

Podstawowe funkcje niezawodnościowe stacji 110kV/SN oraz rozdzielni sieciowych SN

Streszczenie. W artykule przedstawione zostały wyniki oceny podstawowych funkcji określających właściwości niezawodnościowe stacji 110kV/SN oraz rozdzielni SN, jakimi są funkcja intensywności awarii, funkcja niezawodności oraz funkcja zawodności. Na podstawie wieloletnich obserwacji tych obiektów, eksploatowanych w sieci dużej spółki dystrybucyjnej energii elektrycznej w kraju, określone zostały przebiegi empiryczne wymienionych funkcji. Przeprowadzona została także analiza zgodności rozkładu empirycznego z założonym rozkładem teoretycznym. Wyznaczona została wartość oczekiwana czasu poprawnej pracy stacji do uszkodzenia.

Abstract. The article presents the results of the evaluation of basic functions determining reliability characteristics of the 110kV / MV station and MV switchgears, which are a function of intensity of failure, reliability function and unreliability function. Based on years of observations of these objects operated in large electricity distribution company in the country were defined waveforms of empirical mentioned features. It was also carried out analysis of the empirical distribution of compliance with the assumed theoretical distribution. It was fixed the expected value of the lifetime damage to the station. (**Basic functions of reliability 110kV/MV station and MV switchgear stations**).

Słowa kluczowe: : stacje GPZ, rozdzielnie sieciowe RS, funkcje niezawodnościowe, intensywność uszkodzeń.

Keywords: main supply points, switchgear stations, reliability function, failure rate.

Wprowadzenie

Istnieje wiele rozwiązań topologicznych oraz konstrukcyjnych stacji transformatorowo-rozdzielczych 110kV/SN, zwanych w skrócie GPZ-ami (Główny Punkt Zasilający) lub RPZ-ami (Rozdzielczy Punkt Zasilający) oraz rozdzielni sieciowych SN, zwanych RS-ami. Stopień ich złożoności jest uzależniony od wielu czynników, wśród których wymienić należy przede wszystkim: rodzaj zasilanych odbiorców, liczbę pól, sposób pracy sieci oraz wymagania niezawodnościowe. W sieciach komunalnych najczęściej budowane są stacje z dwoma transformatorami. Większa liczba transformatorów komplikuje układ stacji oraz automatykę zabezpieczeniową i sterowniczą, natomiast w przypadku stacji z jednym transformatorem zwiększa się niebezpieczeństwo wyłączeń awaryjnych u odbiorców w przypadku jego uszkodzenia. Stacje takie budowane są jedynie w przypadku zasilania niezbyt dużego obszaru lub odbiorców o małej wymaganej pewności zasilania. Najczęściej ma to miejsce w sieciach terenowych.

Stacje transformatorowo-rozdzielcze 110kV/SN stanowią główne punkty zasilania sieci rozdzielczych SN, zarówno miejskich, jak i terenowych. Stacje takie można podzielić na węzłowe oraz odbiorcze. W przypadku stacji węzłowych, część energii jest przez stację pobierana i transformowana na poziom napięć średnich, natomiast część jest odbierana przez linie 110 kV. Ze względu na możliwość znacznych ograniczeń w przypadku awarii stacji, posiadają one zazwyczaj rozbudowany, podwójny system szyn zbiorczych 110 kV z jednym wyłącznikiem w każdym polu.

Stacje odbiorcze stanowią jedynie punkt poboru energii z sieci 110 kV (nie są punktem tranzytowym sieci 110 kV). W stacjach tych wykorzystywane są następujące układy rozdzielni 110 kV [2, 5, 6, 9, 11]:

- pojedynczy lub podwójny układ blokowy linia – transformator, w przypadku ograniczonego terenu stacji lub bardzo krótkich linii 110 kV;
- układ H2, w przypadku rozdzielni z dwiema liniami zasilającymi i dwoma transformatorami (w uzasadnionych przypadkach układ H3t);
- układ H4, w przypadku rozdzielni z dwiema liniami i dwoma transformatorami, jeżeli układ pracuje także przelotowo;
- układ 1S sekcjonowany wyłącznikiem, w przypadku stacji zasilanych co najwyżej czterema liniami oraz wyposażonych w co najwyżej cztery transformatory;

- układ 2S z jednym łącznikiem, w przypadku rozdzielni o łącznej liczbie pól liniowych oraz transformatorowych większej od ośmiu.

Osobnym zagadnieniem jest wybór układu pracy rozdzielni SN (układu stacji RS). W przypadku stacji zasilanych z jednego źródła, które nie wymagają dużej pewności zasilania odbiorców, może zostać zastosowany pojedynczy niesekcjonowany system szyn zbiorczych. Jeżeli stacja posiada dwa niezależne źródła zasilania oraz dużą liczbę pól, wówczas jako podstawowy układ stosuje się pojedynczy sekcjonowany system szyn zbiorczych. Zazwyczaj liczba sekcji odpowiada liczbie źródeł zasilania. Przy bardzo dużej liczbie pól, stosowane są pojedyncze systemy szyn dzielone na cztery sekcje, zasilane z dwóch transformatorów trójuzwojeniowych lub dwóch transformatorów o dzielonych uzwojeniach średniego napięcia [2, 8]. Jedynie w przypadku stacji bardzo dużych stosowane są układy z podwójnym sekcjonowanym układem szyn zbiorczych.

Podstawowe funkcje niezawodnościowe

Niezawodność urządzenia lub systemu wyraża jego zdolność do wykonania określonych funkcji w określonym przedziale czasowym oraz w zadanych warunkach [4, 12]. W sensie matematycznym niezawodność jest prawdopodobieństwem warunkowym, że urządzenie będzie pracowało bez uszkodzenia od chwili jego uruchomienia do chwili t , pod warunkiem, że w chwili włączenia ($t = 0$) urządzenie było sprawne [1, 7, 12]:

$$(1) \quad R(0, t) = P\{S(\tau) = S; 0 \leq \tau \leq t, S(0) = S\}$$

gdzie: $S(\tau)$ – stan obiektu w chwili czasu τ , S – stan zdatności obiektu.

Powyżej przedstawiona funkcja nosi nazwę funkcji niezawodności lub inaczej funkcji życia urządzenia [12].

Biorąc pod uwagę, iż $R(0) = 1$, czyli że urządzenie w chwili uruchomienia było zdadne, można zapisać:

$$(2) \quad R(t) = P\{S(\tau) = S; 0 \leq \tau \leq t\}$$

Funkcja niezawodności stanowi układ zupełny zdarzeń z funkcją zawodności (trwałości) $F(t)$:

$$(3) \quad F(t) = P\{S(\tau) = \bar{S}; 0 \leq \tau \leq t\}$$

gdzie: \bar{S} – stan uszkodzenia urządzenia.

Jest to więc prawdopodobieństwo warunkowe uszkodzenia się obiektu do chwili czasu t , pod warunkiem, że urządzenie w chwili uruchomienia było zdadne ($F(0) = 0$). Prawdopodobieństwo to nazywane jest również rozkładem trwałości.

Pochodna funkcji zawodności po czasie jest funkcją gęstości prawdopodobieństwa wystąpienia uszkodzenia:

$$(4) \quad f(t) = \frac{dF(t)}{dt}$$

Bardzo ważnym pojęciem jest trwałość obiektu, nazywana także czasem życia obiektu. Trwałość obiektu jest zmienną losową o funkcji gęstości prawdopodobieństwa $f(t)$. Stąd jej wartość oczekiwana określona jest zależnością:

$$(5) \quad E(t) = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt = \int_0^{\infty} t dF(t) = \int_0^{\infty} R(t) dt$$

Bardzo ważna w teorii niezawodności jest funkcja intensywności uszkodzeń, którą definiuje się jako stosunek prawdopodobieństwa uszkodzenia elementu w przedziale czasu od t do $t+\Delta t$ do wielkości tego przedziału, przy $\Delta t \rightarrow 0$, przy założeniu, iż do chwili t uszkodzenie elementu nie nastąpiło:

$$(6) \quad \lambda(t) = \frac{F'(t)}{1 - F(t)} = -\frac{R'(t)}{R(t)}$$

Zatem intensywność uszkodzeń $\lambda(t)$ charakteryzuje w każdej chwili t względne pogorszenie się niezawodności obiektu przypadające na jednostkę czasu $\Delta t = 1$. Dla porównania gęstość prawdopodobieństwa $f(t)$ wyraża bezwzględne pogorszenie niezawodności obiektu przypadające na jednostkę czasu [10, 12].

Kolejną funkcją charakteryzującą niezawodność obiektu jest skumulowana intensywność uszkodzeń, zwana także funkcją wiodącą [10]:

$$(7) \quad \Lambda(t) = \int_0^t \lambda(u) du$$

Jest ona miarą wyczerpywania się zapasu możliwości wykonania przez obiekt postawionego mu zadania.

Niezawodność obiektu można także scharakteryzować, poprzez określenie funkcji oczekiwanego pozostałego czasu zdadności:

$$(8) \quad r(t) = \int_t^{\infty} \frac{R(s)}{R(t)} ds$$

Funkcje niezawodnościowe stacji 110kV/SN

Na podstawie danych empirycznych, w oparciu o metodę dynamicznej próby losowej [3, 12] oszacowane zostały funkcja intensywności awarii, funkcja niezawodności oraz funkcja trwałości stacji GPZ, RS i RPZ. Na rysunku 1 przedstawiona została empiryczna funkcja intensywności awarii.

Analizując przedstawiony przebieg funkcji intensywności zauważa się okres wzmożonej intensywności awarii między 7 a 19 rokiem eksploatacji, następnie intensywność awarii zmniejsza się do około 38 roku, po czym jej wartość gwałtownie wzrasta.

Na podstawie szczegółowej analizy otrzymanych wyników przyjęto, iż funkcja intensywności awarii stacji

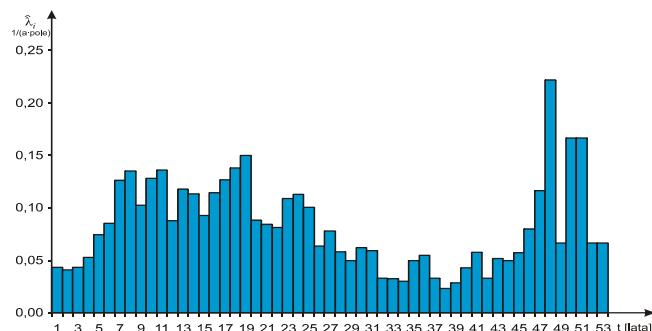
GPZ, RS i RPZ jest superpozycją trzech rozkładów intensywności $\lambda_1(t)$, $\lambda_2(t)$, $\lambda_3(t)$ o postaci:

$$(9) \quad \lambda(t) = k_1 \cdot \lambda_1(t) + k_2 \cdot \lambda_2(t) + k_3 \cdot \lambda_3(t)$$

gdzie: k_1 , k_2 , k_3 – udziały awarii w poszczególnych latach eksploatacji, wyrażone zależnościami:

$$(10) \quad k_1 = \frac{l_1}{l} \quad k_2 = \frac{l_2}{l} \quad k_3 = \frac{l_3}{l}$$

l_1 – liczba awarii stacji, które wystąpiły do 30 roku eksploatacji, l_2 – liczba awarii stacji, które wystąpiły między 31 a 40 rokiem eksploatacji, l_3 – liczba awarii stacji, które wystąpiły od 41 roku eksploatacji, l – liczba wszystkich awarii.



Rys. 1. Empiryczna funkcja intensywności awarii stacji transformatorowo rozdzielczych 110kV/SN

Jako rozkłady intensywności awarii przyjęto: dla frakcji pierwszej $\lambda_1(t)$ – rozkład logarytmiczno-normalny, dla frakcji drugiej $\lambda_2(t)$ – rozkład wykładniczy, dla frakcji trzeciej $\lambda_3(t)$ – rozkład Weibulla. Funkcje intensywności awarii dla powyższych rozkładów wyrażają się zależnościami:

$$(11) \quad \lambda_1(t) = \frac{\log e}{t \cdot \sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \frac{e^{-\frac{(\log t - m)^2}{2 \cdot \sigma^2}}}{0,5 - \Phi\left(\frac{\log t - m}{\sigma}\right)}$$

$$(12) \quad \lambda_2(t) = \lambda_w = const.$$

$$(13) \quad \lambda_3(t) = \frac{\nu}{b} \cdot \left(\frac{t}{b}\right)^{\nu-1}$$

gdzie: σ – odchylenie standardowe zmiennej losowej $\log t$, m – wartość oczekiwana zmiennej losowej $\log t$, λ_w – stała wartość intensywności awarii (parametr rozkładu wykładniczego), ν – parametr kształtu rozkładu Weibulla, b – parametr skali rozkładu Weibulla, $\Phi(x)$ – całka Laplace'a.

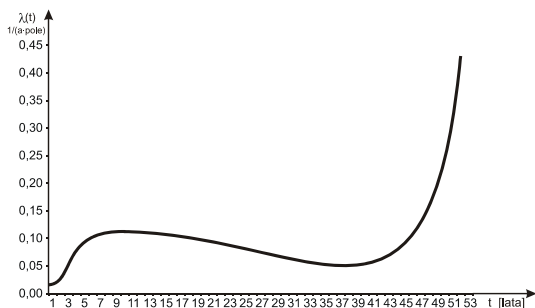
Na podstawie analizy przebiegu empirycznego funkcji $\lambda(t)$ wyznaczone zostały następujące licznosci poszczególnych frakcji: $l_1 = 1823$, $l_2 = 199$, $l_3 = 76$, $l = 2098$ oraz udziały awarii w poszczególnych frakcjach $k_1 = 0,87$, $k_2 = 0,09$, $k_3 = 0,04$.

Wyznaczone z wykorzystaniem pakietu Statistica oraz Excela wartości parametrów rozkładów (11), (12) oraz (13) wynoszą: $m = 0,9502$, $\sigma = 0,3211$, $\lambda_w = 0,0562$, $\nu = 19,54$ oraz $b = 43,35$.

Po podstawieniu wyznaczonych wartości do zależności (9) teoretyczna funkcja intensywności awarii przyjmuje postać:

$$(14) \lambda(t) = \frac{0,4689}{t} \cdot \frac{e^{\frac{(\log t - 0,9502)^2}{0,2062}}}{0,5 - \Phi(3,1143 \cdot \log t - 2,9592)} + 7,30 \cdot 10^{-33} \cdot t^{18,54} + 0,0053$$

Teoretyczną funkcję intensywności awarii stacji 110kV/SN przedstawia rysunek 2.



Rys. 2. Teoretyczna funkcja intensywności uszkodzeń $\lambda(t)$ stacji transformatorowo-rozdzielczych GPZ, RS i RPZ

Weryfikacja hipotezy o rozkładzie została przeprowadzona za pomocą testu znaków: $l_0 = \min(l^+, l^-) = \min(22, 31) = 22$; $l_0 = 22 > 18 = l_{\alpha}$; $l_0 \notin R_{\alpha} = (-\infty, 18)$. Na podstawie przeprowadzonego testu, dla poziomu istotności $\alpha = 0,05$, nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy, iż funkcja intensywności jest superpozycją trzech rozkładów przedstawioną zależnością (14).

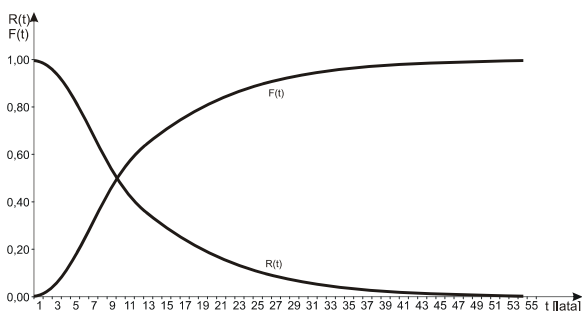
Wykorzystując zależności między funkcjami $R(t)$, $F(t)$ i $\lambda(t)$ funkcje niezawodności można zapisać w postaci:

$$(15) R(t) = 0,4345 - 0,8689 \cdot \Phi(3,1143 \cdot \log t - 2,9592) + 0,0949 \cdot e^{-0,0562 \cdot t} + 0,0362 \cdot e^{-\left(\frac{t}{43,35}\right)^{19,54}}$$

natomiast funkcję zawodności:

$$(16) F(t) = 0,5655 + 0,8689 \cdot \Phi(3,1143 \cdot \log t - 2,9592) + 0,0949 \cdot e^{-0,0562 \cdot t} - 0,0362 \cdot e^{-\left(\frac{t}{43,35}\right)^{19,54}}$$

Przebieg funkcji $R(t)$ oraz $F(t)$ przedstawia rysunek 3.

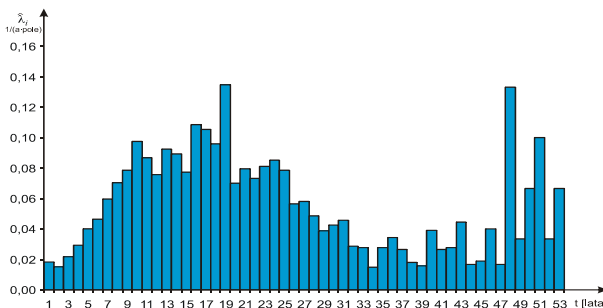


Rys. 3. Teoretyczna funkcja niezawodności $R(t)$ oraz zawodności $F(t)$ stacji 110kV/SN

Funkcja gęstości prawdopodobieństwa czasu poprawnej pracy stacji transformatorowo-rozdzielczych 110kV/SN przyjmuje postać:

$$(17) f(t) = \frac{0,4689}{t} \cdot e^{\frac{(\log t - 0,9502)^2}{0,2062}} + 0,0053 \cdot e^{-0,0562 \cdot t} + 7,30 \cdot 10^{-33} \cdot t^{18,54} \cdot e^{-\left(\frac{t}{43,35}\right)^{19,54}}$$

Przedstawiona powyżej analiza funkcji niezawodnościowych stacji GPZ, RS i RPZ przeprowadzona została z uwzględnieniem awarii i uszkodzeń układów EAZiS. Ponieważ w większości pozycji literaturowych, zarówno krajowych, jak i zagranicznych, analiza taka przeprowadzana jest z pominięciem układów zabezpieczeń i sterowania stacją, a także awarie układów EAZiS w wielu przypadkach nie niosą ze sobą znaczących skutków gospodarczych i technicznych, przeprowadzona została także analiza funkcji niezawodnościowych z pominięciem tych urządzeń i podzespołów. Na rysunku 4 przedstawiona została empiryczna funkcja intensywności awarii z pominięciem uszkodzeń układów EAZiS.



Rys. 4. Empiryczna funkcja intensywności awarii stacji transformatorowo-rozdzielczych 110kV/SN bez uwzględnienia awarii układów EAZiS

Analizując przedstawiony przebieg funkcji intensywności zauważa się okres wzmożonej intensywności awarii między 7 a 25 rokiem eksploatacji, następnie intensywność awarii zmniejsza się do około 45 roku, po czym jej wartość gwałtownie wzrasta.

Na podstawie szczegółowej analizy otrzymanych wyników przyjęto, jak poprzednio, iż funkcja intensywności awarii stacji GPZ, RS i RPZ jest superpozycją trzech rozkładów intensywności $\lambda_1(t)$, $\lambda_2(t)$, $\lambda_3(t)$ o postaci (9), przy czym: l_1 – liczba awarii stacji, które wystąpiły do 30 roku eksploatacji, l_2 – liczba awarii stacji, które wystąpiły między 31 a 45 rokiem eksploatacji, l_3 – liczba awarii stacji, które wystąpiły od 46 roku eksploatacji oraz l – liczba wszystkich awarii.

Jako rozkłady intensywności awarii przyjęto: dla frakcji pierwszej $\lambda_1(t)$ – rozkład logarytmiczno-normalny, dla frakcji drugiej $\lambda_2(t)$ – rozkład wykładniczy, dla frakcji trzeciej $\lambda_3(t)$ – rozkład Weibulla. Funkcje intensywności awarii dla powyższych rozkładów wyrażają się zależnościami (11), (12) oraz (13).

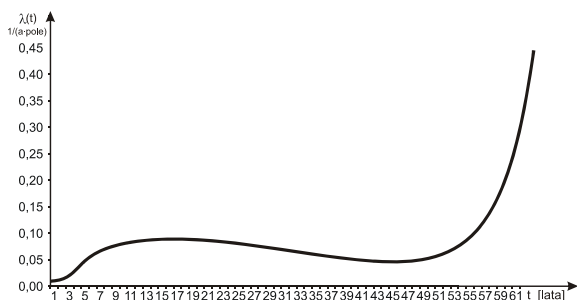
Na podstawie analizy przebiegu empirycznego funkcji $\lambda(t)$ wyznaczone zostały następujące licznosci poszczególnych frakcji: $l_1 = 1331$, $l_2 = 164$, $l_3 = 18$, $l = 1513$ oraz udziały awarii w poszczególnych frakcjach $k_1 = 0,88$, $k_2 = 0,11$, $k_3 = 0,01$.

Wyznaczone z wykorzystaniem pakietu Statistica oraz Excela wartości parametrów rozkładów (11), (12) oraz (13) wynoszą: $m = 1,1207$, $\sigma = 0,2975$, $\lambda_w = 0,0968$, $\nu = 13,74$ oraz $b = 43,83$.

Po podstawieniu wyznaczonych wartości do zależności (9) teoretyczna funkcja intensywności awarii stacji 110kV/SN, z pominięciem awarii układów EAZiS, przyjmuje postać:

$$(18) \lambda(t) = \frac{0,5123}{t} \cdot \frac{e^{\frac{(\log t - 1,1207)^2}{0,1770}}}{0,5 - \Phi(3,3613 \cdot \log t - 3,7671)} + 4,52 \cdot 10^{-24} \cdot t^{12,74} + 0,0105$$

Teoretyczną funkcję intensywności awarii stacji 110kV/SN, przy pominięciu awarii układów EAZiS, przedstawia rysunek 5.



Rys. 5. Teoretyczna funkcja intensywności uszkodzeń $\lambda(t)$ stacji transformatorowo-rozdzielczych GPZ, RS i RPZ, przy pominięciu awarii układów EAZiS

Weryfikacja hipotezy o rozkładzie została przeprowadzona za pomocą testu znaków: $l_0 = \min(l^+, l^-) = \min(25, 28) = 25$; $l_0 = 25 > 18 = l_{\alpha}$; $l_0 \notin R_{\alpha} = (-\infty, 18)$. Na podstawie przeprowadzonego testu, dla poziomu istotności $\alpha = 0,05$, nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy, iż funkcja intensywności jest superpozycją trzech rozkładów przedstawioną zależnością (18).

Wykorzystując zależności między funkcjami $R(t)$, $F(t)$ i $\lambda(t)$ funkcję niezawodności można zapisać w postaci:

$$R(t) = 0,4399 - 0,8797 \cdot \Phi(3,3613 \cdot \log t - 3,7671) + 0,1084 \cdot e^{-0,0968t} + 0,0119 \cdot e^{-\left(\frac{t}{43,83}\right)^{13,74}} \quad (19)$$

natomiast funkcję zawadności:

$$F(t) = 0,5601 + 0,8797 \cdot \Phi(3,3613 \cdot \log t - 3,7671) - 0,1084 \cdot e^{-0,0968t} - 0,0119 \cdot e^{-\left(\frac{t}{43,83}\right)^{13,74}} \quad (20)$$

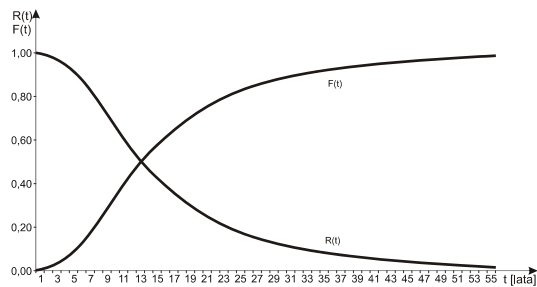
Teoretyczne funkcje $R(t)$ oraz $F(t)$ przedstawia rysunek 6.

Funkcja gęstości prawdopodobieństwa czasu poprawnej pracy stacji transformatorowych 110kV/SN przy pominięciu awarii układów EAZiS przyjmuje postać:

$$f(t) = \frac{0,5123}{t} \cdot e^{-\frac{(\log t - 1,1207)^2}{0,1770}} + 0,0105 \cdot e^{-0,0968t} + 4,52 \cdot 10^{-24} \cdot t^{12,74} \cdot e^{-\left(\frac{t}{43,83}\right)^{13,74}} \quad (21)$$

Podsumowanie

W artykule Autor przedstawił wyniki analiz przeprowadzonych dla stacji elektroenergetycznych 110kV/SN oraz stacji RS, a dotyczących ich podstawowych funkcji niezawodnościowych. Na podstawie danych empirycznych wyznaczone zostały funkcja niezawodności, funkcja zawadności oraz funkcja intensywności awarii tych stacji. Niezależne analizy przeprowadzono z uwzględnieniem oraz bez uwzględnienia awarii układów elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej oraz sterowniczej. Otrzymane funkcje intensywności są superpozycją trzech rozkładów: logarymiczno-normalnego, wykładniczego oraz Weibulla. Wartość oczekiwana czasu poprawnej pracy stacji GPZ oraz RS wynosi w przypadku analizy pełnej 13,39 a, natomiast przy pominięciu awarii układów EAZiS 16,31 a.



Rys. 6. Teoretyczna funkcja niezawodności $R(t)$ oraz zawadności $F(t)$ stacji 110kV/SN, przy pominięciu awarii układów EAZiS

Brak wiarygodnych i pełnych danych uniemożliwia w wielu przypadkach określenie funkcji niezawodnościowych obiektów elektroenergetycznych. Dlatego też w literaturze najczęściej można znaleźć średnie parametry niezawodnościowe stacji. Znajomość podstawowych funkcji niezawodnościowych pozwala ustalić okres pracy stacji w którym z dużym prawdopodobieństwem stacja będzie działała poprawnie, a więc nie będzie powodowała przerw w zasilaniu odbiorców. Pozwala także na wyznaczenie ekonomicznie opłacalnego okresu eksploatacji.

Wyznaczone przez Autora funkcje niezawodnościowe stacji GPZ oraz RS, mogą znaleźć szerokie zastosowanie zarówno na etapie projektowania nowych obiektów, jak i na etapie ich eksploatacji, w celu ustalenia optymalnych warunków pracy. Wyniki przeprowadzonych badań mogą być podstawą do ustalenia terminów prac remontowych. Mogą one także znaleźć zastosowanie w dalszych analizach niezawodnościowych oraz ekonomiczno-gospodarczych samych stacji 110kV/SN oraz rozdzielni sieciowych, jak i zasilanych z nich sieci dystrybucyjnych średniego napięcia.

Autor: dr hab. inż. Andrzej Ł. Chojnacki, Politechnika Świętokrzyska w Kielcach, Zakład Podstaw Energetyki, Al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce, E-mail: a.chojnacki@tu.kielce.pl

LITERATURA

- [1] Barra J.R., *Matematyczne podstawy niezawodności*. PWN, Warszawa 1982
- [2] Bełdowski T., Markiewicz H., *Stacje i urządzenia elektroenergetyczne*. WNT, Warszawa 1995
- [3] Chojnacki A.Ł., *Analiza niezawodności eksploatacyjnej elektroenergetycznych sieci dystrybucyjnych*. Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2013
- [4] Kowalski Z., *Niezawodność zasilania odbiorców energii elektrycznej*. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 1992
- [5] Kujaszczyk S., *Elektroenergetyczne sieci rozdzielcze tom I*. PWN, Warszawa 1994
- [6] Kujaszczyk S., *Elektroenergetyczne sieci rozdzielcze tom II*. PWN, Warszawa 1994
- [7] Maksymiuk J., *Niezawodność maszyn i urządzeń elektrycznych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2003
- [8] Markiewicz H., *Urządzenia elektroenergetyczne*. WNT, Warszawa 2008
- [9] Marzecki J., *Elektroenergetyczne sieci miejskie. Zagadnienia wybrane*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2006
- [10] Migdański J. red., *Poradnik niezawodności, Podstawy matematyczne*. Wydawnictwo Przemysłu Maszynowego „WEMA”, Warszawa 1982
- [11] Praca zbiorowa, *Poradnik inżyniera elektryka, t. 3*. WNT, Warszawa 2011
- [12] Sozański J., *Niezawodność zasilania energią elektryczną*. WNT, Warszawa 1982