



Michał DASZCZYSAK

Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Katedra Elektroenergetyki

Wpływ poziomu niezawodności na poziom bezpieczeństwa pracowników

Streszczenie. Referat dotyczy ryzyka zawodowego pracowników obsługujących urządzenia elektryczne. Przedmiotem rozważań jest zagadnienie poprawy niezawodności urządzeń elektrycznych, aby uzyskać optymalny (ze względu na koszty) poziom bezpieczeństwa pracowników.

Abstract. (Influence of reliability level on safety of employees). The paper concerns occupational hazard of employees working with electrical equipment. The subject of consideration is improvement of electrical equipment reliability, to acquire optimal (taking into account costs) safety level of employees.

Słowa kluczowe: awaryjność i niezawodność urządzeń elektrycznych, ryzyko zawodowe, analiza kosztów.

Keywords: failure frequency and reliability of electrical equipment, occupational hazard, cost analysis.

Wstęp

Niezawodność definiuje się jako zdolność obiektu (urządzenia, systemu urządzeń, układu, itp.) do wypełniania zadanych funkcji w wymaganym przedziale czasu. Awaria jest to zdarzenie powstałe w wyniku niekontrolowanego rozwoju sytuacji w czasie eksploatacji urządzeń prowadzące do strat [9]. Awarię powstałą na skutek przekroczenia wymagań zwarciowych opisano w pozycji [2], natomiast awarię powstałą na skutek przekroczenia wytrzymałości termicznej opisano w pozycji [1].

Poziom niezawodności i poziom bezpieczeństwa

Poziom niezawodności to możliwość bezawaryjnej pracy urządzenia. Poziom niezawodności urządzenia można utożsamić z przeciętnym czasem między kolejnymi uszkodzeniami T_u :

$$(1) \quad T_u = \frac{I}{\lambda_u}$$

gdzie: λ_u – intensywność uszkodzeń w ciągu roku.

Poziom bezpieczeństwa to możliwość bezpiecznej (bezwypadkowej) pracy pracowników. Poziom bezpieczeństwa można utożsamić z przeciętnym czasem między kolejnymi wypadkami T_w :

$$(2) \quad T_w = \frac{I}{\lambda_w}$$

gdzie: λ_w – intensywność wypadków w ciągu roku.

Autor w swoich rozważaniach zakłada, że do wypadku dochodzi na skutek awarii (np. eksplozji, pożaru itp.) urządzenia. W takim razie można zapisać zależność pomiędzy roczną intensywnością wypadków a roczną intensywnością uszkodzeń [2,11]:

$$(3) \quad \lambda_w = \lambda_u \cdot \frac{T_E}{T_r}$$

lub:

$$(4) \quad T_w = T_u \cdot \frac{T_r}{T_E}$$

gdzie: T_E – czas ekspozycji (czas przebywania pracowników w pobliżu zagrożonego awarią urządzenia), T_r – czas pracy urządzenia w roku.

Miary statystyczne niezawodności

Podstawową zmienną służącą do analizy statystycznej niezawodności jest funkcja gęstości prawdopodobieństwa wystąpienia uszkodzenia $f_u(t)$. Funkcja ta przyjmuje najczęściej postaci [11]:

$$(5) \quad f_u(t) = \frac{I}{T_u} = \lambda_u$$

lub:

$$(6) \quad f_u(t) = \frac{\exp\left(-\frac{t}{T_u}\right)}{T_u} = \lambda_u \cdot \exp(-t \cdot \lambda_u)$$

Funkcja gęstości prawdopodobieństwa wystąpienia uszkodzenia musi spełniać zależność:

$$(7) \quad \int_0^{\infty} f_u(t) dt = 1.$$

Wartość oczekiwana kosztu usunięcia uszkodzenia wyznacza się z zależności [3,11]:

$$(8) \quad E[K_u] = \int_0^{T_{exp}} K_u \cdot (I + p)^{-t} \cdot f_u(t) \cdot dt$$

gdzie: T_{exp} – czas eksploatacji urządzenia, K_u – koszt, który obejmuje wszystkie skutki uszkodzenia, w tym również koszt niedostarczonej energii, p – stopa dyskonta [7].

Przy założeniu, że funkcja gęstości prawdopodobieństwa jest wyrażona wzorem (5), wartość oczekiwana kosztu usunięcia uszkodzenia wynosi:

$$\begin{aligned}
E[K_u] &= \int_0^{T_{exp}} K_u \cdot (1+p)^{-t} \cdot \frac{1}{T_u} \cdot dt = \\
&= \frac{K_u}{T_u} \cdot \int_0^{T_{exp}} (1+p)^{-t} dt = \frac{K_u}{T_u} \cdot \frac{1 - (1+p)^{-T_{exp}}}{\ln(1+p)} \cong \\
&\cong \frac{K_u}{T_u} \cdot \frac{1 - (1+p)^{-T_{exp}}}{p} = \frac{K_u}{T_u} \cdot \frac{(1+p)^{T_{exp}} - 1}{p \cdot (1+p)^{T_{exp}}} = \frac{K_u}{T_u} \cdot \frac{r}{p}
\end{aligned}$$

gdzie: r – rata rozszerzonej reprodukcji [7].

Jeżeli funkcja gęstości prawdopodobieństwa jest wyrażona wzorem (6), to wartość oczekiwana kosztu usunięcia uszkodzenia wynosi:

$$\begin{aligned}
E[K_u] &= \int_0^{T_{exp}} K_u \cdot (1+p)^{-t} \cdot \frac{\exp\left(-\frac{t}{T_u}\right)}{T_u} \cdot dt = \\
&= \frac{K_u}{T_u} \cdot \int_0^{T_{exp}} (1+p)^{-t} \cdot \exp\left(-\frac{t}{T_u}\right) dt \cong \frac{K_u}{T_u}
\end{aligned}$$

W oparciu o powyższe, można zapisać uproszczoną zależność na wartość oczekiwaną kosztu usunięcia uszkodzenia:

$$(9) \quad E[K_u] \cong \frac{K_u}{T_u} = \frac{K_l}{T_u}$$

gdzie: K_l – jednostkowy koszt związany z usunięciem uszkodzenia.

Miary statystyczne bezpieczeństwa pracowników

Podstawową zmienną służącą do analizy statystycznej bezpieczeństwa pracowników jest funkcja gęstości prawdopodobieństwa wystąpienia wypadku $f_w(t)$:

$$(10) \quad f_w(t) = \frac{1}{T_w} = \lambda_w$$

Najczęściej zakłada się, że:

$$(11) \quad \lambda_w = const.$$

Funkcja gęstości prawdopodobieństwa wystąpienia wypadku musi również spełniać zależność:

$$(12) \quad \int_0^{\infty} f_w(t) dt = 1$$

Wartość oczekiwana kosztu wypadku:

$$(13) \quad E[K_w] = \int_0^{T_{exp}} K_w \cdot (1+p)^{-t} \cdot f_w(t) \cdot dt,$$

gdzie: K_w – koszt strat, p – stopa dyskonta.

Koszt strat K_w obejmuje m.in.: straty produkcji, odszkodowania powypadkowe, renty inwalidzkie, koszty absencji chorobowej itp.

W oparciu o rozważania znajdujące się w poprzednim rozdziale można zapisać uproszczoną zależność, na wartość oczekiwaną kosztu wypadku:

$$(14) \quad E[K_w] \cong \frac{K_w}{T_w} \cdot \frac{r}{p}$$

W oparciu o wzory (4) i (14) wyznacza się zależność na wartość oczekiwaną kosztu wypadku:

$$(15) \quad E[K_w] \cong \frac{K_w}{T_w} = \frac{K_w}{T_u} \cdot \frac{r \cdot T_r}{T_u} \cdot T_E = \frac{K_2}{T_u} \cdot T_E$$

gdzie: K_2 – jednostkowy koszt związany z wypadkiem.

Koszty bezpiecznej i niezawodnej pracy

Koszt związany z zapewnieniem wysokiego poziomu niezawodności urządzenia K_n [3,11] jest to koszt działań zmierzających do zmniejszenia intensywności awarii, tzw. koszt zapobiegania awariom. Wartość kosztu zapobiegania awariom jest proporcjonalna do przeciętnego czasu między kolejnymi uszkodzeniami T_u . Oznacza to, że inwestując w wytrzymałość urządzeń, można zmniejszyć intensywność uszkodzeń [5]. W takim razie autor proponuje następującą zależność na koszt zapobiegania awariom:

$$(16) \quad K_n \cong K_3 \cdot T_u$$

gdzie: K_3 – jednostkowy koszt zapobiegania awariom.

Koszt związany z zapewnieniem wysokiego poziomu bezpieczeństwa pracowników jest to koszt działań zmierzających do zmniejszenia liczby wypadków, tzw. koszt zapobiegania wypadkom. Wartość kosztu zapobiegania wypadkom jest odwrotnie proporcjonalna do czasu przebywania pracowników w pobliżu zagrożonego awarią urządzenia – wzór (4). Oznacza to, że inwestując w aparaturę kontrolującą pracę urządzenia (np. monitoring), można zmniejszyć czas ekspozycji T_E . W takim razie autor proponuje następującą zależność na koszt zapobiegania wypadkom:

$$(17) \quad K_E \cong \frac{K_4}{T_E}$$

gdzie: K_4 – jednostkowy koszt zapobiegania wypadkom.

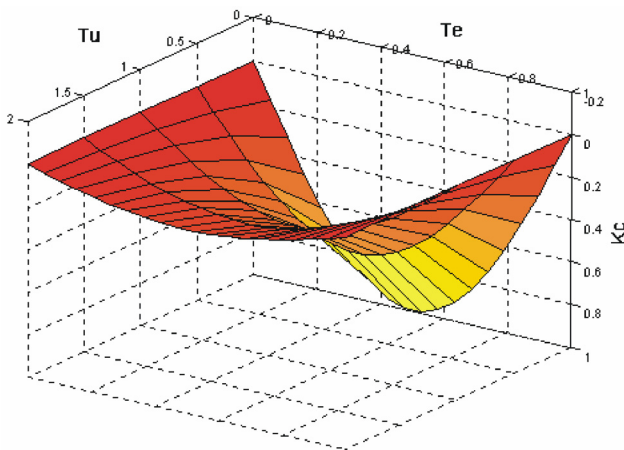
Ostatecznie koszty bezpiecznej i niezawodnej pracy wynoszą:

$$(18) \quad K_C = \frac{K_1}{T_u} + \frac{K_2}{T_u} \cdot T_E + K_3 \cdot T_u + \frac{K_4}{T_E}$$

Różniczkując funkcję kosztów otrzymuje się optymalne wartości czasów T_u oraz T_E , przy których koszty bezpiecznej i niezawodnej pracy są minimalne:

$$(19) \quad \left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial T_u} K_C = 0 \\ \frac{\partial}{\partial T_E} K_C = 0 \end{aligned} \right\} K_{C_{opt}} = K_C(T_{u_{opt}}, T_{E_{opt}})$$

W praktyce, w większości przypadków mamy do czynienia z dyskretnym modelem kosztów, związanym z poszczególnymi wariantami. W tej sytuacji należy rozpatrywać dwa lub więcej wariantów (np. tańszy, lecz bardziej zawodny, i droższy, lecz mniej zawodny).



Rys. 1. Poglądowy wykres kosztów bezpiecznej i niezawodnej pracy, w jednostkach względnych.

Wnioski

Zwiększenie poziomu niezawodności urządzeń powoduje zwiększenie poziomu bezpieczeństwa pracowników.

Zwiększenie poziomu bezpieczeństwa pracowników można również uzyskać zmniejszając czas ekspozycji przy niezmiennym poziomie niezawodności urządzenia, przy którym pracuje obsługa.

Mając na uwadze wymagany poziom bezpieczeństwa, należy przeprowadzić analizę ekonomiczną, która wykaże, czy lepiej zainwestować w poprawę niezawodności urządzenia, czy w monitoring pracy urządzenia.

Przeprowadzone w przeszłości analizy poziomu bezpieczeństwa pracowników doprowadziły do powstania wielu metod służących do analizy ryzyka zawodowego, np. metoda RISC SCORE [2,6,10,12], metoda PHA [1,10], czy metoda polskiej normy [9].

Przeprowadzona w referacie analiza wpływu poziomu niezawodności na poziom bezpieczeństwa pracowników będzie kontynuowana i rozwijana w dalszych pracach autora.

LITERATURA

- [1] Daszczyszak M., Ocena ryzyka zawodowego przy eksploatacji urządzeń elektroenergetycznych, *Energetyka*, 1/2005, str. 28÷31.
- [2] Daszczyszak M., Zwarcia w systemie elektroenergetycznym a bezpieczeństwo personelu w świetle wymagań wynikających z wejścia Polski do Unii Europejskiej, *Energetyka*, 1/2005, str. 32÷34.
- [3] Daszczyszak M., Poprawa niezawodności urządzeń elektrycznych przy zarządzaniu ryzykiem, IX Międzynarodowe Sympozjum EUI 2003, Zakopane, 9-11 października 2003 r.
- [4] Daszczyszak M., Zarządzanie ryzykiem w świetle wybranych praw UE, VI Konferencja Naukowa PE 2002, Częstochowa-Złoty Potok, 18-20 września 2002, str. 235-239.
- [5] Daszczyszak M., Awaryjność izolatorów wsporczych w czasie trwania zwarcia, VIII Sympozjum EUI'01, Zakopane, 18-20 października 2001, str. 83-87.
- [6] Kinney G. F., Wiruth A. D., Practical Risk Analysis for Safety Management, *Naval Weapons Center*, China Lake, 1976.
- [7] Laudyn D., Rachunek ekonomiczny w elektroenergetyce, *Oficyna Wydaw. Politechniki Warszawskiej*, Warszawa, 1997.
- [8] PN-IEC 60300-3, Zarządzanie niezawodnością, *PNK 2001*.
- [9] PN-N-18002 Systemy zarządzania bezpieczeństwem i higieną pracy, *PNK 2000*.
- [10] Paluch R. i inni., BHP w energetyce – poradnik dla każdej firmy, *EUROPEX*, Kraków, lipiec 2003.
- [11] Popczyk J., Modele probabilistyczne w sieciach elektroenergetycznych, *WNT*, Warszawa 1991.
- [12] Studenski R., Ryzyko zawodowe w spółkach dystrybucyjnych energii elektrycznej, *ODDK*, Gdańsk 2001.

Autor: dr inż. Michał Daszczyszak, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Katedra Elektroenergetyki, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, E-mail: mdaszcz@agh.edu.pl