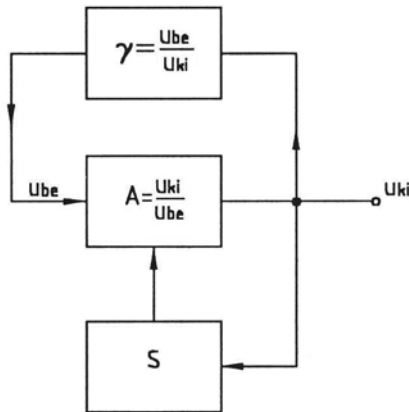


3.8. Szinuszos jelek előállítása

3.8.1. Oszcillátorok

Az oszcillátor olyan áramkör, amely periodikus (az analóg elektronikában általában szinuszos) jelet állít elő.

Az oszcillátor elvi felépítését (tömbvázlatát) az 1. ábra mutatja.



1. ábra
Oszcillátor tömbvázlata

Az oszcillátor **A** erősítőtől, γ visszacsatoló hálózattól, és **S** amplitúdószabályozó áramkörből áll.

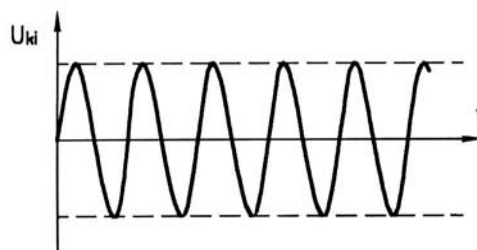
γ visszacsatoló hálózat feladata, hogy kifejezetten egy frekvencián: az oszcillátor működési frekvenciáján *pozitív visszacsatolást* hozzon létre **A** erősítő kimenete és bemenete között. Ezért a működési frekvencián a visszacsatoló hálózat nem invertáló erősítő esetén 0° , invertáló erősítő alkalmazásakor 180° fázisforgatást hoz létre u_{ki} és u_{be} jelek között. (Általánosságban: a pozitív visszacsatolás feltétele, hogy az erősítő és a visszacsatoló hálózat együttes fázisforgatása 0° [vagy az ezzel egyenértékű 360°] legyen. Ez az ún. *fázisfeltétel*.) Más frekvenciákon a fázisforgatás mértéke más, ezért ezeken a frekvenciákon nem jön létre pozitív visszacsatolás.

S amplitúdószabályozó áramkör az **A** erősítő erősítését úgy szabályozza, hogy a működési frekvencián a visszacsatoló hálózat γ leosztásának és az erősítő A_u feszültségerősítésének szorzata 1 legyen, azaz a

$$\gamma A_u = 1$$

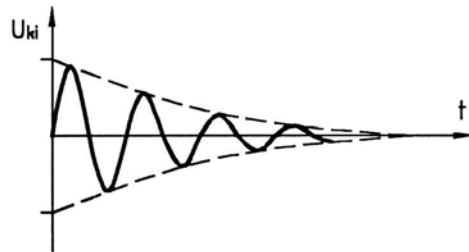
feltétel teljesüljön (ez az ún. *amplitúdófeltétel*).

Ez azt jelenti, hogy a működési frekvencián az erősítő kimenetén megjelenő feszültség γ -szorosa jut vissza az erősítő bemenetére, amelyet az erősítő A_u -szorosára erősít. Ha $\gamma A_u = 1$, akkor az erősítő kimenetén ugyanazt a jelet kaptuk vissza, amiből kiindultunk, azaz az adott frekvencián a rezgés állandó amplitúdóval fenntartja önmagát (2. ábra).



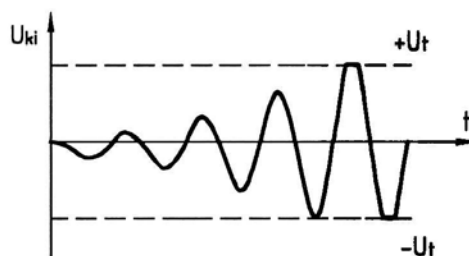
2. ábra
 u_{ki} jel $\gamma A_u = 1$ esetben

Ha $\gamma A_u < 1$, a kimenő jel a visszacsatoló hálózaton és az erősítőn áthaladva kisebb amplitudójú lesz, ezért a jel egyre kisebb amplitúdóval lecseng (3.ábra).



3. ábra
 u_{ki} jel $\gamma A_u < 1$ esetben

Abban az esetben, ha $\gamma A_u > 1$, a visszacsatoló hálózaton majd az erősítőn áthaladó jel amplitúdója nagyobb lesz, ezért a kimenő jel amplitúdója folyamatosan növekszik, majd a tápfeszültséget (vagy az áramkör felépítéséből adódó más korlátot) elérve torzul (4.ábra).



4. ábra
 u_{ki} jel $\gamma A_u > 1$ esetben

Az oszcillátorokat a visszacsatoló hálózat típusa szerint fel lehet **osztani RC-oszcillátorokra** (ezek esetében a visszacsatoló hálózat ellenállásokból és kondenzátorokból áll), **LC oszcillátorokra** (a visszacsatoló hálózat frekvenciameghatározó eleme rezgőkör), és **kristályoszcillátorokra** (a frekvenciameghatározó elem kvarckristály).

LC oszcillátorok

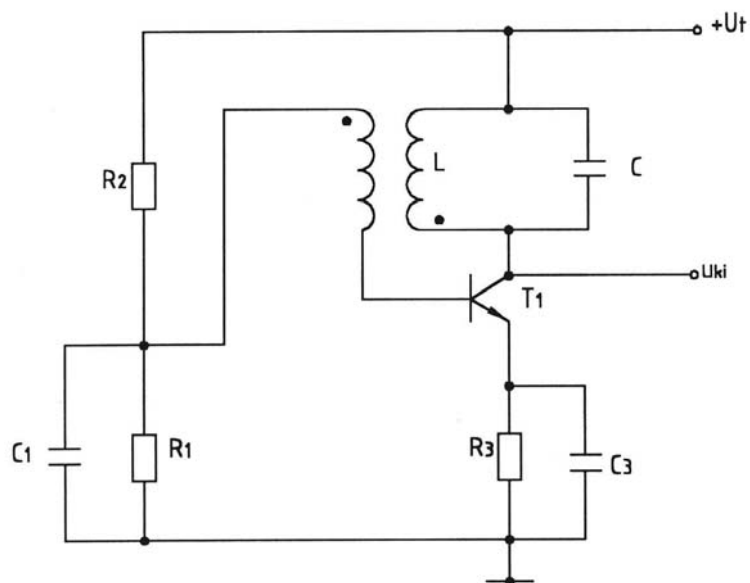
Az LC oszcillátorok frekvenciameghatározó eleme a rezgőkör. Tekintettel arra, hogy néhány száz tíz kHz alatti rezonanciafrekvenciához szükséges induktivitások és kapacitások nagyon nagyok, LC oszcillátorokat jellemzően 100 kHz feletti frekvenciákra készítik.

Meissner-oszcillátor

A Meissner-oszcillátor visszacsatoló áramköre *transzformátor*, melynek egyik tekercse a vele párhuzamosan kapcsolt kondenzátorral rezgőkört alkot. A működési frekvenciát a rezgőkör rezonanciafrekvenciája határozza meg. Az 5.ábrán hangolt kollektorkörű, földelt emitteres, a 6.ábrán pedig hangolt kollektorkörű, földelt bázisú Meissner-oszcillátor kapcsolása látható.

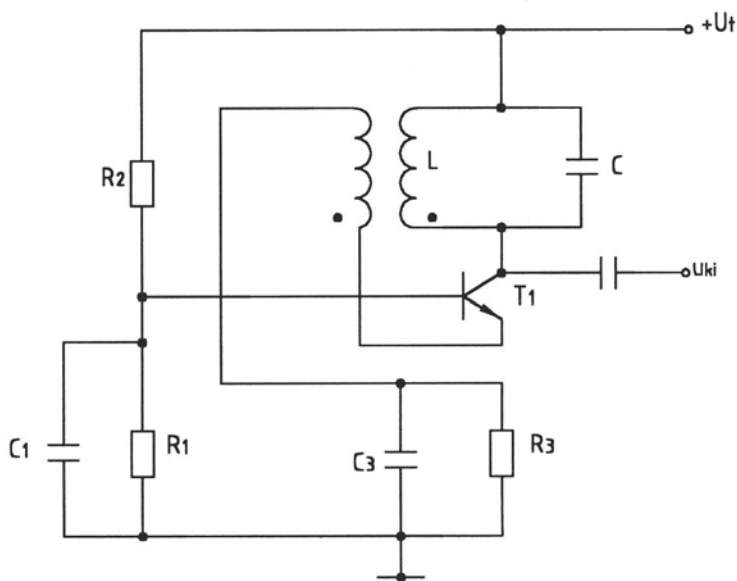
Mindkét kapcsolásban R_1 és R_2 ellenállások által képzett bázisosztó, valamint R_3 emitterellenállás határozzák meg a tranzisztor munkapontját (ahhoz, hogy a rezgés beinduljon, a tranzisztort A osztályú munkapontba kell állítani). R_1 és R_2 közös pontját mindkét áramkörben C_1 kondenzátor hidegíti.

Az 5.ábra szerinti, földelt emitteres kapcsolás kollektor- és bázisfeszültsége közötti fáziskülönbség 180° , a 360° -os fázisfordításhoz tehát a visszacsatoló hálózatnak további 180° fázistolást kell biztosítania: amikor a kollektorfeszültség növekszik, a bázisfeszültségnek csökkennie kell. A fázisfeltétel a transzformátor tekercseinek megfelelő bekötésével biztosítható. A kapcsolási rajzon a transzformátor primer és szekunder tekercsének egy-egy kivezetése ponttal van megjelölve; a megjelölt kivezetéseken azonos fázisú a feszültség. Jelen esetben a 180° -os fázisfordítást az biztosítja, hogy a kollektor a ponttal megjelölt, a bázis pedig a meg nem jelölt transzformátor kivezetéshez csatlakozik.



5. ábra
FE, hangolt kollektorkörű Meissner-oszcillátor

A 6. ábra földelt bázisú kapcsolásában az emitter- és kollektorfeszültség között nincs (azaz 0°) a fázisfordítás, ezért a visszacsatoló hálózatnak sem szabad fázist fordítania. Ezért a tranzistor kollektora és emittora is a transzformátor ponttal jelölt kivezetéseihez csatlakozik.



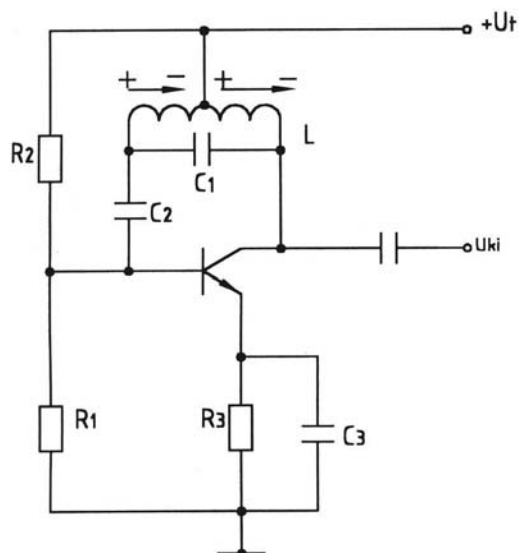
6. ábra
FB, hangolt kollektorkörű Meissner-oszcillátor

A transzformátor áttételét mindkét kapcsolásban úgy választják meg, hogy az azonos legyen a tranzistoros erősítő erősítésével, így teljesül a $\gamma A_u = 1$ amplitúdófeltétel.

A rezgés amplitúdóját R_3 és C_3 elemek stabilizálják a tranzistor munkapontjának beállításával.

Hartley-oszcillátor (induktív hárompontkapcsolású oszcillátor)

A Hartley-oszcillátor hasonlít a Meissner-oszcillátorra, a különbség annyi, hogy a transzformátort „autotranszformátor” azaz egy megcsapolt tekerecs helyettesíti (7. ábra).



7. ábra

Induktív hárompontkapcsolású (Hartley-) oszcillátor (földelt emitteres kapcsolás)

A tranzisztor (A osztályú) munkapontját R_1 , R_2 bázisosztó és R_3 állítja be.

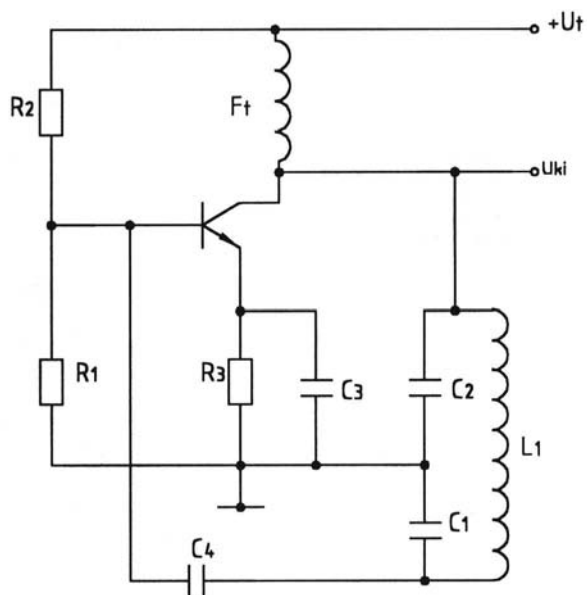
A működési frekvenciát L tekercs és a vele párhuzamos C_1 kondenzátor alkotta rezgőkör határozza meg.

A tekercs megcsapolása a tápfeszültségre van kapcsolva, ehhez a ponthoz képest a tekercs egyik ill. másik végén mérhető feszültség között 180° fáziskülönbség mutatkozik. (A tekercs két vége és megcsapolása a „hárompontkapcsolás” három pontja.) A tekercs egyik vége a tranzisztor kollektorára, másik vége C_2 kondenzátoron keresztül a bázisra van kötve, így – tekintettel arra, hogy a földelt emitteres tranzisztor maga is 180° fázist fordít – a fázisfeltétel teljesül, pozitív visszacsatolás lép fel.

A visszacsatoló hálózat „leosztását” a tekercs megcsapolási pontjának alkalmas megválasztásával lehet úgy beállítani, hogy a $\gamma A_u = 1$ amplitúdófeltétel teljesüljön.

Colpitts-oszcillátor (kapacitív hárompontkapcsolású oszcillátor)

A Colpitts (kapacitív hárompontkapcsolású) oszcillátor frekvenciameghatározó eleme szintén rezgőkör, de nem a tekercs megcsapolásával, hanem a rezgőköri kapacitás két részre osztásával állítják elő a rezgőkör „harmadik” pontját, amelyhez képest a két végpont feszültsége 180° -os fáziseltérést mutat (8. ábra).



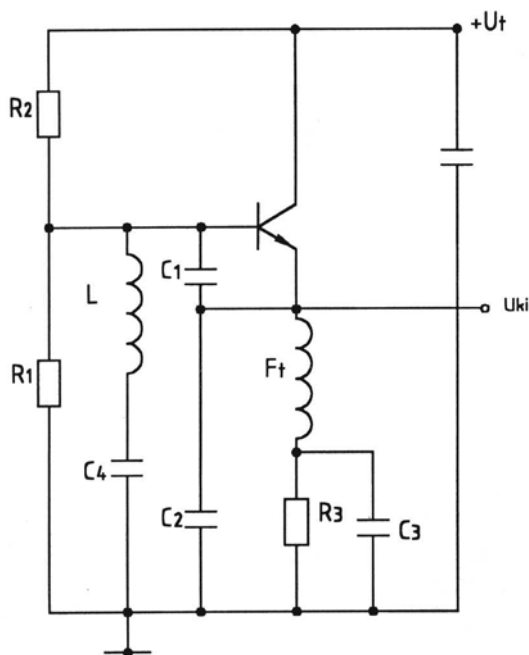
8. ábra

Colpitts (kapacitív hárompontkapcsolású) oszcillátor (földelt emitteres kapcsolás)

A fokozat munkapontját – mint az előző kapcsolásoknál is – R_1 , R_2 és R_3 ellenállás állítja be. F_t fojtótekerics impedanciája a fokozat működési frekvenciáján végtelennek tekinthető, ezért a kollektorköri váltakozóáram L_1 - C_1 - C_2 rezgőkör felé folyik. A rezonanciafrekvenciát L_1 és $C_1 \times C_2$ értéke határozza meg. Az amplitúdófeltétel ($\gamma A_u = 1$) C_2 és C_3 arányának megfelelő megválasztásával biztosítható.

Clapp-oszcillátor

A Clapp-oszcillátor (9. ábra) a Colpitts-féle oszcillátor módosított kivitele, ahol a tranzisztor nem a teljes rezgőkörre, hanem annak egy megcsapolt részére csatlakozik. (A rezgőköri kapacitás C_1 , C_2 , és C_4 soros eredője; a tranzisztorhoz C_1 és C_2 kapcsolódik). A tranzisztor bemenő impedanciája így csak átranzformálva terheli a rezgőkört, ezért a Clapp-oszcillátor frekvenciastabilitása igen jó.



9. ábra
Clapp-oszcillátor

Kristályoszcillátorok (XO)

Az LC oszcillátorokkal (gondos építés esetén is) legfeljebb

$$\frac{\Delta f}{f} = 10^{-4}$$

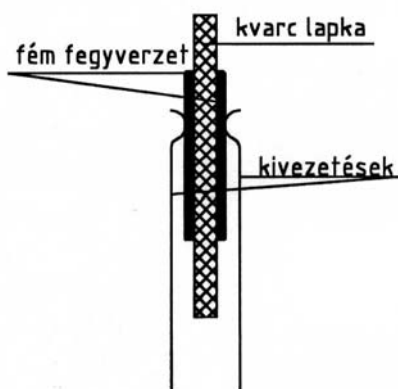
értékű *frekvenciastabilitás* érhető el, mert a hőmérséklet változásával mind a rezgőköri kondenzátor kapacitása, mind a tekerics inductivitása, ezzel együtt pedig a rezonanciafrekvencia és így az oszcillátor működési frekvenciája is változik.

A rezgőkör helyett azonban *rezgőkristály* is alkalmazható, melynek frekvenciastabilitása sokkal jobb, a $10^{-6} \dots 10^{-10}$ értéktartományban mozog.

A rezgőkristály tulajdonságai

Egyes (pl. SiO_2 = kvarc) kristályok felületén mechanikai deformáció hatására elektromos feszültség keletkezik, és fordítva: elektromos feszültség hatására a kristály rugalmas alakváltozást szenved (elektrosztrikció). Ez a jelenség a *piezoelektromosság*.

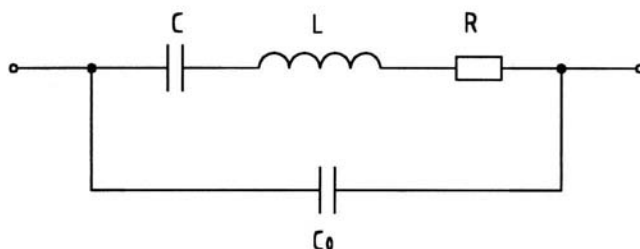
Elektronikai célra a kvarckristályból megadott módon (metszetben) és meghatározott alakú lapkát vágnak ki, és azt olyan méretre csiszolják, hogy mechanikai rezonanciafrekvenciája megegyezzen a kívánt rezgési frekvenciával. A lecsiszolt kvarc lapka mindkét felületére elektrolitikus úton ezüstréteget visznek fel. A mechanikus kivezetések a két oldali ezüstréteghez csatlakoznak (10.ábra).



10. ábra
Rezgőkristály kialakítása

A kivezetések közé váltakozófeszültséget vezetve, a kristály periódikusan deformálódik, rezgésbe jön. Amikor a rákapcsolt váltakozófeszültség frekvenciája megegyezik a kristály mechanikai méreteitől függő rezonanciafrekvenciájával, a kristály rezonál.

A rezgőkristály úgy működik, mint egy elektromechanikai átalakító, azaz az elektromos energiát átalakítja mechanikai energiává, a mechanikai energiát pedig visszaalakítja elektromos energiává. Így a kapcsai között mérhető impedancia a működési frekvencia függvényében változik. Elektromos szempontból a rezgőkristály a 11. ábrán látható kapcsolással helyettesíthető.



11. ábra
Rezgőkristály elektromos helyettesítő képe

L, C és R a kristály piezoelektromos tulajdonságai által meghatározott értékek, C_0 pedig a kristály két oldalára csapatott ezüstréteg illetve a kivezetések kapacitásából adódik. Az L, C és R elemekből adódó, igen nagy jóságú rezgőkör *soros rezonanciafrekvenciája*:

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

A soros rezonanciafrekvencia fölött a soros LCR kör induktív jellegűvé válik, és C_0 kapacitással egy *párhuzamos rezonancia* jön létre. A párhuzamos rezonanciafrekvencia

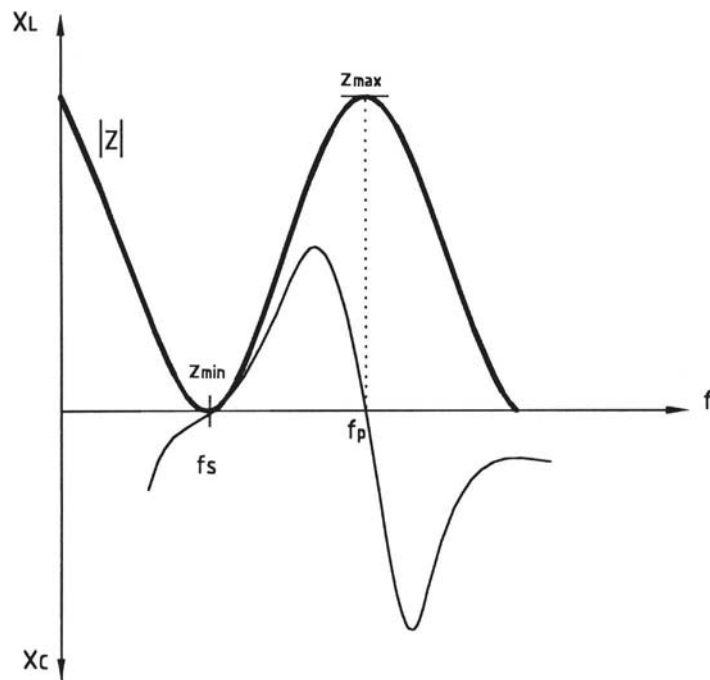
$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C \times C_0)}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \sqrt{1 + \frac{C}{C_0}}$$

Látható, hogy a jól definiált, csak a kristály tulajdonságaitól függő f_s -től eltérően f_p értékét erősen befolyásolja a kivezetés C_0 kapacitása is. A befolyásolás csökkentése céljából a kristállyal célszerű egy olyan C_0 kondenzátort párhuzamosan kapcsolni, amelynek kapacitása sokkal nagyobb C -nél, így a párhuzamos rezonanciafrekvencia

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \sqrt{1 + \frac{C}{C_0 + C_p}} \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

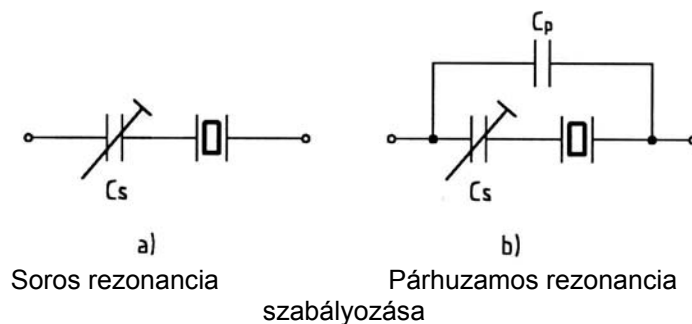
lesz, azaz a párhuzamos rezonanciafrekvencia közvetlenül f_s fölé kerül, és a bizonytalan C_0 és C_p értékével nem kell számolni.

A rezgőkristály impedanciáját a frekvencia függvényében a 12. ábra mutatja:



12. ábra
Rezgőkristály impedanciája a frekvencia függvényében

A kvarcoszcillátor frekvenciájának pontos beállításához a rezonanciafrekvenciának kis mértékben szabályozhatónak kell lennie. A szabályozás egy, a kvarccal sorba kötött trimmer kondenzátorral oldható meg, melynek kapacitása C -hez képest nagy. (13. ábra)



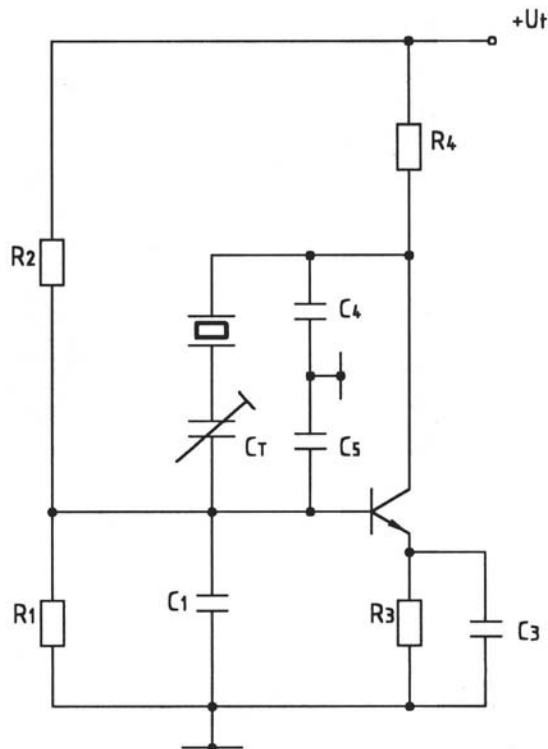
a) Soros rezonancia
b) Párhuzamos rezonancia szabályozása

13. ábra

Párhuzamos rezonanciájú (Pierce-) kvarcoszcillátor

Az LC oszcillátoroknál megismert, párhuzamos rezgőkör frekvenciameghatározó elemmel működő oszcillátor kapcsolások megépíthetők úgy is, hogy a rezgőkört a párhuzamos rezonancián működő kvarckristállyal helyettesítjük. (Természetesen hárompont-kapcsolású oszcillátorhoz itt nem tudjuk megcsapolni a rezgőköri tekercset vagy megosztani a rezgőköri kondenzátort. A megfelelő fázistolást/leosztást járulékos párhuzamos feszültségosztó alkalmazásával lehet elérni.)

A 14. ábra kapcsolása (Pierce-oszcillátor) a 8.ábra kapcsolásának kvarckristállyal megvalósított megfelelője.



14. ábra
Pierce-oszcillátor

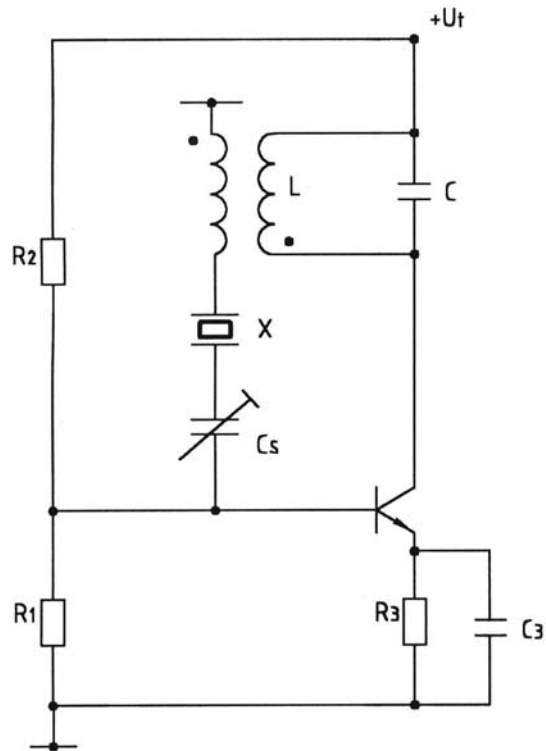
C_4 és C_5 kondenzátort úgy méretezzük, hogy soros eredőjük a párhuzamos rezonanciánál amúgy is alkalmazandó C_p értékét adják, arányuk pedig meghatározza a visszacsatoló hálózat feszültségosztását; ezzel állítható be a $\gamma A_u = 1$ amplitúdófeltétel.

Soros rezonanciájú kvarcoszcillátor

A soros rezonancia felhasználásával a kedvezőbb működési jellemzők érhetők el, mivel - ellentétben a kristály párhuzamos rezonanciájával - a rezonanciafrekvencia semmilyen mértékben nem függ C_0 vagy C_p kapacitástól.

A 15.ábra a kvarckristály soros rezonanciáján működő oszcillátort mutat.

Az elgondolás az, hogy az LC oszcillátor kvarcoszcillátorra alakítható át, ha a kvarckristályt a visszacsatoló áramkörbe helyezzük. Ekkor ugyanis csak a kvarckristály soros rezonanciáján jöhet létre a pozitív visszacsatolás. Természetesen a kollektorkörben elhelyezkedő rezgőkörnek is azon a frekvencián kell rezonálnia, mint a kvarckristálynak, de a működési frekvencia pontos értékét a nagy jóságú kvarc határozza meg.



15. ábra
Hangolt kollektorkörös kapcsolás kvarckristállyal

Az amplitúdófeltétel biztosításához a transzformátor áttételét a kristály soros ellenállásának figyelembevételével kell meghatározni, ugyanis a kristály soros ellenállásán eső feszültség csökkenti az erősítő bemenetére a visszacsatoló áramkörből jutó feszültség nagyságát.

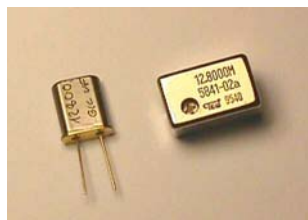
Harmonikus oszcillátorok

Nagyobb (néhányszor tíz MHz feletti) rezonanciafrekvenciához a kvarckristályt megoldhatatlanul kis méretre kellene csiszolni, ezért az ilyen névleges frekvenciára szánt kvarcok általában a mechanikai rezonanciájuk valamelyik harmonikusán üzemelnek. Ilyen esetben a kvarckristály hajlamos lehet más frekvenciákon (pl. az alapharmonikuson) is berezegni. A 15. ábra szerinti kapcsolásban a kollektorköri rezgőkör megfelelő hangolása biztosítja, hogy az oszcillátor a kívánt frekvencián üzemeljen.

A rezgőkristály hőmérsékletének beállítása

A kristály mechanikai méretei a hőmérséklettel változnak, így mechanikai (és ezzel elektromos) rezonanciafrekvenciája – is a hőmérséklet függvénye. Ha igen nagy pontosságú frekvenciára van igény, a rezgőkristályt ún. **termosztátba** helyezik, azaz olyan hőszigetelt dobozba, melynek hőmérsékletét (elektromos fűtéssel, és a fűtést szabályozó áramkörrel) állandó értéken tartják.

Megjegyzés: A frekvencia hőmérséklettel való változásának csökkentésének másik módszere, hogy a rezonanciafrekvenciát befolyásoló külső áramköri elemeket (kondenzátorokat) olyan hőmérsékleti tényezőre állítják be, hogy összességében a frekvencia a hőmérséklettel csak kevéssé változzon. Ilyen, különféle frekvenciákra sorozatban gyártott áramkör pl. a **TCXO** (Temperature Compensated Xtal Oscillator). A 16. ábra fémtokozású kvarckristályt, illetve miniatűr TCXO-t mutat (mindkettőnél $f_0 = 12,8$ MHz).



16. ábra

3.8.2. Változtatható frekvenciájú oszcillátor (VFO = Variable Frequency Oscillator)

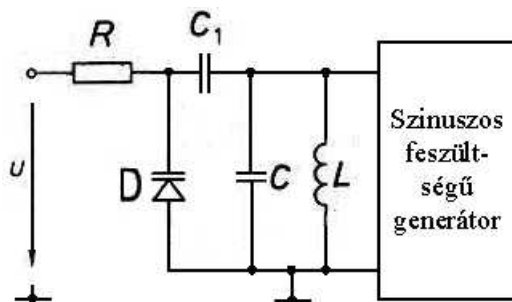
Az ismertett oszcillátorok működési frekvenciáját egy rezgőkör (vagy a kristály) rezonanciafrekvenciája határozza meg. A rezgőkör rezonanciafrekvenciáját elemei (kapacitás, induktivitás) értékének változtatásával állíthatjuk be. (Pl. ha rezgőkörben változtatható kapacitású, ún., forgókondenzátort alkalmazunk, a tengely forgatásával változik a kapott jel frekvenciája is.) Az ilyen, a rezgőköri kapacitás vagy induktivitás változtatásával üzemszerűen változtatható frekvenciájú oszcillátort **VFO** –nak nevezik.

Soros (vagy párhuzamos) változtatható kapacitású kondenzátorral nagyon kis mértékben (10^{-4}) a kristályoszcillátor frekvenciáját is befolyásolhatjuk.

3.8.3. Feszültséggel vezérelhető oszcillátor (VCO = Voltage Controlled Oscillator)

Korszerű áramkörökben a frekvencia beállítása gyakran elektronikus úton, mechanikai mozgás (a forgókondenzátor tengelyének forgatása, a tekercs vasmagjának, vagy a trimmer kondenzátornak az állítása nélkül) szükséges. Ilyen esetben az oszcillátor frekvenciáját egy (külső áramkör által előállított) feszültséggel befolyásolják. Az ilyen, feszültséggel hangolható oszcillátort *feszültségvezérelt oszcillátornak* nevezik, és **VCO** –nak nevezik.

A 17. ábra példát mutat a rezgőkör rezonanciafrekvenciájának feszültséggel való hangolására.



17. ábra
Feszültséggel vezérelhető oszcillátor (VCO)

Az oszcillátor rezgőkörét L és C elemek alkotják, az áramkör többi részét a „Szinuszos feszültségű generátor” tömb tartalmazza. C kondenzátorral (C_1 elválasztó kondenzátoron keresztül) párhuzamosan kapcsolódik D varicap dióda. A varicap diódát záró irányban előfeszítve, kapacitást képez, melynek nagysága a zárófeszültségtől függ (ld. 3.6.2. pont). Ha U a jelzett polaritású, D diódát záró irányban feszíti elő (katódja a pozitív), így U nagyságával befolyásolható D kapacitása, ezzel együtt a rezgőkörben működő kapacitás, így változik a rezonanciafrekvencia is.

C_1 szerepe az, hogy a D diódára kapcsolt egyenfeszültséget leválassza a rezgőkörrel, hiszen L tekercs egyenáramú ellenállása 0, és így az ezt az egyenfeszültséget rövidre zárna.

R helyett egy fojtótekercset is alkalmazhattunk volna hasonló feladattal: a D diódán, mint rezgőköri elemén keletkező nagyfrekvenciás feszültséget választja le az U feszültséget szolgáltató generátorról. (Ideális generátor esetén annak kapocsfeszültsége nem változhat, így ha közvetlenül volna D katódjára kötve, nem engedné, hogy azon a rezgőkörnek megfelelő váltakozófeszültség alakuljon ki.)

3.8.4. Fáziszárt hurok (PLL = Phase Locked Loop)

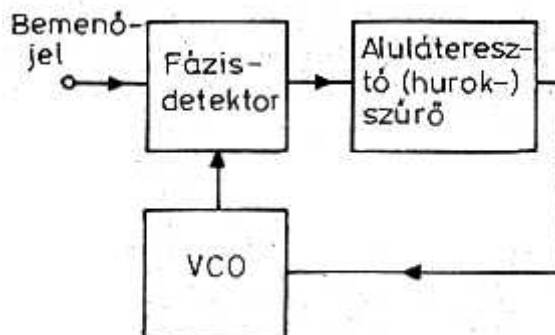
Nagy pontosságú frekvenciák előállítása

A technika fejlődésével egyre nagyobb az igény a stabil, nagy frekvenciapontosságú jelekre. Ilyen stabil frekvenciájú jelek csak kristályvezérelt oszcillátorral állíthatók elő. A kristályoszcillátor jelének frekvenciáját a rezgőkristály határozza meg, ezért a frekvencia változtatása a rezgőkristály cseréjével oldható meg.

A „fáziszárt hurok” áramköri összeállítás segítségével egyetlen nagy frekvenciastabilitású kristályoszcillátor felhasználásával ugyanolyan frekvenciastabilitású, de más (beállítható) frekvenciájú jeleket tudunk előállítani. (Ezt az eljárást „frekvenciaszintézis”-nek nevezik.)

A fáziszárt hurok (PLL) működését az alábbiakban ismertetjük, megértéséhez azonban szükséges a későbbiekben sorra kerülő „szűrők” és „keverés” témakör ismerete is.

A fáziszárt hurok (PLL) elemei: a *fázisdetektor*, az *aluláteresztő szűrő*, és a *feszültségvezérelt oszcillátor* (Voltage Controlled Oscillator = VCO), ld. a 18. ábrát.



18. ábra
PLL tömbvázlata

A fázisdetektor összehasonlítja egy periodikus bemenő jelnek és a VCO jelének a fázisát, és kimenetén a fáziskülönbséggel arányos jel jelenik meg. Ez a jel az aluláteresztő szűrőn keresztül a VCO vezérlő bemenetére kerül, és annak frekvenciáját úgy változtatja meg, hogy a bemenő jel és a VCO jele közötti fáziskülönbség csökkenjen.

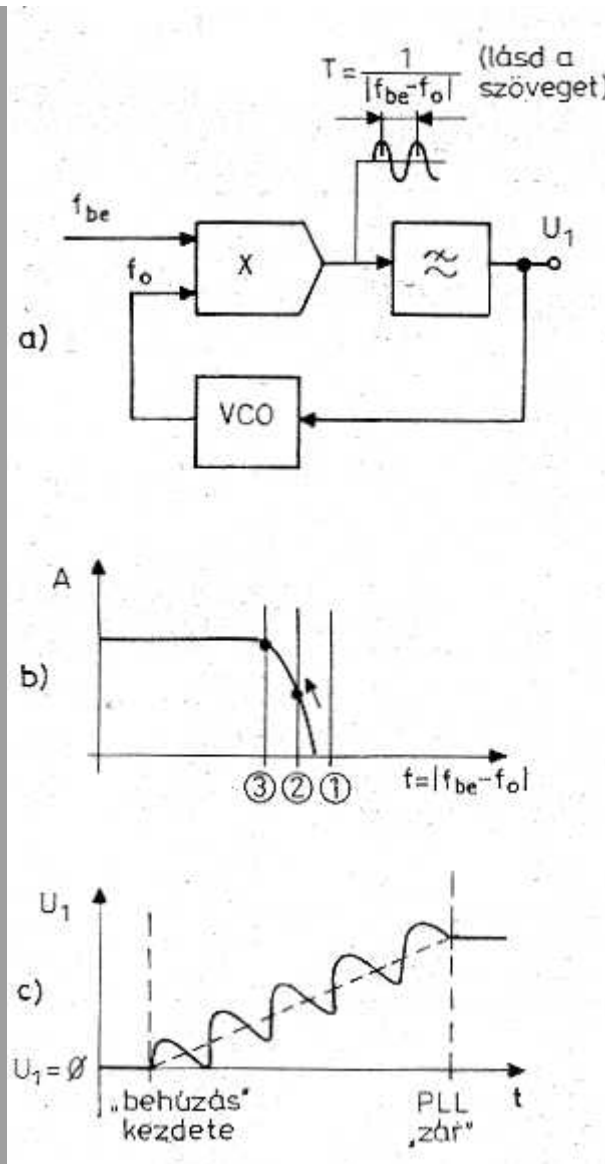
A hurok akkor „zárt”, ha a VCO olyan vezérlő feszültséget kap, amelynek hatására frekvenciája pontosan megegyezik a bemenő jel frekvenciájával (a bemenő jel egy periódusára az oszcillátor jelének egy periódusa esik, ezek között fáziskülönbség azonban lehet. A PLL megfelelő méretezésével ez a fáziskülönbség igen kis értékre állítható be).

Hogyan „záródik” („húz be”) a PLL?

A PLL „behúzásának” folyamatát az 19. ábra segítségével vizsgáljuk meg.

A 19.a ábrán a fázisdetektor egy analóg szorzó áramkör, melynek egyik bemenetére az f_{be} frekvenciájú bemenő jel, másik bemenetére az f_o frekvenciájú VCO jel jut. Ismert (amplitúdómoduláció, keverés), hogy két szinuszos jel összeszorításának eredménye ugyancsak két szinuszos jel: az egyik frekvenciája a két összeszorított jel frekvenciájának összege (itt: $f_{be} + f_o$), a másik jel frekvenciája pedig a két összeszorított jel frekvenciájának a különbsége (itt: $f_{be} - f_o$ vagy $f_o - f_{be}$, attól függően, hogy f_o vagy f_{be} a nagyobb). A 19.a. ábrán a szorzó kimenetén csak az utóbbi, különbségi frekvenciás jelet ábrázoltuk, mert az összegfrekvenciás jel biztosan az aluláteresztő szűrő zárótartományába esik, azon nem jut át, ezért a PLL működése szempontjából érdektelen. A 19.b. ábra az aluláteresztő szűrő átvitelét mutatja a frekvencia függvényében.

Legyen vizsgálatunk kezdetén $f_{be} > f_o$, és tételezzük fel, hogy f_{be} és f_o frekvenciák különbsége olyan nagy, hogy ez a különbségi frekvencia is az aluláteresztő szűrő zárótartományába esik (19.b. ábra, 1. sz. jelzővonal). Ekkor az aluláteresztő szűrőn semmilyen jel nem jut át, ezért U_1 kimenő feszültség 0 (19.c. ábra), és ezért a VCO „üresjárás” frekvenciáján működik.



19. ábra

Csökkenjen most f_{be} frekvencia úgy, hogy $f_{be} - f_0$ kerüljön az aluláteresztő szűrő átteresztési tartományába (19.b. ábra 2. sz. jelzővonal). Ekkor kezdődik meg a hurok „behúzása”: az aluláteresztő szűrő kimenetén megjelenik egy $f_{be} - f_0$ frekvenciájú U_1 jel. Tételezzük fel, hogy a VCO frekvenciája pozitív vezérlőfeszültség hatására nő. Ebben az esetben U_1 pozitív félperiódusában a VCO f_0 frekvenciája nő, és ezzel közeledik f_{be} frekvenciához. Ebben a félperiódusban így $f_{be} - f_0$ frekvenciakülönbség csökken, tehát a félperiódusidő nő.

U_1 negatív félperiódusában azonban a VCO frekvenciája csökken, ezért $f_{be} - f_0$ nő, U_1 jel félperiódusideje csökken. A folyamat eredménye az, hogy U_1 jel nem lesz szimmetrikus: pozitív félperiódusa tovább tart, mint negatív félperiódusa, azaz a jel átlagértéke nem 0 lesz, hanem egy pozitív érték. Már pedig feltételezésünk szerint a pozitív U_1 feszültség a VCO frekvenciáját közelíti f_{be} frekvenciához, tehát egy teljes U_1 periódus lezajlása után a VCO frekvenciája *átlagában* közelebb kerül a bemenő jel frekvenciájához, $f_{be} - f_0$ csökken, ezért a 19.b. ábrán a jelzővonal balra tolódik (3. sz. jelzővonal). A következő U_1 pozitív félperiódusban így f_0 még jobban megközelíti f_{be} -t, ezért a pozitív félperiódus még hosszabb idejű lesz, s így tovább, U_1 jel átlagértéke egyre növekszik, miközben a VCO f_0 frekvenciája egyre közelebb kerül f_{be} -hez. A folyamat végén a hurok „záródik”: $f_0 = f_{be}$ értéket vesz fel, $f_{be} - f_0$ különbségi frekvencia 0 lesz, azaz az aluláteresztő szűrőn egyenfeszültség jelenik meg, amely éppen akkora, hogy a VCO frekvenciáját $f_0 = f_{be}$ értéken tartsa. Ez az egyenfeszültség f_0 és f_{be} fáziskülönbségétől függ.

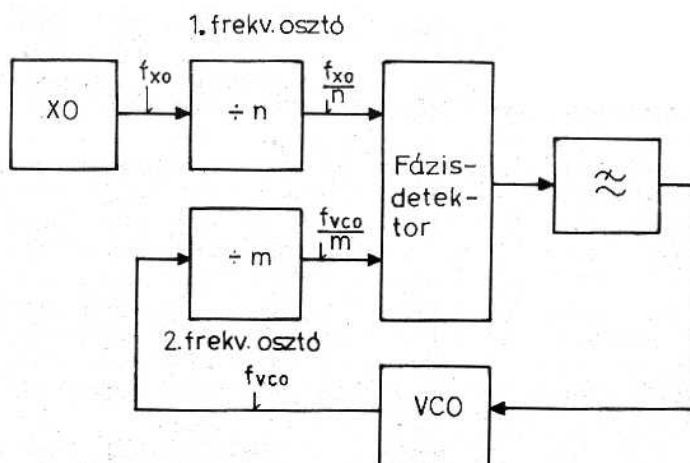
A PLL **behúzási tartománya** az a frekvenciatartomány, amelybe eső frekvenciájú bemenő jelekre a hurok „zárni” képes.

Ha most f_{be} olyan lassan változik, hogy U_1 jel az aluláteresztő szűrő átteresztő tartományában marad, a VCO követi a bemenő jel frekvenciáját, miközben a vezérlő feszültsége, (és a két jel fáziskülönbsége is)

változik. Ez a folyamat a VCO teljes vezérlési tartományában (**benntartási tartomány**) fennmarad, ha ebből a tartományból kikerülünk, a fáziszár megszűnik.
 (Ha f_{be} változása gyors, a változás az aluláteresztő szűrőn nem jut át, és a VCO frekvenciája változatlan marad, ezért a PLL a bemenő jelet terhelő fáziszajokat elnyomja.)

Frekvenciaszintézer

A frekvenciaszintézer (röviden szintézer) egy kellően stabil frekvenciájú referenciajellel, PLL és a digitális technika *frekvenciaosztó* áramköreinek (sajnos e témakörrel terjedelmi korlátok miatt nem foglalkozhatunk) segítségével állít elő a referenciajellel azonos stabilitású, de más frekvenciájú jeleket (20. ábra).



20. ábra
PLL-es frekvenciaszintézer

A nagystabilitású referenciajelet XO kristályoszillátor állítja elő. A kristályoszillátor frekvenciáját az 1. frekvenciaosztó áramkör n -ed részére osztja, ez a jel kerül a fázisdetektor egyik bemenetére. A fázisdetektor másik bemenetére a VCO által előállított, s a 2. frekvenciaosztó által m -ed részére leosztott frekvenciájú jelet vezetjük. A fázisdetektor kimenőjele az aluláteresztő (hurok-) szűrőn áthaladva szabályozza a VCO frekvenciáját.

A hurok akkor van „zárva”, amikor a fázisdetektor két bemenetére azonos frekvenciájú (legfeljebb eltérő fázisú) jel kerül. Ez a feltétel akkor teljesül, amikor a kristályoszillátor frekvenciájának n -ed része megegyezik a VCO frekvenciájának m -ed részével:

$$\frac{f_{XO}}{n} = \frac{f_{VCO}}{m}$$

az egyenlet átrendezésével

$$f_{VCO} = \frac{f_{XO} \cdot m}{n}$$

azaz m és n osztásviszony változtatásával a VCO frekvenciája (amely egyúttal a szintézer kimenő jele is) széles tartományban változtatható. A fáziszár következtében a VCO így beállított frekvenciájú kimenő jele ugyanolyan frekvenciastabilitású, mint az XO kristályoszillátoré.