

**Prace badawcze w ramach stażu
naukowego.
Model eksploatacyjny zabezpieczeń
elektroenergetycznych**

**Dr inż. Robert Adam Sobolewski, e-mail: r.sobolewski@pb.edu.pl
Katedra Elektrotechniki, Energoelektroniki i Elektroenergetyki
Wydział Elektryczny, Politechnika Białostocka**

Wrocław, 18.11.2021 r.

PLAN PREZENTACJI

1. Staż naukowy
2. Kierunki prowadzonych badań naukowych
3. Model eksploatacji zabezpieczenia elektroenergetycznego zainstalowanego w sieci wewnętrznej farmy wiatrowej

Tematyka badań

Analiza i modelowanie funkcjonowania zabezpieczeń elektroenergetycznych i środków ochrony przeciwporażeniowej w mikrosieciach niskiego napięcia pracujących w trybie wyspowym

Miejsce realizacji badań

Zakład Sieci i Systemów Elektroenergetycznych, Katedra Energoelektryki, PWr

Opiekun naukowy

Dr hab. inż. Robert Lis, prof. PWr

Okres realizacji stażu

15.09.2021 – 15.12.2021

Zadania badawcze:

- opracowanie modeli komputerowych mikrosieci nn o wybranych konfiguracjach topologicznych, pracujących w warunkach wyspowych oraz wyznaczenie prądów zwarciovych i napięć w węzłach mikrosieci podczas zwarć,
- analiza doboru nastaw zabezpieczeń elektroenergetycznych spełniających wymagania selektywności działania i ochrony przeciwporażeniowej przy dotyku pośrednim w trybie pracy wyspowej,
- analiza spełnienia warunków niezawodności i skuteczności działania zabezpieczeń elektroenergetycznych i środków ochrony przeciwporażeniowej w mikrosieci przy przejściu do pracy wyspowej,
- ocena warunków skuteczności ochrony przeciwporażeniowej z poziomu stacji SN/nn oraz odbiorców w różnych trybach i stanach pracy mikrosieci.

Metodologia badań:

- studia literaturowe dotyczące stosowanych na świecie zabezpieczeń elektroenergetycznych w mikrosieciach i wymagań formalnych stawianych takim zabezpieczeniom,
- modelowanie komputerowe mikrosieci o wybranych konfiguracjach topologicznych, pracujących w trybie wyspowym oraz wyznaczenie na ich podstawie prądów i napięć przy zwarciach symetrycznych i niesymetrycznych,
- analiza możliwości zmian nastaw stosowanych zabezpieczeń elektroenergetycznych pod kątem niezawodnego wykrywania i likwidowania zwarć w mikrosieci i zapewnienia warunków skutecznego działania środków ochrony przeciwporażeniowej,
- wnioski dotyczące rodzajów i nastaw zabezpieczeń elektroenergetycznych i środków ochrony przeciwporażeniowej dedykowanych mikrosieciom nn pracującym w trybie wyspowym.

KIERUNKI PROWADZONYCH BADAŃ

1. Metody ilościowej analizy ryzyka porażenia prądem elektrycznym użytkowników urządzeń niskiego napięcia

- modele niezawodnościowe środków ochrony przeciwporażeniowej przed dotykiem bezpośrednim i przy dotyku pośrednim,
- uwzględnienie skutków rażenia prądem elektrycznym – fibrylacji komór sercowych i niemożności samouwolnienia się spod rażenia elektrycznego.

KIERUNKI PROWADZONYCH BADAŃ

2. Modelowanie probabilistyczne i prognozowanie produkcji energii przez źródła wiatrowe

- modele przeznaczone do opisu mocy wyjściowej źródeł wiatrowych,
- wpływ czynników meteorologicznych i technicznych na moc wyjściową źródeł, bezpośrednie wykorzystanie danych z produkcji energii przez źródła wiatrowe,
- modelowanie mocy wyjściowej farm wiatrowych – uwzględnienie wzajemnej korelacji.

3. Modelowanie niezawodności systemów elektroenergetycznych z przyłączonymi źródłami stochastycznymi, głównie wiatrowymi

- modele probabilistyczne do wyznaczania wskaźników wystarczalności systemów elektroenergetycznych – oprócz generacji konwencjonalnej uwzględniona generacja stochastyczna,
- uwzględnienie korelacji pomiędzy mocą wyjściową źródeł stochastycznych oraz korelacji pomiędzy obciążeniem w systemie elektroenergetycznym i generacją stochastyczną.

KIERUNKI PROWADZONYCH BADAŃ

4. Modelowanie niezawodności wybranych elementów turbin wiatrowych i wewnętrznej sieci elektroenergetycznej farm wiatrowych oraz wpływu tej niezawodności na produkcję energii

- modele niezawodnościowe farm wiatrowych o różnych konfiguracjach topologicznych wewnętrznych sieci – analiza wpływu niezawodności elementów ‘elektroenergetycznych’ turbin wiatrowych i sieci wewnętrznej farm na produkcję energii,
- uwzględnienie prawidłowego i nieprawidłowego działania urządzeń elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej.

5. Modelowanie procesu planowych obsług wybranych elementów turbin wiatrowych i wewnętrznej sieci elektroenergetycznej farm wiatrowych pod kątem ograniczania strat w produkcji energii

- modele eksploatacji – wsparcie procesu podejmowania decyzji o planowych obsłudze turbin wiatrowych na podstawie kryterium ograniczenia strat w produkcji energii z uwagi na konieczność wyłączenia turbin na czas ich planowej obsługi.

Model eksploatacyjny zabezpieczeń elektroenergetycznych

- Wprowadzenie
- Sformułowanie problemu
- Model eksploatacji
- Przykład obliczeniowy
- Podsumowanie

MODEL EKSPLOATACYJNY – WPROWADZENIE

Produktywność farm wiatrowych zależy od:

- niezawodności (gotowości) elementów farmy wiatrowej oraz strategii ich obsługi (planowych i naprawczych),
- rozmieszczenia poszczególnych turbin w farmie i topologii jej sieci wewnętrznej,
- warunków wiatrowych i innych meteorologicznych,
- wielu innych czynników.

Elementy: zabezpieczenia elektroenergetyczne (ZE).

Strategie obsługi: ograniczenie niepełnej obsługi (niepełnego wykrywania uszkodzeń), ograniczenie czasu obsługi i odnowy, racjonalizacja terminów planowej obsługi.

MODEL EKSPLOATACYJNY – SFORMUŁOWANIE PROBLEMU

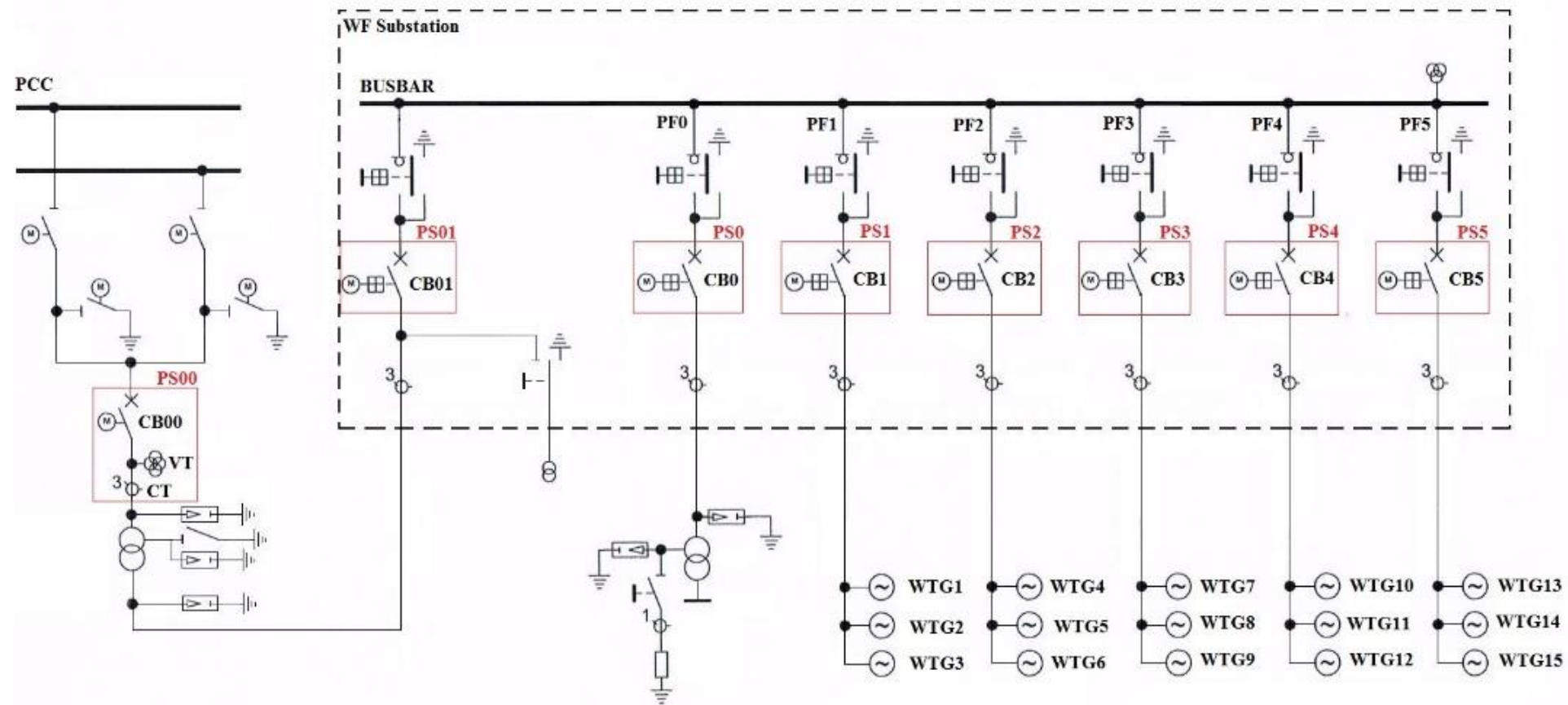
Zabezpieczenia elektroenergetyczne:

- zadziałania nieprawidłowe – brakujące i zbędne,
- niektóre z uszkodzeń nie ujawniają się natychmiast po ich wystąpieniu; ich identyfikacja możliwa podczas planowej obsługi, dzięki samotestowaniu lub po wystąpieniu zakłócenia w chronionym elemencie,
- wyposażenie w moduły samotestowania (samokontroli),
- odpowiednia niezawodność i strategia obsługi: (i) zapobieganie występowaniu uszkodzeń i zakłóceń, (ii) osiągnięcie dłuższego czasu pracy farmy pomiędzy jej wyłączeniami i (iii) ograniczanie rozmiaru i czasu trwania wyłączeń chronionych elementów farmy,
- częściowe lub całkowite wyłączenie elementów farmy w celu przeprowadzenia planowej obsługi – straty ekonomiczne spowodowane niewyprodukowaniem energii.

MODEL EKSPLOATACYJNY – SFORMUŁOWANIE PROBLEMU

Trzy główne lokalizacje ZE:

- bezpośrednio za generatorem (transformatorem nn/SN),
- pole generatorowe w stacji (WF Substation),
- kabel łączący stację z GPZ (PCC).



Rysunek 1. Schemat sieci wewnętrznej lądowej farmy wiatrowej

MODEL EKSPLOATACYJNY – SFORMUŁOWANIE PROBLEMU

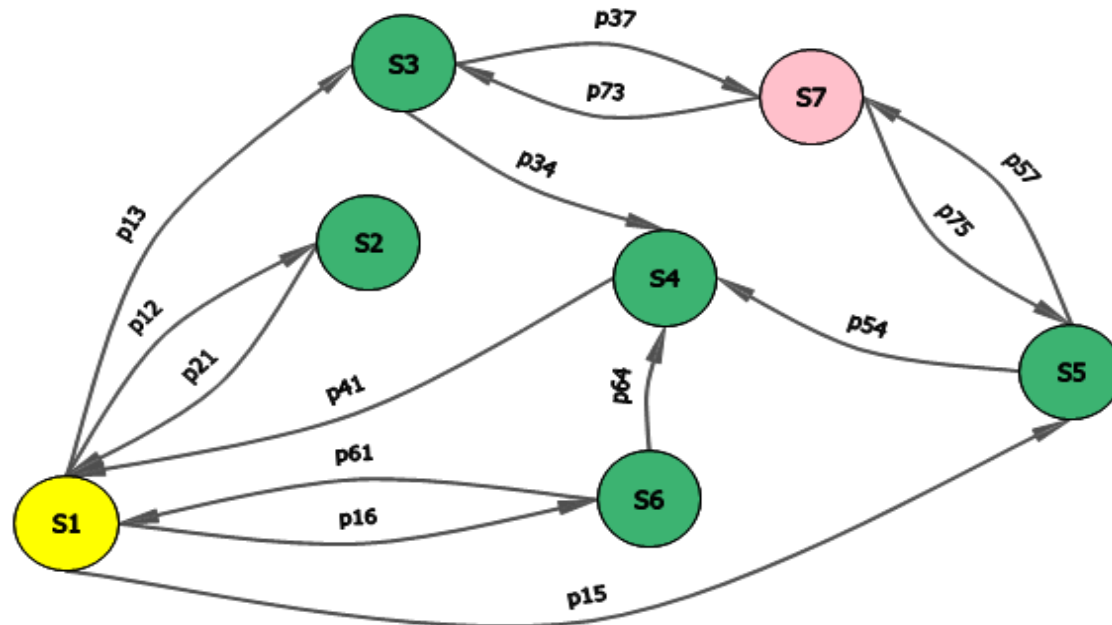
- Modelowanie gotowości ZE – pożądane z punktu widzenia podejmowania decyzji dotyczących odstępów czasu pomiędzy obsługami planowymi (maksymalizacja gotowości).
- Procesy semi-Markowa – modelowanie gotowości ZE z uwzględnieniem ich niezawodności i obsługi.
- Wyznaczanie zależności gotowości ZE w funkcji: (i) intensywności uszkodzeń, (ii) przedziału czasu pomiędzy obsługami planowymi, (iii) prawdopodobieństwa niepełnego wykrywania uszkodzeń podczas planowej obsługi i podczas samokontroli, (iv) czasu trwania planowej obsługi i obsługi po wykryciu uszkodzenia przez moduł samokontroli, (v) czasu trwania odnowy.

MODEL EKSPLOATACYJNY

Współczynnik gotowości – prawdopodobieństwo tego, że ZE będzie znajdować się w stanie zdatności (stan **S1** na rysunku 2) po długim czasie t , t.j.

$$A_{pS} = \lim_{t \rightarrow \infty} A(t), \quad (1)$$

gdzie $A(t)$ jest gotowością ZE w chwili t .



Rysunek 2. Diagram zmian stanów eksploatacyjnych układu automatyki zabezpieczeniowej

Stany eksploatacyjne ZE:

- **S1** – ZE pracuje i nie wystąpiło w nim uszkodzenie,
- **S2** – planowa obsługa ZE, w którym nie wystąpiło uszkodzenie,
- **S3** – planowa obsługa ZE, w którym wystąpiło uszkodzenie,
- **S4** – odnowa ZE,
- **S5** – sprawdzenie ZE po prawidłowym zgłoszeniu przez moduł samotestowania uszkodzenia ZE,
- **S6** – sprawdzenie ZE po fałszywym zgłoszeniu przez moduł samotestowania uszkodzenia ZE,
- **S7** – ZE pracuje podczas utrzymywania się w nim uszkodzenia (tzw. uszkodzenie drzemiące).

MODEL EKSPLOATACYJNY

Współczynnik gotowości ZE

$$A_{PS} = \frac{\pi_1(T) \cdot \mu_1(T)}{\sum_{i=1}^7 \pi_i(T) \cdot ET_i(T)} \quad (2)$$

gdzie: $\pi_i(T)$ – stacjonarne prawdopodobieństwo przebywania ZE w stanie S_i , $\mu_1(T)$ – średni czas poprawnej pracy ZE, $ET_i(T)$ – średni czas przebywania ZE w stanie S_i oraz T – zadany czas pomiędzy planowymi obsługami ZE.

Założenia:

- czas do uszkodzenia ZE, czas do fałszywego wykrycia uszkodzenia przez moduł samotestowania i czas do wykrycia uszkodzenia niewykrytego podczas poprzedniej obsługi – zmienne losowe odpowiednio η , φ i ν .
- zmienne losowe podlegają rozkładowi wykładniczemu, t.j. odpowiednio: $F_{PS}(t) = P(\eta \leq t) = 1 - e^{-\lambda \cdot t}$, $F_{SC}(t) = P(\varphi \leq t) = 1 - e^{-\gamma \cdot t}$ and $F_{DF}(t) = P(\nu \leq t) = 1 - e^{-\theta \cdot t}$, gdzie: λ - intensywność uszkodzeń ZE, γ - intensywność fałszywych uszkodzeń wykrytych przez moduł samotestowania oraz θ - intensywność występowania uszkodzeń ZE niewykrytych podczas poprzedniej obsługi.

MODEL EKSPLOATACYJNY

Średni czas przebywania ZE w stanie S1

$$\mu_1(T) = \frac{1}{\lambda + \gamma} \cdot (1 - e^{-(\lambda + \gamma) \cdot T}).$$

Prawdopodobieństwa przejść pomiędzy stanami (elementy włożonego łańcucha Markowa):

$$p_{12}(T) = e^{-(\lambda + \gamma) \cdot T}, \quad p_{13}(T) = (1 - \rho) \cdot \frac{\lambda}{\lambda + \gamma} \cdot (1 - e^{-(\lambda + \gamma) \cdot T}), \quad p_{15}(T) = \rho \cdot \frac{\lambda}{\lambda + \gamma} \cdot (1 - e^{-(\lambda + \gamma) \cdot T}),$$

$$p_{16}(T) = \frac{\gamma}{\lambda + \gamma} \cdot (1 - e^{-(\lambda + \gamma) \cdot T}), \quad p_{21}(T) = p_{41}(T) = 1, \quad p_{34}(T) = \alpha,$$

$$p_{37}(T) = 1 - \alpha, \quad p_{54}(T) = \beta, \quad p_{57}(T) = 1 - \beta, \quad p_{61}(T) = \delta,$$

$$p_{64}(T) = 1 - \delta, \quad p_{73}(T) = e^{-\theta \cdot T}, \quad p_{75}(T) = 1 - e^{-\theta \cdot T}.$$

Wartości oczekiwane czasu pojedynczego przejścia ze stanu do pozostałych stanów:

$$ET_1(T) = T \cdot \left(e^{-(\lambda + \gamma) \cdot T} + (1 - \rho) \cdot \frac{\lambda}{\lambda + \gamma} \cdot (1 - e^{-(\lambda + \gamma) \cdot T}) \right) + \frac{\rho \cdot \lambda + \gamma}{(\lambda + \gamma)^2} \cdot (1 - ((\lambda + \gamma) \cdot T + 1) \cdot e^{-(\lambda + \gamma) \cdot T}),$$

$$ET_2(T) = t_1 + t_2, \quad ET_3(T) = t_1 + t_2 \cdot (1 - \alpha), \quad ET_4(T) = t_3,$$

$$ET_5(T) = ET_6(T) = t_4, \quad ET_7(T) = \frac{1}{\theta} \cdot (1 - e^{-\theta \cdot T}).$$

MODEL EKSPLOATACYJNY

Prawdopodobieństwa ρ , α , β i δ odnoszą się odpowiednio do: (i) wykrycia uszkodzenia przez moduł samotestowania, (ii) wykrycia uszkodzenia podczas planowej obsługi, (iii) potwierdzenia uszkodzenia po wykryciu go przez moduł samotestowania oraz (iv) potwierdzenia uszkodzenia fałszywego, po wykryciu uszkodzenia przez moduł samotestowania.

Średnie czasy przebywania w poszczególnych stanach: t_1 - czas trwania planowej obsługi układu, gdy jest uszkodzenie ZE, t_2 - czas trwania planowej obsługi, gdy brak jest uszkodzenia (lub uszkodzenie nie zostało wykryte podczas obsługi), t_3 - czas odnowy ZE, t_4 - czas trwania obsługi nieplanowej, gdy uszkodzenie (fałszywe uszkodzenie) zostało wykryte przez moduł samokontroli.

Prawdopodobieństwa stacjonarne włożonego łańcucha Markowa spełniają układ równań

$$\boldsymbol{\pi}(\mathbf{T}) = \boldsymbol{\pi}(\mathbf{T}) \cdot \mathbf{P}(\mathbf{T}) \quad \text{i} \quad \sum_{i=1}^7 \pi_i(\mathbf{T}) = \mathbf{1},$$

gdzie $\boldsymbol{\pi}(\mathbf{T}) = [\pi_1(\mathbf{T}), \pi_2(\mathbf{T}), \dots, \pi_7(\mathbf{T})]$ oraz jądro procesu $\mathbf{P}(\mathbf{T})$ jest macierzą prawdopodobieństw przejść pomiędzy stanami.

PRZYKŁAD – ZADANIE I ZAŁOŻENIA

Zadanie: znalezienie najlepszego przedziału czasu pomiędzy planowymi obsługami ZE T^{BEST} i maksymalnego współczynnika gotowości A_{PS}^{BEST} zapewnianego przez T^{BEST} dla parametrów modelu zestawionych w tabeli. Najlepszy czas T^{BEST} jest to czas, który zapewnia największą wartość współczynnika gotowości A_{PS} .

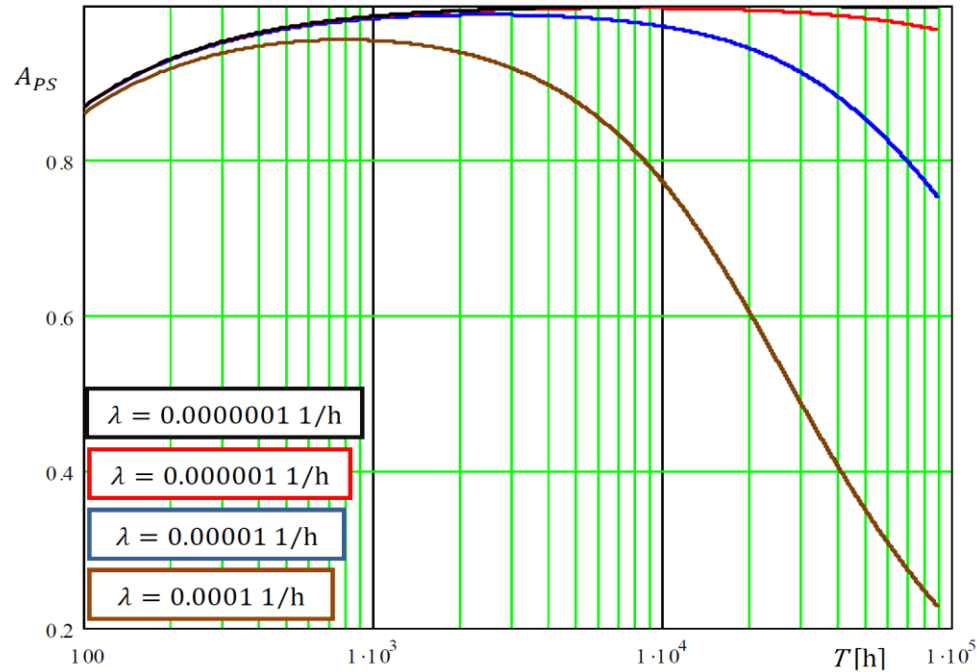
Wartości pozostałych parametrów t_1 , t_2 , t_3 and t_4 są takie same w każdym wariancie, tj.: 5 h, 10 h, 100 h i 3 h.

Przyjęte wartości parametrów modelu eksploatacyjnego są wartościami spodziewanymi/potwierdzonymi w praktyce eksploatacyjnej ZE.

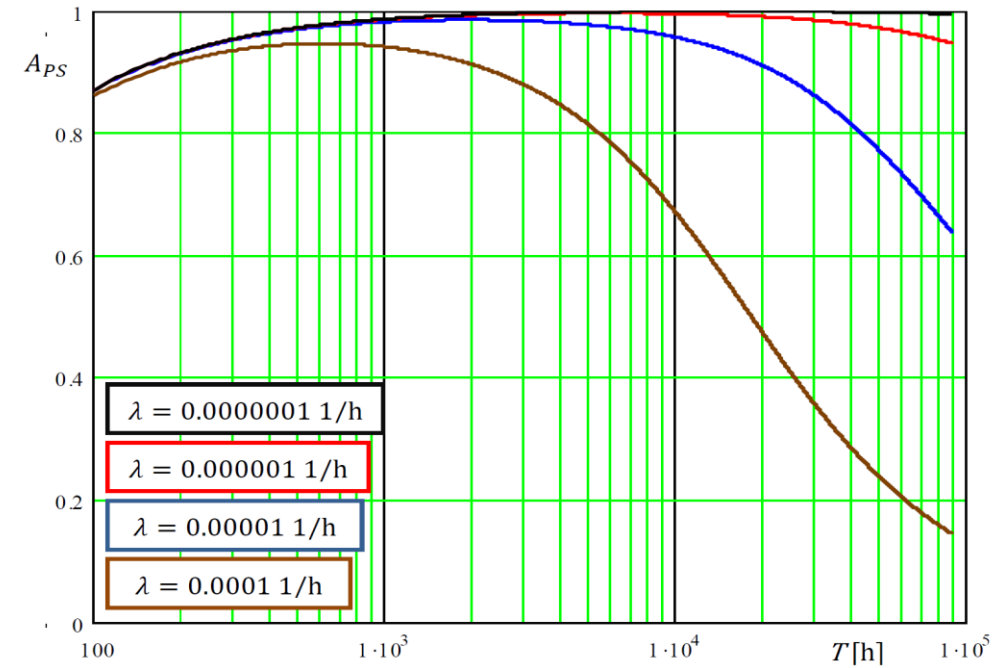
Rozdzielczość czasu $T^{BEST} = 10$ h.

Numer rysunku	Parametr							T [h]
	intensywność uszkodzeń λ [1/h]	intensywność wykrycia fałszywych uszkodzeń γ [1/h]	intensywność nielikwidowania uszkodzeń podczas poprzedniej obsługi ZE θ [1/h]	prawdopodob. wykrycia uszkodzenia przez moduł samotest. ρ	prawdopodob. wykrycia uszkodzenia podczas obsługi planowej α	prawdopodob. potwierdzenia uszkodzenia po jego wykryciu przez moduł samotest. β	prawdopodob. potwierdzenia fałszywego uszk. po jego wykryciu przez mod. samotest. δ	
3	$10^{-7}, \dots, 10^{-4}$	10^{-4}	10^{-6}	0,65	0,95	0,95	0,95	$100 \dots 5 \cdot 10^4$
4	$10^{-7}, \dots, 10^{-4}$	10^{-4}	10^{-6}	0,35	0,95	0,95	0,95	$100 \dots 5 \cdot 10^4$
5	$10^{-7}, \dots, 10^{-4}$	10^{-4}	10^{-6}	0,65	0,75	0,95	0,95	$100 \dots 5 \cdot 10^4$
6	$10^{-7}, \dots, 10^{-4}$	10^{-4}	10^{-6}	0,35	0,75	0,95	0,95	$100 \dots 5 \cdot 10^4$

PRZYKŁAD – REZULTATY



Rysunek 3. A_{PS} w funkcji T , dla $\rho = 0,65$, $\alpha = 0,95$,
i $\lambda = 10^{-7}, \dots, 10^{-4}$ [1/h]

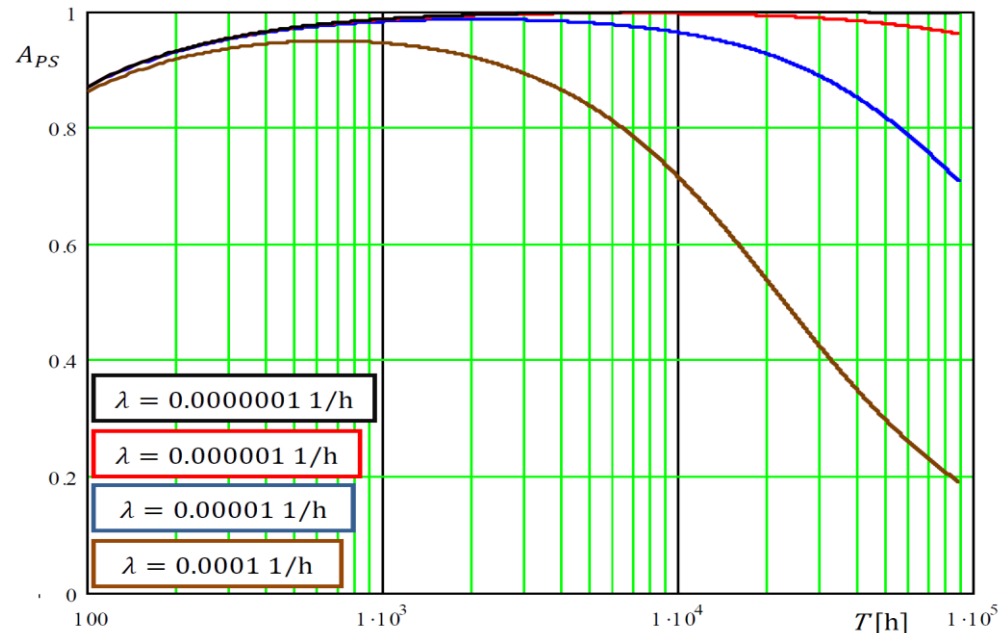


Rysunek 4. A_{PS} w funkcji T , dla $\rho = 0,35$, $\alpha = 0,95$
i $\lambda = 10^{-7}, \dots, 10^{-4}$ [1/h]

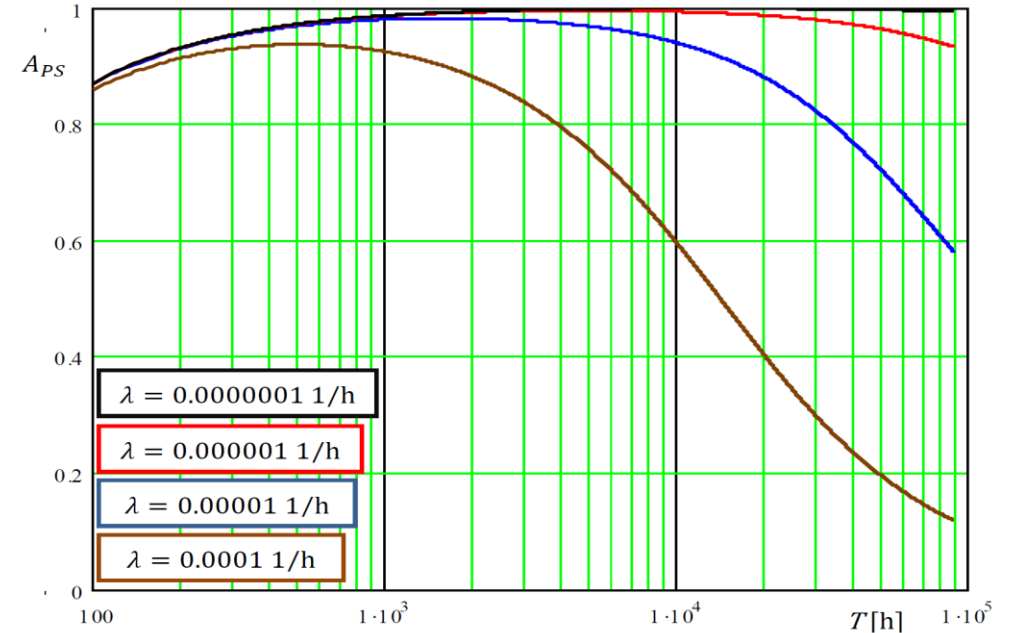
1. Poprawienie λ (w szczególności z 10^{-4} 1/h do 10^{-5} 1/h lub więcej) daje znaczące wydłużenie T^{BEST} i zwiększa A_{PS}^{BEST} .

2. Przy $\lambda = 10^{-5}$ 1/h, $\alpha = 0,95$ i poprawie ρ o 86%, tj. z 0,35 (Rysunek 4) do 0,65 (Rysunek 3), czas T^{BEST} będzie dłuższy o 42% (z 2440 h do 3470 h, tzn. o 1030 h).

PRZYKŁAD – REZULTATY



Rysunek 5. A_{PS} w funkcji T , dla $\rho = 0,65$, $\alpha = 0,75$
i $\lambda = 10^{-7}, \dots, 10^{-4}$ [1/h]



Rysunek 6. A_{PS} w funkcji T , dla $\rho = 0,35$, $\alpha = 0,75$
i $\lambda = 10^{-7}, \dots, 10^{-4}$ [1/h]

3. Przy $\lambda = 10^{-5}$ 1/h i $\alpha = 0,75$, wzrost ρ o 86%, tj. z 0,35 (Rysunek 6) do 0,65 (Rysunek 5) powoduje wydłużenie T^{BEST} o 37% (z 1880 h do 2580 h, tzn. o 600 h).

4. Przy $\lambda = 10^{-5}$ 1/h i $\rho = 0,65$, wzrost α o 27%, tj. z 0,75 (Rysunek 5) do 0,95 (Rysunek 3) powoduje wydłużenie T^{BEST} o 34% (z 2580 h do 3470 h, tzn. o 890 h), natomiast przy $\lambda = 10^{-5}$ 1/h i $\rho = 0,35$, wzrost α z 0,75 (Rysunek 6) do 0,95 (Rysunek 4) powoduje wydłużenie T^{BEST} o 30% (z 1880 h do 2440 h, tzn. o 560 h).

PRZYKŁAD – REZULTATY

Rezultaty modelowania: zestawienie najlepszych czasów pomiędzy planowymi obsługami ZE i maksymalnych gotowości ZE dla wyznaczonych najlepszych czasów (przy $\lambda = 10^{-5}$ 1/h)

Numer rysunku (wartości prawdop.)	Najlepszy czas pomiędzy obsługami T^{BEST} [h]	Maksymalny współczynnik gotowości A_{PS}^{MAX} przy T^{BEST}
3 ($\rho = 0,65, \alpha = 0,95$)	3470	0,987
4 ($\rho = 0,35, \alpha = 0,95$)	2440	0,984
5 ($\rho = 0,65, \alpha = 0,75$)	2580	0,985
6 ($\rho = 0,35, \alpha = 0,75$)	1880	0,981

MODEL EKSPLOATACYJNY – PODSUMOWANIE

1. Model eksploatacji ZE uwzględnia istotne czynniki determinujące jego prawidłowe i nieprawidłowe działanie, t.j.: występowanie uszkodzeń (w tym ukrytych), planową obsługę, wykrywanie/niewykrywanie uszkodzeń podczas planowej obsługi, wykrywanie uszkodzeń/fałszywych uszkodzeń przez moduł samokontroli, odnowę ZE, utrzymywanie się uszkodzeń po przeprowadzeniu obsługi.
2. Model umożliwia wyznaczenie: (i) najlepszego odstępu czasu pomiędzy planowanymi obsługami ZE i (ii) maksymalnej gotowości ZE.
3. Poprawa parametrów niezawodnościowych ZE i prawdopodobieństwa wykrywania uszkodzeń podczas obsługi planowej i podczas samotestowania może istotnie wydłużyć czas pomiędzy planowymi obsługami ZE.



Dziękuję za uwagę