

## Ćwiczenie Nr 20

### POMIARY KOMPENSATOREM NAPIĘCIA STAŁEGO

#### **Cel ćwiczenia**

Celem ćwiczenia jest poznanie właściwości metrologicznych kompensacyjnej metody pomiarowej a także typowych rozwiązań układowych oraz niektórych zastosowań pomiarowych kompensatorów napięcia stałego.

*(Opracował: prof. Jan R. Jasik)*

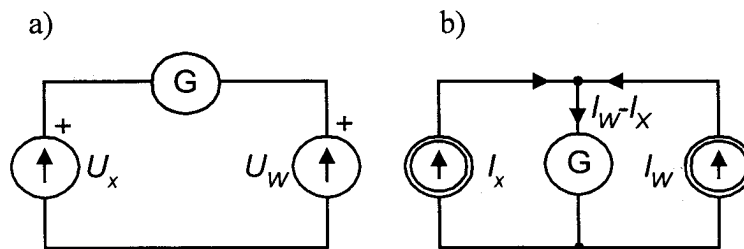
Lublin 2007 r.

## 1. WPROWADZENIE

### 1.1 Idea metody kompensacyjnej

Kompensacyjna metoda pomiarowa, odmiana metody porównawczej (komparacyjnej), polega na bezpośrednim porównaniu mierzonej wielkości fizycznej z wielkością tego samego rodzaju obraną za jednostkę. W elektrotechnice metoda kompensacyjna jest stosowana do dokładnych, bezpośrednich pomiarów napięć i prądów stałych oraz przemiennych.

Na rys.1.1a) przedstawiono dwa źródła napięcia stałego włączone przeciwsobnie: źródło napięcia mierzonego  $U_x$  oraz źródło napięcia wzorcowego  $U_w$ . W galwanometrze G płynie prąd wywołany przez te napięcia. Zanik prądu świadczy o równości obu napięć. Mówi się wówczas, że napięcie mierzone jest skompensowane przez napięcie wzorcowe.



Rys.1.1 Ilustracja metody porównania dwóch napięć a) i dwóch prądów b)

Układ według rys.1.1b) przedstawia zasadę kompensacji dwóch prądów stałych: prądu mierzonego  $I_x$  oraz prądu wzorcowego  $I_w$ . Przez galwanometr  $G$  płynie różnica tych prądów i wytwarza napięcie na jego zaciskach. Zanik napięcia na zaciskach galwanometru świadczy o równości tych prądów. Prąd mierzony jest skompensowany przez prąd wzorcowy.

Źródłami napięcia wzorcowego są najczęściej nasycone ogniwa kadmowe tzw. ogniwa Westona [1,2], których napięcie źródłowe (siła elektromotoryczna) w temperaturze  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  wynosi  $1,018650\text{ V}$ . Źródła napięcia wzorcowego dostarczają napięcie o jednej tylko, niezmienniej wartości. Ponieważ mierzone napięcia mogą się różnić co do wartości od napięć wzorcowych istnieje potrzeba użycia układów umożliwiających kompensację za pomocą pewnej, dającej się dokładnie określić, części napięcia wzorcowego, tzw. napięcia kompensującego  $U_k$ .

### 1.2 Układy kompensatorów napięcia stałego

Kompensator napięcia stałego, w najprostszej postaci, jest źródłem znanego i regulowanego napięcia stałego  $U_k$ , które jest wytwarzane przez znany prąd  $I_r$  (tzw. prąd pomocniczy, roboczy) kompensatora, płynący przez znaną rezystancję  $R_k$ . Uproszczony schemat kompensatora przedstawia rys.1.2.

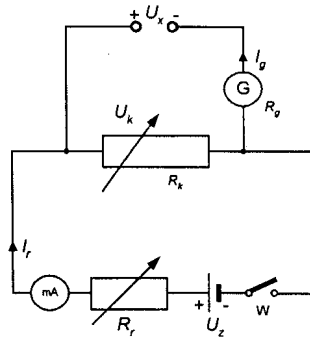
Mierzone napięcie  $U_x$  włącza się przeciwnie do napięcia  $U_k$ . Zmieniając  $U_k$  doprowadza się do stanu równowagi sygnalizowanego przez zerowe wskazania galwanometru  $G$ . Ze stanu  $\alpha_g = 0$  wynika  $I_g = 0$ ; a więc w stanie równowagi

$$U_x = U_k = I_r R_k \quad (1.1)$$

Łatwo zauważyć, że napięcie kompensujące  $U_k$  może być regulowane na dwa sposoby:

- przez zmianę  $I_r$  przy zachowaniu stałości rezystancji  $R_k = \text{const.}$ ,
- przez zmianę  $R_k$  przy zachowaniu stałości prądu pomocniczego  $I_r = \text{const.}$

Obydwa rozwiązania są stosowane w konstrukcjach firmowych kompensatorów napięcia stałego. Pierwsze rozwiązanie znajduje zastosowanie w tzw. kompensatorach o stałej



Rys. 1.2 Uproszczony schemat kompensatora napięcia stałego

rezystancji zwanymi też kompensatorami o małej rezystancji wewnętrznej. Rozwiązanie drugie znajduje zastosowanie w tzw. kompensatorach o stałym prądzie zwanymi kompensatorami o dużej rezystancji wewnętrznej.

Warto podkreślić, że pojęcia małej lub dużej rezystancji odnoszą się do wartości rezystancji rezystora  $R_k$  i nie świadczą o rezystancji wewnętrznej kompensatora, który w stanie kompensacji ( $I_g = 0$ ) jest doskonałym woltomierzem o bliskiej nieskończoności rezystancji wewnętrznej, nie obciążającym mierzonego źródła napięcia  $U_x$ . Dzięki temu kompensator umożliwia pomiary siły elektromotorycznej źródła bez poboru energii, tzn. bez wpływu na jego stan. Jest to sytuacja, do której dążymy w konstrukcjach różnego typu woltomierzy.

### 1.2.1 Kompensatory o stałej rezystancji

Kompensatorem o stałej rezystancji jest kompensator Lindeck'a – Rothe'go [1,2], którego schemat jest w zasadzie identyczny z podanym na rys. 1.2, z tym zastrzeżeniem, że rezystor  $R_k$  jest nieregulowany. Stan kompensacji, opisany wzorem (1.1), osiąga się poprzez zmianę prądu  $I_r$ , uzyskiwaną dzięki regulacji rezystora  $R_r$ . W tym kompensatorze miliamperomierz magnetoelektryczny mA, mierzący prąd pomocniczy  $I_r$  kompensatora, jest skalowany w wartościach mierzonego napięcia  $U_x$ . Błąd pomiaru tym kompensatorem zależy w głównej mierze od błędu miliamperomierza a także od błędu rezystora  $R_k$  i błędu nieczułości wskaźnika stanu kompensacji, którym jest galwanometr magnetoelektryczny G.

Dzięki małej wartości rezystora  $R_k$  kompensator ten charakteryzuje się wysoką czułością i jest szczególnie przydatny przy pomiarach źródeł siły elektromotorycznej o niskich wartościach (rzędu kilku mV) i małej rezystancji wewnętrznej (rzędu kilkudziesięciu  $\Omega$ ), np. siły termoelektrycznej termooogniw (termoelementów, termopar).

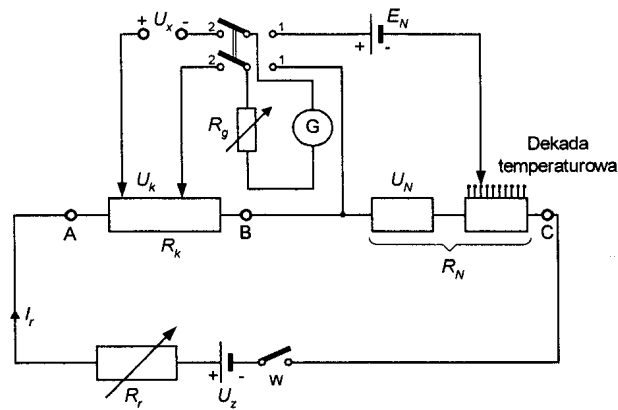
### 1.2.2 Kompensatory o stałym prądzie

W pomiarach laboratoryjnych podstawowe znaczenie posiadają kompensatory o stałym prądzie (rys.1.3). W przyrządach tych wykorzystuje się metodę tzw. kompensacji podwójnej [2, 3].

Metoda kompensacji podwójnej polega na tym, że:

- w pierwszym etapie nastawia się (regulacja  $R_r$ ) prąd pomocniczy  $I_r$  na podstawie kompensacji, znanej z dużą dokładnością siły elektromotorycznej  $E_N$  ogniwa Westona, spadkiem napięcia  $U_N$  na rezystorze  $R_N$ ,
- w drugim etapie odbywa się właściwy pomiar napięcia  $U_x$  poprzez jego kompensację napięciem  $U_k$ , wartość którego jest zmieniana dzięki nastawom rezystora  $R_k$ .

We wszystkich rozwiązaniach firmowych kompensatorów rezystor  $R_k$  jest wyskalowany bezpośrednio w woltach. Pociąga to za sobą konieczność nastawiania prądu pomocniczego  $I_r$  na ściśle określoną wartość np. 100  $\mu\text{A}$ , 1 mA. Ponieważ rzeczywista wartość sem. ogniw wzorcowych zawiera się w granicach od 1,01740 V do 1,02050 V (zależy ona od czasu



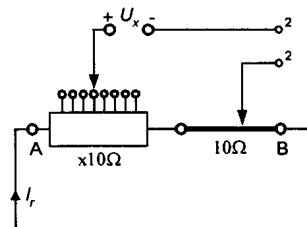
Rys.1.3 Schemat ideowy kompensatora o stałym prądzie pomocniczym

eksploatacji oraz temperatury pracy ogniwa), rezystor wzorcowy  $R_N$  powinien mieć rezystancję wyrażającą się liczbą o identycznych cyfrach jak sem.  $E_N$  ogniwa wzorcowego. W celu dopasowania rezystora wzorcowego do aktualnej sem.  $E_N$ , część tego rezystora jest wykonana w postaci dekady regulowanej, której pokrętko umieszczone jest na płycie czołowej kompensatora jako tzw. „dekada temperaturowa”. Na przykład dla ogniwa wzorcowego o sem.  $E_N = 1,018605$  V, wartość  $R_N$  powinna wynosić  $10186,5 \Omega$ , wtedy bowiem  $I_r = 100 \mu\text{A}$ .

W omawianym układzie zastosowano zabezpieczenie galwanometru (również ogniwa wzorcowego przy braku kompensacji) rezystorem  $R_g$ . Warto podkreślić, że w układach kompensacyjnych rezystor zabezpieczający  $R_g$  jest zawsze włączany szeregowo z galwanometrem. Niedopuszczalne jest zabezpieczanie galwanometru rezystorami włączanymi równolegle, gdyż ten rodzaj zabezpieczenia może prowadzić do uszkodzenia ogniwa wzorcowego.

Praktycznie wszystkie firmowe kompensatory napięcia o stałym prądzie pomocniczym mają budowę odpowiadającą schematowi z rys. 1.3. Zróżnicowanie konstrukcji oferowanych przez różnych producentów [2] sprowadza się do zróżnicowania rozwiązań rezystora kompensacyjnego  $R_k$  mającego na celu:

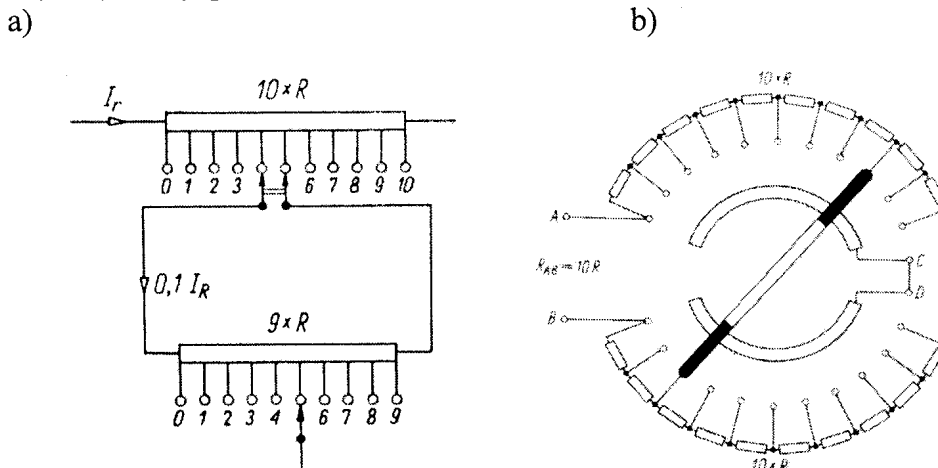
- zapewnienie wymaganej płynności regulacji i dokładności odczytu napięcia  $U_k$ ,
- uniezależnienie prądu pomocniczego  $I_r$  od nastaw rezystora  $R_k$ .



Rys. 1.4 Budowa rezystora kompensacyjnego kompensatora Cromptona

W kompensatorze Cromptona [1,2] rezystor  $R_k$  jest wykonany w postaci dekady (rys.1.4), której ostatni stopień stanowi kalibrowany drut ślizgowy. Wadą tego rozwiązania jest ścieranie się drutu ślizgowego, a więc zmiana jego rezystancji w czasie eksploatacji oraz pojawianie na styku suwaka i drutu ślizgowego, podczas pocierania, pasożytniczej sem. (zjawisko triboelektryczne). Kompensatory Cromptona bywają stosowane głównie do pomiarów sem. termoelementów.

Rozwiązanie dekady Rapsa [1, 2] (rys.1.5a) polega na bocznikowaniu części rezystora o większej rezystancji podzielonego na szereg sekcji. Prąd roboczy  $I_r$  rozgałęzia się; przez



Rys. 1.5 Układ kaskadowej dekady Rapsa a) i podwójnej dekady Feussnera b)

dekadę bocznikującą (pomocniczą) płynie  $0,1 I_r$ , a przez zbocznikowany stopień dekady głównej  $0,9 I_r$ . Przesunięcie przełącznika dekady głównej o jeden stopień o rezystancji  $R$  powoduje zmianę napięcia kompensującego o  $I_r R$ ; natomiast przesunięcie przełącznika dekady pomocniczej o jeden stopień zmienia napięcie kompensujące o  $0,1 I_r R$ , a więc dziesięciokrotnie mniej. Stosując, połączone szeregowo, dwie kaskady mamy możliwość regulacji napięcia  $U_k$  z płynnością odpowiadającą czterem cyfrowi. Celem polepszenia płynności napięcia kompensującego można bocznikować jeszcze dekadę pomocniczą, stosując tę samą zasadę. Warto podkreślić, że niezależnie od położenia szczotek przełączników dekad, rezystancja dekady jest stała – nie wpływa więc na wartość prądu roboczego  $I_r$ .

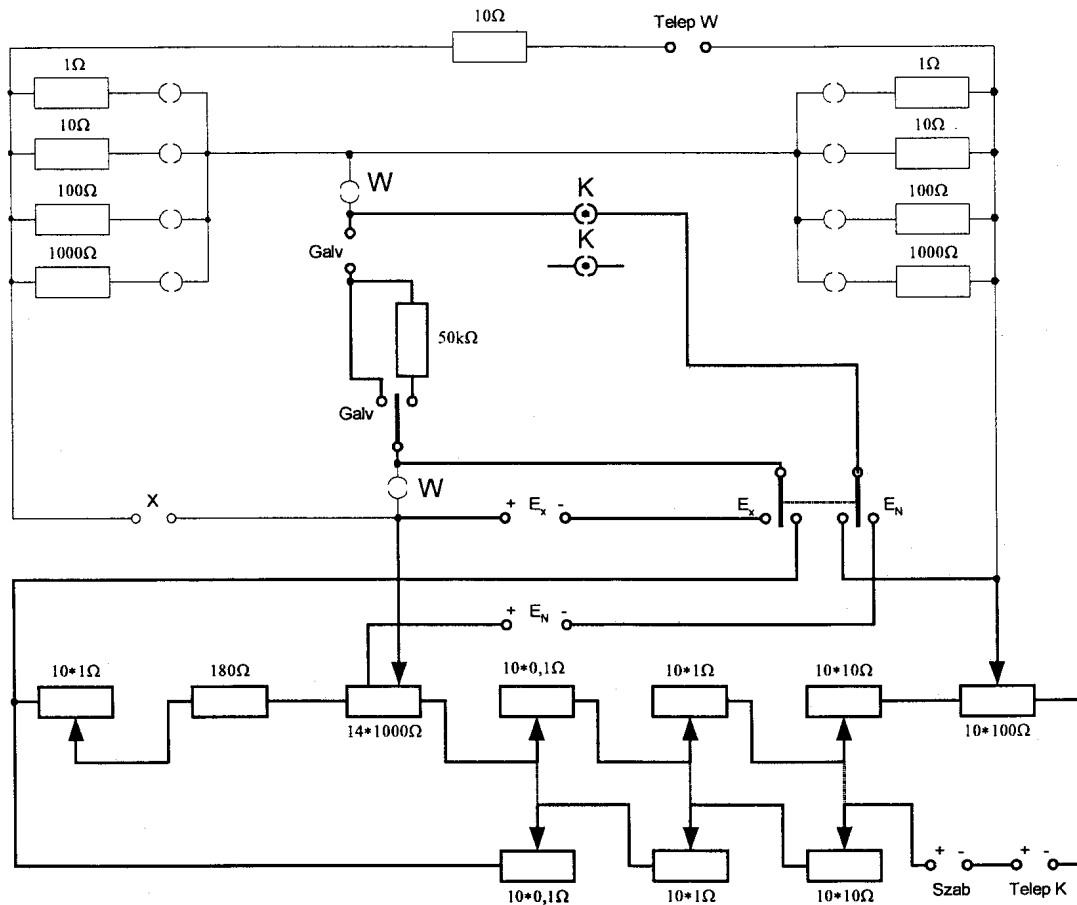
Zestaw podwójnej dekady Feussnera (rys.1.5b) zawiera 20 rezystorów o jednakowej rezystancji  $R$ . Rezystancja zestawu dekadowego, między zaciskami AB, ma wartość stałą, niezależnie od położenia podwójnego przełącznika. Można natomiast za pomocą przełącznika nastawiać skokowo rezystancję między zaciskami AC. Sposób włączenia podwójnej dekady Feussnera do układu kompensatora opisano w p.1.2.3

### 1.2.3 Opis kompensatora Feussnera firmy EKM

Na rys.1.5 przedstawiony jest uproszczony schemat ideowy kompensatora Feussnera węgierskiej firmy EKM stosowanego na stanowisku laboratoryjnym. Łatwo zauważyć, że urządzenie może również pracować jako mostek Wheatstone'a. Dla przejrzystości schematu elementy układu wchodzące w skład kompensatora na rysunku zaznaczono pogrubioną linią.

Kompensator ma rezystor kompensacyjny  $R_k$ , składający się z 5 dekad: dwóch dekad pojedynczych ( $14 \times 1000 \Omega$  i  $10 \times 100 \Omega$ ) oraz trzech dekad podwójnych ( $10 \times 10 \Omega$ ,  $10 \times 1 \Omega$  i  $10 \times 0,1 \Omega$ ). Rezystancja łączna rezystora kompensacyjnego  $R_k$  wynosi  $15111 \Omega$ . Znamionowy prąd roboczy ma wartość  $I_r = 0,1 \text{ mA} = 100 \mu\text{A}$ . Górna granica zakresu pomiarowego jest równa  $U_{zakr} = 100 \mu\text{A} \times 15111 \Omega = 1,5111 \text{ V}$ , jest więc tego samego rzędu co napięcie źródłowe (sem.) wzorcowego ogniwa Westona. Napięcie kompensujące nastawiane jest skokowo w stopniach co  $0,1 \text{ mV}$ . Duża rezystancja rezystora kompensacyjnego  $R_k$  i niewielki prąd roboczy (pomocniczy)  $I_r$  ułatwiają utrzymanie stabilności tego prądu.

Źródłem prądu roboczego  $I_r$  jest akumulator o napięciu  $6 \text{ V}$  dołączany z zewnątrz do zacisków „Telep”<sub>K</sub>. Regulację prądu roboczego przeprowadza się za pomocą rezystora wielodekadowego dołączanego do zacisków „Szab”.



Rys 1.6 Uproszczony schemat ideowy kompensatora Feussnera węgierskiej firmy EKM

Wymaganą wartość prądu roboczego  $I_r = 100 \mu\text{A}$  ustawia się metodą kompensacyjną poprzez porównanie spadku napięcia  $U_N = I_r \times R_N$  z wartością sem. ogniwa wzorcowego dołączonego do zacisków  $E_N$ .

Na rezystor wzorcowy  $R_N$ , ze względów oszczędnościowych, wykorzystano część dekady kompensacyjnej  $14 \times 1000 \Omega$ , wykonując odpowiedni odczep, niezależny od położenia szczotki dekady. Dalsze składowe rezystora  $R_N$  to rezystor  $180 \Omega$  oraz tzw. „dekada temperaturowa”  $10 \times 1 \Omega$ .

Wskaźnikiem stanu kompensacji jest galwanometr magnetoelektryczny [1] dołączany z zewnątrz do zacisków „Galv” bezpośrednio lub poprzez zabezpieczający rezystor szeregowy  $50 \text{ k}\Omega$ . Kompensator firmy EKM posiada klasę dokładności 0,05.

## 1.2 Dokładność kompensatorów

### 1.2.1 Błąd systematyczny

Problem dokładności kompensatorów przeanalizujemy posługując się schematem przedstawionym na rys.1.3. Ponieważ w stanie kompensacji mierzona sem.  $E_x$  lub mierzone napięcie  $U_x = I_r R_k$ , to dokładność pomiaru zależy od dokładności rezystora  $R_k$  oraz dokładności ustawienia prądu  $I_r = E_N/R_N$ .

Jeżeli założymy, że sem. ogniwa Westona  $E_N = (1,0186 \pm 0,0001) \text{ V}$ , zaś rezystancja  $R_N = (10186 \pm 2) \Omega$ , to prąd roboczy  $I_r = (1 \pm 0,0003)10^{-4} \text{ A}$ . Prąd  $I_r$  będzie więc ustalony z dokładnością 0,03 %. Można przyjąć, że dokładność rezystorów kompensacyjnych  $R_k$  jest rzędu 0,02 %.

Zakładając, że rezystancje styków przełączników są rzędu  $10^{-3} \Omega$ , to na każdym styku może powstać spadek napięcia rzędu  $10^{-7} \text{ V}$ , co jest do pominięcia jeżeli mierzone napięcia są większe od  $10^{-2} \text{ V}$ .

Jeżeli nie są znane znaki błędów systematycznych, to jako kryterium błędu systematycznego kompensatora można przyjąć względny błąd graniczny  $\gamma_g$ , który jest określony zależnością

$$\gamma_g = \left| \frac{\Delta E_N}{E_N} \right| + \left| \frac{\Delta R_N}{R_N} \right| + \left| \frac{\Delta R_k}{R_k} \right|, \quad (1.2)$$

gdzie:  $\Delta E_N$ ,  $\Delta R_N$ ,  $\Delta R_k$  – błędy bezwzględne odpowiednio ogniwa wzorcowego, rezystora  $R_N$  i rezystora  $R_k$ .

Błąd ten nie może być przekroczony, gdyż przy obliczeniu przyjmuje się, że wszystkie jego składowe sumują się arytmetycznie. Błąd graniczny wystąpiłby w najmniej korzystnym, i mało prawdopodobnym, przypadku. Dlatego bliższe rzeczywistości oszacowanie daje geometryczne sumowanie błędów składowych.

Szacowanie błędu granicznego według wzoru (1.2) jest kłopotliwe ze względu na nieznaną wartość błędów składowych w konkretnym urządzeniu. Dlatego producenci kompensatorów podają wzory umożliwiające oszacowanie granicznego błędu pomiaru dokonanego konkretnym typem kompensatora. Na przykład dla kompensatora używanego w ćwiczeniu należy stosować wzór:

$$\gamma_g = \frac{a}{100} U + 0,5 U_{\min} \quad (1.3)$$

gdzie:  $a$  – klasa kompensatora,  $U$  – wskazanie kompensatora w woltach,  $U_{\min}$  – wartość napięcia jednego stopnia najmłodszej dekady w woltach.

### 1.2.2 Błąd nieczułości

Czułość kompensatora  $S$  jest określona wzorem (1.4) jako stosunek elementarnego, zauważalnego prądu galwanometru  $\Delta I_g$  do wywołującego ten prąd przyrostu  $\Delta U_x$  napięcia mierzonego  $U_x$

$$S = \frac{\Delta I_g}{\Delta U_x}. \quad (1.4)$$

Jest oczywistym, że elementarny, zauważalny prąd [3] jest odwrotnie proporcjonalny do zastępczej rezystancji kompensatora  $R_z = R_g + R_{wx} + R'_k$ , tzn.

$$\Delta I_g = \frac{\Delta U_x}{R_g + R_{wx} + R'_k}, \quad (1.5)$$

gdzie:  $R_g$  – rezystancja galwanometru,

$R_{wx}$  – rezystancja wewnętrzna źródła napięcia mierzonego,

$R'_k$  – rezystancja zastępcza kompensatora.

Podstawiając (1.5) do (1.4) otrzymujemy, że

$$S = \frac{1}{R_g + R_{wx} + R'_k}. \quad (1.6)$$

Z wzoru (1.6) wynika, że czułość kompensatora rośnie wraz ze zmniejszaniem wszystkich składowych rezystancji  $R_z$ . Właśnie dlatego wyżej twierdziliśmy, że kompensatory o małej rezystancji wewnętrznej mają większą czułość niż kompensatory o dużej rezystancji wewnętrznej.

Rezystancje  $R_g$  i  $R_{wx}$  są dla konkretnego przypadku stałe; rezystancja  $R'_k$  ulega zmianie w zależności od położenia dekad kompensatora tj., w konkretnej sytuacji, zależy od wartości mierzonego napięcia. Charakter tych zmian zależy od schematu kompensatora [3].

Skończona wartość czułości jest przyczyną obecności błędu nieczułości kompensatora, którego wartość względną  $\gamma_s$  można oszacować [3] z wzoru:

$$\gamma_s = \Delta\alpha_g c_i \frac{R_g + R_{wx} + \frac{R'_k(R_z - R'_k)}{R_z}}{U_x}, \quad (1.7)$$

gdzie:  $\Delta\alpha_g$  - postrzegalne (minimalne) odchylenie galwanometru w praktyce przyjmowane jako 0,1 działki,  $c_i$  – stała galwanometru.

Szczegółowa analiza wzoru (1.7) prowadzi do wniosku, że względny błąd nieczułości maleje gdy:

- zmniejsza się  $\Delta\alpha_g$ ,
- zmniejsza się stała  $c_i$  galwanometru a więc rośnie jego czułość,
- rośnie wartość mierzonego napięcia  $U_x$ .

Błąd nieczułości kompensatora, dla konkretnej sytuacji pomiarowej, można wyznaczyć doświadczalnie równoważąc układ tak by  $U_k = U_x$  a następnie rozstrajając go o wartość  $\Delta U_k$ , powodującą zauważalne odchylenie galwanometru, np. o 0,1 działki. Wtedy wartość doświadczalną błędu czułości  $\gamma_{sd}$  oblicza się z zależności

$$\gamma_{sd} = \frac{\Delta U_k}{U_k}. \quad (1.8)$$

Błąd nieczułości występuje przy pomiarach kompensatorem dwukrotnie, raz przy nastawianiu prądu roboczego  $I_r$ , a drugi raz przy określaniu wartości napięcia  $U_x$ . W prawidłowo zbudowanym kompensatorze błąd nieczułości powinien być dziesięciokrotnie mniejszy od sumy pozostałych błędów. Wtedy można przyjąć, że nie wpływa on odczuwalnie na dokładność pomiaru.

### 1.2.3 Błędy przypadkowe

Obecność błędów przypadkowych w pomiarach kompensatorem dostrzega się otrzymując, przy wielokrotnym powtórzeniu pomiaru, odczyty różniące się między sobą ostatnimi znaczącymi cyframi. Błędy przypadkowe występują tym wyraźniej im większa jest czułość kompensatora. Źródłem błędów przypadkowych jest zmienna rezystancja styków poszczególnych dekad, powstające na stykach przy pocieraniu napięciem, szumy rezystorów, siły termoelektryczne itp. Szacowanie błędów przypadkowych odbywa się znanymi z teorii błędów i teorii niepewności pomiarów, metodami statystycznymi[1].

## 1.3 Pomiary kompensatorem

Kompensatory są kosztownymi przyrządami o dużej dokładności, dlatego też należy się nimi posługiwać w rozważny sposób. Właściwe wykorzystanie kompensatora uwarunkowane jest przestrzeganiem następujących zasad:

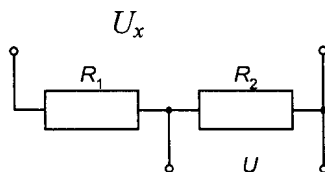
- kompensatory powinny pracować w urządzeniach połączonych na stałe,
- pierwsze próbne włączenie galwanometru przy kompensacji powinno odbywać się przez szeregowy rezystor ok. 10 k $\Omega$ ; włączenie powinno trwać jak najkrócej; rezystor można zewrzeć gdy odchylenie galwanometru jest małe,
- po odłączeniu źródła prądu roboczego nie należy zmieniać nastawienia rezystora służącego do regulacji tego prądu,
- przed pomiarem należy ustalić przybliżoną wartość mierzonego napięcia i nastawić odpowiednie rezystory dekady kompensacyjnej,
- po wykonaniu pomiaru należy sprawdzić wartość prądu roboczego.



### 1.3.1 Pomiary siły elektromotorycznej i napięcia

Napięcie  $U_x$  o wartości nie przekraczającej zakresu kompensatora dołącza się bezpośrednio do zacisków  $E_x$  kompensatora. Graniczny błąd pomiaru oblicza się korzystając z wzoru (1.3).

Podwyższenie górnej granicy zakresu pomiarów wymaga zastosowania rezystancyjnego dzielnika napięcia (rys.1.7).



Rys. 1.7 Układ rezystancyjnego dzielnika napięcia

Łatwo wykazać, wykorzystując oznaczenia zamieszczone na rys.1.7, że przy braku obciążenia dzielnika - gwarantuje to kompensator jako „doskonały woltomierz” nie pobierający prądu ze źródła mierzonego - prawdziwy jest wzór:

$$U_x = \frac{R_1 + R_2}{R_2} U, \quad (1.9)$$

przy czym  $K = \frac{R_1 + R_2}{R_2}$  jest przekładnią dzielnika. Mnożąc wynik pomiaru  $U$  przez przekładnię otrzymuje się wartość napięcia mierzonego  $U_x$ .

Zastosowanie dzielnika napięcia ma tę wadę, że prąd ze źródła mierzonego jest pobierany również w chwili kompensacji. Kompensator z dzielnikiem napięcia nie może więc służyć do pomiarów sił elektromotorycznych.

Przy pomiarach z dzielnikiem należy się liczyć z pewnym zmniejszeniem dokładności ze względu na błąd  $\gamma_k$  wywołany niedotrzymaniem znamionowej wartości przekładni, tak więc

$$\gamma_{U_x} = \gamma_g + \gamma_k. \quad (1.10)$$

W dobrze wykonanych dzielnikach rezystancyjnych błąd przekładni nie przekracza 0,02%.

### 1.3.2 Pomiary prądu

Pomiaru prądu  $I_x$  dokonuje się poprzez pomiar kompensatorem napięcia  $U$  na rezystorze wzorcowym  $R_w$ , przez który przepływa ten prąd. Wartość prądu wyznacza się z równania

$$I_x = \frac{U}{R_w}. \quad (1.11)$$

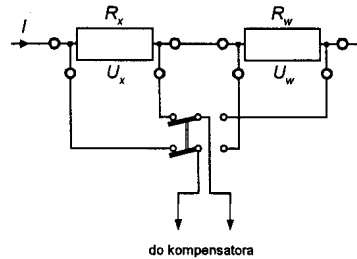
Zastosowanie rezystora wzorcowego jest źródłem dodatkowego błędu pomiaru  $\gamma_{R_w}$  związanego z dokładnością tego rezystora, tak więc

$$\gamma_{I_x} = \gamma_g + \gamma_{R_w}. \quad (1.12)$$

Błąd dobrych rezystorów wzorcowych nie przekracza 0,01%. Pomiar będzie najdokładniejszy gdy dobierze się rezystor wzorcowy o takiej wartości by wartość spadku napięcia wywołanego przez mierzony prąd był bliski górnej granicy zakresu pomiarowego kompensatora. Przy wyborze rezystora wzorcowego należy zwrócić uwagę by wydzielana w nim moc nie przekraczała mocy dopuszczalnej.

### 1.3.3 Pomiar rezystancji

Rezystancję mierzy się przez pomiar kompensatorem (rys.1.8) napięcia  $U_x$  na rezystorze badanym  $R_x$  i napięcia  $U_w$  na rezystorze wzorcowym  $R_w$  przy tym samym prądzie  $I$  w obu rezystorach.



Rys.1.8 Idea pomiaru rezystancji za pomocą kompensatora

Zakładając, że kompensator jako „doskonały woltmierz” podczas pomiaru napięć nie bocznikuje rezystorów, możemy napisać następującą zależność wynikającą ze stałości prądu  $I$ .

$$R_x = R_w \frac{U_x}{U_w}. \quad (1.13)$$

Największy możliwy błąd pomiaru oblicza się z wzoru

$$\gamma_{R_x} = \gamma_{R_w} + \gamma_{U_x} + \gamma_{U_w}. \quad (1.14)$$

Pomiar jest najdokładniejszy, gdy  $R_x \cong R_w$ . wówczas bowiem  $U_x \cong U_w$  i błędy pomiaru napięć  $\gamma_{U_x}$  i  $\gamma_{U_w}$  się kompensują [2].

### 1.3.4 Sprawdzanie ogniów wzorcowych

Sprawdzanie ogniwa wzorcowego polega na wyznaczeniu jego napięcia źródłowego (sem.) i rezystancji wewnętrznej przy znamionowej temperaturze otoczenia. Kompensatorowe pomiary napięcia źródłowego dokonywane są zwykle [3] metodą podstawieniową lub metodą różnicową.

Pomiar metodą różnicową polega na wyznaczeniu za pomocą kompensatora różnicy  $\mathfrak{R}$  napięć źródłowych, ogniwa sprawdzanego  $E_{Nx}$  i ogniwa wzorca  $E_{Nw}$ , włączonych szeregowo przeciwsośnie. Wartość rzeczywistą napięcia źródłowego ogniwa sprawdzanego oblicza się wówczas z wzoru:

$$E_{Nx} = E_{Nw} + \mathfrak{R}. \quad (1.15)$$

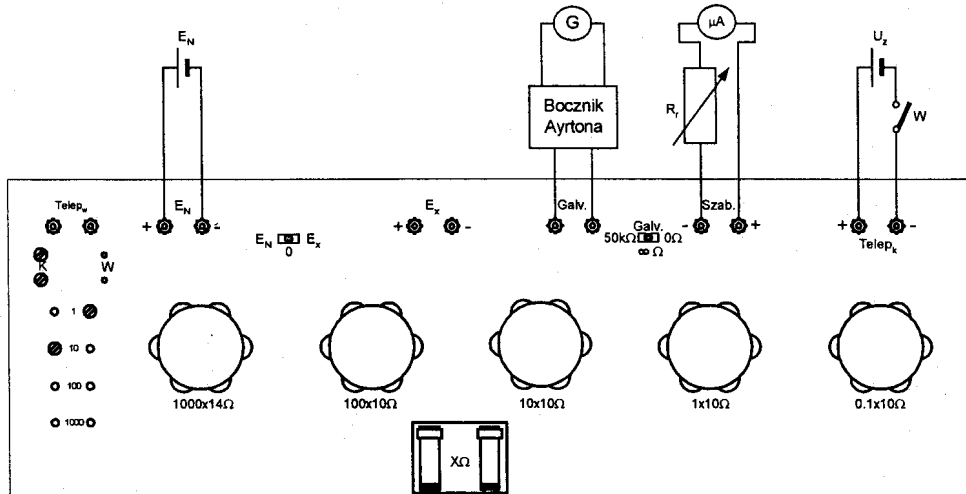
Przy pomiarach metodą podstawieniową wyznacza się najpierw, za pomocą kompensatora, napięcie źródłowe  $W_x$  ogniwa sprawdzanego  $E_{Nx}$  a następnie napięcie źródłowe  $W_w$  ogniwa wzorcowego  $E_{Nw}$ . Różnicę wskazań kompensatora dodaje się następnie, z zachowaniem znaku, do napięcia ogniwa wzorca. W tym przypadku rzeczywistą wartość napięcia źródłowego ogniwa sprawdzanego oblicza się z wzoru:

$$E_{Nx} = E_{Nw} + W_x - W_w \quad (1.16)$$

Ponieważ w obydwu przypadkach uzyskiwane pomiarowo różnice są bardzo małe w stosunku do napięcia źródłowego ogniwa sprawdzanego to wpływ błędu kompensatora (głównie rezystora  $R_k$ ) na wynik pomiaru jest pomijalnie mały. Ponadto nie jest uwzględniany błąd rezystora  $R_N$ .

## 2. OPIS STANOWISKA LABORATORYJNEGO

Najważniejszym przyrządem na stanowisku laboratoryjnym jest dwufunkcyjny przyrząd EKM skonfigurowany (kołki w gniazdach K) do pracy w układzie kompensatora Feussnera, którego płytę czołową schematycznie przedstawiono na rys.2.1.



Rys. 2.1 Widok płyty czołowej kompensatora Feussnera węgierskiej firmy EKM

Źródłem  $U_z$  prądu roboczego kompensatora jest akumulator EUROPOWER typu EP12-6 o napięciu 6 V i pojemności 12 Ah, dołączony do zacisków „Telep<sub>K</sub>”.

Prąd roboczy kompensatora jest wstępnie kontrolowany za pomocą magnetoelektrycznego mikroamperomierza  $\mu A$  o zakresie  $0 \div 750 \mu A$ . Do regulacji prądu roboczego służy 6 dekadowy rezystor  $R_r$  typu DR-6a-16 o skoku najniższej dekady równym  $0,1 \Omega$ . Rezystor  $R_r$  i mikroamperomierz  $\mu A$  dołączone są do zacisków „Szab”.

Precyzyjne nastawienie prądu roboczego na wartość  $100 \mu A$  odbywa się metodą kompensacyjną z wykorzystaniem nasyconego ogniwa Westona  $E_N$  typ H $\Theta$ -65 klasy 0,005.

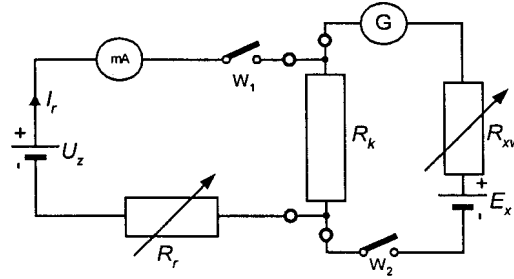
W charakterze detektora stanu kompensacji zastosowano galwanometr G firmy ERA typ GL-1, dołączony do zacisków „Galv” poprzez bocznik Ayrtona typu RG-15. Stała prądowa galwanometru  $c_i = (1,97 \div 5,22) \cdot 10^{-9} A/dz$ , rezystancja  $R_g = 1317 \Omega$ , zaś rezystancja krytyczna  $R_{k,r} = (18000 \div 1460) \Omega$ .

Ponadto na stanowisku laboratoryjnym znajdują się rezystory wzorcowe  $R_w$  typu RN-1 o wartościach rezystancji  $0,1 \Omega$ ,  $1 \Omega$  i  $10 \Omega$ , wielozakresowy dzielnik napięcia, wielozakresowy miliamperomierz magnetoelektryczny typ LM-3, bateria  $E_x$  o napięciu 4,5 V typu 3R12, galwanometr firmy NORMA czułości  $1,5 \times 10^{-6} A/dz$  i rezystancji wewnętrznej  $R_g = 780 \Omega$ , a także wyłączniki jednobiegunowe W, przełącznik dwubiegunowy P oraz nasycone ogniwo normalne Westona  $E_{N_x}$ .

## 3.ZADANIA POMIAROWE

### 3.1 Pomiary sem. ogniwa kompensatorem o regulowanym prądzie roboczym

**3.1.1** Połączyć układ pomiarowy zgodnie z rys, 3.1. Obiektem pomiaru jest sem.  $E_x$  baterii 3R12 o napięciu ok. 4,5 V. Źródłem  $U_z$  prądu roboczego jest akumulator EP12-6 o napięciu ok. 6 V. W charakterze rezystora kompensacyjnego  $R_k$  zastosować (wybrać) jeden z rezystorów wzorcowych (normalnych) dostępnych na stanowisku laboratoryjnym. Wskaźnikiem stanu kompensacji jest galwanometr firmy NORMA.



Rys. 3.1 Laboracyjny układ kompensatora napięcia o regulowanym prądzie roboczym.

- 3.1.2** a) Dobrać rezystor  $R_k$  i nastawę  $R_r$  (rezystor 6 dekadowy) tak by wartość napięcia  $U_k$  na rezystorze  $R_k$  była w granicach  $\pm 10\%$  wartości mierzonej  $E_x$  i załączyć wyłącznik  $W_1$ .
- b) Nastawić maksymalną wartość rezystora  $R_{xw}$  (symulującego w układzie rezystancję wewnętrzną ogniwa badanego) i zamknąć wyłącznik  $W_2$ .
- c) Poprzez regulację  $R_r$  doprowadzić do stanu kompensacji (zerowe wskazanie galwanometru G) stopniowo zmniejszając do zera nastawę rezystora  $R_{xw}$ .
- d) Wyznaczyć doświadczalny błąd nieczułości  $\gamma_{sd}$  zgodnie z wzorem (1.8).
- e) Obliczyć wartość mierzonej sem. ogniwa  $E_x$

$$E_x = I_r R_k$$

oraz graniczny błąd pomiaru

$$\gamma_{E_x} = \gamma_{I_r} + \gamma_{R_k} + \gamma_{sd}$$

i zapisać wynik pomiaru uwzględniając zasady zaokrąglania błędów i wyniku pomiaru.

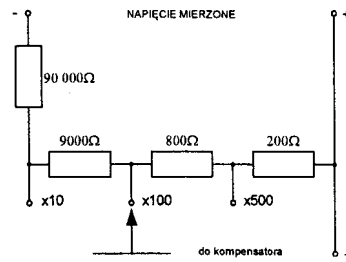
- 3.1.3** Zbadać wpływ rezystancji wewnętrznej  $R_{wewn.}$  mierzonego źródła  $E_x$  na błąd nieczułości doświadczalnej  $\gamma_{sd}$  kompensatora. Zmienną rezystancję wewnętrzną ogniwa  $E_x$  symulować przez różne nastawy rezystora dekadowego  $R_{xw}$ . Wyniki badań przedstawić w odpowiednio przygotowanej tabeli oraz na wykresie  $\gamma_{sd} = f(R_{wewn.})$ . Ocenić przydatność metody kompensacyjnej do pomiarów sem. źródeł o dużej rezystancji wewnętrznej.
- 3.1.4** Zbadać wpływ wartości rezystancji wewnętrznej rezystora kompensacyjnego  $R_k$  na błąd nieczułości doświadczalnej  $\gamma_{sd}$  kompensatora. Zmienną rezystancję  $R_k$  uzyskiwać włączając do układu różne, znajdujące się na stanowisku laboratoryjnym, rezystory wzorcowe. Wyniki badań przedstawić w odpowiednio przygotowanej tabeli oraz na wykresie  $\gamma_{sd} = f(R_k)$ .

### 3.2 Pomiary kompensatorem o stałym prądzie roboczym

Do pomiarów stosuje się kompensator EKM opisany w p.2 wraz z elementami uzupełniającymi przedstawionymi na rys 2.1.

#### 3.2.1 Pomiary siły elektromotorycznej kompensatorem o stałym prądzie roboczym

Obiektem pomiaru jest bateria 3R12 o napięciu ok. 4,5 V. Ponieważ napięcie zakresowe kompensatora wynosi 1,5111 V (p.1.2.3), badana bateria do zacisków  $E_x$  kompensatora jest dołączana poprzez wysokomowy dzielnik napięcia (rys.3.2).



Rys. 3.2 Schemat wysokoomowego dzielnika napięcia

Obliczyć prąd, którym obciążony używany na stanowisku dzielnik napięcia badane ogniwo, dołączone do zacisków NAPIĘCIE MIERZONE i ocenić przydatność metody do pomiaru sem. tego ogniwa.

#### Nastawianie prądu roboczego

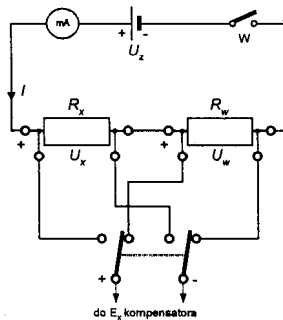
- Połączyć układ pomiarowy zgodnie ze schematem przedstawionym na rys.2.1 utrzymując:
  - otwarty wyłącznik W,
  - nastawę przełącznika  $E_N/E_x$  w pozycji „0”,
  - nastawę przełącznika „Galv” w pozycji „∞”,
  - nastawę rezystora  $R_r$  na wartość maksymalną,
  - nastawę bocznika Ayrtona na wartość  $1 \times 10^{-6}$ .
- Załączyć wyłącznik W i poprzez ostrożne zmniejszanie nastawy  $R_r$  ustawić przybliżoną wartość prądu roboczego ( $100 \mu\text{A}$ ), odczytując wskazania mikroamperomierza  $\mu\text{A}$ .
- Przełączyć przełącznik  $E_N/E_x$  w pozycję  $E_N$  oraz przełącznik „Galv” w pozycję  $50 \text{ k}\Omega$  i stopniowo, zmieniając nastawy bocznika Ayrtona, doregulowywać rezystorem  $R_r$  prąd roboczy tak by uzyskać zerowe wskazanie galwanometru przy największej czułości.
- Przełączyć przełącznik „Galv” w pozycję „0” i skorygować w razie potrzeby prąd roboczy by upewnić się, że jego wartość wynosi dokładnie  $100 \mu\text{A}$ .

#### Realizacja pomiaru

- Wybrać przekładnię dzielnika napięcia o takiej wartości by na jego zaciskach wyjściowych było napięcie o wartości najbliższej napięciu zakresowemu kompensatora.
- Połączyć zaciski wyjściowe dzielnika napięcia zaciskami  $E_x$  kompensatora.
- Nastawić na dekadach kompensatora wartość napięcia w przybliżeniu równą spodziewanej wartości napięcia wyjściowego dzielnika napięcia.
- Zminimalizować czułość wskaźnika stanu kompensacji (przełącznik „Galv” w pozycji  $50 \text{ k}\Omega$ , bocznik Ayrtona w pozycji  $1 \times 10^{-6}$ ).
- Przełączyć przełącznik  $E_N/E_x$  w pozycję  $E_x$  i stopniowo zwiększając czułość wskaźnika stanu kompensacji, w sposób opisany w p. 3.2.1, zmieniać nastawy dekad kompensatora aż do uzyskania zerowego wskazania galwanometru przy najwyższej czułości.
- Zanotować wskazanie kompensatora  $U_{kx}$ .
- Wyznaczyć i zanotować błąd nieczułości doświadczalnej  $\gamma_{sd}$ .
- Skontrolować stałość prądu roboczego poprzez przełączenie przełącznika  $E_N/E_x$  w pozycję  $E_N$  i stwierdzenie stanu kompensacji. W przypadku stwierdzenia zmiany prądu roboczego należy skorygować jego wartość i powtórzyć pomiar. Obliczyć błąd graniczny pomiaru uwzględniając błąd  $\gamma_g$  wynikający z klasy kompensatora, błąd nieczułości doświadczalnej  $\gamma_{sd}$  i błąd przekładni  $\gamma_K$  dzielnika napięcia. Zapisać wynik pomiaru uwzględniając zasady zaokrąglania błędów i wyniku pomiaru.

### 3.2.2 Pomiary rezystancji kompensatorem o stałym prądzie roboczym

- a) Połączyć układ pomiarowy zgodnie ze schematem przedstawionym na rys.3.3 wybierając rezystor wzorcowy  $R_w$  o wartości rezystancji zbliżonej do wartości rezystancji rezystora mierzonego  $R_x$ , wybranego spośród dostępnych na stanowisku laboratoryjnym. Wartość napięcia źródła  $U_z$  powinna być taka by prąd  $I$  wytwarzał na rezystorach  $R_x$  i  $R_w$  spadki napięć  $U_x$  i  $U_w$  o wartościach zbliżonych do wartości napięcia zakresowego kompensatora. Oczywiście wartość prąd  $I$  nie może przekraczać wartości dopuszczalnej dla rezystorów  $R_x$  i  $R_w$ .



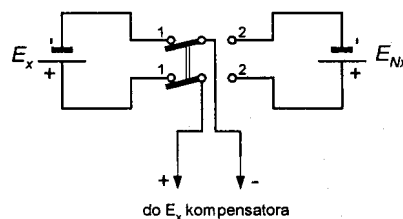
Rys.3.3 Układ do pomiaru rezystancji za pomocą kompensatora

- b) Nastawić prąd roboczy kompensatora postępując zgodnie z procedurą omówioną w p. 3.2.1.  
 c) Zmierzyć kompensatorem napięcia  $U_x$  i  $U_w$  przestrzegając zasad przedstawionych w p 3.2.2.  
 d) Obliczyć wynik pomiaru korzystając z wzoru (1.13).  
 e) Obliczyć błąd pomiaru korzystając z wzoru (1.14) przy wykorzystaniu wzoru (1.3) oraz faktu, że błąd nieczułości, ze względu na pomiary dwóch napięć, powinien być podwojony.

Zapisać wynik pomiaru uwzględniając zasady zaokrąglania błędu i wyniku pomiaru.

### 3.2.3 Sprawdzanie ogniwa wzorcowego

Zmierzyć napięcie źródłowe (sem.)  $E_{Nx}$  ogniwa Westona metodą podstawieniową uzupełniając układ kompensator z rys.2.1 układem połączeń przedstawionym na rys.3.4.



Rys. 3.4 Układ do pomiaru napięcia źródłowego ogniwa wzorcowego metodą podstawieniową

Kolejność czynności podczas wykonywania pomiaru powinna być następująca:

- na podstawie wskazań mikroamperomierza  $\mu A$  ustawić prąd roboczy kompensatora na przybliżoną wartość równą  $100 \mu A$  aktualizując nastawy przełącznika  $E_N/E_x$  oraz „Galv” rezystora  $R_f$  oraz bocznika Ayrtona na pozycje określone w p.3.2.1,
- na dekadach kompensatora nastawić wskazanie odpowiadające aktualnej wartości napięcia źródłowego ogniwa wzorcowego  $E_{Nw}$ ,
- do zacisków  $E_x$  kompensatora dołączyć ogniwo wzorcowe  $E_{Nw}$  (przełącznik dwubiegunowy na rys.3.4 w pozycji 2-2),
- przełączyć przełącznik  $E_N/E_x$  kompensatora w pozycję  $E_x$ ,

- przełączyć przełącznik „Galv” w pozycję 50 kΩ stopniowo zwiększając czułość wskaźnika kompensacji (zmiana nastawy bocznika Ayrtona) regulować rezystorem  $R_r$  aż do uzyskania stanu kompensacji przy najwyższej czułości,
- odczytać i zanotować nastawę dekad kompensatora  $W_w$ ,
- do zacisków  $E_x$  kompensatora dołączyć ogniwo badane  $E_{Nx}$  (przełącznik dwubiegunowy na rys.3.4 w pozycji 1-1),
- zmieniać nastawy dekad kompensatora aż do uzyskania stanu kompensacji przy najwyższej czułości,
- odczytać i zanotować nastawę dekad kompensatora  $W_x$ .

Korzystając z wzoru (1.16) obliczyć wartość napięcia źródłowego  $E_{Nx}$  ogniwa badanego. Wykonać pomiary wielokrotne mające w celu wyjawienia i oszacowania błędów przypadkowych i niepewność wyniku. Przed każdym kolejnym pomiarem sprawdzać i korygować ewentualne zmiany prądu roboczego. Wyniki pomiarów i cząstkowych obliczeń zamieścić w tabeli 1.

Tabela 1

Lp.	$W_{wi}$	$W_{xi}$	$E_{Nxi}$	$E_{Nxi} - E_{Nxi\bar{r}}$	$(E_{Nxi} - E_{Nxi\bar{r}})^2$
	V	V	V	V	V <sup>2</sup>
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					

### Wzory umożliwiające obliczenie niepewności pomiaru

Wartość napięcia źródłowego w i-tym pomiarze

$$E_{Nxi} = E_{Nw} + W_{xi} - W_{wi}.$$

Wartość średnia napięcia źródłowego z  $n$  pomiarów

$$E_{Nxi\bar{r}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_{Nxi}.$$

Niepewność standardowa typu A

$$u_A = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (E_{Nxi} - E_{Nxi\bar{r}})^2}.$$

Niepewność standardowa typu B

$$u_B = \frac{\gamma_g E_{Nxi\bar{r}}}{100\sqrt{3}},$$

gdzie  $\gamma_g$  - względny błąd graniczny kompensatora.

Niepewność standardowa łączna

$$u_r = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}.$$

Niepewność całkowita

$$u_{\tau} = k_{\alpha} u_{\tau},$$

gdzie  $k_{\alpha}$  - współczynnik rozszerzenia zależny od poziomu ufności.

Wartość mierzonego napięcia źródłowego

$$E_{Nx} = E_{Nx\dot{x}} \pm u_{\tau}.$$

Podać przykłady obliczeń wyżej podanych parametrów.

#### 4. WYKONANIE SPRAWOZDANIA

W sprawozdaniu należy zamieścić:

- schematy połączeń układów pomiarowych,
- charakterystykę metrologiczną użytej w poszczególnych układach aparatury,
- wzory niezbędne do przeprowadzenia obliczeń,
- krótki opis postępowania przy wykonywaniu poszczególnych pomiarów,
- tabele z cząstkowymi wynikami pomiarów oraz wynikami obliczeń uzupełnione przykładami ilustrującymi sposób dokonywania tych obliczeń,
- wyniki pomiarów wraz z oszacowaniem ich błędów lub niepewności,
- uzyskane w wyniku pomiarów wykresy i charakterystyki wraz ze zwięzłą ich interpretacją,
- uwagi i wnioski dotyczące wykonanych pomiarów.

#### Literatura

- [1] Lebson S. Podstawy miernictwa elektrycznego, WNT, Warszawa 1972 r.  
 [2] Lebson S., Szczepaniak Cz., Kompensatory prądu stałego, WNT, Warszawa 1972 r.  
 [3] Karandziejew M., Pomiarы elektryczne metodami mostkowymi i kompensacyjnymi, WNT, Warszawa 1969 r.

#### Pytania i zadania

1. Jakie są podstawowe typy kompensatorów napięcia stałego i jakie są ich najważniejsze cechy?
2. Czy jest uwarunkowana dokładność pomiaru kompensatorem o stałym prądzie a czym kompensatorem o stałej rezystancji?
3. Według jakich kryteriów dobiera się galwanometr do układu kompensacyjnego?
4. W jaki sposób zabezpiecza się galwanometr w układach kompensatorów napięciowych?
5. Co to jest czułość kompensatora i od czego ona zależy?
6. W jaki sposób można wyznaczyć doświadczalny błąd nieczułości kompensatora
7. W jaki sposób i na jaką wartość ustala się prąd roboczy kompensatora Feussnera?
8. Jaki jest zakres pomiaru kompensatora Feussnera i czym jest on ograniczony?
9. Omówić technikę pomiarów napięcia źródłowego metodą podstawieniową kompensatorem Feussnera.
10. Obliczyć rezystancję zastępczą podwójnej dekady Rapsa z rys.1.4a).
11. Obliczyć zakres pomiarowy kompensatora stosowanego w ćwiczeniu wiedząc, że jego prąd roboczy wynosi 100  $\mu$ A.
12. Ocenić rezystancję wewnętrzną kompensatora stosowanego w ćwiczeniu podczas pomiarów napięcia 1,2 V wiedząc, że najmniejszy zauważalny prąd galwanometru wynosi 10 nA.
13. Przeanalizować wpływ nieczułości galwanometru na dokładność pomiaru sem. przyjmując, że najmniejszy zauważalny prąd galwanometru wynosi 10 nA, zaś jego rezystancja  $R_g = 200 \Omega$ .