

Elektronika 2. PLL gyakorló példák

1.

PLL segítségével analóg szorzós amplitúdó demodulátort valósítunk meg. A fázisdetektor szintén analóg szorzó.

a.) $\hat{u}_1 = 1V-3V$, $\hat{u}_2 = 2V$ és $K_M = 0,1/V$ esetén mekkora lesz K_{PD} ?

b.) Passzív szűrő alkalmazása esetén legalább mekkora lesz a követési tartomány, ha a VCO átviteli karakterisztikája $f_2 = f_0 + K_O \cdot U_C$? ($f_0 = 1MHz$, $K_O = 10kHz/V$)

Megoldás:

a.) K_{PD} függ a bemeneti feszültség amplitúdójától és a fázishibától. Mivel az analóg szorzós demodulátor megköveteli a kis fázishibát, feltételezhetjük hogy az

$u_{PD \Delta V} = K_M \cdot \frac{1}{2} \hat{U}_1 \cdot \hat{U}_2 \cdot \sin(v_1 - v_2)$ egyenlet kezdeti meredekségével közelíthető, azaz

$K_{PD} = K_M \cdot \frac{1}{2} \hat{U}_1 \cdot \hat{U}_2$, tehát a fázisdetektor átviteli tényezője $K_{PD \min} = 0,1 \cdot 0,5 \cdot 1 \cdot 2 = 0,1$ és

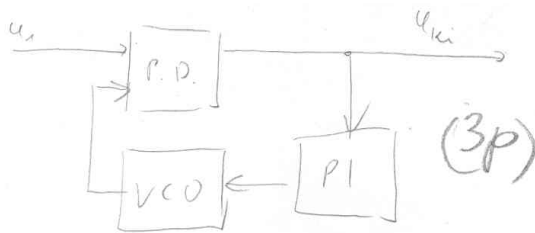
$K_{PD \max} = 0,3 \cdot 0,5 \cdot 1 \cdot 2 = 0,3 [V/rad]$ között változik..

b.) A PLL akkor esik ki a szinkronból, ha U_{PD} még $\pi/2$ szöghibánál sem elegendően nagy a bemeneti frekvencia követéséhez. A változó amplitúdójú bemeneti jel miatt legkisebb bemeneti jelszintnél lesz a legkisebb a követési tartomány. Ekkor a $-\pi/2 \rightarrow \pi/2$ tartományban

$\Delta U_{PD} = 2 \cdot \frac{1}{2} K_M U_1 U_2 = 0,1 \cdot 1 \cdot 2 = 0,2V$,

az ehhez tartozó frekvencia tartomány pedig $\Delta f_H = \Delta U_{PD} K = 0,2 \cdot 10k = 2kHz$.

2. Fázismodulált jelet PLL segítségével demodulálunk. Ismertesse a kapcsolás blokkvázlatát! Mekkora lehet a szabályozó integrálási ideje, ha a moduláló jel spektruma 100Hz és 5kHz közötti?



az első frekvenciátartomány kell a szabályozót beállítani
PM jel demodulálásakor: $\omega_c < 2\pi \cdot 100Hz$.

A szab. beállításakor általában $\sin \frac{1}{\omega_c T_f} \approx \frac{1}{3} \cdot (\frac{\pi}{2} - \varphi_t)$,

és $\varphi_t \approx \frac{\pi}{3}$, tehát $T_f > \frac{1}{\omega_c \cdot \frac{1}{3} \cdot (\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{3})} = \frac{1}{2\pi \cdot 100 \cdot 0,1547} = 2,7 \mu s$.

(Elfogadható $T_f \gg \frac{1}{2\pi \cdot 100Hz}$ is.) (2p)

2.a Fázismodulált jelet PLL segítségével demodulálunk. Ismertesse a kapcsolás blokkvázlatát (felhasználható elemek: fázisdetektor, VFC, monostabil multivibrátor, kizáró vagy kapu, PI szabályozó, VCO)! Mire célszerű állítani a szabályozási kör vágási körfrekvenciáját, ha a

moduláló jel spektruma 100Hz és 5kHz közötti? Mekkora lehet a szabályozó integrálási ideje?

3. Analóg PLL-ben a fázisdetektor $K_M=0,1/V$ átviteli tényezőjű analóg szorzó. A VCO kimeneti jelének amplitúdója 1V, átviteli karakterisztikája $f_2=f_0 + K_O \cdot U_C$, ahol $f_0=1MHz$, $K_O=10kHz/V$. A bemeneti jel amplitúdója 2V és 3V, frekvenciája 999kHz és 1,001MHz között változik.

- a) Szükség van-e aktív szabályozó alkalmazására a bemeneti jel követésére?
 b) Szükség van-e aktív szabályozó alkalmazására, ha az előírt maximális fázishiba 0,1 radián?

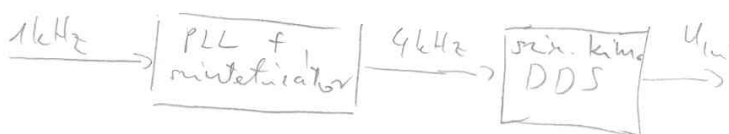
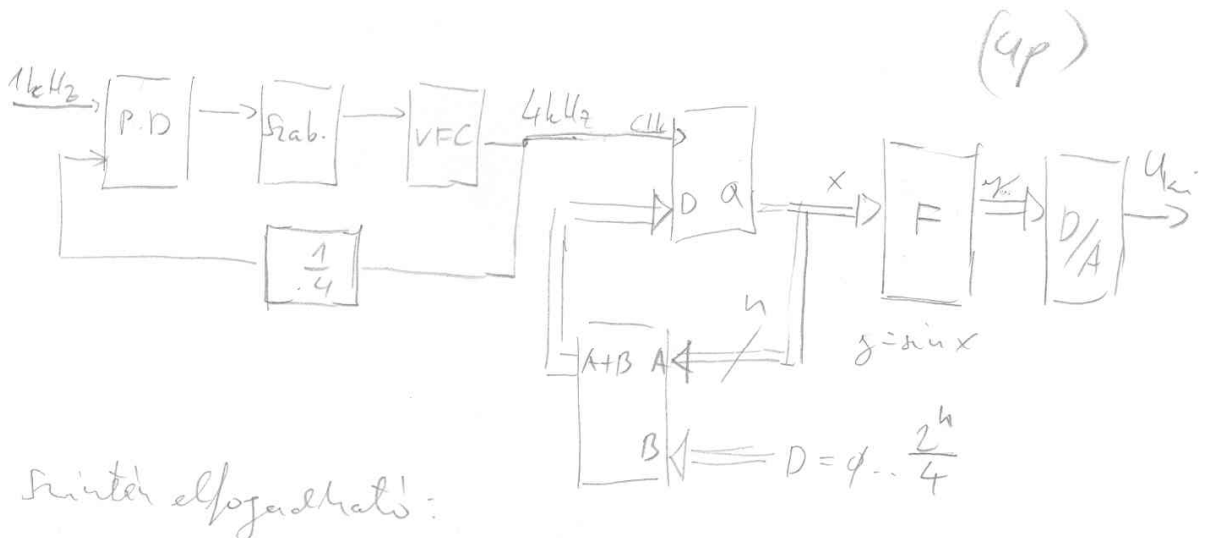
a) Legrosszabb eset: $\hat{U}_1 = 2V$, ekkor $U_{PDmax} = \frac{1}{2} \cdot K_M \cdot \hat{U}_1 \cdot \hat{U}_2 = \frac{1}{2} \cdot 0,1 \cdot 2 \cdot 1 = 0,1V$
 $U_{PDmin} = -U_{PDmax} = -0,1V$ (1p)

$f_2(U_{PDmax}) = 1MHz + 10kHz/V \cdot 0,1V = 1,001MHz$,
 $f_2(U_{PDmin}) = 1MHz - 10kHz/V \cdot 0,1V = 999kHz$, } 2p

teljesítendő a passzív mátrixozás!

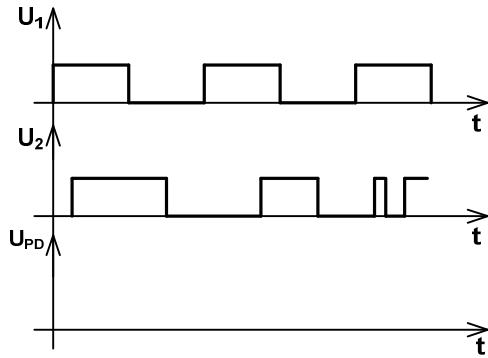
b) Igen, hiszen a kívánt tartományt két szűk passzív mátrixozással U_{PD} szélső értékeit nem fel, azaz $\varphi_1 - \varphi_2 = \pm \frac{\pi}{2}$. (2p)

4. Egy 1kHz-es kvarc oszcillátor, egy PLL és egy DDS segítségével a 0..1kHz-es tartományban szinuszos jelet állítunk elő. Ismertesse a kapcsolás blokk-vázlatát!



5. Egy PLL-ben kizáró-vagy kapus fázisdetektort alkalmazunk.

- a.) Rajzolja fel a fázisdetektor karakterisztikáját, ha a kapu kimeneti feszültsége $U_{OH}=5V$, ill. $U_{OL}=0V$!
 b.) Határozza meg a fázisdetektor kimeneti jelét az alábbi bemeneti jelekre:

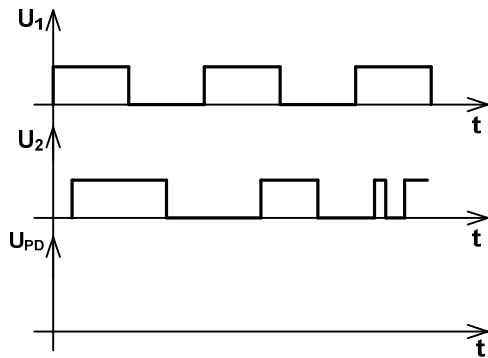


c.) Mekkora lesz a fázishiba passzív, ill. aktív szabályozó esetén, ha a VCO karakterisztikája: $f_2 = 20[\text{kHz}] - 0,1[\text{kHz/V}] * U_C$ és $f_1 = 19,9\text{kHz}$?

6. Egy PLL-ben élvezérelt számlálós fázisdetektort alkalmazunk.

a.) Rajzolja fel a fázisdetektor kapcsolási rajzát!

b.) Határozza meg a fázisdetektor kimeneti jelét, ha a számlálót ± 1 értékre korlátozzuk! A számláló értéke nulla U_1 első élét megelőzően. A bemeneti jelek:



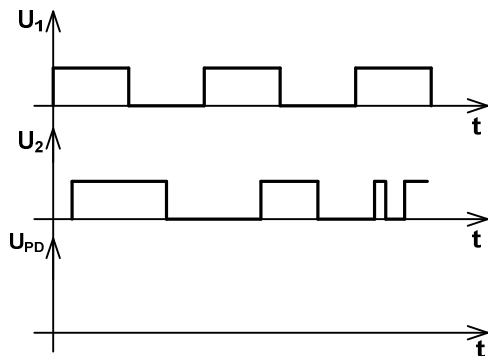
c.) Milyen a fázisdetektor zavarérzékenysége (U_2 -ben fellépő, a periódusidőhöz képest elhanyagolható szélességű tüske hatása alapján)?

d.) Milyen a fázisdetektor frekvenciaérzékenysége ($U_{PD\Delta V} = ?$, ha a két jel frekvenciája kismértékben eltérő és $U_{LSB} = 1\text{V}$)?

7. Egy PLL-ben élvezérelt számlálós fázisdetektort alkalmazunk.

a.) Rajzolja fel a fázisdetektor kapcsolási rajzát!

b.) Határozza meg a fázisdetektor kimeneti jelét, ha a számlálót ± 2 értékre korlátozzuk, a számláló kezdeti értéke nulla és a bemeneti jelek:



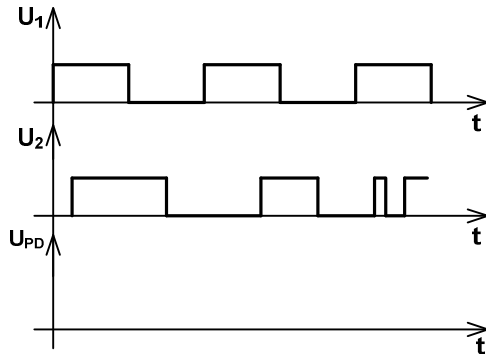
c.) Milyen a fázisdetektor zavarérzékenysége (U_2 -ben fellépő tüske hatása alapján)?

d.) Milyen a fázisdetektor frekvenciaérzékenysége ($U_{PD\Delta V}=?$, ha a két jel frekvenciája kismértékben eltérő és $U_{LSB}=1,5V$)?

8. Egy PLL-ben élvezérelt számlálós fázisdetektort alkalmazunk.

a.) Rajzolja fel a kapcsolási rajzot!

b.) Határozza meg a fázisdetektor kimeneti jelét, ha a számlálót ± 1 -re korlátozzuk, a számláló kezdeti értéke nulla és a bemeneti jelek:



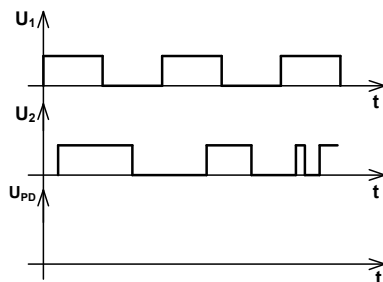
c.) Milyen a fázisdetektor zavarérzékenysége a b.) pont alapján?

d.) Milyen a fázisdetektor frekvenciaérzékenysége ($U_{PD\Delta V}=?$, ha a két jel frekvenciája eltérő és $U_{LSB}=1V$)?

9. Egy PLL-ben XOR kapus fázisdetektort alkalmazunk.

a.) Rajzolja fel a kapcsolási rajzot!

b.) Határozza meg a fázisdetektor kimeneti jelét, ha a bemeneti jelek:



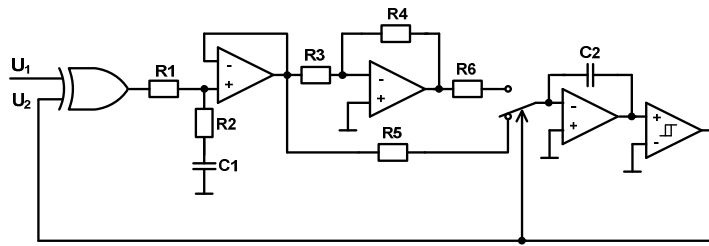
c.) Milyen a fázisdetektor zavarérzékenysége a b.) pont alapján?

d.) Milyen a fázisdetektor frekvenciaérzékenysége ($U_{PD\Delta V}$, ha a két jel frekvenciája eltérő)?

9A. Tervezzen olyan fázisdetektort, amely nem zajérzékeny, kétállapotú jelekkel működik, átviteli tényezője $K_{PD} \approx 5V/\pi$, szintvezérelt és lineáris a $\pm\pi/2$ tartományban! Rajzolja fel a be- és kimeneti jelek időfüggvényét arra az állapotra, amikor a detektor a hasznos jeltartománya közepén üzemel!

10. Az alábbi PLL áramkörben jelölje be a fázisdetektor kimeneti feszültségét (U_{PD}) és a szabályozó kimeneti feszültségét (U_C)! Mekkora bemeneti frekvenciáig működőképes a PLL a megadott adatokkal? Határozza meg mekkora lesz a szöghiba megváltozása 1Hz bemeneti frekvenciaváltozás hatására!

Adatok: XOR: $U_{OH}=5V$ és $U_{OL}=0V$, $R_1=10k\Omega$, $R_2=1k\Omega$, $C_1=20nF$, $R_3=R_4=R_5=R_6=10k\Omega$, $C_2=2nF$, a hiszterézises komparátor hiszterézis sávja $U_H=1V$.



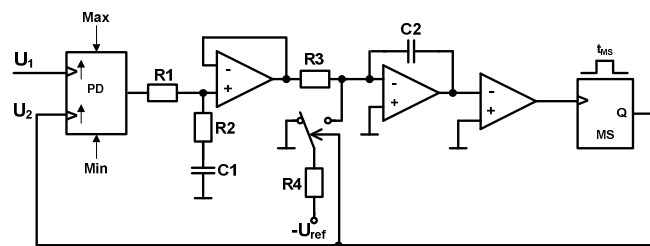
11. Adjon egy-egy példát fázisdetektorra az alábbi jellemzőkkel:

- a bemeneti frekvencia alsó határa nulla,
- kétállapotú jelekkel dolgozik, frekvenciaérzékeny,
- kétállapotú jelekkel dolgozik, nem zavarérzékeny,
- szinuszos jelekkel dolgozik, nem frekvenciaérzékeny.

12. Egy DDS segítségével a 0..1kHz-es tartományban 1Hz-es lépésekben szinuszos jelet állítunk elő. Ismertesse a kapcsolás blokk-vázlatát! Felhasználható elemek: 1MHz-es kvarc oszcillátor, D tárolók, D/A váltó, ROM (más néven LUT, ill. statikus függvénykapcsolat), analóg szorzó, digitális összeadó, VCO.

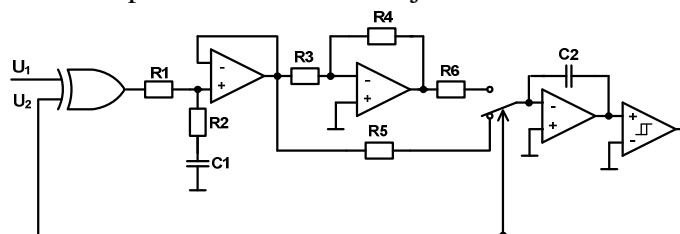
13. Az alábbi PLL áramkörben jelölje be a fázisdetektor kimeneti feszültségét (U_{PD}) és a szabályozó kimeneti feszültségét (U_C)! K_O és K_{PD} számítását követően határozza meg számszerűen a felnyitott hurok átviteli függvényét a VFC-t arányos taggal közelítve!

Adatok: PD: +2 és 0 közé korlátozott számláló és DA váltó ($U_{LSB}=5V$), $R_1=20k\Omega$, $R_2=2k\Omega$, $C_1=10nF$, $R_3=20k\Omega$, $R_4=10k\Omega$, $C_2=1nF$, $t_{MS}=5\mu s$, $U_{ref}=10V$.



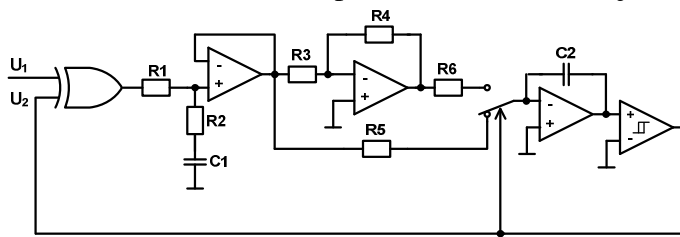
14.a Az alábbi PLL áramkörben jelölje be a fázisdetektor kimeneti feszültségét (U_{PD}) és a szabályozó kimeneti feszültségét (U_C)! Határozza meg számszerűen a felnyitott hurok átviteli függvényét a VFC-t arányos taggal közelítve!

Adatok: XOR: $U_{OH}=5V$ és $U_{OL}=0V$, $R_1=10k\Omega$, $R_2=1k\Omega$, $C_1=20nF$, $R_3=R_4=R_5=R_6=10k\Omega$, $C_2=2nF$, a hiszterézises komparátor hiszterézis sávja $U_H=1V$.



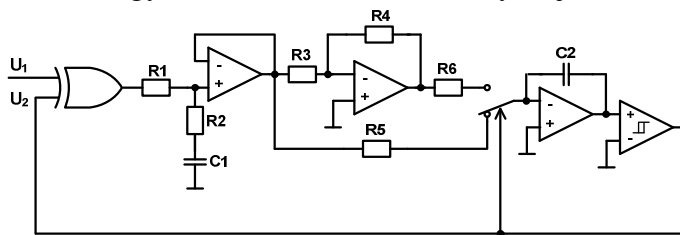
14.b Az alábbi PLL áramkörben jelölje be a fázisdetektor kimeneti feszültségét (U_{PD}) és a szabályozó kimeneti feszültségét (U_C)! K_O és K_{PD} számítását követően határozza meg a PLL követési tartományának felső határát! (5 ponton felül: mi határozza meg a követési tartomány alsó határát?)

Adatok: XOR: $U_{OH}=5V$ és $U_{OL}=0V$, $R_1=10k\Omega$, $R_2=1k\Omega$, $C_1=20nF$, $R_3=R_4=R_5=R_6=10k\Omega$, $C_2=2nF$, a hiszterézises komparátor hiszterézis sávja $U_H=1V$.



14.c Az alábbi kapcsolást FM jel demodulálására kívánjuk használni. Jelölje be a kapcsoláson az x frekvencia modulált jelet és az y demodulált jelet!

A kapcsolásban adott: XOR: $U_{OH}=5V$ és $U_{OL}=0V$, $R_1=10k\Omega$, $R_2=1k\Omega$, $C_1=20nF$, a hiszterézises komparátor hiszterézis sávja $U_H=1V$. Válassza meg úgy az R_3 , R_4 , R_5 , R_6 , C_2 értékeket, hogy a demodulátor átviteli tényezője $1V/kHz$ legyen!



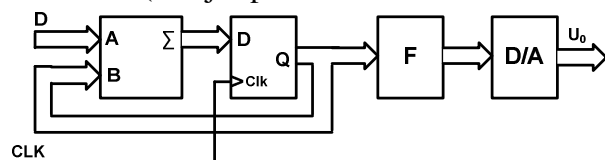
15. Rajzolja fel az integráló típusú VFC kapcsolási rajzát! Méretezze a kapcsolást az alábbi feltételekkel: a kapcsolás bemenő ellenállása legyen $10k\Omega$, a bemeneti jeltartomány $5..10V$, amelyhez $5..10kHz$ kimeneti frekvencia tartozik, a rendelkezésre álló referencia feszültség $1V$, a kimeneti jel kitöltési tényezője a maximális frekvencián 50% , a műveleti erősítő kimeneti jeltartománya $-10..10V$.

16. PLL segítségével $1kHz$ -es lépésekben programozható $100kHz$ és $1MHz$ közötti órajelet állítunk elő.

- Rajzolja fel a szintetizátor kapcsolási rajzát az elemek bit-számát is jelölve!
- Milyen mértékben változik a PLL szabályozási körének hurokerősítése?
- Hogyan méretezné a szabályozót?

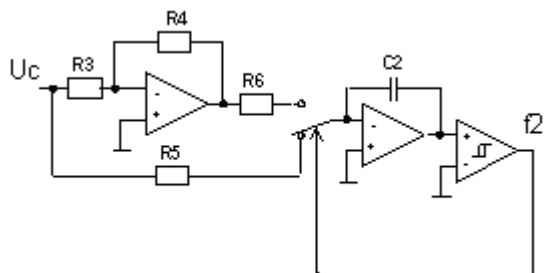
17. Egy $10kHz$ -es kvarc oszcillátor és egy DDS segítségével szinuszos jelet állítunk elő. Ismertesse a kapcsolás blokkvázlatát! Közelítően mekkora lehet az előállított jel maximális frekvenciája?

Megoldás: A kimeneti frekvencia az órajelet negyedét, azaz $2,5kHz$ -et érhet el a gyakorlati esetekben (a teljes periódust 4 mintavett értékkel közelítjük).



18.a Rajzolja fel a szimmetrikusan integráló VFC kapcsolási rajzát! Méretezze úgy a kapcsolást, hogy a maximum $5V$ -os vezérlő feszültség hatására a kimeneti frekvencia $1kHz$ legyen! A komparátor U_H hiszterézise $1V$, a megengedhető bemeneti áram $1mA$. Mekkora lesz a kimeneti frekvencia, ha a bemeneti feszültség $1V$? Hogyan változik meg a kimeneti frekvencia, ha a hiszterézises komparátor bemenetére egy $1MHz$ -es $10mV$ amplitúdójú zavaró jel szuperponálódik?

Megoldás:



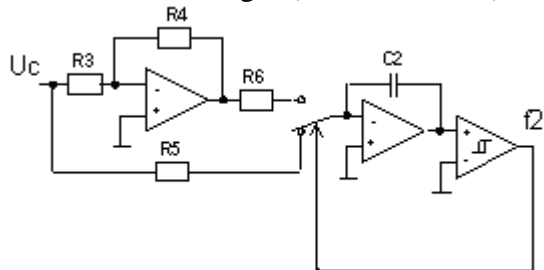
$I_{bmax} = U_{cmax} * (1/R3 + 1/R5)$. Legyen $R3 = R4 = R5 = R6$, így $R3 = 2 * U_{cmax} / I_{bmax} = 10k\Omega$.

$U_c / (R5 * C2) = U_H / (T/2) \rightarrow C2 = T/2 * U_c / U_H / R5 = 500\mu s * 5V / 10k\Omega = 250nF$

A kimeneti frekvencia, ha a bemeneti feszültség 1V: $1V / 5V * 1kHz = 200Hz$ lesz.

A zavaró jel hatása olyan, mintha a hiszterézis csökkent volna $2 * 10mV$ -tal, azaz az eddigi 200Hz helyett $200Hz * 1V / (1V - 20mV) = 204Hz$ lesz a kimeneti frekvencia.

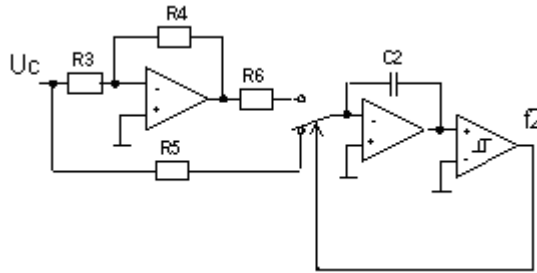
18.b Az alábbi kapcsolásban mindegyik ellenállás értéke $10k\Omega$, $C2 = 10nF$, $U_H = 1V$. Milyen funkciót valósít meg a kapcsolás (számszerűen is)? Mekkora lesz a bemeneti áram középértéke $10V$ bemeneti feszültségnél? Rajzolja fel $C2$ feszültségének időfüggvényét $10V$ bemeneti feszültségre (számszerűen is)!



18.c Rajzolja fel a szimmetrikusan integráló VFC kapcsolási rajzát! Méretezze úgy a kapcsolást, hogy a maximum $5V$ -os vezérlő feszültség hatására a kimeneti frekvencia $100kHz$ legyen! A komparátor U_H hiszterézise $1V$, a megengedhető bemeneti áram $1mA$. Rajzolja be egy ábrába a bemeneti áram, az integrátor feszültsége és a kimeneti feszültség időfüggvényét! Egészítse ki az áramkört (más színnel vagy bekeretezéssel jelölje) úgy, hogy a bemeneti áram elhanyagolható értékűre csökkenjen!

18.d Tervezzen olyan kapcsolást, amelynek kétállapotú, 50% -os kitöltési tényezőjű kimeneti feszültségének frekvenciája a vezérlő bemeneti feszültség $K_O = 10kHz/1V$ -szorososa. Felhasználható elemek: $U_H = 1V$ hiszterézisű komparátor, kizáró-vagy kapu, műveleti erősítők, ellenállások, kondenzátorok, diódák, monostabil multivibrátor, analóg multiplexer, de nem kell minden típust felhasználni. A kapcsolás bemeneti árama $10V$ -os bemeneti feszültség esetén se haladja meg az $1mA$ -t!

18.d Az alábbi kapcsolásban az összes ellenállás értéke $10k\Omega$, C_2 kapacitása $10nF$, a hiszterézisű komparátor komparálási pontjai $+1V$, ill. $-1V$. Jelölje be az ábrán a virtuális földponto(ka)t! Rajzolja be egy ábrába a 2 műveleti erősítő kimeneti feszültségét számszerűen is helyesen $U_c = 1V$ bemeneti feszültségre!



19. Tervezzen olyan fázisdetektort, amely frekvenciaérzékeny, kétállapotú jelekkel működik, átviteli tényezője $K_{PD}=0,159155[V/rad]$, élvezérelt és lineáris a $\pm 4\pi$ tartományban!

20. Rajzolja fel annak a PLL-nek a kapcsolási rajzát, ahol a fázisdetektor számláló és DA felépítésű, a szabályozó PI típusú, a VFC pedig az egyszeresen integráló változat! Mi határozza meg az áramkör követési, ill. behúzási frekvencia tartományát?

21.a Rajzolja fel a műveleti erősítő PI szabályozó **méretezett** kapcsolási rajzát! A szabályozó arányos erősítése legyen 10, késleltetése 50Hz bemeneti frekvencia mellett 45° legyen. A műveleti erősítő maximális kimeneti árama 1mA. A bemeneti feszültség a $-10V \dots +10V$ tartományban van, a következő fokozat bemeneti árama elhanyagolható.

21.b Tervezzen PLL-hez olyan PI szabályozót, amely nagyfrekvenciás átviteli tényezője -5, a +3dB-hez tartozó törésponti frekvenciája 1kHz és a fázisdetektort terhelő impedancia abszolút értéke legalább $1k\Omega$. Rajzolja fel a méretezett kapcsolási rajzot és a $W_C(jw)$ átviteli függvény amplitúdó és fázisdiagramját!

21.c Tervezzen PLL-hez olyan passzív szabályozót, amely nagyfrekvenciás átviteli tényezője 0,05, a -3dB-hez tartozó törésponti frekvenciája 1kHz és a fázisdetektort terhelő impedancia abszolút értéke legalább $1k\Omega$, a következő fokozat bemenő árama elhanyagolható. Rajzolja fel a méretezett kapcsolási rajzot és a $W_C(jw)$ átviteli függvény amplitúdó és fázisdiagramját!

22. Egy analóg PLL-ben a fázisdetektor egy $K_M=1/V$ átviteli tényezőjű analóg szorzó. A szabályozó passzív aluláteresztő tag. A bemeneti jel és a VCO kimeneti feszültségének amplitúdója egyaránt 2V. A VCO frekvenciája $U_C=0V$ vezérlő feszültség alatt 100kHz, $U_C=5V$ vezérlő feszültség felett 200kHz, közte lineárisan változik. Határozza meg a PLL f_H követési tartományát! Mekkora lesz a PLL követési hibája a követési tartomány közepén?

23. Rajzolja fel az integráló típusú VFC kapcsolási rajzát! A 0V, +10V bemeneti feszültség hatására a kimeneti jel frekvenciája 0Hz, 100kHz között változik, a maximális kimeneti frekvencián a kimeneti jel kitöltési tényezője 50%. A kapcsolást úgy méretezték, hogy a műveleti erősítő kimeneti feszültségének maximális értéke 5V. Rajzolja fel a műveleti erősítő kimenőfeszültségének időfüggvényét 5V bemeneti feszültség esetére a jellemző értékeket is bejelölve!

23.b Rajzolja fel azt a VFC kapcsolást, amely megfelel a következő adatoknak: A 0V, +10V bemeneti feszültség hatására a kimeneti jel frekvenciája 0Hz, 100kHz között változik, a kimeneti jel impulzusszélessége a bemeneti jeltől függetlenül 5 μs ! Felhasználható elemek: -1V értékű referencia forrás, komparátor, maximum 10V kimeneti feszültségű műveleti erősítő, monostabil multivibrátor, ellenállások és kondenzátorok.

24. Egy PLL segítségével 3 fázisú hálózathoz szeretnénk egy átalakító-kapcsolás vezérlését szinkronozni. Hogyan állítjuk elő a v_1 jelet? Milyen elven választjuk meg a PLL vágási körfrekvenciáját, ha a jelek mintavételezési gyakorisága 10kHz, a hálózati frekvencia 50Hz?

25. Egy PLL segítségével 50Hz-es 3 fázisú hálózathoz szeretnénk egy átalakító-kapcsolás vezérlését szinkronozni. Hogyan állítjuk elő a v_1 jelet? Elektronikus vagy szoftveres megoldás a jellemző? Miért?

26. Rajzolja fel az integráló típusú VFC kapcsolási rajzát! Méretezze a kapcsolást az alábbi feltételekkel: a kapcsolás bemenő ellenállása legyen 10kOhm, a bemeneti jeltartomány 0..10V, amelyhez 0..100kHz kimeneti frekvencia tartozik, a rendelkezésre álló referencia feszültség 10V, a kimeneti jel kitöltési tényezője a maximális frekvencián 25%, a műveleti erősítő kimeneti jeltartománya -10..10V. Rajzolja fel a műveleti erősítő kimenőfeszültségének időfüggvényét számszerűen is helyesen 5V bemeneti feszültségre!

27. PLL segítségével 1MHz-es órajelből 1kHz-es lépésekben programozható 100kHz és 1MHz közötti órajelet állítunk elő.

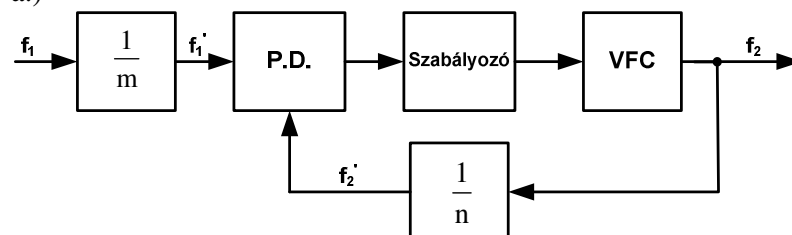
a.) Rajzolja fel a szintetizátor elvi rajzát!

b.) Határozza meg a frekvenciaosztók értékét, ill. tartományát!

c.) Milyen mértékben változik a PLL szabályozási körének hurokerősítése? Hogyan méretezné a szabályozót?

Megoldás:

a.)



b.) $f_2/n=f_1/m$, ahol n és m természetes számok, egy-egy digitális frekvenciaosztót képvisel. Az adott feltételek mellett $f_1'=1\text{kHz}$ lesz, tehát $m=f_1/f_1'=1\text{MHz}/1\text{kHz}=1000$. Mivel $f_2=f_1' \cdot n$, így n 100 és 1000 között programozható osztó.

c.) Mivel a programozható frekvenciaosztó a hurokban van, így 100:1000 arányban változik a hurokerősítés, alacsony kimeneti frekvenciánál a magasabb.

PI szabályozót választunk, $W_C = A_P \cdot \left(1 + \frac{1}{sT_I}\right)$, így biztosan nem gond a nagy átfogás (lineáris

VFC-nél U_C is 1:10 arányban változik). A felnyitott kör átviteli függvénye:

$$W = K_{PD} A_P \left(1 + \frac{1}{sT_I}\right) K_O \cdot e^{-sT_H} \frac{1}{2\pi s}$$

A_P -t a legnagyobb körerősítésre választjuk ($f_2=100\text{kHz}$). Élvezérelt fázisdetektort feltételezve a jelfüggő mintavételezést közelítő holtidős tag $T_H=1/f_2'$.

Az integráló tag késleltetését a legnagyobb körerősítésnél elhanyagolva és $\pi/3$ fázistöbbletre méretezve $\omega_C \cdot T_H = \pi - \pi/3 - \pi/2 = \pi/6$, ebből $\omega_C = \pi/6/T_H = \pi/6/1\text{ms} = 524[\text{rad/s}]$. Felírva a vágási

körfrekvencián a hurokerősítést: $|W| = 1 = K_{PD} A_P K_O \cdot \frac{1}{2\pi\omega_C}$, továbbá K_{PD} és K_O ismeretében

A_P meghatározható. Amennyiben K_{PD} és K_O nem ismert, A_P -t addig növeljük, amíg jelentős túllendülést nem kapunk n megváltoztatását követve.

Nagy kimeneti frekvenciát a frekvenciaosztást növelve érhetünk el, így a körerősítéssel együtt a vágási körfrekvencia is tizedrészére csökken ($\omega_c' = \omega_c \cdot 100/1000 = 52,4 [\text{rad/s}]$). Itt már a holtidős tag késleltetése lesz elhanyagolható, tehát az integráló tag $\text{atan}(1/(\omega_c \cdot T_I))$ késleltetése szabja meg a fázistartalékot. Továbbra is 60 fokos fázistartaléknál maradva $\text{atan}(1/(\omega_c \cdot T_I)) = \pi - \pi/3 - \pi/2 = \pi/6$, ebből $T_I = \text{sqrt}(3)/\omega_c' = 33 [\text{ms}]$.

27.b Egy 10MHz-es kvarc oszcillátor felhasználásával akarunk előállítani programozhatóan választható 0,5MHz, 1MHz, 1,5MHz ... 10MHz-es órajelet. Rajzolja fel a kapcsolást! Felhasználható (de nem okvetlenül szükséges) elemek: szimmetrikusan integráló VFC, programozható frekvencia osztó, fix frekvenciaosztó, PI szabályozó, fázisdetektor.

28. Rajzolja fel a PLL blokkvázlatát! Képzelve el, hogy keringőt lejt. Rendezze be a blokkokba az alábbi lista elemeit! (láb, szem, fül, agyi észlelés, agyi gondolkozás).