

# Przyczyny powstawania uszkodzeń elektroenergetycznych linii kablowych oraz sposoby ich naprawy

JEL: L94 DOI: 10.24136/atest.2018.413

Data zgłoszenia: 19.11.2018 Data akceptacji: 15.12.2018

*W artykule omówiono problematykę lokalizacji miejsca uszkodzenia, na skutek zwarć i przerw zupełnych jak i zwarć i przerw niezupełnych, w kablach elektroenergetycznych. Przedstawiono kilka metod lokalizacyjnych, ich porównanie i sposoby zastosowania. Wyszczególniono i przedstawiono najczęstsze przyczyny uszkodzeń lokalizowanych kabli, ich rodzaje i sposoby naprawy. Większość metod sprawdza się w przypadku zastosowania przynajmniej trzech metod lokalizacyjnych łącznie. Przedstawione w artykule sposoby naprawy wykrytych uszkodzeń są sposobami praktycznymi, wykonywanymi na co dzień przez monterów i konserwatorów.*

**Słowa kluczowe:** izolacja powłoki kabla, kabel elektroenergetyczny, przebiecia, zwarcia.

## Wstęp

Kable elektroenergetyczne pełnią bardzo istotną rolę w systemie zapewnienia ciągłości zasilania maszyn i urządzeń [1], [4], [5], [10] oraz [14]. Wiele linii kablowych ma za sobą kilkudziesięcioletni okres eksploatacji, co sprawia, że cechuje je wyższy wskaźnik awaryjności. Z tego względu należy dążyć do wymiany wyeksploatowanych linii kablowych, w pierwszej kolejności tych o najgorszym stanie technicznym. Wobec powyższych stwierdzeń bardzo ważne staje się dokonanie prawidłowej oceny stanu kabla wraz z wytypowaniem odcinków szczególnie zagrożonych awarią. Przerwy w zasilaniu mogą powodować straty produkcyjne oraz zagrożenia związane z brakiem zasilania obiektów podstawowych i najważniejszych struktur gospodarczych miasta, województwa czy nawet całego kraju. Powyższe względy sprawiają, że istotne staje się zagadnienie prawidłowej oceny stanu technicznego linii kablowej. Ocena taka powinna opierać się na badaniach diagnostycznych pozwalających wykryć i zlokalizować defekty mogące w niedługim czasie doprowadzić do awarii. Konieczna jest przy tym znajomość mechanizmów prowadzących do degradacji izolacji kabla, skutków tego starzenia oraz technik lokalizacyjnych pozwalających na wykrycie miejsc osłabionych.

Uszkodzenia pojawiające się w kablach elektroenergetycznych można lokalizować wieloma różnymi metodami [2], [6], [9] oraz [10]. Wyniki pomiarów nie są zazwyczaj wystarczająco jednoznaczne i dokładne jak wyniki pomiarów wielkości fizycznych. Najlepsze rezultaty można osiągnąć dysponując kilkoma miernikami, opartymi na różnych metodach pomiarowych. W trakcie eksploatacji kabli elektroenergetycznych niskiego, jak i średniego napięcia, często występują uszkodzenia izolacji zewnętrznej, zwarcia z ziemią i zwarcia międzyfazowe. Dostępne na rynku przyrządy zazwyczaj bazują na trzech metodach wykrywania uszkodzeń. Podstawowa z nich polega na pomiarze odbicia impulsów niskonapięciowych reflektometru (TDR). Przyrząd generuje wtedy impulsy, a następnie analizowane są ich odbicia pojawiające się w miejscu uszkodzenia kabla. Dzięki znajomości szybkości propagacji impulsów w kablu oraz czasu od ich wysłania i powrotu, w sposób automatyczny określa się odległość do miejsca uszkodzenia. Do pozytywów takiego rozwiązania

należy zaliczyć łatwe i szybkie lokalizowanie miejsca usterki. Nie mniej ważny pozostaje pomiar bezpiecznym napięciem. Kolejną metodą, którą używa się przy wykrywaniu uszkodzeń w kablach, jest odbicie impulsów niskonapięciowych od łuku (ARM – Arc Reflection Method). Metodę tą najczęściej uwzględnia się w miejscach, gdzie nie ma możliwości zastosowania reflektometru. Metoda opiera się na wysłaniu impulsu o dużej energii, który powoduje rozpalenie łuku elektrycznego w miejscu uszkodzenia. W następnej kolejności reflektometr wysła niskonapięciowe impulsy, odbijane od palącego się łuku. Jeżeli rezystancja łuku przekracza  $200\Omega$ , metoda odbicia od łuku nie jest efektywna. Stąd też uwzględnia się wówczas metodę impulsu prądowego (Surge IC). W tym przypadku generowany jest impuls o dużej energii przy napięciu sięgającym 16kV. Powoduje on zapalenie łuku elektrycznego w miejscu uszkodzenia, przy czym obserwowane są stany nieustalone (gasnące oscylacje) przebiegu prądu. Do obwodu włączany jest sprzęg, który pełni rolę bocznika. Sygnał, pozyskany dzięki niemu, jest analizowany i rejestrowany.

Przyrządy do wykrywania uszkodzeń w kablach najczęściej używane są w energetyce. Przede wszystkim chodzi o diagnostykę kabli niskiego napięcia. Stąd też niektóre modele za pomocą specjalnych filtrów separujących mogą być stosowane przy badaniach kabli pod napięciem. Przyrządy tego rodzaju są używane chociażby do wykrywania przerw w przewodach aluminiowych, zwarć międzyfazami, jak również stanu połączeń transformatorów. Niejednokrotnie zastosowanie obejmuje też wykrywanie nielegalnych podłączeń do linii elektroenergetycznych. Przyrządy do lokalizowania uszkodzeń w przewodach cieszą się dużą popularnością w diagnostyce systemów telewizji przemysłowej. Przede wszystkim chodzi o wiarygodną ocenę ciągłości przewodów pod kątem nacięć, zagięć, zwarć itp. Oczywiście lokalizatory uszkodzeń kabli są nieocenione w telekomunikacji.

## 1. Przyczyny powstawania wykrytych uszkodzeń linii kablowych wszystkich napięć [2], [6], [10], [11] oraz [14]

Do głównych czynników powodujących powstawanie uszkodzeń linii kablowych można zaliczyć:

- czynniki elektryczne takie jak przepięcia, wyładowania elektryczne i elektrostatyczne, przeciążenia czy nieprawidłowy pomiar wartości właściwości izolacji;
- uszkodzenia powodowane wadliwym wykonaniem kabla, głównie wady w konstrukcji kabli, żył czy izolacji;
- wpływ czynników środowiska zewnętrznego eksploatowanego kabla, do których zaliczyć można wpływ zmiennej temperatury środowiska i klimatu, zapylenie, zawilgocenie i wszelkie czynniki chemiczne;
- uszkodzenia powstałe przy zbyt długiej eksploatacji, do których zaliczyć można degradację i proces starzenia się izolacji, a także procesy przemian chemicznych oddziaływujących na eksploatowany kabel;
- czynniki atmosferyczne, czyli opady deszczu, ogólne zawilgocenie podłoża, na którym kabel jest eksploatowany, wiatr, wyładowania atmosferyczne czy oddziaływanie magnetyczne burz słonecznych;

- inne czynniki takie jak szkodliwe działanie zwierząt i gryzoni, błędna eksploatacja kabla, niewłaściwa instalacja czy uszkodzenia mechaniczne.

Większość uszkodzeń kabli powstaje na skutek oddziaływania wielu czynników naraz lub kolejno po sobie. Na kable pracujące w glebie jednym z poważniejszych czynników powstawania uszkodzeń są przesunięcia gruntów na trasie kabla, które poddają pewien odcinek danego kabla rozciąganiu a inny zgniataniu. Ruchy tego typu występują najczęściej na terenach aktywnych górniczo, na sztucznie stworzonych nasypach gruntowych, na terenach o charakterze górskim i wyżynnym oraz na terenach aktywnych sejsmicznie. Silne naprężenia gruntu powodują przesunięcia dielektryka w kablu co prowadzi do przerwania izolacji oraz zerwania muf kablowych i innych połączeń kabli. Przesunięcia dielektryka są szczególnie niebezpieczne dla kabli w izolacji papierowo-olejowej.

Do innych rodzajów uszkodzeń kabli zaliczyć można uszkodzenia mechaniczne (Rys. 1.), elektrolityczne i korozyjne. Uszkodzenia tych typów powodują niszczenie metalowych powłok kabli w izolacji papierowo-olejowej i przenikanie wilgoci, co prowadzi do licznych uszkodzeń wewnątrz kabla jak i uszkodzeń zewnętrznej powłoki izolacyjnej kabli każdego typu. W kablach z izolacją termoplastyczną wykonanych z polwinilu lub polietylenu wnikanie wilgoci powoduje nadto uszkodzenie powłoki uszczelniającej i powstawanie drzewienia wodnego. Poprzez erozję dielektryka na skutek wyładowań niepełnych powstają wżery w izolacji kabla. Uszkodzenia takie charakteryzują się dużą rezystancją przejścia. Aby wcześniej wykryć uszkodzenia tego typu wykorzystuje się próby napięciowe.



Rys. 1. Kabel 240mm<sup>2</sup> czterożyłowy aluminiowy z izolacją termoplastyczną nawinięty na bęben z widocznym przedarciem izolacji zewnętrznej [fot. Opracowanie własne autorów artykułu]

Wyładowania niepełne wykrywa się metodami opartymi na zjawiskach świetlnych, akustycznych bądź elektrycznych. W diagnostyce kabli wykorzystuje się metody elektryczne wykorzystujące lokalne zakłócenie elektryczne w postaci przejściowego zwarcia małej objętości izolacji. Zjawisko to powoduje chwilową zmianę pojemności badanego obiektu, mierzalną przy wykorzystaniu odpowiednio czułych przyrządów pomiarowych. Czas trwania pojedynczego impulsu wyładowania jest rzędu nanosekund i ma charakter sygnału szerokopasmowego o górnej częstotliwości granicznej do 1GHz.

Poziom wyładowań niepełnych określany jest za pomocą pomiaru czułym układem detekcji impulsu napięcia na zaciskach obiektu badanego  $\Delta UC_3$ , który jest związany z wyładowaniem (1):

$$\Delta UC_3 = \frac{q_a}{C_3} \approx \frac{q_w \times C_2}{C_1} \times C_3 \quad (1)$$

Wartości pojemności  $C_1$  i  $C_2$  nie są znane. Nie ma możliwości pomiaru ani obliczenia napięcia  $U_z$  i ładunku  $q_w$ . Poziom wyładowań niepełnych charakteryzuje ładunek pozorny  $q_w$  (2c), który odpowiada ładunkowi między zaciskami badanego obiektu i który spowodowałby podobne wskazania przyrządów pomiarowych jak impuls wyładowania niepełnego. W rzeczywistych warunkach zachodzi:

$$C_3 \gg C_1 \gg C_2 \quad (2a)$$

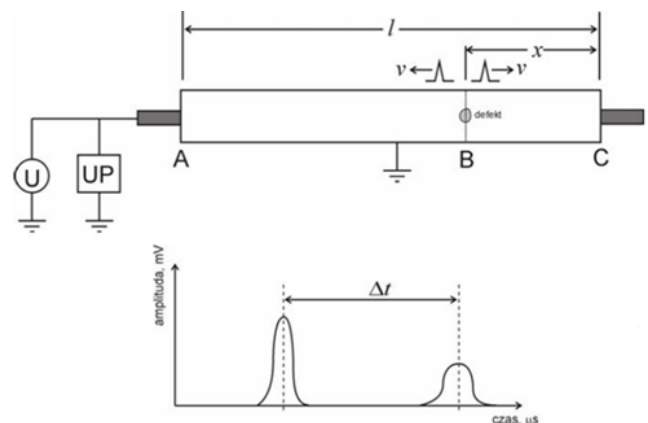
$$q_a = \frac{C_1 \times C_2}{C_1 + C_2} = \frac{q_w \times C_2}{C_1} \quad (2b)$$

$$q_w = \Delta U_w \times C_1 \quad (2c)$$

gdzie  $\Delta U_w$  (3) jest różnicą napięcia zapłonu  $U_z$  i gaszenia  $U_g$  wyładowania:

$$\Delta U_w = U_z - U_g \quad (3)$$

Diagnostyka wymaga pomiaru wyładowań niepełnych przy najwyższym napięciu jakie może się pojawić w systemie. Jeżeli przy tym napięciu nie wykryje się żadnych wyładowań, to można uznać, że w najbliższej przyszłości wyładowania niepełne nie powinny być przyczyną uszkodzenia. Zastosowanie przy pomiarach wyładowań niepełnych napięcia dwu lub trzykrotnie przewyższającego napięcie znamionowe izolacji może rodzić obawy o skutki badań jednak doświadczenia wskazują, że bardzo rzadko dochodzi do uszkodzeń podczas testów i pomiary wyładowań niepełnych uznawane są za nieniszczące szczególnie jeżeli trwały krótko. Oprócz poziomu wyładowań niepełnych bardzo ważnymi wielkościami są napięcie początkowe, czyli napięcie, przy którym pojawiają się wyładowania niepełne, oraz napięcie gaśnięcia wyładowań niepełnych. Niewielka wartość napięcia początkowego oznacza pojawianie się wyładowań niepełnych przy niewielkich przepięciach lub przy napięciu roboczym, co w przypadku kabli o izolacji z polietylenu prowadzi do awarii. Sygnał emitowany przez źródło wyładowania rozchodzi się w obydwie strony kabla. Znając długość kabla i prędkość rozchodzenia się fali można określić miejsce defektu poprzez pomiar różnicy czasów dotarcia do czujnika fali bezpośredniej i odbitej od przeciwnego końca kabla. Pewne informacje dotyczące rodzaju defektu oraz jego położenia można też uzyskać na podstawie analizy kształtu impulsu (Rys. 2.). W kablu, szybkość rozchodzenia się impulsu, czyli propagacji, uzależniona jest od rodzaju materiału wykonania izolacji między żyłami i charakteryzuje się współczynnikiem liczbowym, stanowiącym ułamek szybkości rozprzestrzeniania się fali elektromagnetycznej w próżni.



Rys. 2. Propagacja impulsu wyładowania niepełnego w kablu [9]

Przystępując do badania kabla określa się jego impedancję falową oraz współczynnik propagacji. Wartość impedancji zależy od typu kabla i jest inna dla przewodu współosiowego, przewodu instalacyjnego czy kabla energetycznego. Dwa kable o tym samym materiale wykonania izolacji, wykonane przez różnych producentów mogą charakteryzować się różnymi wartościami tego samego współczynnika. Przykładowe wartości współczynnika propagacji dla wybranych rodzajów dielektryka:

- 0,50-0,56n papier nasycony olejem;
- 0,64n polietylen wypełniony pianką;
- 0,67n polietylen;
- 0,71n teflon;
- 0,94-0,98n powietrze.

Właściwe ustalenie współczynnika propagacji jest istotne przy wyznaczaniu odległości do miejsca uszkodzenia. Współczynnik propagacji uzależniony jest od:

- rodzaju zastosowanej izolacji;
- geometrii kabla;
- okresu eksploatacji kabla.

Po określeniu parametrów kabla ustala się parametry układu pomiarowego. W pierwszej kolejności wybiera się odpowiedni zakres pomiarowy uwzględniając fakt, że emitowany impuls ulega tłumieniu w kablu, w miarę oddalania się od przyrządu zmniejsza się jego amplituda. Poziom tłumienia uzależniony jest od:

- typu kabla;
- okresu eksploatacji;
- jakości połączeń występujących wzdłuż jego toru.

Ważną funkcję w procesie detekcji uszkodzeń pełnią układy rejestracji. Stosuje się je jako układy autonomiczne lub układy wyposażone w automatykę zabezpieczeń. Najlepiej spełniają swą rolę układy rejestratorów zakłóceń, które są w stanie zapisać chwilowe wartości prądów oraz napięć fazowych, a także sygnałów automatyki zabezpieczeń związanej z działaniem urządzeń zainstalowanych na obydwu końcach linii lub urządzenia systemowego. Dzięki zapisanych w pamięci urządzenia, wartości napięć i prądów ustala się rodzaj uszkodzenia i jego przebieg czasowy. Rejestrowane są wartości prądów i napięć chwile przed wystąpieniem uszkodzenia za pomocą zwłoki czasowej urządzenia zainstalowanego na linii. W ten sposób można określić moment wypadkowy uszkodzenia i przewidzieć jego rozwój. Wartość napięć i prądów to podstawa wymagana do obliczenia odległości od miejsca uszkodzenia.

## 2. Rodzaje występujących uszkodzeń w liniach kablowych [6], [9] [10] oraz [11]

Uszkodzenie izolacji powłoki kabla ma istotne znaczenie w procesie eksploatacji linii kablowej i traktowane jest na równi z lokalizacją uszkodzenia izolacji między przewodem roboczym a ekranem. Do najczęstszych uszkodzeń kabli zaliczyć można:

- uszkodzenia mechaniczne spowodowane czynnikami zewnętrznymi;
- proces starzenia się izolacji;
- nieprawidłowy montaż, przekroczenie dopuszczalnych naprężeń, zbyt mały promień zginania, błędy montażowe głowic i muf;
- wady fabryczne izolacji;
- częste przekraczanie temperatur dopuszczalnych;
- oddziaływanie przepięć.

Z wyjątkiem uszkodzeń mechanicznych (Rys. 3.), wyżej wymienione czynniki powodują stopniową degradację izolacji, przy czym określenie stopnia degradacji oraz miejsca jej występowania stwarza możliwość uniknięcia lub ograniczenia czasu trwania niepożądanego przerwy w zasilaniu.



Rys. 3. Mechaniczne uszkodzenia kabla skręcanego z wielu cienkich żył aluminiowych [fot. Opracowanie własne autorów artykułu]

Badania diagnostyczne pozwalają na ocenę stanu izolacji kabla, a także monitorowanie procesu jej starzenia, wykonuje się je aby:

- oszacować trwałość kabla;
- potwierdzić lub odrzucić dalszą przydatność kabla do eksploatacji;
- sprawdzić czy kabel został wyprodukowany oraz zainstalowany prawidłowo.

Zjawiskiem występującym w kablach o izolacji z polietylenu jest tworzenie się drzewek wodnych, które są największym zagrożeniem tych kabli, szczególnie wykonanej z polietylenu usieciowanego. W przypadku tych kabli, wskutek łącznego oddziaływania wody i pola elektrycznego może rozwijać się drzewienie wodne, czyli degradacja polimeru rozwijająca się w strukturę przypominającą krzak lub drzewo. Drzewienie wodne zmniejsza wytrzymałość elektryczną polietylenu, ale przy normalnym użytkowaniu kabla rozwija się bardzo powoli. Gwałtowny rozwój drzewienia wodnego i jego przekształcenie się w drzewienie elektryczne może być wynikiem podania izolacji podwyższonemu napięciu. Do procesów powodujących, w szczególności stopniu, pogorszenie stanu izolacji, a jednocześnie będących symptomem negatywnych zjawisk należą wyładowania niezupełne. Czyli lokalne wyładowania elektryczne, które tylko częściowo zwierają izolację. Dotyczy to głównie kabli o izolacji z polietylenu usieciowanego (XLPE), w których stosunkowo niewielka intensywność wyładowań niezupełnych, w krótkim czasie, może doprowadzić do uszkodzenia. Wyładowania te są następstwem miejscowej koncentracji naprężeń elektrycznych w izolacji lub na jej powierzchni i powstają zwykle w miejscach wtrąceń gazowych lub w pobliżu ostrych krawędzi.

Linie kablowe niskiego jak i średniego napięcia są dość awaryjnym układem sieci elektroenergetycznych rozdzielczych. Statystyki awaryjności wykazują, że uszkodzenia linii kablowych występują często i oscylują w granicach od 16 do 20 uszkodzeń na każde 100km kabla w przeciągu 12 miesięcy. Uszkodzenia występują na trasie kabla co stanowi 70% wszystkich wykrywanych uszkodzeń. Reszta uszkodzeń przypada na osprzęt kablowy i jego wadliwe zainstalowanie. Około 5% uszkodzeń przypada mufom kablowym. Jednostkowe parametry normalnej pracy linii kablowej są niemożliwe do zbadania. Każda zmiana dowolnego parametru powodować może powstanie nieciągłości kabla i prowadzi do jego uszkodzenia.

Dość często lokalizowanymi uszkodzeniami linii kablowych są:

- zwarcia jednofazowe;
- zwarcia dwufazowe;
- zwarcia trójfazowe;
- zwarcia trójfazowe z ziemią;
- zwarcia dwufazowe z ziemią;
- przerwy w jednej lub wielu fazach;
- przerwy z rezystancją poprzeczną;
- przerwy z rezystancją podłużną przejścia;
- uszkodzenia powłoki antykorozyjnej;
- zwarcia przemijające.

Zwarcia przemijające są skokowe lub występują jako przebicia po przekroczeniu napięcia znamionowego kabla. Podczas ubytku syciwa lub masy bitumicznej w mufach i głowicach kabli pojawia się powietrze, którego wystąpienie prowadzi do przeskoków. Po wyłączeniu napięcia powietrze zostaje dejonizowane, a rezystancja izolacji danego kabla jest duża. Kolejne przebicia zmniejszają wartość wytrzymałości izolacji poprzez jej zwęglenie i prowadzą do dalszych uszkodzeń kabla. Zmniejszenie rezystancji przejścia umożliwia wstępną lokalizację miejsca uszkodzenia z wykorzystaniem metod niskonapięciowych. Około 3% wszystkich uszkodzeń zawiera się jako zwarcia przemijające. Występujące uszkodzenia złożone czyli uszkodzenia obejmujące więcej uszkodzeń prostych występujących naraz lub kolejno po sobie są rzadko spotykane. Zwarcia złożone to głównie zwarcia jednofazowe z przerwą na zyle i zwarcia doziemne podwójne.

Występujące zwarcia dzielą się na bezpośrednie i pośrednie. Zwarcia pośrednie określa się jako zwarcie z rezystancją przejścia, a bezpośrednie jako zwarcia galwaniczne. Zwarcia przemijające i zwarcia pośrednie z dużą rezystancją wykrywa się przy użyciu wstępnej lokalizacji metodami wysokonapięciowymi oraz przy zastosowaniu kondycjonowania miejsca uszkodzenia w celu obniżenia rezystancji przejścia i umożliwienia zastosowania metod niskonapięciowych, głównie metody niskonapięciowej reflektometru.

Uszkodzenia można podzielić na:

1. Uszkodzenia występujące ze względu na wynik lokalizacji wstępnej urządzeń elektroenergetycznych czy przewodów, które występują jako:

- zwarcia dwufazowe;
- zwarcia trójfazowe;
- zwarcia jednofazowe zwane zvarciami doziemnymi;
- uszkodzenia ekranów osłonowych lub powłok ochronnych;
- zwarcia żyły fazowej z ziemią;
- rozwarcia żyły fazowej;
- rozwarcia wielu żył.

2. Zwarcia jednofazowe wywoływane są bezpośrednim połączeniem żyły roboczej z ziemią lub innej części obwodu.

3. Zwarcia dwufazowe, w poczet których zaliczyć można:

- zwarcia dwufazowe doziemne występujące poprzez połączenie dwóch faz eksploatowanego kabla z ziemią w jednym punkcie danego układu;
- zwarcia doziemne podwójne występujące w miejscu zwarcia dwóch faz z ziemią ale oddalonych od siebie;
- zwarcia dwużyłowe zwane międzyprzewodowymi występujące przy bezpośrednim połączeniu dwóch przewodów przewodzących lub innej części danego obwodu.

4. Zwarcia wielofazowe, najczęściej trójfazowe, w których skład wchodzi:

- zwarcia trójfazowe z ziemią w obwodzie z uziemionym punktem neutralnym;
- zwarcia potrójne z ziemią w obwodzie z uziemionym punktem neutralnym;
- zwarcia doziemne potrójne, których miejsca zwarcia trzech faz z ziemią są od siebie oddalone;
- zwarcia trójfazowe występujące jako zwarcia żył trzech różnych faz z ziemią w jednym punkcie danego układu;
- zwarcia trójprzewodowe powstające na skutek bezpośredniego połączenia trzech przewodów czynnych przewodzących lub innej części danego obwodu napięciowo-prądowego przy trzech różnych fazach.

Podział zvarc ze względu na czas wystąpienia i czasu trwania uszkodzenia:

- uszkodzenia zmienne w czasie;
- uszkodzenia losowe;

- uszkodzenia przemijające;
- uszkodzenia rozwijające się;
- uszkodzenia trwałe.

Uszkodzenia trwałe to uszkodzenia, których parametry nie podlegają oddziaływaniu czasu, nie są zmienne w czasie lub nie ulegają zmianie podczas badań i pomiarów. Do uszkodzeń trwałych należą:

- rozwarcia jednej lub wielu żył;
- zwarcia nisko i wysokooporowe z ziemią;
- nadwyrężenia izolacji;
- zawarcia bezpośrednie.

Uszkodzenia zmienne w czasie charakteryzują się zmianą parametrów w dość krótkim czasie od wystąpienia lub w czasie wykonywanych pomiarów. Występowanie tych zvarc podczas wykonywania pomiarów okresowych lub lokalizacyjnych powodowane są poprzez wartość napięcia pomiaru lub poprzez procesy chemiczne i fizyczne, które zachodzą w punkcie uszkodzenia w trakcie wykonywanego pomiaru.

Rozwijające uszkodzenia mogą wystąpić poprzez przeobrażenie się wcześniej występującego uszkodzenia w uszkodzenie groźniejsze. Do tego typu uszkodzeń zaliczyć można:

- zwarcia jednofazowe doziemnie zmieniające się w zwarcia międzyfazowe lub międzyfazowe z ziemią;
- uszkodzenia doziemienia, które prowadzą do uszkodzeń w innych oddalonych miejscach trasy kabla lub sieci;
- uszkodzenia wysokooporowe prowadzące do uszkodzeń niskomomowych.

Rozwijanie się uszkodzeń powodowane jest wzrostem temperatury w miejscu uszkodzenia kabla na skutek występowania prądów zwarciovych, co prowadzi do przyspieszonego procesu starzenia się izolacji kabla. Proces degradacji izolacji kabla skutkuje dalszym rozwijaniem się uszkodzenia.

Uszkodzenia losowe pojawiają się w sposób przypadkowy w niezależnych odstępach czasowych z różnym natężeniem i w trudnych do sprecyzowania warunkach pracy linii. Jest praktycznie niemożliwe zlokalizowanie uszkodzeń tego typu.

Przemijającymi uszkodzeniami nazywa się uszkodzenia obejmujące pojedyncze nieregularnie występujące skoki wyładowań lub wyładowania łukowe ciągle. Uszkodzenia tego typu charakteryzują się trwałością i występowaniem przy określonym napięciu. Uszkodzenia mogą być niepowtarzalne i nie występować po wyłączeniu napięcia zasilającego dany kabel lub sieć. Wyładowania łukowe i przeskoki występują w miejscach gdzie doszło do ubytku izolacji, do których dostaje się powietrze będące katalizatorem łuku lub inny gaz. Po wyłączeniu zasilania linii dochodzi do dejonizacji powietrza, a powtórne załączenie napięcia zasilania nie koniecznie spowoduje wystąpienie wyładowania w tym samym miejscu lub w ogóle, a w miejscu uszkodzenia zaobserwować można odbudowanie się izolacji. Odbudowanie izolacji dzieli się na odbudowanie przejściowe i trwałe. W przypadku odbudowania trwałego występowanie tego zjawiska zachodzi poprzez wysoką temperaturę wyładowania powodującą topienie izolacji i końcowe zalanie uszkodzonego miejsca stopioną izolacją. Ze względu na charakterystyczny przebieg w czasie uszkodzenia przemijające są trudne do wykrycia i sporo ich część ewoluuje w uszkodzenia trwałe zanim będzie możliwe ich zlokalizowanie. Do uszkodzeń przemijających zalicza się także uszkodzenia łukowe w liniach napowietrznych powstające na skutek oddziaływania płactwa, a wyłączenie zasilania linii powoduje przerwanie tego zwarcia.

Przeskoki w stałej izolacji lub powstające na jej powierzchni skutkują zmniejszeniem się wytrzymałości napięciowej izolacji kabla. Wynika to z procesu nadpalania izolacji powstającego poprzez występowanie wysokich temperatur pojawiających się w czasie wyładowania. Rezystancja w miejscu wyładowania gwałto-

wanie się zaniża dzięki czemu uszkodzenia tego typu można zlokalizować metodami niskonapięciowego reflektometru lub poprzez pomiar metodami impulsowymi i pomiary rezystancji.

W liniach kablowych uszkodzenia przemijające występować mogą tylko w osprzęcie zainstalowanym na trasie kabla i mogą być pojedyncze lub występować wielokrotnie.

Uszkodzenia pojedyncze charakteryzują się miejscem występowania we wszystkich trzech rodzajach sieci elektroenergetycznych. Uszkodzenia wielokrotne są ewolucją uszkodzeń pojedynczych powodujących przebiegi i prowadzą do dalszych uszkodzeń linii kablowej w innych miejscach. Głównym następstwem wyżej opisanych uszkodzeń jest powstawanie uszkodzeń doziemnych innych przewodów czynnych roboczych prowadzących do zwarcia międzyfazowego z ziemią. Układy automatyki zabezpieczeniowej zapobiegają powstawaniu kolejnych uszkodzeń w liniach kablowych, napowietrznych i sieciach rozdzielczych poprzez natychmiastowe wyłączenie zasilania po odnotowaniu wystąpienia tych uszkodzeń.

Zastosowanie układów kompensujących prądy pojemnościowe w sieciach średniego napięcia pozwala ograniczyć szkodliwy wpływ występowania zwarcia doziemnych. Ograniczenie prądu zwarciovego i skracanie czasu trwania zwarcia jest bardzo pożądane i prowadzi do zmniejszenia skutków występowania uszkodzeń. Zbytne skracanie czasu trwania zwarcia utrudnia jego dokładną lokalizację.

Uszkodzenia podlegają podziałowi związanemu z wartością rezystancji i charakterem miejsca występowania tego uszkodzenia. Rozróżnić można:

- rozwarcia występującej w przewodzie na poprzez pęknięcie bądź zerwanie przewodu na skutek oddziaływania na przewód siły wzdłużnej;
- uszkodzenia zależne od impedancji linii gdzie rezystancja uszkodzenia uzależniona jest od wartości izolacji na skutek wcześniejszych wylądowań łukowych;
- zwarcia metaliczne bezpośrednie powstające poprzez małą wartość rezystancji w punkcie uszkodzenia. Rozróżnia się zwarcia metaliczne wielofazowe z ziemią i zwarcia metaliczne pomiędzy pojedynczymi żyłami kabla z ziemią;
- zwarcia występujące poprzez większą wartość rezystancji w miejscu zwarcia od rezystancji w miejscu zwarcia bezpośredniego;
- uszkodzenia przerywane powstałe wskutek oddziaływania czynników zewnętrznych przez dany okres czasu;
- uszkodzenia powstające w punkcie występowania uszkodzenia poprzez rezystancję przejścia uzależnioną od polaryzacji napięciowej;
- uszkodzenia zwiększające rezystancję przewodu poprzez większą wartość rezystancji od średniej wartości rezystancji danego przewodu;
- uszkodzenia z wartością rezystancji przewyższającą wartość impedancji falowej;
- uszkodzenia przemijające powstające na skutek niedawnego przeskoaku bądź wylądowania łukowego;
- uszkodzenia powstałe na skutek zmian właściwości elektrycznych zmiennych w czasie w danym punkcie pomiarowym poprzez szkodliwe oddziaływanie czynników chemicznych i fizycznych.

Uszkodzenia charakteryzują się głównie złożonością, ciężko je skatalogować i składają się na około 20% wszystkich występujących uszkodzeń, a także spowodują błąd działania automatyki zabezpieczeniowej.

Na poniższych rysunkach przedstawiono przykładowe zlokalizowane uszkodzenia kable elektroenergetycznych ziemnych.



Rys. 4. Proces starzenia się izolacji [fot. Opracowanie własne autorów artykułu]

Rysunek 4. obrazuje proces degradacji izolacji powstały na skutek wcześniejszego uszkodzenia zewnętrznej izolacji kabla przez montera.



Rys. 5. Mechaniczne uszkodzenie kabla 1 [fot. Opracowanie własne autorów artykułu]

Podobnie jak na poprzednim rysunku, uszkodzenie wynika z błędów monterskich spowodowało całkowite przerwanie kabla (Rys. 6.):



Rys. 6. Mechaniczne uszkodzenie kabla 2 [fot. Opracowanie własne autorów artykułu]

Rys. 6. przedstawia kabel poddany sile zgniatającej co spowodowało przerwanie zewnętrznej powłoki izolacyjnej.



Rys. 7. Uszkodzenie zewnętrznej powłoki kabla zasilającego oświetlenie uliczne (Opracowanie własne autorów artykułu)

Rys. 7. przedstawia proces przepalenia izolacji wewnętrznej żyły roboczej i zewnętrznej izolacji kabla zasilającego na skutek podwyższonej temperatury w miejscu uszkodzenia.

**3.Sposoby naprawy wykrytych uszkodzeń [2], [9], [10] oraz [9]**

Po zlokalizowaniu miejsca uszkodzenia w kablu i określeniu jego rodzaju należy przystąpić do niezwłocznego usunięcia awarii i przywrócenia zdolności przesyłowych linii kablowej. W tym celu stosuje się:

- specjalistyczne taśmy;
- mufy i rury termokurczliwe;
- gotowe zestawy zalewane żywicą lub masą bitumiczną.

Zasady bhp pozwalają na takie prace tylko wykwalifikowanym pracownikom na ustne lub pisemne polecenie osoby upoważnionej. Wszelkie prace naprawcze linii kablowej wykonuje się po wyłączeniu linii spod napięcia, zabezpieczeniu jej przed załączeniem i założeniu uziemienia roboczego. Metodą zapewniającą niezawodności pracy linii elektroenergetycznych kablowych jest wymiana uszkodzonych fragmentów na nowe, co czasami jest niemożliwe. Należy dążyć do minimalizacji kosztów przy maksymalizacji niezawodności linii kablowych. Najlepiej wyczekać awarii, a w razie jest wystąpienia dokonać szybkiej naprawy lub wymiany uszkodzonego fragmentu. Powtarzające się awarie powodują powstawanie dodatkowych kosztów eksploatacji linii. Połączenie żył odznacza się małą rezystancją i wytrzymałością mechaniczną. Aby zagwarantować odpowiednią wytrzymałość elektryczną, w miejscu połączenia, powinny być odtworzone wszystkie pozostałe warstwy kabla. W procesie naprawy kabla wykorzystuje się zbiór elementów wyposażenia mechanicznego, zwanego osprzętem kablowym przeznaczonym do wykonywania i ochrony połączeń między kablami, rozgałęziania i zakańczania kabli i do przyłączania kabli do urządzeń. Łączenie kabli elektroenergetycznych jest czynnością pracochłonną.

Połączenia między żyłami kabli wykonuje się w celu zapewnienia bezpiecznego i pewnego styku. Niestarannie wykonane połączenie jest słabym punktem układu i prowadzi do niewłaściwego działania, nadmiernego nagrzewania i do porażenia prądem elektrycznym. Żyły robocze kabla łączą się przez:

- spawanie;
- zaprasowywanie;
- lutowanie;
- przy pomocy złączy śrubowych.

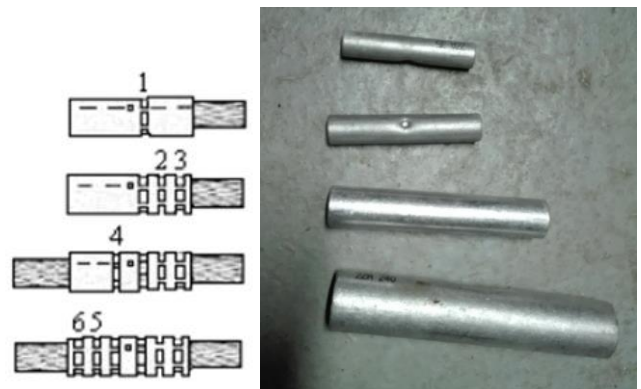
Mufy kablowe służą do połączenia dwóch lub większej ilości kabli w celu zapewnienia wytrzymałości mechanicznej i elektrycznej połączenia nie obniżając wytrzymałości samego kabla. Konstrukcja muf zapewnia elektryczne połączenie żył oraz metalowych powłok kabla, odpowiednią izolację połączeń, ochronę przed uszkodzeniami i wnikaniem wilgoci. Rozróżnić można trzy rodzaje muf:

- przelotowe, do łączenia dwóch końców kabla;
- rozgałęźne, do tworzenia odgałęzień;
- przejściowe, do łączenia dwóch różnych rodzajów kabli.

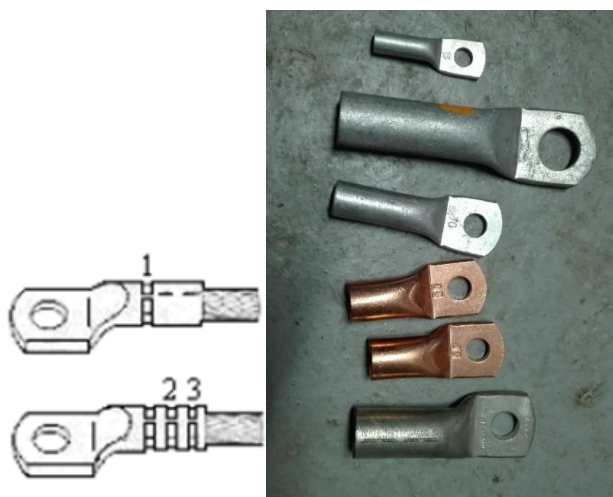
Głowice kablowe (Rys. 8.) znajdują zastosowanie przy przyłączaniu kabli do urządzeń i do zakańczania kabli. Zapewniają wytrzymałość elektryczną i mechaniczną zakończenia oraz ochronę izolacji końca kabla od czynników środowiskowych. Ze względu na warunki pracy głowice dzieli się na napowietrzne i wewnętrzne. Końcówka kablowa służy do metalicznego połączenia końca żyły roboczej kabla z zaciskiem urządzenia elektrycznego.



Rys. 8. Głowice kablowe [fot. Opracowanie własne autorów artykułu]



Rys. 9. Kolejność zaprasowywania zacisków tulejkowych i ich przykłady [fot. Opracowanie własne autorów artykułu]



**Rys. 10.** Kolejność zaprasowania końcówek kabli i przykłady końcówek tulejkowych [fot. Opracowanie własne autorów artykułu]

Złączka kablowa (Rys. 9. oraz Rys. 10.) służy do metalicznego połączenia ze sobą końców żył roboczych dwóch odcinków kabli przy mufie. Ze względu na materiał i budowę różni się następujące rodzaje osprzętu kablowego:

- żeliwny;
- taśmowy;
- z rur i kształtek termokurczliwych;
- z rur i kształtek zimnokurczliwych;
- z żywic chemoutwardzalnych;
- prefabrykowany;
- specjalistyczny.

Przy doborze osprzętu kablowego należy:

- zwrócić uwagę na warunki, w jakich osprzęt będzie pracował;
- dopasować osprzęt do rodzaju i budowy kabla;
- sprawdzić wartość napięcia znamionowego kabla;
- zweryfikować rodzaj zewnętrznej powłoki kabla.

W przypadku przewodów linii napowietrznych żyły łączy się za pomocą zacisków i złączek. Zacisk przeznaczony jest do przewodzenia prądu elektrycznego bez przejmowania naciągu przewodów. Wykorzystuje się je do przyłączania przewodów odgromowych i uziemiających do konstrukcji stalowych na słupach.

#### 4. Proces naprawy kabla przy użyciu mufy przelotowej z wstawką kablową [9]

Po pozytywnym zlokalizowaniu miejsca uszkodzenia w kablu (Rys. 11.) należy zabrać się za jego naprawę. Pierwszą z czynności jakie należy wykonać to odkopanie kabla.



**Rys. 11.** Odkopywanie kabla [Opracowanie własne autorów artykułu]

Po oczyszczeniu kabla z zabrudzeń i izolacji zewnętrznej (Rys. 12.) należy dociąć wszystkie żyły w taki sposób aby, po założeniu tulejek zaciskowych, nie dochodziło do styku między poszczególnymi żyłami.



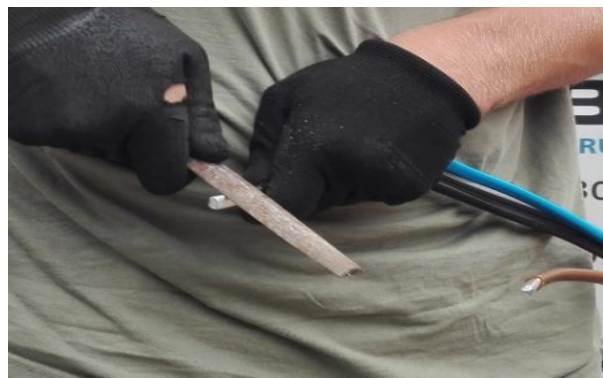
**Rys. 12.** Oczyszczanie kabla z izolacji zewnętrznej i usunięcia uszkodzonych żył [fot. Opracowanie własne autorów artykułu]

Przed przystąpieniem do wykonania połączenia żyły, żyły należy odpowiednio przygotować usuwając warstwy izolacji na naprawianym odcinku.



**Rys. 13.** Proces przygotowawczy do wstawkowej. Żyły przycięte na mijanego [fot. Opracowanie własne autorów artykułu]

Przed założeniem tulejek, fragment żył bez izolacji, można dopasować pilnikiem aby lepiej nachodziły w tulejkach (Rys. 14.). Niektóre kable mają kształt owalny dlatego trzeba je dodatkowo dostosować do osprzętu kablowego.



**Rys. 14.** Dostosowywanie osprzętu kablowego do naprawianego kabla [fot. Opracowanie własne autorów artykułu]



Rys. 15. Montaż osprzętu kablowego w postaci tulejek [fot. Opracowanie własne autorów artykułu]



Rys. 17. Połączenie dwóch końców, tego samego przewodu [fot. Opracowanie własne autorów artykułu]

Po założeniu tulejek na każdej żyłce, przed ich zaprasowaniem, należy pamiętać o założeniu rurek termokurczliwych.



Rys. 16. Proces odnowy izolacji wewnętrznej poszczególnych żył [fot. Opracowanie własne autorów artykułu]



Rys. 18. Praska hydrauliczna i praska ręczna do zaprasowywania tulejek kablowych [fot. Opracowanie własne autorów artykułu]





Rys. 19. Zaprasowane tuleje gotowe do zaizolowania [fot. Opracowanie własne autorów artykułu]



Rys. 22. Opalarka gazowa służąca do zgrzewania muf i termokurczliwek [fot. Opracowanie własne autorów artykułu]



Rys. 20. „Mijanka” [fot. Opracowanie własne autorów artykułu]

Po zainstalowaniu niezbędnego osprzętu kablowego przychodzi czas na zgrzanie poszczególnych elementów przewodzących (Rys. 22.). W celu zgrzania muf i termokurczliwek stosuje się opalarki elektryczne lub gazowe.



Rys. 23. Proces zgrzewania [fot. Opracowanie własne autorów artykułu]



Rys. 21. Prawidłowo przygotowany kabel do procesu zgrzewania [fot. Opracowanie własne autorów artykułu]



Rys. 24. Zakładanie mufy termokurczliwej [fot. Opracowanie własne autorów artykułu]



**Rys. 25.** Zgrzewanie mufy kablowej [fot. Opracowanie własne autorów artykułu]

W przytoczonym powyżej przypadku uszkodzenia kabla i jego naprawy, kabel uszkodzony był w dwóch miejscach. Takie okoliczności zmuszają monterów do zastosowania wstawki kablowej, czyli zainstalowania fragmentu kabla, o takich samych parametrach jak badany kabel, między jednym miejscem uszkodzenia a drugim.



**Rys. 26.** Założona pierwsza mufa kablowa [fot. Opracowanie własne autorów artykułu]

Na Rys. 26. mufa kablowa łącząca jeden koniec kabla, znajdującego się w ziemi, ze wstawką kablową i drugi koniec wstawki gotowy do połączenia z drugim końcem kabla.



**Rys. 27.** Zakładanie wstawki kablowej [fot. Opracowanie własne autorów artykułu]



**Rys. 28.** Prawidłowo wykonana naprawa kabla elektroenergetycznego znajdującego się w ziemi [fot. Opracowanie własne autorów artykułu]

Kabel jest gotowy do dalszej pracy i należy go ponownie zakopać stosując te same zalecenia, co w przypadku nowych kabli.

Mufy i końcówki termokurczliwe można zgrzewać także opalarkami elektrycznymi (Rys. 29.) ale wymagają one użycia przenośnego agregatu prądowórczego na paliwo ciekłe takie jak benzyna (Rys. 30.).



**Rys. 29.** Opalarka elektryczna firmy Makita do zgrzewania muf i termokurczliwek [fot. Opracowanie własne autorów artykułu]



**Rys. 30.** Agregat prądowtórca wytwarzający napięcie rzędu 230V do zasilania urządzeń elektrycznych [fot. Opracowanie własne autorów artykułu]

## Podsumowanie

Wybór właściwej metody diagnostyki uzależniony jest od badanego kabla, jego długości, wieku, izolacji, warunków pracy i oczekiwanych rezultatów. Kabel przy którym nie stwierdzono dalszej przydatności lub kabel o krótkiej żywotności należy wymienić. Więcej zastrzeżeń budzą próby napięciowe kabli o izolacji z polietylenu usieciowanego. Jediną metodą pozwalającą określić osłabione miejsce linii kablowej, bez powodowania degradacji izolacji, jest pomiar poziomu i lokalizacji wylądowań niepełnych. Systematyczne prowadzenie pomiarów zapewnia wpływ na określenie tempa niekorzystnych zjawisk zachodzących w izolacji. Lepszy obraz stanu izolacji zapewnia pomiary wylądowań niepełnych przeprowadzany wraz z innymi badaniami. Metody i urządzenia do lokalizacji zwarć i przerw są opracowywane i rozwijane na potrzeby lokalizacji zwarć i przerw w kablach w trakcie ich eksploatacji. Niektóre z nich znalazły także zastosowanie w procesie produkcji kabli. Wszystkie stosowane metody i urządzenia do lokalizacji miejsca uszkodzenia w kablach, w procesie produkcji, związane są z pomiarem parametrów rezystancja żyły, pojemność i szybkość rozchodzenia się im-

pulsów napięcia w izolacji. Zakłada się równomierność rozłożenia tych parametrów wzdłuż długości kabla, co jest założeniem czysto teoretycznym i nie ma odzwierciedlenia w rzeczywistych warunkach. W celu dokładnego zlokalizowania miejsca uszkodzenia konieczna jest dokładna znajomość długości wyrobu, obciążonej błędem rzędu 0,25% liczników długości. Ograniczeniem dotychczasowych metod lokalizacji jest rezystancja zwarć i przerw zupełnych, a także zwarć i przerwy niepełne. Dotychczasowe metody lokalizacji są metodami pomiarowymi i wymagają ciągłej obecności wykwalifikowanego personelu. Błąd lokalizacji może wynosić, zależnie od metody i rodzaju uszkodzenia nawet do 3m. Opracowana metoda lokalizacji zwarć i przerw z wykorzystaniem zmiany natężenia pola elektromagnetycznego nie jest związana z oceną pomiaru żadnego parametru kabla lub jego długością. Możliwość płynnej regulacji napięcia generatora i wartości wzmocnienia siły elektromotorycznej indukowanej w cewkach indukowanej oraz zastosowanie rezonansu cewek pozwala wykryć małe zmiany natężenia pola elektromagnetycznego powodowane przez zwarć i przerwy niepełne. W warunkach laboratoryjnych można przeprowadzić pomiar wytrzymałości elektrycznej napięciem przebicia odcinków kabli wycofanych z eksploatacji. Stan izolacji określa się porównując wytrzymałości elektryczne przed i po starzeniu kabla. Dokładne oszacowanie trwałości kabli, będących w eksploatacji jest jednak niemożliwe. W przypadku podziemnych instalacji niemetalowych jak: rurociągi gazowe, kable światłowodowe i wodociągowe zbudowane z tworzyw sztucznych, wykorzystanie znaczników EMS w połączeniu z taśmą lokalizacyjną zapewnia skuteczną lokalizację trasy i identyfikację poszczególnych punktów instalacji. Stosowane kuliste znaczniki EMS-ID posiadają wbudowany układ elektroniczny zawierający informacje o sieciach podziemnej. Do różnych rodzajów sieci podziemnych stosuje się znaczniki w innych kolorach. Znaczniki w kolorze żółtym stosowane są w sieciach gazowych. Z możliwości lokalizacji uszkodzenia kabla metodami impulsowymi wynika zależność tej metody od przewodności materiału otaczającego miejsce uszkodzenia i rośnie w miarę przyrostu przewodność. Pozytywne wyniki daje zmiana poziomu odniesienia, z ekranu, na przewód roboczy.

Nie ma uniwersalnej metody lokalizacji wszystkich rodzajów zwarć i przerw z dużą dokładnością. Należy zatem łączyć kilka metod lokalizacji miejsca uszkodzenia w kablach elektroenergetycznych.

## Bibliografia:

1. Arciszewski A., Zawodnik J. J., *Linie średniego napięcia w aspekcie awaryjności oraz problemów formalno-technicznych*, Zakład Sieci i Automatyki Elektroenergetycznej, Zakład Wysokich Napięć i Materiałów Elektrotechnicznych, Instytut Elektroenergetyki Politechniki Poznańskiej, Zeszyt 247, Poznań 2010.
2. Boron S., *Nowoczesne metody diagnostyki górniczych kabli elektroenergetycznych*, Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa, Nr 9/2010.
3. Bugajska A., *Propagacja sygnałów w uszkodzonych liniach długich*, Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2008.
4. Drzycimski Z., *Metody lokalizacji uszkodzeń w kablach miedzianych*, Opracowanie w ramach pracy inżynierskiej M. Grobelskiego i G. Rachuby wykonanej pod kierunkiem dr hab. inż. Z. Drzycimskiego, Bydgoszcz 1997.
5. Grobelski M., *Przewody i kable elektroenergetyczne*, WNT, Warszawa 2000.
6. Grzybowski S., Nowaczyk H., *Badania eksploatacyjne i lokalizacja uszkodzeń kabli elektroenergetycznych*, WNT, Warszawa 1977.

7. Kujszczyk S. (red.) Praca zbiorowa: *Elektroenergetyczne sieci rozdzielcz.* e Tom 1, PWN, Warszawa 1994.
8. Noske S., *Pomiar wyładowań niezupelnych w liniach kablowych sredniego napiecia*, Acta Energetica, Elblag 2009.
9. Stankiewicz J., *Wspolczesne metody lokalizacji uszkodzen w kablach elektroenergetycznych*, Praca dyplomowa magisterska, Wydział Transportu i Elektrotechniki Uniwersytetu Technologiczno-Humanistycznego im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu, Promotor: Dr inż. Daniel Pietruszczak, Recenzent: Dr hab. inż. Marcin Chrzan, prof. UTH, Radom 2018.
10. Szczerski R., *Lokalizacja uszkodzeń kabli elektroenergetycznych i niektóre badania eksploatacyjne linii kablowych*, Bielsko-Biala 1996.
11. Tarczyński W., *Wpływ otoczenia na warunki lokalizacji uszkodzeń ekranu linii wspolosiowej*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2013.
12. Tarczyński W., *Metody impulsowe w lokalizacji uszkodzeń w liniach elektroenergetycznych*, Politechnika Opolska, Opole 2006.
13. Wasiak I., *Elektroenergetyka w zakresie przesyłu i rozdział energii elektrycznej*, Politechnika Łódzka, Łódź 2010.
14. Zawadzki Ł., *Wpływ właściwości gruntu na oporność elektryczną*, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Warszawa 2015.
15. Wieczorek M., *Budowa i eksploatacja sieci elektroenergetycznych*, www.marwie.net.pl, 2013.
16. <http://elektrosystemy.pl/?p=1607>
17. SEBA KMT, *Metody pomiarów*, katalog firmowy

## Causes of damage electro-energetic cable lines and methods of their repair

The paper discussed the problem of the location of the damage site as a result of short-circuits and complete breaks as well as short-circuits and incomplete breaks in power cables. Several localization methods are presented, their comparison and methods of application. The most frequent causes of damage to localized cables and their types are listed and presented and ways to repair. Most methods work well when using at least three localization methods together. The methods of repairing the detected defects presented in this paper are practical methods.

**Keywords:** cable shell insulation, power cable, overvoltages, short circuits.

### Autorzy:

**Dr hab. inż. Marcin Chrzan, prof. UTH** – Wydział Transportu i Elektrotechniki Uniwersytetu Technologiczno-Humanistycznego im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu, ul. Malczewskiego 29, 26-600 Radom, e-mail: [m.chrzan@uthrad.pl](mailto:m.chrzan@uthrad.pl)

**Dr inż. Daniel Pietruszczak** – adiunkt, Wydział Transportu i Elektrotechniki Uniwersytetu Technologiczno-Humanistycznego im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu, ul. Malczewskiego 29, 26-600 Radom, e-mail: [d.pietruszczak@uthrad.pl](mailto:d.pietruszczak@uthrad.pl)

**Mgr inż. Jarosław Stankiewicz** – absolwent (2018 r.) Wydziału Transportu i Elektrotechniki Uniwersytetu Technologiczno-Humanistycznego im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu, ul. Malczewskiego 29, 26-600 Radom, Nr albumu: 99853