

ELMÉLETI ÉS MÉRÉSI ALAPISMERETEK

Az oszcilláció magyarul rezgést jelent. Az oszcillátorok olyan váltakozófeszültségű generátorok, melyek az idő függvényében meghatározott jelalakú, amplitúdójú és frekvenciájú rezgést állítanak elő. Jelalak szempontjából megkülönböztetünk: szinuszos-, háromszög- és négyszögoszcillátorokat. Szinuszos oszcillátorokat alkalmazunk pl. az adás- és vételtechnikában, a távközlésben, a számítástechnikában és a mérés technikában.

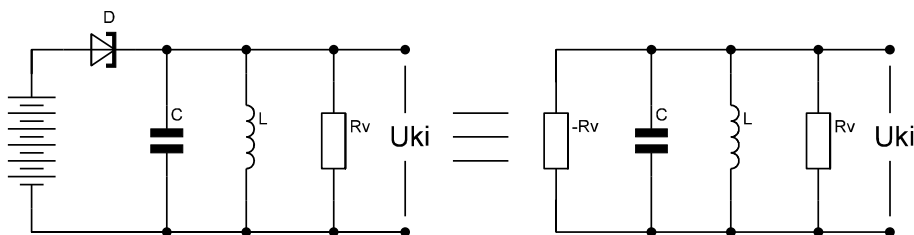
A szinuszos oszcillátorokat más néven harmonikus oszcillátoroknak is nevezzük. Minden oszcillátornak szerves része a frekvenciameghatározó hálózat, mely általában LC-, RC-, kvarckristály. Ettől eltérő a felépítése az elosztott paraméterű rezgőkörös oszcillátoroknak (jelen ismertetőnek ez nem része).

Mindezek tükrében két módszer adódik a csillapítatlan, szinuszos, villamos rezgések előállítására:

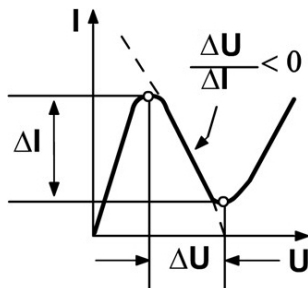
- Negatív differenciális ellenállás-karakterisztikaszakasszal rendelkező elemet tartalmazó, úgynevezett belső visszacsatolású oszcillátorok;
- Pozitív visszacsatolású oszcillátorok.

Negatív ellenállást tartalmazó oszcillátorok

Az oszcilláció feltételezi a csillapítatlan, állandó amplitúdójú rezgések keltését és annak fenntartását. Ezek előállítására az egyik lehetőség az, hogy a rezgőkör veszteségi ellenállásával megegyező nagyságú negatív ellenállást kapcsolunk a rezgőkörbe. Így módon a rendszer veszteségmentes lesz, tehát a rezgés csillapítatlan. Negatív ellenállást valósít meg egy tartományban a tetróda és az alagútdióda. Az alagút dióda előnye a tetródával szemben, hogy kétpólus. Egy ilyen oszcillátor vázlata látható a 1. ábrán.

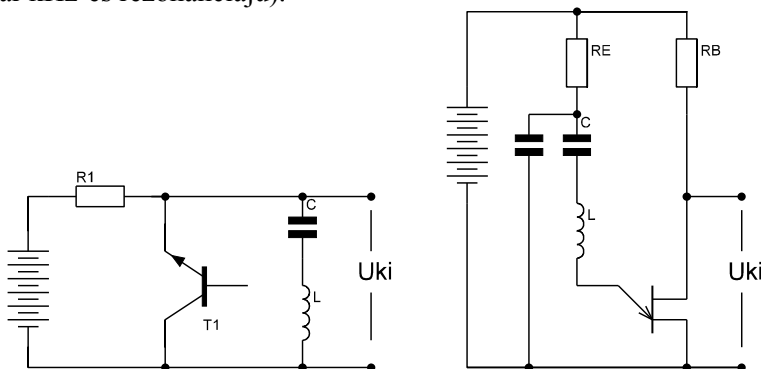


1. ábra alagútdiódás oszcillátor

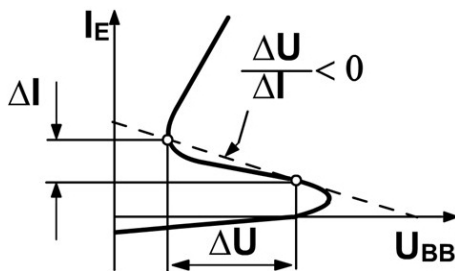
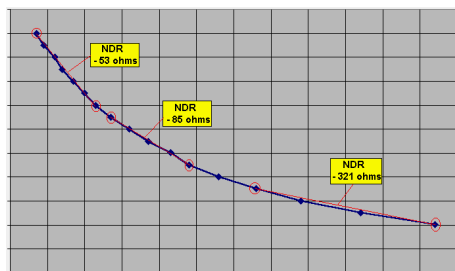


2. ábra negatív differenciális ellenállászakasszal rendelkező alagút-dióda feszültség-áram karakterisztikája

Hasonlóan jó tulajdonságokkal rendelkező oszcillátorok realizálhatók negisztor, valamint UJT alkalmazása esetén. Ezeknek az oszcillátoroknak a különlegessége az, hogy jóval alacsonyabb frekvenciatartományban üzemeltethetők, mint az alagút-diódás oszcillátor (akár kHz-es rezonanciájú).



3. ábra negatív differenciális ellenállászakasszal rendelkező Negisztorral és UJT-vel felépített oszcillátorok



4. ábra negatív differenciális ellenállászakasszal rendelkező Negisztor és UJT karakterisztikái

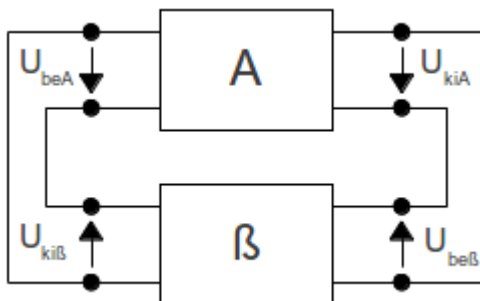
Visszacsatolt oszcillátorok

Legyen az erősítőfokozat erősítése A , fázistolása φ_A , a visszacsatoló hálózaté pedig β , illetve φ_β . Pozitív visszacsatolás csak szűk hurokerősítésű tartományban állhat fenn. Ha pozitív visszacsatolás esetén a hurokerősítés megközelíti az 1-et, az erősítés az

$$A_v = \frac{A}{1 - A\beta}$$

összefüggés alapján a megengedhető határon túl növekedne. Az $A\beta = 1$ értéknél állapotváltozás következik be: a visszacsatolt erősítő begerjed, oszcillátorrá alakul. Az oszcillátor tehát olyan áramkör, amely vezérlőjelet nem kap és a következő szerkezeti alapelemeket tartalmazza:

- frekvencia-meghatározó elem, hálózat;
- erősítő fokozat(ok);
- amplitúdóhatároló elemek, amelyek az erősítő szerves részei.



5. ábra Az oszcillátorok elvi tömbvázlata

Az oszcillátor rezgésének feltétele, hogy az erősítőfokozat kimeneti feszültsége egyenlő legyen a visszacsatoló hálózat bemeneti feszültségével:

$$U_{kiA} = U_{be\beta} = \beta A U_{kiA} \quad \Rightarrow \quad \text{tehát a hurokerősítés: } H = A\beta = 1$$

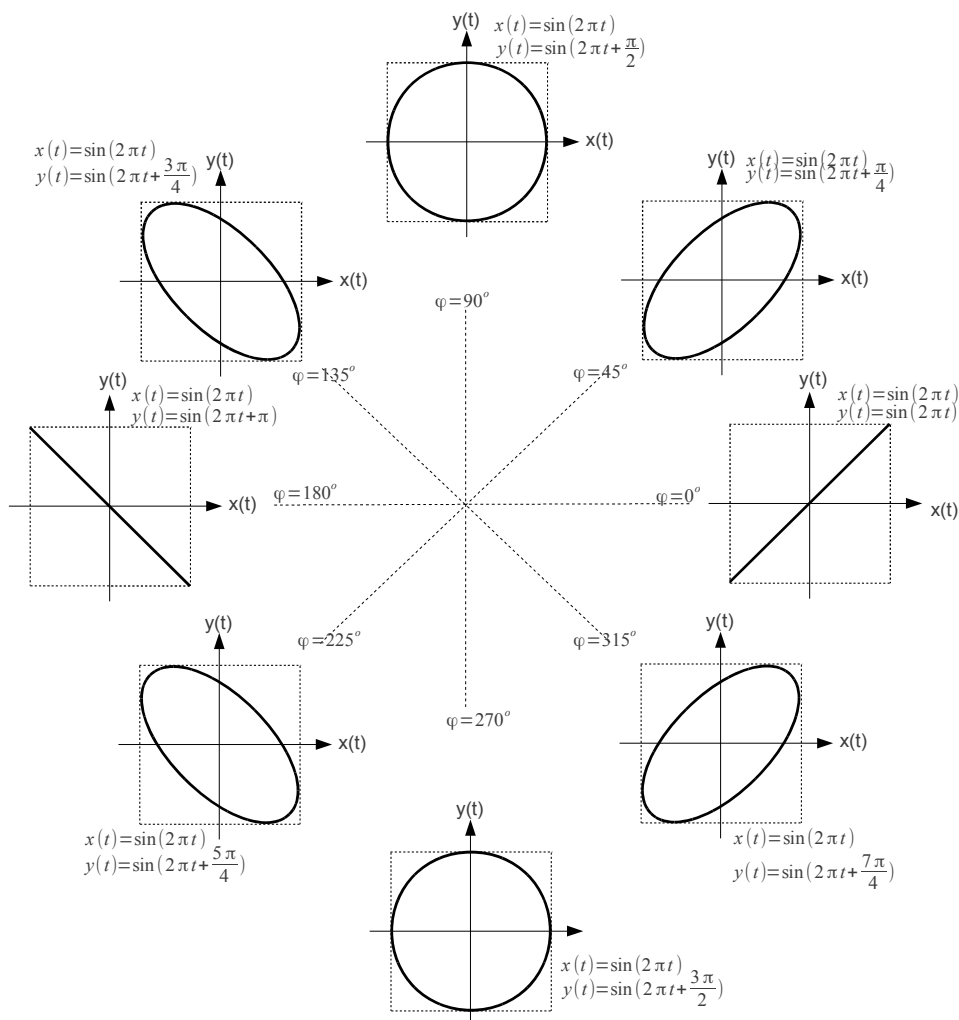
Mínthogy pozitív visszacsatolásról van szó, a kimeneti és a bemeneti feszültség fázisának is meg kell egyeznie. Ebből adódik a következő két feltétel:

$$|H| = |A||\beta| = 1 \quad \text{és} \quad \varphi_A + \varphi_\beta = 0 \pm k2\pi$$

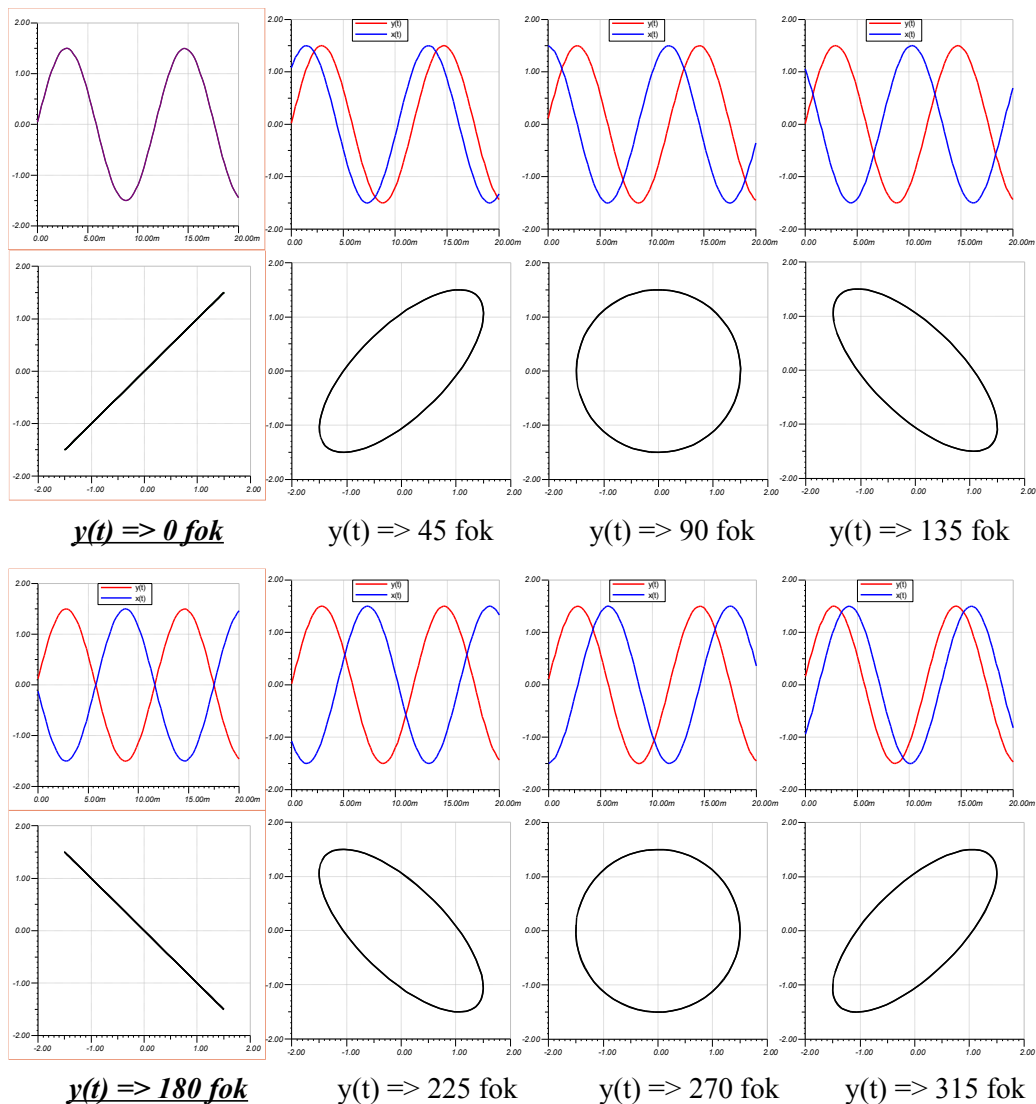
ahol az φ_A az erősítőfokozat fázistolása, a φ_β a visszacsatoló hálózat fázistolása és a k egész szám.

Az oszcilláció kettős feltétel együttes teljesülése esetén jön létre:

- fázisfeltételt maga a visszacsatoló hálózat biztosítja [β], természetesen a visszacsatoló hálózat fázistolásához kell megtervezni az erősítőfokozatot, illetve annak fázistolását; az oszcillációs frekvencián 0, vagy 180 fokos (2π) a szelektív hálózat fázistolása, így a fázisfeltétel teljesüléséhez ekképpen kell igazítani az erősítőfokozat fázisforgatását;
- amplitúdófeltétele pedig a hurokerősítés egységnyi ($H = A\beta = 1$), illetve az oszcilláció beindulása érdekében vagy ennél nagyobb értéke : $H = A\beta > 1$



6. ábra Lissajous-ábrák két, azonos frekvenciájú jel fázishelyzetének megállapításához



7. ábra fázismérés oszcilloszkóppal

Kétsugaras oszcilloszkóppal lehetőségünk van két, azonos frekvenciájú jel közötti fáziseltérés mérésére (7. ábra). A felső ábrarészletek esetén a két függőleges csatornát (Y) használjuk, az alsó ábrarészleteknél (Lissajous-ábrák) pedig az egyik jelet a függőleges (Y), a másikat pedig a vízszintes (X) eltérítőrendszere kapcsoljuk. Mint ismert: az oszcillációs frekvencián – felépítéstől függően – 0 (azonos fázisú) és 180 fokos (ellenfázisú) lehet a fázisforgatása mind az erősítőnek, mind pedig a szelektív hálózatnak. Eme ábrarészleteket narancs színnel emeltük ki.

A szinuszos oszcillátorok visszacsatoló hálózata olyan, hogy csak egy frekvencián teljesíti a gerjedés feltételét, és a visszacsatolás folyamatosan fennáll, mert az erősítő ezen a frekvencián erősít annyit, mint amennyit a visszacsatoló hálózat csillapít.

Az erősítő mindig termel zajt. A zajban minden frekvenciájú jel egyforma valószínűséggel előfordul, az a frekvencia is, ahol adott a berezgés feltétele. Ez a zajösszetevő az alapja az oszcilláció megindulásának. Az oszcillátorok tehát mindig zajból gerjednek be.

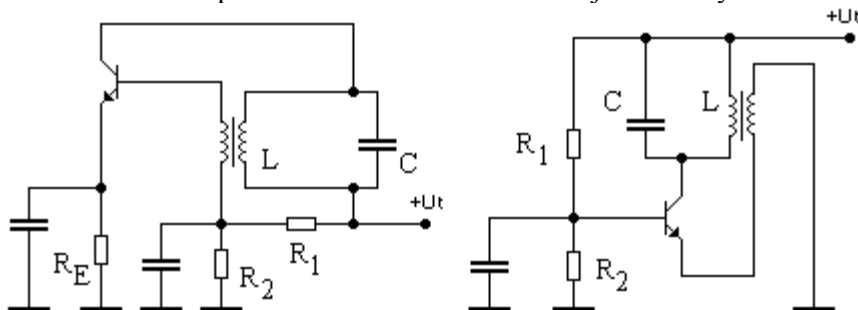
A szinuszos oszcillátorokban a frekvencia-meghatározó elem lehet:

- LC-rezgőkör;
- RC-hálózat (esetleg RL, de ezt ritkán alkalmaznak a tekercs nagy mérete, valamint az alacsony frekvencia-stabilitás miatt);
- rezgőkvarc;
- elosztott paraméterű rezgőkör.

Amplitúdóhatárolás

Matematikailag igazolható, hogy az oszcilláció esetén a hurokerősítés minden határon túl exponenciálisan növekedne az idő függvényében. Ezért a rendszerben szükség van az amplitúdóhatárolásra. Az amplitúdóhatárolás rendszerint automatikusan létrejön az erősítő telítés jellegű transzfer karakterisztikája következtében, vagy erről külön áramköri elemek gondoskodnak a kapcsolásban. Eszerint megkülönböztetünk *belső- és külső amplitúdóhatárolást*. Az LC-oszcillátorok többségében belső amplitúdóhatárolás jön létre (noha ez attól is függ, hogy mi az aktív elem: tranzisztor, FET vagy elektroncső). Többször van szükség az RC oszcillátorok esetében a külső amplitúdó-határolásra, pl. akkor, ha az erősítő elem egy műveleti erősítő.

A 6. ábrán egy Meißner-oszcillátor kapcsolási rajza látható. Itt az emitter-bázis dióda végzi a határolást. A bekapcsolást követően a hurokban a jelszint folyamatosan nő.



8. ábra és 9. ábra földelt emitteres, illetve földelt bázisú Meißner-oszcillátor

Amíg kicsi az erősítendő jel, addig a karakterisztikák lineárisnak tekinthetők, a tranzisztor működése egy A osztályú erősítőfokozatnak felel meg. Ha a szint már elegendően nagy, akkor a karakterisztikák nemlinearitása érvényesül. Az emitteráram már nem lesz szinuszos: torzul. A torzítás miatt megváltozik a középértéke, tehát az emitter egyenáram is. A változás növekvő irányú; az emitterellenállásra eső feszültség nő. Mivel a bázis feszültségét nagyáramú feszültség-osztóval állítjuk be, a bázisfeszültség állandó. Az emitter-feszültség növekedése tehát a tranzisztor munkapontjának záróirányú változását eredményezi. A munkapont itt is annál a rezgési amplitúdónál áll be, ahol a $A\beta = 1$ feltétel teljesül.

A belső határolás másik módját mutatja be az 7. ábrán levő földelt bázisú Meißner-oszcillátor, amely kapcsolási rajza alapján érthető meg. Ebben a megoldásban a kollektor-bázis dióda fejt ki a határoló, amplitúdóstabilizáló működést. Emitterellenállás nincs; a bázisosztót itt úgy méretezzük, hogy az árama sokkal nagyobb legyen, mint a bázisáram, mert ekkor a bázisáram változásai nem változtatják meg a bázisfeszültséget, még akkor sem, ha az emitteráram torzul. A bekapcsolást követően mindaddig nő a jelszint,

amíg a nagy jelamplitúdó mellett a pozitív csúcsokban - a periódus kis részében - a kollektorfeszültség kisebb lesz a bázisfeszültségnél. Ekkor nyit a kollektor-bázis dióda és a bázisáram ugrásszerűen megnő. Tulajdonképpen a kollektor-bázis dióda határoló működésének eredménye azonos a másik fajta határolás eredményével.

Nagyobb amplitúdóstabilitási és szigorúbb jeltorzítási követelmények esetén nem az erősítő elemet használják egyenirányítóként, hanem külön diódával egyenirányítják az oszcillátor kimeneti feszültségét. Az egyenirányított feszültséggel vagy közvetlenül, vagy egyenáramú erősítón keresztül állítjuk be az oszcillátor erősítő elemének munkapontját, s ezzel az erősítés nagyságát.

A határolás másik módszere: az oszcillátor erősítőjének szintfüggő negatív visszacsatolása (külső határolás). Ezt akkor alkalmazzuk, ha nagyobb pontossági- és torzítási követelményeket támasztunk az oszcillátorral szemben. Ekkor a gerjedést létesítő pozitív visszacsatolással együtt egy, az erősítés nagyságának beállítására szolgáló negatív visszacsatolást is alkalmaznak. A negatív visszacsatolást adó hálózat általában feszültségosztó, amelynek egyik eleme izzólámpa vagy termisztor (Wien-hidas oszcillátor). Ezek az úgynevezett kvázilineáris elemek; karakterisztikájuk a lineáristól keveset különbözik, nemlineáris torzítást alig okoznak, ellenállásuk szintfüggő, megváltozása a negatív visszacsatolás, és ezen keresztül az erősítés megváltozását okozza. Elsősorban RC-oszcillátorokban alkalmazzák ezeket a kvázi-lineáris hálózatokat. Emellett más kétpólussal, illetve négy-pólushálózattal is létrehozhatunk szintfüggő visszacsatolást. Korszerű eszközeinkben diódákat és diódás hálózatokat alkalmazunk.

Kis frekvencia-, valamint amplitúdó-stabilitású igény esetén elsősorban tehát RC-, és LC-oszcillátorokat alkalmazunk. Míg az RC-oszcillátorokat az alacsonyabb frekvenciatartományban (például a hangfrekvenciás mérések esetén), addig az LC-oszcillátorokat nagyobb, akár több száz MHz-es frekvencián is eredményesen működtethetünk. Nagy frekvencia-stabilitású igények esetén három lehetőségünk van:

- kvarcoszcillátorok: akár több száz MHz-es rezonanciafrekvencián, alap- és felharmonikus oszcillátorokban, hátránya kis mértékben hangolható, vagyis kicsi a frekvenciaátfogás;
- frekvenciaszintézeres, fáziszárt hurkos (PLL: Phase Locked Loop) LC-oszcillátorok alkalmazása, ahol az előállítandó frekvencia egy időalap-generátor jeléhez szinkronizált;
- [DDS](#) (Direct Digital Synthesis - Közvetlen Digitális Szintézis) céláramköröket alkalmaznak, melyekkel könnyedén állítható elő szinte bármilyen jelalak.

Mikrohullámú eszközökben alagút-diódás, Gunn-diódás, illetve az elosztott paraméterű rezgőkörös megoldások jöhetnek szóba.

Az 1. táblázatban összefoglaltuk néhány oszcillátortípus minőségi paraméterét.

Típus	Működési frekvencia-tartomány	Hangolhatóság (frekvencia-átfogás) $átfogás = \frac{f_{max}}{f_{min}}$	Frekvencia-pontos- ság $s = \frac{\Delta f}{f_0}$
RC	1 Hz - 10 MHz	1:10*	$10^{-2} - 10^{-4}$
LC	10 kHz – 1 GHz	1:√10 **	$10^{-2} - 10^{-5}$
Kvarc	10 kHz - 1 GHz	***	$10^{-6} - 10^{-7}$
Termosztált kvarc	10 kHz - 1 GHz	***	$10^{-8} - 10^{-10}$

1. táblázat

*: az RC-oszcillátorok általános körfrekvencia-meghatározó képlete az $\omega_0 = \frac{1}{RC}$.

Amennyiben egy elemet hangolunk, akkor célszerű ennek megfelelően egy dekádos elemértékátfogást választva (1:10 esetén pl. 1 kΩ – 10 kΩ), a körfrekvenciaátfogás 1:10 értékű lesz.

** : LC oszcillátorok rezonancia-körfrekvencia képlete: $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$. Egy elem hangolása és 1:10-es értékátfogása esetén a körfrekvenciaátfogás 1:√10 értékűre adódik.

***: a kvarc-oszcillátorok (kör)frekvenciaátfogása 1:1 közeli értéket biztosít. Ennek az az oka, hogy a rezonancia-frekvenciát csak néhány milliomodnyi értékkel hangolhatjuk el (pl. egy 1 MHz kvarc esetén néhány Hertz).

AZ OSZCILLÁTOROK MÉRÉSE

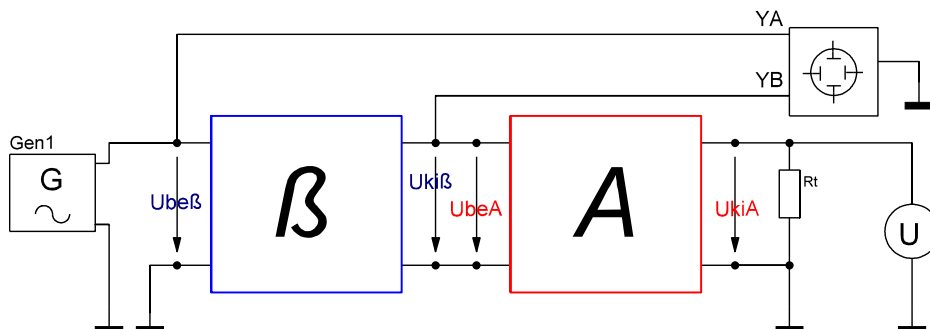
Az oszcillátorok műszeres megismerése során a következő méréscsoportokat különböztethetjük meg:

1. Munkaponti mérések: melyek során az oszcillátor erősítőáramkörének egyenáramú munkaponti jellemzőit mérik.

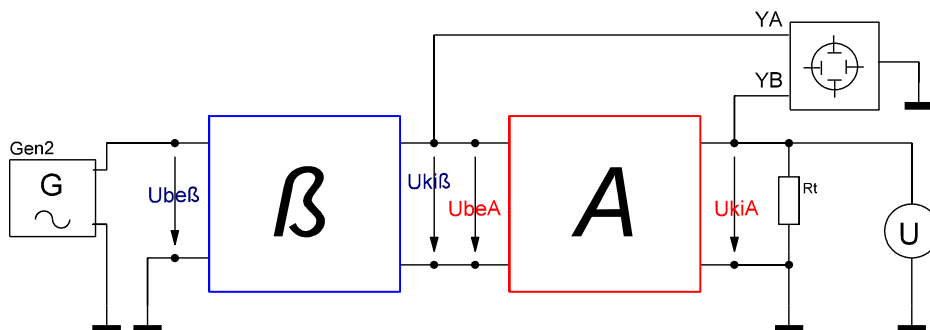
- munkaponti egyenfeszültségek oszcillációmentesen;
- munkaponti áramok oszcillációmentesen;
- munkaponti áramok oszcilláció mellett, üzemi terheléssel lezárt kimenet.

2. Az oszcilláció feltételeinek mérése, nyitott hurkú mérések:

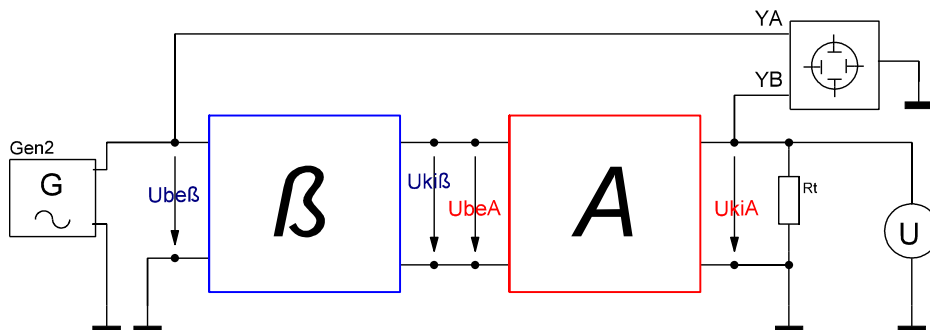
- *a hurokerősítés frekvenciafüggésének mérése (átviteli karakterisztika);*
- *a frekvenciameghatározó hálózat amplitúdó- és fáziskarakterisztikája;*
- *az erősítési- $[A]$ és visszacsatolási tényező mérése;*
- *a rezonanciafrekvencia megállapítása;*
- *az amplitúdófeltétel igazolása és a fázisfeltétel igazolása;*
- *a szintfüggő erősítés mérése (be- és kimeneti feszültség karakterisztika).*



10. ábra a nyitott hurok jellemzőinek mérése: β , φ_β



11. ábra a nyitott hurok jellemzőinek mérése: A , φ_A



12. ábra a nyitott hurok jellemzőinek mérése: H , φ , szintfüggő erősítés

A visszacsatolási tényező frekvenciafüggése (átviteli karakterisztika) és a visszacsatoló hálózat fázistolásának mérése (fáziskarakterisztika) => 10. ábra

A visszacsatolási tényező: $\beta = \frac{U_{ki\beta}}{U_{be\beta}}$.

A visszacsatoló hálózat fázistolása a rezonancián: $\varphi_\beta = k\pi$, mely hálózathatófüggő, és ahol k eleme egész szám.

Az erősítési tényező frekvenciafüggése (átviteli karakterisztika) és az erősítő hálózat fázistolásának mérése (fáziskarakterisztika) => 11. ábra

A visszacsatolási tényező: $A = \frac{U_{kiA}}{U_{beA}}$

A visszacsatoló hálózat fázistolása a rezonancián: $\varphi_A = k\pi$, mely hálózathatófüggő, és ahol k eleme egész szám.

A hurokerősítés frekvenciafüggése (átviteli karakterisztika), az amplitúdófeltétel és az nyitott hurok fázistolásának mérése (fáziskarakterisztika) => 12. ábra

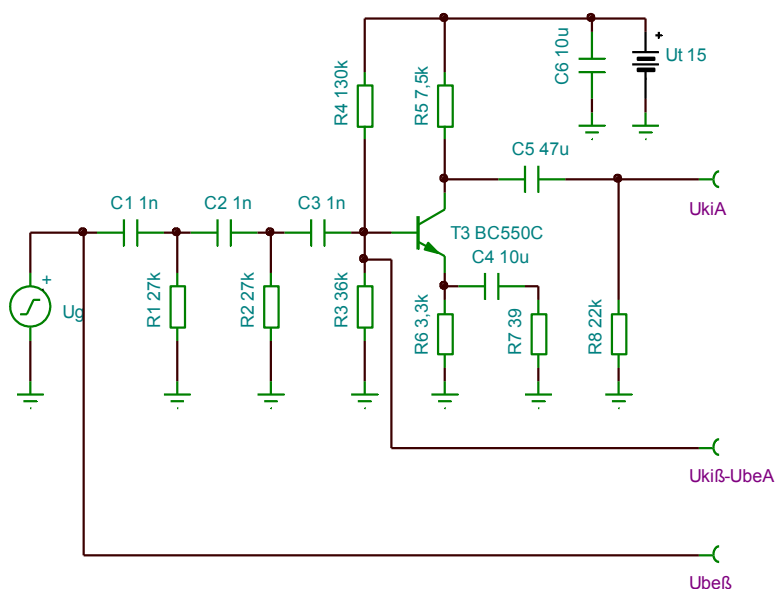
A hurokerősítés: $H_{f_0} = A\beta \geq 1$

A teljes hurok fázistolása a rezonancián: $\varphi = \varphi_A + \varphi_\beta = k\pi + k\pi = k2\pi = 0 \text{ fok}$, ahol k eleme egész szám.

A szintfüggő hurokerősítés mérése => 12. ábra: A rezonancia-frekvencián a teljes nyitott hurok vizsgálata: a bemeneti feszültség függvényében mérjük a kimeneti

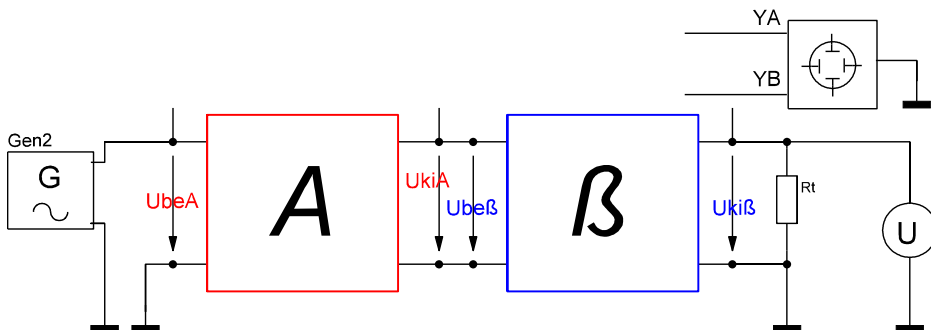
feszültséget: $H_{szintfüggő} = A\beta = \frac{U_{kiA}}{U_{be\beta}}$, majd felvesszük a karakterisztikát.

A 10-12. ábra szerinti mérési elrendezésben eredményesen lehet vizsgálni például a fázistolós, az áthidalt T-tagos, a kettős T-tagos, valamint alapkapsolás függvényében a hárompont-kapsolású oszcillátorokat. Ilyen konkrét példát mutat a 13. ábra.

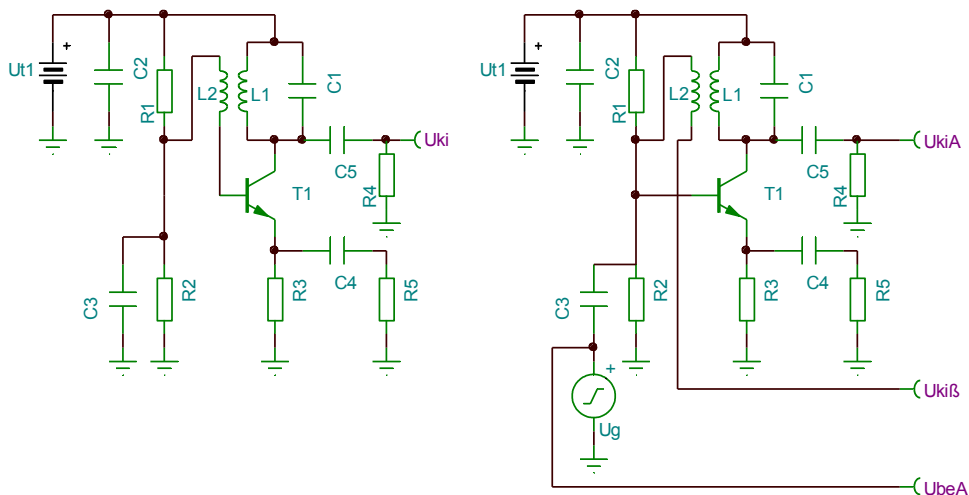


13. ábra a fázistolós oszcillátor nyitott hurkú mérése

Más a helyzet az olyan oszcillátorok esetében, ahol a visszacsatoló hálózat (szelektív hálózat) az erősítőáramkör szerves, nehezen elkülöníthető része. Ilyen kapcsolás például az Armstrong-Meißner oszcillátor (hangolt kollektoros felépítés). Ebben az esetben a nyitott hurkú mérés lényegében a szelektív erősítő mérőkörével azonos. Ennek blokkvázlatát tekinthetik meg a 14. ábrán, a mérőkör konkrét kapcsolási rajzát pedig a 15. ábrán. Az aktuális mérőpontok variációja itt is a 10-12. ábra szerint alakul.



14. ábra nyitott hurkú mérőkör (szelektív erősítő: a szelektív hálózat az erősítő szerves része)



15. ábra példa: az Armstrong-Meißner-oszcillátor és nyitott hurkú mérőkörének kapcsolási rajza

3. Az oszcillációs jellemzők mérése, zárt hurkú mérések

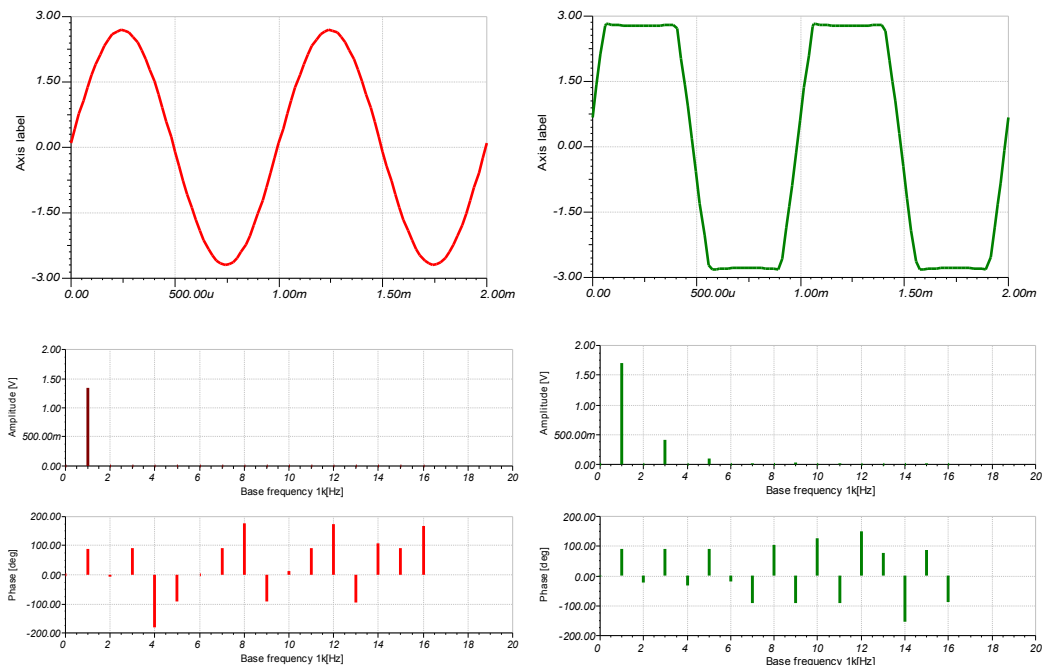
- *A frekvenciastabilitás mérése (elvárásunk: a rezgési frekvencia legyen állandó az idő függvényében):* a kívánt rezonanciafrekvenciától való eltérés oka lehet:
 - az alkatrészek hőfokfüggése;
 - a terhelés megváltozásának visszahatása;
 - a tápfeszültség megváltozásának visszahatása;
 - a munkapont bármely ok miatti megváltozása.

Méréseink során ezeket a visszahatásokat vizsgáljuk. A frekvenciastabilitás jellemezhető a frekvenciapontossággal: $s = \frac{\Delta f}{f_0}$, ahol a rezonanciafrekvencia

környékén a frekvenciaváltozás tartományát vizsgáljuk.

- *Az amplitúdóstabilitás mérése (elvárásunk: a kimeneti jel amplitúdója ne változzék az idő függvényében):* az amplitúdóstabilitás feltétele a stabil kimeneti feszültség, melyet külső-, vagy belső nemlineáris elemekkel, hálózatokkal biztosítjuk. A mérésünk tehát lényegében a szintfüggő erősítő kimeneti feszültség (esetleg hurokerősítés) változásának megfigyelése, terhelés-, munkapont-, hőmérséklet-, tápfeszültség változásának függvényében.
- *A torzításmérés (elvárásunk: tiszta szinuszos, egyéb melléktermékek és*

hamonikusok nélküli, vagyis egy időben egyetlen jel előállítására): a jelelak és melléktermékvizsgálat, oszcilloszkóppal, torzításmérővel, valamint spektrumanalizátorral.



16. ábra torzításmentes és nagy torzítású szinuszos jel, valamint a jelek Fourier-analízise után kapott spektrumábrái

A 16. ábrán jól megfigyelhető, hogy a torzított szinuszos jelben az alapjelen kívül megjelennek a frekvenciatöbbszörösök (felharmonikusok) is.

- A hangolhatóság mérése: [elvárásunk: lehetőségünk legyen többféle frekvenciájú jel előállítására (természetesen egy időben csak egy jel) a lehető legnagyobb frekvenciaátfogással]: a szelektív hálózat egy, vagy több elemének értékváltoztatása mellett mérjük meg a működési frekvenciatartományt, a kimeneti feszültséget is regisztrálva. A frekvenciaátfogás a legnagyobb és legkisebb előállítható frekvencia hányadosa: $\text{átfogás} = \frac{f_{\max}}{f_{\min}}$.