

INSTYTUT ŁĄCZNOŚCI
WARSZAWA · MIEDZESZYN

BIULETYN

INFORMACYJNY

6(218)

1983

MINISTERSTWO ŁĄCZNOŚCI

BIULETYN INFORMACYJNY

ROK 23

WARSZAWA 1983

NR 6/218/

INSTYTUT ŁĄCZNOŚCI

Branzowy Ośrodek

Informacji Naukowej, Technicznej i Ekonomicznej

Redakcja Biuletynu Informacyjnego

Redaktor Naczelny - prof. mgr inż. Lesław Kędzierski
Z-ca Redaktora Naczelnego - doc. dr inż. Krystyn Plewko

Redaktorzy działów:
doc. mgr inż. Władysław Cetner, doc. mgr inż. Adam Moniuszko

Adres Redakcji:
Instytut Łączności
Branżowy Ośrodek
Informacji Naukowej, Technicznej i Ekonomicznej
Warszawa - Miedzeszyn, ul. Szachowa 1

ISSN 0209-1046

Redaktor: mgr K. Juszkiewicz Montaż tekstu: E. Czerwińska

Dział Wydawniczy Instytutu Łączności
Format B5. Nakład 625. Wpłynęło do
Działu Wydawniczego 20.IX.1983 r.
Druk ukończono w listopadzie 1983 r.

S P I S T R E Ś C I

Olimpia Skiba-Rogalska
Krystyna Teska-Swiderek

KOROZJA KABLI W KANALIZACJACH Z POLICHLORKU WINYLU /PCW/

	Str.
1. Wstęp	1
2. Niektóre szczegóły budowy i eksploatacji kanalizacji rurowej z PCW	3
3. Przypadki korozji kabli w kanalizacjach z rur PCW	4
4. Proponowane środki zaradcze	6
5. Badania wstępne nad korozją kabli w kanalizacji z PCW	6
5.1. Sposób prowadzenia badań	6
5.2. Podsumowanie	9
6. Wnioski z dotychczasowych badań	10
Wykaz literatury	12

Janina Pałczyńska

OCHRONA PRZED KOROZJĄ KABLI O POWŁOKACH ALUMINIOWYCH

	Str.
1. Wstęp	13
2. Odzież ochronna kabli o powłokach aluminiowych, budowa i ocena jakości	15
3. Problemy ochrony katodowej kabli o powłokach aluminiowych	18
4. Badanie możliwości zabezpieczenia przed korozją kabli o powłokach aluminiowych, prowadzone w Instytucie Łączności	20
Wykaz literatury	27

Olimpia Skiba-Rogalska

UZIEMIENIE KABLI TELEKOMUNIKACYJNYCH

	Str.
1. Wstęp	29
2. Cel uziemiania	31
3. Korozyjne ogniwa galwaniczne	33
4. Materiały uziomowe	40
5. Środki zaradcze zmniejszające niebezpieczeństwo korozji przy uziemianiu	44
6. Problem łączenia powłok kabli z opancerzeniem	45
7. Skojarzona ochrona kabli	47
8. Uwagi końcowe	48
Wykaz literatury	50

KOROZJA KABLI W KANALIZACJACH Z POLICHLORKU WINYLU /PCW/

1. WSTĘP

Przez określenie "kanalizacja kablowa" rozumie się zespół ciągów podziemnych z wbudowanymi studniami, przeznaczony do prowadzenia kabli telekomunikacyjnych. Kanalizacja kablowa powinna, m.in. zabezpieczać kable nieopancerzone przed uszkodzeniami mechanicznymi i w pewnym stopniu przed korozją.

Do budowy ciągów kanalizacyjnych stosowane są bloki betonowe, jedno- lub wielootworowe, a także rury azbestocementowe, stalowe oraz z tworzyw sztucznych - najczęściej z polichlorku winylu.

W Polsce stosuje się przede wszystkim bloki betonowe i rury z nieplastifikowanego polichlorku winylu, które wprowadzono do eksploatacji w drugiej połowie lat sześćdziesiątych.

Kanalizacja kablowa z tworzyw sztucznych ma wiele zalet w porównaniu z tradycyjną kanalizacją z bloków betonowych. Zajmuje mniej miejsca, a także jest przede wszystkim lżejsza, łatwa w transporcie i układaniu, elastyczna i w przeciwieństwie do betonu nieagresywna w stosunku do metalowej powłoki kabla. Ponadto przeloty rur są gładkie, tym samym tarcie przy wciąganiu kabla jest mniejsze w porównaniu z tarcie przy wciąganiu do kanalizacji betonowej. Odcinki rur z PCW między studniami mogą być odpowiednio dłuższe i dłuższe odcinki kabla można w nie wciągać.

Jedną z ważniejszych zalet takiej kanalizacji kablowej miała być jej szczelność w całym ciągu, między sąsiednimi studniami oraz jej działanie izolujące zewnętrzne prądy elektryczne od powłoki kabla, a tym samym zapobiegające korozji powłoki.

W praktyce okazało się, że te zalety kanalizacji kablowych z tworzyw sztucznych, nie mają nic wspólnego z zabezpieczeniem kabli przed korozją. Już w kilka lat po wprowadzeniu ciągów kanalizacyjnych z tworzyw sztucznych zaobserwowano korozyjne uszkodzenia ołowianych powłok kabli ułożonych w takich ciągach. Próbki nadsyłane do laboratorium IŁ świadczyły najczęściej o korozji powodowanej przepływem elektrycznych prądów stałych przez powłokę kabla. Stwierdzono przy tym, że tradycyjny system ochrony katodowej nie działa na kable ułożone w kanalizacji z materiału izolacyjnego względnie działa nieefektywnie.

Przypadki korozji kabli obołowionych ułożonych w kanalizacji rurowej z PCW rejestrowały również administracje telekomunikacyjne za granicą.

Okazało się, że szczelność rur kanalizacyjnych, na całym ich przebiegu, przy otwarciu ich w studniach kablowych jest niekorzystna zarówno ze względu na stosowany system ochrony katodowej, jak też korozję powłok kablowych przez nieunikniony lokalny kontakt z wilgotnym mułem naniesionym do kanalizacji z wodami opadowymi lub przez kontakt z samymi wodami, które często zalegają w studniach kablowych do wysokości otworu rury kanalizacyjnej.

W krajach, gdzie kontrola stanu sieci kablowej postawiona jest na odpowiednio dobrym poziomie /np. w Szwajcarii/, notowano stosunkowo częste przypadki korozji kabli w kanalizacji z PCW, po dość krótkim czasie eksploatacji; mianowicie korozja pojawiała się niekiedy już po roku od ułożenia kabla [4].

Niedobre doświadczenia z kanalizacjami z tworzyw sztucznych zmuszają wiele administracji do bardziej wnikliwych obserwacji zachowania się kabli w takich kanalizacjach i do szukania środków zaradczych.

O wadze problemu świadczy fakt, że w latach ubiegłych zagadnienie to wstawiono w problematykę współpracy w ramach OWŁ.

2. NIEKTÓRE SZCZEGÓŁY BUDOWY I EKSPLOATACJI KANALIZACJI RUROWEJ Z PCW

Zgodnie z normą BN-73/8984-01 [3], a także instrukcją [6] kanalizacje kablowe z tworzyw sztucznych budowane są u nas z rur z twardego, nieplastyfikowanego polichlorku winylu [8], o średnicy 100 mm i grubości nie mniejszej niż 2 mm. Pod warstwami gruntu bez podłoża betonowego zaleca się grubości co najmniej 5 mm. Norma [3] dopuszcza do budowy kanalizacji również rury o mniejszych średnicach, np. 75 mm w kanalizacjach rozdzielczych i wielootworowych.

Rury łączone są kielichowo na gorąco lub na zimno. Przy łączeniu na gorąco w kielich wkładany jest koniec sąsiedniej rury, smarowany lakierem bitumicznym lub 80% farbą mianową. Przy łączeniu na zimno używa się kleju agresywnego.

Powierzchnie końców rur, na odcinkach podlegających wnurowaniu do studni kablowych lub budynków, powinny być smarowane klejem agresywnym, obsypane piaskiem oraz cementem i tak wbudowane.

Warstwy rur PCW, przy wprowadzaniu do studni kablowych, łączone są na długości około 0,5 m od ściany studni zaprawą cementową i powinny być zespalane masą betonową, co około 20 m, na długości 0,8 m.

Ciąg rur powinien mieć spadek w kierunku studni kablowych. W terenach płaskich norma [3] zaleca stosować spadki od 1 do 3‰.

Zestawy rur PCW powinny być układane w piasku lub przesiąnym gruncie, a w gruntach niespistych zaleca się układanie łąwy betonowej pod kanalizacją rurową.

Studnie w ciągach kanalizacji rurowej są betonowe, z dnami betonowymi, z lekką pochyłością do środka i betonowym osadnikiem.

Dla terenów o niskim poziomie wód gruntowych przewiduje się studnie z nie zabetonowanym dnem osadnika lub otworem ściekowym.

Jak wynika z przeglądu literatury zagranicznej [1, 4, 5, 7,]

materiał i szczegóły budowy ciągów kanalizacyjnych z tworzyw sztucznych są podobne. Połączenia rur są wodo- i gazoszczelne. Niekiedy używa się przy łączeniu rur uszczeltek gumowych [1], przy czym szczelność połączeń w ciągu, przed oddaniem kanalizacji do eksploatacji, sprawdzana jest ciśnieniowo.

Za granicą cienkościennie rury PCW zabetonowuje się niekiedy na całej długości [4]. W NRD do uszczelniania wlotu rury do studni proponowane są elementy poliuretanowe [1].

Mimo tak starannie przestrzeganej szczelności istnieje zawsze niebezpieczeństwo zalegania wody po ulewnych deszczach. Woda niesie ze sobą muł, który osadza się w rurach. Usunięcie wody z ponad 100-metrowych odcinków rur jest bardzo skomplikowane, dlatego do czasu ukończenia budowy studni zaleca się rury zamykać korkami drewnianymi. Czynności te są pracochłonne i nie zawsze przestrzegane. Po wciągnięciu kabla do kanalizacji woda opadowa zanieczyszczona mułem może się dostać ze studni do wnętrza rur. Mały spadek rur w kierunku studni nie zapewnia szybkiego ściekania wody, a nawet jeśli woda ścieknie, pozostaje w rurze muł, który utrzymuje wilgoc dość długo i stanowi środowisko przewodzące prąd elektrolityczny. Przechyszczanie kanalizacji szczołkami wg [2], jest w takich przypadkach nieprzydatne, nie usuwa bowiem osadu znajdującego się między kablem a wewnętrzną ścianą rury.

3. PRZYPADKI KOROZJI KABLI W KANALIZACJACH

Z RUR PCW.

Po zaobserwowaniu pierwszych przypadków korozji ołowianych powłok kabli ułożonych w kanalizacji z rur PCW, administracja szwajcarska rozpoczęła w roku 1971 systematyczne badania tego zjawiska [4]. Na przestrzeni lat 1971-77 przebadano szereg przypadków korozji.

Korozję powłok obserwowano po kilku latach od wciągnięcia kabla w kanalizację, ale były też przypadki korodowania po-

włoki już po roku od ułożenia kabla. Najczęściej obserwowano korozję przy wylocie kabla do studni kablowej. Notowano również uszkodzenia powłoki wewnątrz rury, w odległości kilkunastu i kilkudziesięciu metrów od studni kablowej. Głębokie wżery na powłoce ograniczały się wyłącznie do powierzchni styku kabla z rurą.

Uszkodzenia były bardzo różne. W niektórych przypadkach wżery przypominały korozję od prądów błędzących, niektóre były pokryte produktami korozji. Były też wżery bez produktów korozji. W wodach i mulach z kanalizacji i studni kablowych stwierdzono znaczną alkalizację /wartość pH wahała się od 7 do 12,6/ na skutek kontaktu z betonem. Jako główną przyczynę korozji kabla podano więc alkalizację wód. W suchych, czystych kanałach nie obserwowano korozji kabli.

Notowane w ciągu ostatnich lat u nas w kraju przypadki korozji kabla w kanalizacji z rur PCW nie miały raczej nic wspólnego z alkalizacją wód. Korozja powłok występowała często w znacznej odległości od ujścia kabla do studni. Powłoka korodowała, podobnie jak w wyżej opisanych przypadkach, w miejscu styku kabla z rurą PCW. Wżery były bardzo różne, niekiedy zlewające się ze sobą, niekiedy pojedyncze. W produktach korozji wykrywano tlenki ołowiu i węglany, czasem próbki pokryte były czarnym nalotem rozpylonego ołowiu.

Trzeba tu podkreślić, że służby eksploatacyjne resortu łączności na ogół bardzo mało uwagi przywiązują do zgłaszania przypadków korozji kabli, a szczególnie przypadków dotyczących korozji kabli w kanalizacji z PCW, co bardzo utrudnia prowadzenie systematycznych badań. Badania przyczyn korozji kabli w kanalizacji wymagałyby ściślejszej współpracy z jednostkami resortu eksploatującymi i konserwującymi linie kablowe.

4. PROPONOWANE ŚRODKI ZARADCZE

Ze względu na niemożliwość całkowitego osuszenia czy oczyszczenia kanalizacji kablowej z PCW, na całym jej przebiegu, administracje zagraniczne zalecają wciąganie do takich kanalizacji tylko kabli posiadających osłony ochronne z tworzyw termoplastycznych, wytłoczone na powłokę kabla. I tak, np. w Szwajcarii od 1972 roku zaleca się do kanalizacji wciągać wyłącznie kable z osłoną ochronną polietylenową, wytłaczaną.

W kraju rozpoczęto pierwsze badania nad systemem ochrony katodowej, ograniczonej do kanalizacji. Wymaga to jednak dokładnego sprawdzenia zarówno warunków ułożenia kabla, jak też wielkości prądów zewnętrznych oddziałujących na powłokę, materiału anod, ich usytuowania, itp. Na obecnym etapie nie można więc podać żadnych wytycznych stosowania takiej ochrony w stosunku do kabli kanałowych.

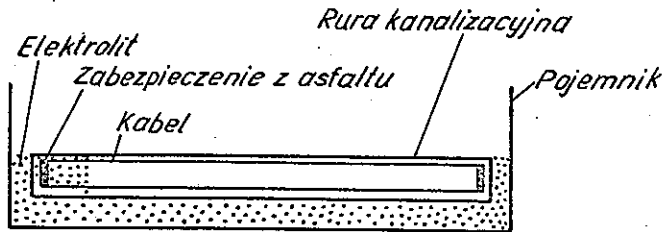
5. BADANIA WSTĘPNE NAD KOROZJĄ KABLI W KANALIZACJI Z PCW

5.1. Sposób prowadzenia badań

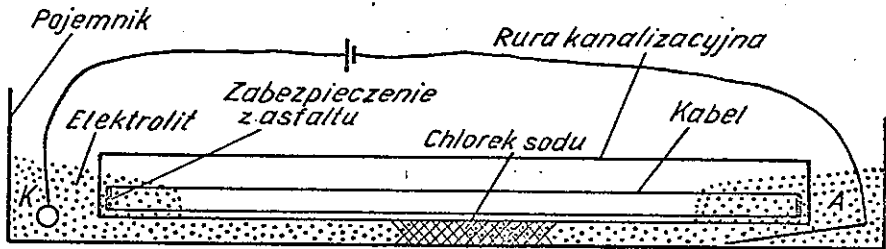
W związku ze zgłoszeniami uszkodzeń kabli w kanalizacji z PCW podjęto w Instytucie Łączności pracę, która miała na celu stwierdzenie, w jaki sposób kanalizacja ta sprzyja korozji ołowianych powłok kabli. Doświadczenie przeprowadzono wstępnie w warunkach laboratoryjnych.

Do badania użyto kabel o powłoce ze stopu ołowiu w gatunku OT1A z dodatkiem około 0,5% antymonu. Odcinki kabla o długości 1,63 m, 1,31 m, 1,21 m oraz cztery odcinki o długości 0,36 m i wszystkie o średnicy 36 mm zabezpieczono na końcach asfaltem PS 80/35. Jako elektrolit, imitujący muł w kanalizacji kablowej zastosowano mieszaninę bentonitu z piaskiem w stosunku 1:1. Odcinki kabla jw. umieszczono w rurach

kanalizacyjnych z nieplastyfikowanego polichlorku winylu, wg [8], w taki sposób aby tylko część powłoki kabla stykała się w rurze z elektrolitem. Zewnętrzna część rury kanalizacyjnej stykała się z elektrolitem na całej swojej długości /rys. 1 i 2/.

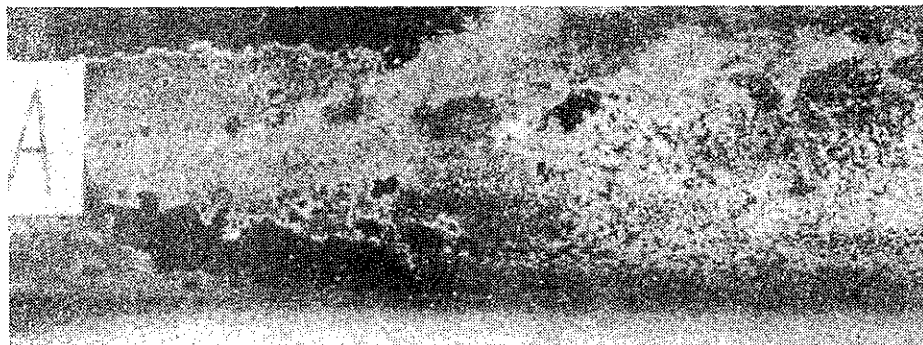


Rys. 1. Schemat układu przy badaniu oddziaływania kanalizacji z PCW na korozję ołowianej powłoki kabla, bez udziału prądu elektrycznego

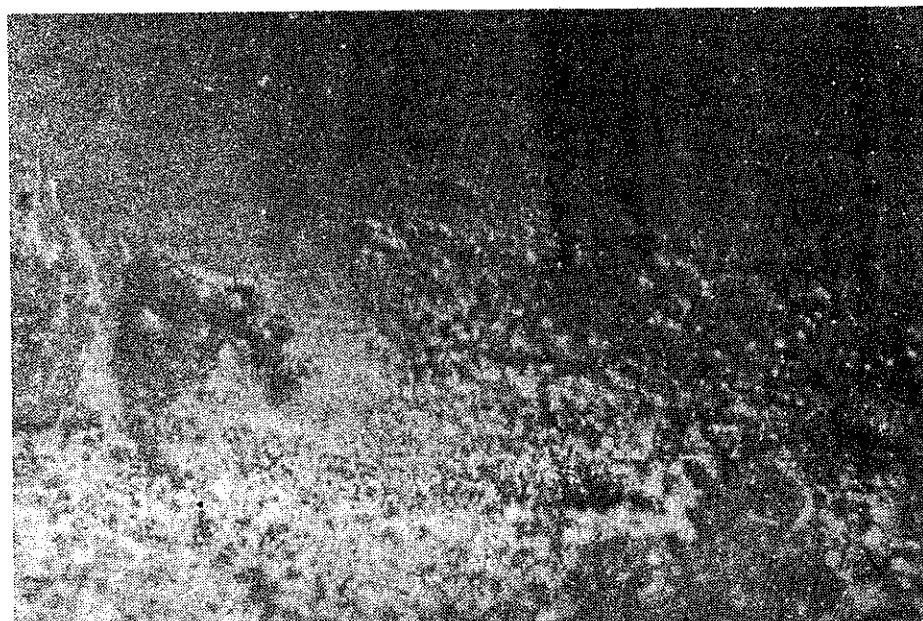


Rys. 2. Schemat układu przy badaniu oddziaływania kanalizacji z PCW na korozję ołowianej powłoki kabla z udziałem prądu elektrycznego

Przeprowadzono dwa warianty doświadczenia, a mianowicie bez udziału prądu elektrycznego /4 równoległe próby - rys.1/ i z udziałem elektrycznego prądu stałego, płynącego poprzez elektrolit między dwiema elektrodami specjalnie umieszczonymi w ziemi /rys. 2/. Dla zwiększenia przewodnictwa elektrolitu w środkowej jego części umieszczono 3 g chlorku sodu /soli kuchennej/. W tym przypadku prowadzono 3 równoległe próby. Między elektrodami przed ułożeniem próbek kabli płynął prąd



Rys. 3. Anodowy koniec próbki kabla, będącego w zasięgu oddziaływania prądu stałego po 800 godz. badania /wielkość naturalna/



Rys. 4. Fragment powłoki kabla, najbardziej skorodowanej w okolicy końcówki zalanej asfaltem /powiększenie 4x/

rzędu 2 mA oraz 3,2 mA. Jako źródła prądu stałego używano akumulatory 12 V. Po ułożeniu próbek kabli, prąd płynący między elektrodami wzrósł na początku doświadczenia około 10-krotnie, co świadczyło o tym, że płynął on częściowo przez powłoki kabli. Prąd mierzono dwa razy w ciągu doby. Średni prąd, jaki przepływał przez układy w czasie trwania doświadczenia wynosił kolejno 9,8 mA, 9,7 mA, 9,4 mA. Doświadczenie z prądem i bez prądu prowadzono przez 800 godzin.

Po zakończeniu doświadczeń próbki oczyszczono i obejrzano pod lupą.

Próbki znajdujące się w kanalizacji, przez które nie przepływał prąd, w miejscu styku z ziemią nie posiadały widocznych gołym okiem wżerów korozyjnych. Zmieniony był tylko kolor powłoki, występowały cienkoszare naloty /zacieki/.

Na próbkach, przez które płynął prąd, od strony anodowej stwierdzono zacieki utworzone z produktów korozji. Na całej powierzchni zacieków występowały wżery korozyjne o brzegach ostrych i zaokrąglonych, najgłębsze na obrzeżach zacieków i przy końcu zabezpieczonym asfaltem. Wżery często zlewały się ze sobą i głębokość ich dochodziła do 1 mm. Pojedynczo obserwowano wżery o średnicy 4 mm i głębokości 2 mm. Produkty korozji ściśle przylegały do kabla i wypełniały wżery. Były one koloru białego, brązowego i czarnego. W produktach korozji stwierdzono obecność dużej ilości tlenków ołowiu i niewielkie ilości węglanów. Od strony katodowej na powłoce kabla występowały naloty. Wżerów korozyjnych nie zaobserwowano. Naloty były koloru białego, szarego i rudego. Stwierdzono w nich małe ilości tlenków ołowiu.

Skorodowane końce anodowe próbek kabli po zakończeniu doświadczenia przedstawiono na fotografiach /rys. 3 i 4/.

5.2. Podsumowanie

Wstępne doświadczenia laboratoryjne wykazują, że przepływ prądu stałego przez metalową powłokę kabla sprzyja intensywnej korozji powłoki w miejscu styku z wilgotnym mułem w ka-

nalizacji. Korozja występuje, zgodnie z prawami elektrolizy, w strefie wpływu prądu z powłoki metalowej do jonowo przewodzącej warstwy mułu.

Ze wzoru Faradaya można obliczyć, że stosowany w doświadczeniu średni prąd 9,6 mA, wypływając z powłoki do środowiska elektrolitycznego, spowoduje roztworzenie około 0,3 kg ołowiu w ciągu roku.

Z doświadczenia wynika, że przy największej miejscowej gęstości prądu całkowitego miejscowego przedziurawienia powłoki należy się spodziewać po upływie 1200 godzin, czyli po około 7 tygodniach. Jest to znaczna szybkość korozji, przy tak małym prądzie.

Pomiary prowadzone w warunkach terenowych na kablach ułożonych w kanalizacji z PCW wskazują, że prądy płynące w powłocie kabla mogą być w praktyce wielokrotnie większe niż stosowane w doświadczeniu laboratoryjnym.

W przypadku kabli ułożonych w kanalizacji z PCW niebezpieczna jest obecność nawet bardzo małych prądów błądzących. Kanalizacja taka w założeniu swoim powinna być szczelna, lecz w załamaniach jej zawsze zalegają wody kondensacyjne lub ściekowe, a także naniesiony wilgotny muł. W miejscach tych należy spodziewać się wpływu prądu z powłoki kabla i miejscowej korozji.

6. WNIOSKI Z DOTYCZĄCYCH BADAŃ

1. Wstępne badania laboratoryjne wykazały, że korozja ołowianej powłoki kabla w rurze kanalizacyjnej z polichlorku winylu jest możliwa również bez udziału alkalicznych substancji, powstających na skutek sąsiedztwa z betonem. Przypisywanie tego zjawiska wyłącznie alkalicznym wodom przedostającym się do kanalizacji z PCW, jak to stwierdzono w trakcie wieloletnich badań administracji szwajcarskiej [4], nie znajduje potwierdzenia w naszych warunkach.

2. Znaczny udział w korozji ołowianych powłok kablowych w kanalizacjach z PCW mogą mieć prądy błędzące, które w miejscach wypływu do środowiska elektrolitycznego, jakim jest wilgotny muł nagromadzony w rurze, powodują intensywny proces niszczenia metalu.
3. Korozja w takich przypadkach ma charakter nierównomierny, wżerowy, przy czym niezależnie od tego, na jak dużej powierzchni powłoka styka się ze środowiskiem elektrolitycznym, intensywny proces korozji zachodzi tylko w niektórych miejscach na powłoce kabla. Pojedyncze wżery mogą w pewnych przypadkach osiągać znaczne głębokości, co w krótkim czasie może prowadzić do perforacji powłoki ołowianej.
4. W opisanych tu wstępnych doświadczeniach średni prąd rzędu 9,6 mA w miejscach styku z wilgotną ziemią powodował w ciągu 800 godzin wżery o głębokości do 2 mm.
5. Korozję wżerową obserwowano również na kilku próbkach kabli eksploatowanych w kanalizacjach z PCW, a nadesłanych do badań w IL.
6. Wstępne badania laboratoryjne i obserwacje z terenu wykazują, że w kanalizacji z PCW możliwa jest korozja powłoki kabla także bez udziału zewnętrznych prądów stałych, a więc w rejonach gdzie nie stwierdza się obecności prądów błędzących. Proces korozyjny jest tu powolniejszy. W miejscach styku kabla z wodą kondensacyjną lub z wilgotną ziemią w rurze powstają, w tym przypadku na powłoce, zacioki lub naloty świadczące o miejscowym powierzchniowym utlenianiu powłoki.
7. Agresywność korozyjna samej rury kanalizacyjnej nie została dotychczas potwierdzona.
8. Do całkowitego wyjaśnienia problemu korozji kabli w kanalizacjach z PCW wymagane są dalsze badania laboratoryjne i terenowe, może na wydzielonym odcinku doświadczalnym kabla.

9. Po zbadaniu różnych możliwych przyczyn korozji kabli w kanalizacjach z PCW należałoby opracować i sprawdzić środki zaradcze, a następnie przygotować wytyczne dla służb budowlanych i eksploatacyjnych.

WYKAZ LITERATURY

1. Ausgewählte Beiträge der 1 Fachtagung der KDT. Teil: Fernmeldebau. Referaty autorów: Dalski G. i Heinig K.H. /w/ Informationsheft des Instituts für Post und Fernmeldewesen, Berlin 1979.
2. BN-67/3238-01. Telekomunikacyjne sieci kablowe miejscowe. Szczotki.
3. BN-73/8984-01. Kanalizacja kablowa. Ogólne wymagania i badania.
4. Brunold A.: Korrosion von Bleimantelkabeln in Kunststoffrohrblockanlagen. Techn. Mitteilungen PTT, No 1, 1979, s. 16-27; No 2, 1979, s. 50-60.
5. Czerliński J.: Kabelkanal aus hart PCV-Rohren im Bereich von Gleisanlagen. Fernmeldepraxis, No 7, 1979, s. 265.
6. Instrukcja budowy i naprawy kanalizacji kablowej z rur z nieplastyfikowanego polichlorku winylu /PCW/. Zjednoczenie Budownictwa Łączności, Warszawa 1974.
7. Jagemann H.: Absenkung eines Kabelkanals aus PVC-Rohren. Fernmeldepraxis, No 5, 1979, s. 183.
8. PN-74/C-89200. Rury z nieplastyfikowanego polichlorku winylu. Wymiary.

OCHRONA PRZED KOROZJĄ KABLI O POWŁOKACH ALUMINIOWYCH

1. WSTĘP

Kable telekomunikacyjne o powłokach innych niż ołów zaczęto produkować w Polsce w połowie lat siedemdziesiątych.

Deficyt i wysoki koszt ołowiu zmusił przemysł kablowy do zastosowania aluminium i stali jako materiałów na powłoki kabli, przy czym głównie wykorzystano aluminium, przewidując stosowanie stali tylko do produkcji kabli miejscowych w szczególnych przypadkach.

Zalety powłok aluminiowych to [12, 19, 20]:

- mały ciężar właściwy - ok. 4 razy mniejszy niż powłok ołowianych;
- dobra wytrzymałość mechaniczna, pozwalająca na zmniejszenie grubości powłoki o 20% w porównaniu z grubością powłok ołowianych, a także na częstsze niestosowanie opancerzenia, które w przypadku kabli o powłokach aluminiowych nakłada się raczej w celu ekranowania;
- zmniejszenie grubości powłoki i jej mały ciężar właściwy stanowi o znacznie mniejszym koszcie powłoki aluminiowej w porównaniu z kosztem powłoki ołowianej;
- odporność na korozję zmęczeniową, powodowaną drganiami; odporność powłok aluminiowych jest 25-krotnie wyższa od odporności powłok ołowianych;
- dobra przewodność elektryczna, 7-krotnie większa od przewodności ołowiu, stąd niski współczynnik redukcyjny, ważny ze względu na ochronę kabli przed szkodliwymi oddziaływaniami zewnętrznymi pól elektrycznych.

Aluminium, posiadające wiele zalet [14, 20] jako surowiec do produkcji powłok kabli, ma również wady [2, 4]:

- trudno się lutuje, co bardzo komplikuje montaż linii kablowej,
- jest mniej elastyczne niż ołów, stąd konieczność nadania falowanego kształtu powłokom kabli,
- intensywnie koroduje w warunkach gruntowych.

Na wolnym powietrzu aluminium reaguje z tlenem, tworząc ochronną warstewkę tlenu; od grubości, równomierności i szczelności tej warstwy zależy szybkość i charakter korozji metalu. W warunkach gruntowych, gdzie dostęp tlenu jest utrudniony, nie może się utworzyć szczelna warstewka tlenkowa i aluminium łatwo ulega korozji głównie o charakterze wżerowym. Ten rodzaj korozji jest szczególnie niebezpieczny, ponieważ łatwo może spowodować perforację powłoki kablowej. Tak więc w gruntach dobrze napowietrzonych, piaszczystych i piaszczysto-gliniastych, aluminium nie powinno ulegać korozji, nie mniej z praktyki wiadomo, że w gruntach tych także obserwuje się korozję aluminium. W gruntach ciężkich, nawodnionych, takich jak gliny, grunty bągienne i torfiaste, należy spodziewać się wzmożenia procesów korozyjnych aluminium, przy czym praktyka wykazuje, że najmniej agresywne w stosunku do aluminium są grunty gliniaste. Bardzo agresywne w stosunku do aluminium są grunty nasypane, coraz częściej występujące przy rosnącej industrializacji.

Szczególne niebezpieczeństwo korozji aluminiowych powłok kablowych stwarza obecność prądów błędzących, ponieważ aluminium może korodować zarówno w strefach anodowych, jak i katodowych, w polu oddziaływania prądów stałych i zmiennych.

Dodatki stopowe, szczególnie miedzi, zmniejszają odporność korozyjną aluminium, dlatego powłoki kablowe wykonane są z aluminium możliwie czystego /99,5%/, w Polsce z gatunku aluminium A1 [15].

Przyczyną korozji aluminiowych powłok kablowych w gruntach mogą być także naprężenia i zmiany w strukturze krystalicznej powłoki, spowodowane procesem nadawania falowanego kształtu powłoce kablowej.

Ze względu na fakt, że najbardziej zagrożone korozją są powłoki kabli ziemnych, metody zabezpieczenia tych kabli będą tematem niniejszego artykułu.

2. ODZIEŻ OCHRONNA KABLI O POWŁOKACH ALUMINIOWYCH, BUDOWA I OCENA JAKOŚCI

Wysoka wrażliwość aluminium na korozję w gruntach spowodowała konieczność zastosowania, dla kabli o powłokach aluminiowych, osłon ochronnych z materiałów o szczególnie dobrych własnościach izolujących.

CCITT zaleca dla tego rodzaju kabli odzież, tzw. II kategorii, którą powinna cechować [7]:

- duża rezystancja izolacji /mała nasiąkliwość wodą/,
- równomierna grubość,
- dobra przyczepność kolejnych warstw między sobą,
- dobra wytrzymałość mechaniczna,
- odporność chemiczna na działanie środowiska, w którym eksploatowany jest kabel,
- obojętność chemiczna w stosunku do metalu powłoki i pancerza kabla,
- ekonomiczność.

Wymienione cechy posiadają tworzywa termoplastyczne: plastifikowany polichlorek winylu /PCW/ i polietylen /PE/. Osłony z tych tworzyw, wytłaczane na gorąco, na powłoce i pancerzu kabla, stanowią zasadniczy element odzieży kabli o powłokach innych niż ołów. Dopiero z chwilą wynalezienia tworzyw termoplastycznych, możliwe stało się wykorzystanie w eksploatacji tego rodzaju kabli.

Własności PE i PCW, przeznaczonych dla potrzeb kablownictwa, opisano m.in. w [21] oraz w opracowaniu K.K. Nikolskiego [13]. Istotną różnicę we własnościach obu tworzyw stanowią: nasiąkliwość wodą, która dla PE jest ok. 15-krotnie mniejsza niż dla PCW; palność - PCW jest tworzywem samogasnącym, nato-

miast PE stosunkowo łatwo się pali. Wymienione różnice zdecydowały o zakresie zastosowania tych tworzyw: osłony z PE stosuje się głównie w przypadku kabli ziemnych, natomiast w pomieszczeniach central i innych miejscach zagrożonych pożarem wykorzystuje się najczęściej kable w osłonach lub powłokach z PCW.

Oprócz osłon z tworzyw sztucznych, element odzieży kabli o powłokach aluminiowych stanowią lepiszcza, głównie na podłożu bitumicznym, z ewentualnym dodatkiem inhibitora korozji oraz taśmy papierowe lub poliestrowe [4, 13]. Lepiszczą mają za zadanie łączyć osłonę termoplastyczną z powłoką kabla, uszczelniając przestrzeń pomiędzy nimi. W przypadku powłok falowanych lepiszcze musi wypełniać wgłębienia na powłoce i przykryć grzbiety fal, tak aby powłoka była całkowicie nim pokryta.

Omówione wyżej elementy odzieży stosuje się powszechnie do ochrony kabli o powłokach aluminiowych w różnych wykonaniach, zmienia się jedynie liczba warstw ochronnych. I tak, np. w RFN [5] w przypadku kabli ziemnych, stosuje się na powłokę aluminiową kolejno:

- lepiszcze,
- owój z taśm z tworzywa sztucznego,
- lepiszcze,
- wytłoczoną warstwę PE lub PCW,
- owój z taśmy,
- lepiszcze,
- taśmę stalową opancerzenia,
- owój z taśmy,
- wytłoczoną warstwę PCW lub PE.

Administracja francuska przewiduje do ochrony powłoki tego samego rodzaju kabla, warstwę lepiszcza i jedną lub dwie wytłoczone warstwy PE, każda o grubości 2 mm. Natomiast administracja chińska zabezpiecza aluminiową powłokę kabla warstwą lepiszcza, owojem z taśmy papierowej i wytłaczaną osłoną z PCW [6]. Na ogół jednak administracje zagraniczne między pancerz

i osłonę zewnętrzną, stosując owój z taśmy papierowej lub z tworzywa sztucznego.

Nowoczesne kable o powłokach aluminiowych produkowane są w Polsce wg warunków technicznych opracowanych na podstawie wymagań francuskich [22]. Przewidują one następującą budowę odzieży ochronnej kabli ziemnych:

- warstwa elastycznej polewy bitumicznej, nałożona równomiernie i pokrywająca zagłębienia powłoki;
- owój z taśm poliestrowych z zakładką nie mniejszą niż 5 mm;
- wytłoczona warstwa PE grubości 2 mm;
- owój z taśm papierowych albo ze sznurka polipropylenowego, o grubości nie mniejszej niż 0,2 mm;
- pancerz z dwu taśm stalowych nawiniętych tak, aby szczeliny między zwojami były przykryte;
- wytłoczona warstwa PE.

Jakkolwiek istnieje szereg znormalizowanych, laboratoryjnych metod oceny jakości poszczególnych elementów odzieży ochronnej, to na temat stosowanych metod i kryteriów oceny skuteczności odzieży nowoczesnych kabli w warunkach eksploatacyjnych można znaleźć niewiele danych.

Jedynie administracja ZSRR [5] podaje wielkości potencjału powłoki kabla w stosunku do ziemi i rezystancji izolacji powłoki kabla jako kryterium oceny skuteczności osłon ochronnych. Według Nikolskiego [13] wartości rezystancji izolacji powłoki aluminiowej, w zależności od średnicy kabla, powinny kształtować się następująco:

Średnica kabla mm	Rezystancja MΩ . km
11-30	10
30-60	4,1
60	2,5

Wartości rezystancji zmniejszają się w czasie eksploatacji linii kablowej na skutek uszkodzeń osłon przy układaniu kabla w gruncie i niedostatecznej jakości izolacji złączy. W celu

wykrycia ewentualnych uszkodzeń osłon ochronnych administracja ZSRR zaleca pomiary potencjału i rezystancji izolacji względem ziemi, w czasie układania, montażu i eksploatacji linii kablowej. Odcinki fabrykacyjne kabla muszą być przy pomiarze odizolowane na obu końcach od ziemi, a odcinki linii eksploatowanej na czas pomiaru należy odłączyć od systemu uziemiającego. Według danych radzieckich wartość rezystancji izolacji powłoki odcinków fabrykacyjnych kabla na bębnie, wahała się w granicach 10-100 MΩ . km.

Zgodnie z wymaganiami kolei francuskiej wartość rezystancji izolacji między powłoką i pancerzem na odcinkach fabrykacyjnych kabli powinna wynosić ok. 100 MΩ . km /przy napięciu pomiarowym 500 V/ [3].

3. PROBLEMY OCHRONY KATODOWEJ KABLI O POWŁOKACH ALUMINIOWYCH

Osłony izolujące kabli o powłokach aluminiowych powinny skutecznie zabezpieczać powłokę i pancerz przed korozją, niemniej, jak wspomniano wyżej, zawsze istnieje możliwość uszkodzenia osłon w czasie budowy i montażu linii, co z racji podatności aluminium na korozję w gruntach może być groźne w skutkach. Granice potencjałów ochrony dla aluminium w gruncie podawane są różnie przez różne źródła i tak:

- GOST [3] zaleca -0,85 V do -1,38 V^z/;
- BSI [2] od -0,95 V do -1,20 V;
- AW Peabody [11] od -1,0 V do -1,20 V;
- CCITT [5] od -0,80 V do -1,40 V;
- J.H. Morgan [10] od -0,80 V do -0,85 V;
- L.L. Shreir [17] podaje wartość -0,85 V potencjału ochrony aluminium.

x/ Uwaga: wszystkie wartości potencjałów podane w niniejszym artykule są mierzone w stosunku do elektrody Cu/CuSO₄.

Obecnie zebrano już pewne doświadczenia z kilkunastoletniej niekiedy, eksploatacji kabli aluminiowych. Według CCITT sporo administracji posiada nowoczesne telekomunikacyjne linie zbudowane z tego rodzaju kabli. Analizując dokument CCITT [5] można stwierdzić, że administracja angielska nie zaobserwowała zmian korozyjnych na trzech liniach doświadczalnych długości 26, 11 i 7 km. badanych w ciągu 15 lat. We Włoszech w latach 1970-76 zainstalowano 12 tys. km kabla o powłoce aluminiowej i w czasie eksploatacji obserwowano jedynie uszkodzenie kabla na skutek oddziaływania linii energetycznych. Na terenie Francji do końca 1975 r. zainstalowano 11,5 tys. km kabli o powłoce aluminiowej.

Wymienione administracje nie stosowały ochrony katodowej linii telekomunikacyjnych posiadających osłony termoplastyczne, a wyniki obserwacji wykazały, że termoplastyczne osłony ochronne skutecznie zabezpieczają powłokę i pancierz kabla przed korozją.

Administracja ZSRR przewiduje ochronę aluminiowej powłoki kabla za pomocą protektorów magnezowych, ale GOST [2] nie zaleca stosowania ochrony katodowej opancerzonych kabli o powłoce aluminiowej, z wytłaczanymi na powłoce i pancierzu osłonami polietylenowymi.

W Chinach prowadzone są obserwacje na wspomnianej już linii kablowej, długości 165 km. Kabel jest chroniony protektorami magnezowymi stanowiącymi jednocześnie uziemienie linii. Powłokę kabla polaryzuje się w zakresie potencjałów od $-0,85$ V do $-1,10$ V. W ciągu 11 lat eksploatacji nie zaobserwowano uszkodzeń korozyjnych na omawianej linii.

W Polsce brak jest doświadczeń z eksploatacji kabli o powłokach innych niż ołów, ponieważ budowę tego rodzaju linii rozpoczęto dopiero w drugiej połowie lat siedemdziesiątych. W ciągu ostatnich lat w resorcie łączności ułożono kilka linii kablowych o powłokach aluminiowych, długości kilkunastu lub kilkudziesięciu km. Nie wszędzie zakończono budowę, a złącza budowanych linii są często wykonane niezgodnie z dokumenta-

cją. Dodatkowy nie rozwiązany jeszcze problem stanowi zabezpieczenie złącza przed korozją, po ponownym jego otwarciu.

4. BADANIE MOŻLIWOŚCI ZABEZPIECZENIA PRZED KOROZJĄ KABLI O POWŁOKACH ALUMINIOWYCH, PROWADZONE W INSTYTUCIE ŁĄCZNOŚCI

Uwzględniając potrzeby naszego resortu w Instytucie Łączności, w końcu lat sześćdziesiątych, podjęto badania nad korozją aluminium w gruncie [14, 20]. Do badań wykorzystano kabel energetyczny o powłoce aluminiowej, wykonanej ze stopu o zawartości 99,7% metalu, chronionej warstwą lepiska bitumicznego i wytkoczoną warstwą PCW. W laboratorium badano potencjał stacjonarny powłoki aluminiowej w gruntach: piaszczystym, torfiastym i gliniastym. Wyniki badań przedstawiono w tabelicy 1.

Tablica 1

Rodzaj gruntu	Wartości graniczne potencjałów /V/		
	najmniej ujemne	najbardziej ujemne	średnie
piasek	-0,45	-0,71	-0,55
torf	-0,63	-1,02	-0,89
glina	-0,96	-1,18	-1,05

Wyniki badań laboratoryjnych wskazują, że w gruntach piaszczystych dobrze napowietrzonych, wartości potencjału stacjonarnego są mniej ujemne niż w gruntach torfiastych; najbardziej ujemne wartości potencjału stacjonarnego powłoki aluminiowej kabla mierzono w gruntach gliniastych. Największe zmiany korozyjne metalu obserwowano w gruncie piaszczystym, w gruncie gliniastym nie zaobserwowano procesów korozyjnych na powierzchni aluminium.

Na poletku doświadczalnym obserwowano skuteczność ochrony

katodowej za pomocą protektorów i korozję powłoki aluminiowej, polaryzowanej prądem z zewnętrznego źródła, do potencjałów $-1,25$ V i $-0,95$ V w strefie katodowej; próbki kabli znajdowały się w polu modelowanych prądów błędzących. Badano odcinki kabla pozbawione osłon ochronnych oraz odcinki w osłonie ochronnej, z modelowanymi szczelinami.

Ochrona katodowa za pomocą protektorów magnezowych była sprawdzana w gruntach piaszczystych i torfiastych, przy średnim potencjale ok. $-1,05$ V. Bliższe dane umieszczono w tablicy 2.

Tablica 2

Rodzaj gruntu	Powierzchnia aluminium cm^2	Czas działania ochrony /miesiące/	Parametry mierzone		Średnie wartości potencjału /V/
			I /mA/	U /V/	
torf	2912	6	2,55	-1,04	-1,05
		12	1,09	-0,99	
	94	6	0,05	-1,10	
		12	0,035	-1,02	
piasek	2912	6	0,09	-1,09	-1,04
		12	0,03	-1,02	
	94	6	0,015	-0,93	
		12	0,001	-1,02	

Zmiany korozyjne na powłoce odcinków kabla, pozostających w polu oddziaływania prądów błędzących, obserwowano w strefach anodowych w obu gruntach oraz w strefie katodowej w gruncie torfiastym przy potencjale $-1,25$ V. Podczas badań prowadzonych na poletku doświadczalnym nie zaobserwowano śladów korozji na powłoce aluminiowej kabla przy potencjałach w grani-

cach od $-0,90$ V do $1,10$ V, zarówno w gruncie torfiastym jak i piaszczystym.

Wraz z rozpoczęciem budowy nowoczesnych linii telekomunikacyjnych kabli o powłokach aluminiowych typu ALTKDXpxFtx, podjęto badania mające na celu ocenę jakości osłon ochronnych: odcinków fabrykacyjnych kabli na terenie fabryki i odcinków fabrykacyjnych ułożonych w gruncie, nie połączonych lub zmontowanych, częściowo albo całkowicie [18]. Jako kryterium oceny jakości osłon ochronnych wybrano wartości rezystancji izolacji i potencjału stacjonarnego, powłoki i pancerza kabla, w stosunku do ziemi.

Według opracowanych w Instytucie Łączności wstępnych zasad instalowania nowoczesnych kabli wartość rezystancji izolacji powłoki zwartej z pancerzem mierzona względem ziemi, w przypadku odcinków wzmacniakowych lub regeneratorskich kabla typu ALTKDXpxFtx, powinna wynosić $1 \text{ M}\Omega \cdot \text{km}$ [1].

Opierając się na danych z fachowej literatury zagranicznej i cytowanych wyżej założono, że w przypadku odcinków kabla już zmontowanych termoplastyczna osłona ochronna będzie szczelna, jeżeli wartość rezystancji izolacji powłoki aluminiowej kabla w stosunku do ziemi będzie większa lub równa $1 \text{ M}\Omega \cdot \text{km}$. Natomiast wartości rezystancji izolacji powłoki odcinków fabrykacyjnych kabla powinny być równe lub większe $10 \text{ M}\Omega \cdot \text{km}$. Jak już wspomniano, o jakości osłony izolującej będzie świadczył także potencjał powłoki lub pancerza mierzony względem ziemi. Metal mający kontakt elektrochemiczny z gruntem, w wyniku procesów korozyjnych, polaryzuje się do pewnego potencjału. Stąd można uważać, że osłona ochronna nie jest uszkodzona, jeżeli potencjał pancerza lub powłoki kabla jest bliski zeru, o ile kabel nie znajduje się w polu oddziaływania zewnątrznych pól elektrycznych, które mogłyby wpłynąć na wynik pomiaru. Jeżeli natomiast istnieje uszkodzenie osłony, na powłoce lub pancerzu mierzy się jakiś określony potencjał, a jednocześnie mierzone wartości rezystancji izolacji, powłoki lub pancerza kabla, są niskie. Podane w literaturze wartości potencjału stacjonarnego podziemnych konstrukcji stalo-

wych wahają się w granicach od $-0,30$ V do /sporadycznie/ $-0,80$ V, przy czym na konstrukcjach posiadających dobre osłony izolujące obserwuje się potencjały od $-0,65$ V do sporadycznie $-0,80$ V. Jako średnią wartość tego potencjału wg PN [16], przyjmuje się $-0,55$ V. Wartości potencjału stacjonarnego aluminium, jak wspomniano wyżej, kształtują się w granicach od $-0,46$ V do $-1,18$ V, w gruntach piaszczystych średnia wartość tego potencjału, podobnie jak w przypadku stali, wynosi $-0,55$ V. Na podstawie powyższych danych przyjęto, że powłoka lub pancerz kabla mają szczelną osłonę ochronną, jeżeli wartość zmierzonego potencjału jest bliska zeru, przy czym wartości rezystancji izolacji powinny być większe lub równe $1 \text{ M}\Omega \cdot \text{km}$.

W wyniku przeprowadzonego rozpoznania ustalono, że dostępne do badań są odcinki fabrykacyjne kabli ułożone w gruncie, nie połączone oraz odcinki częściowo zmontowane, a także odcinki fabrykacyjne umieszczone na bębnach.

Pomiary prowadzono na terenie czterech województw oraz w fabryce kabli i na terenie magazynu PBLK. Na większości badanych linii odcinki fabrykacyjne kabla, ułożone w gruncie, były nie połączone. Sprawdzono około 100 takich odcinków. Na trzech trasach badano także odcinki linii częściowo połączone, posiadające jedno lub kilka złączy i skrzynie pupinizacyjne. W tym na dwu trasach złącza były wykonane bez dokumentacji, na pozostałej złącza montowano wg instrukcji IT-004/ZBL-78 [9]. Umieszczenie badanych linii w różnych częściach kraju umożliwiło dokonanie pomiarów w różnych warunkach gruntowych. W okresie prowadzenia badań ilość opadów była większa od przeciętnej i na prawie wszystkich trasach, w miejscu ułożenia kabla, zalegała woda.

W wyniku badań stwierdzono, że rezystancja izolacji między powłoką a pancerzem kabla, umieszczonego na bębnie, na 60% badanych odcinków była równa lub większa niż $80 \text{ M}\Omega \cdot \text{km}$, a w przypadku pozostałych 40% odcinków nie była niższa niż $20 \text{ M}\Omega \cdot \text{km}$, natomiast na dwóch badanych odcinkach, na terenie

magazynów PBLK, rezystancja izolacji jw. była nie mniejsza niż 4 M Ω km.

W przypadku nie połączonych odcinków kabla, leżących minimum 2 tygodnie w gruncie, wartości rezystancji izolacji powłoki i pancerza, w stosunku do ziemi, kształtowały się jak podano w tablicy 3.

Tablica 3

Wartości rezystancji powłoki		Wartości rezystancji izolacji pancerza	
M Ω . km	%	M Ω . km	%
0,0001	2	0,0001	15
0,001	2	0,001	31
0,01	3	0,01	26
0,1	16	0,1	14
1	10	1	4
10	47	10	10

Procent odcinków kabla posiadających szczelne osłony ochronne na powłokach był różny na różnych trasach, zgodnie z zestawieniem podanym w tablicy 4.

Tablica 4

Trasa	%
G-Z	33
Ś-N	82
P-Ch	86
B-S	26
O-O	32

W przypadkach gdy rezystancja izolacji powłoki była więk-

sza lub równa $10 \text{ M}\Omega \cdot \text{km}$ na powłoce mierzono wyłącznie wartości potencjału bliskie zeru.

W stosunku do wszystkich badanych nie połączonych odcinków kabla 40% stanowiły odcinki, w przypadku których wyniki badań wskazują na możliwość nieszczelności osłon izolujących powłokę.

Procentowy udział odcinków kabla, posiadających szczelne osłony ochronne na pancerzu, był na różnych trasach następujący /por. tablica 5/:

Tablica 5

Trasa	%
G-Z	0
Ś-M	0
P-Ch	21
B-S	4
G-O	14

W przypadkach gdy rezystancja izolacji pancerza była większa lub równa $1 \text{ M}\Omega \cdot \text{km}$, na pancerzu mierzono wyłącznie potencjały bliskie zeru.

W stosunku do wszystkich badanych nie połączonych odcinków kabla 60% stanowiły odcinki, w przypadku których wyniki badań wskazują na nieszczelność osłon ochronnych pancerza.

Podczas pomiarów zwracano również uwagę na sposób zabezpieczenia końców odcinków fabrykacyjnych kabla, które fabrycznie powinny być izolowane rękawem termokurczliwym; przeważająca liczba ułożonych w gruncie odcinków miała zdjęte rękawy termokurczliwe, całkowicie lub częściowo, co mogło ułatwić penetrację wilgoci i wpłynąć na wyniki pomiarów, a także spowodować korozję powłoki przed zmontowaniem kabla. Na jednej z tras zaobserwowano także przecięcie zewnętrznej osłony przez taśmę stalową opancerzenia.

Wszystkie badane odcinki kabla częściowo zmontowane, posiadające złącza i skrzynie pupinizacyjne, wykazywały kontakt elektryczny i elektrochemiczny powłoki i pancerza z ziemią.

Analizując wyniki badań prowadzonych w Instytucie Łączności można sformułować następujące wnioski:

- aluminium koroduje w gruntach intensywniej niż ołów i w związku z tym aluminiowe powłoki kabli muszą być starannie odizolowane od ziemi;
- zakres potencjałów ochrony katodowej dla aluminium powinien zawierać się w granicach od $-0,95$ V do $-1,10$ V wzgl. $\text{Cu}/\text{Cu SO}_4$, bo tylko w tych granicach potencjałów nie obserwowano uszkodzeń korozyjnych metalu;
- w polu oddziaływania prądów błędzących aluminium może korodować zarówno w strefach anodowych, jak i katodowych;
- z przebadanych dotychczas ok. 100 odcinków fabrykacyjnych kabla, ułożonych w gruncie, nie połączonych - około 40% ma nieszczelne osłony ochronne izolujące powłokę, a około 60% tych odcinków ma nieszczelną osłonę izolującą pancerz.

Wyniki dotychczasowych badań wskazują na konieczność:

- wybudowania, jednolitą techniką, doświadczalnej linii kablowej; linia taka niezbędna jest do przeprowadzenia systematycznych badań i obserwacji zastosowanych metod ochrony, a w konsekwencji do opracowania wytycznych ochrony katodowej czy też wytycznych skojarzonej ochrony, zabezpieczającej linię przed różnymi oddziaływaniami;
- starannej kontroli procesu układania i montowania kabli w ziemi;
- poprawienia jakości taśm stalowych opancerzenia;
- kontroli jakości osłon ochronnych na kablach aluminiowych; wykryte uszkodzenia, zarówno w procesie fabrykacyjnym, jak też w trakcie montażu i eksploatacji kabla, powinny być zlokalizowane i usunięte.

WYKAZ LITERATURY

1. Bralewski J.: Wstępne zasady instalowania kabli w nowoczesnych osłonach ochronnych. IL.Praca Nr 111.02.D.05/743/68, 1979.
2. BSI.CP 1021 1973. Code of Practice for cathodic protection.
3. Câbles de telecommunication à enveloppe en aluminium protégée par une gaine de polyéthylène et deux feuillards en acier, avec fils en quartes "étoile"isolés au papier. Conditions Techniques, No 2001. Fascicule No 7. Raccordement et verification des câbles. S.N.C.F. April 1967.
4. CCITT: Doc. AP V No 56. Genewa 1972. Preliminary report to the V th CCITT plenary assembly on the work of study group VI /period 1968-72/.
5. CCITT: Doc. AP VI No 70. Genewa 1976. Final report of study group VI to the VI th plenary assembly, part II.
6. CCITT: Doc. AP VII No 36. Genewa 1980. Final report to the CCITT VII plenary assembly. Study group VI.
7. CCITT: Zalecenia dotyczące ochrony kabli podziemnych przed korozją. New Delhi 1960. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 1968.
8. GOST 9.015-74. Jedinaja sistema zaszcizity ot korrozii i starenija. Podziemnyje sooruzenija. Obszczyje techniczeskije trebowania. Moskwa.
9. Instrukcja IT-004/ZBL-78. Wykonywanie złączy kabli symetrycznych o powłokach aluminiowych.
10. Morgan J.H.: Cathodic Protection. Leonard Hill /Books/ Ltd., London 1959.
11. NACE Basic corrosion course. National Assotiation of corrosion engineers. Houston Texas, 1970.
12. Niewiadomski C.: Kable telekomunikacyjne o powłoce aluminiowej. Przegląd Zagadnień Łączności, 1964, Nr 4, s. 15-56.
13. Nikolskij K.K., Fiedosiejewa E.G.: Zaszczita podziemnych metaliczeskich sooruzenij swiazi izolirujuszczymi pokrowami. Swiaż, Moskwa 1975.

14. Pałczyńska J.: Problems of the cathodic protection of aluminium in the soil. Proceedings of the 3rd International Symposium on Corrosion in Soil. Siófok/Hungary 1980.
15. PN-70/H-82160. Aluminium do przeróbki plastycznej. Ga-tunki.
16. PN-77/E-05030 ark. 00. Ochrona przed korozją. Ochrona ka-todowa. Wspólne wymagania i badania; ark. 01. Ochrona przed korozją. Ochrona katodowa. Ochrona metalowych kon-strukcji podziemnych.
17. Shreir L.L.: Corrosion, George Newnes Limited, London 1965.
18. Skiba-Rogalska O., Pałczyńska J.: Badania w warunkach eksploatacyjnych środków ochrony dla kabli o powłokach aluminiowych i stalowych. IL.Praca 111.02.A.03, 1981.
19. Skiba-Rogalska O., Pałczyńska J.: Rozoznanie zagadnienia ochrony przed korozją kabli telekomunikacyjnych w powłokach stalowych. IL.Praca 111.02.A.01a, 1977.
20. Skiba-Rogalska O., Ryniewicz K.: Badania laboratoryjne w zakresie ochrony katodowej kabli o powłokach alumini-owych, cz. I. Rozoznanie literaturowe i opracowanie wstępnej metodyki badań laboratoryjnych. IL.Praca nr 109.01.04/968/302, 1971.
21. Skiba Rogalska O., Teska-Świderek K.: Korekta wymagań na osłony i powłoki kablowe z tworzyw termoplastycznych dla resortu łączności. Sprawozdanie z badań i wnioski. IL. Praca 109.01.04.02/1295/419, 1975.
22. Warunki techniczne na telekomunikacyjne kable dalekość-
no symetryczne:
 - z wiązkami parowymi o izolacji polietylenowej piankowej WT-77/K-092,
 - z wiązkami czwórkowymi o izolacji polietylenowej pianko-
wej WT-77/K-093,
 - z parami współosiowymi małowymiarowymi WT-78/K-094.

UZIEMIENIE KABLI TELEKOMUNIKACYJNYCH

1. WSTĘP

Tradycyjne metody uziemiania w telekomunikacji, stosowane dotychczas w kraju, wymagają przeanalizowania zarówno pod kątem ich skuteczności w związku ze stopniowym zmniejszaniem się długości i powierzchni uziomów naturalnych /na skutek wprowadzania niemetalowych rurociągów podziemnych i kabli w izolujących osłonach termoplastycznych/, jak też pod kątem zagrożenia korozyjnego, jakie mogą stwarzać uziomy. Nieznajomość podstaw korozji elektrochemicznej jest bowiem w przypadku uziemiania przyczyną częstych błędów w projektowaniu, instalacji i eksploatacji urządzeń uziemiających, co pociąga za sobą straty korozyjne w liniach kablowych oraz innych metalowych konstrukcjach stykających się z elektrolitem glebowym lub wodą. Nieefektywne też stają się środki ochrony katodowej przewidzianej do zabezpieczenia kabli przed korozją.

Wpływ uziemień na korozję metalowych konstrukcji stykających się ze środowiskiem elektrolitycznym nie był dotychczas w kraju badany. Wieloletnie obserwacje wskazują, że wpływ taki istnieje. Można tu wymienić choćby bardzo mały zasięg ochrony katodowej na obołwionych kablach ziemnych, posiadających bardzo dobry styk z gruntem, korozję występującą na opancerzeniu i powłokach kabli ułożonych w rejonach z korozyjnego punktu widzenia mało agresywnych, gdzie nie stwierdza się oddziaływania prądów błądzących. Nie wyjaśniona do końca jest sprawa, tak często obecnie spotykanej w kraju, korozji ocynkowanych rur instalacji wodnych w budynkach mieszkalnych. Badania prowadzone w Kalifornii wykazały, że niewłaściwe uziemienia były jedną z głównych przyczyn przedwczesnego niszczenia rur instalacyjnych.

Włączanie różnych kabli i urządzeń telekomunikacyjnych, bez dodatkowych zabezpieczeń, do wspólnego systemu uziemiającego może stwarzać niebezpieczeństwo korozji metalu bardziej elektroujemnego, w stosunku do metalu uziomu. Niebezpieczeństwo to wzrasta ze zmniejszaniem się powierzchni anodowej, ponieważ wzrasta wtedy gęstość prądu korozyjnego, co wiąże się bezpośrednio z korozją materiału. Szczególnie niebezpieczne są małe, odsłonięte powierzchnie stalowe lub aluminiowe na kablach w osłonach termoplastycznych. W wilgotnym gruncie stanowią one, w połączeniu z rozległym uziomem, np. miedzianym, bardzo aktywne anody korozyjnego ogniw galwanicznego, którego katodą jest miedziany uziom, działający w tym samym środowisku elektrolitycznym.

Wspomniane tu, niektóre tylko problemy, związane z uziemianiem kabli i urządzeń telekomunikacyjnych, wymagają ściślej współpracy między korozjonistami i specjalistami ochrony elektrycznej. Bez takiej współpracy trudno sobie wyobrazić jednoczesne, skuteczne zabezpieczenie kabla przed oddziaływaniem linii elektroenergetycznych, udarami piorunów i korozją, czyli tak zwaną ochronę skojarzoną. Prace nad tym zagadnieniem prowadzone są od wielu lat za granicą. Problem badany jest w Komisji V i VI CCITT oraz w ramach Organizacji Współpracy Łączności /OWL/. Wytycznych szczegółowych, obejmujących jednocześnie zabezpieczenia kabli przed różnego rodzaju oddziaływaniami elektrycznymi i korozją, brak dotychczas w kraju.

W niniejszym artykule podano informacje na temat działania korozyjnych ogniw galwanicznych, w których elektrodami mogą być fragmenty metalowej powłoki kabla i materiał uziomu, omówiono materiały uziomowe stosowane w dotychczasowej praktyce, bądź zalecane do stosowania, środki zaradcze zmierzające do zmniejszenia niebezpieczeństwa korozji, a także niektóre aspekty skojarzonej ochrony kabli.

2. CEL UZIEMIANIA

Uziemieniem nazywa się przewodzące połączenie z uziomem, to jest przedmiotem, najczęściej metalowym, umieszczonym w gruncie i tworzącym także z gruntem przewodzące połączenie [4]. Określenie podane w normie można rozszerzyć, nazywając uziemieniem przewodzące połączenie z ziemią obwodu elektrycznego lub przedmiotu, który może znaleźć się pod napięciem [23].

W skład uziemienia wchodzi, oprócz wspomnianego wyżej uziomu, przewody uziemiające i uziomowe. Pierwsze z wymienionych łączą uziemiany przedmiot z przewodem uziomowym lub bezpośrednio z uziomem. Drugie, niez izolowane, umieszczone w gruncie, łączą uziom lub zespół uziomów z przewodem uziemiającym lub zaciskiem probierczym. Zacisk ten może być umieszczony zarówno na przewodzie uziomowym, jak i uziemiającym, a przeznaczony jest do odłączania uziemianych przedmiotów przy pomiarze rezystancji uziemienia.

Układ złożony z uziomów, przewodów uziemiających i uziomowych nazywany jest w normie [4] siecią uziemiającą.

Celem uziemiania jest:

- ochrona personelu i użytkowników przed niebezpiecznymi napięciami przez sprowadzenie do wspólnego potencjału wszystkich metalowych konstrukcji i urządzeń nie będących normalnie pod napięciem oraz przez spowodowanie zadziałania zabezpieczeń przetężeniowych;
- obniżenie szumów i przeników w sieci telekomunikacyjnej oraz zakłóceń radioelektrycznych;
- połączenie z ziemią dodatniego bieguna źródła prądu stałego, zasilającego urządzenia telekomunikacyjne;
- ochrona kabli i urządzeń telekomunikacyjnych przed oddziaływaniami linii elektroenergetycznych i elektrotrakcyjnych oraz przed niebezpiecznymi napięciami powodowanymi wyładowaniami atmosferycznymi; tu wykorzystuje się również odgromniki stacyjne lub liniowe;

- utworzenie obwodu wspólnego do celów sygnalizacji i zdalnego zasilania, np. wzmacniaków na liniach kablowych /czego obecnie już się nie stosuje/.

W obiektach telekomunikacyjnych zaleca się łączyć z uziomem wszystkie konstrukcje metalowe istniejące w budynku.

W związku z dalszymi rozważaniami na temat niebezpieczeństwa korozji trzeba jeszcze wymienić postanowienia normy [4] dotyczące systemów uziemień.

W przypadku zerowania, czyli środka dodatkowej ochrony przeciwporażeniowej, sieć uziemiająca powinna być połączona:

- z wszystkimi dostępnymi uziomami naturalnymi;
- z uziomami sztucznymi;
- z przewodem zerowym sieci elektroenergetycznej niskiego napięcia i własnej elektrowni zapasowej;
- z instalacją sanitarną, gazową i ogrzewczą budynków;
- z instalacją piorunochronną budynku w miejscach największego zbliżenia;
- ze zbrojeniem albo konstrukcją stalową budynku;
- z przewodami ochronnymi, doprowadzonymi do poszczególnych urządzeń wymagających uziemienia.

Również w przypadku uziemienia ochronnego, sieć uziemiająca powinna mieć połączenia podobne do opisanych wyżej.

Uziemienia linii kablowych natomiast powinny być wykonywane zgodnie z wytycznymi [26], które są aktualnie nowelizowane. Wytyczne przewidują metaliczne łączenie powłoki kabla z opancerzeniem w następujących miejscach:

- a/ we wszystkich złączach kablowych,
- b/ przy skrzyniach pupinizacyjnych,
- c/ na końcach kabli wprowadzanych do budynków,
- d/ przed złączami izolującymi i rozdzielczymi.

Zaleca się także metaliczne łączenie sąsiednich kabli przy złączach i skrzyniach pupinizacyjnych.

Ograniczenia w łączeniu powłoki z opancerzeniem dotyczą kabli o powłokach metalowych w osłonach termoplastycznych.

Na liniach kablowych w zasięgu oddziaływania trakcji elektrycznej również ogranicza się łączenie powłoki z opancerzeniem, przy czym ograniczenie dotyczy przede wszystkim wymienionych wyżej punktów c/ i d/. W celu wyrównania potencjału norma [4] dopuszcza łączenie z siecią uziemiającą kabli w osłonach termoplastycznych.

Zarówno w wyżej cytowanej normie, jak też wytycznych [26] nie jest wyraźnie powiedziane, jakie środki należy podejmować przy równoczesnym stosowaniu ochrony katodowej dla zabezpieczenia urządzeń liniowych przed korozją. Brak także informacji na ten temat w instrukcji francuskiej administracji [18].

W projekcie podręcznika nt. uziemień, opracowanego w ramach V i VI Komisji Studiów CCITT wspomina się, że aby nie obniżać efektywności zastosowanej ochrony katodowej, na podziemnych konstrukcjach metalowych wprowadzanych do budynków, należy te konstrukcje odizolować względnie stosować inne środki zapewniające efektywną ochronę przed korozją [6].

Pewne wskazówki dotyczące równoczesnego stosowania uziomów i ochrony katodowej daje kolejowa instrukcja radziecka [14].

3. KOROZYJNE OGNIWA GALWANICZNE

Korozja metalu w ziemi lub w wodzie ma charakter elektrochemiczny i zawsze towarzyszy jej przepływ prądu między anodą i katodą ogniwa galwanicznego czy komórki elektrolitycznej, przy czym w elektrolicie /w rozpatrywanym przypadku wilgotna ziemia lub woda/ prąd przenoszony jest jonowo, w przewodzie metalicznym elektronowo. Wśród wielu czynników sprzyjających procesowi korozji bardzo ważny jest styk dwóch różnych metali w tym samym elektrolicie. W praktyce uziemiańskich różnych obiektów, styki takie często występują. Praktyk, przy łączeniu ze sobą dwóch różnych metali, zazwyczaj nie zwraca uwagi na możliwość powstania ogniwa korozyjnego. Nawet wtedy, kiedy pojawią się znaczne szkody korozyjne, praktyk najczęs-

ciej nie wiąże tego z możliwością szkodliwego oddziaływania uziomu.

Rozważania tu podane powinny w pewnym sensie uświadomić niebezpieczeństwo, na jakie mogą być narażone, łączone ze sobą różne metalowe konstrukcje podziemne, względnie połączone z nimi konstrukcje naziemne posiadające styk ze środowiskiem wodnym.

Powstawanie korozyjnych ogniw galwanicznych i szkody wynikające z łączenia ze sobą, przy uziemianiu różnych obiektów metalowych, wielokrotnie były już w zagranicznej prasie technicznej dyskutowane, o czym świadczą niektóre tylko przytoczone tu publikacje [1 ÷ 3, 11, 12, 15, 17, 19, 22, 24, 25].

Pojawienie się ogniw korozyjnego związane jest z niejednorodnością środowiska elektrolitycznego lub niejednorodnością metalu eksploatowanego w tym środowisku.

W pierwszym przypadku powstają ogniwia stężeniowe. Do takich między innymi zalicza się ogniwia różnicowego napowietrzania, których działanie często obserwuje się na kablach obołwionych posiadających osłony z obwoju jutowo-papierowego. Anodami, z których prąd korozyjny wypływa, są miejsca gorzej napowietrzane, to znaczy fragmenty ołowianej powłoki kabla, do których dociśnięty jest wilgotny materiał włóknistego obwoju osłon kablowych.

Natomiast metaliczny styk dwóch różnych metali w elektrolicie glebowym zapoczątkowuje pracę ogniw korozyjnego, w którym prąd korozyjny uzależniony jest od różnicy potencjałów między tymi metalami, podobnie jak w ogniwie Leclanche'a.

Każdy z metali ma swój własny potencjał w elektrolicie. W wielu podręcznikach elektrochemii podaje się szereg napięciowy, w którym metale uporządkowane są w miarę wzrastającego potencjału elektrochemicznego względem elektrody wodorowej /tabl. 1/. Na jednym krańcu szeregu znajdują się metale aktywne, o bardziej ujemnych potencjałach; na drugim krańcu - metale szlachetne, o bardziej dodatnich potencjałach. Podany w tabelicy 1 szereg teoretyczny może dawać pewne informacje, co do zachowania się pary połączonych ze sobą me-

tali. W praktyce potencjały podziemnych konstrukcji metalowych mierzone są względem siarczano-miedziowej elektrody odniesienia Cu/CuSO_4 , której potencjał różni się od potencjału elektrody wodorowej o wartość $+0,32$ V.

Tablica 1

Szereg napięciowy metali

Metal	Potencjał względem elektrody wodorowej, V
Magnez	-2,40
Aluminium	-1,69
Cynk	-0,76
Żelazo	-0,44
Kadm	-0,40
Kobalt	-0,29
Nikiel	-0,25
Cyna	-0,16
Ołów	-0,13
Wodór	-0,00
Miedź	+0,35
Srebro	+0,81
Złoto	+1,38
Platyna	+1,60

W warunkach eksploatacji metalowych konstrukcji podziemnych potencjał metalu zależy od wielu czynników, takich jak np.: stopień skorodowania powierzchni, skład środowiska elektrolitycznego, stopień napowietrzenia środowiska. Dlatego też w różnych wytycznych podaje się wartości średnie potencjałów, odbiegające często od obliczonych teoretycznie wartości podanych w tablicy 1.

Praktyczny szereg napięciowy metali, najczęściej stosowanych na konstrukcje umieszczane w ziemi, podany jest w tablicy 2.

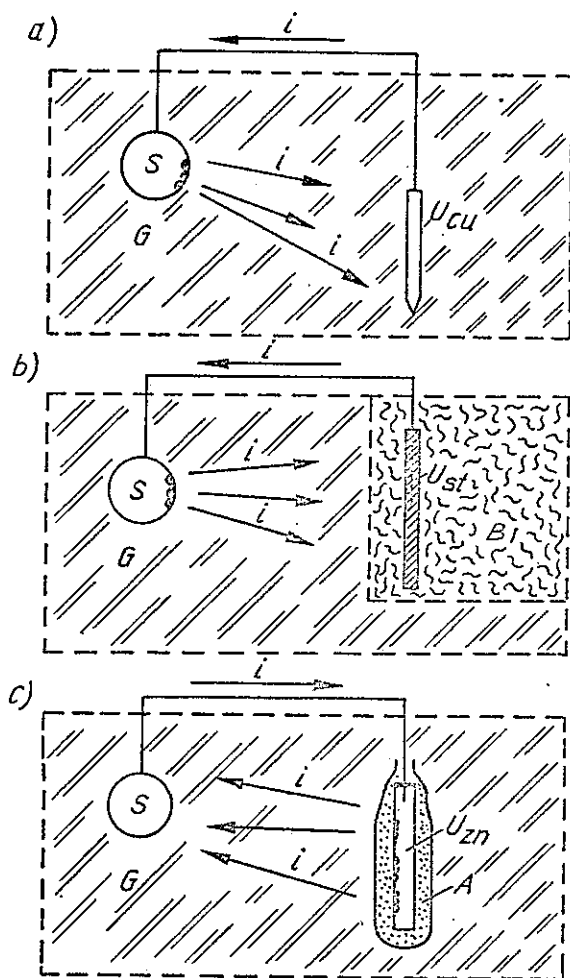
Tablica 2

Szereg napięciowy metali najczęściej stosowanych
na konstrukcje podziemne /Szereg praktyczny/ [24]

Metal	Elektrolit	Zakres wartości potencjałów metalu, mierzonych względem elektrody Cu/CuSO ₄ , V
Cynk a także stal ocynkowana	Wilgotny grunt	-0,7 ... -1,0
Stal zwykła	" "	-0,5 ... -0,8
Ołów	" "	-0,5 ... -0,7
Stal przerdzewiała	" "	-0,4 ... -0,6
Żeliwo	" "	-0,2 ... -0,4
Stal w betonie	Beton/wilgotny grunt	-0,1 ... -0,3
Miedź a także stal pomiedziowana	Wilgotny grunt	0,0 ... -0,2

Mimo stosunkowo szerokiej rozpiętości mierzonych w praktyce potencjałów, z tablicy 2 można zorientować się, że miedź, stal zbrojeniowa w betonie i żeliwo są dodatnie w stosunku do cynku, stali zwykłej, ołowiu. Przy połączeniu z tymi metalami będą się zachowywać katodowo.

Na rysunku 1 pokazano schematycznie działanie galwanicznego ogniwa korozyjnego przy połączeniu niektórych metali ze sobą. Połączenie konstrukcji ze stali zwykłej lub ołowiu z miedzianym uziomem albo ze zbrojeniem w betonie może spowodować korozję tych konstrukcji /rys. 1 a,b/. Przeciwnie będzie przy połączeniu takiej samej konstrukcji z uziomem cynkowym lub stalą ocynkowaną. Tu anodą korodującą będzie uziom cynkowy /stal ocynkowana/, natomiast konstrukcja ze stali zwykłej będzie chroniona katodowo. Prąd elektryczny przenoszony jonowo w elektrolicie będzie przepływał od cynku do stali /rys. 1 c/, a w przewodzie metalowym - od stali do cynku. W koro-



Rys. 1. Działanie ogniwa korozyjnego.

- a/ przy połączeniu stali zwykłej z miedzianym uziomem;
 b/ przy połączeniu ze stalą zbrojenia w betonie; c/ przy
 połączeniu z cynkowym uziomem lub stalą ocynkowaną

i - kierunek prądu ogniwa; S - konstrukcja stalowa /opancerzenie kabla, zbiornik, rurociąg/; G - wilgotny grunt;
 U_{cu} , U_{st} , U_{zn} - uziomy - odpowiednio miedziany, stal zbrojenia, cynkowy; B - beton; A - aktywator bentonitowy

zyjnych ogniwach galwanicznych obszar anodowy charakteryzuje się zawsze bardziej elektroujemnym potencjałem.

Wielkość prądu korozyjnego "i" będzie w każdym z wymienionych przypadków zależała od różnicy potencjałów między metalami, od oporności elektrolitu i od stopnia spolaryzowania połączonych ze sobą metali. Polaryzacją nazywa się tu przesunięcie potencjału elektrod metalowych na skutek przepływu prądu.

Wielkość polaryzacji jest wprost proporcjonalna do gęstości prądu j przypadającego na jednostkę powierzchni, będzie więc najczęściej różna na obu metalach /katodzie i anodzie/ ogniwa korozyjnego; różne są bowiem ich powierzchnie stykające się z ziemią.

Biorąc pod uwagę powierzchnię anody i katody można obliczyć średnią gęstość prądu na anodzie, posługując się tzw. "regułą powierzchni" [3, 12]:

$$j_a = \frac{i}{S_a} \approx \frac{U_k - U_a}{r_k} \cdot \frac{S_k}{S_a} \quad /1/$$

gdzie: j_a - średnia anodowa gęstość prądu,

i - prąd ogniwa,

S_a, S_k - odpowiednio powierzchnie anody i katody,

U_a, U_k - odpowiednio potencjały anody i katody,

r_k - opór właściwy polaryzacji katodowej.

Z podanej wyżej reguły wynika, że gęstość prądu korozyjnego jest tym większa, im mniejsza jest powierzchnia anodowa.

Przy tej samej gęstości prądu korozyjnego na anodzie różne metale będą w różnym stopniu ulegały niszczeniu; zależy to między innymi, od równoważnika elektrochemicznego i od ciężaru właściwego metalu. Wymiar ilościowy korozji, dla różnych metali stosowanych w praktyce uziemiania i na konstrukcje podziemne podaje tablica 3.

Małe powierzchnie anodowe są szczególnie niebezpieczne w przypadku kabli posiadających osłony termoplastyczne wytłoczone. Przy połączeniu kabla z rozległym systemem uziemień miedzianych lub żelbetowych odsłonięta powierzchnia metalu w

małym defekcie pokrycia izolującego będzie narażona na tak duże gęstości prądu, że punktowy wżer korozyjny może wystąpić w ciągu kilku miesięcy.

Tablica 3

Działanie prądów korozyjnych [24]

Metal	Ilość rozpuszczonego metalu g/mA.rok	Ilość rozpuszczonego metalu cm ³ /mA.rok
Żelazo /stal zwykła/	9,1	1,2
Miedź	10,5	1,2
Ołów	34,0	3,0
Cynk	10,7	1,5
Aluminium	2,9	1,1
Magnez	4,0	2,3

Jeśli wziąć jako przykład kołową powierzchnię defektu w pokryciu izolującym, to gęstość prądu w tym miejscu można wyrazić wzorem: [3]:

$$j = \frac{4 \Delta V}{\pi / R_1 + R_2 + R_p / d^2} \quad /2/$$

gdzie: j - gęstość prądu w defekcie pokrycia,
 ΔV - różnica potencjałów metali,
 R_1 - opór przejścia w defekcie pokrycia,
 R_2 - opór porów izolacji,
 R_p - opór polaryzacji,
 d - średnica defektu.

Wymienione opory można określić następującymi zależnościami:

$$R_1 = \frac{S}{2d} = \frac{1}{2\lambda d}; \quad R_2 = \frac{4l}{\lambda \pi d^2}; \quad R_p = \frac{4r_p}{\pi d^2}$$

gdzie: l - grubość pokrycia izolującego,
 ϱ - oporność gruntu,
 r_p - opór właściwy polaryzacji $\sqrt{R \cdot m^2}$ /_p,
 χ - przewodność właściwa gruntu.

Niebezpieczeństwo korozji przy łączeniu metalowych konstrukcji z żelbetem zauważono stosunkowo niedawno. Przy projektowaniu sieci uziemiającej należy pamiętać o nim, gdyż liczba konstrukcji żelbetowych, wykorzystywanych jako uziomy wzrasta, a równocześnie wzrasta sieć podziemnych niemetalowych konstrukcji lub konstrukcji metalowych dobrze izolowanych od ziemi. Stosunek powierzchni sieci uziemiającej przesuwają się więc na korzyść żelbetów; wzrasta polaryzacja anodowa na pozostałych elementach metalowych.

Vögtli [24, 25] opisuje przypadek korozji izolowanych rurociągów wodnych połączonych ze zbrojeniem betonu. Abbot [1] podaje przykład korozji ołowianych powłok kabla kanałowego połączonych z miedzianym uziomem stacyjnym, jak również ocynkowane rur wodnych połączonych z miedzianym systemem uziemiającym w Los Angeles. Neuhaus [19] opisuje przypadek rozległej korozji uziomu pierścieniowego ze stali ocynkowanej połączonej ze zbrojeniem fundamentu. Wiele niewyjaśnionych przypadków korozji kabli spotyka się również w kraju. Problem ten wymaga dokładnego przebadania również z punktu widzenia zwiększenia efektywności ochrony katodowej.

4. MATERIAŁY UZIOMOWE

Na uziomy stosuje się stal zwykłą, stal zwykłą z powłokami metalicznymi, miedź czystą lub z powłokami metalicznymi, a sporadycznie stal szlachetną, żeliwo zwykłe i żeliwo wysoko-krzemowe, stopy protektorowe cynku. Niżej omówione będą zalety i wady różnych materiałów uziomowych.

Stal zwykła bez pokryć metalicznych stosowana jest przeważnie jako złom w postaci szyn, rur itp. Ze względu na małą odporność korozyjną proponuje się czasami równoczesne stoso-

wanie ochrony katodowej do zabezpieczenia uziomu stalowego przed korozją [1, 13, 15, 17].

Stale szlachetne niklowo-chromowe stosuje się niekiedy, ze względu na dużą odporność korozyjną. Odporność stali szlachetnych jest znaczna w atmosferze lub wodzie, natomiast w ziemi zależy ona od stanu spasywowania powierzchni metalu [12]. Potencjał stali szlachetnej zbliżony jest do potencjału miedzi. W niektórych środowiskach bywa jeszcze bardziej dodatni niż potencjał miedzi, a więc stal szlachetna będzie miała silnie wyrażone własności katodowe przy łączeniu z metalami bardziej aktywnymi, jak cynk, stal ocynkowana. Stale szlachetne nie przedstawiają specjalnych korzyści jako materiały uziomowe. Są one ponadto drogie i deficytowe.

Stal ocynkowana ograniczo jest najbardziej rozpowszechniona w technice uziemiania. Jest odporna korozyjnie prawie we wszystkich gruntach, dzięki międzywarstwie stopowej żelazo-cynk. Tylko w niektórych gruntach o małej oporności właściwej stal ocynkowana koroduje [17], ale i w takich przypadkach, dzięki warstwie stopowej, żywotność materiału jest większa niż w przypadku stali bez powłoki metalicznej. Stal ocynkowana zachowuje się anodowo w stosunku do miedzi, stali szlachetnej, zbrojenia stalowego w betonie, stali zwykłej, ołowiu i zeliwa. W połączeniu z tymi metalami może korodować.

Stal obołowiona jest to stosunkowo nowy materiał uziomowy. Stosowana jest w postaci drutów o przekroju okrągłym. Z ziemią styka się tylko ołów, który podobnie jak kable obołowione, w większości środowisk jest odporny na korozję dzięki tworzeniu tlenkowej warstwy ochronnej. Ołów jest mało odporny w środowisku alkalicznym, dlatego przy zabetonowywaniu przewodu obołowionego należy go izolować. Powłoki otrzymuje się ogniowo z ołowiu zawierającego dodatek antymonu /0,5%/ lub telluru /0,04%/. Ołów jest mniej szlachetny niż miedź, natomiast bardziej szlachetny niż stal ocynkowana. Przy połączeniu z nią zachowuje się katodowo, chociaż niektórzy uważają, że połączenia te nie są groźne [22]. Zależy to zwykle od stosunku powierzchni anodowej do katodowej.

Stal miedziowana w układach uziemiających będzie się zachowywała jak uziom miedziany; środki ostrożności będą więc takie, jak zalecane w przypadku miedzi. Należy zaznaczyć, że warstwa miedzi musi być bardzo szczelna, gdyż przy dużej różnicy potencjałów między miedzią i stalą jakiegokolwiek uszkodzenia powłoki metalicznej i pory mogą powodować powstawanie ogniska korozyjnego między tymi metalami. Zgodnie z regułą powierzchni /1/ korodować będzie odsłonięta stal.

Stalowe zbrojenie betonów wykorzystywane jest bardzo często do uziemień. Zarówno uziomy, jak też przewody uziomowe łączone są bezpośrednio ze zbrojeniem fundamentów betonowych. Stal zbrojeniowa na całej powierzchni stykającej się z betonem ma potencjał zbliżony do miedzi; środki ostrożności będą więc podobne do opisanych w przypadku miedzi.

Czysta miedź jest bardzo odporna korozyjnie, dzięki swemu położeniu w szeregu napięciowym, po stronie metali szlachetnych /tabl. 1, 2/. Połączona z takimi metalami, jak cynk, aluminium, stal ocynkowana, stał zwykła, ołów - jest dodatkowo ich kosztem chroniona katodowo. Uziomy miedziane, jak również stal miedziowana nie powinny być nigdy łączone z uziomami z metali mniej szlachetnych, takich jak np. stal ocynkowana. Rozległe uziomy miedziane nie powinny być też łączone z konstrukcjami posiadającymi dobre osłony izolujące /kable w osłonach termoplastycznych, rurociągi, zbiorniki/. Niebezpieczeństwo korozji małych odsłoniętych powierzchni może się tu pojawić zarówno w przypadku dużych oporności gruntu, kiedy do uzyskania przewidzianych normą wartości oporu przejścia niezbędne są duże rozmiary uziomu, jak też w gruntach o małej oporności. Oporność środowiska jest bowiem w takich przypadkach czynnikiem równie ważnym, jak stosunek powierzchni anodowych do katodowych. Madley [17] wspomina o przypadkach korozji rur stalowych o małej średnicy połączonych z systemem uziomów miedzianych, gdzie stosunek górej powierzchni miedzianej do pozabawionej pokrycia izolującego powierzchni stalowej był jak 2:1.

Miedź obołowiona, podobnie jak miedź czysta charakteryzuje się małą opornością wzdłużną. Druty miedziane obołowione stosowane są więc do uzemień narażonych na przepływ dużych prądów. Mają one względem środowiska potencjał zbliżony do potencjału stali /patrz tabl. 2/ i połączone z nią nie stwarzają specjalnego niebezpieczeństwa korozji. Przewody miedziane obołowione można łączyć ze zbrojeniem stalowym w betonie przy zapewnieniu środków bezpieczeństwa podanych dla drutów stalowych obołowionych. Administracja Francuska stosuje ten materiał na przewody uziemiające [18].

Miedź cynowana stosowana jest czasami jako materiał uziomowy [13]. Jej potencjał w ziemi zbliżony jest do potencjału ołowiu. Przy łączeniu z innymi metalami będzie się zachowywała podobnie jak ołów.

Cynk jest anodowy w stosunku do większości metali konstrukcyjnych eksploatowanych w gruncie. W wielu przypadkach proponuje się więc stosowanie uziomów cynkowych w postaci rynkowych anod galwanicznych, czyli protektorów [15, 16, 17]. Stanowią one bardzo bezpieczne uzimienie w połączeniu z ocynkowanymi rurami wodociągowymi, z konstrukcjami stalowymi, ołowianymi, aluminiowymi. Anody takie umieszcza się w aktywatorze składającym się z gipsu i bentonitu w proporcji 1:1. Badania porównawcze wykazały, że w takim aktywatorze anody cynkowe mają opór przejścia do ziemi mniejszy niż uziemiające druty miedziane [17]. Aktywator zapewnia równomierne rozstwarzanie materiału anody, której czas życia będzie zależał od prądu ogniwa, w jakim anoda będzie pracowała. Przy odpowiednim dobraniu rozmiarów anoda może starczyć na kilkanaście do kilkudziesięciu lat. W kraju prowadzone są badania nad zastosowaniem tego rodzaju anod do uzimiania, a równocześnie ochrony katodowej kabli o powłokach aluminiowych w osłonach termoplastycznych wytłaczanych.

Żeliwo wysokorzemowe należy do materiałów odpornych korozyjnie. W normie [4] zalecane jest jako materiał na uziomy sztuczne. W Polsce produkowane są gotowe anody z żeliwa wysokorzemowo-chromowego /Zakłady Chemiczne Sarzyna/ prze-

znaczone do ochrony katodowej zewnętrznym prądem. Materiał ten może być również stosowany na uziomy sztuczne. Potencjał żeliwa wysokokrzemowo-chromowego zbliżony jest do potencjału miedzi. Uziomy z tego żeliwa stosowane są raczej w małej masie, do zabezpieczania niedużych obiektów. Niebezpieczeństwo powstawania korozyjnych ogniw galwanicznych jest więc niewielkie.

Żeliwo zwykle w praktyce wykorzystywane jest najczęściej jako uziom naturalny, pod postacią rurociągów podziemnych wykonanych z tego materiału. W kraju żeliwne mufy wykorzystywane są do uziemiania kabli o powłokach aluminiowych z wytłoczonymi osłonami termoplastycznymi. Ponieważ praktyka takiego uziemienia jest dość powszechna należy zwrócić uwagę, że między aluminium i żelwem jest znaczna różnica potencjałów i drobne uszkodzenia wytłoczonej osłony kabla mogą być przyczyną powstawania, prowadzących do korozji, obszarów anodowych na aluminium. W stosunku do stali opancerzenia nie ma takiego niebezpieczeństwa. W celu zabezpieczenia przed powstawaniem ogniw korozyjnych zaleca się izolowanie muf żeliwnych od ziemi względnie stosowanie muf aluminiowych, również izolowanych od ziemi [9].

5. ŚRODKI ZARADCZE ZMIĘKSZAJĄCE NIEBEZPIECZEŃSTWO KOROZJI PRZY UZIEMIANIU

W przypadku konstrukcji eksploatowanych możliwości stosowania środków zaradczych są raczej ograniczone. W ostatnio opracowanych zaleceniach niemieckich [2] proponuje się więc stosowanie lokalnej ochrony katodowej w stosunku do metalowych konstrukcji podziemnych połączonych ze stalą zbrojeniową fundamentów albo też lokalnej ochrony katodowej zbrojenia żelbetu, w celu obniżenia potencjału stali zbrojeniowej do wartości mniej groźnych dla łączonych z nią konstrukcji [24].

W niektórych przypadkach można przerwać połączenie dwóch różnych pod względem potencjałowym metali przez wbudowanie

iskiernika [12]. Prąd korozyjny nie ma wtedy drogi przepływu, natomiast przy pojawieniu się przepięcia iskiernik zadziała łącząc konstrukcję z uziemieniem, na czas trwania anormalnych warunków pracy. Urządzenie takie nie może być oczywiście wbudowywane w obwody uziomów roboczych i ochronnych, które w sposób ciągły muszą mieć połączenie przewodzące z ziemią. Można stosować złącza izolujące oddzielające zagrożoną konstrukcję od uziomu.

W nowo projektowanych instalacjach, przy łączeniu uziemień z różnych metali, powinno się przestrzegać następujących zasad:

- miedź i stal miedziana nie mogą być łączone z mniej szlachetnymi materiałami, takimi jak: stal zwykła, stal ocynkowana, cynk;
- stal zbrojeniowa w betonie nie powinna być łączona ze stalą ocynkowaną, natomiast można ją łączyć z drutami obożwionymi stalowymi lub miedzianymi; warstwa ołowiu musi być jednak odizolowana od bezpośredniego styku z betonem, np. izolującymi taśmami samoklejącymi;
- druty obożwione można łączyć ze stalą zwykłą nieocynkowaną.

Ponadto

- nie należy stosować miedzi gołej w rozległych uziomach;
- wskazane jest rozdzielanie zbrojenia stalowego w betonie na mniejsze elementy;
- należy dobrze izolować od ziemi wszystkie miejsca połączeń różnych metali; to samo odnosi się do połączeń w betonie.

6. PROBLEM ŁĄCZENIA POWŁOK KABLI Z OPANCERZENIEM

Powłokę kabla łączy się z opancerzeniem, między innymi, w celu wyrównania potencjałów i obniżenia oporu przejścia do ziemi.

Kable tradycyjne, posiadające na powłoce i opancerzeniu obwój włóknisty, uziemione są praktycznie na całej swojej długo-

ści poprzez opancerzenie połączone z powłoką w złączach kablowych. Materiał włóknisty /juta, papier/ nie izoluje elektrycznie od ziemi; wprost przeciwnie, stanowi swego rodzaju elektrolit dla ogniw korozyjnych, np. dla ogniw różnicowego napowietrzania. Metaliczny kontakt między stalą opancerzenia i ołowiem, poza nielicznymi wyjątkami w specyficznych środowiskach, nie stanowi na ogół zagrożenia, gdyż oba metale mają w ziemi podobny potencjał. Podobny jest też udział powierzchni obu metali w elektrolicie glebowym.

Problem pojawia się w przypadku kabli nowoczesnych o powłokach aluminiowych z wytłoczonymi osłonami termoplastycznymi, które izolują elektrycznie powłokę od ziemi. Przy stosowaniu opancerzenia na takich kablach wykorzystuje się często technologie wykonywania złączy, podobne do stosowanych na kablach tradycyjnych, takie jak np. łączenie powłoki z opancerzeniem w złączach, nieizolowanie muł żeliwnych itp.

W pracy [5] zaleca się stosować złącza uziemiane na kablach typu ALKAD posiadających wytłoczone polietylenowe osłony na powłoce i opancerzeniu, układanych z dala od kolejowej sieci trakcyjnej. Przez złącza uziemiane rozumie się przy tym:

- łączenie z uziomami stacji wzmacniakowych i regeneracyjnych,
- uziemienie połączonej z opancerzeniem powłoki poprzez mułę żeliwną,
- uziemienie poprzez protektory lub uziomy anodowe stacji katodowych.

Francuskie przedsiębiorstwa telekomunikacyjne zalecają łączyć powłokę z opancerzeniem możliwie jak najczęściej w przypadkach dużego zagrożenia kabla wyładowaniami atmosferycznymi, w przypadkach zakłóceń radioelektrycznych i w pobliżu trakcji zasilanej prądem zmiennym [20].

Eksperti radzieccy proponują łączyć powłokę z opancerzeniem poprzez specjalne oporniki [3].

Wieloletnie doświadczenia zagraniczo wskazują, że kable o powłokach aluminiowych niekiedy korodują. Uszkodzenia poja-

wiają się przeważnie w sąsiedztwie złączy, co można przypisać galwanicznemu działaniu ogniw korozyjnych pomiędzy słabo zabezpieczoną przy złączu stałą opancerzenia i odsłoniętym na działanie elektrolitu fragmentem powłoki aluminiowej. Może też być galwaniczne działanie ogniwa korozyjnego między mufą żeliwną i aluminium. Dlatego uziemianie poprzez mufę lub poprzez uziomy anodowe czy stacyjne, wykazujące bardziej dodatni w stosunku do aluminium potencjał, wydaje się mniej korzystne.

Zagadnienie łączenia powłoki z opancerzeniem nie jest dostatecznie wyjaśnione w żadnych dokumentach. Potrzebne tu przeanalizowanie doświadczeń różnych administracji; doświadczeń obejmujących różne typy kabli, eksploatowanych w różnych warunkach. Ostatnio zaproponowano opracowanie tego zagadnienia w formie Zalecenia serii L, w ramach VI Komisji Studiów CCITT [9].

Wprowadzenie nowego materiału na powłoki i osłony ochronne kabli wymaga innego niż dotychczas projektowania podziemnej konstrukcji. Techniki i przyzwyczajenia monterskie przenoszone bezpośrednio z kabli tradycyjnych, na kable nowoczesne o powłokach aluminiowych, mogą być dla tych ostatnich czasami niebezpieczne.

7. SKOJARZONA OCHRONA KABLI

Zagadnienie stosowania skojarzonej ochrony pojawiło się wraz z wprowadzeniem kabli o powłokach aluminiowych i stalowych. Kable te wymagają bardzo dobrego odizolowania od środowiska korozyjnego, jakim jest wilgotny grunt. Zabezpieczenie ich przed korozją osiąga się przez wytłoczenie izolującej osłony termoplastycznej. Wytłoczenie takiej osłony naraża jednak kabel na oddziaływania elektromagnetyczne i wyładowania atmosferyczne. Pogodzenie więc interesów ochrony elektrycznej z ochroną przed korozją ma zapewnić ochrona skojarzona, czyli jednocześnie zabezpieczenie kabla przed różnymi oddziaływaniami poprzez umiejętne operowanie uziemieniami i urzą-

dzeniami dodatkowymi. Problem ten przedstawia duże trudności techniczne i jest od paru lat przedmiotem badań na skalę międzynarodową. Również w Instytucie Łączności prowadzone są w bieżącym pięcioleciu badania w tym zakresie.

W ramach OWL opracowano zalecenie dotyczące zasad ogólnych skojarzonej ochrony [21]. W dokumencie tym, jako podstawowy środek ochrony kabli telekomunikacyjnych przed oddziaływaniami elektromagnetycznymi, wyładowaniami atmosferycznymi i korozją, zaleca się stosowanie pojedynczych lub grupowych protektorów, traktowanych jednocześnie jako uziemienia. Opór przejścia takich protektorów powinien być taki, jaki zalecany jest do zabezpieczenia kabla przed oddziaływaniem elektromagnetycznym i wyładowaniami atmosferycznymi. Jeśli z tego względu potrzebna jest większa liczba protektorów, niż to potrzebne do celów ochrony przed korozją, zaleca się stosować uziemianie poprzez elementy, ewentualnie bocznikowane odgromnikami, zapewniające jednokierunkowy przepływ prądu stałego, a przepuszczające prąd zmienny i prądy wyładowań w obu kierunkach. Dobór tych elementów i sposoby ich włączania muszą być dokładnie przebadane, dla konkretnych przypadków oddziaływań.

Poza wymienionym w [21] podstawowym środkiem ochrony skojarzonej mogą być też inne środki, które należałoby rozważyć dla różnych warunków ułożenia kabla. W bieżącym okresie studiów VI Komisja CCITT zwraca uwagę na wiele aspektów, jakie przy projektowaniu i realizacji racjonalnej ochrony skojarzonej należy brać pod uwagę [7]. Studia są w toku i na razie brak konkretnych zaleceń w tym zakresie.

8. UWAGI KOŃCOWE

Przedstawiony tu materiał świadczy o potrzebie bardziej wnikliwego podejścia przy projektowaniu bądź instalacji systemów uziemiających.

Przy doborze materiałów uziomowych należy kierować się nie tylko parametrami elektrycznymi, zapewniającymi sprawne dzia-

ianie uziomu w kierunku zabezpieczenia kabla przed oddziaływaniem elektromagnetycznym i wyładowaniami atmosferycznymi, ale także parametrami elektrochemicznymi metali łączonych ze sobą.

Łącząc ze sobą dwa różne metale trzeba pamiętać o możliwości powstania korozyjnego ogniw galwanicznego w wilgotnej ziemi lub wodzie. W ogniwie takim, roztwarzającą się anodą będzie zawsze metal o bardziej elektroujemnym potencjale w danym środowisku. Niebezpieczeństwo korozji jest tym większe, im mniejsza jest powierzchnia metalu odgrywającego rolę anody, w stosunku do metalu działającego katodowo w powstałym z połączenia metali ogniwie korozyjnym.

W pracy ogniw korozyjnego duże znaczenie ma również oporność środowiska elektrolitycznego, gdyż szybkość korozji, uzależniona od wielkości prądu korozyjnego przypadającego na powierzchnię anodową, będzie wprost proporcjonalna do oporności środowiska.

Najbardziej bezpiecznym materiałem uziomowym jest stal ocynkowana lub cynk protektorowy. W stosunku do nowoczesnych kabli o powłoce aluminiowej i w stalowym opancerzeniu cynk zastosowany w postaci taśmy lub prętów będzie stanowił uzimienie, a jednocześnie będzie chronił katodowo stal opancerzenia w miejscach defektów termoplastycznego pokrycia izolującego. Defekty takie spotyka się przede wszystkim na warstwie termoplastyku pokrywającej opancerzenie. Przy ewentualnym uszkodzeniu warstwy termoplastyku okrywającej powłokę aluminiową cynk nie będzie stwarzał zagrożenia korozyjnego w stosunku do powłoki, gdyż potencjały obu tych metali są zbliżone. Cynk jest dostępny w kraju, a technologię cynkowych protektorów taśmowych opracowuje się aktualnie w jednym z krajowych instytutów badawczych.

Racjonalne wykorzystanie środków zabezpieczenia linii kablowych przed oddziaływaniami elektrycznymi i korozją wymaga ścisłej współpracy różnych specjalistów. Współpraca taka jest niezbędna do znowelizowania wielu postanowień normy [4] oraz przy opracowywaniu wytycznych jednoczesnej ochrony linii

telekomunikacyjnych przed korozją, oddziaływaniem elektromagnetycznym i wylądowaniami atmosferycznymi.

WYKAZ LITERATURY

1. Abbott W.K., Schillmoller C.M.: Survey of electrical grounding problems. Material Protect., No 11, 1962, s. 48-60.
2. Afk-Empfehlung No 9. /1979/. Lokaler kathodischer Korrosionsschutz von unterirdischen Anlagen in Verbindung mit Stahlbetonfundamenten. Arbeitsgemeinschaft DVGW-VDE für Korrosionsfragen /Afk/.
3. Baeckmann W., Schwenk W.: Kathodischen Korrosionsschutz, Weinheim, Verlag Chemie, 1980.
4. BN-76/9371-03/00. Uziemienia urządzeń telekomunikacji przewodowej i bezprzewodowej. Ogólne wymagania i badania.
5. Bralewski J., Piłatowicz A.: Wstępne zasady instalowania kabli w nowoczesnych osłonach. IL. Praca nr 111.01.Y.01, W-wa 1979.
6. CCITT: Com. VI. Doc. 7, 1973-1976. Troisième projet de texte du manuel sur les questions de mise à la terre.
7. CCITT: Doc. Com. VI, No 23, 1981-1984.
8. CCITT: Doc. Com. VI, No 66, 1981-84. Experience acquise dans le domaine de l'utilisation des câbles sous enveloppe en aluminium.
9. CCITT: Doc. Com. VI, No 67, 1981-84. Raccordement des armures et enveloppes métalliques des câbles.
10. DIN 1045-1972. Beton und Stahlbeton. Bemessung und Ausführung.
11. Gundaker W.F.: Cathodic protection of generating station equipments. Proceedings of the eighteenth annual underground corrosion short course. W.V. Univer. Eng. Exp. Stat. Bull., 1973, s. 207-222.
12. Hasse P.: Erdung von Blitzschutzanlagen. Werkstoffe und

- Mindestmasse unter Berücksichtigung der Korrosion. Tab. Techn. Bau, No 1, 1978, s. 63 ÷ 65.
13. Hebel D.: Corrosion control vs electrical protection for telephone cables. Corrosion 78, ref. nr 223. Materiały Międzynarodowej Konferencji Korozyjnej 1978 r., Houston, Texas.
 14. Instrukcja po zaszcitlie zeleznodorożnych podziemnych sooruzenij ot korrozji bluzdajuszczimi tokami. Moskwa, Transport, 1979.
 15. Kirkendall W.E.: Electrical grounding for safety and corrosion protection. Water and Sewage Works, No 9, 1965, s. 323-325.
 16. Kurr G.W.: Underground applications of zinc galvanic anodes. W.V. Univ. Exp. Stat. Bull., No 113, 1974, s. 610-623.
 17. Medley R.: Gruonding affects corrosion. Power, No 9, 1965, s. 71-73.
 18. Mise à la terre des équipements de télécommunications. Bulletin officiel T. 34, doc. 228. Direction Generale des Telecommunications, Direction de l'Equipement et des Marchés, Paris 1974.
 19. Neuhaus H.: Blitzschutz für Hochhäuser. ETZ-b, vol.27, No 1, 1975, s. 19-22.
 20. Nicouleau R., Dastre-Vigne J.: Metody łączenia kabli telekomunikacyjnych. Materiały konferencji "Nowoczesne telekomunikacyjne linie kablowe" SEP, W-wa 1977.
 21. OWL. Zalecenia nr 110259-18. Jednoczesna ochrona kabli telekomunikacyjnych przed oddziaływaniem elektromagnetycznym linii elektroenergetycznych, kolejowej trakcji elektrycznej, przed uderzeniami pioruna i korozją. Berlin 1980.
 22. Pohl J.: Massnahmen für den Korrosionsschutz von unterirdischen Anlagen der Stromversorgungsunternehmen. ETZ-A, vol.96, 8, 1975, s. 323-327.
 23. Praca zbiorowa. Poradnik Teleelektronika R.H.19. WKŁ, Warszawa 1974.

24. Vögtli K.: Betoneisen, eine immerhäufigere Korrosionsursache. Techn. Mitt. PTT, No 11, 1973, ss 502-519.
25. Vögtli K., Trachsel H.R.: Problèmes de corrosion des mises à la terre et des installations connexes. Techn. Mitt. PTT, No 10, 1975, s. 358-366.
26. Wytyczne ochrony linii i urządzeń telekomunikacyjnych przed szkodliwym oddziaływaniem linii elektroenergetycznych i trakcji elektrycznej prądu stałego. Załącznik do Zarządzenia Ministrów Łączności, Górnictwa i Energetyki oraz Komunikacji z dn. 23.01.1974 r.

ISSN 0209-1046

