Impedanciamérés

A **Z** impedancia és az **Y** admittancia komplex mennyiségként definiált:

$$Z=\frac{U}{I}; \quad Y=\frac{I}{U} \quad ,$$

ahol I az impedancián átfolyó áram, U pedig az ennek hatására kialakuló feszültségesés. Az impedancia fogalma nem mindig jelent fizikailag „megfogható” elemet, ezért bonyolultabb hálózat esetén a feszültség és áram kapcsolatát úgynevezett transzfer impedancia segítségével lehet értelmezni.
Az **impedancia** megadása **derékszögű koordináta-rendszer**ben: $Z=\mathrm{Re}\{Z\}+j\cdot\mathrm{Im}\{Z\}$
Az **impedancia** megadása **polárkoordinátákkal** megadva: $Z=|Z|\cdot e^{j\cdot\varphi}$
Impedancia esetén a következőképp definiáljuk a **veszteségi (D)** és a **jósági (Q) tényező**t:

$$D=\frac{P_Z}{Q_Z}; \quad Q=\frac{Q_Z}{P_Z},$$

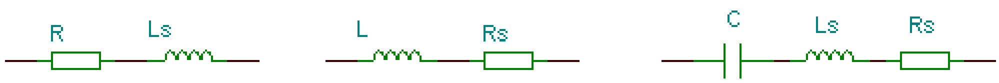
ahol P_Z a létrejövő hatásos teljesítmény, Q_Z pedig a meddő teljesítmény.

Modellalkotás

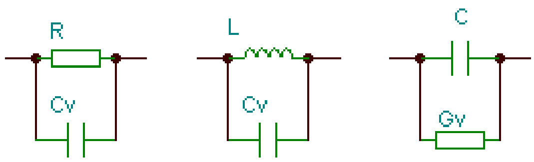
Impedanciamodellek

Ebben az esetben az impedanciát a környezetéből kiemelve, önállóan modellezzük. Az impedancia leírására többféle modell létezik, amelyek egymásba transzformálhatóak. A modellek közül mindig azt érdemes kiválasztani, amely az adott környezetben a legközelebb áll a fizikai valósághoz, mert ekkor nagy valószínűséggel a modell széles frekvenciatartományban illeszkedni fog a valósághoz. Az egyes modelltípusok:

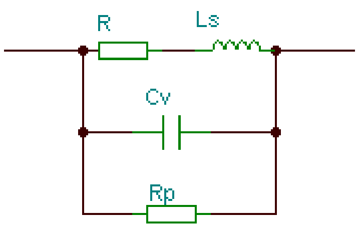
- ➔ Soros modell: ellenállásé, induktivitásé és a kapacitásé



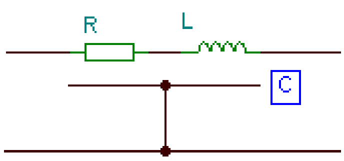
- ➔ Párhuzamos modell: ellenállásé, induktivitásé és a kapacitásé



- ➔ Vegyes modell: ellenállásé



- ➔ Elosztott paraméterű modell: kábelé



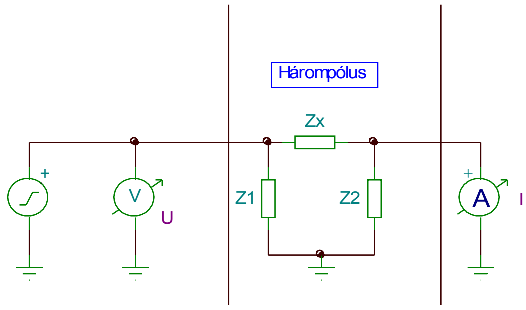
Rendszermodellek

A rendszermodell kialakításakor az impedanciát a környezetével együtt írjuk le. Ennél fogva az impedancia mérési módszert úgy kell megválasztani, hogy a környezet torzító, zavaró hatásait minél jobban elnyomja.

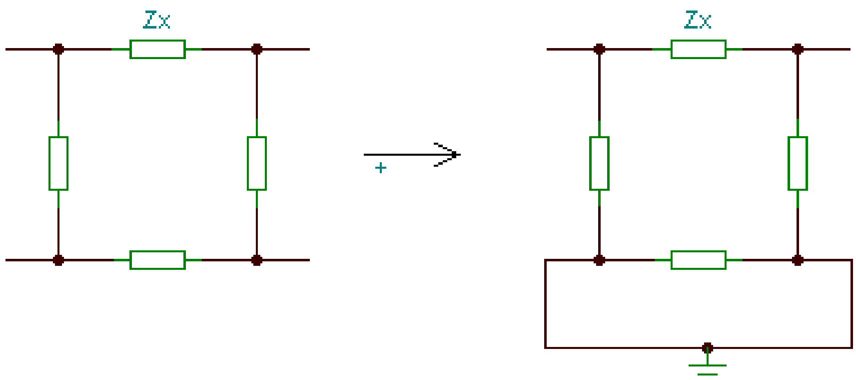
Az egyes rendszermodellek:

- **Kétpólus**: a környezet zavaró hatása elhanyagolható

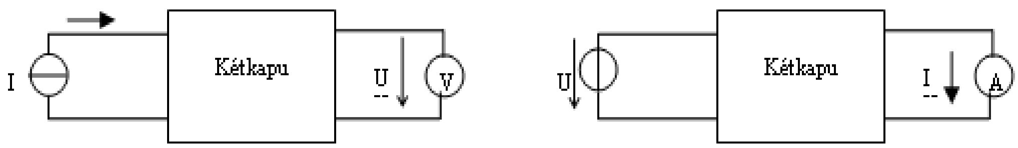
- **Hárompólus**: a hárompólus valamelyik eleme a mérendő impedancia, a mérendő impedancia 3 független kétpólus mérésből meghatározható, azonban a hibaterjedés és a számolás nehézkes, így az alábbi elrendezés esetén a zavaró impedanciák (Z_1 és Z_2) elhanyagolható és a mért áram és fezsültség segítségével meghatározható a mérendő impedancia nagysága.



- **N-pólus**: mérésük visszavezethető a hárompólus esetére, a mérendő impedanciához nem kapcsolódó pontokat összekötjük egymással és ez lesz a hárompólus harmadik, földelendő pontja. Például négypólus visszavezetése hárompólusra:

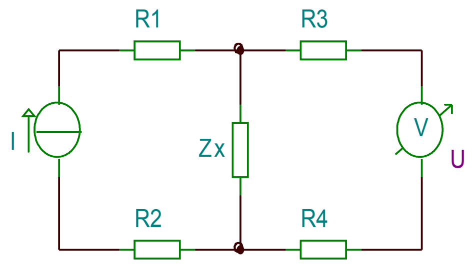


- **Kétkapu**: ebben az esetben az úgynevezett transzfer impedanciát a következőképp értelmezzük



$$Z_T = \frac{U}{I}; \quad Y_T = \frac{I}{U}$$

Kis impedanciák mérése esetén a hozzávezetési és kontaktellenállások okozta hiba jelentős lehet, így ennek kiküszöbölésére a **négykapcsú impedancia mérés**i módszert használják:

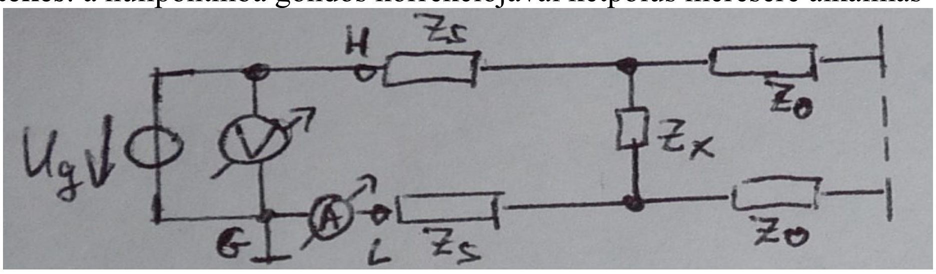


Ebben az elrendezésben a kapott transzfer impedancia Z_x-szel megegyező értékű, függetlenül a zavaró hatást keltő ellenállásoktól.

Átvitelicsatorna-modellek

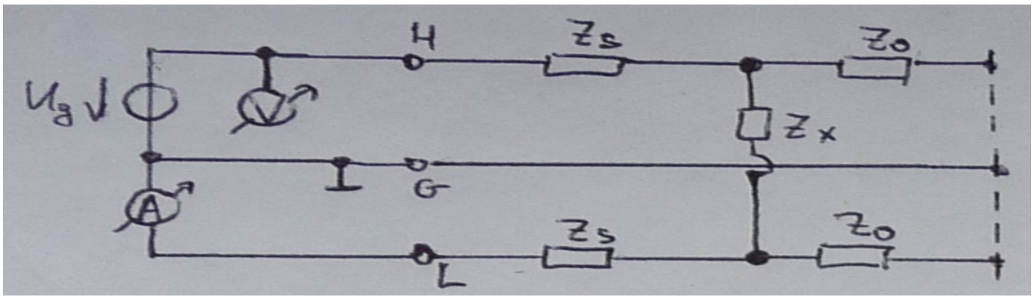
A vizsgált rendszer és a mérőműszer között az átviteli csatorna teremt kapcsolatot. Az átviteli csatornának is vannak korlátos fizikai tulajdonságai, továbbá figyelembe kell venni, hogy a külső környezetből származó zavarokra mennyire érzékeny, ugyanis ezek mind befolyásolják a mérés pontosságát. Az egyes modellek árnyékolatlan esetben:

- **Kétvezetékes**: a nullponthiba gondos korrekciójával kétpólus mérésére alkalmas



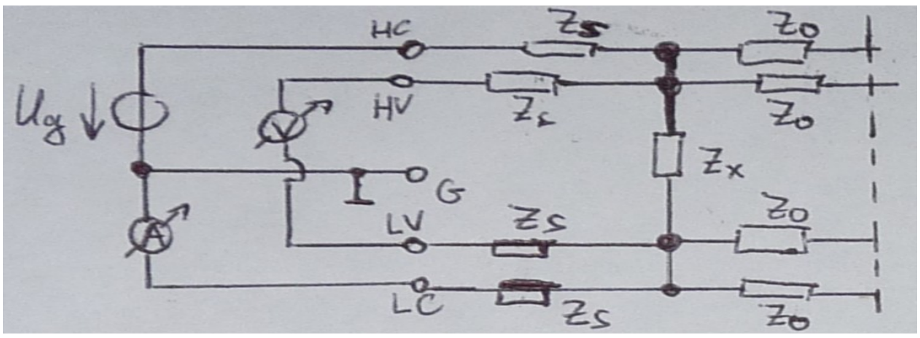
A C szórt kapacitáson keresztül a külső zavarforrás I_z áramot hoz létre a rendszerben, ami igen nagy mérési hibát okozhat, az érpár földelt árnyékolása hatékony védekezést nyújt, ugyanis ekkor a zavaróáram közvetlenül a földbe vezetődik (lásd árnyékolt eset).

- **Háromvezetékes**:



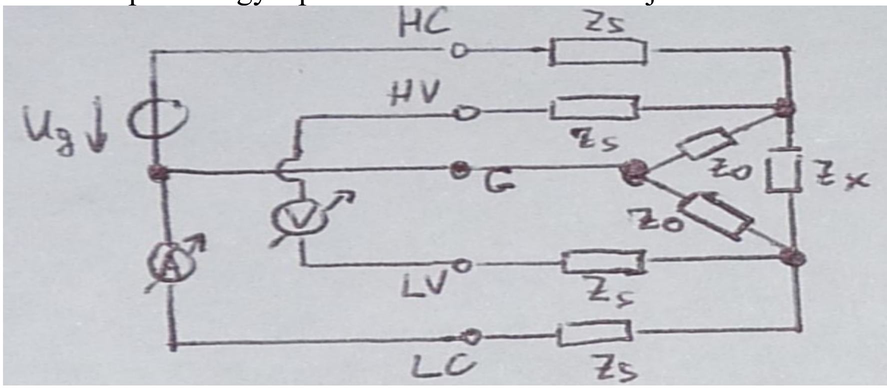
hárompólus mérésére alkalmas, a nullponthiba kisebb, mint a kétvezetékes mérés esetén

- **Négyvezetékes**: kis impedancia esetén a hozzávezetési és kontaktellenállások hatását kiküszöbölendő négykapcsú kialakítást kell alkalmazni, amit a négyvezetékes módszerrel alakítunk ki:



Az összeállítás esetén kialakuló feszültség- és áramhurok közötti kölcsönös induktivitás nullponthibát okozhat, a megfelelő geometriai kialakítás révén a csatolás és így a nullponthiba is a mérés szempontjából kis mértékűre leszorítható.

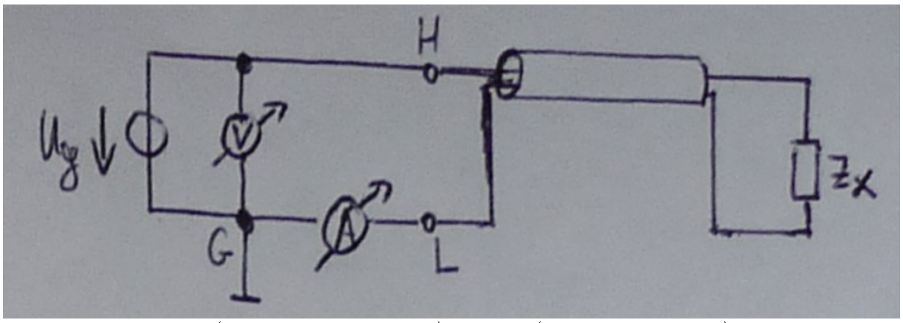
- **Ötvezetékes**: hárompólus négykapcsú mérése esetén használjuk



Sok esetben a mérendő impedancia árnyékolása is szükséges, amit az 5. vezeték segítségével tudunk biztosítani.

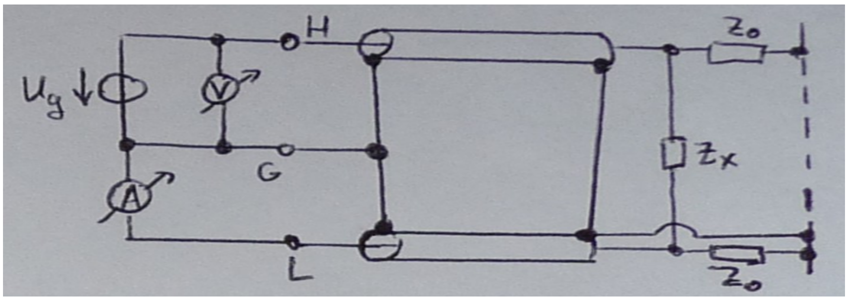
A felsorolt modelleknek másik esete, amikor az egyes vezetékek árnyékoltak (a külső zavarok ellen hatékonyabb védelmet jelent):

- **Kétvezetékes**:

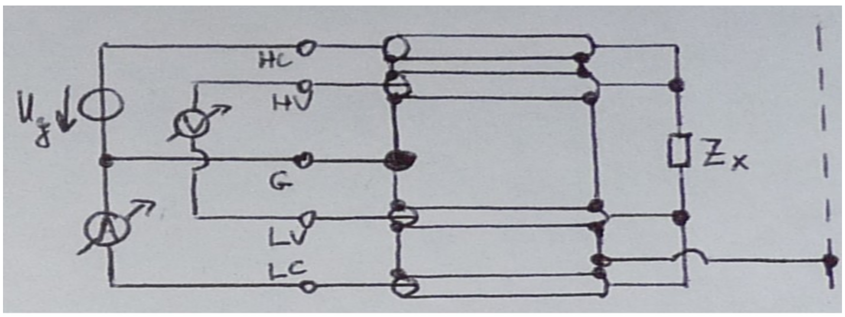


A mért érték: $Z_m = Z_p x (Z_s + Z_p x Z_x + Z_s) = Z_p x (2 \cdot Z_s + Z_p x Z_s)$. Ha $Z_p \to \infty$ és $Z_s = 0$, akkor a mért érték a mérendő impedancia értékével megegyező.

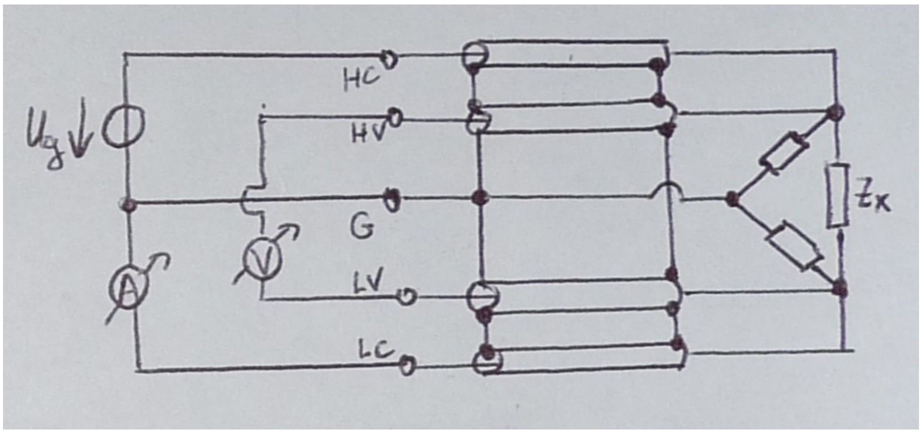
- **Háromvezetékes**:



- **Négyvezetékes**:



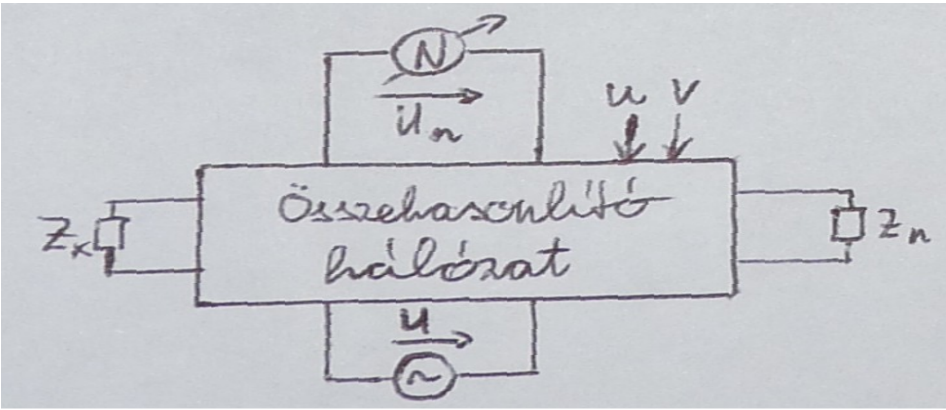
➔ **Ötvezetékes**:



Az impedanciamérés

Nullmódszer

A nullmódszer elve az alábbi:



A mérendő impedancia és az etalon impedancia összehasonlításán alapszik. A kiegyenlített állapot az u és v paraméterek iteratív beállításával érhető el, amikor is a nullindikátor zérust mutat és $Z_x = f(Z_n, u, v)$. A nullmódszer jellemzésére különböző érzékenységek szolgálnak:

➔ **feszültségérzékenység**: $E_u = \frac{\Delta U_n}{\Delta Z_x}$

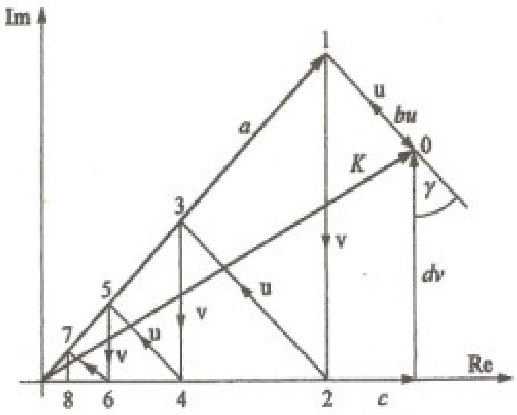
➔ **relatív feszültségérzékenység**: $E_{ur} = \frac{\Delta U_n}{\frac{\Delta Z_x}{Z_x}}$

➔ **áramérzékenység**: $E_i = \frac{\Delta I_n}{\Delta Z_x}$

➔ **relatív áramérzékenység**: $E_{ir} = \frac{\Delta I_n}{\frac{\Delta Z_x}{Z_x}}$

➔ **kapcsolási érzékenység**: $H = \frac{\frac{\Delta U_n}{U}}{\frac{\Delta Z_x}{Z_x}}$; $H = \frac{\frac{\Delta I_n}{I}}{\frac{\Delta Y_x}{Y_x}}$, ismeretében minősíthetjük a mérőhálózatot.

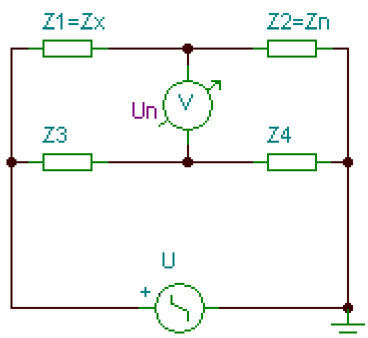
A nullmódszer esetén a kiegyenlítés iteratív módon történik, ehhez ismerni kell a lépések számát, valamint a kiegyenlítésre fordítandó időtartamot. A nullindikátor feszültsége a kiegyenlítés következtében: $U_n = U \cdot \frac{a+b \cdot u}{N_u} = U \cdot \frac{c+d \cdot v}{N_v}$, ahol a,b,c,d komplex együtthatók, és N_u, N_v közel állandó komplex nevezők. A törtek számlálóját konvergenciavektornak nevezik és K_u / K_v-val jelölik. A konvergenciavektor nullához tart az alábbi ábrának megfelelően:



A kiegyenlítés gyorsaságát a konvergenciaszög adja meg: $\gamma = \arctan \frac{\operatorname{Im} b}{\operatorname{Re} b} - \arctan \frac{\operatorname{Im} d}{\operatorname{Re} d}$. Ha a konvergenciaszög 90°, akkor elvileg két lépésben kiegyenlíthető a rendszer, ha ennél kisebb akkor több lépésre van szükség, míg 0° esetén a rendszert nem lehet kiegyenlíteni.

RLC-híd

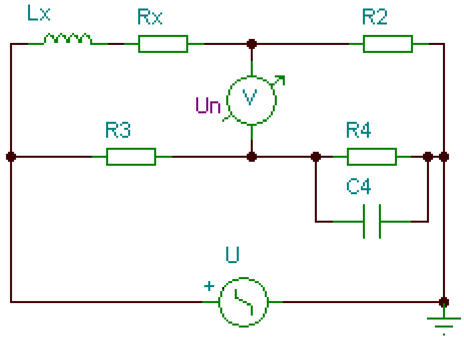
RLC elemekből felépített nullmódszeres klasszikus mérőhidakkal ellenállás, induktivitás, kapacitás és általánosságban impedancia mérhető:



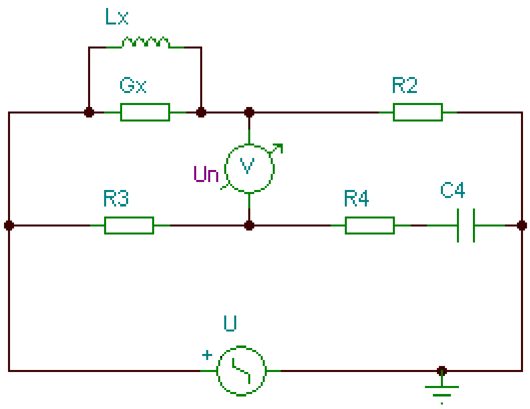
Kiegyenlítés feltétele: $Z_1 = Z_2 \cdot \frac{Z_3}{Z_4} \Rightarrow Z_x = Z_n \cdot \frac{Z_3}{Z_4}$

RLC-híd gyakori típusai:

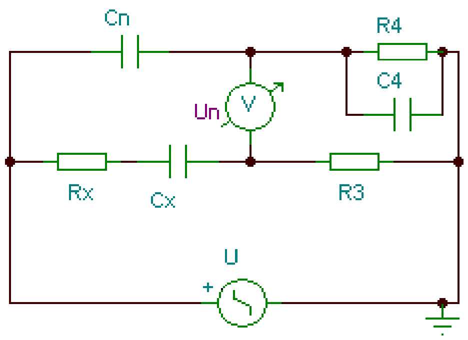
➔ Maxwell-híd: $R_x = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_4}$; $L_x = R_2 \cdot R_3 \cdot C_4$



➔ Hay-híd: $G_x = \dfrac{R_4}{R_2 \cdot R_3}$; $L_x = R_2 \cdot R_3 \cdot C_4$



➔ Shering-híd: $R_x = \dfrac{C_4}{C_N} \cdot R_3$; $C_x = C_N \cdot \dfrac{R_4}{R_3}$

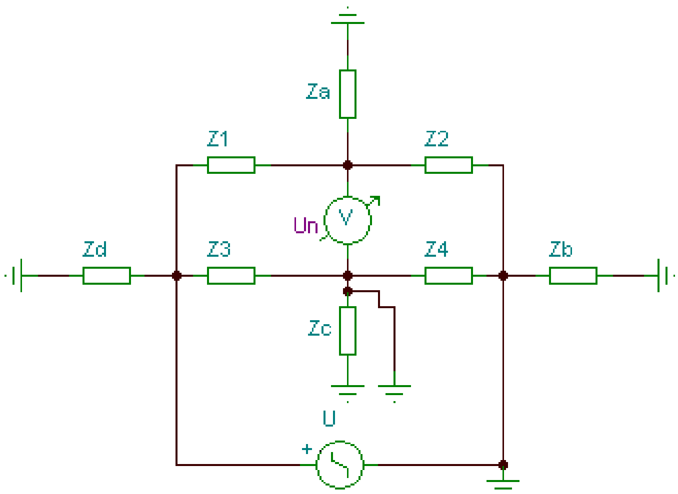


Feszültségérzékenység: $E_u = \dfrac{\partial U_n}{\partial Z_1} = \dfrac{U}{Z_1} \cdot \dfrac{F_0}{(1+F_0)^2}$, *ahol* $F_0 = \dfrac{Z_2}{Z_1} = \dfrac{Z_4}{Z_3}$

Kapcsolási érzékenység: $H = \dfrac{F_0}{(1+F_0)^2}$, *ahol* $F_0 = \dfrac{Z_2}{Z_1} = \dfrac{Z_4}{Z_3}$

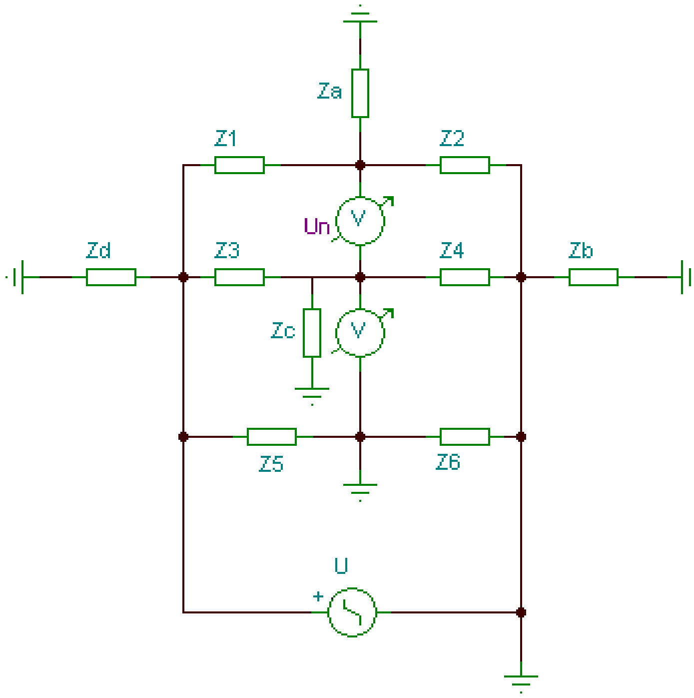
Konvergenciavektor: $K = Z_1 \cdot Z_4 - Z_2 \cdot Z_3$

Szórt impedanciák hatástalanítása: a mérőhíd szórt impedanciákkal

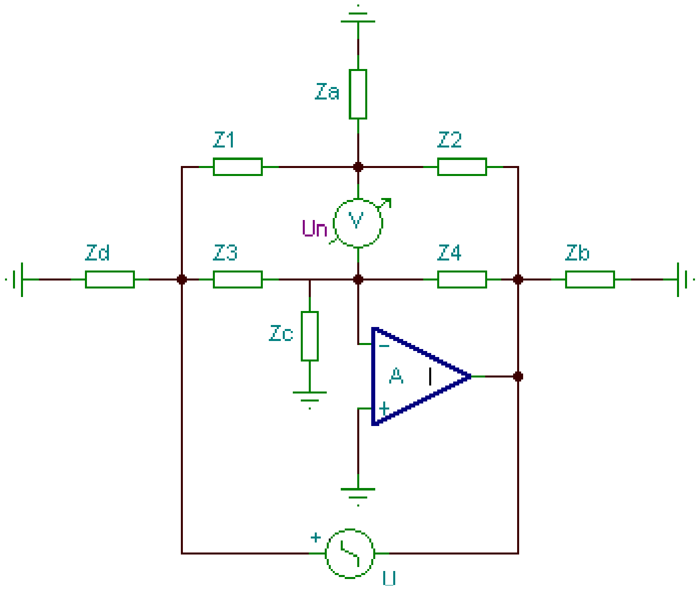


A kiegyenlítési feltétel ekkor: $Z_1 \cdot (Z_4 \, x \, Z_B) = Z_2 \cdot (Z_3 \, x \, Z_D)$, tehát a szórt impedanciák mérési hibát okoznak. Azonban a hídkapcsolás módosításával a szórt impedanciák kiküszöbölhetőek:

➔ Wagner-féle segédhíd:

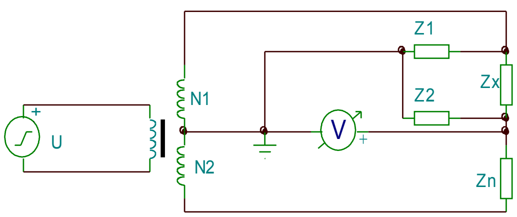


➔ Lebegő mérőhíd:



Aránytranszformátoros híd

Induktív eszközök segítségével a mérendő és az etalonimpedancia aránya menetszámok arányára vezethető vissza, viszont a menetszámarány csak valós szám lehet.

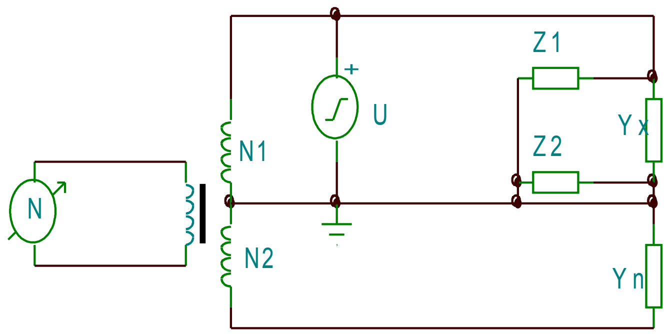


Kiegyenlített esetben az indikátor zérust mutat, ekkor:

$$\frac{U_1}{Z_x}=\frac{U_2}{Z_n}\Rightarrow Z_x=Z_n\cdot\frac{U_1}{U_2}=Z_n\cdot\frac{N_1}{N_2}$$

Hárompólus közvetlen mérésére használható 1 kHz-en 0,1 ppm pontosságú, szokásos frekvenciatartományuk 10 Hz ...100 kHz.

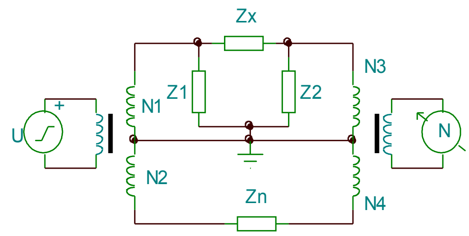
Áramkomparátoros híd



Kiegyenlítés a gerjesztési egyensúly beállításával érhető el: $I_x \cdot N_1 = I_n \cdot N_2 \Rightarrow U \cdot Y_x \cdot N_1 = U \cdot Y_n \cdot N_2$, tehát $Y_x = \frac{Y_n \cdot N_2}{N_1}$. Hárompólus mérésére alkalmas, szokásos frekvenciatartományuk 10 Hz...20 kHz.

Kombinált híd

Az aránytranszformátoros és az áramkomparátoros mérőhíd kombinálása:

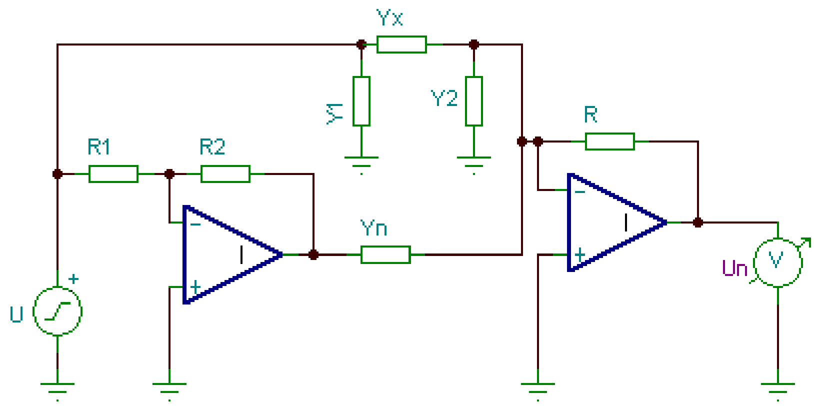


$$Z_x = Z_n \cdot \frac{N_1 \cdot N_3}{N_2 \cdot N_4}$$

Elektronikus hidak

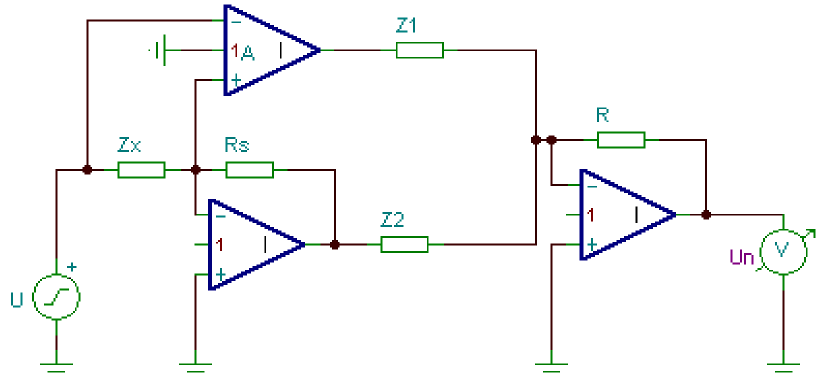
Elektronikus eszközök segítségével számtalan megoldás kínálkozik a nullmódszeres impedanciamérésre. Az alább két példa látható ezekből.

➔ **Elektronikus áramkompenzáció**:



Kiegyenlített esetben az indikátor zérust jelez, és $U \cdot Y_x = U \cdot \frac{R_2}{R_1} \cdot Y_n \Rightarrow Y_x = Y_n \cdot \frac{R_2}{R_1}$. Előnyös tulajdonsága a kapcsolásnak, hogy közvetlenül alkalmas hárompólus mérésére, továbbá a műveleti erősítőből és az R visszacsatoló ellenállásból álló áram-feszültség átalakító átviteli tényezője változtatható, így nagy kapcsolási érzékenység is beállítható. R_1 vagy R_2 ellenállások helyett kondenzátort alkalmazva képzetes arány is beállítható, így ha az áramkompenzációt két párhuzamosan kialakított csatornával valósítjuk meg, akkor a valós és a képzetes komponensek szeparáltan kezelhetőek.

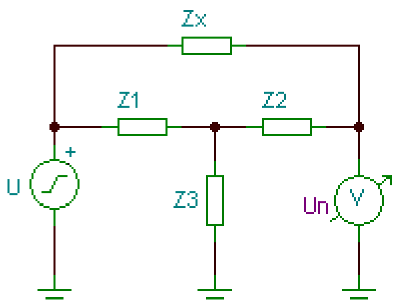
➔ **Négykapcsú mérés**: kis impedanciák mérésére alkalmas megoldás:



Kiegyenlített állapotban: $\frac{U_x \cdot A}{Z_1} = \frac{I_x \cdot R_s}{Z_2} \Rightarrow Z_x = \frac{R_s}{A} \cdot \frac{Z_1}{Z_2}$. A 4 szabad paraméter nagy tervezői szabadságot nyújt a mérési feladat megvalósítása szempontjából.

T kapcsolás

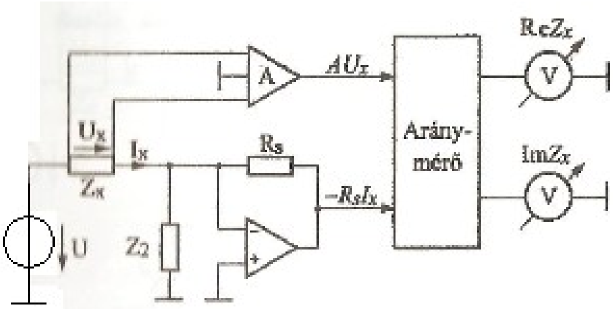
Nagyfrekvenciás mérések esetén előnyös a következő kapcsolás alkalmazása:



A jelforrás és az indikátor is földelt, így az indikátor nincs kitéve jelentős mértékű közös módusú jelnek. Csillag-delta átalakítás révén megállapítható a kiegyenlítés feltétele: $Z_x + Z_1 + Z_2 + \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_3} = 0$, s kiegyenlített állapotban $Z_x = -Z_{12} =$. A T kapcsolás segítségével pontosabb mérés és magasabb felső határfrekvencia érhető el, cserébe viszont bonyolult frekvenciafüggő kiegyenlítési feltételt kell kielégíteni.

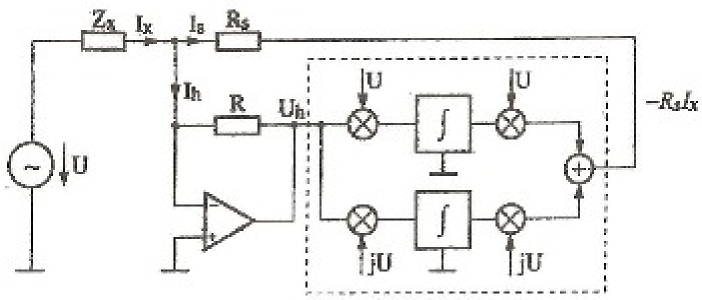
Komplex aránymérés

- **Négykapcsú mérés**:



A komplex arány: $K=-\frac{A\cdot U_x}{R_s\cdot I_x}$, amelyből a mérendő impedancia: $Z_x=-K\cdot\frac{R_s}{A}$. Hárompólus magasabb frekvenciákon történő mérése esetén az áram-feszültség átalakítást végző műveleti erősítő erősítéscsökkenése miatt az invertáló bemeneten áramhiba lép fel, amelyet a transzponálóerősítő alkalmazásával csökkenthető.

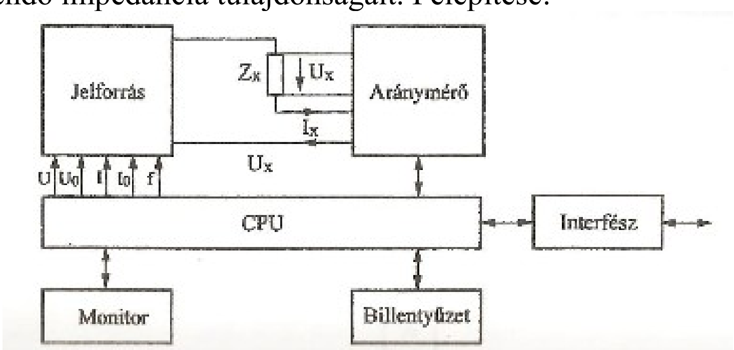
- **Transzponálóerősítő alkalmazása**:



Zárt szabályozási kört építünk ki, ugyanis az U_h hibafeszültséget U és $j\cdot U$ jelekkel moduláljuk majd integráljuk, s az így kapott jeleket demodulálva és összegezve komplex feszültséget nyerünk, amit az R_s ellenálláson keresztül a rendszer bemenetére vezetünk vissza. A kimeneti feszültség addig változik míg I_h hibaáram nullára nem csökken, ekkor $U_h=0$, mellett az integráló tagok tároló tulajdonsága révén a transzponáló erősítő kimeneti feszültsége pont $-R_s\cdot I_x$.

Impedanciaanalizátorok

Olyan összetett műszerek, melyek segítségével széles frekvencia-, feszültség- és áramtartományban lehet vizsgálni a mérendő impedancia tulajdonságait. Felépítése:



A jelforrás programozható, feszültség- vagy áramforrás jelleggel táplálja a mérendő impedanciát. Nemlineáris impedanciák szintmérése is elvégezhető az U mérőfeszültséghez adható U0 előfeszültség és az I mérőáramhoz adható I0 előmágnesező áram segítségével. A kiválasztott munkapontban az impedancia fezsültségének és áramának arányát az aránymérő határozza meg és közli a központi egységgel (CPU-val).

Példák

7.8.

Egy impedancia soros RL helyettesítőképét mértük. Mekkora az impedancia jósági tényezője (Q), veszteségi tényezője (tgδ), illetve disszipációs faktora (D)? A kapott eredményből határozzuk meg a párhuzamos RL, a soros RC és a párhuzamos RC helyettesítőkép elemeit.

Megoldás:

1. **Jósági tényező, veszteségi tényező és disszipációs faktor meghatározása**
   Definíció alapján:
   $$Q=\frac{I^2\cdot\omega\cdot L_s}{I^2\cdot R_s}=\frac{\omega\cdot L_s}{R_s}\,;\,D=tg\,\delta=\frac{1}{Q}=\frac{R_s}{\omega\cdot L_s}$$
2. **A mérés hibája a választott funkció esetén**
   A párhuzamos RL és a soros RL helyettesítőkép alapján felírható admittánciáknak meg kell egyezniük. Az admittanciák a következőképp írhatóak fel:
   $$Y_{s1}=\frac{1}{R_s+j\cdot\omega\cdot L_s}=\frac{R_s-j\cdot\omega\cdot L_s}{(R_s+j\cdot\omega\cdot L_s)\cdot(R_s-j\cdot\omega\cdot L_s)}=\frac{R_s-j\cdot\omega\cdot L_s}{R_s^2+\omega^2\cdot L_s^2}$$
   $$Y_{p1}=\frac{1}{R_{p1}}+\frac{1}{j\cdot\omega\cdot L_p}=\frac{1}{R_{p1}}-j\cdot\frac{1}{\omega\cdot L_p}$$
   A valós és a képzetes részeknek meg kell egyezniük, hogy teljesüljön hogy a 2 admittancia egyenlő. Ebből pedig következik a párhuzamos RL helyettesítőkép elemeinek értéke:
   $$R_{p1}=\frac{R_s^2+\omega^2\cdot L_s^2}{R_s}=R_s\cdot\left(1+\left(\frac{\omega\cdot L_s}{R_s}\right)^2\right)=R_s\cdot(1+Q^2)$$
   $$L_p=\frac{R_s^2+\omega^2\cdot L_s^2}{\omega^2\cdot L_s}=L_s\cdot\left(1+\left(\frac{R_s}{\omega\cdot L_s}\right)^2\right)=L_s\cdot(1+D^2)$$
3. **A mérés hibája a választott funkció esetén**
   A soros RL és a soros RC helyettesítőkép alapján felírható impedanciáknak meg kell egyezniük. Az impedanciák a következőképp írhatóak fel:
   $$R_s+j\cdot\omega\cdot L_s=Z_{s1}=Z_{s2}=R_{s2}-j\cdot\frac{1}{\omega\cdot C_s}$$
   A valós és a képzetes részeknek meg kell egyezniük, hogy teljesüljön hogy a 2 admittancia egyenlő. Ebből pedig következik a párhuzamos RL helyettesítőkép elemeinek értéke:
   $$R_{s2}=R_s\,;\,C_s=-\frac{1}{\omega^2\cdot L_s}$$
4. **A mérés hibája a választott funkció esetén**
   A párhuzamos RC és a soros RL helyettesítőkép alapján felírható admittánciának meg kell egyeznie. Az admittanciák a következőképp írhatóak fel:
   $$Y_{s1}=\frac{1}{R_s+j\cdot\omega\cdot Ls}=\frac{R_s-j\cdot\omega\cdot Ls}{(R_s+j\cdot\omega\cdot Ls)\cdot(R_s-j\cdot\omega\cdot Ls)}=\frac{R_s-j\cdot\omega\cdot Ls}{R_s^2+\omega^2\cdot L_s^2}$$
   $$Y_{p2}=\frac{1}{R_{p2}}+\frac{1}{\frac{1}{j\cdot\omega\cdot C_p}}=\frac{1}{R_{p1}}+j\cdot\omega\cdot C_p$$
   Ami alapján:
   $$R_{p2}=R_{p1}=R_s\cdot(1+Q^2)$$
   $$C_p=-\frac{L_s}{R_s^2+\omega^2\cdot L_s^2}$$