



Dominik DUDA, Zbigniew GACEK, Maksymilian PRZYGRÓDZKI

Politechnika Śląska, Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów

Optymalizacja terminów reinwestycji wybranych urządzeń elektroenergetycznych

Streszczenie. Przedstawiono metodykę określania optymalnych chwil zastępowania eksploatowanych urządzeń nowymi, wynikającą z rachunku ekonomicznego i analizy stanu technicznego eksploatowanych urządzeń. Działania reinwestycyjne prowadzone zgodnie z proponowaną metodyką pozwalają na dotrzymanie równowagi pomiędzy wzrostem funkcji intensywności uszkodzeń i wynikającymi z tego kosztami eksploatacji, a kosztami inwestycyjnymi nowych urządzeń. Metodykę zaprezentowano na przykładzie linii kablowych SN.

Abstract. (Optimization of reinvestment moments of chosen power equipment). The methodology concerning calculation of optimal moments when operated equipment should be replaced by new ones is presented. That results from economic account and an analysis of technical state of operated equipment. Reinvestment activities, made according to proposed analysis method, enable to poise an increase of failure rate function (and resulting from that operating costs) and capital cost of new equipment. The methodology is presented on example of MV cable lines.

Słowa kluczowe: intensywność uszkodzeń, reinwestycja, linia kablowa SN, metoda kosztów rocznych

Keywords: failure rate, reinvestment, MV cable line, method of annual costs

Wstęp

Poruszając zagadnienia związane ze strategiami użytkowania obiektów technicznych szczególną uwagę przywiązuje się do zawodności tych urządzeń. Znając funkcję zawodności oraz odpowiednie kryteria gospodarcze można przeprowadzić optymalizację tych strategii i następnie – w powiązaniu z teorią odnowy – wyznaczyć optymalne terminy wymian profilaktycznych (reinvestycji).

Ze względu na swoją długą historię, a jednocześnie przyszłość w rejonach zurbanizowanych, w obszarze zainteresowań znalazły się linie kablowe SN. Dzięki wyznaczeniu optymalnych terminów wymian profilaktycznych takich linii można uniknąć kosztów związanych z przerwami w dostawie energii oraz naprawami spowodowanymi zwiększoną intensywnością uszkodzeń. Wzrost awaryjności w miarę czasu eksploatacji (konsekwencja procesów starzeniowych i zmęczenia) jest zjawiskiem naturalnym. Racjonalna obsługa sieci rozdzielczych średnich napięć pozwala na dotrzymanie równowagi pomiędzy wzrostem funkcji intensywności uszkodzeń urządzeń, a kosztami inwestycyjnymi nowych obiektów.

Optymalne terminy wymian profilaktycznych określonego urządzenia można określić wykorzystując teorię odnowy [5]. Wymiana urządzenia może być okresowa, bez względu na stan techniczny konkretnego obiektu, lub może wynikać ze zmieniającego się jego stanu technicznego [1]. Mając na celu wyznaczenie optymalnego terminu wymiany należy uwzględnić ogólny podział obiektów na dwie kategorie: obiekty naprawialne i obiekty nienaprawialne.

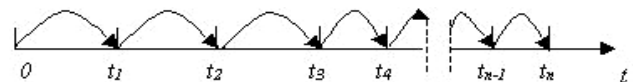
Do obiektów naprawialnych zalicza się te elementy systemu elektroenergetycznego, dla których awaria nie oznacza wymiany całego obiektu, a jedynie jego uszkodzonych elementów. Uszkodzenia w obiektach nienaprawialnych powodują konieczność wymiany całych obiektów na takie same lub równoważne, sprawne pod względem technicznym. W każdej z tych kategorii procesy odnowy przebiegają w całkowicie odmienny sposób.

W artykule rozpatrywane są tylko linie kablowe, należące do grupy obiektów naprawialnych.

Linie kablowe jako obiekty naprawialne

Schemat pracy obiektu naprawialnego można przedstawić jak na rysunku 1, przy czym praca tego obiektu odpowiada następującym założeniom:

- obiekt pracuje z reguły w sposób ciągły (przy pracy z przerwami za zmienną t przyjmuje się łączny czas działania);
- w razie uszkodzenia obiektu w chwilach t_1, t_2, \dots, t_n obiekt podlega naprawie częściowej, polegającej zwykle na wymianie uszkodzonego elementu;
- czas naprawy (odnowy) jest pomijalnie mały w stosunku do czasu poprawnej pracy;
- obiekt nie zmienia rozkładu trwałości po naprawie;
- znany jest średni koszt naprawy, równoznaczny z kosztem zawodności.



Rys. 1. Schemat pracy obiektu naprawialnego

Jak przedstawiono na rysunku 1, obiekt w miarę upływu czasu użytkowania starzeje się i jego uszkodzenia są coraz częstsze. Określając koszty naprawy przypadające na jednostkę czasu można zauważyć, że istnieje taka chwila, w której opłaca się obiekt wycofać z ruchu i złomować (bo koszty jego użytkowania są wyższe niż koszty obiektu nowego). Z drugiej strony, zbyt wczesne wycofanie obiektu z ruchu nie jest opłacalne, gdyż koszty inwestycyjne obiektu nowego są znacznie wyższe od kosztów napraw obiektu użytkowanego. Niemniej jednak można przyjąć, że istnieje taka chwila T_{opt} , kiedy koszty jednostkowe użytkowania obiektu minimalizują się. W takiej właśnie chwili powinna nastąpić planowa wymiana na nowy obiekt.

Jako funkcję celu przyjmuje się zazwyczaj jednostkowe koszty użytkowania obiektu. Jeżeli za jednostkę czasu przyjmie jeden rok, to funkcją celu będą koszty roczne z pominięciem kosztów eksploatacyjnych, ale z uwzględnieniem kosztów zawodności. Pominięcie kosztów eksploatacyjnych, na które składają się koszty strat i koszty utrzymania, wynika stąd, że traktuje się je jako stałe – niezależnie od chwili wymiany obiektu.

Formułując funkcję celu należy uwzględnić rachunek dyskonta, gdyż koszty zawodności na skutek narastania uszkodzeń wraz z upływem czasu są zmienne.

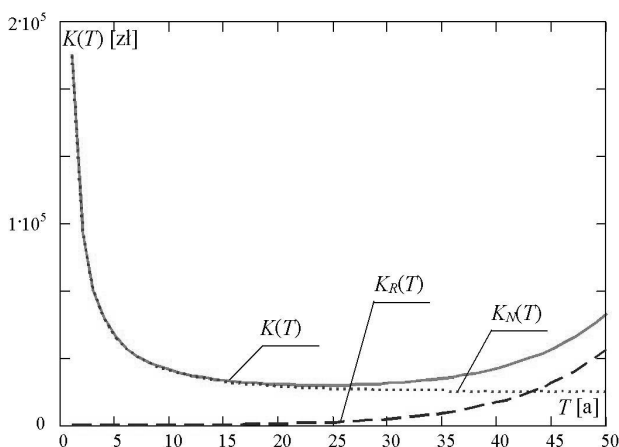
Pomijając koszty eksploatacyjne, na sumaryczne roczne koszty badanego obiektu naprawialnego składają się koszty wynikające z intensywności awarii i koszty zainstalowania nowego obiektu.

Sumaryczne roczne koszty obiektu naprawialnego, przy uwzględnieniu rachunku dyskonta w okresie T , wynikają z wzoru:

$$(1) \quad K(T) = K_I r(T) + a_r(T) \sum_{i=1}^T k_{zi} \lambda_i (1+p)^{T-i}$$

gdzie: K_I – koszt inwestycyjny, $r(T)$ – współczynnik odzysku kapitału, $a_r(T)$ – współczynnik amortyzacji progresywnej, k_{zi} – jednostkowe koszty napraw poawaryjnych w danym roku, λ_i – intensywność uszkodzeń w kolejnych latach eksploatacji, p – współczynnik dyskonta.

Na rysunku 2 przedstawiono przykładowy przebieg sumarycznego rocznego kosztu obiektu naprawialnego z rozbiem na powyższe dwa składniki: $K_N(T)$ i $K_R(T)$.



Rys. 2. Przebieg sumarycznego rocznego kosztu badanego obiektu naprawialnego w okresie T
 $K_N(T)$ – nakłady inwestycyjne, $K_R(T)$ – koszty związane z zawodnością

Traktując funkcję kosztową (1) jako funkcję celu zadania optymalizacji z uwagi na optymalny termin reinwestycji należy rozpatrzyć warunki osiągnięcia minimum (znalezienia rozwiązania) przez tę funkcję. Brak minimum lub występowanie minimum dla bardzo dużej wartości T oznacza, że optymalną strategią użytkowania jest ciągle dokonywanie napraw, aż do kresu technicznych możliwości.

Występowanie T_{opt} jest uwarunkowane:

- rosnącym charakterem funkcji intensywności uszkodzeń $\lambda(t)$ przynajmniej w dalszych latach eksploatacji (może to być funkcja siodłowa);
- uzyskaniem odpowiedniej wartości stosunku k_z/K_I .

Niespełnienie nawet jednego z podanych warunków powoduje, że funkcja celu (1) nie będzie miała minimum i wymiana elementu na nowy nie będzie gospodarczo uzasadniona.

Wyznaczanie funkcji intensywności uszkodzeń

Funkcja intensywności uszkodzeń jest niezbędna do estymacji kosztów eksploatacji (z uwzględnieniem kosztów zawodności). Metoda wyznaczania postaci analitycznej takiej funkcji oparta jest na wykorzystaniu ogólnej postaci funkcji zawodności [3,4]:

– w postaci ciągłej

$$(2) \quad F(t) = 1 - \exp\left[-\int_0^t \lambda(\tau) d\tau\right]$$

– w postaci dyskretniej (dla i -tego roku eksploatacji):

$$(3) \quad F_i = 1 - \exp\left[-\sum_{k=1}^i \lambda_k \cdot \Delta t_k\right]$$

W praktyce, opierając się na historii badanych obiektów, najczęściej wykorzystuje się postać dyskretną funkcji intensywności uszkodzeń, w postaci dyskretnych wartości $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_T$ (które odpowiadają intensywnościom uszkodzeń w kolejnych latach eksploatacji $i = 1, 2, \dots, T$) wyznaczaną z wzoru:

$$(4) \quad \lambda_i = \frac{2m_i}{l_i + l_{i+1}}$$

gdzie: m_i - liczba uszkodzeń, l_i – liczba elementów (długości badanych linii kablowych SN) w i -tym roku eksploatacji.

Dla tak określonej dyskretniej postaci funkcji intensywności uszkodzeń wyznacza się dyskretną postać funkcji zawodności (3). Poprzez dopasowanie wyznacza się postać analityczną funkcji zawodności, a następnie wyznacza się funkcję intensywności uszkodzeń w postaci analitycznej [6].

Najwygodniej jest posłużyć się analityczną postacią funkcji, znaną zarówno w postaci skumulowanej (całkowej), jak i różniczkowej. W prezentowanym przykładzie do opisu intensywności uszkodzeń oraz funkcji zawodności posłużono się funkcją rozkładu Weibulla:

$$(5) \quad F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{b}\right)^v\right]$$

gdzie: b – parametr skali, v – parametr kształtu.

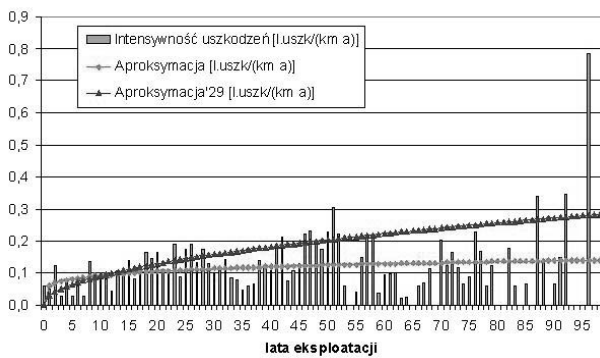
Analityczna postać funkcji intensywności uszkodzeń w przypadku rozkładu Weibulla określana jest jako:

$$(6) \quad \lambda(t) = \frac{v}{b} \left(\frac{t}{b}\right)^{v-1}$$

Wyznaczając funkcje intensywności uszkodzeń dla linii kablowych SN wprowadzono dodatkowo podział na linie kablowe o izolacji papierowej oraz polwinitowej. W dalszej części artykułu przedstawiono wyniki uzyskane w każdej z wymienionych grup.

Linie kablowe o izolacji papierowej

Funkcję intensywności uszkodzeń linii kablowych o izolacji papierowej wyznaczono na podstawie danych o awaryjności linii kablowych pochodzących z jednego obszaru i obejmujących uszkodzenia rejestrowane w latach 1987–2004 (kable od 0 do 98 lat eksploatacji). Na podstawie statystyki obejmującej dane z 17 lat określono sumaryczne długości linii l_i będących w kolejnym roku kalendarzowym w tym samym (i -tym) roku eksploatacji. Na podstawie statystyki określono też sumaryczne liczby uszkodzeń obiektów w tym samym (i -tym) roku eksploatacji. Uzyskany obraz przedstawiający intensywność uszkodzeń stwierdzoną w latach 1987–2004 na tych liniach pokazano na rysunku 3.



Rys.3. Dyskretna postać funkcji intensywności uszkodzeń linii kablowych SN o izolacji papierowej oraz jej aproksymacje

Intensywności uszkodzeń wyznaczono z danych rzeczywistych (dyskretnych), natomiast ich aproksymacje w postaci analitycznej wykonano w dwóch wariantach. Wykorzystano w tym celu dane o awaryjności:

- 1) wszystkich kabli o izolacji papierowej, bez względu na ich wiek ($0 \leq t \leq 98$); w tym przypadku uzyskano rozkład Weibulla o parametrach $\nu = 1,18$, $b = 12,18$,
- 2) jedynie tych kabli o izolacji papierowej, których wiek nie przekroczył przeciętnego wieku, (ok. 29 lat); w tym przypadku uzyskano rozkład Weibulla o parametrach $\nu = 1,49$, $b = 13,81$.

Estymacja funkcji intensywności uszkodzeń wykorzystująca jedynie dane o awaryjności kabli, których wiek nie przekroczył przeciętnego wieku 29 lat została przeprowadzona dlatego, że starsze kable wykazujące zwiększoną awaryjność były z czasem zastępowane nowymi. W populacji starszych kabli zostały więc jedynie takie, których awaryjność jest niewielka. Intensywność uszkodzeń kabli starszych niż 29 lat jest zaniżona, a funkcja intensywności uszkodzeń wykazuje minimalną tendencję wzrostową. Dla wariantu 2 intensywność uszkodzeń wzrasta szybciej.

Linie kablowe o izolacji polwinitowej

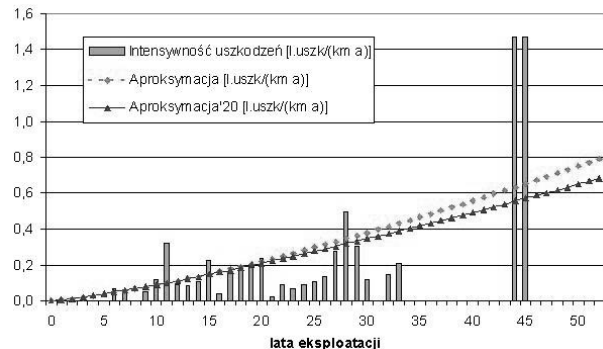
W przypadku linii kablowych o izolacji polwinitowej dysponowano mniejszym zbiorem danych statystycznych, ponieważ konstrukcje te wprowadzono do użytku znacznie później niż kable o izolacji papierowej. Analizowane dane obejmowały uszkodzenia z lat 1985 – 2004 (kable od 0 do 52 lat eksploatacji). Na podstawie statystyki, która obejmowała dane z 19 lat, wyznaczono analityczne funkcje intensywności uszkodzeń. Funkcje te zaprezentowano na rysunku 4, przedstawiając również rzeczywistą intensywność uszkodzeń stwierdzoną w latach 1985 – 2004.

Podobnie jak dla kabli o izolacji papierowej, analityczną postać funkcji intensywności uszkodzeń dla kolejnych lat eksploatacji wyznaczono również w dwóch wariantach:

- 1) wykorzystując dane o awaryjności wszystkich kabli w izolacji polwinitowej, bez względu na ich wiek; w tym przypadku uzyskano rozkład Weibulla o parametrach $\nu = 2,34$, $b = 15,26$,
- 2) wykorzystując dane o awaryjności jedynie tych kabli w izolacji polwinitowej, których wiek nie przekroczył wieku przeciętnego, (ok. 18 lat); w tym przypadku uzyskano rozkład Weibulla o parametrach $\nu = 2,23$, $b = 15,10$.

Dopasowanie funkcji intensywności uszkodzeń do danych o awaryjności kabli, których wiek nie przekroczył przeciętnego wieku (w tym przypadku blisko 20 lat) zostało przeprowadzone zgodnie z tym samym uzasadnieniem, co

w przypadku linii o izolacji papierowej. Starsze kable wykazujące zwiększoną awaryjność zastępowane były bowiem nowymi, a stąd w populacji kabli starszych niż 20 lat pozostają jedynie takie, których awaryjność jest niewielka. Wprowadza to zatem zakłócenia do statystyki awaryjności, zaniżając funkcję intensywności uszkodzeń. Uwzględniając powyższe założenie w ramach wariantu 2 uzyskano szybszy wzrost funkcji intensywności uszkodzeń.



Rys.4. Dyskretna postać funkcji intensywności uszkodzeń linii kablowej SN o izolacji polwinitowej oraz jej aproksymacje

Koszty zawodności

W funkcji celu (1) zadania optymalizacji wraz z intensywnością uszkodzeń występuje składnik kosztowy, wynikający z zawodności badanych obiektów oraz jej skutków. Ponieważ kryterium optymalizacyjnym w przypadku poszukiwania optymalnych terminów reinwestycji jest kryterium kosztu użytkowania obiektu, stąd koszty użytkowania obiektu uzależnione są od jego zawodności. W przypadku obiektów naprawialnych (w tym linii kablowych SN) oprócz kosztu zawodności należy znać również koszt inwestycyjny.

Koszty odnowy poawaryjnej dla obiektów naprawialnych można zapisać w postaci ogólnej jako:

$$(7) \quad k_z = \sum k_i$$

gdzie: k_z – jednostkowe koszty odnowy poawaryjnej, k_i – składowe koszty zawodności.

W przypadku rozważanych kabli SN koszt odnowy poawaryjnej powinien uwzględniać, co najmniej:

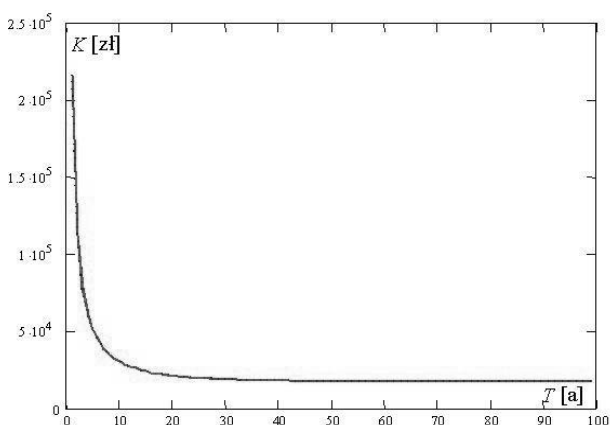
- k_1 – koszt lokalizacji uszkodzenia,
- k_2 – koszt elementów wykorzystanych do odnowy,
- k_3 – koszt transportu,
- k_4 – koszty usunięcia uszkodzenia,
- k_5 – koszt przywrócenia do ruchu,
- k_6 – koszt utylizacji elementu uszkodzonego lub jego części składowych,
- k_7 – koszty współzależności uszkodzeń (wpływu uszkodzenia na inne elementy układu),
- k_8 – koszty strat gospodarczych u odbiorcy z tytułu awarii
- k_9 – koszt odszkodowań dla odbiorcy,
- k_{10} – koszt wypłaty odszkodowań w przypadku porażenia,
- k_{11} – koszty niesprzedanej energii,
- k_{12} – koszty zwiększenia strat sieciowych u dostawcy,
- k_{13} – koszt utraty zaufania do dostawcy energii (utrata „marki”),
- k_{14} – koszt wypłaty roszczeń klientów.

Ocena tak wielu kosztów składowych nie jest prosta, a w przypadku niektórych z nich wręcz subiektywna. Można jednak przypuszczać, że istniejące dziś trudności z wypełnieniem powyższej funkcji konkretnymi wartościami, w miarę wzrostu świadomości znaczenia gospodarczego zawodności funkcjonowania urządzeń, doczekają się ścisłych tabelarycznych ocen i zestawień.

Wyniki optymalizacji

Na podstawie opracowanych funkcji intensywności uszkodzeń oraz kosztów zawodności przeprowadzono analizę optymalnych terminów reinwestycji dla linii kablowych SN (zachowując wprowadzony podział z uwagi na izolację). Posługując się funkcją celu (1), wyznaczono jej wartości w okresie eksploatacji T (traktowanym jako argument optymalizowanej funkcji). Zmieniając długość okresu T można określić minimum sumarycznych rocznych kosztów badanego obiektu. To minimum wyznacza rok eksploatacji, w którym koszty zawodności, związane z uszkodzalnością obiektów, przewyższają koszty reinwestycji. Jest ono jednoznaczne z optymalnym – z punktu widzenia kosztów – terminem reinwestycji.

Dla analizowanych linii kablowych o izolacji papierowej przebieg kosztów rocznych przedstawiono na rysunku 5.



Rys.5. Zdyskontowane łączne koszty odnowy dla linii kablowej SN o izolacji papierowej

Przebieg ten wyznaczono dla stopy dyskontowej równej $p = 0,1$ (10%). W rozpatrywanym okresie eksploatacji (do 100 lat) nie stwierdzono minimum funkcji $K(T)$. Wynika stąd, że przy danej funkcji intensywności uszkodzeń – niezależnie od wariantu (krzywe kosztów pokryły się) – nie występuje optymalny termin reinwestycji tych obiektów. Poza funkcją intensywności uszkodzeń znaczący wpływ na istnienie minimum funkcji celu ma stosunek kosztów odnowy poawaryjnej do kosztu inwestycyjnego. Dla linii kablowych SN został on określony w wysokości 0,066. Podobny przebieg funkcji kosztowej zarejestrowano dla linii kablowych w izolacji polwinitowej.

Niesatysfakcjonujące wyniki (brak minimum, czyli optymalnego terminu reinwestycji) prowadzą do wykonania analizy czułości uzyskanych wyników. Ma ona na celu wskazanie stabilności uzyskanego wyniku względem zmiennych parametrów zewnętrznych, do których można zaliczyć: funkcję intensywności uszkodzeń, koszty zawodności, koszty inwestycyjne nowych obiektów, wysokość stopy dyskontowej, bądź rozpatrywany horyzont czasowy okresu eksploatacji

Przeprowadzając analizę czułości dla linii kablowych SN o izolacji polwinitowej, przy wartości stopy dyskontowej 0,09 uzyskano już optymalny czas reinwestycji rzędu 98 lat, natomiast poprzez jej redukcję o 50% (w stosunku do wyjściowej) uzyskano czas rzędu 70 lat eksploatacji. Zwiększono również proporcję kosztu zawodności do kosztu inwestycyjnego w przedziale od 0,1 (151% wielkości wyjściowej) do 0,2 (ponad 300%). Takiemu przyrostowi proporcji k_z/K_I odpowiada zmniejszenie optymalnego czasu reinwestycji od 77 do 47 lat eksploatacji (przy stopie dyskontowej 0,1) oraz od 67 do 42 lat eksploatacji (przy stopie dyskontowej 0,08).

Podsumowanie

- Na podstawie wyznaczonych funkcji intensywności uszkodzeń określonych obiektów oraz założeń ekonomicznych dotyczących kosztów zawodności można przeprowadzić analizę optymalizacyjną związaną z określeniem optymalnego terminu reinwestycji, na przykład linii kablowych SN.
- Istotne jest dopasowanie analitycznej postaci ciągłej funkcji intensywności uszkodzeń do wyników empirycznych, gdyż może to decydować o rezultacie obliczeń optymalizacyjnych (szczególnie w przypadku niewielkich różnic między kosztami odnowy poawaryjnej i profilaktycznej).
- Racjonalizacja działań eksploatacyjnych, z uwagi na techniczne i ekonomiczne uzasadnienie konieczności przeprowadzania reinwestycji, może i powinna znaleźć zastosowanie w spółkach eksploatujących i zarządzających majątkiem sieciowym.

LITERATURA

- [1] Duda D.: Modelowanie procesów obsługi eksploatacyjnej wybranych elementów składowych sieci elektroenergetycznych. Praca doktorska, Gliwice 2003 r.
- [2] Duda D., Gacek Z.: Model strategii odnowień profilaktycznych linii kablowych SN przy okresowych kontrolach diagnostycznych. *Przegląd Elektrotechniczny - Konferencje 1'2003* ss. 89 – 92.
- [3] Grzesiak K., Kołodziejcki J., Netzel Z.: Badania trwałości obiektów technicznych. WNT, Warszawa 1968
- [4] Kopociński B.: Zarys teorii odnowy i niezawodności. PWN, Warszawa 1973
- [5] Sozański J.: Niezawodność i jakość pracy systemu elektroenergetycznego. WNT, Warszawa 1990
- [6] Stępień J.C.: Ocena funkcji niezawodności linii kablowych 15 kV. *Przegląd Elektrotechniczny - Konferencje 1'2003* ss. 199-202.

Autorzy: prof. dr hab. inż. Zbigniew Gacek, Politechnika Śląska, Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów, ul. Krzywoustego 3, 44-100 Gliwice, E-mail: zbigniew.gacek@polsl.pl;
Dr inż. Dominik Duda, Politechnika Śląska, Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów, ul. Krzywoustego 3, 44-100 Gliwice, E-mail: dominik.duda@polsl.pl;
Dr inż. Maksymilian Przygrodzki, Politechnika Śląska, Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów, ul. Krzywoustego 3, 44-100 Gliwice, E-mail: maksymilian.przygrodzki@polsl.pl;