

BADANIE REZYSTANCJI ELEKTRYCZNEJ ŻYŁ WYBRANYCH PRZEWODÓW

Marek OLESZ¹, Jacek RYL²

1. Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, Katedra Mechatroniki i Inżynierii Wysokich Napięć
tel: 583471820 fax: 583472136 e-mail: m.olesz@ely.pg.gda.pl
2. Politechnika Gdańska, Wydział Chemiczny, Katedra Elektrochemii, Korozji i Inżynierii Materiałowej
tel: 583471092 fax: 583471092 e-mail: jacek.ryl@pg.gda.pl

Streszczenie: W artykule omówiono wymagania przepisów w zakresie sprawdzania rezystancji elektrycznej przewodów niskiego napięcia. Podano wyniki badań rezystancji elektrycznej dla wybranych przewodów miedzianych. Na podstawie analiz fizykochemicznych określono zawartość zanieczyszczeń w miedzi.

Słowa kluczowe: przewody elektryczne, rezystancja żył, badanie

1. WSTĘP

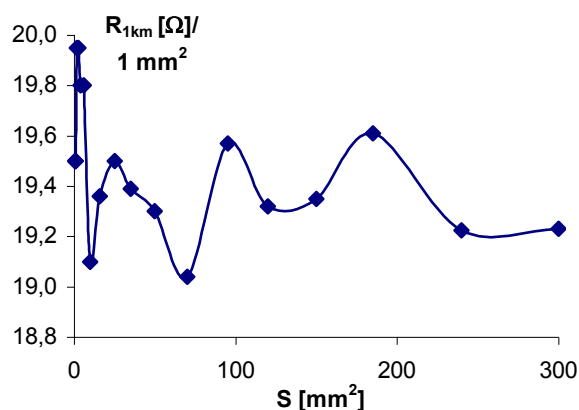
Jakość przewodów giętkich zasadniczo zależy od właściwości fizykochemicznych użytej do ich produkcji miedzi. Od jej jakości zależą parametry mechaniczne i elektryczne, w tym przede wszystkim rezystancja żył i związane z nią straty w czasie obciążenia prądem długotrwałym. Stosowane w praktyce wartości obciążalności długotrwałej przewodów są uwarunkowane możliwością oddawania przez nie ciepła do otoczenia, co zależy głównie od ich konstrukcji i sposobu ich ułożenia. Wartości te zawarte w dokumentach normalizacyjnych zostały ustalone dla określonych rezystywności materiałów, z których wykonano żyły przewodu.

W związku z powyższym jednym z podstawowych badań dopuszczających przewody do sprzedaży i eksploatacji jest sprawdzenie wartości rezystancji kilometrycznej. Wymaganie to podają dokumenty normalizacyjne dla przewodów [1] i dla kabli średniego napięcia [1, 2, 3]. W normie [1] podano te wymagane wartości rezystancji w $[\Omega/\text{km}]$ dla kabli i przewodów izolowanych wykonanych z miedzi, aluminium lub stopów aluminium o przekrojach znamionowych 0,5 – 2500 mm^2 . Pomiary rezystancji elektrycznej przewodów i kabli mogą być wykonywane na pełnych odcinkach fabrykacyjnych (pomiar na bębnie) lub próbkach pobranych z produkcji o długości przynajmniej 1 metra.

Rysunek 1 wykonany na podstawie danych zawartych w tablicy 4 normy [1] wskazuje, że rezystancja 1 km żyły przewodu przypadająca na 1 mm^2 powierzchni jej przekroju poprzecznego, w przypadku przewodów o różnych średnicach, a więc różniących się współczynnikiem oddawania ciepła jest podobna i wynosi około 19,5 Ω/mm^2 (najniższa wartość dla przekroju 70 mm^2 to 19 Ω/mm^2).

Zasady pomiaru rezystancji żył podaje załącznik A normy [1], który wymaga odpowiednio długiego przechowywania wyrobu w stałej temperaturze, której wartość należy uwzględnić przy obliczaniu rezystancji. Minimalna długość L odcinka przewodu powinna wynosić 1 m. Zmierzoną rezystancję żyły przewodu R_t przelicza się na 1 km długości przewodu i temperaturę 20°C. Współczynnik uwzględniający wpływ temperatury żyły k_t podaje tabela normy [1]. W celu uzyskania rezystancji $R_{20^\circ\text{C}}$ w warunkach odniesienia dokonuje się ostatecznego przeliczenia zmierzonej rezystancji R_t w temperaturze t według zależności (1).

$$R_{20^\circ\text{C}} = k_t R_t \frac{1000}{L} \quad (1)$$

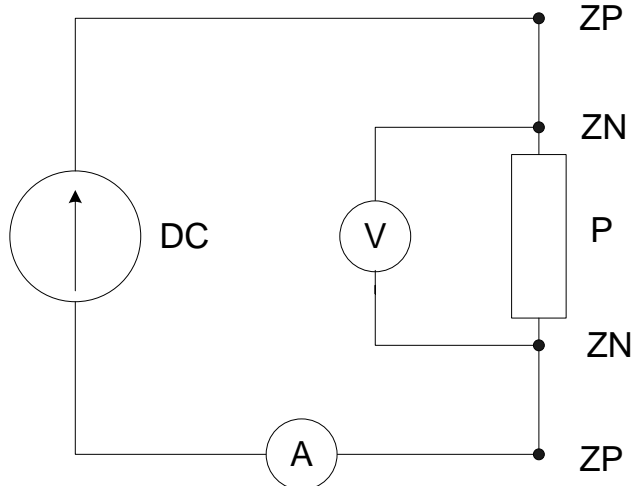


Rys. 1. Rezystancja 1 km przewodu przypadająca na 1 mm^2 przekroju przewodu obliczona na podstawie [1]

W normie [1] nie podano metody pomiaru rezystancji żył przewodów. W praktyce, zazwyczaj stosuje się metodę techniczną z oddzielnymi przewodami prądowymi i napięciowymi w celu wyeliminowania spadków napięcia na prądowych przewodach doprowadzających, co pozwala na dokładniejszy pomiar spadku napięcia na rezystancji mierzonej (rys. 2). Z punktu widzenia dokładności pomiaru istotna jest konstrukcja zacisków prądowych i napięciowych. Zgodnie z rysunkiem oba zaciski napięciowe ZN powinny

być umieszczone jak najbliżej końców przewodu P, aby nie mierzyć dodatkowych spadków napięcia na zaciskach ZP doprowadzających prąd.

Praktycznie stosowane komercyjne rozwiązania techniczne pozwalają na wymuszenie prądu stałego nawet na poziomie 600 A, co umożliwia pomiar rezystancji z dokładnością nawet do 0,1 $\mu\Omega$ [4]. Przyrządy te po stwierdzeniu ciągłości obwodu elektrycznego mniejszym prądem, wymuszają przepływ zadeklarowanego prądu probierczego w obu kierunkach, a następnie wyświetlają średnią wartość ze zmierzonych rezystancji.



Rys. 2. Układ do pomiaru rezystancji metodą techniczną z poprawnie mierzonym napięciem

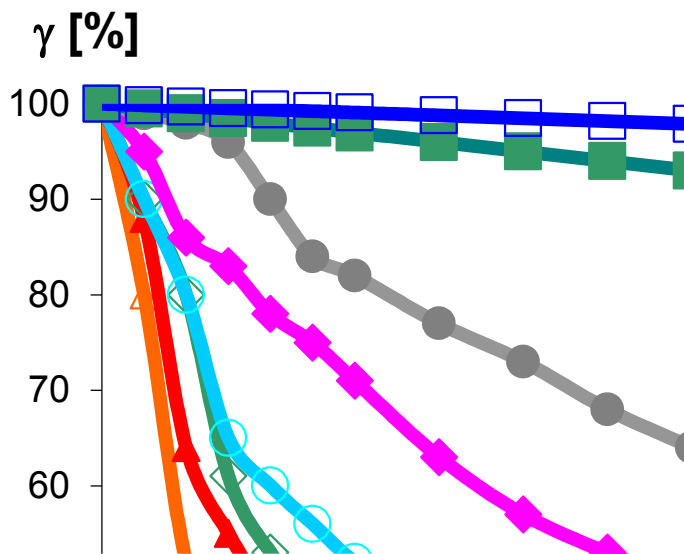
W normie [1] nie ma odniesienia do wpływu nagrzewania żył przewodów prądem probierczym na wyniki pomiarów ich rezystancji. O ile przy znacznych przekrojach przewodu i krótkim czasie pomiaru nie stanowi to problemu, to w przypadku małych przekrojów może występować w czasie pomiaru istotna zmiana rezystancji przewodu spowodowana zmianą temperatury żyły roboczej. Temperaturę tę trzeba mierzyć i w razie konieczności uwzględnić w przeliczeniu rezystancji na temperaturę odniesienia wynoszącą 20°C.

2. WPLYW ZANIECZYSZCZEŃ MIEDZI NA REZYSTYWNOSĆ

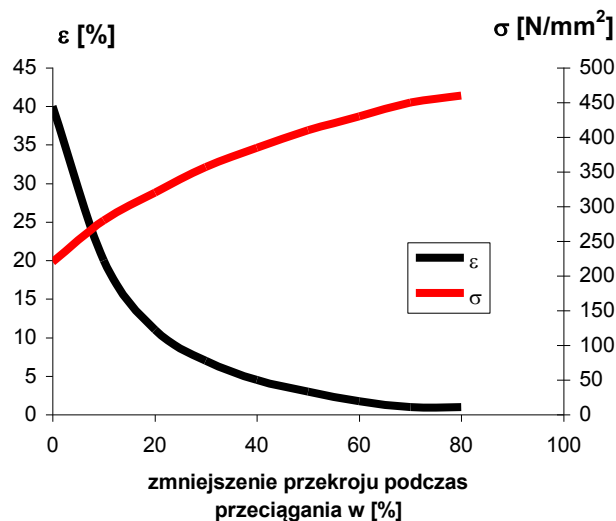
Zazwyczaj do produkcji przewodów stosowanych w elektrotechnice używa się miedzi elektrolitycznej o zawartości 99,9% lub, w przypadku specjalnych zastosowań, beztlenowej o zawartości 99,95% czystego pierwiastka. Podawana w tablicach fizycznych przewodność miedzi wynosi 58 MS/m. Przewodność ta istotnie zależy od zawartości innych materiałów oraz od przebiegu obróbki plastycznej i cieplnej. Zgodnie z danymi przedstawionymi na wykresie z rysunku 3 obecność niewielkich ilościowo pierwiastków, takich jak: fosfor, żelazo, krzem, arsen, aluminium, może spowodować nawet ponad dwukrotne zmniejszenie przewodności γ przewodów miedzianych.

Dodatkowo tlen, ołów i bizmut pogarszają wytrzymałość na rozciąganie. Przeciąganie drutu prowadzące do powstawania miedzi twardej i półtwardej generalnie poprawia wytrzymałość na rozciąganie σ , ale niestety zmniejsza wydłużalność ϵ (rys. 4) oraz przewodność. Niewskazaną w eksploatacji twardość i zmniejszoną przewodność usuwa się przez wyżarzanie

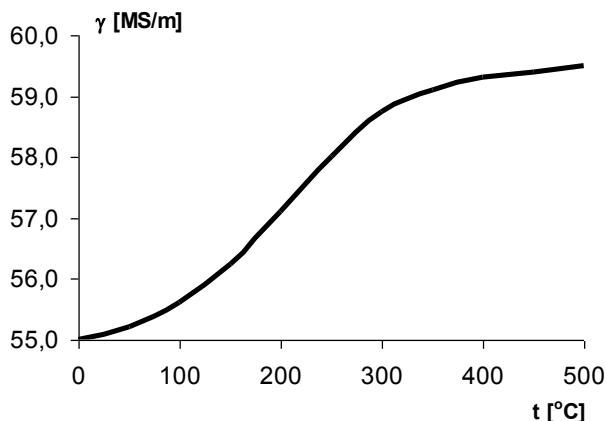
rekrystalizujące w temperaturze 310 – 450°C dające miedź miękka (rys. 5).



Rys. 3. Wpływ ilości zanieczyszczeń na względną przewodność elektryczną miedzi (na podstawie [5])



Rys. 4. Wpływ zmniejszenia przekroju przy przeciąganiu na właściwości mechaniczne miedzi (na podstawie [5])



Rys. 5. Wpływ temperatury wyżarzania na przewodność miedzi (na podstawie [5])

Z danych przedstawionych na rysunku 1 wynika, że do spełnienia wymagań normy [1] wystarczy zastosowanie miedzi o przewodności $50,1 \div 52,6$ MS/m w zależności od przekroju przewodu.

3. METODYKA BADAŃ I WYNIKI POMIARÓW

Otrzymane od producenta próbki przewodów giętkich o przekrojach $0,5 \text{ mm}^2$, $0,75 \text{ mm}^2$ typu A i B (zawierające miedź pochodzącą od różnych dostawców) analizowano początkowo według wymagań normy [1], mierząc rezystancję żyły przewodu. Do pomiaru wykorzystywano w każdej grupie po 5 przewodów o długości 1,5 m, dla których rezystancję mierzono metodą techniczną z poprawnie mierzonym napięciem. Wymuszany w przewodach prąd o wartości 3 A nie powodował w czasie 1 minuty pomiaru wzrostu temperatury żyły przewodu o więcej niż 1°C . Otrzymany wynik rezystancji próbki przewodu przeliczano na długość przewodu 1 km i temperaturę 20°C według zależności (1). W czasie pomiarów dla przewodów z grupy A o przekroju $0,5 \text{ mm}^2$ uzyskano wartości liczbowe z przedziału $32 - 38 \text{ } \Omega/\text{km}$ zgodnie z wymaganiami normy (wartość dopuszczalna to $39 \text{ } \Omega/\text{km}$). Natomiast w przypadku przewodów z grupy B rezystancja 1 km przewodu zawierała się w przedziale $79 - 123 \text{ } \Omega/\text{km}$. Ze względu na uzyskane w trakcie pomiarów duże rozbieżności wartości rezystancji przewodów na 1 km zdecydowano się na szczegółową analizę zawartości domieszek w materiale przewodu.

Badania te wykonywano za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego, z funkcją mikroskopii środowiskowej (VP-SEM), S-3400N firmy Hitachi. Zdjęcia wykonano w trybie elektronów wtórnych, dla napięcia przyspieszającego 20 kV. Mikroskop zaopatrzony jest w przystawkę do pomiarów metodą spektroskopii dyspersji energii promieniowania X (EDX), firmy ThermoFisher Scientific. Technika EDX umożliwia przeprowadzenie analizy jakościowej i ilościowej składu chemicznego żyły roboczej, z dokładnością dochodzącą do 0,5% zależną od badanego pierwiastka.

W przypadku wybranego losowo przewodu z grupy A stwierdzono niewielkie ilości domieszek metali, natomiast w przypadku przewodu typu B ilość cynku w jednej z próbek pobranego przewodu wynosiła aż 12%, co spowodowało nawet 3 - krotne zwiększenie oporności właściwej w stosunku do wartości wymaganej.

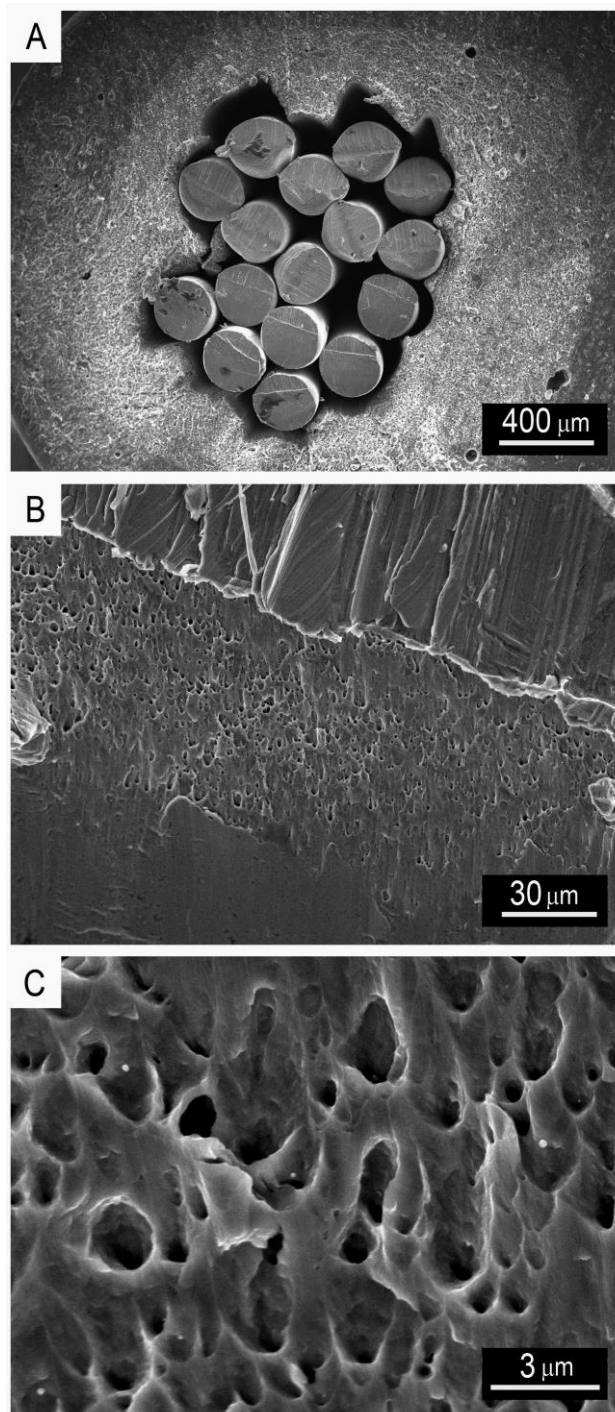
Mikrografie SEM, zamieszczone na rysunku 6a przedstawiają w przekroju poprzecznym wiązkę 16 drutów w izolacji. Przy powiększeniu 700 - krotnym na części drutów ujawnia się struktura porowata (rysunek 6b). Struktura ta występuje lokalnie i nie dotyczy całej powierzchni drutu. Jak widać w szczególności na rysunku 6c pory te cechuje nierównomierny kształt i średnica rzędu od 0,5 do 5 mikrometrów.

W trakcie pomiarów analizowano pod mikroskopem 14 próbek wybranego losowo przewodu, dla którego udało się określić zawartość miedzi, cynku i aluminium. Analizę spektroskopową przeprowadzono w oparciu o technikę EDX, dla napięcia przyspieszającego równego 20 kV. Na kolejnym rysunku (rys. 7) zamieszczono przykładowe widma EDX, dla drutów z grupy B. Widma te przedstawiają liczbę zliczeń kwantów promieniowania X o określonej energii emisji. Energie te, będąc charakterystycznymi dla danych pierwiastków umożliwiają ich identyfikację.

Zawartość procentową oznacza się w oparciu o wyznaczenie pola powierzchni pod pikiem.

Poszczególne druty różnią się od siebie składem chemicznym, którego średnie, minimalne i maksymalne zawartości poszczególnych pierwiastków podano w tablicy 1.

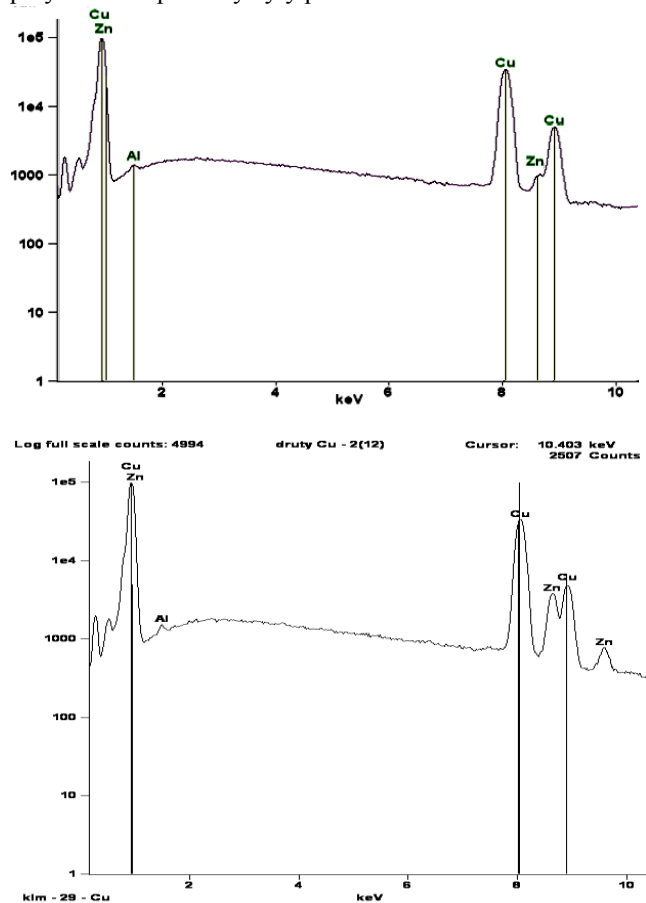
W czasie badań nie wykryto innych pierwiastków metalicznych niż przedstawione w tablicy 1. Wykonane dodatkowo mapy chemiczne wykazują brak lokalnych niejednorodności w składzie chemicznym pojedynczych drutów, mogących występować np. w obrębie obszaru porowatego.



Rys. 6. Mikrografie SEM przedstawiające drut z grupy B w przekroju. Powiększenie A) x50, B) x700 i C) x10000.

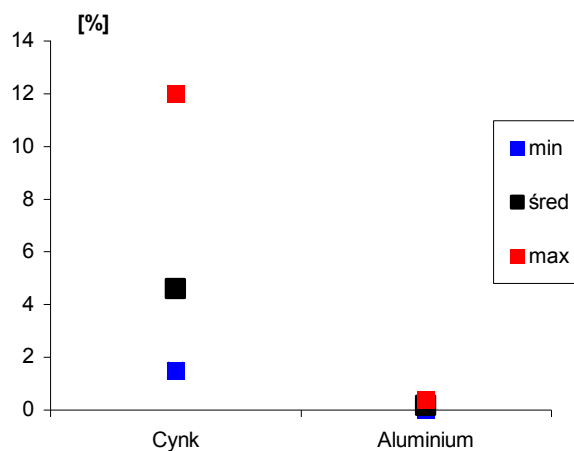
Ze względu na wystąpienie znacznej zawartości cynku w badanej żyłce przewodu o wartości średniej na poziomie

4,6% obserwowano w pomiarach gotowych przewodów z grupy B znaczne zwiększenie rezystancji elektrycznej, bo prawie 3 – krotne. Zakładając ten sam prąd roboczy w przewodzie oraz współczynnik oddawania ciepła do otoczenia, wzrost rezystywności materiału przewodnika powoduje w przybliżeniu proporcjonalne zwiększenie przyrostu temperatury żyły przewodu.



Rys. 7 Przykładowe widma spektroskopowe EDX w skali logarytmicznej, z naniesionymi pierwiastkami odpowiadającymi charakterystycznym pikom energetycznym dla drutu przewodu z grupy B o przekroju 0,5 mm²

Zastosowanie takich przewodów dociążonych zgodnie z tabelami obciążalności długotrwałej powoduje przekroczenie dopuszczalnych temperatur na powierzchni przewodu, co może powodować stopienie izolacji i niebezpieczeństwo wystąpienia zwarcia, pożaru lub porażenia elektrycznego.



Rys. 8. Przykład procentowej zawartości cynku i aluminium w jednym z drutów pobranych z grupy B

4. WNIOSKI

Nadmierna zawartość cynku w miedzi na poziomie 4,6% (wartość średnia) spowodowała silne pogorszenie przewodności wykonanych z niej żył przewodów.

Pomiary rezystancji 1 km przewodu wymagane przez normy wyrobu [1, 2] są konieczne dla jednoznacznej oceny przewodności materiału użytego do produkcji przewodów.

Wyniki rezystancji 1 km przewodu są skorelowane z wynikami analizy chemicznej zawartości pierwiastków w materiale żyły tych samych próbek przewodu.

Znajomość składu chemicznego przewodu pozwala określić zjawiska korozji występującej na połączeniach metali o różnych potencjałach elektrochemicznych.

5. BIBLIOGRAFIA

1. EN 60228: 2007P, Żyły przewodów i kabli
2. PN - HD 620 S2: 2010, Kable elektroenergetyczne o izolacji wytłaczanej na napięcia znamionowe od 3,6/6 (7,2) kV do 20,8/36 (42) kV włącznie
3. PN-HD 605 S2: 2008, Kable elektroenergetyczne - Dodatkowe metody badania (oryg.).
4. strona internetowa: www.tomtronix.pl
5. K. Kolbiński, Kable elektroenergetyczne, PWT, Warszawa 1957

Tablica 1. Procentowa zawartość miedzi, cynku i aluminium w badanych przewodach z grupy B

%wt	min	średnia	maks.
Cu	87,8	95,3	98,4
Zn	1,5	4,6	12,0
Al	0	0,2	0,4

ELECTRICAL RESISTANCE MEASUREMENTS OF SELECTED CONDUCTORS

Key-words: electrical conductors, electrical resistance, test

Abstract:

This paper discusses the requirements of regulations for checking electrical resistance of low voltage conductors. Electrical resistance measurement results of copper conductors are also presented. The content of impurities in the copper wires is determined on the basis of physico-chemical analysis.