# 2. ELLENÁLLÁSMÉRÉS, KOMPENZÁCIÓ

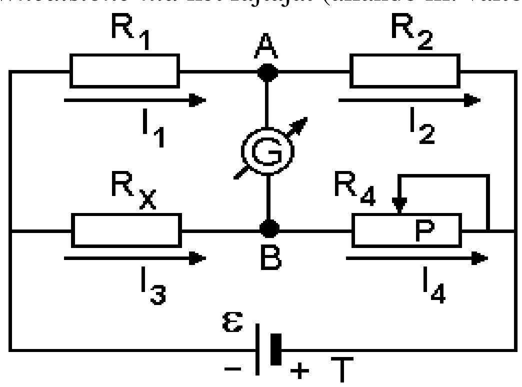
**Elméleti anyag:**
Potenciál, feszültség. Ohm-törvény. Ellenállások soros és párhuzamos eredője. Kirchhoff-törvények, áramkörszámítás. Telepek elektromotoros ereje, belső ellenállása, a kapocsfeszültség. Az elektromos teljesítmény. Hibaszámítás.

**A gyakorlat célja:**
A Wheatstone-hidas ellenállásmérés és a kompenzáció elvét használó feszültségmérés elvének megismerése és alkalmazása.

## 1. Ellenállásmérés

### 1.1 A Wheatstone-hidas ellenállásmérés elve

Egy ellenállás értékét mérhetjük úgy, hogy adott áramot vezetve át rajta, megmérjük, mekkora feszültség esik rajta. Ezzel a módszerrel határozzák meg az ellenállást általában az univerzális (volt-amper-ohm mérő) kézi mérőműszerek. Nagyobb mérési pontosságot tudunk azonban elérni mérőhidak alkalmazásával. Ezek közül a *Wheatstone-híd* két fajtáját (állandó ill. változó hídviszonyú) ismertetjük.




*1.1 ábra: Állandó hídviszonyú Wheatstone-híd*

Itt $R_1$, $R_2$ állandó ellenállások, $R_x$ az ismeretlen ellenállás, $R_4$ egy változtatható ellenállás, mely lehet potenciométer, helipot vagy dekádos ellenállásszekrény; T egy ε elektromotoros erejű feszültségforrás; G pedig galvanométer (nagy érzékenységű ampermérő), mely itt nullműszerként használatos.

A mérés úgy történik, hogy az $R_4$ ellenállást változtatva beállítjuk a **hídegyensúlyt**, azt az állapotot, amikor a galvanométer zérus áramot jelez. Mivel a galvanométer belső ellenállása véges, ebből következik, hogy az A,B pontok között a feszültség $U_{AB} = 0$, azaz az elektromos potenciál értéke azonos az A és B pontban. Az ellenállások közös (külső) pontjain szintén azonos a potenciál, így az $R_1$ és $R_x$ ellenállásokon ugyanaz a feszültség esik, és azonos lesz a feszültség az $R_2$ és $R_4$ ellenállásokon is. Az ellenállásokon eső feszültség az áramerősség és az ellenállás szorzata,

$$I_1 R_1 = I_3 R_x \quad \text{és} \quad I_2 R_2 = I_4 R_4 \,. \tag{1.1}$$

A galvanométeren azonban hídegyensúlynál nem folyik áram, ezért

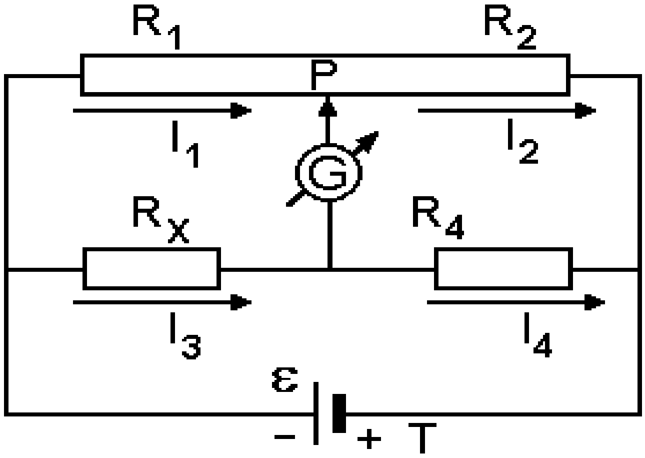
$$I_1 = I_2 \quad \text{és} \quad I_3 = I_4 \,. \tag{1.2}$$

Az (1.1) egyenleteket egymással osztva és (1.2)-t felhasználva, kapjuk:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_x}{R_4} = \alpha, \qquad R_x = \alpha R_4 \,. \tag{1.3}$$

Az $\alpha = R_1/R_2$ hányadost hídviszonynak nevezzük. Az 1.1 ábrán látható kapcsolásnál a hídegyensúly megkeresése közben az $R_1$, $R_2$ ellenállások nem változnak, ezért ezt a kapcsolást *állandó hídviszonyú Wheatstone-hídnak* nevezzük.

A következő ábrán látható Wheatstone-híd esetében $R_4$ állandó ellenállás, és $R_1 + R_2 = R_P$ , egy potenciométer vagy helipot ellenállása. A hídegyensúlyt a potenciométer csúszójának állításával keressük meg.




*1.2 ábra. Változó hídviszonyú Wheatstone-híd*

Ennél a kapcsolásnál is fennállnak az (1.1) - (1.3) egyenletek, de a hídviszony

$\alpha = R_1 / (R_P - R_1)$

változik a hídegyensúly beállításánál, ezért *változó hídviszonyú Wheatstone-hídról* beszélünk. Általában az állandó hídviszonyú kapcsolás tesz pontosabb ellenállásmérést lehetővé, ha $R_1$ és $R_2$ pontosan ismert értékű normálellenállások, $R_4$ pedig dekádos ellenállásszekrény.

A mérésnél 5 dekádos ellenállásszekrényt használunk, mellyel elvileg az ismeretlen ellenállás értéke is 5 jegy pontossággal mérhető a hídviszony megfelelő megválasztásával, amennyiben a galvanométer érzékenysége elegendő ahhoz, hogy az utolsó, legkisebb értékű dekád elállításánál is jelezze az A,B pontok között a hídban folyó áramot.

## 1.2. A Wheatstone-hidas ellenállásmérés érzékenysége

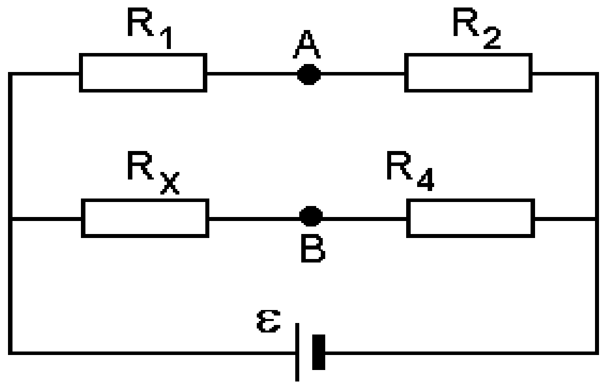
Egy mérőeszköz annál érzékenyebb, minél kisebb megváltozását érzékeli a mérendő mennyiségnek. A bevezető részben az érzékenységet úgy definiáltuk, hogy a mérőműszer 1 skálarészének illetve legkisebb kijelzett egységének megfelelő mért mennyiség reciproka. A Wheatstone-hídban szereplő műszer azonban csak a zérus áramerősségű állapot fennállását jelzi, és $R_x$ értékét a dekádos ellenállásszekrényen beállított ellenállásból határozzuk meg. Hogyan definiálhatjuk most a mérőeszköz (a híd) érzékenységét? Tegyük fel, hogy egy adott $R_x$ ellenállásnál a hidat kiegyensúlyoztuk, és az egyensúlyt valamilyen $R_4 = R_0$ értéknél kaptuk. Cseréljük ki most az $R_x$ ellenállást egy kissé különböző $R_x' = R_x(1 + \delta R_x)$ ellenállásra (ahol $\delta R_x$ $R_x$ relatív megváltozása, $\delta R_x = \Delta R_x/R_x$ ), de $R_4$-et ne változtassuk. Most a híd nincs egyensúlyban, tehát a galvanométeren áram folyik keresztül. Legyen ez az áramerősség $\Delta I_G$. A híd érzékenységét a következőképpen definiáljuk:

$$E = \lim_{\delta R_x \to 0} \left| \frac{\Delta I_G}{\delta R_x} \right| = \lim_{\Delta R_x \to 0} \left| R_x \frac{\Delta I_G}{\Delta R_x} \right| = \left| R_x \left. \frac{\partial I_G}{\partial R_x} \right|_{I_G = 0} \right| \qquad (1.4)$$

ahol az "$I_G$=0" feltétel azt jelenti, hogy a deriváltat a hídegyensúlyban kell kiszámítani.

A derivált számításához először ki kell fejeznünk a galvanométeren folyó áramerősséget $R_x$ függvényeként.

Legyen a galvanométer belső ellenállása $R_G$ (általában néhány 100 Ω) és válasszunk olyan feszültségforrást, melynek belső ellenállása elhanyagolható a körben lévő többi ellenálláshoz képest. A hurokmódszer helyett most célszerűbb a Thevenin-tétel alkalmazása (ld. 24. oldal):




*1.3 ábra. A Thevenin-tétel alkalmazásával helyettesítendő kétpólus*

Az A,B pontok között az áramkör helyettesíthető egy olyan $\varepsilon_h$ elektromotoros erejű és $R_b$ belső ellenállású teleppel, ahol $\varepsilon_h$ megegyezik az A,B pontok közötti üresjárási feszültséggel, és $R_b$ az eredő ellenállással, úgy, hogy az ideális feszültségforrást rövidzárral helyettesítjük:

$$\varepsilon_h = \frac{\varepsilon R_1}{R_1 + R_2} - \frac{\varepsilon R_x}{R_x + R_4}$$
$$R_b = R_1 \| R_2 \otimes R_x \| R_4 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + \frac{R_x R_4}{R_x + R_4} \tag{1.5}$$

Az A,B pontok közé kapcsolt galvanométeren folyó áram

$$I_G = \frac{\varepsilon}{R_b + R_G}, \tag{1.6}$$

melynek $R_x$ szerinti differenciálhányadosa (ponttal jelöljük)

$$\dot{I}_G = \frac{\dot{\varepsilon}_h\,(R_b + R_G) - \varepsilon_h\,\dot{R}_b}{\left(R_b + R_G\right)^2} \tag{1.7}$$

A differenciálhányadost a hídegyensúly esetére számítjuk, ekkor viszont $U_{AB} = 0$, tehát $\varepsilon_h = 0$. $\varepsilon_h$ deriváltja viszont

$$\dot{\varepsilon}_h = -\varepsilon \frac{R_4}{\left(R_x + R_4\right)^2},$$

vagyis

$$\dot{I}_G\Big|_{U_{AB}=0} = -\frac{\varepsilon \quad R_4}{\left(R_b + R_G\right)\left(R_x + R_4\right)^2},$$

és az érzékenység

$$E = \frac{\varepsilon R_4 R_x}{\left(R_b + R_G\right)\left(R_x + R_4\right)^2}\ . \tag{1.8}$$

Az érzékenység (1.8) kifejezése szimmetrikus $R_4$ és $R_x$-re, de akkor az eredeti (1.4) kifejezés is szimmetrikus:

$$E = \left| R_x \frac{\partial I_G}{\partial R_x}\Big|_{U_{AB}=0} \right| = \left| R_4 \frac{\partial I_G}{\partial R_4}\Big|_{U_{AB}=0} \right|. \tag{1.9}$$

Az (1.9) egyenlőség lehetőséget ad arra, hogy adott mérendő ellenállásnál megbecsüljük a mérés érzékenységét: a hídegyensúly beállítása után az ellenállásszekrényt néhány dekáddal elállítjuk ($\Delta R_4$) úgy, hogy legalább egy skálarésznyi kitérést kapjunk a galvanométeren. Ebből számoljuk ki az érzékenység becsült értékét:

$$E \approx R_4 \left| \frac{\Delta I_G}{\Delta R_4} \right| . \qquad (1.10)$$

Számítsuk ki az érzékenységet az (1.8) képlettel is, a hídviszony, ε, $R_1$ és $R_x$ ismeretében! Felhasználva, hogy $R_1/\alpha = R_2$ és $R_x/\alpha = R_4$,

$$R_b = \frac{R_1 + R_x}{\alpha + 1} \qquad \text{és}$$

$$E = \frac{\alpha \qquad \varepsilon}{(1+\alpha)^2 \left(R_b + R_G\right)} = \frac{\varepsilon \quad \alpha}{(\alpha+1)\left(R_1 + R_x + (\alpha+1) R_G\right)} . \qquad (1.11)$$

Az (1.11) képlet segítségével megbecsülhetjük, milyen hibát okoz az ellenállás mérésében a galvanométer leolvasási hibája, $\Delta I_G$. Az (1.4) képlet szerint

$$\Delta R_x \approx R_x \, \Delta I_G / E \qquad (1.12)$$

Ha lehetőség van többféle hídviszonnyal való mérésre, kiválaszthatjuk az optimálisat. Itt azonban azt is meg kell vizsgálnunk, hogy $R_4$ elég finoman változtatható-e ahhoz, hogy a galvanométer érzékenységét ki tudjuk használni. Mivel $\Delta R_x = \alpha\ \Delta R_4$, $\Delta R_x / \alpha$ nem lehet kisebb, mint a legkisebb ellenállásegység, amit $R_4$-en állítani tudunk.

## Példa

A Wheatstone-híd a következő alkatrészekből van felépítve:
- 10 Ω és 100 Ω -os normálellenállások (mint $R_1$ és $R_2$);
- 5 dekádos ellenállásszekrény, a legkisebb állítható ellenállás 0,1 Ω, minden dekádon 0-9 egység állítható (mint $R_4$);
- ε = 5 V elektromotoros erejű és elhanyagolható belső ellenállású telep;
- egy $R_G$ = 500 Ω belső ellenállású és 1skr/μA érzékenységű galvanométer;
- egy $R_x \approx$ 500 Ω értékű mérendő ellenállás.

Milyen hídviszonynál a legpontosabb a mérés?

A normálellenállásokkal előállítható hídviszonyokat, a hídegyensúlyban $R_4$ értékét, $\Delta R_x$-et és $\Delta R_4$-et a következő táblázatban foglaljuk össze, a galvanométer leolvasási hibáját 1 skálarésznek tekintve:

*I. táblázat: Az érzékenység és a mérés hibájának függése a hídviszonytól* ($R_x \approx$ 500 Ω)

| $R_1$ (Ω) | $R_2$ (Ω) | α | $R_4$ (Ω) | E (mA) | $\Delta R_x$ (Ω) | $\Delta R_x / \alpha$ (Ω) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 10 | 100 | 0,1 | 5000 | 0,43 | 1,17 | 11,7 |
| 100 | 100 | 1 | 500 | 1,56 | 0,32 | 0,32 |
| 100 | 10 | 10 | 50 | 0,75 | 0,67 | 0,067 |

Egyértelműen az α = 1 hídviszonnyal célszerű mérni, itt a legnagyobb az érzékenység és legkisebb a mérési hiba. Bár az ellenállásszekrénynek csak 4 dekádját használjuk ki, de az utolsó dekád (tized ohmok) állítására is érzékeny a galvanométer. Így $\Delta R_4 \approx$ 0,3 Ω, és ugyanennyi az ellenállásmérés hibája. α = 0,1-nél elvben minden dekád használható, de a tized ohmok és az ohmok állítására a galvanométer még nem érzékeny. $R_4$ hibája kb. 10 Ω, ennek megfelelően a mérés hibája kb. 1 Ω. Ha α = 10, az ellenállásszekrény dekádjaiból csak 3-at használunk ki, és a hídegyensúlytól $R_4$-et 0,1 Ω-mal elállítva, a galvanométer már több, mint egy skálarészt tér ki. A mérés hibáját most $R_4$ állításának hibája határozza meg, és nagyobb lesz, mint a táblázatban feltüntetett érték.

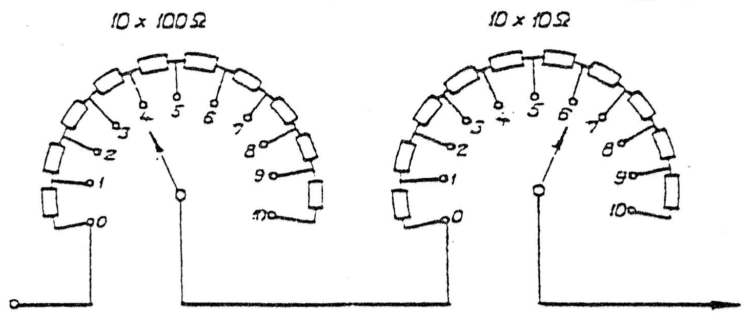
## 1.3. Eszközök

*- Hídviszony-doboz beépített ellenállásokkal*

A dobozban 3 pár (10 Ω-os, 100 Ω-os, 1000 Ω-os) ellenállás található, melyek egyik végpontja közös, és ez a közös végpont valamint az ellenállások másik végpontja ki van vezetve.

- *Forgókaros dekádos ellenállásszekrény* (1.4 ábra)

Nagyon pontos, változtatható ellenállás. 5 dekádot tartalmaz, mindegyiken 10 fokozatban (0-9) változtatható az ellenállás 0,1 Ω, 1 Ω, 10 Ω, 100 Ω, 1000 Ω-os lépésekben. Az ellenállás-szekrény két kivezetése között az ellenállás az egyes dekádokról leolvasott értékek összege.

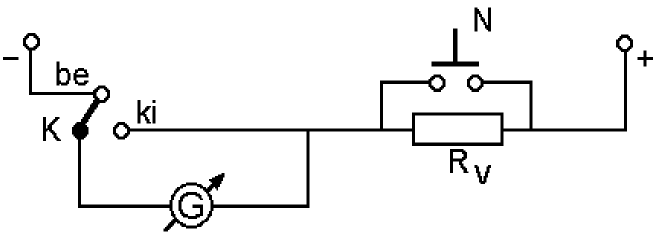



*1.4 ábra. Forgókaros ellenállásszekrény dekádjainak kapcsolása*

- *Egyenfeszültségű tápegység* (ε ≈ 5 V, a belső ellenállás néhány ohm)
- *Mérendő ellenállások*
- *Galvanométer*

Deprez-rendszerű műszer, μA nagyságrendű áramerősséget mér. Az érzékenység és a belső ellenállás értéke a számlapról leolvasható. A túláram ellen védőellenállással van ellátva, mely egy nyomógombbal kiiktatható (1.5 ábra).

A galvanométer mechanikai rázkódásokra és túlterhelésre egyaránt nagyon érzékeny műszer. Lengőtekercsének mechanikai csillapítása nagyon kicsi, és a túl nagy kitérésű lengések a műszert tönkre teszik. A mechanikai behatások ellen úgy védjük a galvanométert, hogy használaton kívül mindig rövidre zárjuk a bemeneteit. (A galvanométer paneljén lévő gomb "ki" állásánál a galvanométer bemenetei össze vannak kötve.) Ekkor a lengésbe jött tekercsben olyan irányú áram indukálódik a Lenz-törvény értelmében, hogy az áram és a mágneses tér kölcsönhatásából származó forgatónyomaték csillapítja a lengést. A túláram ellen a műszerrel sorbakötött $R_v$ ellenállás véd. Ezt a panelon lévő "N" nyomógombbal tudjuk kiiktatni, amikor a mérendő áramerősség már a galvanométer mérési tartományába esik.




*1.5 ábra. A galvanométer mechanikai és túláram elleni védelme*

*Mérés a galvanométerrel:*

A galvanométert nullműszerként használjuk a gyakorlat során. Kikapcsolt állapotban kötjük be az áramkörbe. Mérésnél a K kapcsolót először csak rövid időre kapcsoljuk be, nehogy a mutató túllendüljön a végkitérésen. Az áramkör állításával a mutatót nullhelyzetbe hozzuk, majd amikor a műszer már közel nulla áramot jelez, az N nyomógomb benyomásával kiiktatjuk a védőellenállást, ebben az érzékeny állapotban fejezzük be a nullázást és olvassuk le a méréshez szükséges adatokat. A mérés befejeztével a K kapcsolót "ki" állásba helyezzük.

1.4 A mérés kivitelezése

a.) Kössük össze a Wheatstone-hidas mérőáramkört az 1.1 ábra szerint. Az $R_1$, $R_2$ ellenállásokat a hídviszony-dobozban találjuk, $R_4$ pedig a dekádos ellenállásszekrény. Írjuk fel a használt alkatrészek számát, olvassuk le és jegyezzük fel a galvanométer érzékenységét és belső ellenállását. $\alpha$ = 1 hídviszonyt válasszunk. Vigyázzunk, hogy az ellenállásszekrény ne álljon zérus ellenálláson, legalább 100 Ω ellenállás legyen bekapcsolva a mérés kezdetén!

b.) Kapcsoljuk be a galvanométert és egyensúlyozzuk ki a hidat az ellenállásszekrény állításával. Amikor a galvanométer mutatója már közelítőleg nulla áramot mutat, a védőellenállást kiiktatva állítsuk be a pontos hídegyensúlyt. Olvassuk le az ellenállásszekrényről $R_4$ értékét. Most ez azonos az ismeretlen ellenállás értékével, mert $\alpha$ = 1. Ismételjük meg ötször a mérést. Értékeljük ki a mérési eredményeket, adjuk meg $R_x$ értékét és a hibaintervallumot 95 %-os konfidenciaszinten.

c.) Határozzuk meg az ellenállásmérés érzékenységét méréssel, az (1.10) képletet használva, és számítással, az (1.11) formulával. Mérésnél az utolsó dekádot addig állítsuk el az egyensúlyi helyzethez képest, amíg a galvanométeren legalább egy skálarésznyi kitérést kapunk.

d.) Számítsuk ki az érzékenységet $\alpha$ = 0,1 hídviszonynál is, és egyensúlyozzuk ki a hidat. Milyen értéket kaptunk az ismeretlen ellenállásra? Mérjük meg az érzékenységet ennél a hídviszonynál is.

e.) Határozzuk meg az ellenállás elméleti hibáját az (1.12) képlettel. Hasonlítsuk össze a méréssorozat kiértékelésével kapott hibával.

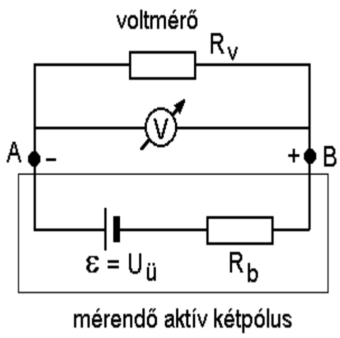
f.) Mérjük meg $\alpha$ = 1 hídviszonynál a másik ismeretlen ellenállást is ötször. Ezután kössük sorosan majd párhuzamosan a két ellenállást és mérjük meg az eredőt egyszer-egyszer. Vigyázzunk, hogy az ellenállások cseréjénél a galvanométer kikapcsolt állapotban legyen!

**Beadandó:** a két ellenállás értéke és hibája a méréssorozatból meghatározva; a soros és párhuzamos eredő mért és számított értéke és az egyes ellenállások hibájából becsült hibájuk; mindkét hídviszonynál a mért és számított érzékenység.

# 2. Kompenzáció

## Feszültségmérés voltmérővel

Ha egy tetszőleges AB kétpóluson mérni akarjuk az $U_{AB}$ feszültséget, egy voltmérőt kötünk az A és B pontokhoz. A voltmérő véges $R_v$ ellenállása most része lesz az áramkörnek, az áramkör megváltozik, és így a mért feszültség különbözni fog attól az $U_{AB}$ értéktől, melyet mérni akartunk. Ahhoz, hogy ezt a hibát megbecsüljük, helyettesítsük a mérendő A,B kétpólust a Thevenin-tétel értelmében egy ideális feszültségforrással és ezzel sorbakötött belső ellenállással.




A voltmérő beiktatása előtt az A,B pontok közötti feszültség, az "üresjárási feszültség" megegyezett a helyettesítő feszültségforrás elektromotoros erejével (ε). Amikor a voltmérőt a kétpólus sarkaira csatlakoztatjuk, zárt áramkört hozunk létre, a voltmérő belső ellenállása ($R_v$) áramot vesz fel, és ugyanez az áram folyik keresztül a helyettesítő kétpólus belső ellenállásán ($R_b$) is:

$$I = \frac{\varepsilon}{R_b + R_v}.$$

Az I áramerősség az $R_b$ ellenálláson $\Delta U = R_b\, I$ potenciálesést hoz létre. Így a voltmérővel terhelt kétpólus sarkain

$$U_{AB} = \varepsilon - I\, R_b = I\, R_v = \frac{\varepsilon\, R_v}{R_b + R_v} \tag{2.1}$$

feszültséget kapunk. A voltmérő belső ellenállása

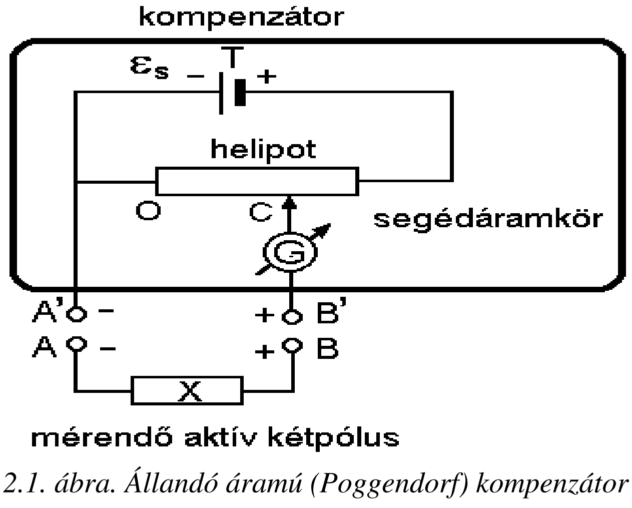
$$\delta U = \frac{\Delta U}{U_{AB}} = \frac{R_b}{R_b + R_v}$$

relatív hibát okoz a feszültségmérésben. A hiba annál kisebb, minél nagyobb a voltmérő belső ellenállása; ideális voltmérő belső ellenállása végtelen.

Ha nagy pontossággal akarunk feszültséget mérni, főleg olyan aktív kétpóluson, melynek nagy a belső ellenállása (pl. elektrokémiában az elektródpotenciálok mérésénél), más módszert kell választani: a feszültségmérésnél ne folyjon áram a mérendő kétpóluson keresztül. Erre ad lehetőséget a **kompenzációs elv**.

## 2.1 A kompenzációs feszültségmérés elve

Kössünk a mérendő AB kétpólus sarkaira egy telepet, úgy hogy az azonos pólusok érintkezzenek (a negatív pólust az A-ra, a pozitívat a B-re). Ha a telep elektromotoros ereje megegyezik ε-nal, az AB kétpólust helyettesítő feszültségforrás elektromotoros erejével, akkor a zárt áramkörben nem folyik áram, mert a két szembekapcsolt telep elektomotoros erejének eredője zérus. Ez egyben azt is jelenti, hogy a mérendő kétpólus sarkain a feszültség ugyanaz, mint összekapcsolás előtt. Az A,B pontokhoz kapcsolt telep legyen egy ismert mértékben változtatható elektromotoros erejű feszültségforrás, és kössünk vele sorba egy galvanométert annak detektálására, hogy folyik-e áram a körben. Ezzel megkaptuk a kompenzációs elven működő voltmérőt, a **kompenzátort**. A kompenzátor-fajtákat a változtatható elektromotoros erő előállításának módszere különbözteti meg. Az *állandó áramú* (*Poggendorf*) kompenzátor kapcsolási rajzát a 2.1 ábra mutatja.




*2.1. ábra. Állandó áramú (Poggendorf) kompenzátor*

A 2.1. ábrán látható Poggendorf-kompenzátor segédáramkörében folyó áram, $I_s$ független a mérendő feszültségtől a kompenzált állapotban, amikor a galvanométeren nem folyik áram. $I_s$-t a segédtelep $\varepsilon_s$ elektromotoros ereje és a segédáramkörben lévő eredő ellenállás határozza meg, az utóbbi magába foglalja a helipot ellenállása mellett a telep belső ellenállását is, mely általában nem ismert. $I_s$-t meghatározhatjuk viszont egy ismert elektromotoros erejű feszültségforrás segítségével, pl. *Weston-féle* *normálelemmel*. Legyen a normálelem feszültsége $\varepsilon_0$. Kössük az ismeretlen kétpólus helyére, és kompenzáljuk ki a kört, és legyen ekkor az $R_{OC}$ ellenállás értéke $R_0$. Ekkor

$$U_{A'B'}(\text{normálelem}) = \varepsilon_0 = I_s R_0.$$

Kössük most az AB kétpólust a kompenzátorra. Kompenzáljuk ki az áramkört. A helipotról leolvasható ellenállás legyen most $R_{OC} = R_x$, és

$$U_{A'B'}(\text{ismeretlen}) = U_x = I_s R_x.$$

A két egyenletet elosztva $I_s$ kiesik, és az ismeretlen feszültség

$$U_x = \varepsilon_0 R_x / R_0. \qquad (2.2)$$

A helipot ellenállása arányos a leolvasható skálarészekkel, N-nel. Ha a normálelem esetében $N_0$ skálarésznél állt a csúszka a kompenzált állapotban, az ismeretlen feszültség mérésénél pedig $N_x$-nél, akkor a meghatározandó feszültség

$$U_x = \varepsilon_0 N_x/N_0. \qquad (2.3)$$

A kompenzációs módszernél sem tökéletesen árammentes állapotban mérünk, de a mért kétpóluson folyó áram kisebb a galvanométerrel még észlelhető áramerősségnél, mely általában a μA törtrésze. Néhány voltos feszültség mérése esetén ez MΩ nagyságrendű belső ellenállást jelent. A félvezető eszközökkel működő digitális mérőműszerek belső ellenállása ennél általában egy nagyságrenddel nagyobb, úgyhogy a kompenzáció elvétől eltérően, melyet gyakran alkalmaznak a méréstechnikában, a kompenzációs feszültségmérésnek ma már nincs túl nagy jelentősége.

## 2.2. Feszültségmérés Poggendorf-kompenzátorral

**Feladat**

A Poggendorf-kompenzátor összeállítása, hitelesítése, feszültségmérés.

**Eszközök**

a.) A segédáramkörben alkalmazandó kb. 5,6 V elektromotoros erejű feszültségforrás (alumínium dobozban).

b.) Ismeretlen elektromotoros erejű (kb. 5 V) és belső ellenállású telep (plexidobozban).

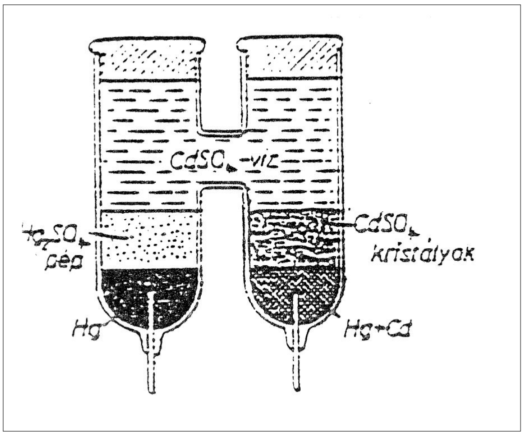
c.) $R_H$=1 kΩ ellenállású, N=1000 beosztású értékállítóval ellátott helipot.

d.) Kiiktatható védőellenállással ellátott galvanométer.

e.) Egy 33 Ω-os és egy 50 Ω-os ellenállás és egy zseblámpaizzó, műszerzsinórok.

f.) Weston-féle normálelem.

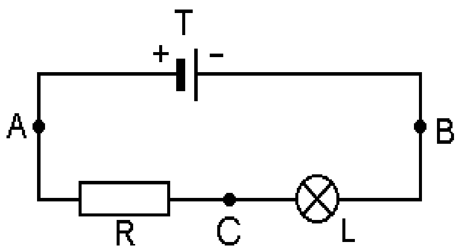
Feszültségetalonként használatos kadmium- normálelem, melynek elektromotoros ereje csak kissé függ a hőmérséklettől, 20 °C-on 1,01865 V. Speciális felépítése miatt gyakorlatilag sohasem "merül ki", mivel nempolározódó elektródokkal rendelkezik. (Anódja $Hg_2SO_4$ péppel fedett higany, a katód kadmium amalgám $CdSO_4$-tal fedve, az elektrolit kadmiumszulfát telített vizes oldata; 2.2. ábra). Csak 10 μA-nél kisebb áramerősséggel terhelhető.




*2.2 ábra. A Weston-féle normálelem felépítése*

## 2.3. A mérés kivitelezése

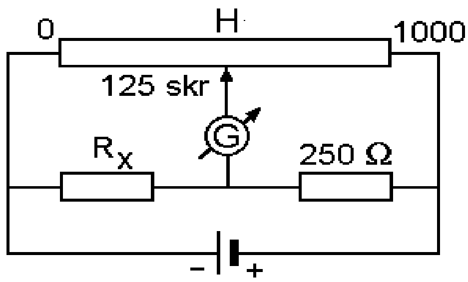
a.) Állítsuk össze a 2.1 ábra szerint az állandó áramú kompenzátort úgy, hogy a helipot "0" pontja a segédtelep negatív pólusával legyen összekötve. Ekkor a helipot csúszójának "0" helyzetében $U_{A'B'} = 0$.
b.) Hitelesítsük a kompenzátort a Weston-elemmel. Kapcsoljuk az elem negatív sarkát a B ponthoz, pozitív sarkát a galvanométerhez, és a csúszó változtatásával keressük meg az árammentes állapotot. Ekkor iktassuk ki a galvanométer védőellenállását, és ebben az érzékeny állapotban kompenzáljuk ki az áramkört. Olvassuk le az értékállítón a csúszka helyzetét, és jegyezzük fel $N_0$-t. Ismételjük meg 5-ször a mérést.
c.) Most kössük az ismeretlen elektromotoros erejű telepet össze a kompenzátorral, figyelve a polaritásra. Itt is keressük meg az árammentes állapotot és olvassuk le az a csúszó helyzetét az értékállítón ($N_x$). Ezt a mérést is 5-ször ismételjük.
d.) Határozzuk meg $N_0$ és $N_x$ átlagát és hibáját. Számítsuk ki az $\varepsilon_x$ elektromotoros erőt a (2.3) képlettel, valamint $\varepsilon_x$ hibáját az $N_0$ és $N_x$ mérésének hibájából. Ha a méréssorozat kiértékelésénél fél skálarésznél kisebb hibát kaptunk, számoljunk fél skálarész leolvasási hibával!
e.) Kössük a telepre az izzót és az egyik ellenállást egymással sorbakötve (2.3 ábra). Mérjük meg az $U_{AB}$ kapocsfeszültséget, az ellenálláson eső $U_{AC}$ és az izzólámpán eső $U_{CB}$ feszültséget.
Az ellenállás értékének ismeretében számítsuk ki az izzólámpán folyó áramot és a telep belső ellenállását.




*2.3 ábra. Az összeállítandó áramkör*

## 3. Példák

**1.** A "csúszóhuzalos Wheatstone-híd" kapcsolási rajza az ábrán látható. A hídegyensúlyt a helipot csúszójának állításával N=125 skr-nél kapták. A helipot értékállítóján 1000 skálarész van. A galvanométer már egy skálarésznyi elállításra észrevehetően kitér. Mekkora az ismeretlen ellenállás értéke és hibája? Az ismert ellenállás értéke $R_0 = (250{,}0 \pm 2)\ \Omega$. A helipoton az értékállító leolvasási hibája 1 skr.



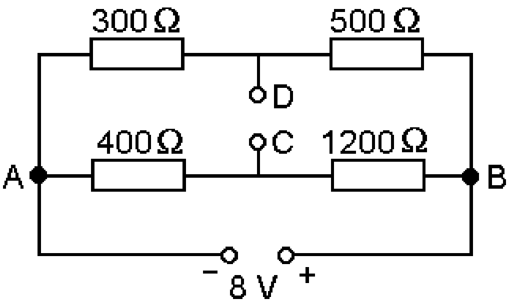

*Megoldás:*
A hídviszony $\alpha = N / (1000 - N)$, és $R_x = R_0\, N/(1000-N) = 35{,}7\ \Omega$.
$R_x$ hibája:

$$\Delta R_x = \sqrt{\left(\frac{\partial R_x}{\partial R_0}\Delta R_0\right)^2 + \left(\frac{\partial R_x}{\partial N}\Delta N\right)^2}$$

$$\frac{\partial R_x}{\partial R_0} = \frac{N}{1000 - N}, \qquad \frac{\partial R_x}{\partial N} = \frac{1000\, R_0}{(1000 - N)^2}, \qquad \Delta R_0 = 0{,}2\ \Omega, \qquad \Delta N = 1\ \text{skr}.$$

$\Delta R = 0{,}43\ \Omega \quad \rightarrow \quad$ <u>$R_x = (35{,}7 \pm 0{,}4)\ \Omega$</u>

**2.** Határozzuk meg az $U_{DC}$ feszültséget!




*Megoldás:*

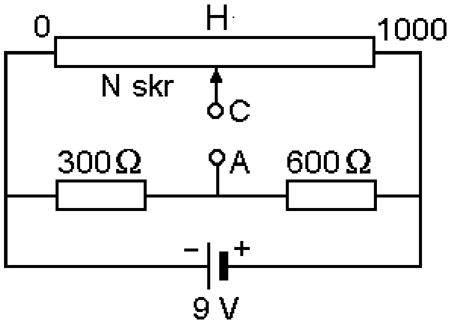
Legyen az elektromos potenciál értéke az A pontban $\varphi(A) = 0$.

Akkor $\varphi(D) = 3$ V,

$\varphi(C) = 2$ V,

$U_{DC} = \varphi(D) - \varphi(C) = \underline{1\ V}$.

**3.**




Hol áll a helipot csúszója,
ha $U_{CA} = 1$ V,
illetve ha $U_{CA} = -1$ V?

*Megoldás:*

A "0" ponthoz viszonyítva

$\varphi(A) = 9 \cdot 300/900 = 3$ V.

$U_{CA} = \varphi(C) - \varphi(A)$,

ezért $\varphi(C) = \varphi(A) + U_{CA}$.

$\varphi(C) = 0{,}009$ V

$\rightarrow \quad N = (\varphi(A) + U_{CA}) / 0{,}009$.

Ha $\underline{U_{CA} = 1\ V,\ N = 444\ skr.}$

Ha $\underline{U_{CA} = -1\ V,\ N = 222\ skr.}$

**4.** Kompenzációs módszerrel mérjük az A,B pontok közé kötött ismeretlen telep $E_x$ elektromotoros erejét.

$E = 7{,}2$ V

$R_b = 100\ \Omega$

$R_H = 800\ \Omega$

$R_G = 300\ \Omega$

a) Mekkora a telep $E_x$ elektromotoros ereje, ha az 1000 osztású helipotot n = 750-re állítva a galvanométer nem jelez áramot?

b) Ha az A, B pontoknál megbontjuk a hálózatot, és az ismeretlen telepet fordítva kötjük vissza, a galvanométeren $I_G = 15$ mA áram folyik fölfelé. (A helipotot nem állítottuk odébb.)
Határozzuk meg az $E_x$ elektromotoros erejű telep $R_x$ belső ellenállását!

*Megoldás:*

a) A segédáramkörben folyó áram $I_s = E / (R_H + R_b) = 0{,}008$ A, az A,B pontok közötti feszültség

$$U_{AB} = E_x = R_1 \cdot I_s = (\, n / 1000 \cdot R_H \,) \cdot I_s = 0{,}75 \cdot 800 \cdot 0{,}008 = 4{,}8\ V.$$

b) A fölső hurokra a hurokegyenlet pozitív körüljárási irány választva és felhasználva, hogy az alsó hurokban $I_G = 15$ mA a hurokáram (szintén pozitív irányban):

$$- R_b I + E - R_1 (I - I_G) - (R_H - R_1) I = 0 \qquad \Rightarrow \qquad I = 0{,}018\ A$$

Az alsó hurokra

$$- R_1 (I_G - I) + E_x - R_x I_G - R_G I_G = 0\ , \qquad \text{amiből} \qquad R_x = 140\ \Omega.$$