
ELEKTRONIKAI TECHNIKUS KÉPZÉS

2 0 1 3

ANALÓG
ELEKTRONIKA I.
NÉGYPÓLUSOK

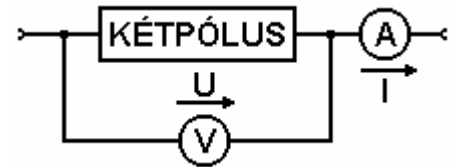
ÖSSZEÁLLÍTOTTA
NAGY LÁSZLÓ
MÉRNÖKTANÁR

Tartalomjegyzék

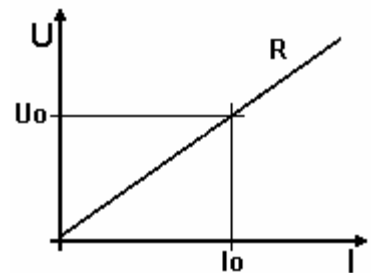
Kétpólusok.....	3
Négy-pólusok.....	4
A négy-pólusok megadása.....	4
Paraméterek meghatározása méréssel	6
Paraméterek meghatározása számítással	7
Négy-pólusok üzemi jellemzői	8
Négy-pólusok hálózatai	9
Frekvenciafüggő négy-pólusok.....	11
Amplitúdó-fázis karakterisztika mérése és szerkesztése.....	11
Amplitúdó-fázis karakterisztika számítása és szerkesztése.....	12
Mintapéldák passzív négy-pólusok frekvenciamenetének meghatározására	14

Kétpólusok

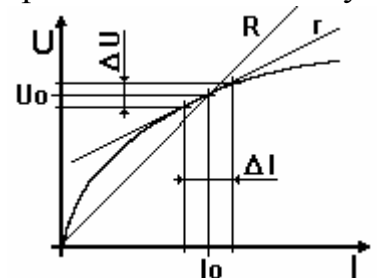
Kétpólusnak nevezzük azokat a tetszőlegesen bonyolult villamos hálózatokat, melyeknek két villamos csatlakozó pontja van. Másképpen fogalmazva kétpólus alatt, egy hálózat két tetszés szerint kiválasztott két pontja által határolt részét értjük. Minden kétpólust a feszültség-áram (U / I) vagy áram-feszültség (I / U) karakterisztikája jellemzi. A karakterisztika alapjába véve egy olyan koordináta-rendszer, melynek tengelyein a feszültség és áram értékek vannak feltüntetve. Egy kétpólus karakterisztikáját mérésrel lehet meghatározni. A meghatározás első lépése, a karakterisztika független változójának kiválasztása. Ha az áramot választjuk független változónak, akkor a feszültség lesz a függő változó, tehát a karakterisztika azt fogja mutatni, hogy a feszültség hogyan függ az áramtól. Hasonló az értelmezés, ha a feszültséget választjuk független változónak. A mérés során a független változónak tekintett jellemzőt különféle értékekre állítjuk be, majd az ehhez tartozó függő változónak tekintett jellemző mérési értékeit feljegyezzük. Az összetartozó értékpárok alapján a karakterisztika megrajzolható.



Lineáris a kétpólus, ha az összetartozó feszültség-áram értékpárok egy egyenesbe esnek. Egy tetszőlegesen kiválasztott munkapont kijelöl egy U_0 és I_0 értékpárost, melyek alapján meghatározható a karakterisztika meredeksége, azaz az U_0 / I_0 hányados. Ez a hányados a karakterisztikán bárhol kiválasztott munkapontra igaz, így a kétpólus egyetlen R adattal egyértelműen meghatározható. Ha a tengelyeket felcseréljük, akkor vezetés (G) karakterisztikát kapunk.

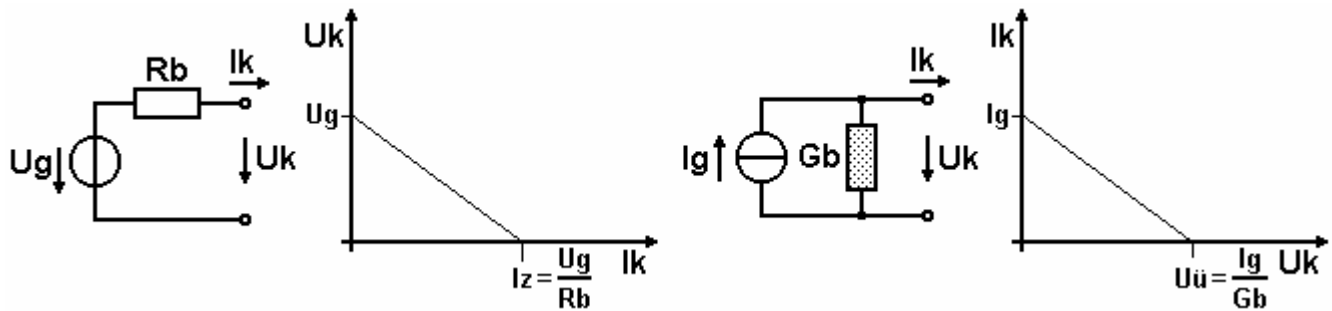


Nemlineáris a kétpólus, ha az összetartozó feszültség-áram értékpárok nem esnek egy egyenesbe. Ebben az esetben is tetszőlegesen kiválasztható egy munkapont. Az U_0 / I_0 hányados azt az R ellenállást határozza meg, mellyel a nemlineáris kétpólus abban a munkapontban egyenáramúlag helyettesíthető. A független változó a munkapont környezetében történő kicsiny ingadozását a függő változó a munkaponthoz húzott r érintő mentén követi. A $\Delta U / \Delta I$ hányados a kétpólus váltakozó áramú vagy más néven dinamikus ellenállása. A Δ változások olyan kicsik, hogy a karakterisztika ebben a rövid szakaszban egyenesnek tekinthető. Ebből következik, hogy a nemlineáris kétpólus egy adott munkapont környezetében, kis változásokra vonatkozóan, lineárisnak tekinthető. Ennek jelentősége, hogy a nemlineáris kétpólus lineáris összefüggésekkel számítható. A nemlineáris kétpólus tehát egy munkaponttal és két adattal, az egyenáramú (R) és a váltakozó áramú (r) ellenállásával adható meg.



Passzívnek nevezzük azt a kétpólust, mely nem tartalmaz és aktívnek azt, amely tartalmaz energia forrást. Az aktív kétpólus is feszültség-áram vagy áram-feszültség karakterisztikával jellemezhető, de a különböző független változó értékeket egy külső terhelő ellenállás

változtatásával lehet beállítani. Az aktív kétpólusok felépítésre nézve lehetnek feszültség-generátorok és áram generátorok. Aktív kétpólusok karakterisztikái:

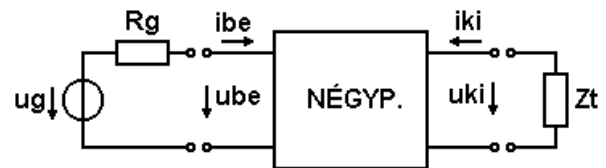


Négypólusok

Négypólusnak nevezzük azokat a tetszőlegesen bonyolult villamos hálózatokat, melyeknek négy villamos csatlakozó pontjuk, azaz két villamos kapocspárjuk van. Az energia felvevő kapocspárt bemenetnek, az energia leadó kapocspárt kimenetnek nevezzük. A bemeneti és a kimeneti kapocspárok közül az egyik általában közös. A négypólusok pozitív vagy szabványos mérőirányai:

(ha $u_t = u_{ki}$, akkor $i_t = - i_{ki}$)

(ha $i_t = i_{ki}$, akkor $u_t = - u_{ki}$)



A négypólusok csoportosítása:

Passzív: ha kizárólag passzív elemeket tartalmaz.

Aktív: ha aktív elemet tartalmaz.

Lineáris: ha kizárólag lineáris elemeket tartalmaz.

Nemlineáris: ha nemlineáris elemet tartalmaz.

Szimmetrikus: ha a kapocspárok egymással felcserélhetők, a meghajtó és terhelő hálózatok működésének megváltozása nélkül. Pl. T vagy PI tag.

Földszimmetrikus: ha a kapocspárok önmagukban felcserélhetők, a meghajtó és terhelő hálózatok működésének megváltozása nélkül. Pl. trafó

A négypólusok megadása

A négypólust akkor tekintjük ismertnek, ha a kapcsokon mérhető négy villamos jellemző - két kapocsfeszültség, két kapocsáram - közötti összefüggéseket ismerjük. Az összefüggések megadhatók algebrai alakban paraméteres egyenletrendszerrel vagy grafikusan karakterisztikákkal. A paramétereket a négypólus belső felépítése alapján számítással, a karakterisztikákat mérési sorozattal lehet meghatározni.

A meghatározás első lépése, a négypólus négy jellemzőjéből a két független változó kivá-

lasztása. Négy jellemzőből kettő kiválasztására hatféle lehetőség adódik, és ez egyben a paraméter rendszert, illetve a mérés menetét is meghatározza.

<u>Független változók</u>	<u>Függő változók</u>	<u>Paraméter rendszer</u>
$I_1 - I_2$	$U_1 - U_2$	impedancia (Z)
$U_1 - U_2$	$I_1 - I_2$	admittancia (Y)
$I_1 - U_2$	$U_1 - I_2$	hibrid (H)
$U_1 - I_2$	$I_1 - U_2$	inverz hibrid (D)
$U_1 - I_1$	$U_2 - I_2$	nem használt
$U_2 - I_2$	$U_1 - I_1$	nem használt

A meghatározás második lépése a független és a függő változók közötti kapcsolat számítása illetve mérése. Mivel a függő változók, mindkét független változóval kapcsolatban állnak, ezért egyidejűleg csak az egyik független változó és a két függő változó kapcsolatát lehet megállapítani, míg a másik független változót hatástalannak kell tekinteni, azaz állandó vagy nulla értéken kell tartani. Az eljárásból következik, hogy egy négypólust négy paraméterrel illetve négy karakterisztikával lehet megadni. A paraméterek egyezményes indexelése:

bemeneti / bemeneti között 11 index

bemeneti / kimeneti között 12 index

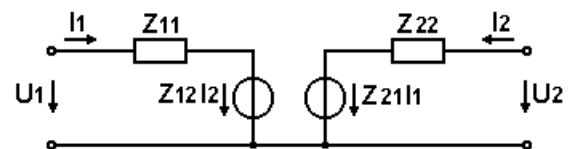
kimeneti / bemeneti között 21 index

kimeneti / kimeneti között 22 index.

A függő változókra felírható karakterisztikus egyenletrendszerek és a négypólusok helyettesítő képei:

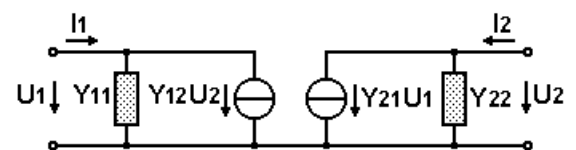
$$U_1 = Z_{11} \cdot I_1 + Z_{12} \cdot I_2$$

$$U_2 = Z_{21} \cdot I_1 + Z_{22} \cdot I_2$$



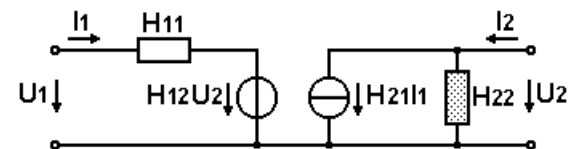
$$I_1 = Y_{11} \cdot U_1 + Y_{12} \cdot U_2$$

$$I_2 = Y_{21} \cdot U_1 + Y_{22} \cdot U_2$$



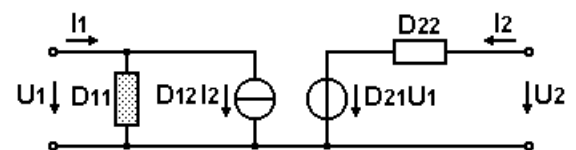
$$U_1 = H_{11} \cdot I_1 + H_{12} \cdot U_2$$

$$I_2 = H_{21} \cdot I_1 + H_{22} \cdot U_2$$



$$I_1 = D_{11} \cdot U_1 + D_{12} \cdot I_2$$

$$U_2 = D_{21} \cdot U_1 + D_{22} \cdot I_2$$



Paraméterek meghatározása méréssel

A karakterisztikák mérésekor a négyfázisra a villamos jellemzőket mérő műszereket kell csatlakoztatni. Egy kérdéses paraméterrendszer meghatározza a meghajtás módját is, azaz a független változókat jelentő fizikai jellemzők előállításához megfelelő generátorokat kell csatlakoztatni. Például: H paraméterek mérése esetén, a bemeneten áramgenerátor a kimeneten feszültséggenerátor szükséges. Az ábrán a négyfázis, Z paramétereinek méréséhez, változtatható áramgenerátorokkal van meghajtva. A bemeneti karakterisztika mérésekor nullára állítjuk az I_{g2} -öt azaz szakadással zárjuk le a kimenetet, majd az I_{g1} változtatásával az u_1 és i_1 kapcsolatot határozzuk meg. Következő lépésben az I_{g2} -öt beállítjuk egy értékre és ismét végigmérjük az u_1 és i_1 kapcsolatot. Ezt addig ismételjük, amíg a négyfázis villamos jellemzői a normális működési tartományban maradnak. A mérés során ellenőrizni kell, hogy az I_{g2} beállított értéke állandó maradjon. A kimeneti karakterisztika mérése ugyanígy történik, de most az I_{g1} -et kell állandó értéken tartani és az I_{g2} változtatásával kell az u_2 és i_2 kapcsolatot meghatározni. Ha a bemeneti karakterisztika mérésekor az I_{g1} értékekhez az u_2 -öt, illetve a kimeneti karakterisztika mérésekor az I_{g2} értékekhez az u_1 -et is feljegyezzük, akkor a két transzfer tehát a Z_{12} visszahatás és a Z_{21} előrehatás tér negyed adatai is rendelkezésre állnak. Egyszerűsítési lehetőség, hogy a tér negyedeket összeforgatva a tengelyeket csak egyszer kell megrajzolni és a szomszédos tér negyedek egy-egy tengelye közös. A balra és lefelé mutató tengelyek nem negatív mennyiségeket jelölnek. A négyfázis paraméterei a mérési sorozattal felvett karakterisztikákból számítással meghatározhatók.

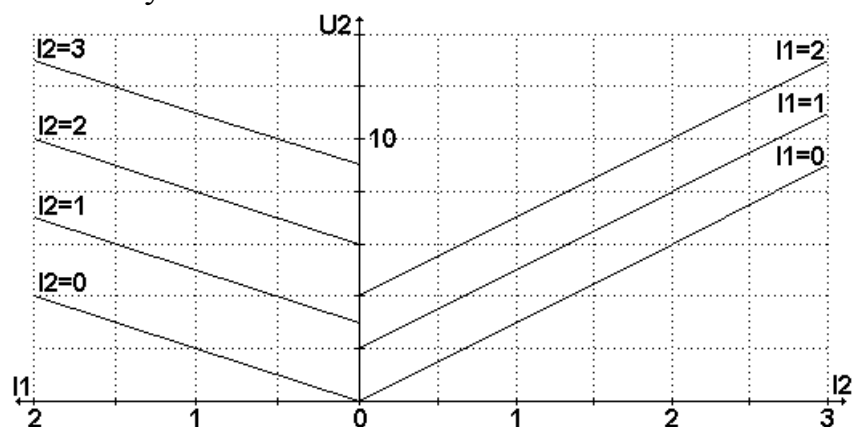
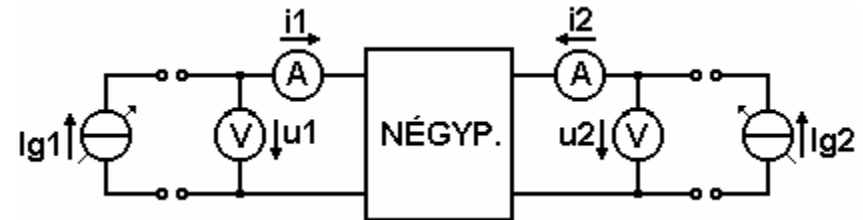
Lineáris elemeket tartalmazó négyfázis karakterisztikái minden esetben egyenesek. A paraméterek a függő és független változók hányadosai.

$$Z_{21} = \left. \frac{U_2}{I_1} \right|_{I_2=0}$$

$$Z_{22} = \left. \frac{U_2}{I_2} \right|_{I_1=0}$$

Az U_2 feszültség:

$$U_2 = Z_{21} \cdot I_1 + Z_{22} \cdot I_2$$



Nemlineáris négypólus esetén a karakterisztikák valamilyen görbesereget alkotnak. A paraméterek egy kiválasztott munkapontban a görbékhez húzott érintők meredekségei, azaz a függő és független változók kis változásra vonatkozó hányadosai. A paramétereket ebben az esetben kisbetűvel jelöljük, mivel váltakozó áramú mennyiségek.

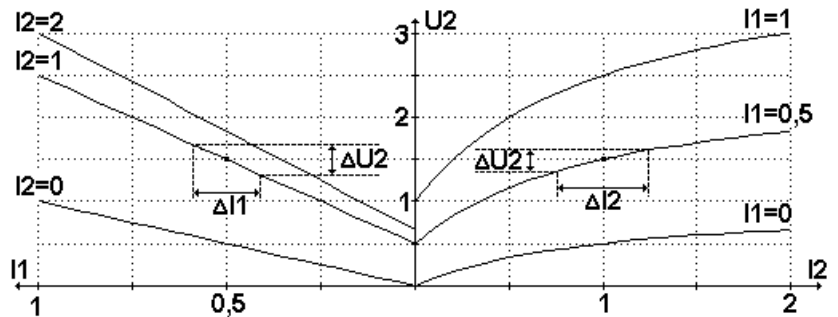
$$z_{21} = \frac{\Delta U_2}{\Delta I_1} = \frac{u_2}{i_1} \Big|_{i_2=0}$$

$$z_{22} = \frac{\Delta U_2}{\Delta I_2} = \frac{u_2}{i_2} \Big|_{i_1=0}$$

Az u_2 feszültség:

$$u_2 = z_{21} \cdot i_1 + z_{22} \cdot i_2$$

A nemlineáris négypólus, egy kiválasztott munkapontban kisjelű, váltakozó áramú helyettesítő képpel számítható.



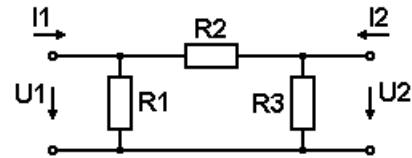
Paraméterek meghatározása számítással

Az egyszerűbb felépítésű, lineáris passzív négypólusok bármelyik paraméter rendszere, hálózat számítási módszerekkel is meghatározható. Reaktív elemet tartalmazó négypólus paraméterei komplex alakúak.

PI négypólus H paramétereinek meghatározása számítással:

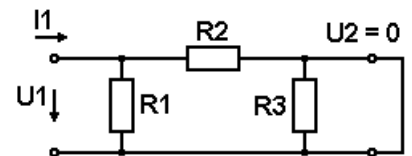
$$U_1 = H_{11} \cdot I_1 + H_{12} \cdot U_2$$

$$I_2 = H_{21} \cdot I_1 + H_{22} \cdot U_2$$



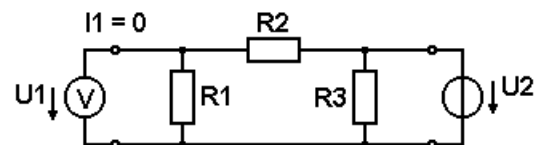
A H_{11} a négypólus bemeneti ellenállása rövidrezárt kimenet esetén:

$$H_{11} = \frac{U_1}{I_1} \Big|_{U_2=0} = R_1 \otimes R_2$$



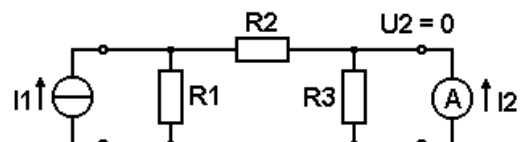
A H_{12} a négypólus feszültség visszahatása:

$$H_{12} = \frac{U_1}{U_2} \Big|_{I_1=0} = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$



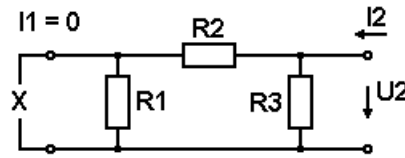
A H_{21} a négypólus áramerősítése (az I_2 a felvett áramiránnyal ellentétes):

$$H_{21} = \frac{I_2}{I_1} \Big|_{U_2=0} = -\frac{R_1}{R_1 + R_2}$$



A H₂₂ a négyfókus kimeneti vezetése, szakadással lezárt bemenet esetén:

$$H_{22} = \left. \frac{I_2}{U_2} \right|_{I_1=0} = \frac{1}{R_3 \otimes (R_1 + R_2)}$$



Az egyes paraméterek az alkatrész adatok alapján számszerűen meghatározhatók.

Négyfókusok üzemi jellemzői

A négyfókusok üzemi közbeni tulajdonságairól, használhatóságukról a váltakozó áramú üzemi jellemzők adnak tájékoztatást.

Teljesítményerősítés: a kimeneten leadott és a bemeneten felvett teljesítmények aránya.

Jele: $A_p = P_{ki} / P_{be} = u_2 i_2 / u_1 i_1$ Mértékegysége: nincs

Használatos a logaritmikus mérőszáma is: $[Bell] = \log A_p$ ill $[dB] = 10 \log A_p$

Feszültségerősítés: a kimeneti és a bemeneti feszültségek aránya.

Jele: $A_u, A_{uo}, A_{ut} = u_{ki} / u_{be}$ Mértékegysége: nincs.

Használatos a logaritmikus mérőszáma is: $[dB] = 20 \log |A_u|$

0 dB feszültség szint = 775 mV (1mW 600 Ω-on).

3 dB $\sqrt{2}$ szerez erősítés.

10 dB $\sqrt{10}$ szerez erősítés ($\approx 3,16$).

20 dB 10 szerez erősítés.

30 dB $10 \cdot \sqrt{10}$ szoroz erősítés ($\approx 31,6$).

40 dB 100 szoroz erősítés.

60 dB 1000 szerez erősítés.

-3dB $1 / \sqrt{2}$ szerez erősítés.

-10 dB $1 / \sqrt{10}$ szoroz erősítés ($\approx 0,316$).

-20 dB $1 / 10$ szerez erősítés (10 szerez csillapítás).

-30 dB $1 / 10 \cdot \sqrt{10}$ szoroz erősítés ($\approx 0,0316$).

-40 dB $1 / 100$ szoroz erősítés.

-60 dB $1 / 1000$ szerez erősítés.

Áramerősítés: a kimeneti és a bemeneti áramok aránya.

Jele: $A_i = i_{ki} / i_{be}$ Mértékegysége: nincs

Használatos a logaritmikus mérőszáma is: $[dB] = 20 \log |A_i|$

Transzfer impedancia:

Jele: $A_z = u_{ki} / i_{be}$ Mértékegysége: $[A_z] = \Omega$

Transzfer admittancia (meredekség):

Jele: $A_s = i_{ki} / u_{be}$ Mértékegysége: $[A_s] = S$

Bemeneti ellenállás: a bemeneti feszültség és a bemeneti áram hányadosa.

Jele: $R_{be} = u_{be} / i_{be}$ Mértékegysége: $[R_{be}] = \Omega$

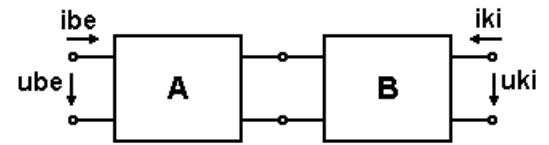
Kimeneti ellenállás: a kimeneti üresjárási feszültség és a rövidzárási áram hányadosa.

Jele: $R_{ki} = u_{ki} / i_{ki}$

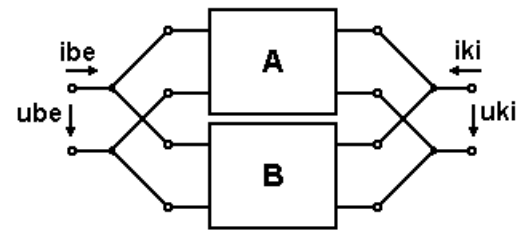
Mértékegysége: $[R_{ki}] = \Omega$

Négypólusok hálózatai

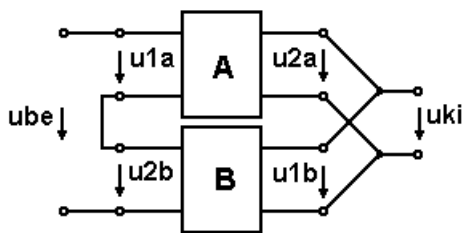
Sorosan mind aktív, mind passzív négypólusok összekapcsolhatók. Az eredő négypólus üzemi jellemzői, a be- és kimeneti ellenállás kivételével, az egyes üzemi jellemzők szorzatai lesznek. Pl. $A_{ue} = A_u B_u$.



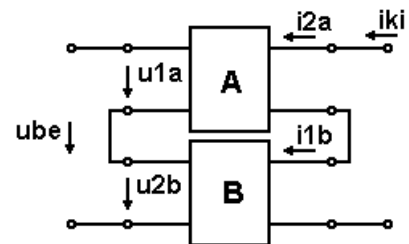
Párhuzamosan, általában csak passzív négypólusok kapcsolhatók össze. Az eredő négypólus üzemi jellemzői méréssel határozhatók meg. Pl. a kettős T négypólus.



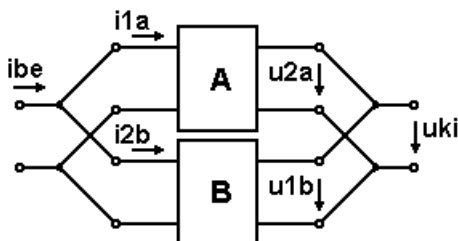
Visszacsatolásnak nevezzük azt az áramköri kialakítást, amelyben egy aktív négypólus kimeneti jelét egy másik, általában passzív négypólus visszavezeti a bemenetére. Az összekapcsolás módjától függően négyféle visszacsatolás létezik:



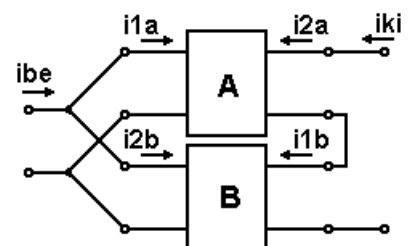
soros - feszültség



soros - áram



párhuzamos - feszültség



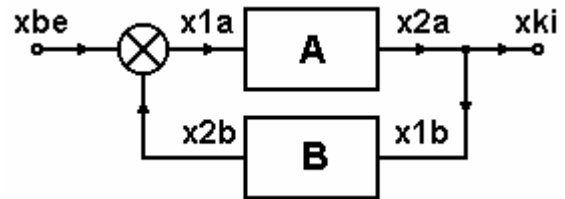
párhuzamos - áram

A visszacsatolások megnevezésének első jelzője a bemeneti kapcsolási módra utal, a második jelző pedig arra, hogy melyik fizikai jellemzővel lesz arányos a visszacsatoló jel, párhuzamos kapcsolásnál a feszültség, soros kapcsolásnál az áram. A visszacsatolás a főerősítő (A) jellemzőit nem változtatja meg, azonban a kialakuló új négypólus eredő jellemzői attól jelentősen eltérhetnek. A visszacsatolás a főerősítő fázisfordításától függően lehet negatív: amikor a visszacsatolt jel a bemenő jelet csökkenti, vagy pozitív, amikor a visszacsatolt jel a bemenő jelet növeli.

A visszacsatolást tartalmazó négypólus eredő üzemi jellemzőinek meghatározásához az egyszerűsítés érdekében, az irányítástechnikából a szabályozási kör blokkvázlatát használjuk fel. A blokkvázlatban az A jelű doboz az úgynevezett előrevezető ág, a B jelű a visszavezető ág. A bemeneten a különbségképző az x_{1a} bemenő jelet állítja elő az x_{be} és az x_{2b} visszacsatolt jel különbségéből vagy összegéből. Ha az x_{2b} negatív, akkor x_{be} -ből kivonódva csökkenti az x_{1a} -t, a visszacsatolás negatív. Ha az x_{2b} pozitív, akkor x_{be} -hez hozzáadódva növeli az x_{1a} -t, a visszacsatolás pozitív. Az ábrán a nyílirányok a jelterjedés irányát mutatják. A visszacsatolt rendszer eredő átviteli jellemzője az x_{ki} és az x_{be} viszonya:

$$x_{ki} = A \cdot x_{1a} = A \cdot (x_{be} \mp x_{2b}) = A \cdot (x_{be} \mp B \cdot x_{ki})$$

$$A_e = \frac{x_{ki}}{x_{be}} = \frac{A}{1 \pm A \cdot B}$$



A nevezőben az AB szorzat a felnyitott kör hurokerősítése. Az eredő átviteli tényező az előrevezető ág átviteli tényező és $1 \pm$ a hurokerősítés hányadosa. A nevező az $1+AB$ értéket veszi fel, ha az x_{2b} negatív, és $1-AB$ értéket veszi fel, ha az x_{2b} pozitív.

A négypólusokra vonatkozóan, a bemeneteken a különbségképzést soros visszacsatolásnál a huroktörvény, párhuzamos visszacsatolásnál a csomóponti törvény oldja meg:

$$x_{1a} = x_{be} \mp x_{2b} \quad \Rightarrow \quad u_{1a} = u_{be} \mp u_{2b} \quad i_{1a} = i_{be} \mp i_{2b}$$

A kimeneteken a visszacsatoló jel:

$$x_{ki} = x_{2a} = x_{1b} \quad \Rightarrow \quad u_{ki} = u_{2a} = u_{1b} \quad i_{ki} = i_{2a} = i_{1b}$$

A hurokerősítéseket a kapcsolási módok határozzák meg. Az A négypólus bemenetén és a B négypólus kimenetén valamint az A négypólus kimenetén és a B négypólus bemenetén azonos jellemzőknek kell szerepelni az átviteli tényezőkben, ezért a lehetséges hurokerősítések:

soros - feszültség	$A_u B_u$
soros - áram	$A_s B_z$
párhuzamos - feszültség	$A_z B_s$
párhuzamos - áram	$A_i B_i$

Negatív visszacsatolás hatására azon átviteli tényezők csökkennek a visszacsatolatlan főerősítőhöz viszonyítva, melyekben a főerősítő bemenőjele szerepel.

Tehát: soros visszacsatolásnál: $A_u / 1 + A_u B_u$ és $A_s / 1 + A_s B_z$

párhuzamos visszacsatolásnál: $A_i / 1 + A_i B_i$ és $A_z / 1 + A_z B_s$

Ez a megállapítás azt jelenti, hogy a soros visszacsatolás az A_i -re és az A_z -re hatástalan, illetve a párhuzamos visszacsatolás az A_u -ra és az A_s -re hatástalan.

Az eredő négypólus bemeneti ellenállása a főerősítő bemeneti ellenállásához viszonyítva:

soros visszacsatolásnál $1+AB$ szeresére nő,

párhuzamos visszacsatolásnál $1+AB$ -ad részére csökken.

Az eredő négy-pólus kimeneti ellenállása a főerősítő kimeneti ellenállásához viszonyítva: feszültség visszacsatolásnál $1+AB$ -ad részére csökken, áram visszacsatolásnál $1+AB$ szorosára nő.

Pozitív visszacsatolás hatására azon átviteli tényezők növekszenek a visszacsatolatlan főerősítőhöz viszonyítva, melyekben a főerősítő bemenő jele szerepel.

Tehát: soros visszacsatolásnál: A_u, A_s

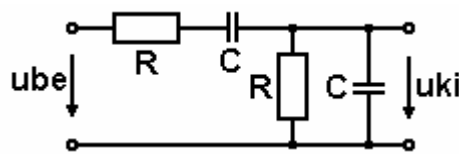
párhuzamos visszacsatolásnál: A_i, A_z

Az átviteli tényezők növekedésének szélső esete, ha a hurokerősítés eléri az egyet, azaz a nevező nullával lesz egyenlő. Ilyenkor az eredő átviteli tényező tart a végtelenhez, ami fizikailag azt jelenti, hogy bemenő jel nélkül is van kimenő jel. (pl. oszcillátorok esetén)

Az elektronikában a jó minőségű (szélessávú, zaj- és torzításmentes, stabil) erősítők kialakításának alapelve az, hogy egy nagyon nagy erősítésű fokozat negatív visszacsatolása az adott célnak megfelelően. (integrált műveleti erősítők)

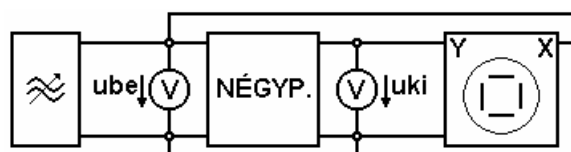
Frekvenciafüggő négy-pólusok

Reaktív elemet tartalmazó négy-pólus kimenő feszültségének nagysága és fázis helyzete a különböző frekvenciákon eltérő. Az ábra egy Wien osztó nevű négy-pólust mutat. A négy-pólus működését különböző frekvenciákon vizsgálva, megállapítható, hogy nagyon alacsony frekvencián a soros kondenzátor miatt, nagyon magas frekvencián a párhuzamos kondenzátor miatt lesz a kimenő feszültség értéke kicsi. A kérdés, hogy közbülső frekvencián hogyan alakul a kimeneti feszültség amplitúdója és fázishelyzete. A négy-pólusok frekvencia függésének szemléletes megadási módja a BODE diagram, más néven logaritmikus amplitúdó-fázis karakterisztika. Az amplitúdó karakterisztika a feszültség átviteli tényezőjének, a fázis karakterisztika a kimenő feszültség fázishelyzetének alakulását mutatja be a frekvencia logaritmikus függvényében. A karakterisztikák meghatározása történhet méréssel vagy számítással és szerkesztéssel vagy valamilyen erre alkalmas számítógépes szimulációs programmal.



Amplitúdó-fázis karakterisztika mérése és szerkesztése

Egy négy-pólus Bode diagramjának méréséhez szükség van egy változtatható frekvenciájú szinuszos feszültségforrásra, két AC elektronikus feszültségmérőre és egy oszcilloszkópra. A kezdő frekvenciát vagy a mérési utasítás alapján, vagy ennek hiányában az áramkör legnagyobb időállandója által meghatározott frekvencia 0,1-szerese alapján célszerű megválasztani. A generátoron 0 dB jelszintet, azaz 775 mV feszültséget, kell beállítani, az ehhez tartozó kimeneti



feszültséget a kimenetre kötött feszültségmérőről dB-ben kell leolvasni. Ha műszereken nincs dB skála, akkor az átviteli tényezőt minden mérési pontban számítani kell, egyébként a leolvasott kimeneti dB értékek közvetlenül ábrázolhatók. Az oszcilloszkópot X-Y üzemmódban működtetve, Lissajous módszerrel a feszültségek közötti szög meghatározható. A mérési tevékenység során, különböző frekvenciákon le kell mérni az u_{ki} / u_{be} átviteli tényezőket dB-ben és a fázistolást $^\circ$ -ban. A frekvencia értékeket célszerű a logaritmikus skálához igazítani. A bemeneti feszültség állandóságát a bemeneti feszültségmérővel folyamatosan ellenőrizni kell. A mérési eredmények ábrázolásához elsőként a Bode diagram vízszintes logaritmikus frekvencia tengelyét szerkesztjük meg. Ehhez meg kell választani egy dekád hosszát, például 6, 8 vagy 10 cm. A logaritmikus osztásokat, számológép segítségével, $\text{dekád} \cdot \log 2$, $\text{dekád} \cdot \log 3$, ..., $\text{dekád} \cdot \log 9$ cm hosszakat a tengelyre felmérve kapjuk meg. A szükséges darabszámú dekádok megrajzolása után a függőleges tengelyen meg kell választani a 20dB-es és célszerűen a 45° -os osztásokat. Végül a mérési pontok bejelölése és összekötése után megkapjuk a karakterisztikákat. A fázistolás előjelére a kapcsolási rajz alapján az áramkör működése lehet következtetni.

Amplitúdó-fázis karakterisztika számítása és szerkesztése

Egy frekvenciafüggő négypólus frekvenciamenete, matematikai úton is meghatározható.

A meghatározás lépései:

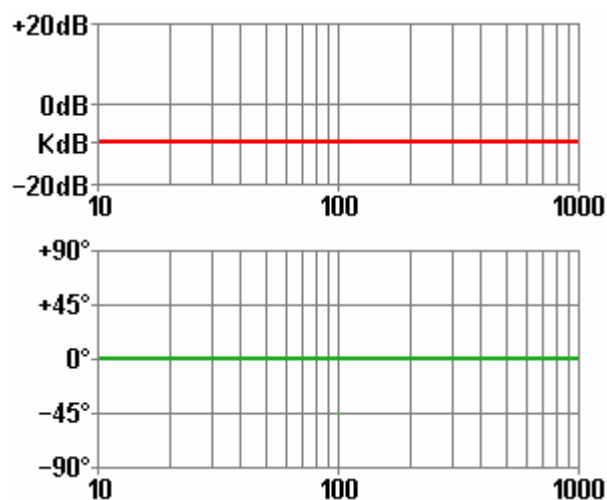
1. a kapcsolási rajz alapján, a komplex átviteli függvény felírása;
2. az átviteli függvény alaptagokra bontása;
3. az időállandók alapján a törésponti frekvenciák meghatározása;
4. az alaptagok amplitúdó és fázis karakterisztikáinak ábrázolása,
5. az eredő amplitúdó és fázis karakterisztika szerkesztése.

Ez az eljárás teljesen mechanikusan alkalmazható elsőfokú átviteli tényezők esetén. Ha az átviteli függvényben másodfokú tag jelenik meg, akkor gyöktényezős alakra hozással alaptagokra alakítható és így a karakterisztika is meghatározható. Az öt alaptag komplex átviteli függvényei és amplitúdó fázis karakterisztikái:

Konstans tag valamilyen erősítés vagy csillapítás értéke, logaritmikus mérőszámmal kifejezve.

$$A_u(j\omega) = K \quad A_{u\text{dB}} = 20\log|K|$$

A teljes frekvencia tartományban állandó az értéke, azaz frekvencia független. A fázistolása 0° szintén a teljes frekvencia tartományban.



Differenciáló jellegű hiányos elsőfokú tag:

$$A_u(j\omega) = j\omega\tau \quad A_{u_{dB}} = 20 \log \left| \frac{\omega}{\omega_0} \right|$$

Az $\omega (= 2 \pi f)$ minden tízszeres értékére az átvitel 20dB-el növekszik. A karakterisztika egy egyenes, meredeksége +20dB/Dekád vagy 6dB/Oktáv. Az időállandót $1/\omega_0$ -al helyettesítve az átvitel értéke $\omega=\omega_0$ esetén 0dB, tehát az egyenes ω_0 helyen metszi a 0dB tengelyt. Az átviteli tényezőnek csak képzetes része van, fázisforgatás +90°.

Integráló jellegű hiányos elsőfokú tag:

$$A_u(j\omega) = \frac{1}{j\omega\tau} \quad A_{u_{dB}} = 20 \log 1 - 20 \log \left| \frac{\omega}{\omega_0} \right|$$

Az $\omega (= 2 \pi f)$ minden tízszeres értékére az átvitel 20dB-el csökken. A karakterisztika egy egyenes, meredeksége -20dB/D. Az egyenes szintén ω_0 helyen metszi a 0dB tengelyt. Az átviteli tényezőnek csak negatív képzetes része van, a fázisforgatás állandó -90°.

Differenciáló jellegű normál elsőfokú tag:

$$A_u(j\omega) = 1 + j\omega\tau \quad A_{u_{dB}} = 20 \log \sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2}$$

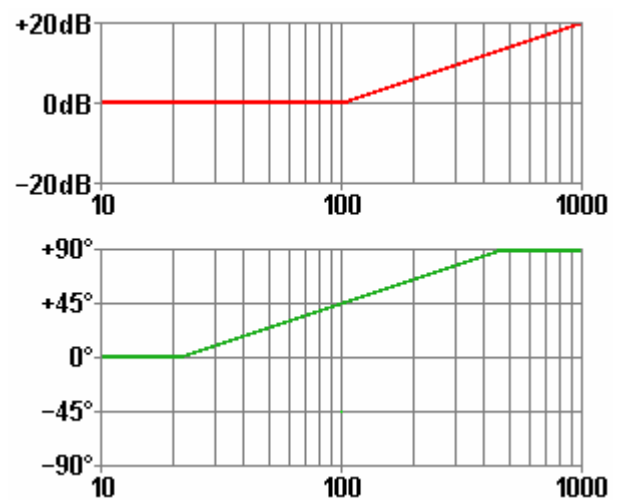
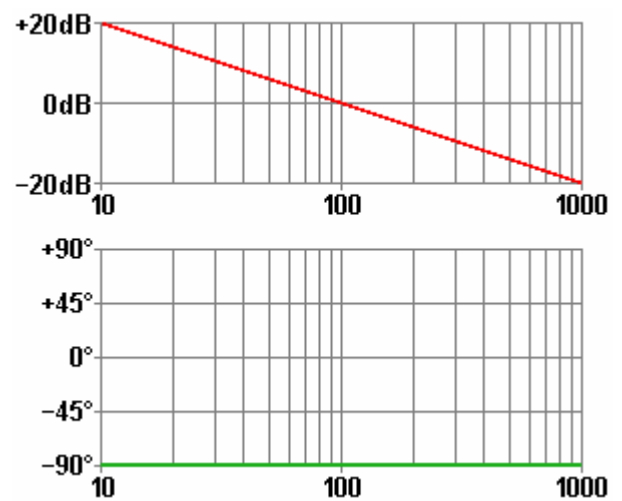
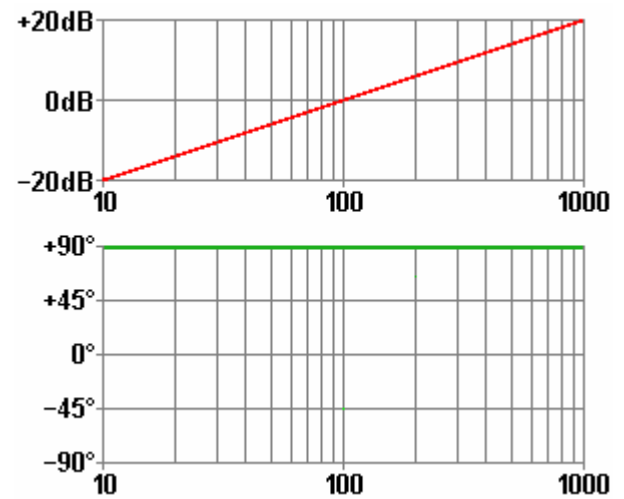
Az átvitelt az ω / ω_0 arány határozza meg.

Ha $\omega \ll \omega_0$, akkor $A_{u_{dB}} = 0$ dB;

Ha $\omega = \omega_0$, akkor $A_{u_{dB}} = 20 \log \sqrt{2} \approx 3$ dB;

Ha $\omega \gg \omega_0$, akkor $A_{u_{dB}} = + 20$ dB / D.

Az átvitel $1 / \tau = \omega_0$ körfrekvenciáig a 0dB tengelyben halad, felette 20dB/D meredekséggel emelkedik. Törésponti körfrekvencián az átvitel 3,01dB. A fázismenet $\arctan(\omega / \omega_0)$ alapján a töréspont alatt 0°-kal indul, törésponti frekvencián 45° és felette tart a 90°-hoz.



Integráló jellegű normál elsőfokú tag:

$$A_u(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega\tau}$$

$$A_{u_{dB}} = 20 \log 1 - 20 \log \sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}$$

Az átvitelt az ω / ω_0 arány határozza meg.

Ha $\omega \ll \omega_0$, akkor $A_{u_{dB}} = 0 \text{ dB}$;

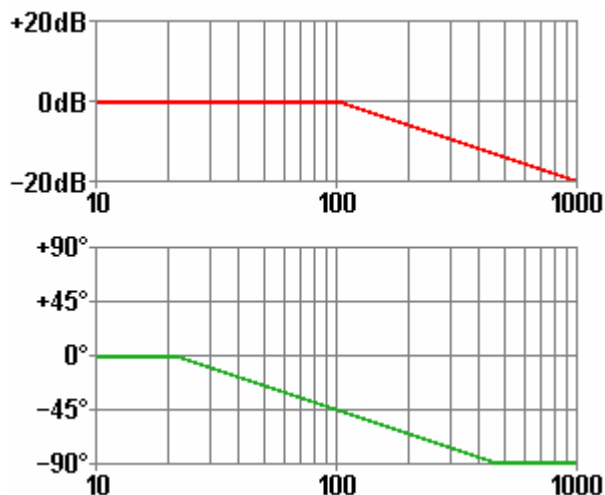
Ha $\omega = \omega_0$, akkor $A_{u_{dB}} = -20 \log \sqrt{2} \approx -3 \text{ dB}$;

Ha $\omega \gg \omega_0$, akkor $A_{u_{dB}} = -20 \text{ dB} / D$.

Az átvitel $1 / \tau = \omega_0$ körfrekvenciáig a 0dB ten-

gelyben halad, felette -20 dB/D meredekséggel csökken. Törésponti körfrekvencián az átvitel $-3,01 \text{ dB}$. A fázismenet a komplex alakú függvény nevezőjének átalakítása után $\arctan(-\omega / \omega_0)$ alapján a töréspont alatt 0° -kal indul, törésponti frekvencián -45° és felette tart a -90° -hoz.

A két utolsó karakterisztikát töréspontosnak nevezzük, mert az amplitúdó és fázis menetet egyenesekkel közelítjük. A legnagyobb eltérés a törésponti frekvenciákon lép fel, ami $\pm 3 \text{ dB}$, de ez a hiba a frekvenciamenetek jellegét és kiértékelhetőségét nem befolyásolja.



Mintapéldák passzív négypólusok frekvenciamenetének meghatározására

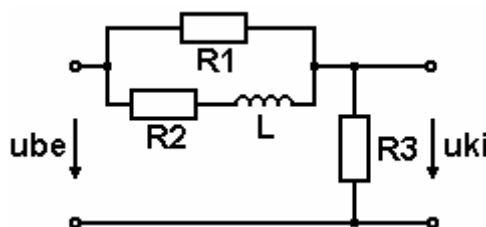
1. Példa: az adott passzív négypólus adatai:

$$R1 = 20 \text{ k}\Omega$$

$$R2 = 12 \text{ k}\Omega$$

$$R3 = 5 \text{ k}\Omega$$

$$L = 848 \text{ mH}$$



Az amplitúdó-fázis karakterisztika meghatározásához a komplex átviteli függvény:

$$A_u(j\omega) = \frac{R3}{R1 \otimes (R2 + jX_L) + R3} = \frac{R3}{\frac{R1 \cdot (R2 + j\omega L)}{R1 + R2 + j\omega L} + R3}$$

A nevezőből a tört nevezőjével szorozva:

$$A_u(j\omega) = \frac{R3 \cdot (R1 + R2 + j\omega L)}{R1 \cdot (R2 + j\omega L) + R3 \cdot (R1 + R2 + j\omega L)}$$

A nevezőben a szorzásokat elvégezve és a képzetes tagokat összevonva:

$$A_u(j\omega) = \frac{R3 \cdot (R1 + R2 + j\omega L)}{R1 \cdot R2 + j\omega L \cdot R1 + R3 \cdot (R1 + R2) + j\omega L \cdot R3}$$

$$A_u(j\omega) = \frac{R_3 \cdot (R_1 + R_2 + j\omega L)}{R_1 \cdot R_2 + R_3 \cdot (R_1 + R_2) + j\omega L \cdot (R_1 + R_3)}$$

Alaptagra alakítás kiemelésekkel:

$$A_u(j\omega) = \frac{R_3 \cdot (R_1 + R_2) \cdot \left(1 + j\omega \frac{L}{R_1 + R_2}\right)}{[R_1 \cdot R_2 + R_3 \cdot (R_1 + R_2)] \cdot \left(1 + j\omega \frac{L \cdot (R_1 + R_3)}{R_1 \cdot R_2 + R_1 \cdot R_3 + R_2 \cdot R_3}\right)}$$

A konstans tag és a nevezőben az időállandó rendezése:

$$A_u(j\omega) = \frac{R_3}{R_1 \otimes R_2 + R_3} \cdot \frac{1 + j\omega \frac{L}{R_1 + R_2}}{1 + j\omega \frac{L}{R_2 + R_1 \otimes R_3}}$$

Az ábrázoláshoz a szükséges adatok:

Konstans = 0,4

Számláló időállandó = 26,5 μ s

Nevező időállandó = 53 μ s

$\Rightarrow A_{u\text{dB}} = -8 \text{ dB}$

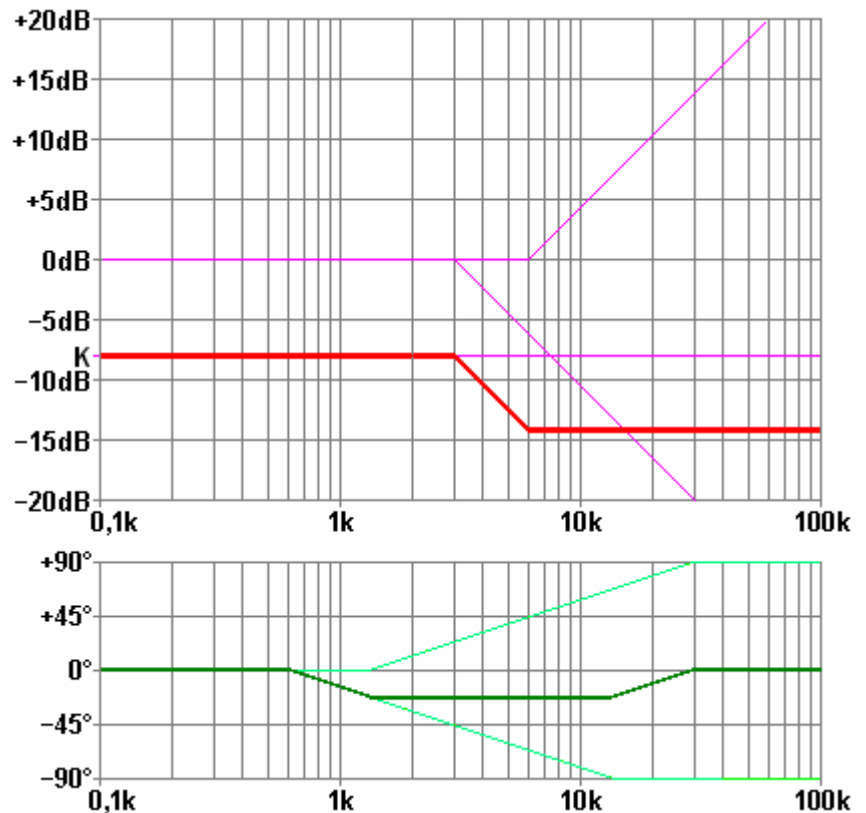
$\Rightarrow f_{\text{osz}} = 6 \text{ kHz}$

$\Rightarrow f_{\text{on}} = 3 \text{ kHz}$

A karakterisztikák:

A vékony vonal az alaptagokat, a vastag vonal az eredőt jelenti.

Érdemes megfigyelni, hogy nagyfrekvencián, csak az R_1 és R_3 alkot feszültségosztót. Az átvitel 0,2, mely logaritmikus egységben -14dB . Ez a szerkesztéssel adódó érték az amplitúdó meneten jól látszik. Az átviteli függvény számlálója 0-ról 90° -ra, a nevezője 0-ról -90° -ra forgató alaptag. A fázismenetet a két alaptag fázisforgatásának összegzése határozza meg. A legnagyobb fázistolás a két töréspont között sávközépen, $\sqrt{6 \cdot 3} = 4,24 \text{ kHz}$ -en jön létre. Ezt a frekvenciát a komplex tagokba helyettesítve és a számláló és nevező fázistolásának különbségét képezve, $-19,5^\circ$ adódik.



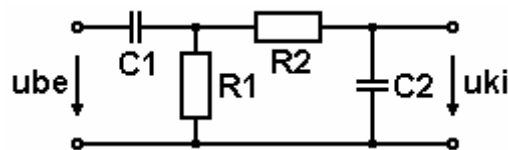
2. Példa: az adott passzív négyfólyus adatai:

$$R1 = 10 \text{ k}\Omega$$

$$R2 = 20 \text{ k}\Omega$$

$$C1 = 800 \text{ nF}$$

$$C2 = 4 \text{ nF}$$



Az amplitúdó-fázis karakterisztika meghatározásához a komplex átviteli függvény:

$$A_u(j\omega) = \frac{R1 \otimes \left(R2 + \frac{1}{j\omega C2} \right)}{R1 \otimes \left(R2 + \frac{1}{j\omega C2} \right) + \frac{1}{j\omega C1}} \cdot \frac{\frac{1}{j\omega C2}}{R2 + \frac{1}{j\omega C2}}$$

A replusz műveletet kifejtve:

$$A_u(j\omega) = \frac{\frac{R1 \cdot \left(R2 + \frac{1}{j\omega C2} \right)}{R1 + R2 + \frac{1}{j\omega C2}}}{\frac{R1 \cdot \left(R2 + \frac{1}{j\omega C2} \right)}{R1 + R2 + \frac{1}{j\omega C2}} + \frac{1}{j\omega C1}} \cdot \frac{1}{1 + j\omega R2 \cdot C2}$$

Az első törtet $R1$ -el végigosztva, a számláló nevezőjével végigszorozva:

$$A_u(j\omega) = \frac{R2 + \frac{1}{j\omega C2}}{R2 + \frac{1}{j\omega C2} + \frac{R1 + R2 + \frac{1}{j\omega C2}}{j\omega C1 \cdot R1}} \cdot \frac{1}{1 + j\omega R2 \cdot C2}$$

Az első törtet $j\omega C2$ -vel szorozva:

$$A_u(j\omega) = \frac{1 + j\omega R2 \cdot C2}{1 + j\omega R2 \cdot C2 + \frac{1 + j\omega(R1 + R2) \cdot C2}{j\omega R1 \cdot C1}} \cdot \frac{1}{1 + j\omega R2 \cdot C2}$$

Az első tört számlálója, a második tört nevezőjével egyszerűsíthető, ill. a nevezőt rendezve:

$$A_u(j\omega) = \frac{j\omega R1 \cdot C1}{(1 + j\omega R2 \cdot C2) \cdot j\omega R1 \cdot C1 + j\omega(R1 + R2) \cdot C2 + 1}$$

A nevezőben a szorzásokat elvégezve, rendezés után a másodfokú nevező:

$$A_u(j\omega) = \frac{j\omega R_1 \cdot C_1}{(j\omega)^2 R_1 \cdot C_1 \cdot R_2 \cdot C_2 + j\omega(R_1 \cdot C_1 + R_1 \cdot C_2 + R_2 \cdot C_2) + 1}$$

Az együtthatók számítása, figyelembe véve hogy $R_2 = 2 \cdot R_1$ és $C_2 = 0,005 C_1$:

$$\tau = R_1 \cdot C_1$$

$$a = R_1 \cdot C_1 \cdot R_2 \cdot C_2 = R_1 \cdot C_1 \cdot 2 \cdot R_1 \cdot 0,005 \cdot C_1 = 0,01 \tau^2$$

$$b = R_1 \cdot C_1 + R_1 \cdot C_2 + R_2 \cdot C_2 = R_1 \cdot C_1 + R_1 \cdot 0,005 \cdot C_1 + 2 \cdot R_1 \cdot 0,005 \cdot C_1 = 1,015 \tau$$

Az együtthatók behelyettesítése:

$$A_u(j\omega) = \frac{j\omega \tau}{(j\omega)^2 0,01 \tau^2 + j\omega 1,015 \tau + 1}$$

A nevező megoldása:

$$j\omega_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4 \cdot a \cdot c}}{2 \cdot a} = \frac{-1,015 \tau \pm \sqrt{(1,015 \tau)^2 - 4 \cdot 0,01 \tau^2}}{2 \cdot 0,01 \tau^2}$$

Megoldások:

$$j\omega_1 = -\frac{0,995}{\tau} \quad j\omega_2 = -\frac{100,5}{\tau}$$

A gyöktényezős alak az " $a \cdot (x - x_1) \cdot (x - x_2)$ " alapján:

$$0,01 \cdot \tau^2 \cdot (j\omega + \frac{0,995}{\tau}) \cdot (j\omega + \frac{100,5}{\tau})$$

Alaptagra alakításhoz az időállandós tagok kiemelése:

$$A_u(j\omega) = \frac{j\omega \cdot \tau}{\left(1 + j\omega \frac{\tau}{0,995}\right) \left(1 + j\omega \frac{\tau}{100,5}\right)} = \frac{j\omega \cdot \tau}{(1 + j\omega \cdot 1,005 \cdot \tau) \cdot (1 + j\omega \cdot 0,00995 \cdot \tau)}$$

Az ábrázoláshoz a szükséges adatok:

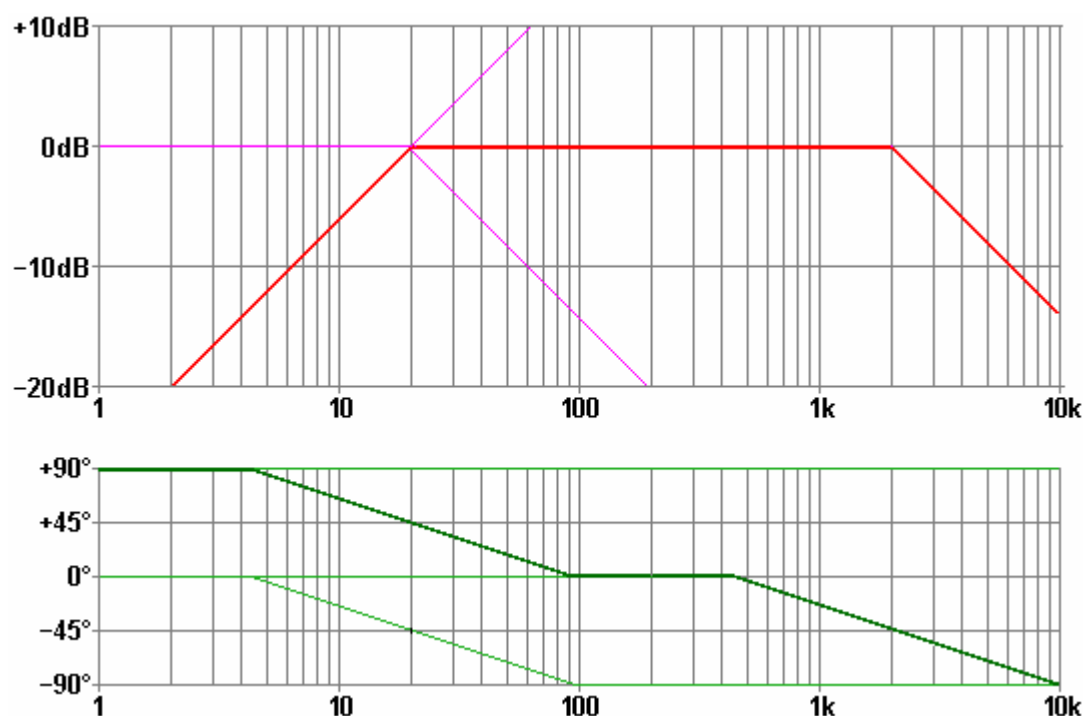
$$\tau_{\text{számláló}} = R_1 \cdot C_1 = 8 \text{ ms} \quad \Rightarrow \quad f_{\text{számláló}} = 19,89 \text{ Hz}$$

$$\tau_{\text{nevező1}} = 1,005 \cdot R_1 \cdot C_1 = 8,04 \text{ ms} \quad \Rightarrow \quad f_{\text{nevező1}} = 19,79 \text{ Hz}$$

$$\tau_{\text{nevező2}} = 0,00995 \cdot R_1 \cdot C_1 = 0,0796 \text{ ms} \quad \Rightarrow \quad f_{\text{nevező2}} = 1999,4 \text{ Hz}$$

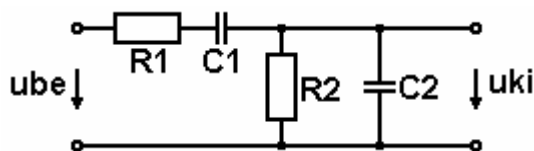
A karakterisztikák:

A vékony vonal az alaptagokat, a vastag vonal az eredőt jelzi. Az amplitúdó karakterisztikán a két töréspont közötti tartományt sáv szélességnek nevezzük. Azt a frekvenciát ahol a négypólus kimenő feszültségének fázishelyzete $\pm 45^\circ$, alsó illetve felső határfrekvenciának nevezzük. A két határfrekvencia különbsége a sáv szélesség, mértani középértéke a sávközépi frekvencia. Jelen esetben $\sqrt{f_a \cdot f_f} = 200 \text{ Hz}$. A feszültség átviteli tényező eltérése a határfrekvenciákon a sávközéphez viszonyítva $\pm 3\text{dB}$.



3. Példa: Wien osztó frekvencia menetének meghatározása:

A Wien-osztó egy soros és egy párhuzamos RC tagokból álló feszültségosztó. Általános esetben az ellenállások és a kondenzátorok is különböző értékűek.



A négypólus komplex átviteli függvénye:

$$A_u(j\omega) = \frac{R_2 \otimes \frac{1}{j\omega C_2}}{R_1 + \frac{1}{j\omega C_1} + R_2 \otimes \frac{1}{j\omega C_2}}$$

A kijelölt műveleteket elvégezve és az összefüggést rendezve:

$$A_u(j\omega) = \frac{j\omega C_1 R_2}{(j\omega)^2 C_1 C_2 R_1 R_2 + j\omega(C_1 R_1 + C_1 R_2 + C_2 R_2) + 1}$$

A másodfokú nevező együtthatói az alkatrész adatok alapján:

$$A = C_1 C_2 R_1 R_2 \quad B = C_1 R_1 + C_1 R_2 + C_2 R_2 \quad C = 1$$

A másodfokú egyenlet megoldása után a gyökök: ω_1 és ω_2

A számláló időállandója alapján: $\omega_3 = 1 / C_1 R_2$

Az alaptagra bontott ábrázolható átviteli függvény:

$$A_u(j\omega) = \frac{1}{\left(1 + j\frac{\omega}{\omega_1}\right)} \cdot \frac{1}{\left(1 + j\frac{\omega}{\omega_2}\right)} \cdot j\frac{\omega}{\omega_3}$$

Az általános eseten kívül ha $R_1 = R_2 = R$ és $C_1 = C_2 = C$, akkor az átviteli függvény:

$$A_u(j\omega) = \frac{j\omega RC}{(j\omega RC)^2 + 3j\omega RC + 1}$$

A nevező alaptagra bontásához legyen $j\omega RC = x$, amivel a másodfokú egyenlet:

$$Ax^2 + Bx + C \text{ együtthatókkal } x^2 + 3x + 1 = 0$$

Az egyenlet gyökei, a megoldó képlettel: $x_1 = -2,618$ és $x_2 = -0,382$.

Az $A(x - x_1)(x - x_2)$ gyöktényezős alakba helyettesítve:

$$A(j\omega RC + 2,618)(j\omega RC + 0,382)$$

A két gyök szorzata és az A együttható is $= 1$, tehát kiemelés után:

$$\left(1 + j\omega \frac{RC}{2,618}\right) \left(1 + j\omega \frac{RC}{0,382}\right)$$

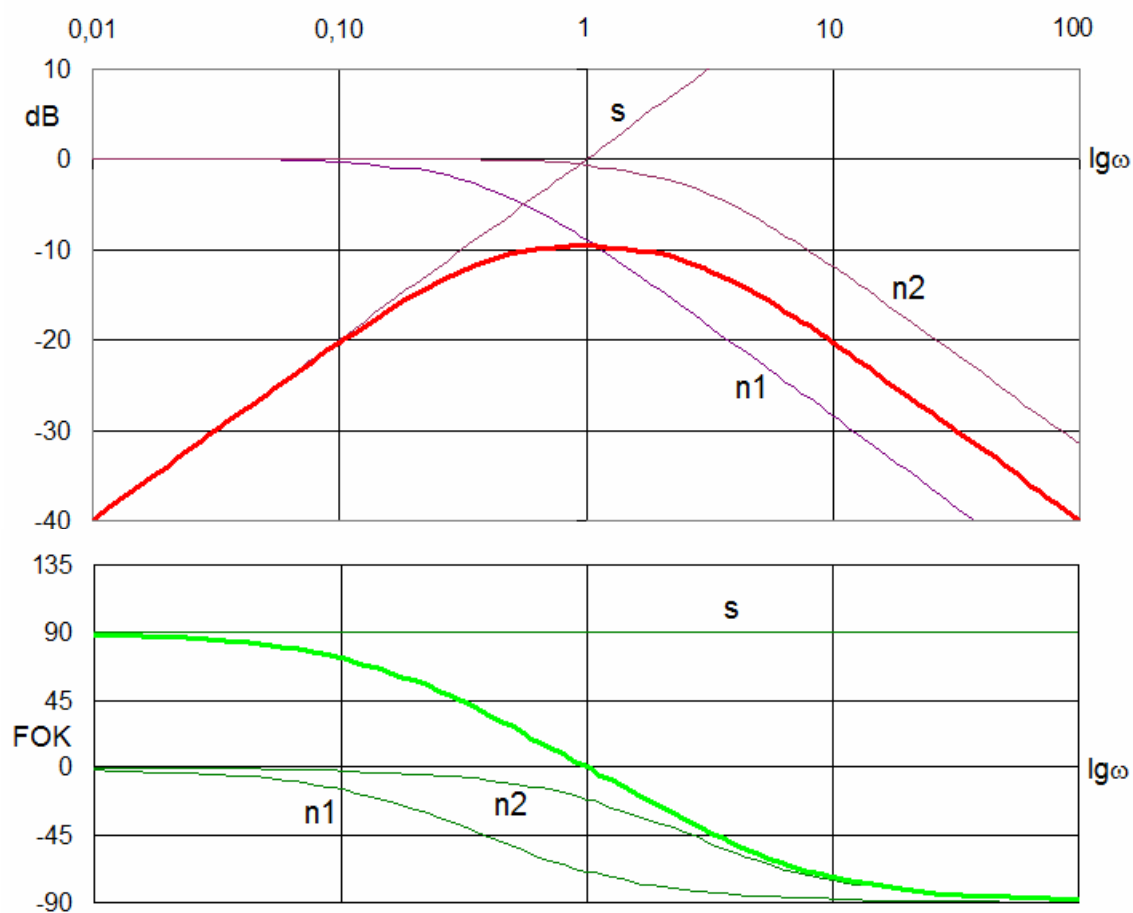
Az alaptagra bontott átviteli függvény:

$$A_u(j\omega) = \frac{j\omega RC}{\left(1 + j\omega \frac{RC}{2,618}\right) \left(1 + j\omega \frac{RC}{0,382}\right)}$$

A törésponti frekvenciák:

$$\omega_{sz} = \frac{1}{\tau_{sz}} = \frac{1}{RC} = 1 \quad \omega_{n1} = \frac{1}{\tau_{n1}} = \frac{2,618}{RC} = 2,618 \quad \omega_{n2} = \frac{1}{\tau_{n2}} = \frac{0,382}{RC} = 0,382$$

Az amplitúdó és fázis frekvenciamenet:



A Wien-osztó $\omega_0 = 1 / RC$ frekvencián $1/3$ -ot csillapít (-9,5 dB) és fázisforgatása 0° .
