

# Koszty strat u dystrybutorów energii elektrycznej spowodowane zawodnością stacji elektroenergetycznych SN/nN

Stacje elektroenergetyczne SN/nN są jednymi z najważniejszych elementów systemu dystrybucyjnego energii elektrycznej. Grupują one istotne dla pracy sieci urządzenia średniego i niskiego napięcia, urządzenia pomiarowe, zabezpieczenia czy też układy telemechaniki. Głównym zadaniem stacji jest przetwarzanie i rozdział energii elektrycznej między poszczególnych odbiorców przy zachowaniu odpowiednio wysokiego poziomu niezawodności tych dostaw. Stacje SN/nN budowane są jako napowietrzne (głównie słupowe) lub wewnątrzowe. Stacje słupowe budowane są zazwyczaj w sieciach terenowych, natomiast stacje wewnątrzowe w sieciach miejskich. Stacje te są zazwyczaj stacjami jednotransformatorowymi. Tylko w przypadku zasilania ze stacji odbiorcy o wymaganej dużej pewności zasilania lub zasilania dużej liczby odbiorców, wyposaża się je w dwa transformatory, które pełnią rolę rezerwy jawnej lub ukrytej.

Stacje eksploatowane na terenach miejskich zasilane są zazwyczaj liniami kablowymi SN w układzie pętlowym z rozcięciami. Umożliwia to zasilanie stacji nawet w przypadku awarii kabla zasilającego w którymś z odcinków pętli. Ze względu na zasilanie stacji miejskich liniami kablowymi oraz fakt, iż większość stacji miejskich to stacje wewnątrzowe o korzystniejszych dla urządzeń elektrycznych warunkach pracy, sieci miejskie SN są układami o stosunkowo małej awaryjności.

Stacje terenowe SN/nN zasilane są zazwyczaj z linii napowietrznych SN pracujących w układzie promieniowym z odgałęzieniami lub magistralnym. Taki układ pracy powoduje, iż w przypadku uszkodzenia linii znaczna liczba stacji zostaje pozbawiona zasilania. Tylko nieliczne stacje terenowe posiadają układy rezerwowego zasilania.

Sposób zasilania, a także konstrukcje napowietrzne słupowe większości stacji, wpływają na znaczną awaryjność sieci terenowych. Urządzenia tam eksploatowane są bowiem narażone na oddziaływanie czynników atmosferycznych, jak niskie lub wysokie temperatury, opady atmosferyczne, wiatr, sadź, deszcz, itp.

Ze względu na fakt, iż uszkodzenia w sieciach dystrybucyjnych dotyczą małych odbiorców, brak jest kompleksowych analiz dotyczących skutków awaryjności sieci SN i nN. W dostępnych publikacjach analizuje się najczęściej awaryjność urządzeń w sektorze wytwarzania energii [2,8,9] oraz w układach jej przesyłu sieciami wysokich i najwyższych napięć [3,8]. Publikacje dotyczące niezawodności sieci dystrybucyjnych ograniczają się w zasadzie do analizy awaryjności linii napowietrznych i kablowych SN [6,12]. Wyjątek stanowi publikacja [11], która prezentuje charakterystykę

awarii wiejskich sieci elektroenergetycznych. Tymczasem awarie w układach dystrybucyjnych są dość częste, zwłaszcza w sieciach terenowych. Skutkiem takiego stanu rzeczy są znaczne koszty strat u odbiorców oraz dystrybutorów energii elektrycznej.

Skutki gospodarcze niedostarczenia energii elektrycznej do odbiorców indywidualnych zostały szczegółowo zaprezentowane w publikacji [1]. W niniejszym artykule przedstawione zostały wyniki badań, dotyczące analizy strat ekonomicznych występujących u dystrybutorów energii elektrycznej w wyniku awarii miejskich oraz wiejskich stacji SN/nN. Straty te wynikają z konieczności usunięcia zaistniałej awarii oraz utraty zysku za czas jej trwania. Przedstawione zostały wyniki szczegółowej analizy statystycznej składników całkowitych kosztów zawodnościowych stacji.

Analiza wykonana została na podstawie danych empirycznych pochodzących z 10 lat obserwacji na terenie dużej spółki dystrybucyjnej w kraju. Statystyka obejmuje 2028 przypadków awarii stacji eksploatowanych w sieciach miejskich oraz 1335 przypadków awarii stacji eksploatowanych w sieciach terenowych. Na jej podstawie wyznaczone zostały wartości średnie analizowanych kosztów, odchylenia standardowe, przedziały ufności dla średniej, wartości minimalne oraz maksymalne. Przeprowadzona została także weryfikacja nieparametryczna. Określone zostały teoretyczne rozkłady gęstości prawdopodobieństwa kosztów strat u dystrybutorów energii w wyniku awarii. Wszystkie analizy przeprowadzone zostały na poziomie istotności  $\alpha = 0,05$ .

## Charakterystyka kosztów strat u dystrybutorów energii elektrycznej

Koszty strat u dystrybutorów energii elektrycznej związane są przede wszystkim z usuwaniem awarii oraz utratą zysku z powodu niedostarczenia do odbiorców energii elektrycznej. Koszty te, wraz z kosztami eksploatacyjnymi, zmniejszają zysk przedsiębiorstwa.

Koszty usuwania awarii są sumą co najmniej kilku składników. Są to przede wszystkim koszty:

- zakupu nowych urządzeń i materiałów, mających zastąpić uszkodzone elementy sieci dystrybucyjnych;
- pracy sprzętu budowlanego, laboratorium kablowego, itp.;
- pracy monterów i innych osób biorących udział w usuwaniu awarii (koszty robocizny);
- dojazdu do miejsca awarii samochodów pogotowia energetycznego oraz sprzętu budowlanego.

<sup>1)</sup> a.chojnacki@tu.kielce.pl, zswierczew@zeork.com.pl

Koszt zakupu nowych urządzeń i materiałów jest bardzo zróżnicowany. Jego wartość zależy bowiem od rozległości awarii oraz urządzenia, jakie uległo uszkodzeniu. W przypadku uszkodzenia wiązań, zacisków, mostków lub innych drobnych elementów stacji, koszty są niewielkie. Nieco większe są koszty zakupu urządzeń takich, jak izolatory, odgromniki, podstawy bezpiecznikowe, baterie kondensatorów, itp. Największym kosztem zakupu charakteryzują się takie urządzenia, jak transformatory, łączniki czy szyny zbiorcze. W celu ograniczenia kosztów awarii, najdroższe urządzenia bardzo często nie są wymieniane w całości, lecz naprawiane, o ile jest to możliwe. Dlatego też nie zawsze koszt ten jest równy cenie rynkowej nowego urządzenia. Ponadto spółki dystrybucyjne często przechowują w magazynach stare urządzenia, które uległy uszkodzeniu, a następnie zostały poddane kapitalnym remontom w odpowiednich fabrykach lub zregenerowane we własnym zakresie. Wykorzystanie takiego urządzenia także wpływa na obniżenie kosztów materiałowych awarii.

Koszty pracy sprzętu wynikają z tego, iż podczas lokalizacji awarii lub bezpośrednio w fazie jej usuwania wykorzystywany jest specjalistyczny sprzęt budowlany lub elektroenergetyczny. Do lokalizacji zwarcia w sieciach napowietrznych oraz kablowych wykorzystywane są specjalistyczne laboratoria kablowe pozwalające z dokładnością do kilku metrów ustalić miejsce zwarcia czy też nieciągłości. Niezależnie od tego, czy wykorzystywane jest laboratorium kablowe, zawsze na miejsce awarii musi dojechać grupa monterów spółki dystrybucyjnej. Pociąga to za sobą koszty przejazdu samochodu pogotowia.

Podczas usuwania awarii także wykorzystywane są specjalistyczne urządzenia, takie jak: dźwigi, koparki, żyzki, wiertnice, dłużyce i inne. Koszt pracy każdego z tych urządzeń zwiększa łączne koszty pracy sprzętu.

Usuwanie awarii w układach elektroenergetycznych związane jest ze znacznymi nakładami pracy ludzkiej. Praca ta wynika zarówno z konieczności obsługi sprzętu specjalistycznego, jak i wielu prac wykonywanych ręcznie lub jedynie przy użyciu prostych narzędzi monterskich. Praca osób usuwających awarie wiąże się z wynagrodzeniem, jakie należy im zapewnić. Koszty pracy są tym większe, im dłuższy jest czas usuwania awarii oraz im więcej osób pracuje.

W wyniku awarii urządzeń elektroenergetycznych, odbiorcy nie otrzymują energii elektrycznej. Skutkiem tego jest utrata zysku przez przedsiębiorstwa dystrybucyjne. Koszty utraconego zysku można wyznaczyć na podstawie zależności:

$$K_{uz} = k_{juz} \cdot \Delta A \quad (1)$$

gdzie:

- $k_{juz}$  – jednostkowy wskaźnik utraty zysku (wynoszący w rozważanej spółce dystrybucyjnej  $k_{juz} = 60$  PLN / MWh,
- $\Delta A$  – wartość energii elektrycznej niedostarczonej do odbiorców w wyniku awarii, określona na podstawie wykresu obciążeń mocą czynną  $P = f(t)$  w danej sieci.

Ostatecznie więc, łączny koszt awarii można wyznaczyć ze wzoru:

$$K_{aw} = K_{miu} + K_{sprz} + K_{pm} + K_d + K_{uz} \quad (2)$$

gdzie:

- $K_a$  – koszt awarii,
- $K_{miu}$  – koszt zakupu nowych materiałów i urządzeń,
- $K_{sprz}$  – koszt pracy sprzętu,
- $K_{pm}$  – koszt pracy monterów,
- $K_d$  – koszt dojazdu pogotowia oraz sprzętu budowlanego do miejsca awarii,
- $K_{uz}$  – koszt utraconego zysku.

W przeprowadzonej analizie autorzy wykorzystali dane dotyczące miejscowej spółki dystrybucyjnej, w której obowiązują następujące stawki:

- koszt pracy laboratorium kablowego:
  - przejazd 3,38 PLN/km;
  - roboczogodzina pracy laboratorium kablowego 69,40 PLN/h;
- koszt pracy samochodu ciężarowego:
  - przejazd 2,39 PLN/km;
- koszt pracy samochodu specjalnego (pogotowie energetyczne, samochód brygady: lekki, średni i ciężki):
  - przejazd: 1,37 PLN/km;
- koszt pracy sprzętu specjalnego (dźwigi, podnośniki, dłużyce, koparki, wiertnice):
  - roboczogodzina pracy sprzętu: 71,02 PLN/h;
- koszt pracy pracownika:
  - roboczogodzina pracownika 35,60 PLN/h.

W dalszej części artykułu przedstawione zostaną wyniki szczegółowej analizy statystycznej kosztów występujących w zależności (2).

## Koszty zakupu nowych materiałów i urządzeń

Na podstawie danych empirycznych wyznaczone zostały parametry statystyczne charakteryzujące koszty zakupu nowych urządzeń  $K_{miu}$  w przypadku awarii w stacji eksploatowanej w sieciach miejskich:

- wartość średnia kosztów:
 
$$\bar{K}_{miu} = 2370,43 \text{ PLN}$$
- odchylenie standardowe:
 
$$s = 6248,94 \text{ PLN}$$
- przedział ufności dla średniej:
 
$$2098,30 \text{ PLN} < \bar{K}_{miu} < 2642,57 \text{ PLN}$$
- wartość minimalna:
 
$$K_{miu \min} = 1,31 \text{ PLN}$$
- wartość maksymalna:
 
$$K_{miu \max} = 40478,14 \text{ PLN.}$$

Podjęto próbę dopasowania teoretycznej funkcji gęstości prawdopodobieństwa kosztów zakupu nowych urządzeń i materiałów do rozkładu empirycznego. Rozważone zostały rozkłady prawdopodobieństwa, takie jak: normalny, wykładniczy, logarytmiczno-normalny oraz Weibulla. Postawione hipotezy testowane były za pomocą testów  $\lambda$  Kołmogorowa i  $\chi^2$  Pearsona. Wynik przeprowadzonej weryfikacji był negatywny. Należało odrzucić hipotezę, iż gęstość prawdopodobieństwa można w tym przypadku przedstawić za pomocą któregoś z wymienionych rozkładów. Po dokładnej analizie autorzy wydzielili dwie frakcje kosztów. Pierwsza frakcja obejmuje awarie o kosztach zakupu nowych urządzeń i materiałów stosunkowo niewielkich. Autorzy przyjęli tu

zakres kosztów od 0 do 5000 PLN. Są to koszty charakterystyczne dla niewielkich awarii, wymagających w celu ich usunięcia tanich materiałów i urządzeń (wiązałki, mostki, bezpieczniki, izolatory, odgromniki, itp.). Druga frakcja obejmuje awarie związane z dużymi kosztami zakupu urządzeń i materiałów. Są to zazwyczaj awarie wymuszające zakup drogich urządzeń, jak transformatory, czy łączniki. Do tej frakcji autorzy zaliczyli awarie, w których koszty te wynoszą powyżej 5000 PLN.

Na podstawie danych empirycznych, została założona hipoteza, iż rozkład teoretyczny gęstości prawdopodobieństwa kosztów zakupu urządzeń i materiałów w przypadku awarii stacji wewnętrznych SN jest superpozycją dwóch rozkładów logarytmiczno-normalnych o postaci:

$$f(K_{miu}) = \mu_1 \cdot f_1(K_{miu}) + \mu_2 \cdot f_2(K_{miu}) \quad (3)$$

gdzie:

$\mu_1, \mu_2$  – udziały awarii w poszczególnych frakcjach, wyrażone zależnościami:

$$\mu_1 = \frac{l_1}{l} \quad (4)$$

oraz

$$\mu_2 = \frac{l_2}{l} \quad (5)$$

$l_1$  – liczba awarii, w których koszt zakupu nowych urządzeń i materiałów nie przekroczył 5000 PLN,  $l_2$  – liczba awarii, w których koszt zakupu nowych urządzeń i materiałów przekroczył 5000 PLN,  $l$  – liczba wszystkich awarii,  $f_1(K_{miu}), f_2(K_{miu})$  – logarytmiczno-normalne rozkłady gęstości prawdopodobieństwa frakcji pierwszej i drugiej, wyrażone zależnościami:

$$f_1(K_{miu}) = \frac{\log e}{K_{miu} \cdot \sigma_1 \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \exp \left[ -\frac{(\log K_{miu} - m_1)^2}{2 \cdot \sigma_1^2} \right] \quad (6)$$

oraz

$$f_2(K_{miu}) = \frac{\log e}{K_{miu} \cdot \sigma_2 \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \exp \left[ -\frac{(\log K_{miu} - m_2)^2}{2 \cdot \sigma_2^2} \right] \quad (7)$$

$\sigma_1, \sigma_2$  - odchylenie standardowe zmiennej losowej  $\log K_{miu}$  dla frakcji 1 i 2,  $m_1, m_2$  – wartość oczekiwana zmiennej losowej  $\log K_{miu}$  dla frakcji 1 i 2.

Na podstawie analizy przebiegu empirycznego funkcji  $f(K_{miu})$  wyznaczone zostały następujące wartości liczebności poszczególnych frakcji:  $l_1 = 1849$ ,  $l_2 = 179$  oraz  $l = 2028$ .

Obliczone zostały udziały awarii w poszczególnych frakcjach:

$$\mu_1 = \frac{1849}{2028} = 0,91$$

oraz

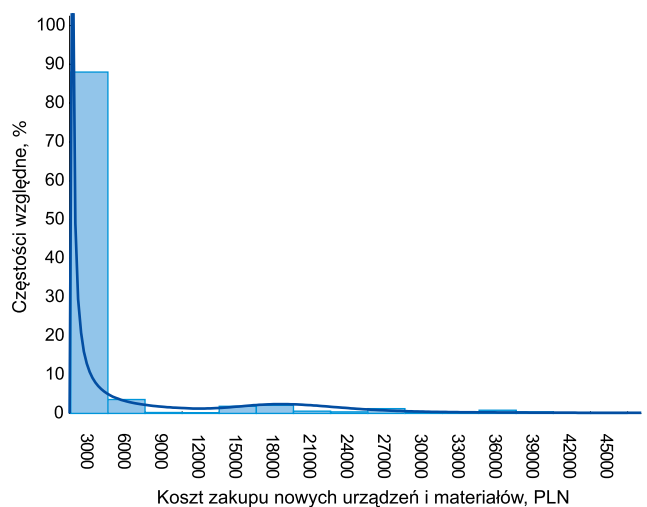
$$\mu_2 = \frac{179}{2028} = 0,09$$

Wyznaczone z wykorzystaniem pakietu Statistica wartości parametrów rozkładów (6) oraz (7) wynoszą  $m_1 = 5,6136$ ,  $\sigma_1 = 2,0138$  oraz  $m_2 = 9,8135$ ,  $\sigma_2 = 0,4730$ .

Po podstawieniu wyznaczonych wartości do zależności (3) teoretyczna funkcja gęstości prawdopodobieństwa przyjmuje postać:

$$f(K_{miu}) = \frac{0,0783}{K_{miu}} \cdot \exp \left[ -\frac{(\log K_{miu} - 5,6136)^2}{8,1108} \right] + \frac{0,0330}{K_{miu}} \cdot \exp \left[ -\frac{(\log K_{miu} - 9,8135)^2}{0,4475} \right] \quad (8)$$

Przebieg empiryczny i teoretyczny funkcji gęstości prawdopodobieństwa kosztów zakupu nowych urządzeń i materiałów, a także wyniki weryfikacji hipotezy o rozkładzie przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Przebieg empiryczny i teoretyczny funkcji gęstości prawdopodobieństwa kosztów zakupu nowych urządzeń i materiałów w przypadku awarii stacji eksploatowanych w terenach miejskich ( $\chi^2 = 4,44 < \chi_{\alpha}^2 = 5,89$ ;  $\lambda = 1,274 < \lambda_{\alpha} = 1,358$ )

Na podstawie danych empirycznych wyznaczone zostały parametry statystyczne charakteryzujące koszty zakupu nowych urządzeń  $K_{miu}$  w przypadku awarii w stacji eksploatowanej w sieciach terenowych:

- wartość średnia kosztów:  
 $\bar{K}_{miu} = 5442,14$  PLN
- odchylenie standardowe:  
 $s = 7612,96$  PLN
- przedział ufności dla średniej:  
 $5033,39$  PLN  $< \bar{K}_{miu} < 5850,89$  PLN
- wartość minimalna:  
 $K_{miu \min} = 1,35$  PLN
- wartość maksymalna:  
 $K_{miu \max} = 38484,38$  PLN.

Podjęto próbę dopasowania teoretycznej funkcji gęstości prawdopodobieństwa kosztów zakupu nowych urządzeń i materiałów, do rozkładu empirycznego. Wyniki przeprowadzonych weryfikacji były negatywne. Należało odrzucić hipotezę, iż gęstość prawdopodobieństwa można w tym przypadku przedstawić

za pomocą któregoś z klasycznych rozkładów. Po dokładnej analizie, również w tym przypadku autorzy wydzielili dwie frakcje kosztów. Pierwsza frakcja obejmuje awarie o kosztach zakupu nowych urządzeń i materiałów stosunkowo niewielkich, tj. od 0 do 1000 PLN. Druga frakcja obejmuje awarie związane z dużymi kosztami zakupu urządzeń i materiałów. Do tej frakcji autorzy zaliczyli awarie, których koszty usuwania wynoszą powyżej 1000 PLN.

Na podstawie danych empirycznych, została założona hipoteza, iż rozkład teoretyczny gęstości prawdopodobieństwa kosztów zakupu nowych urządzeń oraz materiałów w przypadku awarii stacji napowietrznych SN jest superpozycją dwóch rozkładów Weibulla o postaci (3), przy czym:  $f_1(K_{miu})$ ,  $f_2(K_{miu})$  – rozkłady Weibulla gęstości prawdopodobieństwa frakcji pierwszej i drugiej, wyrażone zależnościami:

$$f_1(K_{miu}) = \frac{c_1}{b_1} \cdot \left( \frac{K_{miu} - \rho_1}{b_1} \right)^{c_1-1} \cdot \exp \left[ - \left( \frac{K_{miu} - \rho_1}{b_1} \right)^{c_1} \right] \quad (9)$$

$$f_2(K_{miu}) = \frac{c_2}{b_2} \cdot \left( \frac{K_{miu} - \rho_2}{b_2} \right)^{c_2-1} \cdot \exp \left[ - \left( \frac{K_{miu} - \rho_2}{b_2} \right)^{c_2} \right] \quad (10)$$

gdzie:

- $b_1, b_2$  – parametry skali,
- $c_1, c_2$  – parametry kształtu,
- $\rho_1, \rho_2$  – parametry położenia.

Na podstawie analizy przebiegu empirycznego funkcji  $f(K_{miu})$  wyznaczone zostały następujące wartości liczebności poszczególnych frakcji:  $l_1 = 843$ ,  $l_2 = 492$  oraz  $l = 1335$ . Na ich podstawie obliczone zostały udziały awarii w poszczególnych frakcjach:

$$\mu_1 = \frac{843}{1335} = 0,63$$

oraz

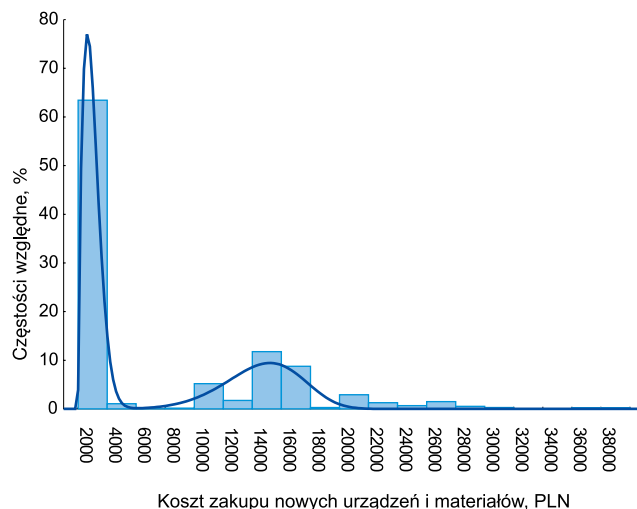
$$\mu_2 = \frac{492}{1335} = 0,37$$

Wyznaczone z wykorzystaniem pakietu Statistica wartości parametrów rozkładów (9) oraz (10) wynoszą  $b_1 = 1087,54$ ,  $c_1 = 1,71$ ,  $\rho_1 = 0$  oraz  $b_2 = 13702,39$ ,  $c_2 = 5,51$ ,  $\rho_2 = 0$ .

Po podstawieniu wyznaczonych wartości do zależności (3) teoretyczna funkcja gęstości prawdopodobieństwa kosztów zakupu urządzeń i materiałów w celu usunięcia awarii w stacjach wiejskich przyjmuje postać:

$$f(K_{miu}) = 6,92 \cdot 10^{-6} \cdot K_{miu}^{0,71} \cdot \exp \left[ - \frac{K_{miu}^{1,71}}{155711,74} \right] + 3,28 \cdot 10^{-23} \cdot K_{miu}^{4,51} \cdot \exp \left[ - \frac{K_{miu}^{5,51}}{6,22 \cdot 10^{22}} \right] \quad (11)$$

Przebieg empiryczny i teoretyczny funkcji gęstości prawdopodobieństwa kosztów zakupu nowych urządzeń i materiałów, a także wyniki weryfikacji hipotezy o rozkładzie przedstawia rysunek 2.



Rys. 2. Przebieg empiryczny i teoretyczny funkcji gęstości prawdopodobieństwa kosztów zakupu nowych urządzeń i materiałów w przypadku awarii stacji eksploatowanych w terenach wiejskich ( $\chi^2 = 6,98 < \chi_{\alpha}^2 = 8,67$ ;  $\lambda = 1,326 < \lambda_{\alpha} = 1,358$ )

## Koszty pracy sprzętu

Na podstawie danych empirycznych z eksploatacji stacji, wyznaczone zostały parametry statystyczne charakteryzujące koszty pracy sprzętu w przypadku usuwania awarii urządzeń eksploatowanych w stacjach miejskich:

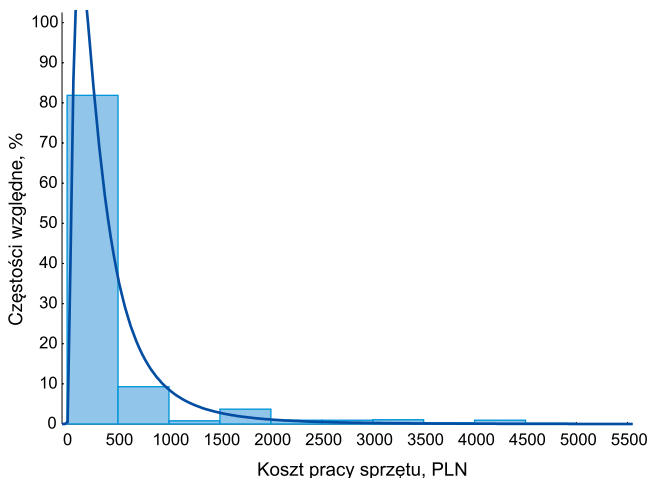
- wartość średnia kosztów:  
 $\bar{K}_{sprz} = 473,63$  PLN
- odchylenie standardowe:  
 $s = 697,06$  PLN
- przedział ufności dla średniej:  
 $443,28$  PLN  $< \bar{K}_{sprz} < 503,99$  PLN
- wartość minimalna:  
 $K_{sprz\ min} = 4,39$  PLN
- wartość maksymalna:  
 $K_{sprz\ max} = 4654,14$  PLN.

Na podstawie danych empirycznych została założona hipoteza o logarytmiczno- normalnym rozkładzie wartości kosztów pracy sprzętu dla przypadku awarii w stacjach miejskich SN. Wyznaczone wartości parametrów rozkładu wynoszą  $m = 5,6619$  oraz  $\sigma = 0,9528$ .

Przebieg empiryczny i teoretyczny funkcji gęstości prawdopodobieństwa kosztów pracy sprzętu w przypadku awarii stacji miejskich, a także wyniki weryfikacji hipotezy o rozkładzie przedstawia rysunek 3.

Na podstawie danych empirycznych wyznaczone zostały parametry statystyczne charakteryzujące koszty pracy sprzętu w przypadku awarii urządzeń eksploatowanych w stacjach terenowych:

- wartość średnia kosztów:  
 $\bar{K}_{sprz} = 952,79$  PLN
- odchylenie standardowe:  
 $s = 1094,41$  PLN
- przedział ufności dla średniej:  
 $894,03$  PLN  $< \bar{K}_{sprz} < 1011,55$  PLN
- wartość minimalna:  
 $K_{sprz\ min} = 48,22$  PLN
- wartość maksymalna:  
 $K_{sprz\ max} = 5029,87$  PLN.



Rys. 3. Przebieg empiryczny i teoretyczny funkcji gęstości prawdopodobieństwa kosztów pracy sprzętu dla przypadku usuwania awarii w stacjach wewnątrzowych ( $\chi^2 = 5,63 < \chi^2_{\alpha} = 5,89$ ;  $\lambda = 1,188 < \lambda_{\alpha} = 1,358$ )

Na podstawie danych empirycznych, została założona hipoteza, iż rozkład teoretyczny gęstości prawdopodobieństwa wartości kosztów pracy sprzętu w przypadku awarii stacji słupowych jest superpozycją dwóch rozkładów normalnych o postaci:

$$f(K_{sprz}) = \mu_1 \cdot f_1(K_{sprz}) + \mu_2 \cdot f_2(K_{sprz}) \quad (12)$$

Udziały awarii w poszczególnych frakcjach  $\mu_1, \mu_2$ , wyrażone są zależnościami (4) oraz (5), przy czym  $l_1$  jest liczbą awarii, w których koszt pracy sprzętu nie przekroczył 500 PLN, natomiast  $l_2$  jest liczbą awarii, w których koszt ten jest większy od 500 PLN.

Funkcje  $f_1(K_{sprz}), f_2(K_{sprz})$  są normalnymi rozkładami gęstości prawdopodobieństwa frakcji pierwszej i drugiej, wyrażonymi zależnościami:

$$f_1(K_{sprz}) = \frac{1}{\sigma_1 \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \exp\left[-\frac{(K_{sprz} - m_1)^2}{2 \cdot \sigma_1^2}\right] \quad (13)$$

$$f_2(K_{sprz}) = \frac{1}{\sigma_2 \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \exp\left[-\frac{(K_{sprz} - m_2)^2}{2 \cdot \sigma_2^2}\right] \quad (14)$$

gdzie:

$\sigma_1, \sigma_2$  – odchylenie standardowe zmiennej losowej  $K_{sprz}$  dla frakcji 1 i 2,

$m_1, m_2$  – wartość oczekiwana zmiennej losowej  $K_{sprz}$  dla frakcji 1 i 2.

Na podstawie analizy przebiegu empirycznego funkcji  $f(K_{sprz})$  wyznaczone zostały następujące wartości liczebności poszczególnych frakcji:  $l_1 = 846, l_2 = 489$  oraz  $l = 1335$ .

Obliczone zostały udziały awarii w poszczególnych frakcjach:

$$\mu_1 = \frac{846}{1335} = 0,63$$

oraz

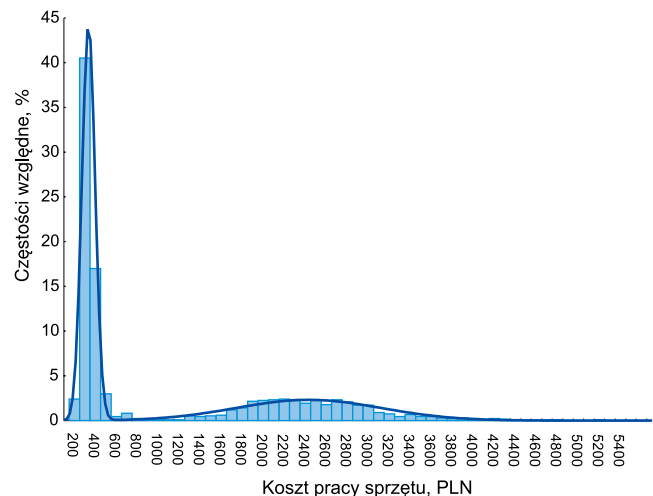
$$\mu_2 = \frac{489}{1335} = 0,37$$

Wyznaczone z wykorzystaniem pakietu Statistica wartości parametrów rozkładów (13) oraz (14) wynoszą  $m_1 = 185,2710, \sigma_1 = 7,9253$ , a także  $m_2 = 2280,6518, \sigma_2 = 26,3105$ .

Po podstawieniu wyznaczonych wartości do zależności (12) teoretyczna funkcja gęstości prawdopodobieństwa przyjmuje postać:

$$f(K_{sprz}) = 0,0317 \cdot \exp\left[-\frac{(K_{sprz} - 185,2710)^2}{125,6208}\right] + 0,0056 \cdot \exp\left[-\frac{(K_{sprz} - 2280,6518)^2}{1384,4848}\right] \quad (15)$$

Przebieg empiryczny i teoretyczny funkcji gęstości prawdopodobieństwa kosztów pracy sprzętu, a także wyniki weryfikacji hipotezy o rozkładzie przedstawia rysunek 4.



Rys. 4. Przebieg empiryczny i teoretyczny funkcji gęstości prawdopodobieństwa kosztów pracy sprzętu w przypadku usuwania awarii w stacjach eksploatowanych w terenach wiejskich ( $\chi^2 = 16,58 < \chi^2_{\alpha} = 28,1$ ;  $\lambda = 1,028 < \lambda_{\alpha} = 1,358$ )

## Koszty pracy monterów

Na podstawie danych empirycznych wyznaczone zostały parametry statystyczne charakteryzujące koszty pracy monterów i innych osób przy usuwaniu awarii w stacjach eksploatowanych w sieciach miejskich:

- wartość średnia kosztów:  
 $\bar{K}_{pm} = 848,09$  PLN
- odchylenie standardowe:  
 $s = 854,55$  PLN
- przedział ufności dla średniej:  
 $810,87$  PLN  $< \bar{K}_{pm} < 885,32$  PLN
- wartość minimalna:  
 $K_{pm \min} = 2,59$  PLN
- wartość maksymalna:  
 $K_{pm \max} = 9826,95$  PLN.

Na podstawie danych empirycznych, została założona hipoteza o wykładniczym rozkładzie kosztów pracy monterów dla przypadku usuwania awarii w stacjach miejskich SN. Funkcja gęstości prawdopodobieństwa rozkładu wykładniczego określona jest zależnością:

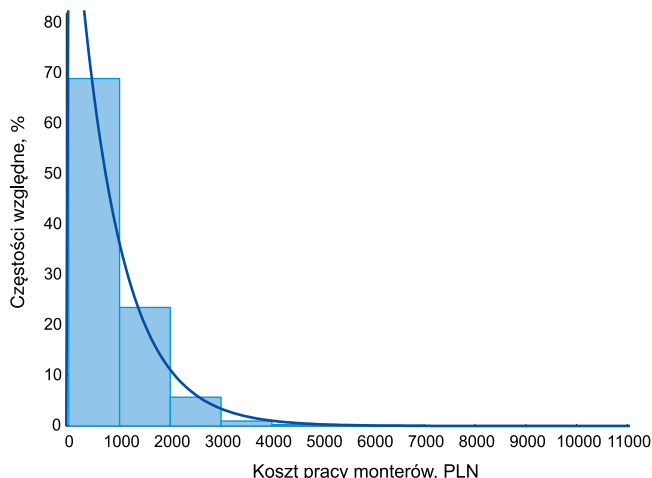
$$f(K_{pm}) = \lambda \cdot e^{-\lambda K_{pm}} \quad (16)$$

Wartość współczynnika  $\lambda$  jest w tym przypadku równa odwrotności wartości oczekiwanej z próby:

$$\lambda = \frac{1}{\bar{K}_{pm}} \quad (17)$$

Wyznaczona wartość parametru rozkładu  $\lambda = 0,0012$ .

Przebieg empiryczny i teoretyczny funkcji gęstości prawdopodobieństwa kosztów pracy monterów w przypadku usuwania awarii w stacjach miejskich, a także wyniki weryfikacji hipotezy o rozkładzie przedstawia rysunek 5.



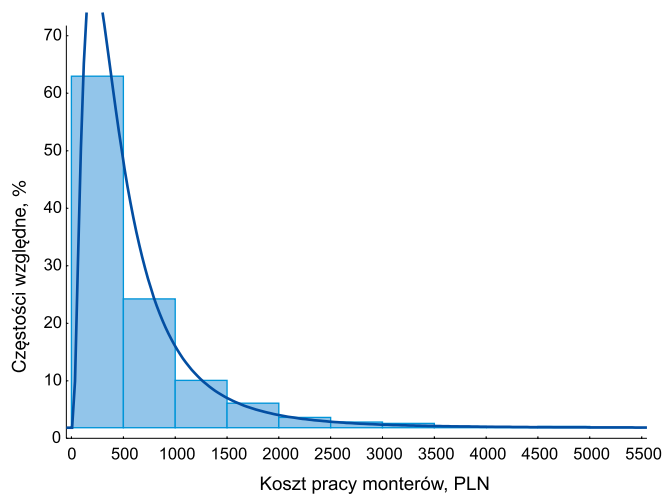
Rys. 5. Przebieg empiryczny i teoretyczny funkcji gęstości prawdopodobieństwa kosztów pracy monterów dla przypadku usuwania awarii w stacjach wewnętrznych ( $\chi^2 = 2,53 < \chi^2_{\alpha} = 3,33$ ;  $\lambda = 0,826 < \lambda_{\alpha} = 1,358$ )

Na podstawie danych empirycznych wyznaczone zostały parametry statystyczne charakteryzujące koszty pracy monterów i innych osób przy usuwaniu awarii w stacjach eksploatowanych w sieciach terenowych:

- wartość średnia kosztów:  
 $\bar{K}_{pm} = 611,07$  PLN
- odchylenie standardowe:  
 $s = 607,21$  PLN
- przedział ufności dla średniej:  
 $578,47$  PLN  $< \bar{K}_{pm} < 643,67$  PLN
- wartość minimalna:  
 $K_{pm\ min} = 17,11$  PLN
- wartość maksymalna:  
 $K_{pm\ max} = 4976,64$  PLN.

Na podstawie danych empirycznych została założona hipoteza o logarymiczno-normalnym rozkładzie wartości kosztów pracy monterów dla przypadku usuwania awarii w stacjach terenowych SN. Wyznaczone wartości parametrów rozkładu wynoszą  $m = 6,0549$  oraz  $\rho = 0,8442$ .

Przebieg empiryczny i teoretyczny funkcji gęstości prawdopodobieństwa kosztów pracy monterów w przypadku usuwania awarii w stacjach terenowych, a także wyniki weryfikacji hipotezy o rozkładzie przedstawia rysunek 6.



Rys. 6. Przebieg empiryczny i teoretyczny funkcji gęstości prawdopodobieństwa kosztów pracy monterów dla przypadku usuwania awarii w stacjach napowietrznych SN ( $\chi^2 = 1,98 < \chi^2_{\alpha} = 3,33$ ;  $\lambda = 1,327 < \lambda_{\alpha} = 1,358$ )

### Koszty dojazdu do miejsca awarii

Na podstawie danych empirycznych z eksploatacji stacji wyznaczone zostały parametry statystyczne charakteryzujące koszty dojazdu do miejsca awarii w stacjach miejskich:

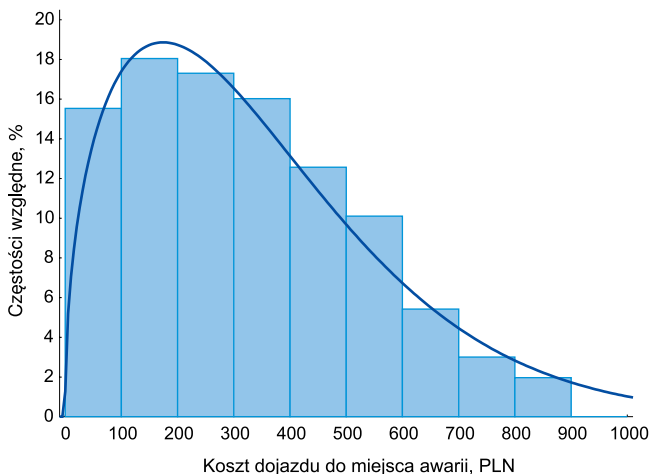
- wartość średnia kosztów:  
 $\bar{K}_d = 320,25$  PLN
- odchylenie standardowe:  
 $s = 206,45$  PLN
- przedział ufności dla średniej:  
 $311,26$  PLN  $< \bar{K}_d < 329,24$  PLN
- wartość minimalna:  
 $K_{d\ min} = 2,09$  PLN
- wartość maksymalna:  
 $K_{d\ max} = 898,40$  PLN.

Na podstawie danych empirycznych, została założona hipoteza o rozkładzie Weibulla gęstości prawdopodobieństwa kosztów dojazdu do miejsca awarii w stacjach miejskich SN/nN. Wyznaczone z wykorzystaniem pakietu Statistica wartości parametrów rozkładu wynoszą  $b = 384,73$ ,  $c = 1,46$  oraz  $\rho = 0$ .

Przebieg empiryczny i teoretyczny funkcji gęstości prawdopodobieństwa wartości kosztów dojazdu do miejsca awarii w stacjach miejskich, a także wyniki weryfikacji hipotezy o rozkładzie przedstawia rysunek 7.

Wyznaczone zostały także parametry statystyczne charakteryzujące koszty dojazdu do miejsca awarii w stacjach terenowych:

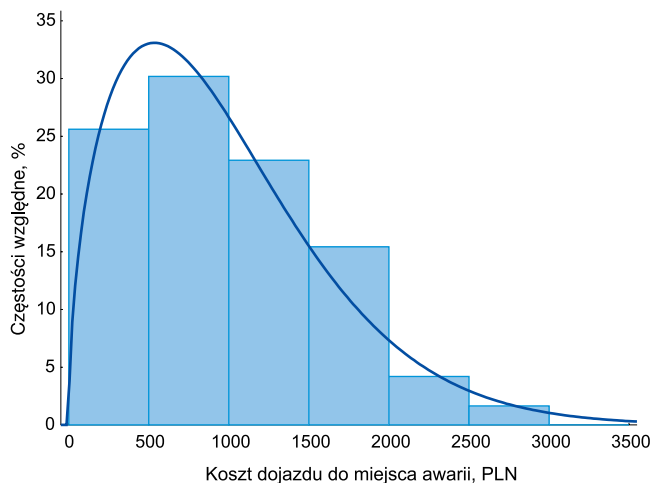
- wartość średnia kosztów:  
 $\bar{K}_d = 985,16$  PLN
- odchylenie standardowe:  
 $s = 621,53$  PLN
- przedział ufności dla średniej:  
 $951,79$  PLN  $< \bar{K}_d < 1018,53$  PLN
- wartość minimalna:  
 $K_{d\ min} = 2,91$  PLN
- wartość maksymalna:  
 $K_{d\ max} = 2944,47$  PLN.



Rys. 7. Przebieg empiryczny i teoretyczny funkcji gęstości prawdopodobieństwa kosztów dojazdu do miejsca awarii w stacjach wewnętrznych  
 $(\chi^2 = 2,67 < \chi^2_{\alpha} = 2,73; \lambda = 1,353 < \lambda_{\alpha} = 1,358)$

Na podstawie danych empirycznych została założona hipoteza o rozkładzie Weibulla gęstości prawdopodobieństwa kosztów dojazdu do miejsca awarii w stacjach terenowych SN. Wyznaczone z wykorzystaniem pakietu Statistica wartości parametrów rozkładu wynoszą  $b = 1084,87$ ,  $c = 1,52$  oraz  $\rho = 0$ .

Przebieg empiryczny i teoretyczny funkcji gęstości prawdopodobieństwa kosztów dojazdu do miejsca awarii w stacjach terenowych, a także wyniki weryfikacji hipotezy o rozkładzie przedstawia rysunek 8.



Rys. 8. Przebieg empiryczny i teoretyczny funkcji gęstości prawdopodobieństwa kosztów dojazdu do miejsca awarii w stacjach napowietrznych SN/nN  
 $(\chi^2 = 0,96 < \chi^2_{\alpha} = 1,15; \lambda = 1,072 < \lambda_{\alpha} = 1,358)$

## Koszty utraconego zysku

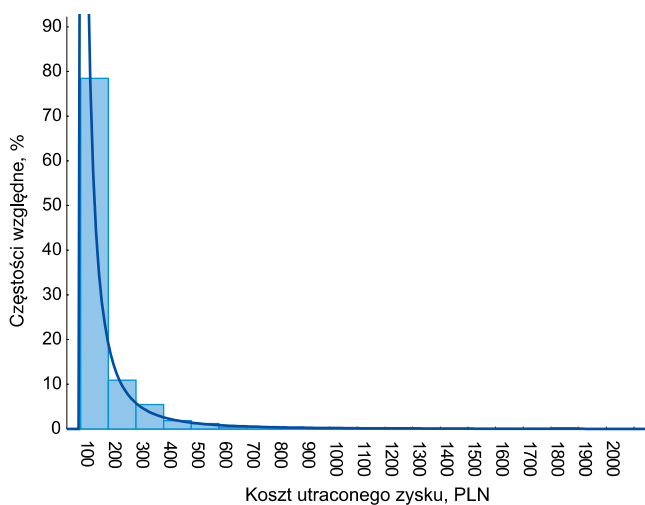
Na podstawie danych empirycznych dotyczących wartości niedostarczonej do odbiorców energii, wyznaczone zostały parametry statystyczne charakteryzujące koszty utraconego zysku w wyniku awarii stacji eksploatowanych w sieciach miejskich:

- wartość średnia kosztów:  
 $\bar{K}_{uz} = 82,21$  PLN
- odchylenie standardowe:  
 $s = 166,85$  PLN

- przedział ufności dla średniej:  
 $72,96$  PLN  $< \bar{K}_{uz} < 91,46$  PLN
- wartość minimalna:  
 $K_{uz\ min} = 0,60$  PLN
- wartość maksymalna:  
 $K_{uz\ max} = 1948,20$  PLN.

Na podstawie danych empirycznych, została założona hipoteza o logarymiczno- normalnym rozkładzie kosztów utraconego zysku dla przypadku awarii w stacjach miejskich SN. Wyznaczone wartości parametrów rozkładu wynoszą  $m = 3,3678$  oraz  $\rho = 1,4813$ .

Przebieg empiryczny i teoretyczny funkcji gęstości prawdopodobieństwa kosztów utraconego zysku w przypadku awarii stacji miejskich, a także wyniki weryfikacji hipotezy o rozkładzie przedstawia rysunek 9.



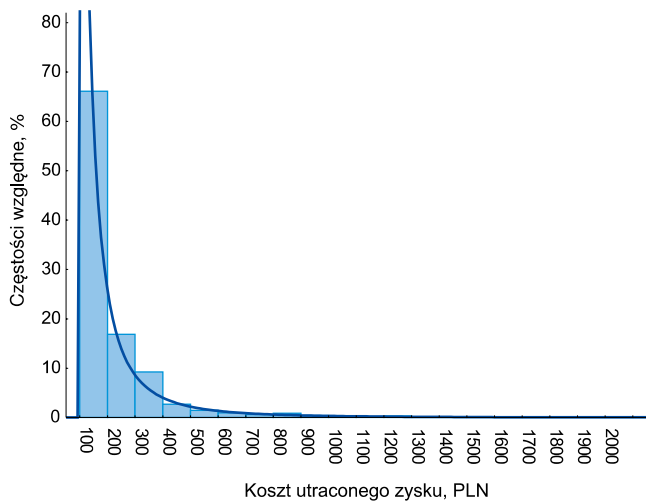
Rys. 9. Przebieg empiryczny i teoretyczny funkcji gęstości prawdopodobieństwa kosztów utraconego zysku dla przypadku awarii stacji wewnętrznych SN/nN  
 $(\chi^2 = 4,31 < \chi^2_{\alpha} = 9,39; \lambda = 1,163 < \lambda_{\alpha} = 1,358)$

Na podstawie danych empirycznych, wyznaczone zostały parametry statystyczne charakteryzujące koszty utraconego zysku w wyniku awarii stacji eksploatowanych w sieciach terenowych:

- wartość średnia kosztów:  
 $\bar{K}_{uz} = 113,12$  PLN
- odchylenie standardowe:  
 $s = 174,11$  PLN
- przedział ufności dla średniej:  
 $103,64$  PLN  $< \bar{K}_{uz} < 122,60$  PLN
- wartość minimalna:  
 $K_{uz\ min} = 1,20$  PLN
- wartość maksymalna:  
 $K_{uz\ max} = 1902,00$  PLN.

Na podstawie danych empirycznych, została założona hipoteza o logarymiczno- normalnym rozkładzie kosztów utraconego zysku dla przypadku awarii w stacjach terenowych SN. Wyznaczone wartości parametrów rozkładu wynoszą  $m = 3,8941$  oraz  $\rho = 1,3493$ .

Przebieg empiryczny i teoretyczny funkcji gęstości prawdopodobieństwa kosztów utraconego zysku w przypadku awarii stacji terenowych, a także wyniki weryfikacji hipotezy o rozkładzie przedstawia rysunek 10.



Rys. 10. Przebieg empiryczny i teoretyczny funkcji gęstości prawdopodobieństwa kosztów utraconego zysku dla przypadku awarii w stacjach napowietrznych SN/nN ( $\chi^2 = 7,68 < \chi_{\alpha}^2 = 9,39$ ;  $\lambda = 1,186 < \lambda_{\alpha} = 1,358$ )

## Podsumowanie

W tabeli 1 zestawione zostały wyniki analizy statystycznej kosztów zawodności stacji transformatorowo-rozdzielczych SN/nN.

Tabela 1

Wartości średnie kosztów strat u dystrybutorów energii powstających na skutek awarii w stacjach elektroenergetycznych SN/nN

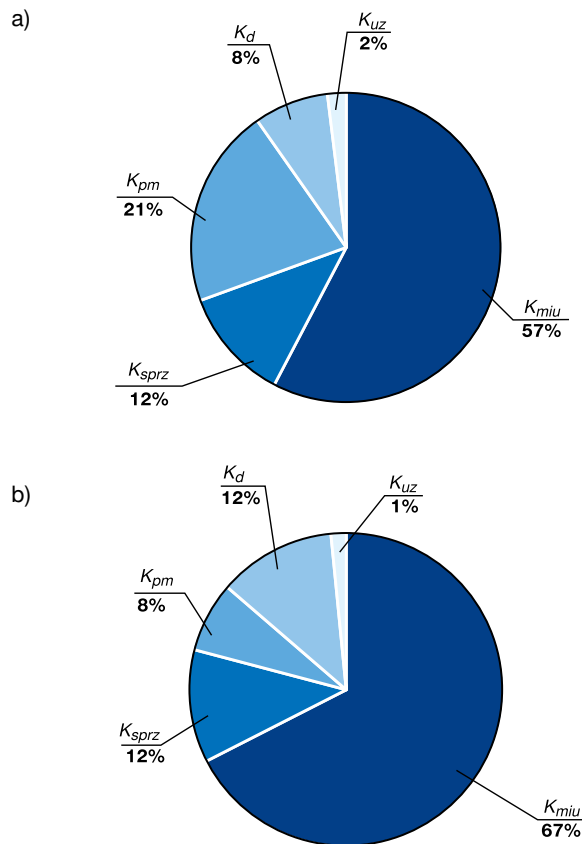
Rodzaj kosztów	Stacja miejska	Stacja terenowa
	PLN	
$K_{miu}$	2370,43	5442,14
$K_{sprz}$	473,63	952,79
$K_{pm}$	848,09	611,07
$K_d$	320,25	985,16
$K_{uz}$	82,21	113,12

Na rysunku 11 przedstawiony został procentowy udział poszczególnych składników w całkowitym koszcie awarii.

Analizując otrzymane parametry charakteryzujące koszty strat u dystrybutorów w związku z awariami w układach stacji SN/nN należy zauważyć, iż średnie koszty usuwania awarii są znacznie większe dla stacji eksploatowanych na terenach wiejskich. W stacjach tych znacznie większe w porównaniu ze stacjami miejskimi są koszty zakupu nowych materiałów i urządzeń, koszty pracy sprzętu, koszty dojazdu oraz koszty utraty zysku.

Największy udział w całkowitych kosztach ma zakup nowych materiałów i urządzeń. Udział ten wynosi około 57% w stacjach miejskich oraz 67% w stacjach terenowych. Większa wartość tego kosztu w stacjach terenowych wynika głównie z wyższych cen urządzeń napowietrznych, powszechnie eksploatowanych w sieciach terenowych, w stosunku do urządzeń w wykonaniu wewnętrznym, instalowanych w stacjach miejskich.

Koszty pracy sprzętu zarówno w stacjach miejskich, jak i terenowych stanowią 12% kosztu całkowitego. Ponieważ koszt całkowity awarii jest większy w stacjach terenowych, to również



Rys. 11. Udziały poszczególnych składników w całkowitych kosztach usuwania awarii w stacjach transformatorowo-rozdzielczych SN/nN eksploatowanych w terenach: a) miejskich oraz b) wiejskich

koszt pracy sprzętu jest tam większy. Wynika to z faktu, iż stacje terenowe są zazwyczaj stacjami słupowymi. Powoduje to, iż nawet najmniejsza awaria wymaga użycia sprzętu, jak zwykły, podnośniki, czy dźwigi.

Koszt pracy monterów jest nieco większy w stacjach miejskich. Jest to spowodowane przede wszystkim większą złożonością strukturalną stacji miejskich, co wpływa na łączny czas pracy monterów podczas usuwania awarii. Nie bez znaczenia jest także długi czas lokalizacji awarii. W sieciach terenowych, które są głównie sieciami napowietrznymi znaczną część awarii można zlokalizować „gołym okiem”. W przypadku sieci miejskich, głównie kablowych, lokalizacja wymaga bardzo często wykorzystania zaawansowanego technologicznie sprzętu pomiarowego oraz dość długiego czasu. Większe są więc także nakłady pracy monterów.

Koszt dojazdu pogotowia oraz sprzętu mechanicznego do miejsca awarii jest znacznie większy w sieciach terenowych, co spowodowane jest znaczną rozległością sieci terenowych oraz w wielu przypadkach trudnościami z dojazdem do miejsca awarii. Stacje miejskie zlokalizowane są zazwyczaj w niewielkich odległościach od siedziby spółki dystrybucyjnej oraz w miejscach publicznych charakteryzujących się łatwym dostępem.

Zarówno w sieciach terenowych, jak i miejskich najmniejszy udział mają koszty utraconego zysku. Stanowią one odpowiednio 2% kosztów awarii stacji miejskich oraz 1% kosztów awarii stacji terenowych. Mimo to średnie koszty bezwzględne są większe



w stacjach terenowych i wynoszą 113,12 PLN, przy 82,21 PLN w stacjach miejskich. Sytuacja taka ma miejsce, mimo iż w Polsce statystycznie znacznie więcej osób zasilanych jest z jednej stacji miejskiej niż terenowej. Dzieje się tak ze względu na znacznie dłuższy czas trwania przerw w zasilaniu odbiorców w terenach wiejskich, co skutkuje większą wartością niedostarczonej do odbiorców energii elektrycznej, która determinuje z kolei koszty utraconego zysku.

#### LITERATURA

- [1] Chojnacki A.Ł.: Analiza skutków gospodarczych niedostarczenia energii elektrycznej do odbiorców indywidualnych, *Wiadomości Elektrotechniczne* 2009, nr 9, s. 3-9
- [2] Dobosiewicz J.: Diagnostyka elementów układów przepływowych turbin, *Energetyka* 2003, nr 12, s. 828 – 831
- [3] Goc W., Bargiel J., Paska J., Sowa P.: Niezawodność sieci elektroenergetycznych najwyższych napięć i 110 kV – stan obecny i perspektywy, *Przegląd Elektrotechniczny* 2006, nr 9, s. 78 – 81
- [4] Grabski F., Jaźwiński J.: Funkcje o losowych argumentach w zagadnieniach niezawodności, bezpieczeństwa i logistyki, WKiŁ, Warszawa 2009
- [5] Kowalski Z.: Niezawodność zasilania odbiorców energii elektrycznej, Wydawnictwa Politechniki Łódzkiej, Łódź 1992
- [6] Kowalski Z., Stępień J.C.: Ocena skutków awarii linii kablowych 15 kV, XI Międzynarodowa Konferencja Naukowa „Aktualne Problemy w Elektroenergetyce” APE 2003, Jurata, 11–13 czerwca 2003, tom I, s. 245-250
- [7] Marzecki J.: Terenowe sieci elektroenergetyczne, Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji, Radom 2007
- [8] Paska J.: Niezawodność systemów elektroenergetycznych, Oficyna wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2005
- [9] Paska J., Parciński G.: Wskaźniki niezawodnościowe i eksploatacyjne krajowych bloków energetycznych, *Energetyka* 2001, nr 12
- [10] Sozański J.: Niezawodność i jakość pracy systemu elektroenergetycznego, WNT, Warszawa 1990
- [11] Stępień J.C.: Madej Z., Charakterystyka awarii wiejskich sieci elektroenergetycznych niskiego napięcia i kosztów ich usuwania, *Rynek Energii* 2008, nr 1, s. 38-41
- [12] Stępień J.C.: Niezawodność linii kablowych i napowietrznych 15 kV, Seminarium Naukowe PTETiS „Wybrane zagadnienia w elektrotechnice i elektronice”, Kielce-Ameliówka, 29-31 maja 2000. *Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej, seria Elektryka* nr 35, s.149-160
- [13] Stobiecki A., Awary transformatorów 15/0,4 kV w sieci elektroenergetycznej, *Energetyka* 2004, nr 2, s. 89 – 92



Ośrodek Doskonalenia Zawodowego  
Z I A D Bielsko–Biała SA  
43–316 Bielsko–Biała, Aleja Armii Krajowej 220

POLSKI KOMITET BEZPIECZEŃSTWA W ELEKTRYCE SEP  
ZIAD BIELSKO-BIAŁA SA

zapraszają na seminarium

## BEZPIECZEŃSTWO EKSPLOATACJI URZĄDZEŃ I INSTALACJI ELEKTROENERGETYCZNYCH

Bielsko-Biała, 8 kwietnia 2010 r.

Seminarium przeznaczone jest dla osób zajmujących się organizacją prac przy urządzeniach i instalacjach elektroenergetycznych oraz dla pracowników służb bhp.

#### **Program seminarium**

1. Wspomnienie o Witoldzie Wiśniewskim.  
W grudniu 2009 roku odszedł wybitny specjalista w dziedzinie bezpieczeństwa prac przy urządzeniach elektrycznych, wykładowca certyfikowany w CIOP, wychowawca wielkiej rzeszy pracowników energetyki polskiej. Wspomnienie będzie wyrazem pamięci i wdzięczności za wspólnie przeżyte chwile.
2. Uroczyste odsłonięcie tablicy pamiątkowej dla upamiętnienia Witolda Wiśniewskiego.
3. Omówienie przewidywanych zmian organizacji prac przy urządzeniach elektroenergetycznych.  
Przedstawiciele PKBwE SEP uczestniczą w pracach nad nowym rozporządzeniem w sprawie bezpieczeństwa przy urządzeniach elektroenergetycznych, mających zastąpić rozporządzenie MG z 1999 roku. Przewidywana jest dyskusja nad proponowanymi zmianami.
4. Prezentacja tymczasowych technicznych sposobów bezpiecznego przywracania zasilania stosowanych w sieci dystrybucyjnej i przesyłowej.  
Tegoroczna zima i liczne awarie elektroenergetycznych sieci zwróciły uwagę na dość szeroko stosowane w świecie tymczasowe techniki przywracania zasilania. Przewoźne agregaty i tymczasowe linie na wszystkie poziomy napięć to interesujące rozwiązania umożliwiające ograniczenie wyłączeń odbiorcom.

Bliższych informacji o seminarium udziela:

Beata Ptak – tel. 33 81 38 305, fax 33 81 38 301, e-mail: [szkolenie@ziad.bielsko.pl](mailto:szkolenie@ziad.bielsko.pl)