

A műveleti erősítő okozta póluseltolódás és korrekciója az aktív szűrőknél

DR. SZÉKELYNÉ NIKODEMUSZ ÉVA
 Budapesti Elektroakusztikai Gyár
 DR. SZÉKELY VLADIMIR
 BME Elektronikus Eszközök Tanszék

Aktív szűrő áramkörök építéskor sokszor tapasztaljuk, hogy a megépített áramkör távolról sem teljesíti a méretezésnél alapul vett specifikációt. Ezt természetesen az $R-C$ elemek értékének pontatlansága is okozhatja, de gyakori eset, hogy igen gondosan beállított elemértékek mellett is megengedhetetlen eltérés adódik a megkívánt és a realizált frekvenciamenet között.

Nézzünk erre egy példát. Hangfrekvenciás aluláteresztő szűrőt tervezünk, $f_h = 16$ kHz határfrekvenciával. A követelményeket hatodfokú Csebisev-karakterisztikával tudjuk kielégíteni, 0,5 dB átérés-tőssávbeli csillapításingadozással. Az ennek megfelelő három póluspár adatai relatív egységben az 1. táblázatban láthatók.

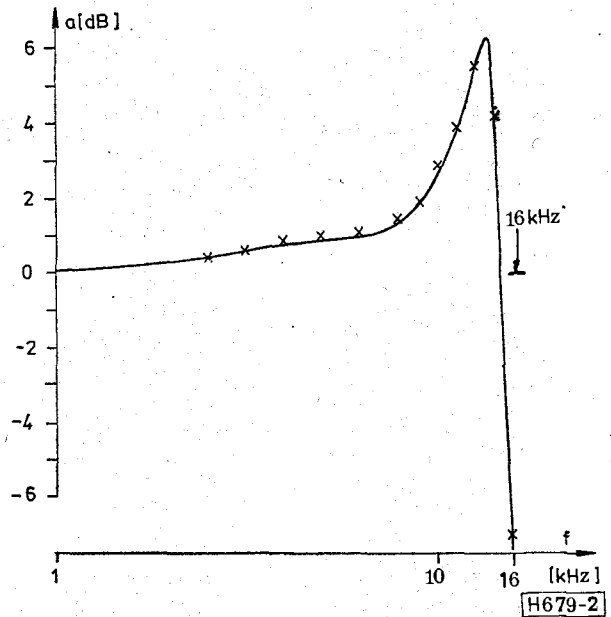
1. táblázat

	ω_0	Q
1.	0,39634	0,68351
2.	0,76819	1,8096
3.	1,0115	6,5100

Az előírt teljes erősítés egységnyi.

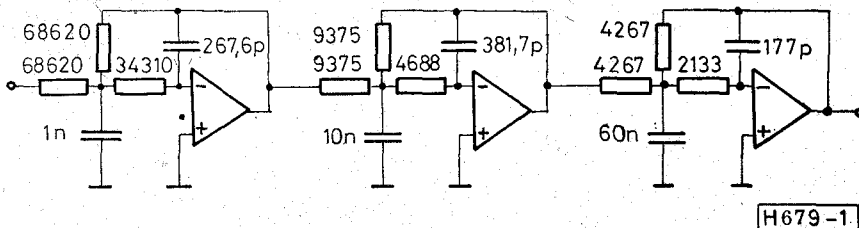
A szűrőt alaptagonként egységnyi erősítéssel, a szokásos méretezési egyenletekkel számolva (1. pl. [1]) az 1. ábrán látható áramkör adódik. Mindhárom póluspárt ugyanazzal az alptaggal valósítottuk meg, műveleti erősítőként a μA 741 áramkört alkalmaztuk.

A szűrőt 1%-nál pontosabb elemértékekkel megépítve, az átviteli karakterisztika mérésénél azonban a tervezettől lényegesen eltérő görbét kapunk. A 2. ábrán keresztekkel jelöltük a frekvenciamenet



2. ábra. Az 1. ábra szerinti szűrő frekvenciamenete, ha az alkalmazott műveleti erősítő μA 741 típusú. Keresztek — mért értékek, folytonos vonal — számítógépes szimuláció

mért pontjait. A határfrekvencia lejjebb tolódott, ugyanakkor az átvitel max. 0,5 dB-es ingadozása helyett kb. 6 dB-es kiemelést tapasztaltunk. Ellenőrizzük a mérési eredményeket gépi szimulációval is! A TRANZ-TRAN áramkör-szimulációs program segítségével vizsgálva az áramkör átviteli karakterisztikáját, a 2. ábrán folytonos vonallal jelölt



1. ábra. Hatodfokú Csebisev aluláteresztő szűrő 16 kHz határfrekvenciával

eredményt kapjuk (a futtatás során a $\mu\text{A} 741$ műveleti erősítőt a [2] irodalomban leírt lineáris modellel vettük számításba).

Megállapíthatjuk, hogy mérés és gépi szimuláció egybehangzóan tanúsítja: a szokásos méretezési összefüggésekkel tervezett szűrő alkalmatlan az előírt specifikáció teljesítésére.

A tervezett és mért karakterisztikák közti lényeges eltérés oka a műveleti erősítő ideálistól eltérő voltában keresendő. A méretezési képletek ugyanis ideális műveleti erősítőt feltételeznek, nem veszik figyelembe az erősítő frekvenciatartománybeli viselkedését. Ennek következményei már meglehetősen kis frekvenciákon megmutatkoznak. Előfordul, hogy a műveleti erősítő egységnyi erősítéshez tartozó határfrekvenciájának századrészénél az aktív szűrő már használhatatlan.

Fentiek tudatában nem meglepő, hogy az aktív szűrők szakirodalmában jelentős teret szentel az alkalmazott műveleti erősítő hatásának elemzésére. A [3] alatt hivatkozott forrás mutat rá arra a tényre, hogy a szűrők működésében a zavarokat elsősorban a műveleti erősítő fázistolása okozza; az erősítés abszolút értékének frekvenciafüggése kisebb hatású. Ugyanez a — viszonylag korai — forrás arra is felhívja a figyelmet, hogy az egyes használatos alaptagok működését különböző mértékben zavarja meg az erősítők véges erősítése és fázistolása. Sok forrásban (pl. [4], [5], [6]) találunk erre vonatkozóan különböző használatos áramkörök közötti összehasonlító adatokat. Szempontként jelent meg az alaptagáramkörök kialakításánál a kicsiny, esetleg nulla érzékenység az alkalmazott műveleti erősítő paramétereire vonatkozóan; sok cikk (pl. [5], [6], [7], [8]) javasol ennek figyelembevételével kialakított új áramköröket.

Megjegyezzük, hogy ez a megközelítés — olyan alaptagok kialakítása, melyek speciálisan kis érzékenységet mutatnak az aktív elemekre vonatkozóan — rejt magában bizonyos problémákat. Az áramkörök eleve költségesek és bonyolultak (3–5 műveleti erősítőt tartalmaz egy-egy alaptag). Az előnyök sem egyértelműek: van olyan áramkör [7], amely teljesen „kioltja” a realizált Q -ra vonatkozó érzékenységet, de az ω_0 rezonanciafrekvenciát ennél az alaptagnál is „elhúzzák” a műveleti erősítők. Feltétele továbbá a kis — vagy éppen nulla — érzékenységnek az alkalmazott műveleti erősítők teljesen azonos frekvenciamenete, ami nem biztosítható könnyen a kivitelezésnél.

Cikkünkben más utat vázolunk fel a valóságos műveleti erősítő okozta konstrukciós nehézségek kiküszöbölésére. Az egyszerű és olcsó, egyerősítős alaptagokra fordítjuk figyelmünket. Ahelyett, hogy az áramkör bonyolítása árán akarnánk csökkenteni a műveleti erősítő frekvenciamenetének hatását, a méretezés során beszámítjuk ezt a hatást, úgy határozva meg az elemértékeket, hogy éppen a valóságos erősítővel épített alaptag szolgáltassa a megkívánt pólusokat. Új méretezési összefüggéseket vezetünk tehát be az ideális erősítőt feltételező közismert képletek helyett.

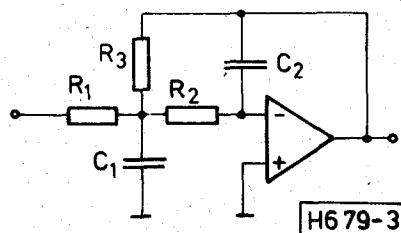
A cikkben követett gondolatmenetünk lépései a következők:

- megvizsgáljuk először, hogy a műveleti erősítő milyen mértékben módosítja, „húzza el” az egyes alaptagok pólusait az ideálishoz képest;
- alaptagonként meghatározzuk azt a pólustartományt, amelyen belül az ideális műveleti erősítővel számoló tervezés elfogadható pontosságú;
- egy sor különböző alaptagra megadjuk a műveleti erősítő tulajdonságait figyelembe vevő méretezési összefüggéseket. Ezek felhasználásával a műveleti erősítő okozta póluseltolódás korrigálódik.

Cikkünkben — terjedelem okokból — elsősorban aluláteresztő alaptagokkal foglalkozunk. Egy-egy példán azonban a sávszűrőre és a feluláteresztőre vonatkozó korrigált tervezést is bemutatjuk.

1. A póluseltolódás számítása

Részletes számításainkat a 3. ábrán látható kétszeresen visszacsatolt aluláteresztő alaptagra végezzük. (Az egyéb alaptagokra vonatkozóan csak a végeredményeket fogjuk közölni. A számítások részletezése érdektelen volna, mert azok minden alaptagra vonatkozóan pontosan ugyanazt a menetet követik.) A 3. ábra szerinti alaptag ideális esetben egy konjugált komplex póluspárt hoz létre.



3. ábra. Kétszeresen visszacsatolt aluláteresztő alaptag

A műveleti erősítőnek csak két tulajdonságát vesszük figyelembe:

- véges nyílt hurkú erősítés (jelöljük A_0 -val, mindig abszolút értéket jelent, és feltesszük, hogy $A_0 > 10^4$);
- a frekvenciamenet egy töréspontja, amit ω_M -mel jelölünk (egy jól kompenzált műveleti erősítőre általában elfogadható közelítés, ha frekvenciamenetében egyetlen töréspontot veszünk figyelembe).

E két adat szolgáltatja a frekvenciameneten az egységnyi erősítés ω_1 frekvenciáját ($\omega_1 = A_0 \omega_M$, lásd 4. ábra). Ezzel a műveleti erősítő modellünk átvitele

$$U_{kl} = (U_{be}^+ - U_{be}^-) \frac{A_0}{1 + \frac{p}{\omega_M}} \quad (i)$$

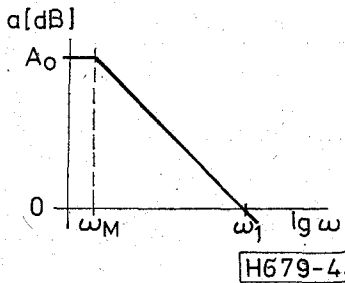
Ha a 3. ábrán látható hálózat műveleti erősítőjét (1) szerint modellezzük, az átviteli függvény elemi számítások eredményeként így adódik:

$$A(p) = \frac{-k}{1 + p \left[\frac{2(1+k)}{\omega_A} + \frac{1+k}{\omega_1} \right] + p^2 \left[\frac{1}{\omega_A \omega_B} + \frac{1}{\omega_1 \omega_B} + \frac{2(1+k)}{\omega_1 \omega_A} \right] + p^3 \frac{1}{\omega_1 \omega_A \omega_B}}, \quad (2)$$

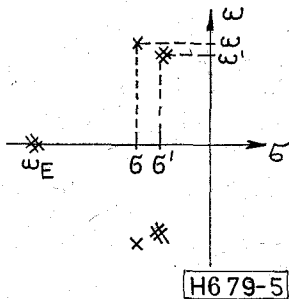
ahol $k=R_3/R_1$, az alaptag egyenáramú erősítésének abszolút értéke, és

$$\omega_A = \frac{1}{R_2 C_2}, \quad (2a)$$

$$\omega_B = \frac{1}{R_3 C_1}. \quad (2b)$$



4. ábra. Így közelítjük a valóságos műveleti erősítő frekvenciamevetését



5. ábra. A 3. ábra szerinti alaptag pólusai. Kereszt — ideális műveleti erősítő, kettős kereszt — valóságos műveleti erősítő

Tekintve, hogy műveleti erősítő modellünk egy többlépőpólust hozott be, nem meglepő, hogy az átviteli függvénynek három pólusa van: egy konjugált komplex póluspár, amely közel esik a megvalósítandó póluspárhoz, továbbá egy valós pólus a műveleti erősítő töréspontja miatt, az ω_1 frekvencia közelében. A pólusok elhelyezkedését az 5. ábrán tüntetjük fel. Itt ω és σ az ideális műveleti erősítő esetén előálló pólus, ω' és σ' a valóságos műveleti erősítő által eltoló pólus koordinátái, ω_E pedig a járulékos valós pólus koordinátája. A tervezéshez célszerűbb ω_0 és Q (illetőleg ω'_0 és Q') adatok a szokásos módon adódnak:

$$\omega_0 = \sqrt{\omega^2 + \sigma^2}, \quad (3)$$

$$Q = \frac{\omega_0}{2\sigma}. \quad (4)$$

Az eltolódott pólusok helyének meghatározásához a (2) kifejezés nevezőjében álló harmadfokú egyenletet kell megoldanunk. Erre a Cardano-féle megoldó-

képletet használjuk fel. A számítás a következő eljárást követve végezhető el egyszerűen. A $0 = ap^3 + bp^2 + cp + d$ egyenlet a, b, c, d együtthatói segítségével kiszámítjuk a következő mennyiségeket:

$$s = \frac{b}{3a},$$

$$t = \frac{c}{a}, \quad (5)$$

$$q = s^3 + \frac{d - c \cdot s}{2a},$$

továbbá

$$p = \frac{t}{3} - s^2,$$

$$r = q^2 + p^3. \quad (6)$$

Ha $r > 0$, akkor egy valós gyök és egy komplex konjugált gyökkpár adódik a következő módon. Kiszámítjuk először az u, v segédmennyiségeket:

$$u = \sqrt[3]{-q + \sqrt{r}},$$

$$v = \sqrt[3]{-q - \sqrt{r}}. \quad (7)$$

Ezután

$$\omega_E = u + v - s,$$

$$\sigma' = -\frac{u+v}{2} - s, \quad \omega' = \pm \frac{\sqrt{3}}{2}(u-v), \quad (8)$$

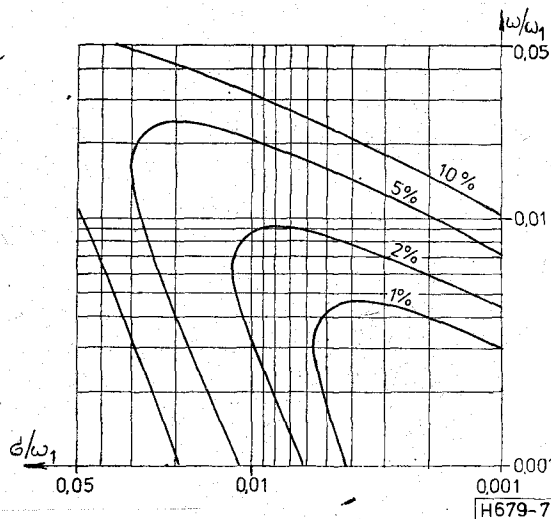
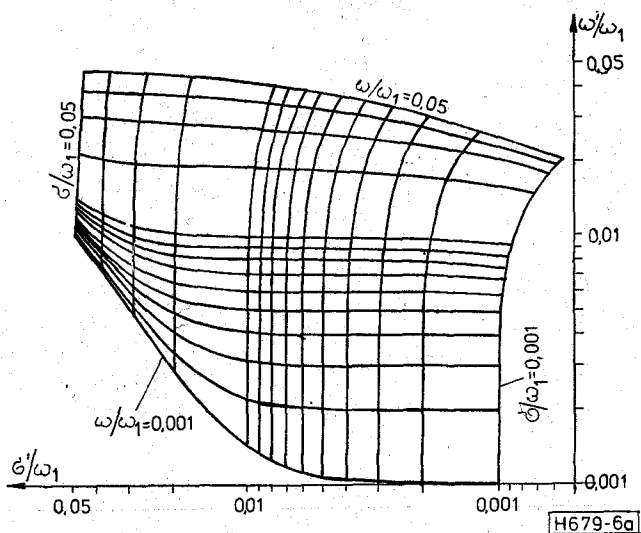
ahol ω_E a valós pólus, σ' és ω' a konjugált komplex póluspár koordinátái.

A fenti összefüggéseket felhasználva, számítógép segítségével végigszámoltuk a gyakorlatilag érdekes pólustartományra, hogy a valóságos műveleti erősítő hatására a pólusok milyen mértékben tolódnak el az ideálishoz képest.

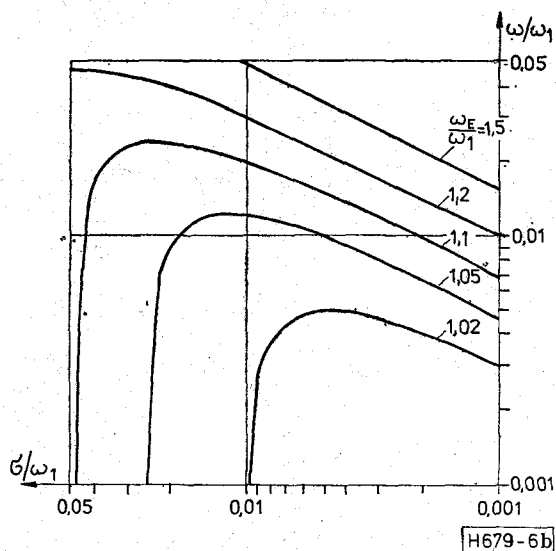
A számítás eredményét a 6. ábrán láthatjuk kétszer logaritmikus ábrázolásban.

Az ábrán minden σ és ω értéket a műveleti erősítő ω_1 határfrekvenciájával normáltunk. Így a diagram tetszőleges műveleti erősítőre érvényes (feltevé, ha $A_0 > 10^4$).

A 6a ábra görbeserege a komplex póluspár ideális műveleti erősítő esetén érvényes σ és ω értékével van paraméterezve, s a tengelyeken a valóságos erősítő esetén adódó σ' és ω' értékek olvashatók le. Így a diagram segítségével az $\omega, a < 0,05\omega_1$ tartomány póluseltolódásai jól nyomon követhetők. A 6b ábrából a műveleti erősítő által behozott valós pólus ω_E frekvenciája olvasható le.



7. ábra. A 3. ábra szerinti alaptag póluseltolódásai valóságos műveleti erősítő esetén



6. ábra. A 3. ábra szerinti alaptag viselkedése valóságos műveleti erősítő figyelembevételével. a) a konjugált komplex póluspár eltolódása, b) a valós pólus frekvenciája

2. Az ideális műveleti erősítővel számoló méretezés hibája

Kis frekvenciákon — a 6a ábrából is láthatóan — a póluseltolódás mértéke még nem számottevő, az ideális műveleti erősítővel számoló méretezési összefüggések pontossága elfogadható. Kérdés, hogy melyik $\sigma-\omega$ tartomány az, amelyben még alkalmazhatjuk a szokásos méretezési összefüggéseket? Ennek meghatározásához célszerű valami módon definiálni a póluseltolódás mértékét. Legyen ez a mérték:

$$PE [\%] = \frac{\sqrt{(\omega' - \omega)^2 + (\sigma' - \sigma)^2}}{\omega_0} \cdot 100. \quad (9)$$

Számítógépes vizsgálatunk során a póluseltolódás mértékét is kiszámítottuk az $\omega, \sigma < 0,05\omega_1$ tartományban. Az eredményeket a 7. ábrán látjuk (az

ábra adatait most is ω_1 -re normáltuk, s az ábra $k=1$ erősítésű alaptagra vonatkozik).

Azt mondhatjuk, hogy amíg a póluseltolódás 1% alatt van, a szűrő átvitele még alig tér el a tervezettől (bár egy nagy Q -jú alaptag esetén ilyenkor is mutatkozhatnak zavarok). Így (kivételesen nagy jószágú pólusoktól eltekintve) a 7. ábrán az origó és az 1%-os görbe közötti területre eső pólusokat megvalósíthatjuk az ideális műveleti erősítővel számoló összefüggésekkel. Kb. az 1% és 10%-os görbék közé eső pólustartomány az, ahol az ideális méretezési összefüggések már nem használhatók, de egy korrigált, a műveleti erősítő tulajdonságait is figyelembe vevő méretezéssel a kívánt pólus jól realizálható. A 10%-ot meghaladó mértékű póluseltolódás esetén már a korrigált számítással sem célszerű a realizálás, mert az így tervezett szűrő igen érzékeny volna a műveleti erősítő ω_1 határfrekvenciájának gyártási szórására és hőmérsékletfüggésére.

3. A korrigált méretezési összefüggések

A korrigált méretezésre már a 6a ábra is lehetőséget ad. Ebből leolvasható, hogy milyen a és ω értékeknél lesz az eltolódott pólus a kívánt helyen. Az így meghatározott a, ω koordinátájú pólust kell realizálni az ideális műveleti erősítőre vonatkozó összefüggésekkel. A leolvasási hibák miatt azonban ennek az eljárásnak a pontossága nem megfelelő. Célravezetőbb módszer új méretezési összefüggéseket levezetni.

A (2) egyenlet nevezője harmadfokú. Írhatjuk tehát így is:

$$\left(1 + p \frac{1}{Q\omega_0} + p^2 \frac{1}{\omega_0^2}\right) \left(1 + \frac{p}{\omega_E}\right), \quad (10)$$

ahol ω_0 és Q a realizálandó pólus adatai, ω_E pedig a járulékos valós pólus. Ezt és (2) nevezőjét egyenlővé téve, elemi úton adódnak az új tervezési összefüggések. ω_A -ra egy másodfokú egyenlet adódik:

$$\omega_A^2 \left[\frac{\omega_1}{Q\omega_0} - (1+k) \right] + \omega_A \omega_0 \left[\frac{1}{Q} \left(1+k + \frac{\omega_1^2}{\omega_0^2} - \frac{\omega_1}{Q\omega_0} \right) - \frac{\omega_1}{\omega_0} (2+3k) \right] - 2\omega_0^2 (1+k) \left(1 + \frac{\omega_1^2}{\omega_0^2} - \frac{\omega_1}{Q\omega_0} \right) = 0. \quad (11)$$

ω_B kifejezhető ω_A -val:

$$\frac{1}{\omega_B} = \frac{1}{Q\omega_0} \left(1+k + \frac{\omega_1^2}{\omega_0^2} - \frac{\omega_1}{Q\omega_0} \right) - \frac{k\omega_1}{\omega_0^2} - \frac{2(1+k)}{\omega_A} \left(1 + \frac{\omega_1^2}{\omega_0^2} - \frac{\omega_1}{Q\omega_0} \right). \quad (12)$$

ω_A és ω_B -ből (2a)–(2b) segítségével közvetlenül számolhatók az alaptag elemértékei. A járulékos ω_E pólus helye így számolható:

$$\omega_E = \frac{\omega_1 \omega_A \omega_B}{\omega_0^2}. \quad (13)$$

Az eddigi eredményeink összefoglalva megtalálhatók a 2. táblázatban.

4. További aluláteresztő alaptagok vizsgálata

Néhány további aluláteresztő alaptagra is elvégeztük a fentihez hasonló számításokat. Ezek eredmé-

2. táblázat.

TÖBBSZÖRÖSEN VISSZACSATOLT MÁSODFOKÚ ALULÁTERESZTŐ ALAPTAG	
	Tervezési feltételek $R_3 = (1+k)R_2$ $(k = \frac{R_3}{R_1})$ $A_0 > 10^4$
	Jelölések: $\omega_A = \frac{1}{R_2 C_2}$ $k = \frac{R_3}{R_1}$ $\omega_B = \frac{1}{R_3 C_1}$
$\frac{U_{ki}}{U_{be}} = \frac{-k}{1+p \left[\frac{2(1+k)}{\omega_A} + \frac{1+k}{\omega_1} \right] + p^2 \left[\frac{1}{\omega_A \omega_B} + \frac{1}{\omega_1 \omega_B} + \frac{2(1+k)}{\omega_1 \omega_A} \right] + p^3 \frac{1}{\omega_1 \omega_A \omega_B}}$	
TERVEZÉS IDEÁLIS MŰVELETI ERŐSÍTŐVEL Kiindulási adatok: k, ω_0, Q, C_1 Elemértékek: $C_2 = \frac{C_1}{4Q^2(1+k)}$; $R_2 = \frac{2Q}{\omega_0 C_1}$; $R_3 = (1+k)R_2$; $R_1 = \frac{R_3}{k}$	
ÖSSZEFÜGGÉSEK A PÓLUSELTOLÓDÁS SZÁMÍTÁSÁHOZ $s = [\omega_1 + \omega_A + 2\omega_B(1+k)]/3$ $q = s^3 + \frac{1}{2} \omega_1 \omega_A \omega_B - \frac{t \cdot s}{2}$ $t = \omega_A \omega_B (1+k) + 2\omega_1 \omega_B (1+k) + \omega_1 \omega_A / A_0$	
TERVEZÉS VALÓSÁGOS MŰVELETI ERŐSÍTŐVEL Kiindulási adatok: $k, \omega_1, \omega_0, Q, C_1$ $\omega_A^2 \left[\frac{\omega_1}{Q\omega_0} - (1+k) \right] + \omega_A \omega_0 \left[\frac{1}{Q} \left(1+k + \frac{\omega_1^2}{\omega_0^2} - \frac{\omega_1}{Q\omega_0} \right) - \frac{\omega_1}{\omega_0} (2+3k) \right] - 2\omega_0^2 (1+k) \left(1 + \frac{\omega_1^2}{\omega_0^2} - \frac{\omega_1}{Q\omega_0} \right) = 0$ $\frac{1}{\omega_B} = \frac{1}{Q\omega_0} \left(1+k + \frac{\omega_1^2}{\omega_0^2} - \frac{\omega_1}{Q\omega_0} \right) - \frac{k\omega_1}{\omega_0^2} - \frac{2(1+k)}{\omega_A} \left(1 + \frac{\omega_1^2}{\omega_0^2} - \frac{\omega_1}{Q\omega_0} \right)$ $\omega_E = \omega_A \omega_B \omega_1 / \omega_0^2$	
AZ 1% ÉS 10% PÓLUSELTOLÓDÁS HATÁRGÖRBÉI - - - - - 1% eltolódás ——— 10% eltolódás	

nyét táblázatos formában közöljük (3., 4., 5. táblázat).

A táblázatokban mindegyik alaptagra vonatkozóan a következő információk szerepelnek:

- átviteli karakterisztika (valóságos műveleti erősítőt figyelembe véve s az elemértékekkel kifejezve);
- tervezési képletek ideális műveleti erősítőre vonatkozóan;
- összefüggések a valóságos műveleti erősítő esetén adódó pólusok számításához [s, t és q kiszámítása után a (6), (7) és (8) egyenletek alkalmazandók];
- tervezési képletek valóságos műveleti erősítőkre vonatkozóan;

— az 1% és 10% póluseltolódás tartományát megadó diagramok, általában több egyenáramú erősítésértékre vonatkozóan.

A póluseltolódásra vonatkozó görbéket szemlélve megállapíthatjuk, hogy ugyanazon pólus esetében minél nagyobb k erősítést kívánunk az alaptaggal elérni, annál erőteljesebb póluseltolódásra számíthatunk. Érdekesség, hogy — akármelyik alaptagot is nézzük — a póluseltolódás mértéke nemcsak a nagy, hanem a kis Q értékek felé is növekszik, és minimális a $Q=0,7$ érték környezetében. A diagramok a Sallen—Key/1. alaptagot mutatják a legelőnyösebbnek — de a négy alaptag közti eltérések nem jelentősek.

3.táblázat.

EGYSZERESEN VISSZACSATOLT MÁSODFOKÚ ALULÁTERESZTŐ ALAPTAG	
	<p>Tervezési feltételek: $R_1 = R_2 = r$; $(R_1 \times R_2) C_1 = (R_3 \times R_4) C_4$ $R_3 = R_4 = R$</p> <p>Jelölések: $\omega_A = \frac{1}{RC_3}$; $k = \frac{R}{r}$ $\omega_B = \frac{1}{RC_4}$; $k' = k + 1$</p>
$\frac{U_{ki}}{U_{be}}(p) = \frac{-k}{1 + p \left(\frac{k'}{\omega_1} + \frac{k'}{A_0 \omega_B} + \frac{2}{\omega_A} \right) + p^2 \left(\frac{k'}{\omega_1 \omega_B} + \frac{2}{\omega_1 \omega_A} + \frac{1}{\omega_A \omega_B} \right) + p^3 \frac{1}{\omega_1 \omega_A \omega_B}}$	
<p>TERVEZÉS IDEÁLIS MŰVELETI ERŐSÍTŐVEL</p> <p>Kiindulási adatok: k, ω_0, Q, C_3</p> <p>Elemértékek: $C_4 = 4Q^2 C_3$; $R = R_3 = R_4 = \frac{1}{2Q\omega_0 C_3}$; $r = R_1 = R_2 = \frac{R}{k}$; $C_1 = kC_4$</p>	
<p>ÖSSZEFÜGGÉSEK A PÓLUSELTOLÓDÁS SZÁMÍTÁSÁHOZ</p> $s = (k\omega_A + 2\omega_B + \omega_1)/3$ $t = k'\omega_A\omega_B + k'\omega_M\omega_A + 2\omega_1\omega_B$ $q = s^3 + \frac{1}{2}\omega_1\omega_A\omega_B - \frac{t \cdot s}{2}$	
<p>TERVEZÉS VALÓSÁGOS MŰVELETI ERŐSÍTŐVEL</p> <p>Kiindulási adatok: $A_0, \omega_1, \omega_0, Q, k, k', C_3$</p> $2\omega_B^2 \left(\frac{\omega_1}{\omega_0} + \frac{k'\omega_0}{\omega_1} - \frac{1}{Q} \right) - \omega_B \frac{\omega_0}{Q} \left(\frac{\omega_1}{\omega_0} + \frac{k'\omega_0}{\omega_1} - \frac{1}{Q} + Q(1+k') \right) + k'\omega_0^2 \left[\frac{1}{A_0} \left(\frac{\omega_1}{\omega_0} - \frac{1}{Q} \right) + \frac{\omega_0}{\omega_1} \right] = 0$ $\frac{2}{\omega_A} = \frac{1}{Q\omega_0} - \frac{k'}{\omega_B} \left[1 + \frac{1}{A_0} \left(\frac{\omega_1^2}{\omega_0^2} - \frac{\omega_1}{Q\omega_0} \right) \right] - \frac{k}{\omega_0} \left(\frac{1}{Q} - \frac{\omega_1}{\omega_0} \right) ; \quad \omega_E = \frac{\omega_1 \omega_A \omega_B}{\omega_0^2}$	
<p>AZ 1% ÉS 10% PÓLUSELTOLÓDÁS HATÁRGÖRBÉI</p> <p>----- 1% eltolódás ————— 10% eltolódás</p>	

5. Méretezési példa

Tervezzük meg új méretezési eljárásunk segítségével a bevezetőben specifikált szűrőt, továbbra is kétszeres visszacsatolású alaptagot és μA 741 műveleti erősítőt alkalmazva. Először nézzük meg a 2. táblázat diagramján, hová esnek a kívánt pólusok! Egységnyi erősítés mellett az 1. póluspár 1%-on belül, a 2. póluspár 1% és 10% közé, a 3. póluspár 10%-on jóval felül (kb. 25%-ra) esik. Ha ezt az utóbbi fokozatot 1/3 erősítésre állítjuk be, $PE=12\%$ lesz — ami még a megengedhető határán van. Az eredő egységnyi erősítés beállítása végett az 1. alaptagot $k=3$ -ra kell méreteznünk, így az 1. és 2. pólusok eltolódása is 1% és 10% közé esik.

A tervezéshez a (11) és (12) méretezési egyenleteket felhasználva, a 8. ábra szerinti elemértékek adód-

nak (az alaptagok sorrendjét a kivezérlési szempontok figyelembevételével választottuk meg).

A szűrőt megépítve és lemérve, a 9. ábrán kereszttekkel jelölt görbét kaptuk (megjegyzendő, hogy a megépített szűrőn semmiféle hangolási műveletet nem végeztünk). A korrigált áramkör átvitelét is kiértékeljük a TRANZ-TRAN áramkör-szimulációs programmal. Ennek eredményét a 9. ábrán folytonos vonallal ábrázoltuk. A két görbe mind egymással, mind a szűrős pecifikációjával jó egyezést mutat.

6. A műveleti erősítő további tulajdonságainak hatása

Az ω_1 határfrekvencia szórása

Tervezési eljárásunk figyelembe veszi az alkalmazott műveleti erősítő ω_1 határfrekvenciáját. Ezáltal

4. táblázat.

SALLEN-KEY ALAPTAG 1	
	<p>Tervezési feltételek: $R_1 = R_2 = R$; $k=1$; $A_0 > 10^4$</p> <p>Jelölések: $\omega_A = \frac{1}{R C_1}$; $\omega_B = \frac{1}{R C_2}$</p>
$\frac{U_{ki}}{U_{be}} = \frac{k}{1 + p \left(\frac{1}{\omega_1} + \frac{2}{\omega_B} \right) + p^2 \left[\frac{1}{\omega_A \omega_B} + \frac{1}{\omega_1} \left(\frac{1}{\omega_A} + \frac{2}{\omega_B} \right) \right] + p^3 \frac{1}{\omega_1 \omega_A \omega_B}}$	
<p>TERVEZÉS IDEÁLIS MŰVELETI ERŐSÍTŐVEL</p> <p>Kiindulási adatok: ω_0, Q, R</p> <p>Elemérték: $C_1 = \frac{2Q}{\omega_0 R}$; $C_2 = \frac{1}{2Q \omega_0 R}$</p>	
<p>ÖSSZEFÜGGÉSEK A PÓLUSELTOLÓDÁS SZÁMÍTÁSHOZ</p> $s = (\omega_1 + 2\omega_A + \omega_B) / 3 \quad q = s^3 + \frac{1}{2} \omega_A \omega_B \omega_1 - \frac{t \cdot s}{2}$ $t = \omega_A \omega_B + 2 \omega_A \omega_1$	
<p>TERVEZÉS VALÓSÁGOS MŰVELETI ERŐSÍTŐVEL</p> <p>Kiindulási adatok: ω_1, ω_0, Q, R</p> $\omega_A^2 - \omega_A \omega_0 \left[\frac{\frac{\omega_1}{\omega_0}}{1 + \frac{\omega_1^2}{\omega_0^2} - \frac{\omega_1}{Q \omega_0}} + \frac{1}{2Q} \right] + \frac{\omega_0^2}{2} \frac{1}{1 + \frac{\omega_1^2}{\omega_0^2} - \frac{\omega_1}{Q \omega_0}} = 0$ $\frac{2}{\omega_B} = \frac{1}{Q \omega_0} \frac{1}{\omega_A} \frac{1}{1 + \frac{\omega_1^2}{\omega_0^2} - \frac{\omega_1}{Q \omega_0}}$ $\omega_E = \frac{\omega_1 \omega_A \omega_B}{\omega_0^2}$	
<p>AZ 1% ÉS 10% PÓLUSELTOLÓDÁS HATÁRGÖRBÉI</p> <p>----- 1% eltolódás ————— 10% eltolódás</p>	

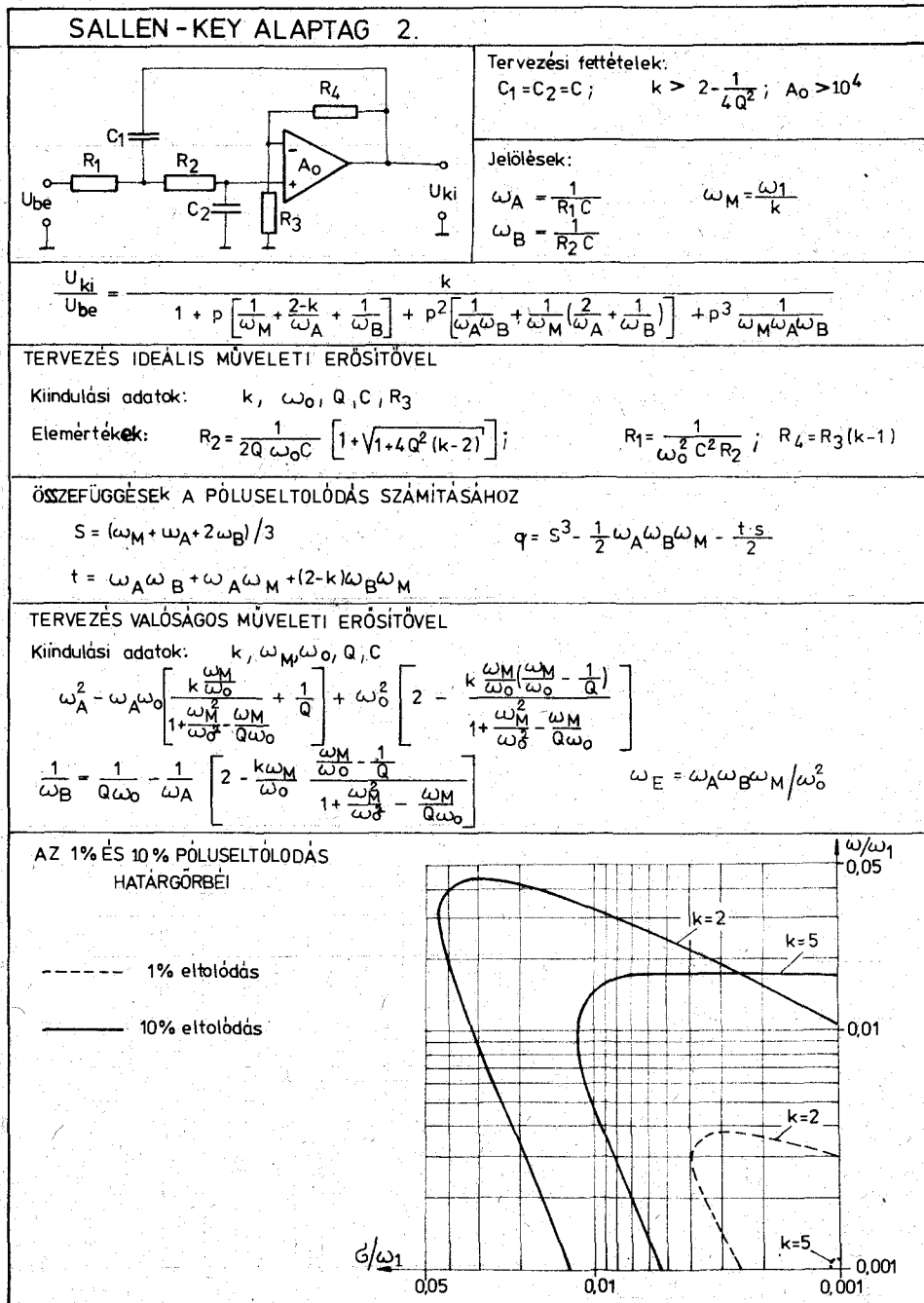
érjük el, hogy az ω_1 frekvenciát jobban megközelítheti a szűrő átteresztő tartománya, mint az ideális műveleti erősítővel számoló méretezésnél. Ennek ára viszont, hogy a kapott szűrő frekvenciamegértékének nagyobb az ω_1 határfrekvenciára vonatkozó érzékenysége. Vizsgáljuk meg egy példán, hogy mekkora. A célra alkalmas lesz a 8. ábrán adott áramkör, amelynél meglehetősen nagy, 12% körüli póluseltolódást korrigáltunk.

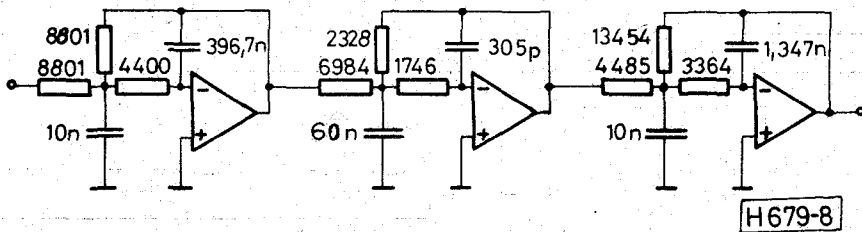
Gépi szimulációval vizsgáltuk az áramkör átvitelét névleges ($\mu\text{A} 741$ esetén 1 MHz) és az attól $\pm 15\%$ -kal eltérő ω_1 határfrekvenciák esetére. Az eredményeket a 10. ábrán látjuk. E három görbélből több lényeges következtetést vonhatunk le. Láthatjuk, hogy az ω_1 frekvencia megváltozása fő-

leg a nagy jóságú alaptag átvitelét befolyásolja. Megállapíthatjuk, hogy az átviteli karakterisztika változása a határán van a megengedhetőnek, egyes kényes alkalmazások esetén azt kissé meghaladja. Azt a következtetést vonhatjuk tehát le, hogy a méretezési szempontból kritikus alaptagoknál (ahol tehát 10% körüli póluseltolódást korrigáltunk), az ω_1 értékek kb. $\pm 10\%$ pontossággal a névleges érték közelében kell lennie.

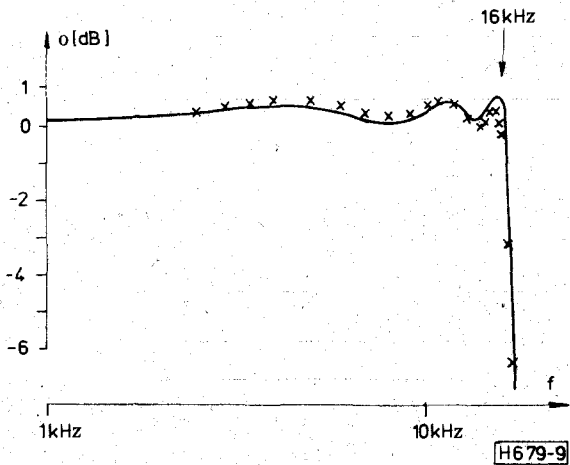
Kérdés, hogy ez hogyan valósítható meg. Egyik lehetőség a kritikus helyre kerülő műveleti erősítő durva változtatása. Ez természetesen csak akkor reális út, ha az ω_1 értékek nem mutatnak extrém nagy szórásrápét. Erre vonatkozóan tájékozódó méréseket végeztünk néhány kisebb tétel (20–20 db) $\mu\text{A} 741$ -

S.táblázat.

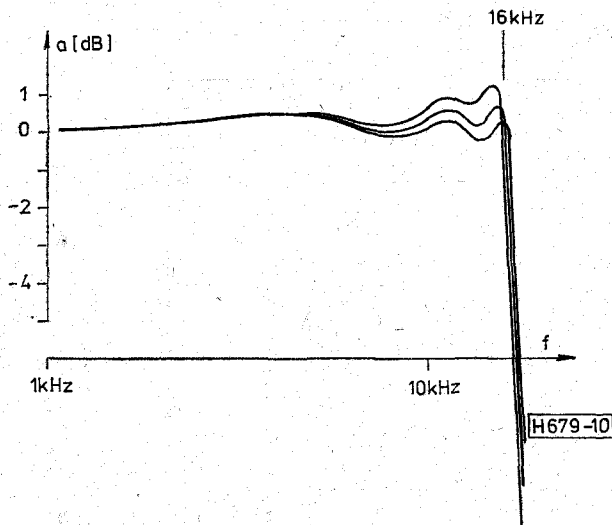




8. ábra. Az 1. ábra aluláteresztő szűrője korrigált elemértékekkel



9. ábra. A 8. ábra szerinti szűrő frekvenciamenete. Keresztek — mért értékek, folytonos vonal — számítógépes szimuláció



10. ábra. A 8. ábra szerinti szűrő frekvenciamenete, a műveleti erősítők névleges és attól $\pm 15\%$ -kal eltérő ω_1 határfrekvenciája esetén

en. Azt tapasztaltuk, hogy az azonos beszerzésből származó tételek ω_1 (matematikai értelemben vett) szórása 6–11% közötti volt — a válogatás tehát nem irreális. Egy másik megoldás: a kritikus helyeken külső kompenzálású erősítőt alkalmazni s a kompenzáló kondenzátor értékével állítani be a $\pm 10\%$ -ra pontos ω_1 értéket.

Az ω_1 határfrekvencia függ a tápfeszültségtől és a hőmérséklettől is — de ez a függés nem zavaró mértékű ($\mu\text{A 741}$ -nél kb. $1\%/V$ a tápfeszültség-függés, s a szóba jövő hőmérséklet-tartományban kb. 5% ω_1 változás mutatkozik).

A karakterisztika további töréspontjai

Jól kompenzált műveleti erősítőnél egy törésponttal megfelelően leírható az átviteli karakterisztika, a második vagy esetleges további töréspontok hatása nagyon kicsi. Ha mégis szükségünk van további töréspontok figyelembevételére, lehetséges ilyen tervezési összefüggések bevezetése is. Az előzőekhez hasonlóan (lásd 3. szakasz) azt feltételezve, hogy a műveleti erősítő karakterisztikájának minden további töréspontja egy-egy újabb valós pólust hoz be az alaptag átvitelébe, felírhatjuk a póluselrendezés gyöktényező alakját. Ezt egyenlővé téve a hálózathoz számolt átviteli függvény nevezőjével, a kapott egyenletrendszer a valós pólusok kiejtésével, jól választott tervezési feltétel mellett a keresett időállandóban első- vagy másodfokú egyenletrendszerre redukálódik.

Bemeneti impedancia

A műveleti erősítők néhány pF-os bemeneti kapacitása okozhat 1–2 tized dB változást az átvitelben egy nagy jóságú alaptagnál, ezért ilyenkor törekedjünk kisebb impedanciaszintet létrehozni (a legkisebb kapacitás legalább néhány száz pF legyen).

7. Sávszűrő és feluláteresztő alaptagok

A sávszűrők és a feluláteresztők tervezése általában az aluláteresztő alaptagok frekvencia-transzformációjával történik. Ha viszont a műveleti erősítő átviteli karakterisztikáját is figyelembe akarjuk venni, akkor sajnos nem dolgozhatunk transzformációval. Alaptagonként meg kell határoznunk az új méretezési összefüggéseket az aluláteresztő alaptagokkal analóg módon. Példaként a többszörös visszacsatolású alaptag sávszűrő és feluláteresztő változatára mutatjuk be eredményeinket a 6. táblázatban.

8. Összefoglaló

Cikkünkkel a gyakorló áramkörtervezők munkájához kívántunk segítséget nyújtani. Új, a szokásosan alkalmazottaknál pontosabb összefüggéseket vezetünk be az aktív szűrő áramkörök méretezésére, a használt műveleti erősítő véges erősítését és határfrekvenciáját is figyelembe véve. Eredményeinket a leggyakrabban alkalmazott aluláteresztő alaptagokra vonatkozó, jól kezelhető táblázatok formájában közöltük. Számítógéppel meghatározott diagramokat adtunk, melyekből leolvasható, hogy az egyes alaptagok milyen pólustartományi realizálására használhatók. A közölt méretezési módszer alkalmas arra, hogy a közepes igényeket kielégítő aktív

MASODFOKÚ FELÜLTERESZTŐ ALAPTAG	
	Jelölések: $\omega_A = \frac{1}{R_1 C_1}$ $\omega_C = \frac{1}{R_1 C_2}$ $\omega_B = \frac{1}{R_2 C_2}$ $\omega_D = \frac{1}{R_1 C_3}$
Tervezési feltételek: $C_1 + C_2 = C_3$; $A_0 > 10^4$	
$\frac{U_{ki}(p)}{U_{be}} = \frac{-p^2 \frac{1}{\omega_A \omega_B}}{1 + p \left[\frac{1}{\omega_1} + \frac{1}{\omega_A} + \frac{1}{A_0 \omega_B} + \frac{1}{\omega_C} + \frac{1}{\omega_D} \right] + p^2 \left[\frac{1}{\omega_B \omega_D} + \frac{1}{\omega_1} \left(\frac{1}{\omega_A} + \frac{1}{\omega_B} + \frac{1}{\omega_C} + \frac{1}{\omega_D} \right) \right] + p^3 \frac{1}{\omega_1 \omega_B (\omega_A \times \omega_C)}}$	
TERVEZÉS VALÓSÁGOS MŰVELETI ERŐSÍTŐVEL Kiindulási adatok: $A_0, k, \omega_1, \omega_0, Q, R_1$ $\omega_D^2 \left(\frac{\omega_1}{A_0 \omega_0} + \frac{\omega_0}{\omega_1} - \frac{1}{Q} \right) - \omega_D \omega_0 \left[\frac{1}{Q} \left(\frac{\omega_1}{\omega_0} + \frac{\omega_0}{\omega_1} - \frac{1}{Q} \right) - 2 \right] + 2 \omega_0^2 \left(\frac{\omega_1}{\omega_0} + \frac{\omega_0}{\omega_1} - \frac{1}{Q} \right) = 0$ $\frac{1}{\omega_B} = \frac{\omega_D \left(1 - \frac{\omega_1}{Q \omega_0} \right) + 2 \omega_1}{\omega_D^2 - \omega_D \frac{\omega_1}{A_0}}; \quad \frac{1}{\omega_A} = k \left(\frac{\omega_B}{\omega_0^2} - \frac{\omega_0}{Q \omega_1 \omega_D} \right); \quad \frac{1}{\omega_C} = \frac{1}{\omega_D} - \frac{1}{\omega_A}$	
MASODFOKÚ SÁVSZŰRŐ ALAPTAG	
	Jelölések: $\omega_A = \frac{1}{R_1 (C_1 + C_2)}$ $\omega_C = \frac{1}{R_1 C_2}$ $\omega_B = \frac{1}{R_3 C_1}$ $B = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$
Tervezési feltételek: $R_2 = \infty$	
$\frac{U_{ki}(p)}{U_{be}} = \frac{-p \frac{B}{\omega_B}}{1 + p \left[\frac{1}{\omega_1} + \frac{B}{\omega_A} + \frac{1}{A_0 \omega_B} \right] + p^2 \left[\frac{B}{\omega_B \omega_C} + \frac{B}{\omega_1 \omega_A} + \frac{1}{\omega_1 \omega_B} \right] + p^3 \frac{B}{\omega_1 \omega_B \omega_C}}$	
TERVEZÉS VALÓSÁGOS MŰVELETI ERŐSÍTŐVEL Kiindulási adatok: $k, \omega_1, \omega_0, Q, C_2$ $\omega_B = \omega_0 \frac{\frac{\omega_0}{\omega_1} + \frac{1}{k} \left(\frac{\omega_1}{\omega_0} + \frac{\omega_0}{\omega_1} - \frac{1}{Q} \right)}{1 + \left(\frac{\omega_0}{\omega_1} \right)^2 + \frac{\omega_1}{Q \omega_0} - \frac{1}{Q^2}}$ $\frac{1}{\omega_A} = \frac{1}{k \omega_B} - \frac{1}{\omega_1}$ $\frac{1}{\omega_C} = \frac{\omega_1}{\omega_0^2} \left(\frac{1}{k} - \frac{\omega_B}{Q \omega_0} \right)$	

szűrő áramköröket pusztán az elemértékek bemérése segítségével állítsuk be; az összeépítés utáni hangolási lépések elkerülhetők.

IRODALOM

- [1] Herpy M.: Analóg integrált áramkörök. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1973
- [2] Székely V.: Analóg IG-k funkcionális modelljei. Mérés és Automatika, XXVII. évf. 10. szám. (1979)
- [3] E. A. Faulkner—J. B. Grimbleby: Active filters and gain-bandwidth product. El. Letters, V. 6., No. 17, pp. 549—550 (1970)
- [4] G. S. Moschytz: Linear integrated networks: Design. Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1975
- [5] R. Srinivasagopalan—G. O. Martens: A Comparison of a Class of Active Filters with Respect to the Operational-

Amplifier Gain-Bandwidth Product. IEEE Trans. on Circuits and Systems, V. CAS—21, No. 3., pp. 377—381. (1974)

- [6] G. Wilson—Y. Bedri—P. Bowron: RC-Active Networks with Reduced Sensitivity to Amplifier Gain-Bandwidth Product. IEEE Trans. on Circuits and Systems, V. CAS—21., No. 5. (1974)
- [7] D. Åkerberg—K. Mossberg: A Versatile Active RC Building Block with Inherent Compensation for the Finite Bandwidth of the Amplifier. IEEE Trans. on Circuits and Systems, V. CAS—21, No. 1. (1974)
- [8] M. A. Reddy: An Insensitive Active-RC Filter for high Q and high Frequencies. IEEE Trans. on Circuits and Systems, V. CAS—23, No. 7. (1976)
- [9] Scultéry L.: Aktív RC áramkörök optimalizálási kérdései, kandidátusi disszertáció, 1975
- [10] Simonyi E.: Hibrid integrált aktív RC szűrők tervezése és gyártása, egyetemi doktori disszertáció, 1974