ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1983

Seria: ELEKTRYKA z. 85 Nr kol. 757

Zbigniew GACEK

STRATEGIA OKRESOWEJ ODNOWY IZOLACJI LINIOWEJ W WARUNKACH ZABRUDZENIOWYCH

Streszczenie. W artykule dokonano próby adaptacji i zastosowania wybranych elementów teorii odnowy do oceny uzasadnionej częstości czyszczenia izolatorów wysokiego napięcia na terenach zabrudzeniowych. Określono w tym celu podstawowe wielkości opisujące strategię grupowych wymian uprzedzających izolatorów w krajowych liniach 110 i 220 kV na terenach o niepomijalnym zanieczyszczeniu atmosfery pochodzenia przemysłowego.

1. Wprowadzenie

Jednym ze sposobów zapewnienia ciągłości pracy linii napowietrznych w rejonach o znacznym narażeniu zabrudzeniowym jest czyszczenie izolatorów. Zabieg ten należy do zakresu normalnych czynności eksploatacyjnych i wywiera korzystny, chociaż ograniczony wpływ na własności izolatorów w ich dalszej eksploatacji. Czyszczenie wykonywane jest okresowo na szczególnie narażonych odcinkach linii i połączone jest na ogół z wymianą nielicznych izolatorów uznanych za uszkodzone.

Skuteczność czyszczenia związana jest między innymi z jego częstością w zadanym przedziale czasu, zależącą od rodzaju oraz natężenia pyłów, oparów i gazów, a także od wytrzymałości (niezawodności) zastosowanej izolacji. Ze względów gospodarczych i organizacyjnych energetyka zainteresowana jest w wydłużaniu okresów między kolejnymi czyszczeniami (zabiegi dość kosztowne i przede wszystkim kłopotliwe). Może to być jednak przyczyną niedopuszczalnie częstych nieplanowych wyłączeń linii, powodujących znaczne straty odbiorców przemysłowych.

Terminy czyszczenia izolacji napowietrznej ustalane są obecnie dość arbitralnie na podstawie doświadczeń eksploatacyjnych i obserwacji wyładowań niezupełnych na powierzchni zabrudzonych izolatorów w niekorzystnych warunkach atmosferycznych [5]. Wydaje się, że wymaganą częstość czyszczenia izolatorów można wyznaczyć w oparciu o elementy teorii odnowy [4]. Zastosowana w tym celu zmodyfikowana strategia grupowych wymian uprzedzających polega na wykonywaniu jednoczesnego i okresowego czyszczenia (wymiany uprzedzającej) wszystkich izolatorów na rozpatrywanym odcinku linii, a w przypadku wcześniejszego uszkodzenia izolatorów lub osprzętu tylko na wymuszonej wymianie elementów uszkodzonych. Rozważania szczegółowe dotyczą linii napowietrznych 110 i 220 kV na terenach o niepomijalnym zanieczyszczeniu atmosfery pochodzenia przemysłowego.

2. Parametry procesu odnowy liniowej izolacji napowietrznej

Izolacja linii napowietrznych wykazuje pod względem niezawodnościowym strukturę szeregową, ponieważ przeskok na jednym łańcuchu izolatorów lub odstępie powietrznym może spowodować wyłączenie linii. Wypadkowy strumień zakłóceń zabrudzeniowych wynika z superpozycji strumieni pochodzących od wszystkich łańcuchów izolatorów, a ciąg superpozycji zmierza ze wzrostem zredukowanego czasu eksploatacji do strumienia Poissona [2, 4]. Przedziały czasu między kolejnymi zakłóceniami są niezależnymi zmiennymi losowymi o jednakowych dystrybuantach F(t), równymi czasowi poprawnej pracy układu izolacyjnego o najmniejszej wytrzymałości w określonym stanie narażenia.

W dalszych rozważaniach rozpatruje się więc tzw. prosty proces odnowy, tj. zbiór wzajemnie niezależnych zmiennych losowych w postaci uporządkowanych czasów poprawnej pracy izolacji o jednakowej dystrybuancie [2, 3]. Proces ten opisuje jednoznacznie rozkład prawdopodobieństwa łącznej liczby odnowień $N_o(t)$ w zredukowanym przedziale czasu (0,t], tj przy uwzględnieniu sezonowych okresów największego narażenia zabrudzeniowego [4]. Wielkość $N_o(t)$ jest zmienną losową, przyjmującą tylko wartości dodatnie i całkowite. Rozkład prawdopodobieństwa łącznej liczby odnowień ma na ogół postać bardzo skomplikowaną, dlatego też najczęściej wystarczy, jeśli dana jest jej wartość oczekiwana [1, 2], zwana funkcją odnowy:

$$H(t) = E\left\{N_o(t)\right\} = \sum_{k=1}^{\infty} F_k(t) = F(t) + \int_0^t H(t-\tau)dF(t)(\tau), \tag{1}$$

przy czym

$$F(t) \leqslant H(t) \leqslant \frac{F(t)}{1-F(t)} \quad \text{lub} \quad H(t) \approx F(t) \quad \text{dla} \quad F(t) \ll 1 \tag{1a}$$

oraz prawdopodobieństwo co najmniej k odnowień w przedziale czasu (0,t]

$$P\left\{N(t) \geqslant k\right\} = F_k(t), \tag{2}$$

a także gęstość odnowy:

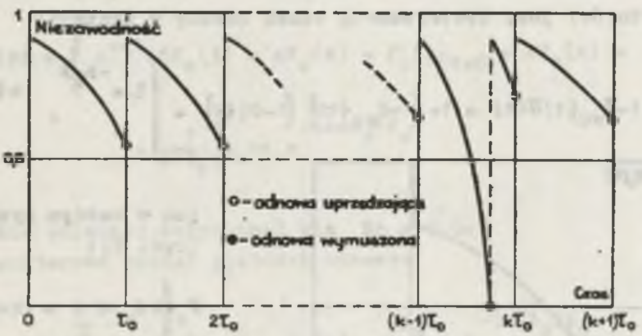
$$h(t) = \frac{dH(t)}{dt} = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{dF_k(t)}{dt} = \sum_{k=1}^{\infty} f_k(t), \tag{3}$$

gdzie:

$F_k(t)$ - dystrybuanta sumy wzajemnie niezależnych oraz o jednakowych dystrybuantach F(t) zmiennych losowych w postaci czasów między kolejnymi odnowieniami (k = 1,2,3...).

W dalszych rozważaniach, na podstawie danych z prac [4] i [5], przyjęto następujące założenia:

1. Konduktywność powierzchniowa izolatorów w trudnych warunkach środowiskowych osiąga wartość graniczną dla strefy zabrudzeniowej w krótkim przedziale czasu.
2. Koszt spowodowany nieplanową przerwą w zasilaniu odbiorców przemysłowych jest znacznie większy od kosztu czyszczenia izolatorów.
3. Czyszczenie jest rodzajem okresowej odnowy uprzedzającej, wykonywanej wtedy, gdy niezawodność zabrudzeniowa izolacji odcinka linii obniży się poniżej poziomu uznanego za wymagany (nie jest ono potrzebne, gdy niezawodność jest dostateczna).
4. Zgodnie z zasadami okresowej strategii uprzedzających wymian grupowych w praktycznie nieograniczonym przedziale czasu (rys. 1), odnowa wykonywana jest alternatywnie, gdy:
   a) od chwili ostatniego czyszczenia minął okres czasu τ_0, zwany dalej zredukowanym przedziałem odnowy, po którym intensywność zakłóceń zaczyna rosnąć (czyszczenie izolatorów na odcinku linii),
   b) nastąpiło wyłączenie linii spowodowane uszkodzeniem izolatorów lub osprzętu na skutek przeskoku zabrudzeniowego (wymiana uszkodzonych elementów).



Rys. 1. Ilustracja okresowej strategii odnowy izolacji napowietrznej

5. Każda odnowa wykonywana jest w pomijalnie krótkim okresie czasu w porównaniu z czasem eksploatacji, przy czym zarówno odnowa uprzedzająca (czyszczenie), jak i wymuszona (wymiana) stanowią odnowę czystą, nie zmieniającą rozkładu czasu między kolejnymi zakłóceniami dla elementów odnowionych [1].

6. Zredukowany czas eksploatacji między kolejnymi zakłóceniami oraz przedział odnowy wynikają z modelu sezonowej zmienności narażenia zabrudzeniowego, a strumienie zakłóceń zbliżone są wtedy do strumieni Poissona. Funkcja intensywności zakłóceń w okresie czasu większym od przedziału odnowy jest monotonicznie rosnąca, ale jej postać jest nieznana.

Zgodnie z tymi założeniami dystrybuanta czasu między kolejnymi wyłączeniami linii wskutek uszkodzeń izolatorów i osprzętu:

$$F_{wu}(t) = F_{wu}\left\{k\tau_o \leqslant t < (k+1)\tau_o\right\} = 1 - e^{-\lambda_z t}; \quad k = 0,1,2,\ldots \tag{4}$$

gdzie:

$\lambda_z = k_u Q_{SPZ}\lambda_p$ – zastępcza intensywność wyłączeń z uszkodzeniami na rozpatrywanym odcinku linii,

Q_{SPZ} – prawdopodobieństwo nieudanego zadziałania SPZ przy zakłóceniach zabrudzeniowych,

k_u – współczynnik uszkadzalności izolatorów i osprzętu (udział wyłączeń z uszkodzeniami w ogólnej liczbie wyłączeń zabrudzeniowych),

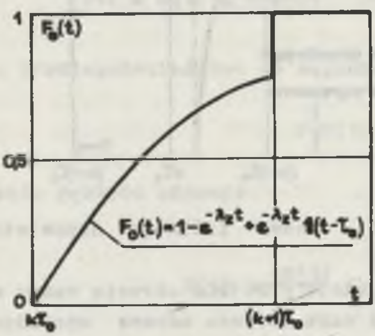
λ_p – największa sezonowa intensywność przeskoków zabrudzeniowych na odcinku linii.

Dystrybuanta czasu między kolejnymi czyszczeniami:

$$G(t) = \begin{cases} 0, & k\tau_o \leqslant t < (k+1)\tau_o \\ 1, & t \geqslant (k+1)\tau_o \end{cases} \quad (k = 0,1,2,\ldots) \tag{5}$$

Funkcja rozkładu czasu między kolejnymi odnowami (czyszczeniem lub wymianą izolatorów) jest dystrybuantą czasu odnowy w postaci:

$$F_o(t) = 1-F_{wu}(t)\bar{G}(t) = 1-\left[1-F_{wu}(t)\right]\left[1-G(t)\right] = \begin{cases} 1-e^{-\lambda_z t}, & k\tau_o \leqslant t < (k+1)\tau_o \\ 1 & t \geqslant (k+1)\tau_o \end{cases} \tag{6}$$



Rys. 2. Dystrybuanta czasu między kolejnymi odnowami izolacji napowietrznej

lub w każdym przedziale odnowy (rys. 2):

$$F_o\left\{k\tau_o \leqslant t < (k+1)\tau_o\right\} = (1-e^{-\lambda_z t})\left[\mathbb{1}(t)-\mathbb{1}(t-\tau_o)\right] - \mathbb{1}(t-\tau_o) = 1 - e^{-\lambda_z \tau_o} + e^{-\lambda_z \tau_o}\,\mathbb{1}(t-\tau_o), \quad k=0,1,2,\ldots \tag{7}$$

gdzie:

$F_{wu}(t)$ oraz $\bar{G}(t)$ – funkcje rozkładu określające prawdopodobieństwo, że w okresie $(0,t]$ nie będzie wymiany wymuszonej, ani czyszczenia,

$\mathbb{1}(t)$ oraz $\mathbb{1}(t-\tau_0)$ – funkcje jednostkowe.

Operatorowa postać tej dystrybuanty:

$$F_0(s) = \frac{1}{s}(1 - e^{-s\tau_0}) - \frac{1}{s+\lambda_z}\left[1 - e^{-(s+\lambda_z)\tau_0}\right] + \frac{1}{s}e^{-s\tau_0} =$$

$$= \frac{1}{s+\lambda_z}\left[\frac{\lambda_z}{s} + e^{-(s+\lambda_z)\tau_0}\right], \quad \text{Re } s > 0 \tag{8}$$

ponieważ transformaty Laplace'a [6] jej kolejnych składników wynoszą odpowiednio:

$$\mathcal{L}\left\{\mathbb{1}(t)\right\} = \frac{1}{s}, \quad \mathcal{L}\left\{\mathbb{1}(t-\tau_0)\right\} = \frac{1}{s}e^{-s\tau_0}, \quad \mathcal{L}\left\{e^{-\lambda_z t}\right\} = \frac{1}{s+\lambda_z}$$

i

$$\mathcal{L}\left\{e^{-\lambda_z t} f(t)\right\} = F(s+\lambda_z).$$

Gęstość prawdopodobieństwa czasu odnowy $f_0(t) = \frac{dF_0(t)}{dt}$ w postaci operatorowej:

$$f_0(s) = \int_0^\infty e^{-st}\, dF_0(t) = sF_0(s) - F_0(t)_{t=0} = sF_0(s) =$$

$$= \frac{1}{s+\lambda_z}\left[\lambda_z + s\, e^{-(s+\lambda_z)\tau_0}\right] \tag{9}$$

w półpłaszczyźnie zmiennej zespolonej dla Re $s > 0$.

Wynika stąd operatorowa postać gęstości odnowy:

$$n_0(s) = \int_0^\infty e^{-st}\, dN_0(t) = \frac{f_0(s)}{1-f_0(s)} = \frac{\frac{\lambda_z}{s} + e^{-(s+\lambda_z)\tau_0}}{1 - e^{-(s+\lambda_z)\tau_0}}, \tag{10}$$

oczekiwanej liczby odnowień:

$$E\left\{N_0(s)\right\} = \frac{1}{s}\, n_0(s) = \frac{\lambda_z}{s^2\left[1 - e^{-(s+\lambda_z)\tau_0}\right]} + \frac{e^{-(s+\lambda_z)\tau_0}}{s\left[1 - e^{-(s+\lambda_z)\tau_0}\right]} \tag{11}$$

gęstości czyszczeń izolacji:

$$n_c(s) = n_o(s) - \frac{\lambda_z}{s} = \frac{(s+\lambda_z)e^{-(s+\lambda_z)\tau_o}}{s\left[1 - e^{-(s+\lambda_z)\tau_o}\right]}, \tag{12}$$

oraz oczekiwanej liczby czyszczeń:

$$E\left\{N_c(s)\right\} = \frac{1}{s}\, n_c(s) = \frac{(s+\lambda_z)e^{-(s+\lambda_z)\tau_o}}{s^2\left[1 - e^{-(s+\lambda_z)\tau_o}\right]} = \frac{\lambda_z e^{-(s+\lambda_z)\tau_o}}{s^2\left[1 - e^{-(s+\lambda_z)\tau_o}\right]} +$$

$$+ \frac{e^{-(s+\lambda_z)\tau_o}}{s\left[1 - e^{-(s+\lambda_z)\tau_o}\right]} \tag{13}$$

W celu dokonania odwrotnej transformacji wzorów (11) i (13) rozwinięto w szereg Laurenta wyrażenie:

$$\frac{1}{1 - e^{-(s+\lambda_z)\tau_o}} = 1 + e^{-(s+\lambda_z)\tau_o} + e^{-2(s+\lambda_z)\tau_o} + \ldots = \sum_{k=0}^{\infty} e^{-(s+\lambda_z)k\tau_o} \tag{14}$$

ponieważ $\left|e^{-(s+\lambda_z)\tau_o}\right| < 1$ dla $(s+\lambda_z)\tau_o > 0$ i $\mathrm{Re}\ s > 0 (\lambda_z \tau_o > 0)$.
W zredukowanym przedziale czasu $(0,t]$ oczekiwana liczba odnowień w izolacji (czyszczeń i wymian wymuszonych łącznie):

$$E\left\{N_o(t)\right\} = \mathcal{L}^{-1}\left\{N_o(s)\right\} = \mathcal{L}^{-1}\left\{\sum_{k=0}^{\infty} \frac{\lambda_z}{s^2}\, e^{-(s+\lambda_z)k\tau_o}\right\} +$$

$$+ \mathcal{L}^{-1}\left\{\sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{s}\, e^{-(s+\lambda_z)k\tau_o}\right\} = \sum_{k=0}^{\infty} e^{-k\lambda_z \tau_o} \lambda_z (t-k\tau_o) +$$

$$+ \sum_{k=1}^{\infty} e^{-k\lambda_z \tau_o}\, \mathbb{1}(t-k\tau_o) \tag{15}$$

oraz oczekiwana liczba czyszczeń izolacji:

$$E\left\{N_o(t)\right\} = \mathcal{L}^{-1}\left\{N_c(s)\right\} = \mathcal{L}^{-1}\left\{\sum_{k=1}^{\infty} \frac{\lambda_z}{s^2}\, e^{-(s+\lambda_z)k\tau_o}\right\} +$$

$$+\mathcal{L}^{-1}\left\{\sum_{k=1}^{\infty}\frac{1}{s}e^{-(s+\lambda_z)k\tau_o}\right\}=\sum_{k=1}^{\infty}e^{-k\lambda_z\tau_o}\lambda_z(t-k\tau_o)+$$

$$+\sum_{k=1}^{\infty}e^{-k\lambda_z\tau_o}\mathbf{1}(t-k\tau_o) \tag{16}$$

Jedynie w pierwszym przedziale odnowy $\mathbb{E}\left\{N_o(0\leqslant t<\tau_o)\right\}=\lambda_z t$ oraz $\mathbb{E}\left\{N_c(0\leqslant t<\tau_o)\right\}=0$, natomiast w każdym z pozostałych:

$$\mathbb{E}\left\{N_o\left[k\tau_o\leqslant t<(k+1)\tau_o\right]\right\}=$$

$$=\lambda_z t+\sum_{j=1}^{k}e^{-j\lambda_z\tau_o}\left[\lambda_z(t-j\tau_o)+1\right],\quad k=1,2,3,\ldots \tag{17}$$

oraz

$$\mathbb{E}\left\{N_c\left[k\tau_o\leqslant t<(k+1)\tau_o\right]\right\}=$$

$$=\sum_{j=1}^{k}e^{-j\lambda_z\tau_o}\left[\lambda_z(t-j\tau_o)+1\right],\quad k=1,2,3,\ldots \tag{18}$$

Ponieważ jednak

$$\sum_{k=0}^{\infty}e^{-k\lambda_z\tau_o}=(1-e^{-\lambda_z\tau_o})^{-1}$$

oraz

$$\sum_{k=0}^{\infty}(k+1)e^{-k\lambda_z\tau_o}=(1-e^{-\lambda_z\tau_o})^{-2}\quad \text{dla}\quad \left|e^{-\lambda_z\tau_o}\right|<1,$$

więc

$$\mathbb{E}\left\{N_o\left[k\tau_o\leqslant t<(k+1)\tau_o\right]\right\}=\lambda_z t\sum_{j=0}^{k}e^{-j\lambda_z\tau_o}-\lambda_z\tau_o\sum_{j=0}^{k}j\,e^{-j\lambda_z\tau_o}+$$

$$+\sum_{j=0}^{k-1}e^{-(j+1)\lambda_z\tau_o}=\lambda_z t\sum_{k=0}^{\infty}e^{-k\lambda_z\tau_o}-\lambda_z\tau_o\sum_{k=0}^{\infty}k\,e^{-\lambda_z\tau_o}+$$

$$+\sum_{k=0}^{\infty} e^{-(k+1)\lambda_z \tau_0} - \lambda_z t \sum_{j=k+1}^{\infty} e^{-j\lambda_z \tau_0} + \lambda_z \tau_0 \sum_{j=k+1}^{\infty} j\, e^{-j\lambda_z \tau_0} -$$

$$-\sum_{j=k}^{\infty} e^{-(j+1)\lambda_z \tau_0} = \frac{\lambda_z t + e^{-\lambda_z \tau_0} + \lambda_z \tau_0}{1 - e^{-\lambda_z \tau_0}} - \frac{\lambda_z \tau_0}{(1 - e^{-\lambda_z \tau_0})^2} -$$

$$- e^{-(k+1)\lambda_z \tau_0}(\lambda_z t - k\lambda_z \tau_0 + 1) \sum_{k=0}^{\infty} e^{-k\lambda_z \tau_0} +$$

$$+ \lambda_z \tau_0\, e^{-(k+1)\lambda_z \tau_0} \sum_{k=0}^{\infty} (k+1) e^{-k\lambda_z \tau_0} =$$

$$= \frac{1}{1 - e^{-\lambda_z \tau_0}} \left\{ \lambda_z t + e^{-\lambda_z \tau_0} + \lambda_z \tau_0 - \lambda_z t\, e^{-(k+1)\lambda_z \tau_0} + \right.$$

$$\left. + k\lambda_z \tau_0\, e^{-(k+1)\lambda_z \tau_0} - e^{-(k+1)\lambda_z \tau_0} \right\} - \frac{\lambda_z \tau_0}{(1 - e^{-\lambda_z \tau_0})^2} \left\{ 1 - e^{-(k+1)\lambda_z \tau_0} \right\} =$$

$$= \frac{1}{(1 - e^{-\lambda_z \tau_0})^2} \left\{ \lambda_z t - (\lambda_z t + \lambda_z \tau_0 - 1) e^{-\lambda_z \tau_0} - e^{-2\lambda_z \tau_0} - \right.$$

$$- \left[\lambda_z t - (k+1)\lambda_z \tau_0 + 1\right] e^{-(k+1)\lambda_z \tau_0} + (\lambda_z t - k\lambda_z \tau_0 + 1) e^{-(k+2)\lambda_z \tau_0}, \quad k = 0, 1, 2, \ldots \tag{19}$$

oraz

$$\mathbf{E}\left\{ N_c\left[k\tau_0 \le t < (k+1)\tau_0\right] \right\} =$$

$$= \mathbf{E}\left\{ N_0\left[k\tau_0 \le t < (k+1)\tau_0\right] \right\} - \mathbf{E}\left\{ N_{wu}\left[k\tau_0 \le t < (k+1)\tau_0\right] \right\} =$$

$$= \frac{e^{-\lambda_z \tau_0}}{(1 - e^{-\lambda_z \tau_0})^2} \left\{ (\lambda_z t - \lambda_z \tau_0 + 1) - (\lambda_z t + 1) e^{-\lambda_z \tau_0} - \right.$$

$$- \left[\lambda_z t - (k+1)\lambda_z \tau_0 + 1\right] e^{-k\lambda_z \tau_0} + (\lambda_z t - k\lambda_z \tau_0 + 1) e^{-(k+1)\lambda_z \tau_0}, \quad k = 0, 1, 2, \ldots \tag{20}$$

gdzie:

$\mathrm{E}\left\{N_{wu}(t)\right\} = \lambda_z t$ – oczekiwana liczba wyłączeń z uszkodzeniami na odcinku linii (wymuszonych wymian izolatorów) i osprzętu.

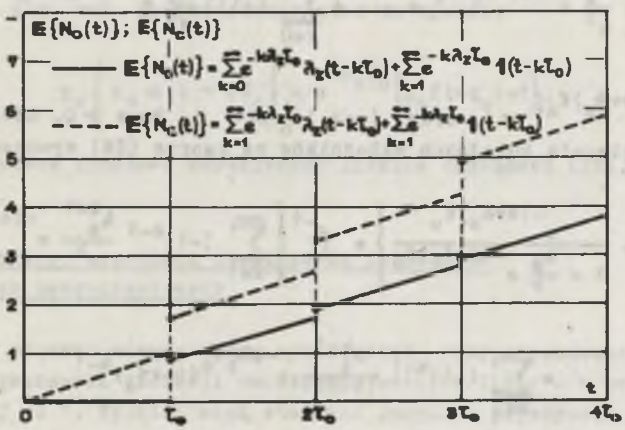
Przykładowo, dla $k=1$ (pierwsze czyszczenie dopiero po czasie $t=\tau_o$), oczekiwana liczba odnowień:

$$\mathrm{E}\left\{N_o(\tau_o \leqslant t < 2\tau_o)\right\} = \lambda_z t + e^{-\lambda_z \tau_o}\left[\lambda_z(t-\tau_o)+1\right] \tag{21}$$

oraz oczekiwana liczba czyszczeń:

$$\mathrm{E}\left\{N_c(\tau_o \leqslant t < 2\tau_o)\right\} = e^{-\lambda_z \tau_o}\left[\lambda_z(t-\tau_o)+1\right] \tag{22}$$

Zmienność w czasie oczekiwanej liczby odnowień i czyszczeń izolacji pokazano na rys. 3.



Rys. 3. Zmienność w czasie oczekiwanej liczby odnowień i czyszczeń izolacji

Jeśli $P_c(t)$ jest prawdopodobieństwem co najmniej 1 czyszczenia w czasie $(0,t]$, to gęstość tego prawdopodobieństwa w postaci operatorowej:

$$p_c(s) = \int_0^{\infty} e^{-st}\, dP_c(t) = \frac{n_c(s)}{1+n_c(s)} = \frac{(s+\lambda_z(e^{-(s+\lambda_z)\tau_o}}{s+\lambda_z e^{-(s+\lambda_z)\tau_o}} \tag{23}$$

dla gęstości czyszczenia (12), a więc:

$$P_c(s) = \frac{1}{s}\, p_c(s) = \frac{(s+\lambda_z)\, e^{-(s+\lambda_z)\tau_o}}{s\left[s+\lambda_z\, e^{-(s+\lambda_z)\tau_o}\right]} = \frac{1}{s} \cdot \frac{e^{-(s+\lambda_z)\tau_o}}{1+\frac{\lambda_z}{s}\, e^{-(s+\lambda_z)\tau_o}} +$$

$$+ \frac{1}{s^2}\, \frac{\lambda_z\, e^{-(s+\lambda_z)\tau_o}}{1+\frac{\lambda_z}{s}\, e^{-(s+\lambda_z)\tau_o}} \tag{24}$$

Po rozwinięciu w szereg Laurenta wyrażenia:

$$\frac{1}{1+\frac{\lambda_z}{s}\, e^{-(s+\lambda_z)\tau_o}} = 1 - \frac{\lambda_z}{s}\, e^{-(s+\lambda_z)\tau_o} + \frac{\lambda_z^2}{s^2}\, e^{-2(s+\lambda_z)\tau_o} -$$

$$- \frac{\lambda_z^3}{s^3}\, e^{-3(s+\lambda_z)\tau_o} + \ldots = \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k \frac{\lambda_z^k}{s^k}\, e^{-(s+\lambda_z)k\tau_o} \tag{25}$$

dla $\left|\frac{\lambda_z}{s}\, e^{-(s+\lambda_z)\tau_o}\right| < 1$ oraz $(s+\lambda_z)\tau_o > 0$ i $\operatorname{Re} s > 0$. Odwrotne transformanty Laplace'a kolejnych składników we wzorze (24) wynoszą:

$$\mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{1}{s} \cdot \frac{e^{-(s+\lambda_z)\tau_o}}{1+\frac{\lambda_z}{s}\, e^{-(s+\lambda_z)\tau_o}}\right\} = \mathcal{L}^{-1}\left\{\sum_{k=1}^{\infty} (-1)^{k-1} \frac{\lambda_z^{k-1}}{s^k}\, e^{-(s+\lambda_z)k\tau_o}\right\} =$$

$$= \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^{k-1} \frac{\lambda_z^{k-1}}{(k-1)!}\, e^{-k\lambda_z\tau_o} (t-k\tau_o)^{k-1} \tag{26}$$

oraz

$$\mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{1}{s^2} \cdot \frac{\lambda_z\, e^{-(s+\lambda_z)\tau_o}}{1+\frac{\lambda_z}{s}\, e^{-(s+\lambda_z)\tau_o}}\right\} = \mathcal{L}^{-1}\left\{\sum_{k=1}^{\infty} (-1)^{k-1} \frac{\lambda_z^k}{s^{k+1}}\, e^{-(s+\lambda_z)\tau_o}\right\} =$$

$$= \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^{k-1} \frac{\lambda_z^k}{k!}\, e^{-k\lambda_z\tau_o} (t-k\tau_o)^k \tag{27}$$

ponieważ $\mathcal{L}^{-1}\left\{\frac{k!}{s^{k+1}}\right\} = t^k$ [6].

Wynikająca stąd postać czasowa prawdopodobieństwa co najmniej 1 czyszczenia w zredukowanym okresie czasu $(0,t]$ wynosi:

$$P_c(t) = \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^{k-1} \frac{\lambda_z^{k-1} e^{-k\lambda_z \tau_o}}{(k-1)!} (t-k\tau_o)^{k-1} \left[1 + \frac{\lambda_z}{k}(t-k\tau_o)\right]. \quad (28)$$

W pierwszym okresie odnowy $P_c\left\{0 \leqslant t < \tau_o\right\} = 0$, natomiast w każdym z pozostałych:

$$P_c\left\{k\tau_o \leqslant t < (k+1)\tau_o\right\} = \sum_{j=1}^{k} (-1)^{j-1} \frac{\lambda_z^{j-1} e^{-j\lambda_z \tau_o}}{(j-1)!} (t-j\tau_o)^{j-1} \cdot$$

$$\cdot \left[1 + \frac{\lambda_z}{j}(t-j\tau_o)\right], \quad k=1,2,3,\ldots \quad (29)$$

Przykładowo, dla $k=1$ prawdopodobieństwo to wynosi:

$$P_c\left\{\tau_o \leqslant t < 2\tau_o\right\} = e^{-\lambda_z \tau_o}\left[\lambda_z(t-\tau_o)+1\right], \quad (30)$$

a więc jest równe liczbowo oczekiwanej liczbie czyszczeń (22).

3. Ocena wymaganej częstości czyszczenia izolatorów w warunkach zabrudzeniowych

Parametry procesu odnowy można wykorzystać przy wyznaczaniu rocznej częstości czyszczenia izolacji narażonego odcinka linii - w praktyce zwykle mniejszej od 1. Wyjątek mogą stanowić jedynie pojedyncze słupy w miejscach szczególnie silnego narażenia lokalnego (np. w pobliżu chłodni kominowych), gdzie zastosowanie nawet bardzo wytrzymałych układów izolacyjnych może nie zapobiec częstym przeskokom i wyłączeniom linii.

W celu wyznaczenia wymaganej częstości czyszczenia na odcinku linii w ciągu roku uwzględniono, że:

- zredukowany czas eksploatacji można wyrazić jako $t = k\frac{T}{N_c(T)}$ (dla $k = 1,2,3,\ldots$), jeśli częstość czyszczenia izolacji w ciągu roku obliczeniowego T wynosi $N_c(T) \cong T/\tau_o$ [4],
- najmniejsza niezawodność zabrudzeniowa między kolejnymi czyszczeniami $R_{min}(\tau_o)$ nie powinna być mniejsza od wymaganej niezawodności $R^*(\tau_o)$, czyli:

$$R_{min}(\tau_o) = e^{-\lambda_z \tau_o} \geqslant R^*(\tau_o) = e^{-N^*_{wu}(\tau_o)} = e^{-k_u Q_{SPZ} N^*_p(\tau_o)}, \quad (31)$$

gdzie:

$N^*_{wu}(\tau_o)$ oraz $N^*_p(\tau_o)$ - dopuszczalne oczekiwane liczby wyłączeń z uszkodzeniami oraz przeskoków zabrudzeniowych na rozpatrywanym odcinku linii w czasie $(0,\tau_o]$,

- względna liczba zakłóceń (przeskoków lub wyłączeń) dopuszczalnych w przedziale odnowy lub w ciągu roku:

$$q_c = \frac{N^*_p(\tau_o)}{N_p(\tau_o)} = \frac{N^*_p(T)}{N_p(T)} = \frac{N^*_{wu}(\tau_o)}{N_{wu}(\tau_o)} = \frac{N^*_{wu}(T)}{N_{wu}(T)} < 1, \tag{32}$$

gdzie:

$N_p(\tau_o)$ i $N_{wu}(\tau_o)$ - oczekiwane liczby przeskoków oraz wyłączeń z uszkodzeniami w przedziale odnowy,

$N_p(T)$ i $N_{wu}(T)$ - oczekiwane liczby przeskoków oraz wyłączeń z uszkodzeniami w ciągu roku,

- względna częstość czyszczenia, tj. odniesiona do oczekiwanej liczby przeskoków w ciągu roku:

$$\sigma_c = \frac{N_c(T)}{N_p(T)} = \frac{1}{N_p(\tau_o)} = \frac{q_c}{N^*_p(\tau_o)} \tag{33}$$

Po wprowadzeniu do wzoru (30) wymagania (31), równoznacznego warunkowi $\lambda_z\tau_o \le k_u Q_{SPZ} N^*_p(\tau_o)$, dla $t' = t - \tau_o = \tau_o$ otrzymuje się, że:

$$P_c\left\{0 < t' < \tau_o\right\} = e^{-\lambda_z\tau_o}(\lambda_z t' + 1) = 1, \tag{34}$$

a po uwzględnieniu, że $\lambda_z t' = N_{wu}(t') = \frac{1}{N_c(T)} Q_{SPZ} k_u N_p(T)$, wymagana częstość czyszczenia dla zadanej wartości $N^*_p(\tau_o)$ wynosi:

$$N_c(T) \ge \frac{k_u Q_{SPZ} N_p(t)}{e^{\frac{k_u Q_{SPZ}}{N^*_p(\tau_o)}} - 1} = \sigma_c N_p(T) = \frac{N_p(T)}{N_p(\tau_o)} \tag{35}$$

i rośnie ze wzrostem zawodności izolatorów oraz wymaganego poziomu niezawodności w okresie między czyszczeniami, natomiast dopuszczalna względna liczba zakłóceń:

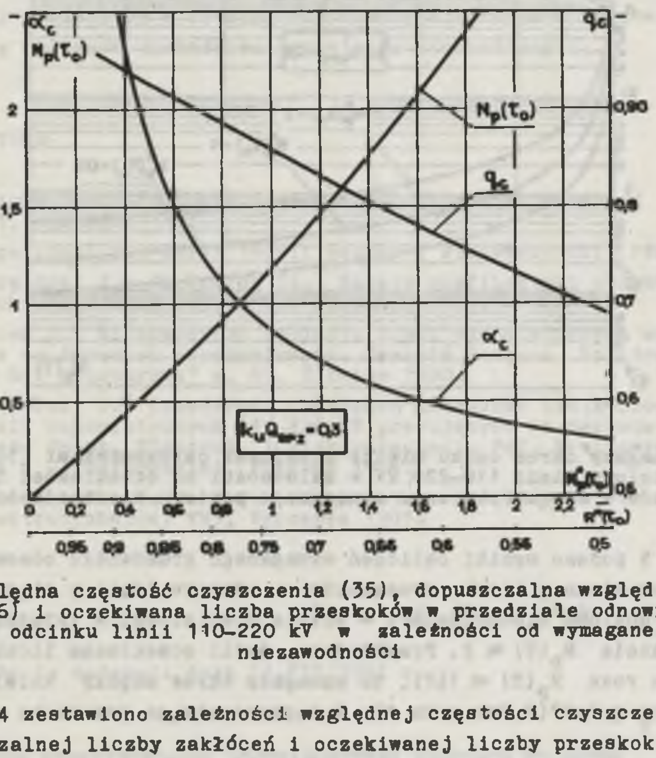
$$q_c \le \frac{\frac{k_u Q_{SPZ}}{N^*_p(\tau_o)}}{e^{\frac{k_u Q_{SPZ}}{N^*_p(\tau_o)}} - 1} \tag{36}$$

Oznacza to również, że między oczekiwaną a dopuszczalną liczbą przeskoków na odcinku linii w przedziale odnowy zachodzi zależność:

$$N_p(\tau_o) = \frac{1}{k_u Q_{SPZ}} \left(e^{k_u Q_{SPZ} N_p^*(\tau_o)} - 1\right), \tag{37}$$

natomiast wymagany okres czasu między kolejnymi czyszczeniami:

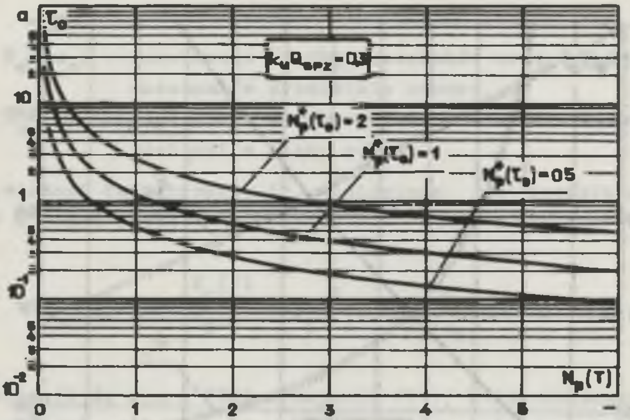
$$\tau_o \leqslant \frac{T}{\alpha_c N_p(T)} = \frac{T}{k_u Q_{SPZ} N_p(T)} \left(e^{k_u Q_{SPZ} N_p^*(\tau_o)} - 1\right) \tag{38}$$



Rys. 4. Względna częstość czyszczenia (35), dopuszczalna względna liczba zakłóceń (36) i oczekiwana liczba przeskoków w przedziale odnowy (37) dla izolacji na odcinku linii 110–220 kV w zależności od wymaganego poziomu niezawodności

Na rys. 4 zestawiono zależności względnej częstości czyszczenia, względnej dopuszczalnej liczby zakłóceń i oczekiwanej liczby przeskoków od dopuszczalnej liczby przeskoków w przedziale odnowy dla krajowych linii napowietrznych 110–220 kV na terenach przemysłowych [4]. Poziom wymaganej niezawodności izolacji na odcinku linii w okresie między czyszczeniami wynika z doświadczeń eksploatacyjnych, przy czym najczęściej $1 \leqslant N_p^*(\tau_o) < 2$ (przeskoki świadczą między innymi o konieczności czyszczenia).
Wynika stąd, że w przybliżonych obliczeniach praktycznych można przyjąć następujące wartości dopuszczalne:

Wymagania niezawodnościowe		Wartości dopuszczalne		
$N_p^*(\tau_o)$	$R^*(\tau_o) = e^{-k_u Q_{SPZ} N_p^*(\tau_o)}$ dla $k_u Q_{SPZ} = 0,3$	σ_c	q_c	$N_p(\tau_o)$
1(2)	0,74 (0,55)	0,857(0,365)	0,857(0,[illegible])	1,17(2,74)



Rys. 5. Wymagany okres czasu między kolejnymi czyszczeniami (38) dla izolacji na odcinku linii 110-220 kV w zależności od oczekiwanej liczby przeskoków w ciągu roku oraz wymaganego poziomu niezawodności

Na rys. 5 podano wyniki obliczeń wymaganego przedziału odnowy w zależności od oczekiwanej liczby przeskoków na odcinku linii w ciągu roku oraz wymaganego poziomu niezawodności - silnie nieliniowej w istotnym dla praktyki przedziale $N_p(T) \leq 2$. Przykładowo, jeśli oczekiwana liczba przeskoków w ciągu roku $N_p(T) \leq 1(2)$, to wymagany okres między kolejnymi czyszczeniami $\tau_o \leq 1,17(2,74)$ roku dla 1 dopuszczalnego przeskoku w przedziale odnowy.

Uzyskane wyniki są przybliżone ze względu na brak w pełni uzasadnionych danych niezawodnościowych dla izolacji liniowej w szczególnie trudnych warunkach środowiskowych i wymagają dalszych uzasadnień techniczno-ekonomicznych. W praktyce nie jest jednak na ogół wymagana dokładność obliczeń mniejsza od 0,5 roku, ponieważ - ze względów organizacyjnych - izolatory czyszczone są najczęściej na wiosnę i w lecie.

4. Wnioski

1. Jedną z możliwości praktycznego zastosowania teorii odnowy do oceny uzasadnionej częstości czyszczenia liniowych izolatorów napowietrznych jest strategia grupowych wymian uprzedzających.
2. Wymagana częstość czyszczenia oraz długość okresu czasu między kolejnymi czyszczeniami uzależnione są od zawodności zabrudzeniowej izolatorów i wymaganego poziomu niezawodności na odcinku linii w przedziale odnowy.
3. Obliczone wartości dopuszczalnych parametrów proponowanej strategii odnowy izolatorów w szczególnie trudnych warunkach środowiskowych wymagają dalszych uzasadnień techniczno-ekonomicznych.

LITERATURA

[1] Beichelt F.: Problemy niezawodności i odnowy urządzeń technicznych. WNT, Warszawa 1974.

[2] Kopociński B.: Zarys teorii odnowy i niezawodności. PWN, Warszawa 1973.

[3] Karpiński J.: Firkowicz Sz.: Zasady profilaktyki obiektów technicznych. Mała monografia PWN, Warszawa 1981.

[4] Gacek Z.: Niezawodność izolacji linii napowietrznych wysokiego napięcia na terenach przemysłowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej nr 642 "Elektryka" z. 67, Gliwice 1980.

[5] Kucharski K.: Czasokresy czyszczeń łańcuchów izolatorów długopniowych linii napowietrznych 110-220 kV pracujących na terenie GOP. Pr. Nauk. Inst. Podst. Elektrot. i Elektrotechnol. Pol. Wrocławskiej nr 14 (seria 2 - konferencje), Wrocław 1976.

[6] Osiowski J.: Zarys rachunku operatorowego; teoria i zastosowanie w elektrotechnice. WNT, Warszawa 1965.

Recenzent: doc. dr hab. inż. Zbigniew Pohl

Wpłynęło do redakcji dnia 24.VII.1982 r.

СТРАТЕГИЯ ПЕРЕОДИЧЕСКОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЛИНЕЙНОЙ ИЗОЛЯЦИИ В УСЛОВИЯХ ЗАГРЯЗНЕНИЯ

Р е з ю м е

В статье сделана попытка приспособления и применения некоторых элементов теории востановления к оценке обоснованной частоты очистки изоляторов в высоковольтных ЛЭП на территориях с загрязнением атмосферой. Для этого были определены основные величины, описывающие стратегию групповых профилактических замен изоляторов в отечественных ЛЭП 110 и 220 кв, находящихся в условиях сильных промышленных загрязнений атмосферы.

THE STRATEGY OF PERIODICAL LINE INSULATION RENOVATION IN POLLUTED CONDITIONS

S u m m a r y

The paper presents an attempt to adapting and applying some elements of the renovation theory to justify the frequency of high voltage line insulator cleaning on the polluted areas. To do this, there were determined the basic quantities which define the strategy of profilactic insulator grouping exchange in the lines of 110 and 220 kV in the industrial zones with considerable air pollution.