



## Model strategii odnowień profilaktycznych linii kablowych SN przy okresowych kontrolach diagnostycznych

**Streszczenie.** Zaprezentowano model strategii obsługi eksploatacyjnej, który może być wykorzystany w eksploatacji linii kablowych SN. Model ten opisuje strategię należącą do grupy strategii uwzględniających stopień zużycia obiektu. Model umożliwia dokonanie analizy wpływu kontroli diagnostycznych i wykonywanych na tej podstawie odnowień profilaktycznych na niezawodność eksploatowanej linii kablowej SN.

**Abstract.** (Model of preventive renewal strategy of MV cables in periodical diagnostic controls). A maintenance strategy model, which can be used for operating of MV cable lines is presented. Such a model describes a strategy belonged to the group of strategies keeping count the wear of a system (condition based maintenance). The model enables to analyse how diagnostic controls and carried out preventive renewal influence on reliability of a used MV cable line.

**Słowa kluczowe:** kontrola diagnostyczna, odnowienie profilaktyczne, kabel SN.

**Keywords:** diagnostic control, preventive renewal, medium voltage cable.

### Wstęp

Przedziały czasu (okresy) użytkowania obiektów technicznych, będących elementami składowymi sieci elektroenergetycznych (w tym linii kablowych), są wielkościami losowymi. Niemożliwe jest więc dokładne określenie chwili wystąpienia nieprzewidzianego przestoju (awarii) takich obiektów, co może powodować duże straty ekonomiczne. Dzięki zastosowaniu odpowiedniej strategii obsługi eksploatacyjnej umożliwiającej zapobieganie awariom – poprzez wykonywanie odpowiednich czynności profilaktycznych w odpowiednim czasie – możliwe jest zmniejszenie strat ekonomicznych wynikających m.in. z konieczności nieplanowanych wyłączeń i niedostarczenia energii odbiorcom. Czynnościami profilaktycznymi nazywa się odnowienia (naprawy), które należy wykonać zanim zużycie, zmęczenie lub zużycie się obiektu (lub jego części składowych) spowoduje awarię i konieczność dokonania naprawy wymuszonej. Eksploatacyjne czynności obsługowe mogą być wykonywane po upływie zdeteterminowanych lub losowych przedziałów czasu.

Obsługa eksploatacyjna elementów składowych sieci elektroenergetycznych obejmuje najczęściej następujące czynności: przegląd i kontrolę stanu technicznego, częściową lub pełną naprawę profilaktyczną, wymianę profilaktyczną oraz naprawę lub wymianę wymuszoną przez awarię. Czynności te mają na celu utrzymanie takiego stanu technicznego, który pozwoli na dalszą eksploatację obsługiwanego obiektu i wypełnianie przez niego nałożonych zadań. Najmniej efektywne jest ograniczanie się tylko do obsług wymuszonych przez awarię (*corrective maintenance*). Znacznie bardziej uzasadnione są obsługi profilaktyczne, tzn. wykonywane jeszcze w stanie zdatności obiektu do spełniania określonych zadań funkcjonalnych. Wyróżnia się tu zasadnicze dwie grupy strategii: tzw. strategię zależną od czasu pracy obiektu (*time based maintenance*) i strategię zależną od stopnia zużycia obiektu (*condition based maintenance*).

Do odwzorowania procesów obsługi eksploatacyjnej powyższych linii kablowych SN wybrano strategię, której zastosowanie nie jest istotnie ograniczone ani możliwościami technicznymi, ani względami organizacyjnymi spotykanymi w energetyce zawodowej. Jest to tzw. strategia odnowień profilaktycznych przy okresowej obserwacji obiektu, należąca do grupy strategii

obsługi zależnej od stopnia zużycia obiektu [1]. Strategia ta polega na tym, że: odnowień dokonuje się po kontrolach diagnostycznych przeprowadzanych w chwilach  $\tau_p, 2\tau_p, 3\tau_p, \dots$ , gdy stopień zużycia obiektu osiąga wartość niedopuszczalną oraz wtedy, gdy obiekt ulegnie awarii. Może być więc zastosowana w odniesieniu do linii kablowych, których stan techniczny może być oceniany w stosunkowo prosty sposób. Metody diagnostyczne ([2], [3]) umożliwiają wiarygodną ocenę stopnia zużycia (zestarczenia) izolacji linii kablowej. Ponadto możliwe jest również lokalizowanie miejsc wzdłuż trasy kabla (np. [4]), w których izolacja jest lokalnie osłabiona. Dzięki temu istnieje możliwość eliminowania takich miejsc albo poprzez wykonanie muf (o parametrach niezawodnościowych podobnych do parametrów odnawianego kabla), albo – w przypadku dłuższych zdegradowanych fragmentów – poprzez lokalną wymianę kabla (wykonanie wstawki).

### Model obliczeniowy

W rozważanym modelu obliczeniowym kabel jest traktowany jako jeden niepodzielny obiekt, tzn. nie wyróżnia się jego elementów składowych: muf, głowic, wstawek kablowych. Uwzględniana jest jednak szeregową strukturą niezawodnościową kabla, oznaczająca, że uszkodzenie jednego z elementów linii kablowej powoduje niezdatność do pracy całego obiektu. Rozważany kabel może znajdować się w jednym z dwóch stanów  $Z_i = 0, 1$ . Stany te oznaczają umowny stopień sprawności technicznej kabla, przy czym stan 0 odpowiada zadowolającemu stanowi technicznemu izolacji kabla, natomiast stan 1 oznacza, że stan techniczny izolacji jest już pogorszony, ale jeszcze dopuszczalny (izolacja nadaje się jeszcze do naprawy). Zakłada się, że przejście ze stanu  $Z_i = 1$  do stanu  $Z_i = 0$  nie może nastąpić samoistnie, ale jest to możliwe po dokonaniu odnowienia (profilaktycznego lub poawaryjnego).

Dystrybuenta czasu poprawnej pracy kabla  $\eta$  w stanie  $Z_i = 0$  (pod warunkiem, że nie nastąpi żadna awaria) jest funkcją  $F_0(t) = P(\eta < t)$ . Odcinek czasu  $\xi$  kiedy kabel znajduje się w stanie  $Z_i = 0$  ma rozkład prawdopodobieństwa  $F(t) = P(\xi < t)$ . Zmienne losowe  $\xi$  i  $\eta$  są z założenia niezależne. Gdy w chwili  $x$  (mierzonej od rozpoczęcia eksploatacji kabla) parametr  $Z_i$  zmieni wartość z 0 na 1, resztkowy czas pracy kabla wyraża dystrybuenta:

$$(1) \quad F_1(t) = \frac{F_1(t-x) - F_1(x)}{1 - F_1(x)}.$$

Intensywności uszkodzeń  $\lambda(t)$ ,  $\lambda_0(t)$  i  $\lambda_1(t)$  odpowiadają dystrybuantom  $F(t)$ ,  $F_0(t)$  i  $F_1(t)$ , gdzie:

- $F(t)$  opisuje rozkład prawdopodobieństwa czasu poprawnej pracy kabla w stanie  $Z_t = 0$ ,
- $F_0(t)$  opisuje rozkład prawdopodobieństwa czasu poprawnej pracy kabla w stanie  $Z_t = 0$  pod warunkiem, że nie nastąpi żadna awaria (czas do pierwszego uszkodzenia),
- $F_1(t)$  opisuje rozkład prawdopodobieństwa długości odcinka czasu liczonego od chwili przejścia ze stanu technicznego  $Z_t = 0$  na  $Z_t = 1$  do chwili powstania uszkodzenia.

Prawdopodobieństwa  $p_0(t)$  i  $p_1(t)$  oznaczają, że kabel w przedziale  $(0, t)$  nie ulegnie awarii i że w chwili  $t$  jest w stanie  $Z_t = 0$  lub  $1$ . Prawdopodobieństwa te spełniają następujący układ równań różniczkowych:

$$(2) \quad p_0'(t) = -[\lambda(t) + \lambda_0(t)]p_0(t),$$

$$(3) \quad p_1'(t) = \lambda(t)p_0(t) - \lambda_1(t)p_1(t).$$

Dla warunków początkowych  $p_0(0) = 1$  i  $p_1(0) = 0$  oraz przy uwzględnieniu zależności:

$$(4) \quad F(t) = 1 - e^{-\int_0^t \lambda(x) dx},$$

$$(5) \quad F_i(t) = 1 - e^{-\int_0^t \lambda_i(x) dx} \quad (i = 0, 1),$$

otrzymuje się rozwiązanie układu równań (2) i (3) w następującej postaci

$$(6) \quad p_0(t) = \overline{F(t)} \overline{F_0(t)},$$

$$(7) \quad p_1(t) = \overline{F_1(t)} \int_0^t \frac{\lambda(u) \overline{F(u)} \overline{F_0(u)}}{\overline{F_1(u)}} du,$$

gdzie:

$$\overline{F(t)} = 1 - F(t) \quad \text{oraz} \quad \overline{F_i(t)} = 1 - F_i(t) \quad \text{dla} \quad i = 0, 1.$$

Gęstość funkcji rozkładu życia kabla ma postać

$$(8) \quad f(t) = \lambda_0(t)p_0(t) + \lambda_1(t)p_1(t).$$

Jeśli  $\lambda(t) = \lambda$ ,  $\lambda_0(t) = \lambda_0$  i  $\lambda_1(t) = \lambda_1$ , wówczas prawdopodobieństwa (6) i (7) przyjmują uproszczoną postać:

$$(9) \quad p_0(t) = e^{-(\lambda + \lambda_0)t},$$

$$(10) \quad p_1(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \lambda_0 - \lambda_1} \left[ e^{-\lambda_1 t} - e^{-(\lambda + \lambda_0)t} \right],$$

natomiast gęstość funkcji rozkładu życia wyraża się następująco:

$$(11) \quad f(t) = \frac{(\lambda_0 - \lambda_1)(\lambda + \lambda_0)}{\lambda + \lambda_0 - \lambda_1} e^{-(\lambda + \lambda_0)t} + \frac{\lambda \lambda_1}{\lambda + \lambda_0 - \lambda_1} e^{-\lambda_1 t},$$

w przypadku, gdy  $\lambda + \lambda_0 - \lambda_1 \neq 0$ .

W dalszej części zakłada się, że odnowienie wykonywane jest albo bezpośrednio po awarii, albo okresowo, gdy obiekt znajdzie się w stanie  $Z_t = 1$ . W przypadku stosowania tej strategii niezbędne są okresowe kontrole diagnostyczne, wykonywane w odstępach czasu  $\tau_d$ ,  $2\tau_d$  itd. Kabel jest odnawiany profilaktycznie wtedy, gdy kontrola diagnostyczna wykaże, że  $Z_t = 1$ . Kabel może się znajdować w takim stanie z prawdopodobieństwem  $\pi_1(t)$  wyrażonym wzorem:

$$(12) \quad \pi_1(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \lambda_1} \left( 1 - e^{-(\lambda + \lambda_1)t} \right).$$

Aby wyznaczyć oczekiwaną liczbę odnowień, postać czasową funkcji (11) przekształcono do postaci operatorowej. Wykorzystując związek między operatorowymi postaciami gęstości funkcji odnowy i gęstości funkcji rozkładu życia oraz związek między operatorowymi postaciami funkcji odnowy i jej gęstości, a następnie dokonując odwrotnej transformacji Laplace'a, oczekiwana liczba wszystkich odnowień – wymuszonych przez awarie i odnowień profilaktycznych – przybiera postać:

$$(13) \quad N_o(t) = \frac{\lambda_1(\lambda + \lambda_0)}{\lambda + \lambda_1} t - \frac{\lambda(\lambda_1 - \lambda_0)}{(\lambda + \lambda_1)^2} \left[ 1 - e^{-(\lambda + \lambda_1)t} \right].$$

Aby wyznaczyć oczekiwaną liczbę odnowień profilaktycznych należy uwzględnić: prawdopodobieństwo, że w chwili kontroli diagnostycznej badany obiekt (kabel) jest w stanie  $Z_t = 1$  oraz liczbę kontroli diagnostycznych wykonanych do chwili  $t$ . Liczba kontroli diagnostycznych uzależniona jest od przyjętej wartości  $\tau_d$  i dla  $\tau_d = const.$  można ją przedstawić w postaci:

$$(14) \quad N_k(t) = \frac{t}{\tau_d},$$

więc oczekiwana liczba odnowień profilaktycznych wynosi:

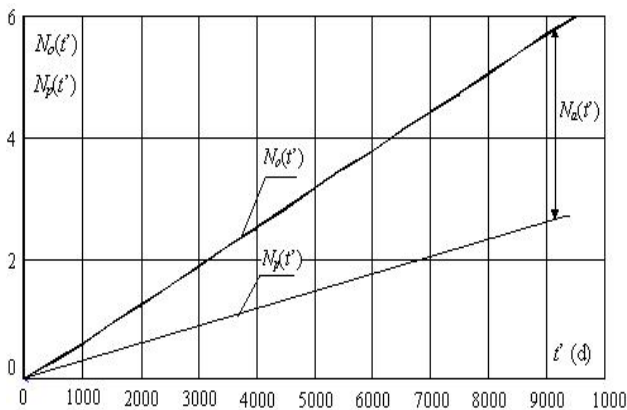
$$(15) \quad N_p(t) = N_k(t) \pi_1(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \lambda_1} \frac{t}{\tau_d} \left[ 1 - e^{-(\lambda + \lambda_1)t} \right],$$

zaś liczba awarii:

$$(16) \quad N_a(t) = N_o(t) - N_p(t).$$

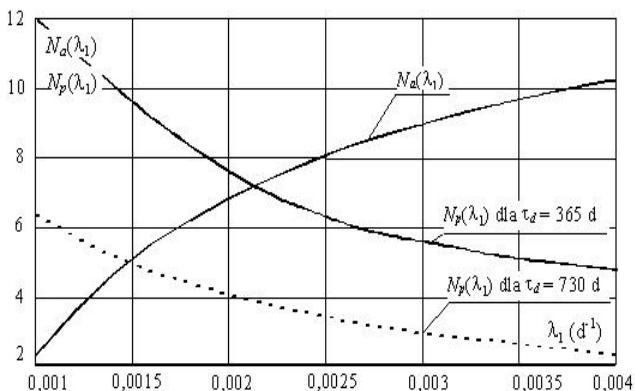
Wykresy oczekiwanej liczby obsłóg eksploatacyjnych, oczekiwanej liczby odnowień profilaktycznych oraz wynikającej stąd (z różnicy obu wielkości) liczby odnowień poawaryjnych (równiej liczbie awarii) przedstawione są na rysunku 1.

Ze wzorów (14) i (15) wynika, że liczba kontroli diagnostycznych i oczekiwana liczba odnowień profilaktycznych, a tym samym oczekiwana liczba odnowień poawaryjnych (wzór (16)), są uzależnione od długości przedziału czasu między kolejnymi kontrolami diagnostycznymi.



Rys.1. Oczekiwana liczba obsług eksploatacyjnych i odnowień profilaktycznych izolacji linii kablowej SN ( $\lambda' = 0,0002 \text{ d}^{-1}$ ,  $\lambda_0' = 0,0005 \text{ d}^{-1}$ ,  $\lambda_1' = 0,002 \text{ d}^{-1}$ ,  $\tau_d' = 321 \text{ d}$ )

Zmienną modelu obliczeniowego, która w największym stopniu wpływa na efektywność stosowania strategii jest intensywność uszkodzeń  $\lambda_1$  odpowiadająca czasowi mierzonemu od chwili przejścia obiektu (kabla) ze stanu  $Z_t = 0$  na  $Z_t = 1$  do chwili powstania uszkodzenia. Wpływ tej zmiennej na oczekiwane wartości odnowień profilaktycznych i awarii w okresie eksploatacji  $T_E = 30$  lat ilustruje rysunek 2. Przedstawione są wyniki obliczeń dla parametrów  $\lambda_0 = 0,0008 \text{ d}^{-1}$  i  $\lambda = 0,0007 \text{ d}^{-1}$  oraz dwóch różnych czasów między kolejnymi kontrolami diagnostycznymi:  $\tau_d = 365 \text{ d}$  i  $\tau_d = 730 \text{ d}$ .



Rys.2. Oczekiwane liczby awarii i odnowień profilaktycznych izolacji linii kablowych w zależności od intensywności uszkodzeń  $\lambda_1$  (dla obliczeniowego okresu eksploatacji  $T_E = 30$  lat)

Intensywność uszkodzeń  $\lambda_1$  zależy z jednej strony od szybkości procesu degradacji izolacji kabla, a z drugiej strony – od przyjętych parametrów kryterialnych metody diagnostycznej. Jeśli parametry kryterialne metody diagnostycznej zostaną dobrane w taki sposób, że procesy degradacyjne prowadzące do uszkodzenia będą wykrywane z dużym wyprzedzeniem (co oznacza długi czas do powstania uszkodzenia i małą wartość intensywności  $\lambda_1$ ), wówczas strategia obsługi eksploatacyjnej będzie bardziej efektywna. Oznacza to większą oczekiwaną liczbę odnowień profilaktycznych i zmniejszenie się oczekiwanej liczby awarii.

Do oceny ekonomicznej rozwiązań eksploatacyjnych wykorzystano metodę kosztów rocznych. Podstawowymi rodzajami kosztów wyróżnionych w tej metodzie są: koszt inwestycyjny, koszty strat mocy i energii oraz koszt zawodności związany z prawdopodobieństwem uszkodzenia obiektu. Zakłada się, że koszty inwestycyjne i

zmienne są jednakowe dla wszystkich wariantów strategii obsługi eksploatacyjnej linii kablowych SN. Jest to uzasadnione tym, że rozważa się ten sam obiekt, który może być eksploatowany tak, że inaczej wpływa to na poziom jego zawodności. Poszczególnym strategiom odpowiadają zatem różne koszty zawodności. W takim przypadku wystarczające jest porównanie kosztów zawodności związanych z rozważanymi wariantami strategii. W przypadku stosowania strategii, według której nie dokonuje się obsług profilaktycznych, koszty zawodności w założonym okresie czasu eksploatacji  $T_E$  można zapisać ogólnie jako

$$(17) \quad K_{zaw1} = N_a(T_E) c_a.$$

W przypadku stosowania strategii obejmującej działania profilaktyczne w założonym okresie eksploatacji  $T_E$ , koszt zawodności wynika ze wzoru

$$(18) \quad K_{zaw2} = N_a(T_E) c_a + N_p(T_E) c_p + \frac{T_E}{\tau_d} c_d,$$

gdzie:

- $c_a$  – koszt wykonania jednego odnowienia poawaryjnego, uwzględniający również koszt niedostarczonej energii,
- $c_p$  – koszt wykonania jednego odnowienia profilaktycznego,
- $c_d$  – koszt wykonania jednej kontroli diagnostycznej,
- $\tau_d$  – przedział czasu między kolejnymi kontrolami diagnostycznymi.

Porównując powyższe koszty można ocenić opłacalność stosowania obu rodzajów strategii obsługi eksploatacyjnej. Aby spełniona była nierówność:

$$(19) \quad K_{zaw2} < K_{zaw1},$$

uzasadniająca celowość zastosowania kontroli diagnostycznych i będących ich następstwem ewentualnych odnowień profilaktycznych, zamiast ograniczania się jedynie do odnowień poawaryjnych muszą być zachowane odpowiednie proporcje między poszczególnymi składnikami kosztu zawodności. W szczególności koszt odnowienia poawaryjnego musi być większy od kosztu odnowienia profilaktycznego.

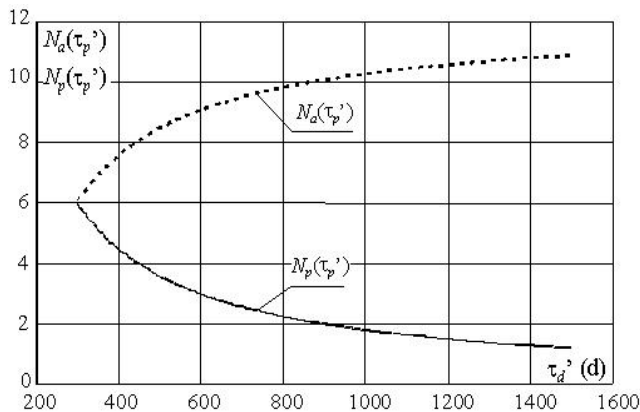
### Przykład

Kable o izolacji polietylenowej, wyprodukowane w końcu lat 70-tych i na początku lat 80-tych, wykazują obecnie zwiększoną intensywność uszkodzeń (nawet w porównaniu z eksploatowanymi długotrwałe kablami o izolacji papierowej). Analizując zawodność tego typu kabli należy posługiwać się dwustanowym modelem zawodnościowym. Pierwszy stan zawodnościowy, charakteryzujący się większą intensywnością uszkodzeń, obejmuje miesiące XII–VIII. Drugi stan zawodnościowy obejmuje miesiące XI–XI. Aby strumień uszkodzeń kabli można było traktować jako strumień Poissona, intensywność uszkodzeń powinna być jednakowa w ciągu roku. W tym celu można zastosować tzw. transformację czasu, polegającą na skróceniu czasu trwania stanu drugiego, zgodnie ze wzorem:

$$(19) \quad t_2' = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} t_2,$$

aby intensywności awarii w stanie pierwszym i drugim były sobie równe. Po dokonaniu transformacji czasu rok „obliczeniowy” ( $T'$ ) równy jest 0,88 roku kalendarzowego. Dla tak zdefiniowanego modelu zawodnościowego

poszczególne intensywności uszkodzeń oszacowano na poziomie  $\lambda' = 0,00075 d^{-1}$ ,  $\lambda_0' = 0,00085$  i  $\lambda_1' = 0,003 d^{-1}$ . Okres eksploatacji rozpatrywanej linii kablowej przyjęto  $T_E = 30$  lat – po transformacji czasu – obliczeniowy okres eksploatacji wynosi więc  $T_E = 24,6$  roku (9636 dób). Dla powyższych danych oczekiwana liczba odnowień (profilaktycznych i poawaryjnych), wynikająca z wzoru (13), wynosi  $N_o(T_E) = 12$ .



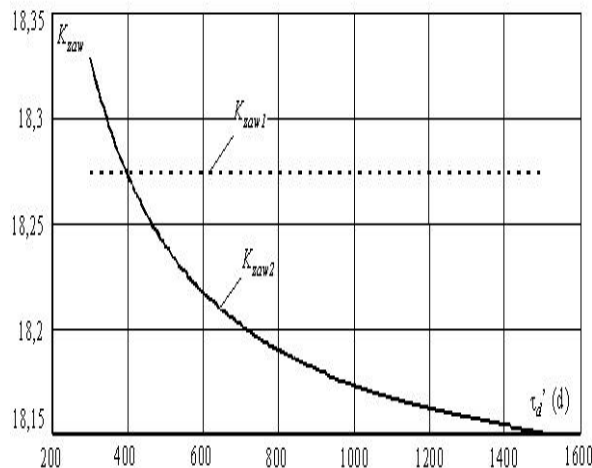
Rys. 3. Zależność oczekiwanej liczby odnowień profilaktycznych i oczekiwanej liczby awarii linii kablowej SN od długości przedziału czasu między kolejnymi kontrolami diagnostycznymi

Rysunek 3 przedstawia wykresy oczekiwanej liczby odnowień poawaryjnych oraz oczekiwanej liczby odnowień profilaktycznych w zależności od długości przedziału czasu między kolejnymi kontrolami diagnostycznymi. Zgodnie z oczekiwaniami efektem skrócenia przedziału czasu między kontrolami diagnostycznymi jest zmniejszenie oczekiwanej liczby awarii. W tym przypadku, wykonując kontrole diagnostyczne rozważanej linii kablowej w odstępach ok. 1 roku kalendarzowego można uniknąć prawie połowy awarii. Należy jednak uwzględnić możliwości organizacyjne wykonywania takich kontroli. Przedział czasu między kolejnymi kontrolami krótszy od jednego roku w praktyce wydaje się mało realny, ale również rzadsze kontrole diagnostyczne (na przykład, co dwa lata) pozwalają znacząco ograniczyć liczbę awarii, dzięki zastosowaniu działań profilaktycznych.

Koszty zawodności obu wariantów strategii obsługi eksploatacyjnej można przedstawić w postaci kosztów względnych odniesionych na przykład do kosztu pojedynczego odnowienia profilaktycznego. Rysunek 4 przedstawia względne koszty zawodności w funkcji długości przedziału między kolejnymi kontrolami diagnostycznymi dla poszczególnych względnych składników kosztu zawodności:

- kosztu pojedynczej kontroli diagnostycznej  $c_d = 0,1$ ,
- kosztu pojedynczego odnowienia poawaryjnego  $c_a = 1,4$ ,
- kosztu pojedynczego odnowienia profilaktycznego  $c_p = 1$ .

W rozpatrywanym przypadku stosowanie wariantu c) strategii jest nieopłacalne dla przedziałów czasu między kolejnymi kontrolami diagnostycznymi krótszych niż  $\tau_d' = 400$  dób, a po wykonaniu odwrotnej transformacji czasu  $\tau_d = 454$  doby.



Rys. 4. Względne koszty zawodności linii kablowej SN w okresie eksploatacji  $T_E = 30$  lat związane z dwoma wariantami strategii

### Podsumowanie

- W przypadku linii kablowych, ze względu na dostępność danych diagnostycznych, celowym jest wybór efektywnej strategii obsługi eksploatacyjnej, zależnej od stopnia zużycia obiektu i opartej na wynikach okresowych badań diagnostycznych.
- Znając prawdopodobieństwo zdarzenia, że linia kablowa w chwili kontroli diagnostycznej jest w stanie technicznym  $Z_i = 1$  można określić oczekiwaną liczbę odnowień profilaktycznych i awarii.
- Stosowanie kontroli diagnostycznych stanu izolacji w liniach kablowych SN, a w ich następstwie racjonalnych odnowień profilaktycznych, powoduje zmniejszenie oczekiwanej liczby awarii. Decydujący wpływ na oczekiwaną liczbę odnowień profilaktycznych i poawaryjnych ma długość przedziału czasu między kolejnymi kontrolami diagnostycznymi.

### LITERATURA

- [1] Beichelt F. Problemy niezawodności i odnowy urządzeń technicznych, WNT, Warszawa 1974.
- [2] Gacek Z., Stępień J.: Diagnosis of the state of PE/XLPE insulation in power cables basing on return voltage measurement results, *French Polish Days in Electricity*, Gliwice 2000, pp. 31 – 34
- [3] Szczerski R.: Lokalizacja uszkodzeń kabli i wybrane badania eksploatacyjne linii kablowych, WNT, Warszawa 1999.
- [4] Gulski E., Wester F., Turner M.: OWTS® – a new method to perform on-site on medium voltage power cables advanced partial discharge diagnostics, *High Voltage Testing & Diagnostics Seminar'99*, San Antonio 1999, pp. 1 – 11.

**Autorzy:** prof. dr hab. inż. Zbigniew Gacek, Politechnika Śląska, Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów, ul. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, E-mail: [gacekz@polsl.gliwice.pl](mailto:gacekz@polsl.gliwice.pl); mgr inż. Dominik Duda, Politechnika Śląska, Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów, ul. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, E-mail: [dudadom@poczta.onet.pl](mailto:dudadom@poczta.onet.pl)