

SONKOLY AURÉL

Híradástechnikai Ipari Kutató Intézet

Univerzális aktív RC szűrők hibridáramkörü kivitelben

ETO 621.372.54.040.776;621.372.57.911.732.24

A kisfrekvenciás, hagyományos LC elemekből felépített szűrőknél nagy gondot jelent a nagy értékű induktivitás realizálása. Az áramkörökben szereplő induktivitás kiküszöbölhető, ha olyan elektronikus kapcsolást használunk, amelyik szimulálja az induktivitást. Az ilyen áramkör csak ellenállásokat, kapacitást és aktív elemeket tartalmaz. A szimulált induktivitás értéke kiszámítható, és a bemérés során könnyen változtatható. Az ilyen típusú realizálásnak az az előnye, hogy az eredetileg már kiszámított LC szűrő struktúráját nem kell megváltoztatni. Sajnos a szimulált induktivitásnak általában valamekkora soros ellenállása is van, amely pozitív és negatív is lehet. Ez a tervezésnél és a realizálásnál külön problémát jelent. Hátrányként elmondható még, hogy földfüggetlen induktivitás csak bonyolultabb áramkörrel hozható létre.

Ha nem ragaszkodunk az eredeti LC szűrő struktúrájához, akkor más megoldást is választhatunk. Az egyik legjobb megoldás a biquadrátikus kaszkád felbontás. Páros fokszám esetén mindig realizálható a szűrő másodfokú alaptagok kaszkád kapcsolásával. Páratlan fokszám esetén egy elsőfokú tagot is realizálni kell. A kaszkád kapcsolás azzal az előnnyel jár, hogy az egyes alaptagok egymástól függetlenül hangolhatók be. Az összekapcsolás után az egyes alaptagok egymást nem hangolják el, mivel az aktív RC szűrőkben levő műveleti erősítők kimeneti ellenállása a visszacsatolás miatt gyakorlatilag zérus.

Integrátoros aktív RC szűrők

A szakirodalomban a különböző aktív RC szűrő alapkapcsolások száma már szinte megszámlálhatatlan. Általánosan elmondható, hogy a kapcsolások bonyolultsági foka és érzékenysége között szoros kapcsolat van. Időnként az irodalomban csodakapcsolások jelennek meg, amelyekről rövid vizsgálat után kiderül, hogy érzékenységben és behangolási problémákban drágán kell megfizetni a megtakarított műveleti erősítőket.

Az aktív RC szűrőknél külön előnyt jelent, ha valamilyen sorrendben az áramkör paraméterei egymástól teljesen függetlenül behangolhatók. Ez a tulajdonság a hibridáramköröknél nagyon fontos, mert az ellenállások értékét trimmeléssel csak növelni tudjuk. Az ellenállások csökkentése csak külső elem segítségével lehetséges.

Az állapotváltozós kapcsolásoknak az a nagy előnyük, hogy az alapvető struktúrát megtartva, segítségével bármilyen típusú szűrő kialakítható. Ez az univerzális tulajdonság a hibridáramköröknél nagyon jól alkalmazható, hiszen így a különböző szűrőtípusok azonos topológiával gyárthatók.

A HIKI-ben kifejlesztett UI-01 univerzális integrátoros hibrid aktív szűrő áramkör az eddig felsorolt összes előnyös tulajdonsággal rendelkezik. Összesen hétféle szűrőtípus realizálható az áramkörrel, de az ábrázoláshoz elegendő négy kapcsolási rajz, mert az elemek más megválasztásával is kialakulhat különböző szűrőtípus.

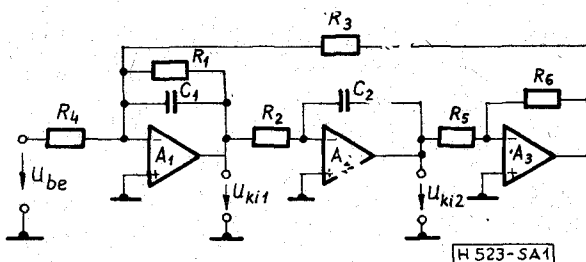
A szűrők alapját az 1. ábrán látható kapcsolás képezi. A negyedik műveleti erősítő összehadóként működik, és a szűrőtípusoknak megfelelő helyekről kapja az összeadandó jeleket.

Az egységes és egyszerűbb leírás érdekében érdemes két áramkörü paramétert kiemelni:

$$\omega^* = \sqrt{\frac{1}{R_2 R_3 C_1 C_2}}$$

$$Q = \sqrt{\frac{R_1^2 C_1}{R_2 R_3 C_2}}$$

ahol ω = körfrekvencia, Q = jósági tényező.



1. ábra

Ezek a paraméterek minden szűrőtípusnál szerepelnek, és a betűknek a későbbiekben mindig ez a konkrét jelentésük.

Aluláteresztő aktív RC szűrő

A szűrő kapcsolási rajza az 1. ábrán látható. Az áramkör kimenete U_{ki2} . Az általános biquadratikus aluláteresztő transzfer függvény a következő:

$$T(p) = \frac{U_{ki}}{U_{be}} = K \frac{1}{p^2 + \frac{\omega_p}{Q_p} p + \omega_p^2}$$

ahol ω_p = pólusfrekvencia, Q_p = pólusjóság, K = átviteli konstans.

A tényleges kapcsolás transzfer függvénye a következő:

$$T(p) = \frac{U_{ki2}}{U_{be}} = \frac{1}{R_2 R_4 C_1 C_2} \frac{1}{p^2 + \frac{1}{R_1 C_1} p + \frac{1}{R_2 R_3 C_1 C_2} \frac{R_6}{R_5}}$$

A két transzfer függvényt összehasonlítva az egyes jellemző paraméterek megkaphatók:

$$\omega_p = \omega^* \sqrt{\frac{R_6}{R_5}},$$

$$Q_p = Q \sqrt{\frac{R_6}{R_5}}$$

Ha a frekvencia a zérushoz tart, akkor a szűrő egyenfeszültségű átvitelét kapjuk meg, amelynek értéke:

$$T(p) \Big|_{\omega \rightarrow 0} = \frac{K}{\omega_p^2} = \frac{R_3 R_5}{R_4 R_6}$$

A szűrő frekvenciamenete az 5. ábrán látható. A szűrő töréspontos levágási meredeksége 12 dB/oktáv. A kiemelés mértéke a pólusjóságtól függ.

Sáváteresztő aktív RC szűrő

A szűrő kapcsolási rajza szintén az 1. ábrán látható, de az áramkör kimenete U_{ki1} . Az általános biquadratikus sáváteresztő átviteli függvény a következő:

$$T(p) = \frac{U_{ki}}{U_{be}} = K \frac{p}{p^2 + \frac{\omega_p}{Q_p} p + \omega_p^2}$$

A konkrét kapcsoláshoz tartozó transzfer függvény a következő:

$$T(p) = \frac{U_{ki1}}{U_{be}} = -\frac{1}{R_4 C_1} \frac{p}{p^2 + \frac{1}{R_1 C_1} p + \frac{1}{R_2 R_3 C_1 C_2} \frac{R_6}{R_5}}$$

A transzfer függvények összehasonlítása után a szűrő paraméterei a következők:

$$\omega_p = \omega^* \sqrt{\frac{R_6}{R_5}},$$

$$Q_p = Q \sqrt{\frac{R_6}{R_5}}$$

Az átviteli függvény értéke a pólusfrekvencián a következő:

$$T(p) \Big|_{\omega = \omega_p} = K \frac{Q_p}{\omega_p} = -\frac{R_1}{R_4}$$

A sáváteresztő szűrő frekvenciamenete a 6. ábrán látható.

A töréspontos levágási meredekség 6 dB/oktáv. A szűrő erősítése az R_1 és R_4 ellenállások értékétől függ.

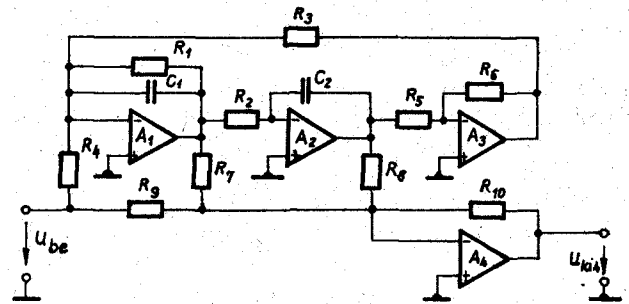
Elliptikus aluláteresztő aktív RC szűrő

A szűrő kapcsolási rajza a 2. ábrán látható. A szűrő kialakításához már külön összegző erősítőre is szükség van.

Az általános biquadratikus transzfer függvény a következőképpen írható fel:

$$T(p) = K \frac{p^2 + \frac{\omega_z}{Q_z} p + \omega_z^2}{p^2 + \frac{\omega_p}{Q_p} p + \omega_p^2} \tag{1}$$

ahol ω_z = zérus frekvencia, Q_z = zérus jóság.



2. ábra

Ez az átviteli függvény akkor lesz biquadratikus elliptikus aluláteresztő, ha $Q_z \rightarrow \infty$ és $\omega_z > \omega_p$. Így:

$$T(p) = K \frac{p^2 + \omega_z^2}{p^2 + \frac{\omega_p}{Q_p} p + \omega_p^2}$$

A tényleges áramkör átviteli függvénye a következő:

$$T(p) = \frac{U_{ki4}}{U_{be}} = -\frac{R_{10}}{R_9} \frac{p^2 + \frac{1}{R_1 C_1} \left(1 - \frac{R_1 R_9}{R_4 R_7}\right) p + \frac{1}{R_2 R_3 C_1 C_2} \left(\frac{R_6}{R_5} + \frac{R_3 R_9}{R_6} + \frac{R_5 R_9}{R_4 R_7}\right)}{p^2 + \frac{1}{R_1 C_1} p + \frac{1}{R_2 R_3 C_1 C_2} \frac{R_6}{R_5}}$$

A transzfer függvények megfelelő részeinek össze-

hasonlítása után az egyes hálózatjellemzők a következők:

$$\omega_n = \omega^* \sqrt{\frac{R_6}{R_5}},$$

$$Q_p = Q \sqrt{\frac{R_6}{R_5}},$$

$$\omega_z = \omega^* \sqrt{\frac{R_6}{R_5} + \frac{R_3 R_9}{R_4 R_8}},$$

$$Q_z = Q \frac{\sqrt{\frac{R_6}{R_5} \frac{R_3 R_9}{R_4 R_8}}}{1 - \frac{R_1 R_9}{R_4 R_7}},$$

$$K = -\frac{R_{10}}{R_9}.$$

A képletből jól látható, hogy a zérus jóság végtelenné tehető, ha

$$\frac{R_1 R_9}{R_4 R_7} = 1.$$

Vizsgáljuk meg a transzfer függvény viselkedését kis és nagy frekvencián!

Ha a frekvencia zérushoz tart, akkor az egyenáramú átvitelt kapjuk meg:

$$T(p) \Big|_{\omega \rightarrow 0} = K \left(\frac{\omega_z}{\omega_p} \right)^2.$$

Ha a frekvencia végtelenhez tart, akkor

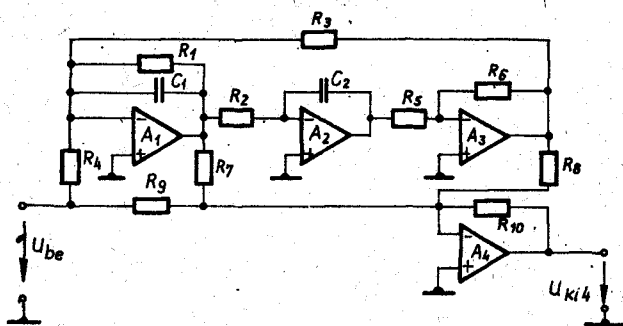
$$T(p) \Big|_{\omega \rightarrow \infty} = K.$$

Az elliptikus aluláteresztő szűrő frekvenciamenete a 7. ábrán látható.

Az elliptikus alaptagokra INVERZ CSEBISEB, CAUER és GENERAL PARAMÉTERES szűrők realizálásánál van szükség. Segítségükkel nagy oldalmeredekség érhető el.

Elliptikus felületáteresztő aktív RC szűrő

Az áramkör kapcsolási rajza a 3. ábrán látható. Az általános biquadratikus transzfer függvényből (1) úgy juthatunk el az elliptikus felületáteresztő átviteli függvényhez, ha $Q_z \rightarrow \infty$ és $\omega_z < \omega_p$.



H 523-SA 3

3. ábra

A konkrét áramkör transzfer függvénye a következő:

$$T(p) = \frac{U_{ki4}}{U_{be}} = -\frac{R_{10}}{R_9} \frac{p^2 + \frac{1}{R_1 C_1} \left(1 - \frac{R_1 R_9}{R_4 R_7}\right) p + \frac{1}{R_2 R_3 C_1 C_2} \left(1 - \frac{R_3 R_9}{R_4 R_8}\right) \frac{R_6}{R_5}}{p^2 + \frac{1}{R_1 C_1} p + \frac{1}{R_2 R_3 C_1 C_2} \frac{R_6}{R_5}}. \quad (2)$$

Az összevetés után kapott jellemző paraméterek a következők:

$$\omega_p = \omega^* \sqrt{\frac{R_6}{R_5}},$$

$$Q_p = Q \sqrt{\frac{R_6}{R_5}},$$

$$\omega_z = \omega^* \sqrt{\frac{R_6}{R_5}} \sqrt{1 - \frac{R_3 R_9}{R_4 R_8}},$$

$$Q_z = Q \sqrt{\frac{R_6}{R_5}} \sqrt{\frac{1 - \frac{R_3 R_9}{R_4 R_8}}{1 - \frac{R_1 R_9}{R_4 R_7}}},$$

$$K = -\frac{R_{10}}{R_9}.$$

Nyilvánvaló, hogy $Q_z \rightarrow \infty$, ha $\frac{R_1 R_9}{R_4 R_7} = 1$.

Nézzük meg a transzfer függvény viselkedését kis és nagy frekvencián!

Ha a frekvencia zérushoz tart, akkor

$$T(p) \Big|_{\omega \rightarrow 0} = K \left(\frac{\omega_z}{\omega_p} \right)^2.$$

Ha a frekvencia végtelenhez tart, akkor

$$T(p) \Big|_{\omega \rightarrow \infty} = K.$$

Az elliptikus felületáteresztő frekvenciamenete a 8. ábrán látható.

Felületáteresztő aktív RC szűrő

A szűrő kapcsolási rajza a 3. ábrán látható.

Az általános biquadratikus felületáteresztő átviteli függvény a következő:

$$T(p) = K \frac{p^2}{p^2 + \frac{\omega_p}{Q_p} p + \omega_p^2}.$$

Ez a függvény megfelel egy elliptikus transzfer függvénynek, ha $\omega_z = 0$.

A konkrét áramkör transzfer függvénye teljesen megegyezik az elliptikus felületáteresztő szűrő átviteli függvényével (2).

ω_z akkor tart zérushoz, ha

$$\frac{R_3 R_9}{R_4 R_8} = 1.$$

Ha ez a feltétel már teljesül, akkor az áramkör paraméterei a következők:

$$\omega_p = \omega^* \sqrt{\frac{R_6}{R_5}},$$

$$Q_p = Q \sqrt{\frac{R_6}{R_5}},$$

$$K = -\frac{R_{10}}{R_9}.$$

Az áramkör átvitele nagy frekvencián:

$$T(p) \Big|_{\omega \rightarrow \infty} = K.$$

A felüláteresztő szűrő frekvenciamenete a 9. ábrán látható.

A szűrő oldalmeredeksége 12 dB/oktáv.

Sávzáró aktív RC szűrő

Az áramkör kapcsolási rajza a 4. ábrán látható. Az elliptikus szűrők egyik speciális esete a sávzáró vagy lyukszűrő. Ha egy elliptikus szűrőnél a zérus frekvenciája megegyezik a pólus frekvenciájával: $\omega_z = \omega_p = \omega_0$ és $Q_z \rightarrow \infty$, akkor sávzáró szűrőt kapunk.

Így az általános biquadrátikus sávzáró transzfer függvénye a következő:

$$T(p) = K \frac{p^2 + \omega_0^2}{p^2 + \frac{\omega_0}{Q_p} p + \omega_0^2}.$$

A 4. ábrán látható kapcsolat átviteli függvénye a következő:

$$T(p) = \frac{U_{ki4}}{U_{be}} = -\frac{R_{10}}{R_9} \frac{p^2 + \frac{1}{R_1 C_1} \left(1 - \frac{R_1 R_9}{R_4 R_7}\right) p + \frac{1}{R_2 R_3 C_1 C_2} \frac{R_6}{R_5}}{p^2 + \frac{1}{R_1 C_1} p + \frac{1}{R_2 R_3 C_1 C_2} \frac{R_6}{R_5}} \quad (3)$$

Az összehasonlítás után a jellemző paraméterek a következők:

$$\omega_0 = \omega^* \sqrt{\frac{R_6}{R_5}},$$

$$Q_p = Q \sqrt{\frac{R_6}{R_5}},$$

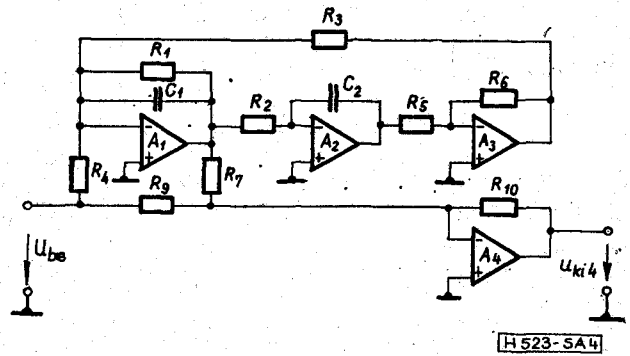
$$K = -\frac{R_{10}}{R_9}.$$

A sávzáró szűrő frekvenciamenete a 10. ábrán látható.

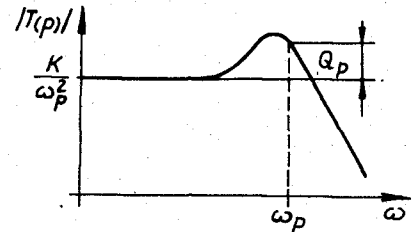
A sávzáró szűrők kiválóan alkalmasak egy bizonyos zavaró frekvencia kiszűrésére.

Mindentáteresztő aktív RC szűrő

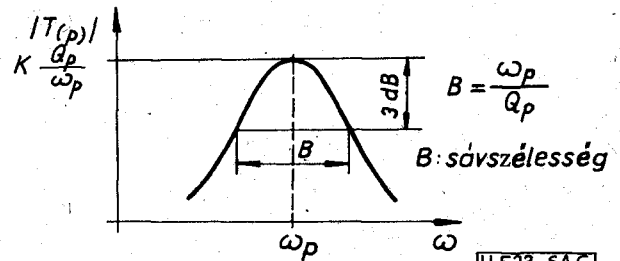
A mindentáteresztő kapcsolási rajza a 4. ábrán látható. A futási idő korrektorok építőeleme a mindentáteresztő.



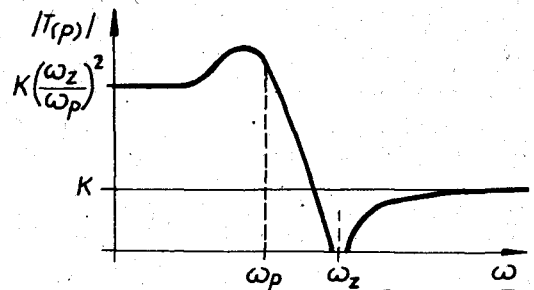
4. ábra



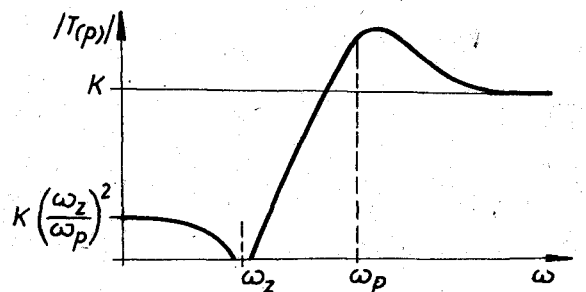
5. ábra



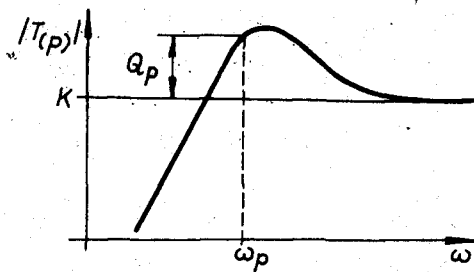
6. ábra



7. ábra



8. ábra



H 523-SA 9

9. ábra

Az általános biquadratikus mindentáeresztő transzfer függvénye a következő:

$$T(p) = K \frac{p^2 - \frac{\omega_0}{Q_0} p + \omega_0^2}{p^2 + \frac{\omega_0}{Q_0} p + \omega_0^2}$$

A függvény nevezője és számlálója csak az elsőfokú tag előjelében különbözik. Ha erősítés nem szükséges, akkor $K=1$. A tényleges áramkör transzfer függvénye megegyezik a sávzáróval (3).

Ahhoz, hogy a (3) függvény mindentáeresztő transzfer függvény legyen, a következő feltételnek kell teljesülnie:

$$\frac{R_1 R_9}{R_4 R_7} = 2.$$

Ha ez a feltétel már teljesült, akkor az áramkörü paraméterek a következők:

$$\omega_0 = \omega^* \sqrt{\frac{R_6}{R_5}}$$

$$Q_0 = Q \sqrt{\frac{R_6}{R_5}}$$

$$K = -\frac{R_{10}}{R_9}$$

A mindentáeresztő frekvenciamenete és fázismenete a 11. ábrán látható.

Az amplitúdómenet természetesen csak pontosan behangolt mindentáeresztőnél konstans.

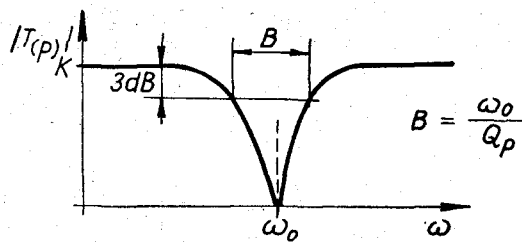
Különleges megfontolások

Elég gyakran előfordul, hogy az R_1 és R_4 ellenállás értéke a méretezés során túl nagyra adódik. Az ellenállás csökkentő módszereket vékonyréteg-technikában érdemes alkalmazni, mert a nagy ellenállás csak nagy felületen valósítható meg.

A 12. ábrán látható két kapcsolás ekvivalens egymással.

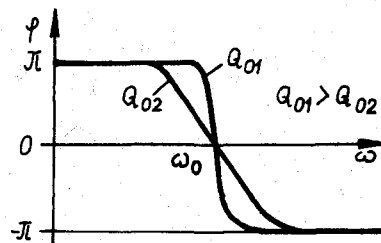
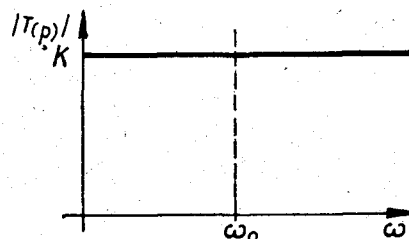
Az áramkörü egyenleteket felírva és megoldva, a következő végeredmény adódik:

$$R_{11} = \frac{R_{13}(R_1 - R_{12})}{R_{12} + R_{13}}$$



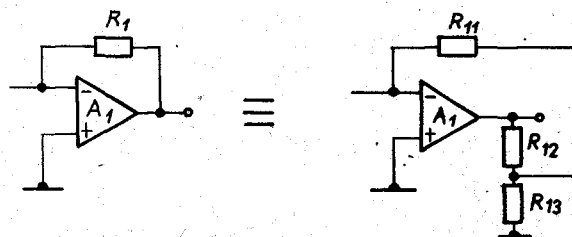
H 523-SA 10

10. ábra



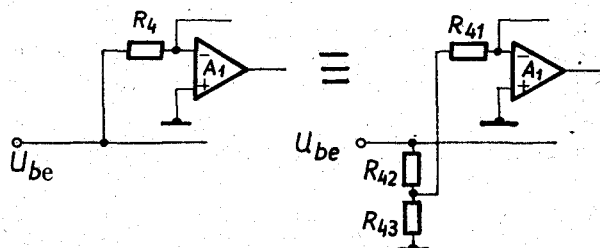
H 523-SA 11

11. ábra



H 523-SA 12

12. ábra



H 523-SA 13

13. ábra

Az elemek megválasztásánál vigyázni kell arra, hogy $R_{12} + R_{13}$ értéke terheli a műveleti erősítő kimenetét (R_{11} már elhanyagolható mértékben).

A 13. ábrán látható két kapcsolás ekvivalens egymással, ha a bemenet feszültséggenerátorral van vezérelve.

Az áramkörü egyenleteket megoldva a következő adódik:

$$R_{41} = \frac{R_{43}(R_4 - R_{42})}{R_{42} + R_{43}}$$

Ez a megoldás csökkenti a szűrő bemeneti ellenállását.

Az elsőfokú tagok realizációja

Mint tudjuk, páratlan fokszámú approximáció esetén elsőfokú építőelemekre is szükség van.

Elsőfokú aluláteresztő

Az áramkör kapcsolási rajza a 14. ábrán látható. A transzfer függvény a következő:

$$T(p) = \frac{U_{ki}}{U_{be}} = \frac{1}{1 + pRC}$$

Ha a C kapacitást egyéb áramkör terheli, akkor azt is be kell számítani.

Az integrátoros kapcsolás összegző műveleti erősítője is kialakítható elsőfokú aluláteresztőként. Ez a 15. ábrán látható.

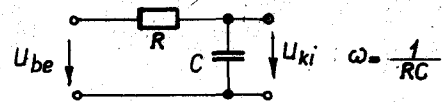
Ez a megoldás azért célszerű, mert a kimenet a műveleti erősítőre megengedett mértékig terhelhető.

Elsőfokú felüláteresztő

Az áramkör rajza a 16. ábrán látható. Az átviteli függvény a következő:

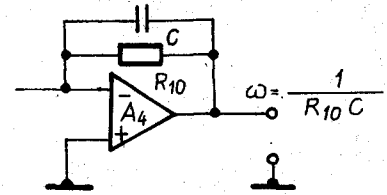
$$T(p) = \frac{U_{ki}}{U_{be}} = \frac{pRC}{1 + pRC}$$

Ha az R ellenállást más áramkör terheli, akkor az átviteli függvényt aszerint kell módosítani.



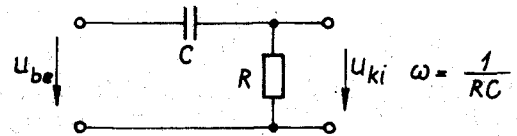
H 523-SA 14

14. ábra



H 523-SA 15

15. ábra



H 523-SA 16

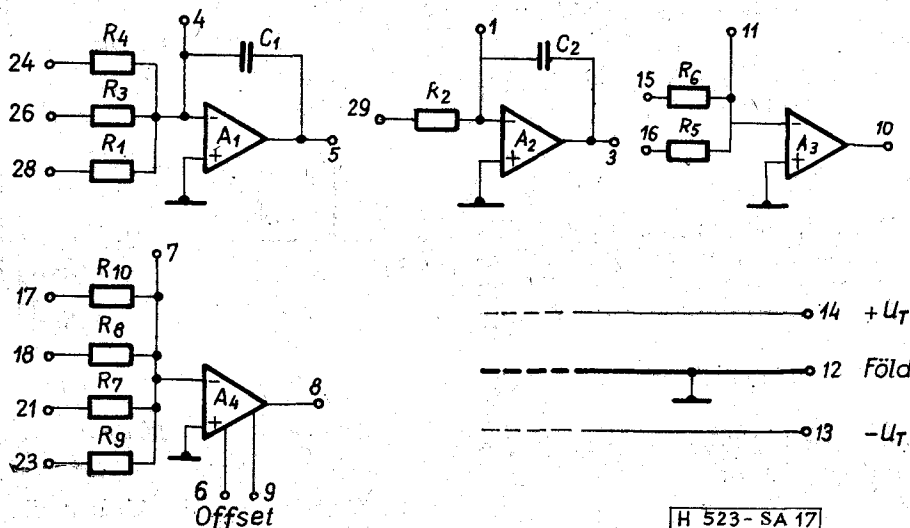
16. ábra

Az integrátoros aktív RC szűrők hibridáramkörü kialakítása

Általános megfontolások és a gyakorlati kivitel

A széles frekvenciatartomány és a kapacitások szűk választéka miatt érdemes az áramkört vastagréteg-technikával készíteni. Egyébként vékonyréteg-technikával nagyobb pontosság érhető el, de az ellenállások értéktartománya ilyen esetben sokkal kötöttebb. A legtöbb esetben a vastagréteg-technológiával elérhető pontosság is elegendő.

Gyakori felhasználói igény a szűrők későbbi finom behangolása, így a lapkán csak a biztosan összeköt-



H 523-SA 17

17. ábra

betű pontok vannak összekötve. Az UI—01 integrátoros aktív RC szűrő kapcsolási rajza a 17. ábrán látható.

A szűrőhöz felhasznált műveleti erősítő a μA 741-nek megfelelő miniatűr kiviteli formájú TBA 221D.

Az áramkörben az egyes ellenállások alakja különleges (kalap alakú), így nagymértékű ellenállás-trimmelés végezhető el az ellenállás stabilitásának lényeges romlása nélkül.

Az áramkör topológiája olyan, hogy az egyes ellenállásokhoz kívülről sorosan és párhuzamosan is köthetők külső beállító ellenállások, ha ez szükséges. Az egyes ellenállások a konkrét feladatnak megfelelő pasztákkal nyomtathatók. A C_1 , C_2 kapacitással kívülről bármekkora kapacitás kapcsolható párhuzamosan.

Az integrált áramkörök alatt a vezető hálózat nyomtatása kétrétegű, de csak olyan vezetékek keresztezik egymást, amelyek egymásra semmilyen háttal nincsenek.

A szűrő 1" \times 1,5" méretű lapkán készül. A 2×15 kivezető láb módot ad bármilyen típusú szűrő kialakítására, sőt a bemerés során a további belső pontok gyors és pontos mérésre adnak lehetőséget.

Néhány áramköri realizációnál nincs szükség az A_4 összegző műveleti erősítőre. Ilyen esetben ez elhagyható, de a felhasználó kívánságára más funkcióra is beállítható.

Az integrátoros szűrők bemérése

A szűrő aktívan és passzívan is trimmelhető. Az áramkör topológiája olyan, hogy minden ellenállás jól hozzáférhető. A behangolás sorrendje nagyon fontos, mert csak így érhető el, hogy az előzőleg már beállított ellenálláshoz nem kell újból visszatérni. A beállítási sorrend a következő:

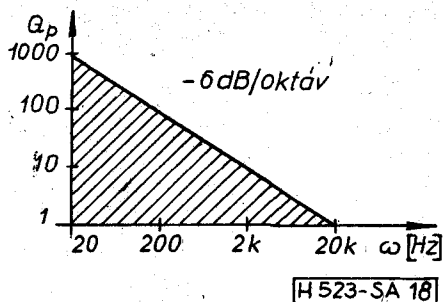
1. ω_p = pólus frekvencia: R_3 ellenállással,
2. Q_p = pólus jóság: R_1 ellenállással,
3. ω_z = zérus frekvencia: R_5 ellenállással,
4. Q_z = zérus jóság: R_7 ellenállással,
5. az átviteli konstans: R_{10} ellenállással (négy műveleti erősítő esetén).

Az UI—01 néhány jellemző elektromos paramétere

A szűrővel még biztonságosan realizálható Q_p tartomány a 18. ábrán látható.

Az UI—01-gyei 20 Hz alatt is készíthetünk aktív szűrőt, de ilyen esetben a nagy értékű kapacitásokat kívülről kell bekötni, mert nagy méretű kapacitás nem fér el az áramköri tokban.

A valagtértegen ellenállások tűrése $\pm 1\%$, stabilitásuk az alkalmazott paszta függvénye. A belső kapacitás



18. ábra

tűrése $\pm 1\%$, a TK ± 30 ppm; há MCB csillám chip kondenzátort alkalmazunk.

Az összegző erősítő offset nullázható. A tápfeszültség ± 15 V. Az áramkör áramfelvétele $3 \times 2,8$ mA vagy $4 \times 2,8$ mA, a szűrő típusától függően.

Összefoglalás

Összefoglalásként megállapíthatjuk, hogy a jelenleg beszerezhető integrált áramkörökkel készült aktív RC szűrők csak kis frekvencián versenyképesek a hagyományos LC szűrőkkel. Ez a tulajdonság egyben meghatározza az aktív szűrők alkalmazási területét.

A hibrid integrált aktív szűrők alkalmazásával általában a teljes berendezés mérete is csökkenthető, ami a legtöbb esetben előnyös.

I R O D A L O M

- [1] Dr. Géher K.: Lineáris Hálózatok. Műszaki Könyvkiadó, Bp. 1968.
- [2] Lawrence P. Huelsman: Active Filters: Lumped, Distributed, Integrated, Digital, and Parametric. McGraw-Hill Book Company, 1970, New York
- [3] J. Tow: A Step-by-Step Active-Filter Design. IEEE Spectrum, December 1969, New York
- [4] LeóC. Thomas: The Biquad: Part I — Some Practical Design Considerations. IEEE Transactions on Circuit Theory, May 1971.
- [5] W. J. Kerwin, L. P. Huelsman, and R. W. Newcomb: State-Variable Synthesis for Insensitive Integrated Circuit Transfer Functions. IEEE Journal of Solid-State Circuits, September 1967.
- [6] Richard W. Daniels: Approximation Methods for Electronic Filter Design with Applications to Passive, Active, and Digital Networks. McGraw-Hill Book Company, 1974, New York
- [7] S. S. Haykin: Active Network Theory. Addison-Wesley Publishing Company, 1970.
- [8] Sonkoly A.: Aktív RC szűrők hibrid kivitelben. A Híradástechnikai Ipari Kutató Intézet Közleményei, XVII. évf. (1977) 2. sz.