratę zasilania i awarie LOC. Kontakt z G00 spowoduje że zielona lampka się zaświeci, tym samym powodując stan EI. Kontakt z SV0 zasili elektromagnes i spowoduje niewłaściwe zamknięcie zaworu (SO-Close)

Kontakt z innymi przewodami nie niesie za sobą konsekwencji (NC)



Analiza obwodów komponentów

Tabela umieszczona poniżej pokazuje wyniki otrzymane z analizy gorącej sondy każdego kabla w obwodzie. Zakres tej analizy zawierał również badanie negatywnego (-125V DC) źródła napięcia.

Kabel	+125 V DC Gorąca	-125 V DC Gorąca Sonda
A	LOC	LOC
B	LOC, EI, SO - Close	LOC
C	NC	LOC



Analiza prawdopodobieństwa stanu awaryjnego zaworu elektromagnetycznego

Analiza prawdopodobieństwa stanu awaryjnego składa się z czterech kroków:

Krok 1: Należy przygotować i ocenić wstępne informacje i dane

Krok 2: Należy wybrać metodę oszacowania

Krok 3: Oszacowanie prawdopodobieństwa wystąpienia stanów awaryjnych

Krok 4: Wygenerowanie raportów prawdopodobieństwa stanu awaryjnego obwodu

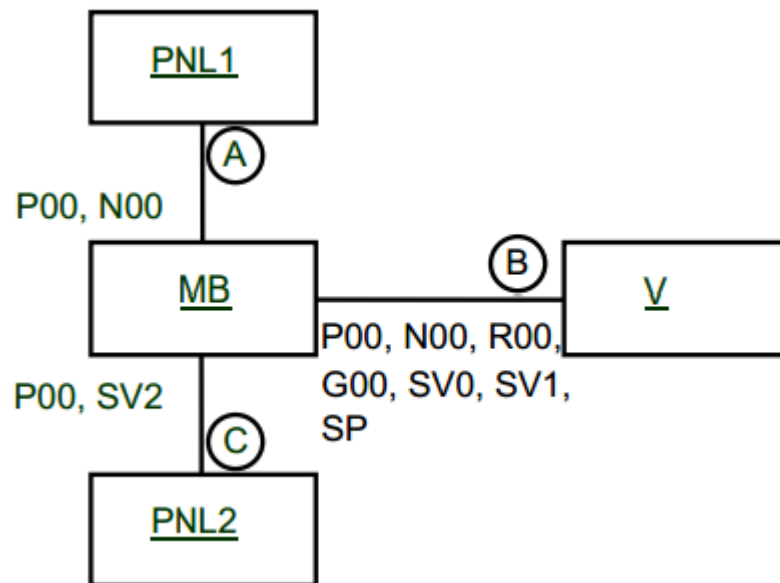
Niepewność: Wytyczne dotyczące oszacowania prawdopodobieństwa dla poszczególnych instalacji

Wynik: Dane niezbędne do szczegółowego modelowania pożaru, oceny interakcji sejsmiczno-pożarowych i kwantyfikacji ryzyka pożarowego



Analiza prawdopodobieństwa stanu awaryjnego zaworu elektromagnetycznego

W analizie prawdopodobieństwa stanu awaryjnego obwodu będziemy rozpatrywali kabel B (jeden z 3 interesujących nas kabli zaznaczonych na schemacie blokowym) W ramach szczegółowej analizy obwodu stwierdzono że istnieją trzy możliwe odpowiedzi na awarie komponentu: utrata kontroli nad zaworem (LOC); błędna sygnalizacja stanu (EI); niepożądane zamknięcie zaworu (SO).

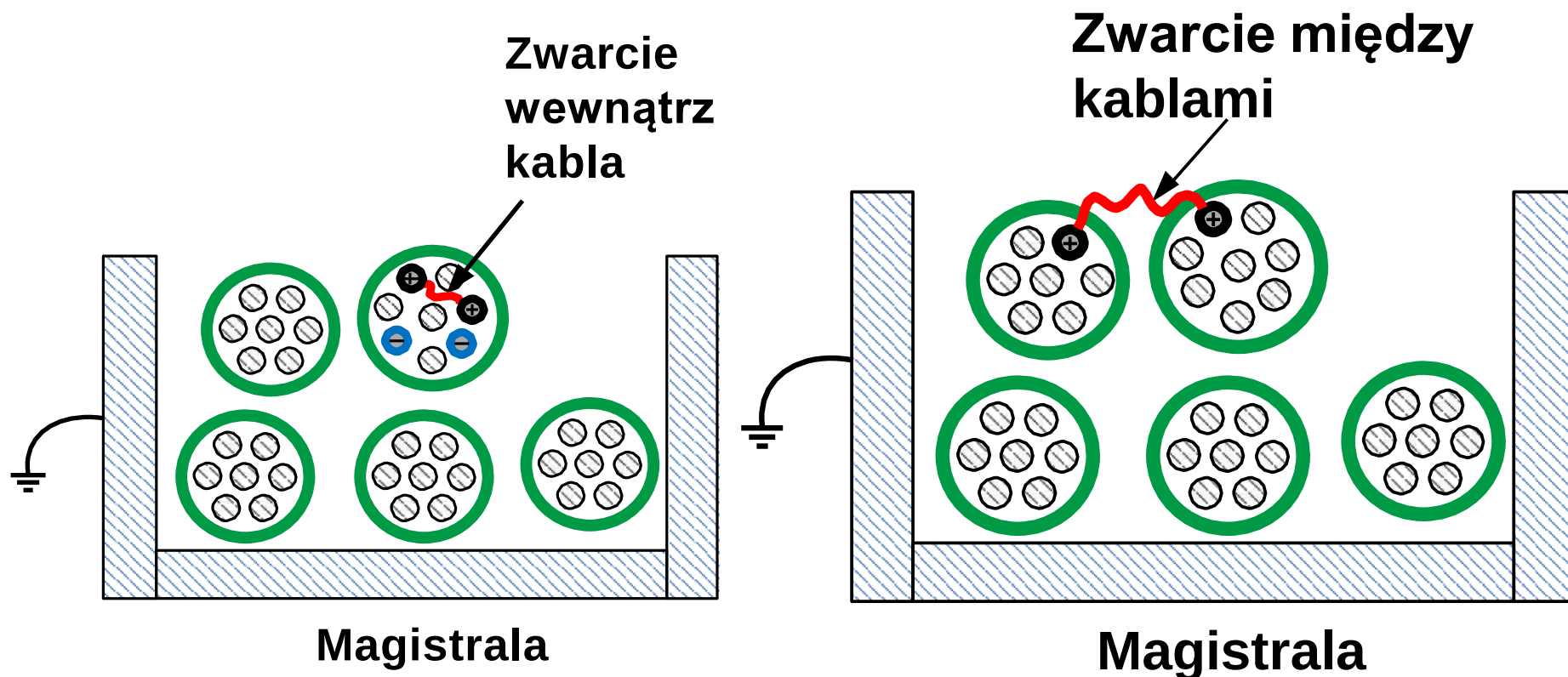


Przed przystępowaniem do analizy należy zwrócić uwagę na charakterystykę kabla i obwodu: siedmio-przewodowy kabel w osłonie termoutwardzalnej, w uziemionym obwodzie prądu stałego, bez CPT, z jednym wspólnym przewodem (N00), oraz trzema przewodami pod napięciem (P00, R00, SV1)

Analiza prawdopodobieństwa stanu awaryjnego zaworu elektromagnetycznego



Analiza prawdopodobieństwa stanu awaryjnego zaworu elektromagnetycznego





Analiza prawdopodobieństwa stanu awaryjnego zaworu elektromagnetycznego

Typ Magistrali	Opis zwarcia	Najlepsze oszacowanie	Przedział wyników
Szyna	M/C wewnątrz - kabli	0.60	0.20 – 1.0
	1/C na zewnątrz - kabli	0.40	0.1 – 0.60
	M/C → 1/C na zewnątrz - kabli	0.20	0.1 – 0.40
	M/C → M/C na	0.02 – 0.1	
Osłona	M/C wewnątrz - kabli	0.15	0.05 – 0.25
	1/C na zewnątrz - kabli	0.1	0.025 – 0.15
	M/C → 1/C na zewnątrz - kabli	0.05	0.025 – 0.1
	M/C → M/C na	0.01 – 0.02	

Oszacowania prawdopodobieństwa stanu awaryjnego przy założonym uszkodzeniu kabla (Kabel termoutwardzalny bez CPT) Dane z EPRI



Analiza prawdopodobieństwa stanu awaryjnego zaworu elektromagnetycznego

Metoda nr 1: analityk podczas badania przypadku stanu awaryjnego zwarcia cieplnego wykorzystuje Tabelę pokazaną na poprzednim slajdzie do oszacowania prawdopodobieństw wystąpienia błędnych wskazań i niepożądanego zamknięcia zaworu. W każdym z przypadków oszacowanie prawdopodobieństwa otrzymuje się poprzez zsumowanie prawdopodobieństwa wystąpienia zwarcia cieplnego wewnątrz kabla ($P = 0.60$), oraz między kablami ($P = 0.06$, nominalna wartość między 0.02 i 0.1). Przedział otrzymanych wyników $0.2 - 1.0$.



Analiza prawdopodobieństwa stanu awaryjnego zaworu elektromagnetycznego

Jednak jeśli analityk oceni, że potrzebuje uściślić oszacowanie prawdopodobieństw stanu awaryjnego, powinien zastosować Metodę nr 2. Wtedy, pierwszym jego krokiem będzie obliczenie prawdopodobieństwa zwarcia międzyprzewodowego (P_{CC}), ponieważ ta wartość zostanie następnie użyta w celu oszacowania prawdopodobieństwa dla każdego interesującego nas stanu awaryjnego. C_{tot} - całkowita liczba przewodów w kablu, C_G - liczba przewodów z uziemieniem.

$$P_{CC} = (C_{Tot} - C_G) / [(C_{Tot} - C_G) + (2 \cdot C_G)]$$

$$P_{CC} = (7 - 1) / [(7 - 1) + (2 \cdot 1)]$$

$$P_{CC} = 6 / [6 + 2]$$

$$P_{CC} = 0.75$$



Analiza prawdopodobieństwa stanu awaryjnego zaworu elektromagnetycznego

Podczas szacowania prawdopodobieństwa natychmiastowej odpowiedzi EI obwodu, analityk zauważa, że zwarcie, które zasila G00 jest jedynym występującym zwarcie. Stąd, współczynnik konfiguracji kabla dla utraty kontroli nad nim (CF_{EI}) oparty jest na obecności jednego przewodu zagrożonego C_T (G00) oraz trzech przewodów źródłowych C_S (P00, R00 i SV1).

$$CF_{EI} = \{C_T \cdot [C_S + (0.5 / C_{Tot})]\} / C_{Tot}$$

$$CF_{EI} = \{1 \cdot [3 + (0.5 / 7)]\} / 7$$

$$CF_{EI} = 3.071 / 7$$

$$CF_{EI} = 0.44$$

W tym przypadku, oszacowane prawdopodobieństwo odpowiedzi obwodu na EI wynosi:

$$P_{EI} = P_{CC} \cdot CF_{EI}$$

$$P_{EI} = 0.75 \cdot 0.44 = 0.33$$



Analiza prawdopodobieństwa stanu awaryjnego zaworu elektromagnetycznego

Dla oszacowania prawdopodobieństwa niepożądanego zamknięcia (SO) zaworu, jedynym możliwym czynnikiem inicjującym jest zwarcie, które zasila SV0. Stąd, współczynnik konfiguracji kabla dla SO (CF_{SO}) jest oparty na obecności jednego przewodu zagrożonego C_T (SV0) oraz trzech przewodów źródłowych C_S (P00, R00 i SV1).

$$CF_{SO} = \{C_T \cdot [C_S + (0.5 / C_{Tot})]\} / C_{tot}$$

$$CF_{SO} = 0.44$$

Oszacowane prawdopodobieństwo niepożądanego zamknięcia zaworu wynosi:

$$P_{SO} = P_{CC} \cdot CF_{SO}$$

$$P_{SO} = 0.75 \cdot 0.44$$

$$P_{SO} = 0.33$$



Analiza prawdopodobieństwa stanu awaryjnego zaworu elektromagnetycznego

Prawdopodobieństwa odpowiedzi awaryjnych Kabla B

Kod awarii	Prawdopodobieństwo (Obliczone)	Prawdopodobieństwo (Z Tabeli)
EI	0.33	0.66
SO (Zamknięty)	0.33	0.66



Dziękuję za uwagę

- **Aleksej Kaszko M.Sc., Eng.**
Aleksej.Kaszko@ncbj.gov.pl