

Dr inż. Tadeusz Mączka

2. Pomiary rezystancji, rezystancji izolacji i rezystywności

1. Wstęp:

Do podstawowych sposobów pomiaru rezystancji (oporu elektrycznego) należą:

- Metoda techniczna polegająca na bezpośrednim wyznaczeniu rezystancji z pomiaru napięcia i prądu,
- Bezpośredni pomiar omomierzami (analogowymi lub cyfrowymi),
- Pomiary mostkowe.

Pomiary rezystancji izolacji urządzeń energetycznych wykonuje się specjalnymi przyrządami, które zapewniają odpowiednie warunki pomiaru przewidziane przepisami.

2. Cel ćwiczenia:

Zapoznanie studentów z elementarnymi zjawiskami fizycznymi towarzyszącymi przewodnictwu prądu w przewodnikach i dielektrykach.

Zagadnienia oceny materiałów, wyrobów i urządzeń stosowanym w energetyce, z punktu widzenia przydatności i prowadzenia eksploatacji, na podstawie pomiarów rezystancji i rezystywności.

Zapoznanie się ze sposobem oceny zagrożeń wywołanych elektrycznością statyczną w strefach zagrożonych pożarem i wybuchem, na podstawie pomiarów rezystancji izolacji.

Zapoznanie się z technikami pomiarowymi – metoda techniczna, metody mostkowe, metody bezpośrednie (megaomomierze).

Uwaga !!!

Przed przystąpieniem do ćwiczenia zapoznać się z dodatkiem pod tytułem „Procedura wyznaczania niepewności pomiarowych”.

3. Pomiary rezystancji metodą techniczną

Metodę techniczną stosuje się do pomiaru rezystancji małych i rezystancji średnich (dużych). Metodę techniczną przy prądzie stałym można mierzyć praktycznie wszelkie rezystancje. Jednak stosuje się ją głównie do pomiaru rezystancji elementów nieliniowych, takich jak diody, warystory, termistory, żarówki itp. Rezystancja takich elementów zależy od biegunowości napięcia, wartości przyłożonego napięcia, temperatury. Należy zwrócić uwagę na to, że dla elementów nieliniowych wyznaczenie rezystancji elementów bez jednoznacznego określenia napięcia lub prądu, przy którym dokonano pomiaru, jest praktycznie nieprzydatne. Dla przykładu dioda krzemowa w kierunku przewodzenia przy napięciu 0,5 V może mieć rezystancje rzędu megaoma ($M\Omega$), a przy napięciu 1 V mniej niż 1Ω .

W urządzeniach takich jak dławiki, transformatory, kondensatory energetyczne itp. Rezystancja zmierzona przy prądzie przemiennym jest inna niż przy prądzie stałym. Wynika to ze strat mocy w rdzeniach ferromagnetycznych lub dielektrykach (straty polaryzacyjne). W tych przypadkach rezultat pomiaru zależy od wartości doprowadzonego napięcia i jego częstotliwości. Stosuje się wtedy pomiar rezystancji metodą techniczną w obwodzie z watomierzem

zasilanym prądem przemiennym. Wartość mierzonej rezystancji wyznacza się wtedy z poniżej podanej zależności

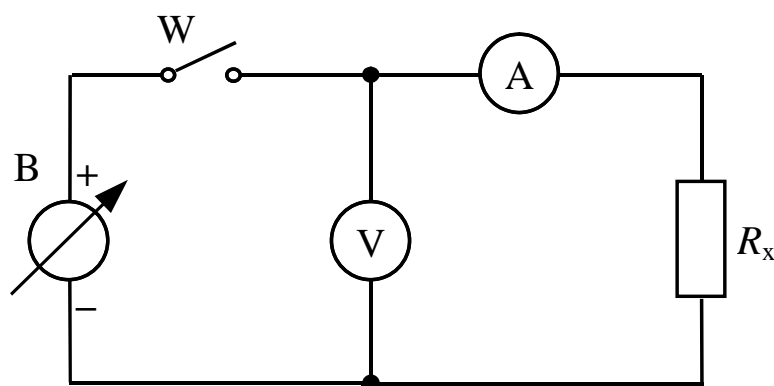
$$R_x = \frac{P}{I^2} = \frac{U^2}{P}$$

gdzie:

P – moc wskazana przez watomierz, I – wartość skuteczna prądu wskazana przez amperomierz, U – wartość skuteczna napięcia wskazana przez woltomierz.

3.1. Pomiar rezystancji średnich (dużych) metoda techniczna

Układ do pomiaru średnich rezystancji ($10 \div 10^6 \Omega$) często zwany układem z pomiarem poprawnego prądu (PPP) prezentuje rys. 1.



Rys. 1. Układ do pomiaru metodą techniczną rezystancji średnich i dużych. **B** – bateria akumulatorów (zasilacz DC max 60 V), **V** – woltomierz, **A** – amperomierz, R_x – rezystor badany (nieznany), **W** – wyłącznik.

Układ ten stosuje się wtedy, gdy wartość mierzona (nieznana) R_x jest wielokrotnie większa niż rezystancja amperomierza stosowanego. Rezystancję mierzoną w powyższym układzie możemy wyznaczyć, jeśli będzie nam znane napięcie na zaciskach tej rezystancji oraz natężenie prądu, który przezeń płynie. Korzystamy wtedy z prawa *Ohma* $R_x = \frac{U}{I}$.

W układzie powyższym mamy mierzone amperomierzem natężenie prądu I , ale woltomierz wskazuje nam napięcie na zaciskach szeregowego połączenia rezystancji: mierzonej R_x i amperomierza R_A . Wynik tak otrzymany obarczony jest błędem (wyliczona rezystancja jest powiększona o rezystancję amperomierza R_A). Dlatego przy wyznaczaniu rezystancji R_x musimy uwzględnić spadek napięcia na amperomierzu, będzie on wynosił:

$$U_A = I \cdot R_A$$

Wobec tego napięcie na rezystorze R_x będzie się równać:

$$U_x = U - U_A = U - I \cdot R_A$$

Korzystając z prawa *Ohma* otrzymamy:

$$R_x = \frac{U - I \cdot R_A}{I}$$

Upraszczając ostatecznie otrzymamy:

$$R_x = \frac{U}{I} - R_A.$$

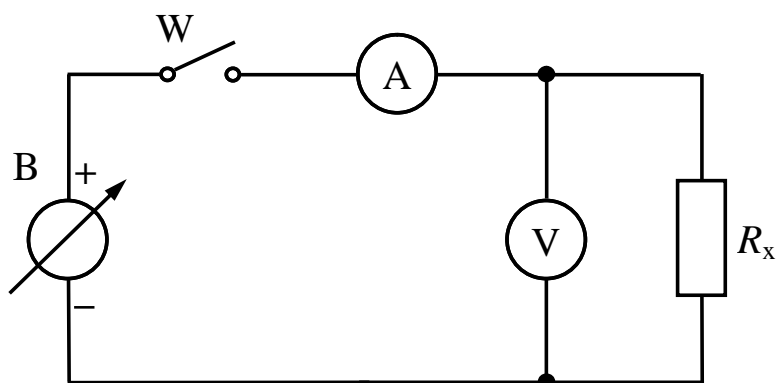
Przy dużych wartościach R_x zwykle rezystancja R_A jest do pominięcia, a wtedy $R_x \approx R'_x$.

3.1.1. Przebieg ćwiczenia i zadania do wykonania

Zmontować układ pomiarowy tak jak na rysunku 1. Następnie ustawiamy pokrętkiem zasilacza DC dogodne wartości napięcia i natężenia prądu i notujemy wskazania mierników. Wykonujemy kilka cykli pomiarów (czyli zmieniamy wartości napięcia i natężenia). Wszystkie odczyty mierników powinny być zanotowane w tabeli. Podać przykład analizy niepewności pomiarowych.

3.2. Pomiar rezystancji małych metoda techniczną

Układ do pomiaru małych rezystancji często zwany układem z pomiarem poprawnego napięcia (PPN) prezentuje rysunek 2. Do rezystancji małych zalicza się te, których wartości są mniejsze od 10Ω .



Rys. 2. Układ do pomiaru metodą techniczną rezystancji małych. **B** – bateria akumulatorów (zasilacz DC max 60 V), **V** – woltomierz, **A** – amperomierz, R_x – rezystor badany (nieznany), **W** – wyłącznik.

W metodzie tej również korzystamy z prawa Ohma $R'_x = \frac{U}{I}$. W układzie pomiarowym mierzymy woltomierzem napięcie U , ale amperomierz wskazuje nam prąd sumaryczny, który rozgałęzia się w punkcie a na prąd w rezystancji mierzonej i na prąd, który płynie przez woltomierz. Ponieważ rezystancja wewnętrzna woltomierza wynosi R_V a napięcie na jego zaciskach wynosi U , to prąd płynący przez niego ma wartość:

$$I_V = \frac{U}{R_V}$$

Amperomierz mierzy prąd główny I będący sumą prądu I_R płynącego przez mierzoną rezystancję i I_V płynącego przez woltomierz.

$$I = I_R + I_V,$$

Więc prąd płynący przez rezystancje wynosi

$$I_R = I - I_V$$

Znając prąd I_R i napięcie U możemy obliczyć wartość rezystancji R_x z poniższych zależności:

$$R_x = \frac{U}{I_R}$$

Podstawiając za I_R mamy:

$$R_x = \frac{U}{I - I_V}$$

Albo ostatecznie:

$$R_x = \frac{U}{I - \frac{U}{R_V}}$$

Przy małych wartościach R_x zwykle prąd woltomierza jest do zaniedbania w stosunku do prądu amperomierza, wówczas można przyjąć $R_x \approx R_x'$. Należy pamiętać że wyliczona wartość rezystancji R_x' jest mniejsza od rzeczywistej.

3.2.1. Przebieg ćwiczenia i zadania do wykonania

Zmontować układ pomiarowy tak jak na rysunku 2. Następnie ustawiamy pokrętką zasilacza DC dogodnie wartości napięcia i natężenia prądu i notujemy wskazania mierników. Wykonać kilka cykli pomiarów (czyli zmieniamy wartości napięcia i natężenia). Wszystkie odczyty mierników powinny być zanotowane w tabeli jak w punkcie 3.1.1. Podać przykład analizy niepewności pomiarowych.

3.3. Wnioski i uwagi do metody technicznej pomiaru rezystancji

W czasie pomiarów nie należy zbyt długo trzymać układu pod napięciem, bowiem rezystor może się nagrzać i wtedy może zmniejszyć się dokładność pomiarów, (dlaczego?). Dobierając mierniki do pomiaru rezystancji metodą techniczną w przypadku, gdy mierzymy duże rezystancje należy wybrać amperomierz o możliwie małej rezystancji wewnętrznej. Przy pomiarze małych rezystancji woltomierz o dużej rezystancji wewnętrznej. Całkowity błąd pomiaru metodą techniczną składa się ze względnych błędów pomiaru prądu i napięcia wynikających z klasy mierników oraz z błędu metody wynikającego z zastosowanego układu pomiarowego i rezystancji mierników. Błąd metody pomiaru dużych rezystancji metodą techniczną jest do pominięcia, gdy $R_A \leq 10^{-3} R_x$. Przy pomiarze małych rezystancji błąd metody jest do pominięcia, jeżeli $R_V \geq 10^3 R_x$. Przy takich założeniach błędy metody nie przekraczają 0,1%.

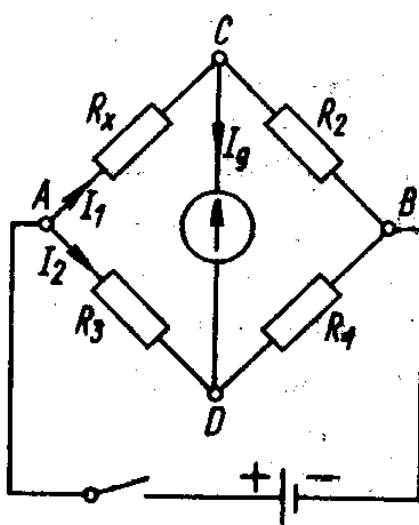
4. Mostki do pomiaru rezystancji

Mostki do pomiaru rezystancji to układy elektryczne umożliwiające porównanie rezystancji mierzonej z rezystancjami wzorcowymi, w które jest wyposażony mostek. Podstawowymi układami są mostki *Wheatstone'a* do pomiaru rezystancji średnich i dużych oraz mostki *Thomsona* do pomiaru rezystancji małych. Mostki produkuje się w dwóch odmianach: techniczne proste w obsłudze o średniej dokładności, i mostki laboratoryjne, zapewniające dużą dokładność pomiaru.

Rezystancje można również mierzyć elektronicznymi mostkami RLC, których głównym zadaniem jest pomiar indukcyjności i rezystancji cewek lub pojemności i rezystancji strat kondensatorów przy prądzie przemiennym.

4.1. Mostek WHEATSTONE'A

Schemat połączeń rezystorów w mostku pokazano na rysunku 3. Mostek *Wheatstone'a* jest to tzw. mostek czteroramienny. Rezystancja mierzona R_x stanowi jedno ramię mostka, a wzorcowe rezystancje R_2 , R_3 , R_4 tworzą pozostałe ramiona mostka. Mostki zasilają się napięciem stałym (czasem przemiennym) doprowadzonym do punktów *A* i *B*. Między punkty *C* i *D* włącza się wskaźnik zera (galwanometr magnetoelektryczny). Przy odpowiednim doborze wartości rezystancji mostka (zrównoważeniu) różnica potencjałów między punktami *C* i *D* może być równa zero i galwanometr wykaże brak przepływu prądu – stan równowagi mostka.



Rys. 3. Ideowy schemat mostka *Wheatstone'a*.

Spadki napięcia na R_x i R_3 są równe $I_1 \cdot R_x = I_2 \cdot R_3$ i spadki napięć na R_2 i R_4 są równe $I_1 \cdot R_2 = I_2 \cdot R_4$. Z podzielenia stronami tych równań mamy warunek równowagi mostka

Wheatstone'a ,

$$\frac{R_x}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$$

co ostatecznie prowadzi do wyznaczenia szukanej wartości rezystancji mierzonej R_x .

$$R_x = R_2 \cdot \frac{R_3}{R_4}$$

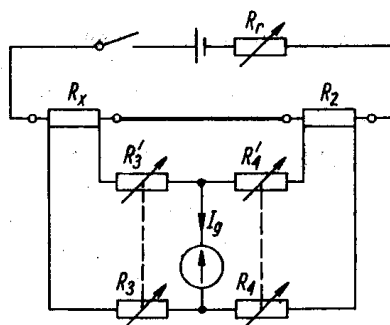
Mostek równoważy się dwoma sposobami. Pierwszy polega na zmianie rezystancji R_2 przy stałym stosunku R_3/R_4 – stosuje się w mostkach laboratoryjnych. Drugi polega na zmianie stosunku R_3/R_4 przy stałej wartości rezystancji R_2 – stosuje się w mostkach technicznych.

4.1.1. Przebieg pomiaru i zadania do wykonania

Zmontować układ pomiarowy tak jak na rysunku 3. Następnie zrównoważyć mostek zgodnie z instrukcją obsługi mostka. Zanotować wynik pomiaru rezystancji R_x i porównać z otrzymanym w metodzie technicznej. Podać przykład analizy niepewności pomiarowych.

4.2. Mostek THOMSONA

Mostek *Thomsona* jest mostkiem sześcioramiennym, przeznaczonym jest do pomiaru małych rezystancji rzędu mikroomów do pojedynczych omów. Schemat ideowy mostka *Thomsona* pokazano na rysunku 4. Oporniki o małych rezystancjach, np. boczniki, mają często cztery zaciski: dwa prądowe i dwa napięciowe. Do pomiaru takich rezystancji jest przewidziany mostek *Thomsona*. Umożliwia on pomiar także małych rezystancji o dwóch końcówkach np. odcińków przewodów i kabli.



Rys. 4. Ideowy schemat mostka *Thomsona*.

W mostku odróżnia się dwa obwody: obwód prądowy złożony ze źródła prądu, opornika mierzzonego R_x , opornika wzorcowego R_2 i opornika regulacyjnego R_r oraz obwód mostkowy złożony ze sprzężonych mechanicznie oporników regulowanych $R_3' - R_3$ i $R_4' - R_4$ i galwanometru. Oporniki regulowane sprzężone działają tak, że obydwa zawsze nastawia się na tę samą wartość. Zastosowanie mostka sześcioramiennego umożliwia wyeliminowanie wpływu na wynik pomiaru rezystancji styków i przewodów doprowadzających (łączących). Mostek w czasie pomiaru doprowadza się do równowagi przez regulację rezystorów $R_3' - R_3$. Gdy galwanometr wskazuje zerowe odchylenie, wtedy w mostku zachodzi równanie:

$$R_x = R_2 \cdot \frac{R_3}{R_4}$$

Zakres pomiarowy zmienia się przez odpowiedni dobór rezystora R_4 i wzorcowego R_2 .

4.2.1. Przebieg pomiaru i zadania do wykonania

Zmontować układ pomiarowy tak jak na rysunku 4. Następnie zrównoważyć mostek zgodnie z instrukcją obsługi mostka. Zanotować wynik pomiaru rezystancji R_x i porównać z otrzymanym w metodzie technicznej. Podać przykład analizy niepewności pomiarowych.

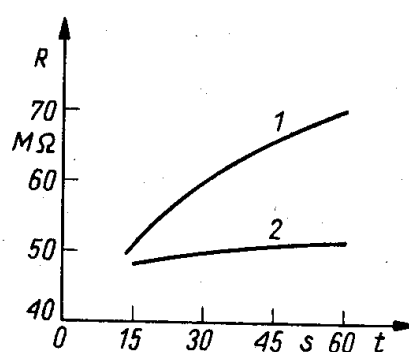
5. Pomiary rezystancji izolacji

Bardzo ważna w eksploatacji urządzeń energetycznych jest ich rezystancja izolacji. Jej stan oraz zmiany w czasie eksploatacji mają znaczący wpływ na czas eksploatacji urządzeń i bezpieczeństwo osób zatrudnionych przy ich obsłudze. Zły stan izolacji może w urządzeniach elektroenergetycznych doprowadzić do groźnych awarii (zwarcie w systemie energetycznym), lub może być spowodować zaistnienie niebezpieczeństwa dla osób prowadzących eksploatację (możliwość porażenia prądem elektrycznym). Okresowe badania rezystancji mogą zapobiec groźnym awariom, służą diagnozowaniu urządzeń i zapewniają bezpieczną obsługę osobom prowadzącym ich eksploatację. Przepisy branżowe i normy określają terminy i sposób wykonania pomiarów rezystancji izolacji dla poszczególnych urządzeń energetycznych.

Sposób pomiarów rezystancji izolacji jest odmienny od pomiarów rezystancji przewodników i gotowych rezystorów. Rezystancja izolacji jest zależna od wielu czynników, między innymi temperatury, wilgotności, wysokości i rodzaju przyłożonego napięcia i czasu. Istotny wpływ ma też tu rodzaj dielektryka i jego budowa strukturalna.

Wpływ temperatury jest bardzo istotny. Na przykład rezystancja energetycznych transformatorów olejowych zwiększa się dwukrotnie przy obniżeniu temperatury o 15°C , a zmniejsza dwukrotnie przy wzroście o 15°C w odniesieniu do temperatury przyjętej za normalną do eksploatacji. Temperatura i wartość przyłożonego napięcia mają decydujący wpływ na mechanizm przebicia izolacji.

Decydujący wpływ na wynik pomiaru rezystancji ma zjawisko absorpcji (ładowanie dielektryka) i samorozładowania w czasie. W uproszczeniu można przyjąć, że np. transformator czy silnik elektryczny to kondensator. Części metalowe to okładki a badana izolacja to dielektryk. Pod wpływem napięcia pomiarowego (najczęściej stosowane napięcia pomiarowe wynoszą 250 V, 500 V, 1000 V i 2500 V) ten kondensator ładuje się, przy czym część ładunku zostaje zaabsorbowana (spułapkowana) przez dielektryk, czyli przez izolację. Dielektryk cechuje również także prąd upływu (prąd przewodzenia), który płynie w czasie pomiaru rezystancji. Poniżej przedstawiony wykres (rysunek 5) przedstawia zależność rezystancji izolacji transformatora od czasu pomiaru.



Rys. 5. Wykres rezystancji izolacji transformatora w funkcji czasu. 1 – izolacja w dobrym stanie, 2 – izolacja w złym stanie (zawilgocona lub uszkodzona).

Zjawiska te decydują o innym sposobie pomiaru rezystancji izolacji i zastosowaniu odmiennych przyrządów pomiarowych. Pomiary rezystancji izolacji najczęściej wykonuje się megaomierzami. Obecnie są stosowane różne konstrukcje tych mierników. Najczęściej spotykane konstrukcje to indukcyjne mierniki izolacji tzw. IMI składające się z prądniczy prądu stałego (induktora) napędzanego korbką i miernika magnetoelektrycznego ilorazowego.

Wraz z postępem elektroniki indukcyjne mierniki izolacji są wypierane przez megaomomierze elektroniczne tzw. EMI. Źródłem wysokiego napięcia jest w nich elektroniczna przetwornica napięcia.

Produkcja megaomomierzy na różne zakresy napięć jest konieczna, ponieważ normy podają, jakim napięciem należy mierzyć rezystancję izolacji danego urządzenia. Pomiar powinien się odbywać napięciem zbliżonym do napięcia znamionowego urządzenia. Wynika to, jak wspomniano wcześniej, że rezystancja izolacji zależy w pewnej mierze od napięcia pomiarowego.

5.1. Przebieg pomiaru i zadania do wykonania

Wykonać pomiary rezystancji izolacji, kondensatora energetycznego lub transformatora lub silnika elektrycznego lub fragmentu instalacji elektrycznej, w funkcji czasu megaomomierzem zgodnie z jego instrukcją obsługi. Pomiaru rezystancji izolacji dokonujemy zwykle pomiędzy poszczególnymi fazami i pomiędzy fazami a metalowymi częściami dostępnymi (rdzeniem, obudową itp.). Wskazania megaomomierza należy odczytać w 15 s, 30 s, 45 s i 60 s pomiaru. Na podstawie pomiarów wykreślić krzywa jak na rysunku 5. Następnie wyznaczyć stosunek R_{60}/R_{15} , na ogół przyjmuje się że rezystancja izolacji jest dobra jeżeli stosunek ten jest nie mniejszy niż 1.3 (1.1). Ocenić stan rezystancji izolacji urządzenia.

Literatura podstawowa:

- R. Kurdziel, *Elektrotechnika*, PWN, Warszawa 1969.
- K. Pazdro, M. Poniński, *Miernictwo elektryczne w pytaniach i odpowiedziach*, WNT Warszawa 1986.
- J. Laskowski, *Poradnik Elektroenergetyka przemysłowego – wydanie czwarte poprawione*, COSiW SEP, Warszawa.
- *Poradnik inżyniera elektryka tom 3. Praca zbiorowa*, WNT, Warszawa 1997.
- Z. Konopacki, Z. Gryżewski, *Prace pomiarowo-kontrolne przy urządzeniach elektroenergetycznych o napięciu znamionowym wyższym od 1 kV*, COSiW SEP, Warszawa 1998.
- Struczyński, M. Świerzewski G., *Bezpieczna eksploatacja urządzeń elektroenergetycznych w pytaniach i odpowiedziach*, WNT Warszawa 1978.