

12. POMIARY METODĄ KOMPENSACYJNĄ

Opracowała: R. Antkowiak

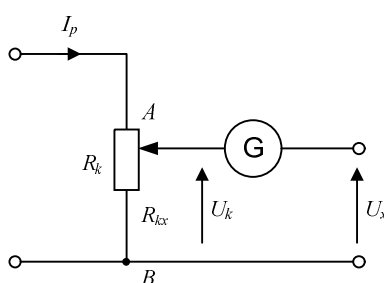
Na format elektroniczny przetworzył: A. Wollek

Niniejszy rozdział stanowi część skryptu:

Materiały pomocnicze do laboratorium z Metrologii elektrycznej i elektronicznej, Politechnika Szczecińska, Szczecin 1984 i 1987 chronionego prawami autorskimi. Wszelkie przetwarzanie, kopiowanie i rozpowszechnianie jest możliwe tylko za zgodą autorów

12.1. Zasada pomiaru

Pomiar metodą kompensacyjną polega na zrównoważeniu wartości mierzonej wartością znaną. Porównywane są ze sobą dwa napięcia (lub siła elektromotoryczna z napięciem). Zasadę pomiaru przedstawiono na rys.12.1.



Rys. 12.1

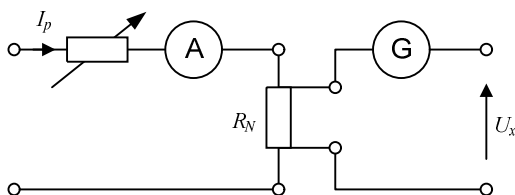
Napięciu mierzonemu $U_x(E_x)$ przeciwstawiony jest spadek napięcia między punktami AB. Napięcie to można regulować i wyznaczyć jego wartość. W chwili zrównania się napięcia U_k z napięciem U_x galwanometr wskaże wychylenie równe zero. Układ jest wtedy w stanie kompensacji i nie pobiera prądu z obiektu mierzonego. Jest to ważna zaleta metody kompensacyjnej. Napięcie U_x można skompensować napięciem U_k dwoma sposobami:

1. regulując prąd I_p przy zachowaniu stałej rezystancji R_{kx} ,
2. zmieniając rezystancję R_{kx} przy zachowaniu stałej wartości prądu I_p .

W technice pomiarowej wykorzystywane są dwa sposoby doprowadzania do stanu kompensacji.

12.2. Kompensator o regulowanym prądzie i stałym rezystorze (Lindecka)

Układ kompensatora przedstawiono na rys.12.2.



Rys. 12.2

Napięcie mierzone U_x kompensowane jest spadkiem napięcia na rezystorze wzorcowym R_N . Układ doprowadza się do stanu kompensacji regulując wartość prądu I_p . W chwili zrównania się obu napięć można wyznaczyć U_x z zależności:

$$U_x = I_p \cdot R_N$$

gdzie:

I_p – wartość natężenia prądu odczytana na amperomierzu w chwili kompensacji,

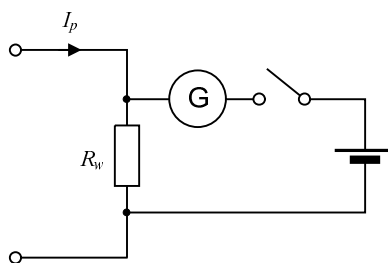
R_N – wartość zastosowanego rezystora wzorcowego.

Należy zapewnić dostatecznie płynną regulację prądu I_p oraz dobrać taki galwanometr, który zapewni wystarczającą czułość układu. Dokładność pomiaru ograniczona jest błędem aparaturowym pomiaru natężenia prądu I_p . Zależy on od klasy i zakresu użytego miernika. Błąd aparaturowy nie jest mniejszy niż w przypadku pomiaru napięcia bezpośrednio woltomierzem (w najlepszym przypadku wynosi ok. 0,1%). Pomiar odbywa się jednak bez poboru prądu, w związku z czym nie popełnia się błędów metody.

Kompensator Lindecka używany jest często do pomiaru sił termoelektrycznych, gdyż umożliwia on w prosty sposób osiągnięcie małych zakresów mierzonych napięć. Np. stosując amperomierz o zakresie 10 mA i rezystor o wartości 0,1 Ω osiąga się zakres 1 mV.

12.3. Kompensatory o zmiennej rezystancji i stałej wartości prądu

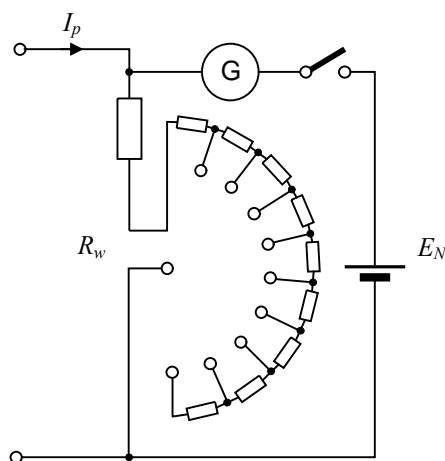
Chcąc zwiększyć dokładność pomiaru napięcia (SEM) metodą kompensacyjną należy zmniejszyć błąd pomiaru prądu pomocniczego. W kompensatorach dokładnych nie mierzy się prądu I_p amperomierzem, lecz wyznacza się jego wartość w sposób pośredni. Spadkiem napięcia wywołanym przez prąd I_p na rezystorze o dokładnie wyznaczonej wartości kompensuje się siłę elektromotoryczną ogniwa Westona, którego wartość znana jest z dużą dokładnością (rys. 12.3.).



Rys. 12.3

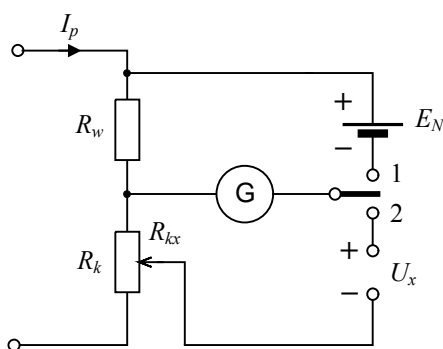
Wartość rezystora R_w dobiera się tak, aby był spełniony warunek $R_w \cdot I_p = E_w$. Wartość SEM ogniwa Westona zależy od egzemplarza oraz od temperatury otoczenia.

Konieczna jest więc możliwość zmiany ostatnich miejsc znaczących na rezystorze R_w (rys. 12.3a.).



Rys. 12.3a

Aby nie stracić na dokładności, należy wyznaczyć wartość rezystora R_w z taką samą liczbą miejsc znaczących, z jaką znamy wartość SEM ogniwa Westona. Ponieważ najmniejsza wartość stopnia dekady wynosi $0,1 \Omega$, a dla wygody pomiaru korzystnie jest ustalić prąd pomocniczy o wartości 10^n , to przy $E = 1,01865 \text{ V}$ w temperaturze 20°C R_w musi mieć wartość $10186,5 \Omega$. Stąd prąd pomocniczy ma zwykle wartość 10^{-4} A , niekiedy 10^{-3} A . Kompensator o zmiennej rezystancji przedstawiony jest na rys. 12.4.



Rys. 12.4

Prąd I_p nastawia się na żadaną wartość przy położeniu przełącznika w pozycji 1 regulując go aż do wartości, przy której będzie spełniony warunek $R_w \cdot I_p = E_N$ (zerowe wychylenie galwanometru). Następnie, nie zmieniając wartości prądu I_p po przełączeniu przełącznika w położenie 2 kompensuje się mierzone napięcie U_x przez zmianę rezystancji R_{kx} . W stanie kompensacji

$$I_p \cdot R_{kx} = U_x$$

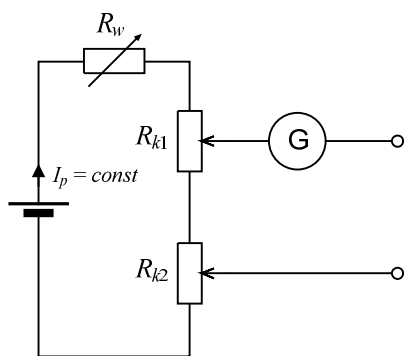
gdzie:

R_{kx} – wartość rezystora R_k w chwili kompensacji.

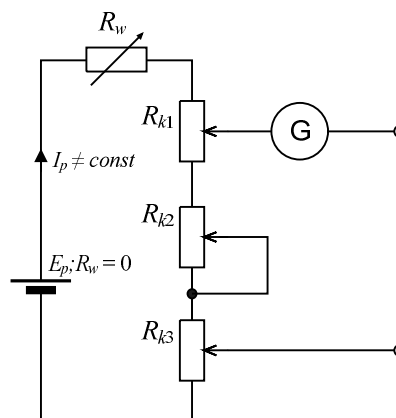
Jako rezystora R_k używa się rezystorów dekadowych. Przy dokładnych pomiarach wyznaczona wartość

musi mieć odpowiednią liczbę miejsc znaczących. Należy więc użyć rezystora o odpowiedniej liczbie dekad (5). Ponieważ najmniejsza dekada jest $10 \times 0,1 \Omega$, więc pozostałe są 10×1 , 10×10 , 10×100 , $10 \times 1000 \Omega$. Układ taki musiałby być zasilany źródłem prądowym o bardzo wysokiej jakości (dobra stabilizacja, bardzo duża niezależność od zmian obciążenia, wartość $I_p = 10^{-4} \text{ A}$). Realizowane obecnie źródła prądowe nie spełniają wymienionych wymagań, dlatego też stosuje się źródła napięć stabilizowanych, a wartość prądu pomocniczego ustawia się rezystorem R_r (rys. 12.4a).

Warunek stałości prądu pomocniczego pozwala na jednoczesne zastosowanie najwyżej dwu dekad. Wyjaśniają to rys. 12.4a i 12.4b.



Rys. 12.4a



Rys. 12.4b

Ze względu na rozdzielczość nastaw taki kompensator byłby mało dokładny. Zwiększenie liczby dekad zostało różnie rozwiązane i w zależności od tego spotyka się różne kompensatory. Jednym z bardziej rozpowszechnionych jest kompensator Feussnera.

LITERATURA

1. Chwaleba A., Poniński M., Siedlecki A.: *Metrologia elektryczna*. Wyd. Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1976
2. Jelonek A., Gąszczak J.: *Podstawy miernictwa elektrycznego dla elektroników*. Cz. 1. PWN, Warszawa - Wrocław 1970
3. Lebson S.: *Podstawy miernictwa elektrycznego*. WNT, Warszawa 1972

13. POMIAR RÓŻNICY SYGNAŁÓW METODĄ CZĘŚCIOWEJ KOMPENSACJI

Opracowała: R. Antkowiak

Na format elektroniczny przetworzył: A. Wollek

Niniejszy rozdział stanowi część skryptu:

Materiały pomocnicze do laboratorium z Metrologii elektrycznej i elektronicznej, Politechnika Szczecińska, Szczecin 1984 i 1987 chronionego prawami autorskimi. Wszelkie przetwarzanie, kopiowanie i rozpowszechnianie jest możliwe tylko za zgodą autorów

13.1. Wiadomości podstawowe

Często wartość wielkości mierzonej jest wyznaczana metodą pośrednią. Wykonuje się wtedy pomiary bezpośrednie innych wielkości związanych z wielkością mierzoną znaną zależnością.

Rozpatrzono przypadek pomiaru pośredniego, gdy wartość mierzona wyznaczana jest ze wzoru, w którym występuje różnica dwóch składników:

$$X = f(A_1 - A_2, B, C, \dots, N)$$

Dokładność pomiaru wielkości X będzie między innymi zależała od dokładności z jaką znana jest wartość $A_1 - A_2$, a to zależy od sposobu pomiaru. Jeżeli różnicę $A_1 - A_2$ wyznacza się z bezpośrednich, wartości pomiarów A_1 i A_2 to prawdopodobny graniczny błąd pomiaru różnicy $A_1 - A_2$ wynosi:

$$U_{rel}(A_1 - A_2) = \sqrt{\left(\frac{A_1}{A_1 - A_2} \cdot U_{rel}(A_1)\right)^2 + \left(\frac{A_2}{A_1 - A_2} \cdot U_{rel}(A_2)\right)^2} \quad (13.1.)$$

Z zależności (13.1.) widać, że nawet przy bardzo dokładnych pomiarach wartości A_1 i A_2 (małe δA_1 , δA_2) błąd pomiaru różnicy może być bardzo duży (gdy $A_1 \rightarrow A_2$ uchyb dąży do ∞). Dlatego też, przy zbliżonych wartościach A_1 i A_2 należy starać się bezpośrednio zmierzyć różnicę $A_1 - A_2$ albo przynajmniej sprowadzić pomiar do pomiaru różnicy wartości znacznie się od siebie różniących.

Nie zawsze jest możliwy bezpośredni pomiar różnicy $A_1 - A_2$ np. gdy wartości A_1 i A_2 nie występują jednocześnie. Dokładność pomiaru można zwiększyć wprowadzając wielkość odniesienia A_0 i mierząc bezpośrednio różnicę $A_1 - A_0 = A'$ oraz $A_2 - A_0 = A''$. Szukana różnica $A_1 - A_2$ ma wtedy wartość:

$$A_1 - A_2 = (A' + A_0) - (A'' + A_0) = A' - A''$$

W dalszym ciągu jest to pomiar różnicowy, lecz wartość A' (przy odpowiednim doborze A_0) nie jest już zbliżona do wartości A'' . Przy założeniu, że A' i A'' mierzy się z taką samą dokładnością jak A_1 i A_2 , niepewność $U_{rel}(A_1 - A_2)$ zmniejsza się wyraźnie. Warunkiem poprawnego pomiaru jest niezmiennosc w czasie wykonywania pomiaru wielkości odniesienia A_0 . Najkorzystniej jest dobrać $A_0 = A_2$ (lub $A_0 = A_1$), ponieważ wtedy $A'' = 0$ (lub $A' = 0$), a różnica $A_1 - A_2 = A'$ (lub $A_1 - A_2 = -A''$). Dla powyższego przypadku błąd pomia-

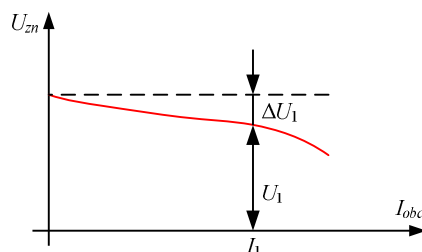
ru różnicy $A_1 - A_2$ jest równy błędowi pomiaru A .

W opisanej wyżej metodzie wartość odniesienia A_0 kompensuje częściowo wartości A_1 i A_2 , stąd jej nazwa: *metoda częściowej kompensacji*. Metoda ta nadaje się szczególnie do wyznaczania małych przyrostów wielkości spowodowanych różnymi czynnikami wpływającymi. Przyrządem, w którym wykorzystano tą metodę jest lupa napięciowa. Poniżej rozpatrzono kilka innych przypadków zastosowania metody częściowej kompensacji.

13.2. Zastosowanie metody częściowej kompensacji

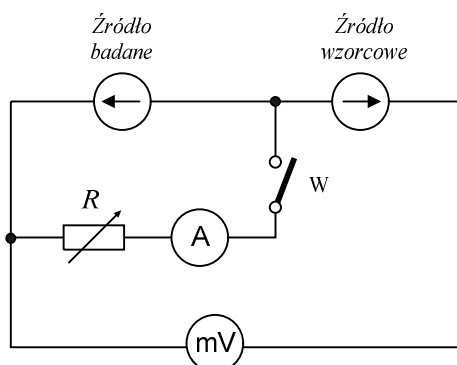
13.2.1. Wyznaczenie napięcia wyjściowego zasilacza napięciowego w zależności od zmiany czynnika wpływającego (np. napięcia, wejściowego, obciążenia)

W zasilaczach stabilizowanych zmiany napięcia wyjściowego spowodowane zmianami napięcia wejściowego lub zmianą obciążenia są niewielkie. Jeżeli przyjąć, że zmiana napięcia z obciążeniem przedstawia się tak jak na rys. 13.1, to zamiast wyznaczenia charakterystyki $U_{wyj} = f(I_{obc})$ korzystniej jest mierzyć przyrosty napięcia wyjściowego od wartości znamionowej (przy prądzie obciążenia $I_{obc} = 0$).



Rys. 13.1

Ze względu na małą wartość przyrostu należy wyznaczyć bezpośrednio ΔU_1 (rys. 13.1). W tym celu do układu pomiarowego należy wprowadzić napięcie odniesienia o wartości $U_0 = U_{zn}$, niezmiennie w czasie wykonywania pomiaru. Układ pomiarowy przedstawiono na rys. 13.2.



Rys. 13.2

Jako źródło odniesienia wybrano stabilizowany zasilacz napięciowy, którego znamionowa wartość napięcia wyjściowego równa jest znamionowej wartości napięcia badanego zasilacza przy prądzie obciążenia $I_{obc} = 0$. Przy otwartym wyłączniku „w” napięcie wyjściowe badanego zasilacza kompensowane jest napięciem źródła odniesienia a włączony miliwoltomierz wskaże wychylenie zerowe. Zamykając wyłącznik „w” obciąża się zasilacz badany, co powoduje zmniejszenie napięcia zasilacza. Napięcie badanego zasilacza nie skompensuje już napięcia odniesienia. Spowoduje to wychylenie miliwoltomierza, który wskaże różnicę między napięciem odniesienia a napięciem wyjściowym badanego zasilacza przy określonym prądzie obciążenia (U_V). Przyrost napięcia wyjściowego, spowodowany obciążeniem zasilacza, wyznaczony jest z dokładnością zależną od dokładności pomiaru napięcia woltomierzem.

W praktyce trudno jest dobrać zasilacz wzorcowy, który ma identyczną wartość znamionową jak zasilacz badany. Dlatego też woltomierz wychyla się również przy otwartym wyłączniku „w” (rys. 13.2) i wskazuje różnicę między napięciem wyjściowym badanego zasilacza przy $I_{obc} = 0$ a napięciem odniesienia (U_{V1}). Jeżeli $U_0 > U_x$, to

$$U_{V1} = U_0 - U_{zN} \quad (13.2)$$

Przy pobieraniu prądu I_{obc} z badanego zasilacza wychylenie przyrządu zwiększa się i wynosi U_{V2} :

$$U_{V2} = U_0 - U_x \quad (13.3)$$

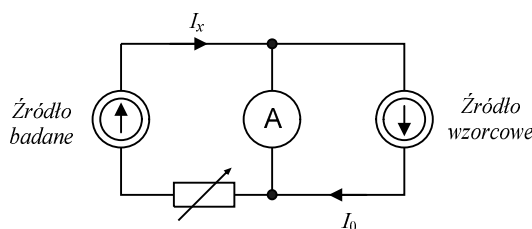
Przyrost (ujemny) napięcia na badanym zasilaczu wyznaczony z równań (13.2.) i (13.3.) wynosi:

$$\Delta U_1 = U_{zN} - U_x = U_{V2} - U_{V1} \quad (13.4)$$

Zależność (13.4), z której wyznaczy się przyrost ΔU_1 jest różnicą, lecz wartość U_{V2} różni się znacznie od wartości U_{V1} (jeżeli $U_0 \approx U_{zn}$), a uchyb pomiaru będzie znacznie mniejszy niż przy wyznaczeniu różnicy $U_{zn} - U_x$ z bezpośrednich pomiarów U_{zn} i U_x .

13.2.2. Wyznaczenie przyrostów prądu wyjściowego zasilaczy prądowych spowodowanych zmianą czynników wpływających

Do wyznaczenia przyrostu wartości prądu wyjściowego zasilacza można zastosować układ pomiarowy pokazany na rys. 13.3 (częściowa kompensacja prądu).



Rys. 13.3

Jako wielkość odniesienia stosuje się zwykle prąd wyjściowy zasilacza tego samego typu. Wartość prądu odniesienia jest zbliżona do wartości znamionowej prądu wyjściowego badanego zasilacza. Różnicę prądów w warunkach znamionowych wskaże włączony miliamperomierz:

$$I_1 = I_{xZN} - I_0 \quad (13.5)$$

gdzie:

I_1 – prąd wskazany przez miliamperomierz,

I_{xzn} – prąd wyjściowy badanego zasilacza w warunkach znamionowych,

I_0 – prąd wyjściowy zasilacza zastosowanego jako źródło odniesienia.

Następnie zmienia się wartość czynnika wpływającego (np. napięcie zasilania, obciążenie źródła) działającego na badany zasilacz. Pociąga to za sobą zmianę prądu wyjściowego, co powoduje zmianę wychylenia miliamperomierza. Prąd płynący przez miliamperomierz wynosi:

$$I_2 = I_x - I_0 \quad (13.6)$$

gdzie:

I_2 – prąd płynący przez miliamperomierz,

I_x – prąd wyjściowy zasilacza po zmianie czynnika wpływającego,

I_0 – prąd wyjściowy źródła odniesienia.

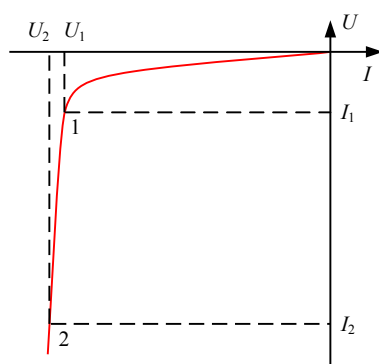
Przyrost prądu wyjściowego badanego zasilacza oblicza się z równań (13.5) (13.6). Wynosi on:

$$I_x - I_{xZN} = I_2 - I_1 \quad (13.7)$$

Pomiar różnicy $I_x - I_{xzn}$ sprowadzony został do pomiaru różnicy $I_2 - I_1$. Wartości I_x i I_{xzn} są zbliżone do siebie, natomiast wartości I_2 i I_1 znacznie się od siebie różnią. Przeprowadzając pomiar w układzie z rys. 13.3 zwiększono dokładność pomiaru różnicy prądów $I_x - I_{xzn}$.

13.2.3. Pomiar rezystancji dynamicznej diody Zenera

Charakterystykę prądowo-napięciową diody Zenera w kierunku zaporowym przedstawiono na rys. 13.4.



Rys. 13.4

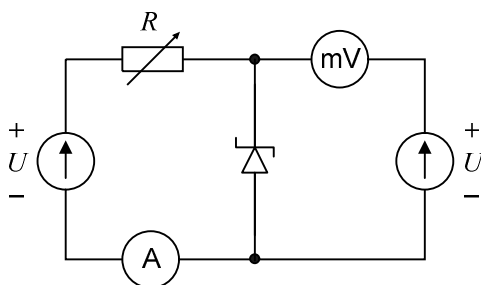
Rezystancja dynamiczna diody określona jest zależnością:

$$R_{dyn} = \left| \frac{\Delta U}{\Delta I} \right|$$

Dla zakresu stabilizacji

$$R_{dyn} = \left| \frac{U_2 - U_1}{I_2 - I_1} \right| \quad (13.8)$$

Wyznaczenie rezystancji dynamicznej dla zakresu stabilizacji przez bezpośredni pomiar U_1 , U_2 , I_1 , I_2 i obliczenie wartości z zależności (13.8) jest mało dokładne. W zależności (13.8) tak w liczniku jak i w mianowniku występuje różnica dwóch wartości. Różnica prądów $I_2 - I_1$ jest tego samego rzędu co poszczególne prądy. Natomiast różnica $U_2 - U_1$ jest mała w porównaniu z wartościami U_2 i U_1 . Jest ona tego samego rzędu co bezwzględne wartości błędów mierzonych napięć U_1 i U_2 . Dokładność z jaką wyznacza się różnicę $U_2 - U_1$ jest znacznie mniejsza od dokładności różnicy prądów $I_2 - I_1$. Należy więc przede wszystkim poprawić dokładność pomiaru różnicy $U_2 - U_1$, co można uzyskać przez zastosowanie metody częściowej kompensacji napięcia. Pomiar oporności dynamicznej diody Zenera można przeprowadzić w układzie przedstawionym na rys. 13.5.



Rys. 13.5

Jako napięcie odniesienia dobrano źródło napięcia o wartości zbliżonej do napięcia Zenera badanej diody. Miliwoltomierz powinien mieć wystarczająco dużą rezystancję aby jego prąd był pomijalny w stosunku do prądu płynącego przez diodę. Miliwoltomierz wskazuje różnicę napięć $U_1 - U_0$ przy nastawionym prądzie I_1 , a przy nastawionym prądzie I_2 wskazuje on różnicę $U_2 - U_0$. Rezystancję dynamiczną diody wyznaczamy z zależności:

$$R_{dyn} = \left| \frac{U_{V2} - U_{V1}}{I_2 - I_1} \right| \quad (13.9)$$

gdzie:

U_{V1} – wartość odczytana z miliwoltomierza przy prądzie I_1 ,

U_{V2} – wartość odczytana z miliwoltomierza przy prądzie I_2 .

Dokładność wyznaczenia rezystancji dynamicznej diody Zenera tą metodą jest rzędu kilku procent. Poniżej przedstawiono przykład obrazujący zwiększenie dokładności pomiaru przy zastosowaniu metody częściowej kompensacji napięcia. Dla diody BZ wyznaczono charakterystykę napięciowo-prądową używając woltomierza uniwersalnego klasy 1 na zakresie 10V z podziałką o 50 działkach, o wystarczająco dużej rezystancji wewnętrznej oraz miliamperomierza o zakresie 15 mA klasy 0,5. Dla wyznaczenia rezystancji dynamicznej diody obrano na prostoliniowej części charakterystyki punkt 1 (rys. 13.4) o współrzędnych $I_1 = 5,00$ mA; $U_1 = 5,90$ V oraz punkt 2 o współrzędnych 14,0 mA i 6,14 V (współrzędne są punktami pomiarowymi). Przy pomiarach napięć U_2 i U_1 wskazówka woltomierza znajduje się w pobliżu punktu podziałki, któremu odpowiada wartość 6,00 V ($\alpha = 30$ działek). Pomiar U_1 i U_2 wykonuje się z takim samym błędem systematycznym. Przy wyznaczaniu różnicy błąd systematyczny miernika (w opisanym przypadku) nie wpływa na dokładność jej wyznaczania. Pozostaje jednak niepewność odczytu. Ponieważ wartości obu napięć odczytuje się na tym samym przyrządzie i w pobliżu tego samego punktu podziałki, więc niepewność względna $U_{rel}(U_1) = U_{rel}(U_2) = U_{rel}(U)$. Przyjmując dokładność odczytu $U(\alpha) = 0,1$ działki, niepewność względna dla podanego przykładu wynosi:

$$U_{rel}(U) = U_{rel}(\alpha) = \frac{U(\alpha)}{\alpha} = \frac{0,1}{30} = 0,3\%$$

Niepewność względna różnicy napięć $U_2 - U_1$ obliczony z zależności (13.1) ma więc wartość:

$$U_{rel}(U_2 - U_1) = \sqrt{\left(\frac{0,3\% \cdot 5,90}{6,14 - 5,90}\right)^2 + \left(\frac{0,3\% \cdot 6,14}{6,14 - 5,90}\right)^2} \approx 11\%$$

Dokładność pomiaru różnicy prądów zależy od niepewności aparaturowej amperomierza, ponieważ odczyty prądów I_1 i I_2 , wykonuje się w różnych punktach podziałki. Prąd I_1 mierzy się z niepewnością

$U_{rel}(I_1) = 1,5\%$, prąd I_2 z niepewnością $U_{rel}(I_2) = 0,5\%$, a niepewność różnicy prądów $I_2 - I_1$ zgodnie z zależnością (13.1) wynosi:

$$U_{rel}(I_2 - I_1) = \sqrt{\left(\frac{0,5\% \cdot 14}{14 - 5}\right)^2 + \left(\frac{0,5\% \cdot 5}{14 - 5}\right)^2} \approx 2\%$$

Błąd pomiaru rezystancji dynamicznej diody Zenera zależy od dokładności pomiaru różnicy napięć i prądów, i wynosi:

$$U_{rel}(R_{dyn}) = \sqrt{[U_{rel}(U_2 - U_1)]^2 + [U_{rel}(I_2 - I_1)]^2} \approx \sqrt{11^2 + 2^2} \approx 11\%$$

W omawianym przypadku o dokładności wyznaczenia rezystancji dynamicznej diody decyduje pomiar różnicy napięć. Dla zwiększenia dokładności pomiaru zastosowano metodę częściowej kompensacji napięcia (rys. 13.5). Jako pomocnicze źródło napięcia zastosowano zasilacz stabilizowany o regulowanym napięciu wyjściowym, ustawiając wartość napięcia odniesienia $U_0 = 5,60$ V. Miernik uniwersalny klasy 1 przełączono na zakres 500 mV. Przy prądzie płynącym przez diodę o wartości $I_1 = 5,00$ mA miliwoltomierz wskazał napięcie $U_{V1} = U_1 - U_0 = 110$ mV, a przy prądzie $I_2 = 15$ mA miliwoltomierz wskazał $U_{V2} = U_2 - U_0 = 350$ mV. Napięcie U_{V1} mierzone jest z błędem $\delta U_{V1} = 5\%$, a U_{V2} z błędem $\delta U_{V2} = 1,4\%$. Różnica $U_{V2} - U_{V1}$ wyznaczona jest z dokładnością (zgodnie z wzorem (13.1))

$$U_{rel}(U_{V2} - U_{V1}) = \sqrt{\left(\frac{1,4\% \cdot 350}{350 - 110}\right)^2 + \left(\frac{5\% \cdot 110}{350 - 110}\right)^2} \approx 3\%$$

a dynamiczna rezystancja diody Zenera z dokładnością

$$U_{rel}(R_{dyn}) = \sqrt{[U_{rel}(U_{V2} - U_{V1})]^2 + [U_{rel}(I_2 - I_1)]^2} \approx \sqrt{3^2 + 2^2} \approx 4\%$$

Przez zastosowanie metody częściowej kompensacji napięć dokładność pomiaru różnicy napięć sprowadzono do rzędu dokładności pomiaru różnicy prądów. Ze względu na zależność rezystancji dynamicznej diody Zenera od czynników wpływających (temperatura, prąd obciążenia) dokładność taka jest wystarczająca.