

## 5. BADANIE OPOROWYCH PRZEWODÓW I ELEMENTÓW GRZEJNYCH

### 5.1. Cel ćwiczenia:

- zapoznanie się z produkowanymi przewodami i elementami grzejnymi,
- wyznaczanie wartości rezystywności przewodów grzejnnych oraz zmian wartości rezystywności i rezystancji tych przewodów w funkcji temperatury.

### 5.2. Wiadomości podstawowe

Oporowe przewody grzejne wykonywane są z oporowych materiałów grzejnnych, które, wraz z materiałami na oporniki: techniczne (np.: regulacyjne, rozruchowe, obciążające), pomiarowe (np.: konstantan, manganin, izabelin) i termometryczne (np.: platyna, miedź, nikiel), stanowią rodzinę materiałów oporowych stosowanych w elektrotechnice.

Oporowy przewód grzejny (oporowy przetwornik elektrotermiczny), będący zazwyczaj ciałem stałym, jest głównym miejscem przemiany elektrotermicznej przy oporowym nagrzewaniu pośrednim. Natomiast oporowy element grzejny to albo oporowy przewód grzejny wyposażony w końcówki i ukształtowany do takiej postaci, w jakiej ma być zainstalowany (wymieniany) w urządzeniu elektrotermicznym, albo łatwo wymienialny i nierozbieralny człon grzejny oporowego urządzenia elektrotermicznego, składający się z opisanego wyżej ukształtowanego oporowego przewodu grzejnego z końcówkami, wyposażonego dodatkowo np. w łączniki, wsporniki, izolację i obudowę.

Oporowe materiały grzejne dzieli się zwykle na: średnotemperaturowe ( $400^{\circ}\text{C} < t_{\text{dop}} < 1400^{\circ}\text{C}$ ), niskotemperaturowe ( $t_{\text{dop}} < 400^{\circ}\text{C}$ ) i wysokotemperaturowe ( $t_{\text{dop}} > 1400^{\circ}\text{C}$ ), lub na metalowe i niemetalowe.

Materiały oporowe niskotemperaturowe metalowe oraz niemetalowe to odpowiednio: aluminium, miedź, nikiel, żelazo, konstantan, nikielina oraz różne półprzewodniki, a także tworzywa sztuczne elektrycznie przewodzące lub tworzywa wymieszane z przewodzącymi materiałami węglowymi (np. sadzą). Jako średnotemperaturowe materiały oporowe stosuje się stopy ferrytyczne (FeCrAl) lub austenityczne (NiCr, FeNiCr). W wielu przypadkach, jeżeli jest to możliwe ze względów konstrukcyjnych lub „elektrycznych”, tanie i łatwo dostępne materiały średnotemperaturowe eksploatuje się w obszarze temperatury charakterystycznym dla ww. materiałów niskotemperaturowych. Wśród materiałów wysokotemperaturowych metalowych i niemetalowych wyróżnia się odpowiednio: platynę, platynorod, molibden, tantal, wolfram oraz spieki wykonane z węgla, grafitu, węgla krzemu, dwukrzemku molibdenu, węgla niobu czy chromianu lantanu. Zaznaczyć należy, że molibden, tantal, wolfram, węgiel i grafit nie są przeznaczone do pracy w atmosferach utleniających (np. w powietrzu).

Do najczęściej stosowanych materiałów oporowych grzejnnych zalicza się średnotemperaturowe materiały metalowe, a także wysokotemperaturowe materiały niemetalowe.

Średnotemperaturowe przewody grzejne metalowe wykonywane są najczęściej w postaci drutów o średnicach od 0,1 do 6mm i w postaci taśm o szerokościach od 0,2 do 50mm i odpowiednio grubościach od 0,1 do 2,5mm. Rolę oporowego przewodu grzejnego może teoretycznie pełnić każdy metal. Jednak ze względu na wymagania stawiane tym przewodom (wysoka temperatura topnienia, odporność na utlenianie, mały ciepły współczynnik przyrostu rezystancji, odpowiednia rezystywność, niska cena i inne) zdecydowanie największe zastosowanie w praktyce znalazły przewody wykonane ze stopów: NiCr (nichromy), FeNiCr (ferronichromy), FeCrAl (ferrochromale). Średnotemperaturowe elementy grzejne (przewody + końcówki) zasilane są najczęściej napięciem sieciowym 220 lub 380V. Temperatury dopuszczalne tych przewodów wahają się w granicach od 1000 do 1350<sup>o</sup>C, a ich rezystywności  $\rho_{20^{\circ}\text{C}}$  wynoszą: dla nichromów – około  $1,1 \cdot 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ , dla ferronichromów – około

$1,05 \cdot 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ , dla ferrochromali – około  $1,4 \cdot 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ .

Wśród asortymentu produkowanych oporowych przewodów i elementów grzejnnych metalowych (nisko-, średnio- i wysokotemperaturowych) można m.in. wyróżnić: druty, taśmy, pręty, sztaby, skrętki, węzownice, rury, spirale, płytki, kable, maty, wkłady, elementy mufowe czy rurkowe. Średnotemperaturowe oporowe przewody grzejne, produkowane przez wiele firm, znane są m.in. pod następującymi nazwami handlowymi: kanthal, akrothal, nikrothal, baildonal, chronix, chronitem, cronifer, alsichrom, aluchrom.

Do wykonywania wysokotemperaturowych oporowych przewodów grzejnnych niemetalowych – zasilanych najczęściej obniżonymi (w stosunku do napięć sieciowych) i często regulowanymi napięciami – używa się takich pierwiastków, jak węgiel, krzem i molibden. Wśród przewodów tych można wyróżnić przewody węglowe i grafitowe, oraz najczęściej użytkowane:

- przewody karborundowe wykonane z węgla krzemu (SiC),
- przewody krzemomolibdenowe wykonane z dwukrzemku molibdenu (MoSi<sub>2</sub>).

Przewody i elementy grzejne węglowe i grafitowe wykonuje się najczęściej w kształcie sztab, rur, prętów, kształtowników, elementów segmentowych czy ziaren. Przy swobodnym dostępie powietrza węgiel bezpostaciowy zaczyna utleniać się już w temperaturze około 400°C, a grafit w temperaturze około 700°C. Natomiast w atmosferach ochronnych np. azotu i wodoru lub w próżni przewody grafitowe i węglowe mogą pracować przez dłuższy czas w temperaturze sięgającej 2000°C, a w atmosferze tlenku węgla – w temperaturze sięgającej 3000°C. Rezystywności  $\rho_{20^{\circ}\text{C}}$  przewodów węglowych wynoszą  $(3 \div 10) \cdot 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$  a przewodów grafitowych –  $(8 \div 15) \cdot 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ , przy czym rezystywności przewodów grafitowych w miarę wzrostu temperatury maleją, a przewodów węglowych – wpraw (do około 600°C) maleją, a następnie rosną.

Przewody karborundowe wykonuje się najczęściej w postaci prętów prostych o średnicach od 4 do 50mm. Elementy grzejne (przewody + końcówki) wykonane z tych przewodów znane są pod takimi nazwami jak sylit (silit), globar, kwarcylit. Dopuszczalne temperatury pracy (w powietrzu) przewodów karborundowych wynoszą około 1400÷1600°C. Najbardziej charakterystyczną a zarazem ujemną cechą przewodów karborundowych jest ich „starzenie”, polegające na wzroście rezystancji przewodów w miarę czasu ich pracy aż do wartości kilkakrotnie większej od wartości ich początkowej rezystancji. Starzenie spowodowane jest powolnym utlenianiem się krzemu i węgla, występującym w całej objętości bardzo porowatych przewodów karborundowych. Rezystywności  $\rho_{20^{\circ}\text{C}}$  nowych przewodów karborundowych wahają się od 0,1 do 1  $\Omega \cdot \text{cm}$ .

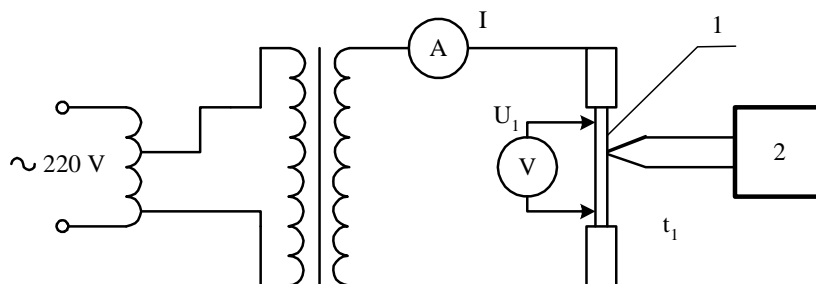
Elementy krzemomolibdenowe (przewody + końcówki) znane są m.in. pod nazwami superkanthal i mosilit. Wykonane są najczęściej w kształcie litery U (kształt szpilkowy), a średnice ich przewodów grzejnych zawierają się w granicach od 6 do 12mm. Przewody krzemomolibdenowe, w porównaniu z przewodami karborundowymi, są bardzo drobnoziarniste. Ich dopuszczalne temperatury pracy (w powietrzu) wahają się od 1600 do 2000°C, a rezystywności  $\rho_{20^{\circ}\text{C}}$  wynoszą około  $2 \cdot 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$  i znacznie wzrastają w miarę wzrostu ich temperatury.

### 5.3. Program ćwiczenia

W ćwiczeniu należy mierzyć temperatury, napięcia i prądy różnych oporowych przewodów grzejnych, nagrzewanych stopniowo do coraz wyższych temperatur. Temperatury do około 800°C należy mierzyć z wykorzystaniem termoelementów NiCr-NiAl, a temperatury wyższe – pirometrem monochromatycznym z zanikającym włóknem.

### 5.4. Przebieg ćwiczenia

- połączyć badane przewody i elementy grzejne zgodnie z rysunkiem 5.1 i mierzyć każdorazowo wartości  $U_1$  oraz  $I$  dla pięciu nastawionych różnych wartości temperatury  $t$  z zakresu  $t_{\text{ot}} \ll t \ll t_{\text{max}}$  dla każdego z badanych elementów grzejnych,
- nagrzewać przewód węglowy do temperatury  $t_{\text{max}}=250^{\circ}\text{C}$ ,
- nagrzewać przewód chromoniklowy (nichromowy) do temperatury  $t_{\text{max}}=750^{\circ}\text{C}$ ,
- nagrzewać przewód karborundowy do temperatury  $t_{\text{max}}=750^{\circ}\text{C}$  i mierzyć dodatkowo napięcie  $U_2$  i moc  $P$ ,
- nagrzewać przewód żelazny do temperatury  $t_{\text{max}}=500^{\circ}\text{C}$ ,
- nagrzewać przewód żelazochromoaluminiowy (ferrochromalowy) do temperatury  $t_{\text{max}}=1100^{\circ}\text{C}$ , mierzonej przy pomocy pirometru z zanikającym włóknem,
- pomierzyć średnice  $d$  badanych przewodów grzejnych oraz długości  $l$  na których mierzono wartości  $U_1$ .



Rys. 5.1. Układ pomiarowy: 1 – badany przewód grzejny, 2 – miliwoltomierz o dużej rezystancji wewnętrznej

#### 5.5. Zawartość sprawozdania

- schemat oraz zwięzły opis badanych układów,
- zestawienie wszystkich pomiarów i obliczeń,
- wykreślenie dla badanych przewodów przebiegów rezystancji  $R=U_1/I$  i rezystywności  $\rho=Rs/l=\pi R d^2/4l$  w funkcji temperatury,
- analiza uzyskanych wyników,
- ocena badanych układów.

#### Literatura

1. Hauser J.: Elektrotechnika. Podstawy elektrotermii i techniki świetlnej. Wyd. Pol. Poznańskiej, 2006.
2. Hering M.: Podstawy elektrotermii. Cz. 1. WNT, Warszawa 1992.
3. Hauser J.: Praca oporowych przewodów grzejnych w wybranych układach termokinetycznych. Wyd. Pol. Poznańskiej, 1998.