Kovács Oszkár
TELEFONGYÁR

Beállítási módszer bikvadratikus aktív RC alaptagok sorozatgyártásánál

ETO 621.372.57:658.624

Napjainkban lineáris aktív négypólusok (szűrők, korrektorok, művonalak) realizálására a leggyakrabban egy műveleti erősítőt tartalmazó bikvadratikus aktív RC alaptagokból felépített áramköröket alkalmaznak [1, 4].

A kereskedelmi forgalomban kapható passzív és aktív elemek azonban egyes speciálisan pontos karakterisztikájú áramkörök realizálását nem teszik lehetővé. Ilyen esetben vagy nagyobb számú elemből felépített alaptagokat kell alkalmazni, vagy a kevesebb elemet tartalmazó alaptagokat gyártás során be kell állítani.

Az alábbiakban Sallen—Key típusú egy műveleti erősítőt tartalmazó bikvadratikus alaptagok beállítási módszerét mutatjuk be.

Érzékenység

Egy bikvadratikus alaptag hálózatfüggvénye a következő formában is felírható:

$$T(s)=T(X_i;\ s) \tag{1}$$

ahol X_i az egyes áramköri elemeket jelenti.
Egy X_i elem megváltozásának hatása:

$$\frac{\Delta T(s)}{T(s)}=S_{X_i}^{T}\cdot\frac{\Delta X_i}{X_i} \tag{2}$$

ahol $S_{X_i}^{T}$ a hálózatfüggvénynek az X_i elemre vonatkoztatott érzékenysége. Ezt $T(s)$ logaritmikus differenciálásával kaphatjuk:

$$S_{X_i}^{T}=\frac{\partial \ln T(s)}{\partial \ln X_i}=\frac{\partial T(s)}{\partial X_i}\cdot\frac{X_i}{T(s)} \tag{3}$$

Ezek után N elemből álló kapcsolás esetén a hálózatfüggvény teljes megváltozása:

$$\frac{\Delta T(s)}{T(s)}=\sum_{i=1}^{N} S_{X_i}^{T}\cdot\frac{\Delta X_i}{X_i} \tag{4}$$

A fenti összefüggés segítségével adott elemérték toleranciák esetén kiszámíthatjuk a hálózatfüggvény toleranciáját.

A hálózatfüggvény a következő formában is felírható:

$$T(s)=T(P_j;\ s) \tag{5}$$

ahol P_j az alaptag valamilyen paramétere, mely független s-től. (pl.: ω_p; Q_p; ω_z stb.) Ez a felírási mód ekvivalens (1)-gyel, hiszen az alaptag paraméterei a hálózatfüggvényt meghatározzák. Ezek a paraméterek az elemértékek függvényei:

$$\begin{aligned} P_1&=P_1(X_1;\ X_2;\ \ldots\ X_i;\ \ldots\ X_N)\\ P_2&=P_2(X_1;\ X_2;\ \ldots\ X_i;\ \ldots\ X_N)\\ &\ \vdots\\ P_j&=P_j(X_1;\ X_2;\ \ldots\ X_i;\ \ldots\ X_N)\end{aligned} \tag{6}$$

Definiálhatjuk az egyes elemeknek az alaptag paraméterekre vonatkoztatott érzékenységeit is:

$$\begin{aligned} S_{X_i}^{P_1}&=\frac{\partial \ln P_1}{\partial \ln X_i}=\frac{\partial P_1}{\partial X_i}\cdot\frac{X_i}{P_1}\\ S_{X_i}^{P_2}&=\frac{\partial \ln P_2}{\partial \ln X_i}=\frac{\partial P_2}{\partial X_i}\cdot\frac{X_i}{P_2}\\ &\ \vdots\\ S_{X_i}^{P_j}&=\frac{\partial \ln P_j}{\partial \ln X_i}=\frac{\partial P_j}{\partial X_i}\cdot\frac{X_i}{P_j}\end{aligned} \tag{7}$$

Az így nyert érzékenységek könnyebben kezelhetők, mivel frekvenciafüggetlen konstansok. Ezek alapján N elemből álló kapcsolás esetén az egyes paraméterek teljes megváltozása:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta P_1}{P_1}&=\sum_{i=1}^{N} S_{X_i}^{P_1}\cdot\frac{\Delta X_i}{X_i}\\ \frac{\Delta P_2}{P_2}&=\sum_{i=1}^{N} S_{X_i}^{P_2}\cdot\frac{\Delta X_i}{X_i}\\ &\ \vdots\\ \frac{\Delta P_j}{P_j}&=\sum_{i=1}^{N} S_{X_i}^{P_j}\cdot\frac{\Delta X_i}{X_i}\end{aligned} \tag{8}$$

Belátható, hogy a (8) egyenletrendszer mátrix formában is felírható:

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta P_1}{P_1}\\ \vdots\\ \frac{\Delta P_j}{P_j}\\ \vdots\\ \frac{\Delta P_m}{P_m}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix} S_{X_1}^{P_1}\ldots S_{X_k}^{P_1}\ldots S_{X_N}^{P_1}\\ \vdots\quad\ \vdots\quad\ \vdots\\ S_{X_1}^{P_j}\ldots S_{X_k}^{P_j}\ldots S_{X_N}^{P_j}\\ \vdots\quad\ \vdots\quad\ \vdots\\ S_{X_1}^{P_m}\ldots S_{X_k}^{P_m}\ldots S_{X_N}^{P_m}\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix} \frac{\Delta X_1}{X_1}\\ \vdots\\ \frac{\Delta X_k}{X_k}\\ \vdots\\ \frac{\Delta X_N}{X_N}\end{bmatrix} \tag{9}$$

A paraméter változásokat tartalmazó vektort P-vel, az érzékenységeket tartalmazó mátrixot S-sel és az áramköri elemek toleranciáit tartalmazó vektort X-szel jelölve:

$$P=\mathbf{S}\cdot X \tag{10}$$

Beérkezett: 1976. III. 1.

Beállítási problematika

Tételezzük fel, hogy az alaptagra megszabott követelmények olyan formában állnak rendelkezésre, hogy összevethetők a (10) egyenlet szerinti P vektorral. Ebben az esetben a (10) egyenlet szerint kiszámított paraméter toleranciákról megállapítható, hogy kielégítik-e az alaptagra megszabott követelményeket.

Abban az esetben, ha a P vektor nem teljesíti a megszabott követelményeket, az áramkört meg kell változtatni. Ez kétféle módon történhet:

X vektor által szemléltetett elemtoleranciák szigorítása. Ez a módszer csak bizonyos esetekben járhat eredménnyel, mivel a toleranciák csökkentésének gazdasági és technológiai szempontok határt szabnak.

A kapcsolás N eleméből k elemet kiválasztunk, ezek értékét úgy változtatjuk meg, hogy a többi elem által okozott paraméter toleranciákat kiegyenlítsék, és az így kapott P vektor már kielégítse a követelményeket.

Az utóbbi esetben tehát beállítást kell végezni. Sorozatgyártásnál azonban előre tudni kell, hogy adott X_i pozíciójú elem a beállítás során legrosszabb esetben milyen értékeket vehet fel. Feladatunk tehát olyan számítási módszer kidolgozása, amelynek segítségével adott kapcsolásra meghatározható a beállító elemek tartománya adott követelményekre történő beállítás esetén. Ezt a beállítási problematikát matematikailag úgy fogalmazhatjuk meg, hogy a (10) egyenlet szerinti X vektor — mely N elemből áll — k db elemének értékét kívánjuk kiszámítani, ha N-k db eleme adott, és fennáll a következő összefüggés:

$$\begin{bmatrix} \frac{\Delta P_1}{P_1} \\ \vdots \\ \\ \\ \frac{\Delta P_m}{P_m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} \dots S_{1k} \dots S_{1N} \\ \vdots \quad \vdots \quad \vdots \\ S_{k1} \dots S_{kk} \dots S_{kN} \\ \vdots \quad \vdots \quad \vdots \\ S_{m1} \dots S_{mk} \dots S_{mN} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\Delta X_1}{X_1} \\ \\ \frac{\Delta X_k}{X_k} \\ \frac{\Delta X_{k+1}}{X_{k+1}} \\ \vdots \\ \frac{\Delta X_N}{X_N} \end{bmatrix} \tag{11}$$

Ez formailag megegyezik a (10) egyenlettel. A P vektor azonban itt az előírásokat tartalmazó vektor, és az egyenletrendszert úgy rendeztük át, hogy az X vektor első k eleme a beállító elemek legyenek. Ez az egyenlet felírható a következő alakban is:

$$P = [S_1 \, S_2] \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} \tag{12}$$

ahol:

$$S_1 = \begin{bmatrix} S_{11} \dots S_{1k} \\ \vdots \quad \vdots \\ S_{m1} \dots S_{mk} \end{bmatrix}; \quad S_2 \begin{bmatrix} S_{1,\,k+1} \dots S_{1N} \\ \vdots \quad \vdots \\ S_{m,\,k+1} \dots S_{mN} \end{bmatrix}$$

és

$$X_1 = \begin{bmatrix} \frac{\Delta X_1}{X_1} \\ \vdots \\ \frac{\Delta X_k}{X_k} \end{bmatrix}; \quad X_2 = \begin{bmatrix} \frac{\Delta X_{k+1}}{X_{k+1}} \\ \vdots \\ \frac{\Delta X_N}{X_N} \end{bmatrix}$$

A (12) egyenlet tehát a beállítás utáni állapotot tükrözi. Ebben az esetben P;S_1;S_2 és X_2 ismert. S_1 és S_2 azonban csak azzal a feltételezéssel ismert, ha a beállítás során az áramkör nem változik meg olyan mértékben, hogy az érzékenységek számításunk pontosságát lényegesen befolyásolná. Ezért a továbbiakban feltételezzük, hogy az áramkör beállításához csak kis elemérték változások szükségesek. Ily módon tehát a (12) egyenletben az ismeretlen az X_1 vektor, mely a beállítás utáni állapotban a beállító elemek toleranciáit tartalmazza. A (12) egyenlet X_1-re nézve egy implicit és túlhatározott egyenletrendszer.

Feladatunk, hogy az egyenletrendszert X_1-re megoldjuk. A megoldást a következő alakban keressük:

$$X_1 = f(S_1;\ S_2;\ P;\ X_2)$$

A probléma matematikai megoldása

A (12) egyenlet a következő formában is felírható:

$$P = S_1 X_1 + S_2 X_2 \tag{13}$$

Ezt X_1-re rendezve:

$$X_1 = S_1^{-1}(P - S_2 X_2) \tag{14}$$

Az egyenlet kiszámíthatóságának feltétele, hogy S_1 nem szinguláris és négyzetes mátrix legyen. Az utóbbi feltétel a következő megkötést jelenti:

$$k \overset{!}{=} m,$$

azaz pontosan annyi beállító elemet kell választanunk, ahány paraméter beállítását kívánjuk elvégezni. Ez a megkötés a gyakorlatban semmi nehézséget nem okoz, a beállítást minden esetben el lehet végezni.

A beállításhoz szükséges beállító elem tartományokat tehát a (14) egyenlet segítségével megkaphatjuk. Sorozatgyártásnál azonban a legkedvezőtlenebb esetek jelölik ki a beállítási tartományok határait. A legkedvezőtlenebb esetet megkapjuk, ha a (14) egyenlet jobb oldalán szereplő S_2 mátrix és X_2 vektor minden elemének abszolut értékével számolunk.

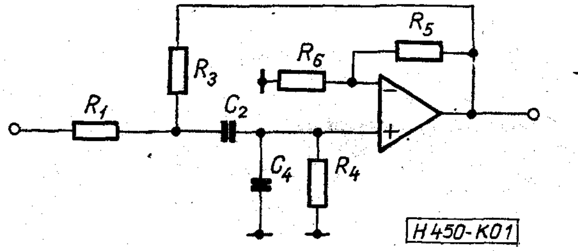
Alkalmazási példa

Feladat: bikvadratikus hálózatfüggvényt realizáló diszkrét elemekből felépített Sallen—Key típusú alaptag ω_p és Q_p értékének beállítása adott elemérték toiarenciák esetén. A beállítás szabványos értékű fix ellenállásokkal történik.

Jelölések az 1. ÁBRÁHOZ:

$$\alpha = \frac{R_1}{R_1 + R_3}; \quad r = \frac{R_4}{R_1 + R_3}; \quad c = \frac{C_2}{C_4}$$

A kapcsolás:



1. ábra. Sallen-Key típusú sávszűrő alaptag

Érzékenységek c=1 ; r=1 esetben (*1. táblázat*):

x_i	$S^{\omega_p}_{x_i}$	$S^{Q_p}_{x_i}$
R_1	$-0{,}5(1-\alpha)$	$(1-\alpha)(-0{,}5+2Q_p)$
R_3	$-0{,}5\alpha$	$1-0{,}5\alpha-Q_p(3-2\alpha)$
R_4	$-0{,}5$	$-0{,}5+Q_p$
C_2	$-0{,}5$	$-0{,}5+Q_p$
C_4	$-0{,}5$	$0{,}5-Q_p$
R_5	0	$-1+(3-\alpha)Q_p$
R_6	0	$1-(3-\alpha)Q_p$
K	0	$3Q_p-1$

Beállító elemek:

$$\omega_p \to R_4$$
$$Q_p \to R_5$$

Ebben az esetben a beállítás egyszerűen elvégezhető: Először R_4 segítségével ω_p-t állítjuk be, majd R_5-tel Q_p-t. Mivel $S^{\omega_p}_{R_5}=0$, a második állítás nem rontja el az elsőt. Ellenkező esetben a beállítást csak iteratív úton lehet elvégezni.

Ezek ismeretében:

$$S_1=\begin{bmatrix} S^{\omega_p}_{R_4} & 0 \\ S^{Q_p}_{R_4} & S^{Q_p}_{R_5} \end{bmatrix} \tag{15}$$

és

$$S_1^{-1}=\frac{1}{\det S_1}\cdot \operatorname{adj} S_1=\frac{1}{S^{\omega_p}_{R_4}\cdot S^{Q_p}_{R_5}}\cdot\begin{bmatrix} S^{Q_p}_{R_5} & 0 \\ -S^{Q_p}_{R_4} & S^{\omega_p}_{R_4} \end{bmatrix}$$

$$S_1^{-1}=\begin{bmatrix} \dfrac{1}{S^{\omega_p}_{R_4}} & 0 \\ -\dfrac{S^{Q_p}_{R_4}}{S^{\omega_p}_{R_4}S^{Q_p}_{R_5}} & \dfrac{1}{S^{Q_p}_{R_5}} \end{bmatrix} \tag{16}$$

A (14) egyenletbe behelyettesítve:

$$\begin{bmatrix} \dfrac{\Delta R_4}{R_4} \\ \dfrac{\Delta R_5}{R_5} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} \dfrac{1}{S^{\omega_p}_{R_4}} & 0 \\ -\dfrac{S^{Q_p}_{R_4}}{S^{\omega_p}_{R_4}\cdot S^{Q_p}_{R_5}} & \dfrac{1}{S^{Q_p}_{R_5}} \end{bmatrix}\cdot\left(\begin{bmatrix} \dfrac{\Delta\omega_p}{\omega_p} \\ \dfrac{\Delta Q_p}{Q_p} \end{bmatrix}-\begin{bmatrix} |S^{\omega_p}_{R_1}| & |S^{\omega_p}_{R_3}| & |S^{\omega_p}_{R_6}| & |S^{\omega_p}_{C_2}| & |S^{\omega_p}_{C_4}| \\ |S^{Q_p}_{R_1}| & |S^{Q_p}_{R_3}| & |S^{Q_p}_{R_6}| & |S^{Q_p}_{C_2}| & |S^{Q_p}_{C_4}| \end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix} \left|\dfrac{\Delta R_1}{R_1}\right| \\ \left|\dfrac{\Delta R_3}{R_3}\right| \\ \left|\dfrac{\Delta R_6}{R_6}\right| \\ \left|\dfrac{\Delta C_2}{C_2}\right| \\ \left|\dfrac{\Delta C_4}{C_4}\right| \end{bmatrix}\right) \tag{17}$$

A (17) egyenlet segítségével egyszerűen számolhatunk, ha az elemérték tűrések (X_2 vektor) és az előírások (P vektor) szimmetrikus tűrésűek. Abban az esetben, ha ez nem áll fenn, az eljárást mindkét szélső határra külön-külön meg kell ismételni:

$$X_1^{+}=S_1^{-1}(P^{+}-S_2X_2^{+}) \tag{18}$$

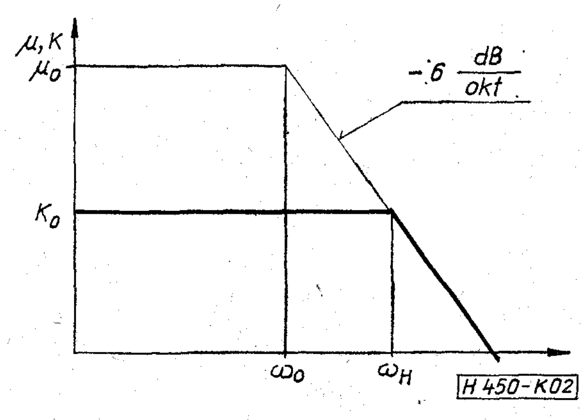
$$X_1^{-}=S_1^{-1}(P^{-}-S_2X_2^{-}) \tag{19}$$

ahol X_1^{+} és P^{+} a pozitív toleranciákat,
X_2^{-} és P^{-} a negatív toleranciákat jelöli.

A gyakorlatban mindig szükség van arra, hogy a P előírás vektor elemeit aszimmetrikussá tegyük. Ennek oka, hogy figyelembe kell venni az áramkörben fellépő parazita hatásokat is, melyek az alaptag paramétereit valamilyen irányban befolyásolják. Ezek hatását a P vektorba úgy építjük be, hogy az előírás szigorúbb legyen. Ily módon a beállítás során az áramkörben fellépő parazita hatásokat is kompenzálni tudjuk. Az alábbiakban a példában szereplő kapcsolásnál két ilyen hatás figyelembevételét mutatjuk be.

A műveleti erősítő véges határfrekvenciája

A műveleti erősítők átviteli karakterisztikáját a gyakorlat számára elegendő pontossággal közelítjük, ha csak az első töréspontját vesszük figyelembe (2. ábra).



2. ábra. Műveleti erősítő átviteli karakterisztikája

Ekkor a visszacsatolatlan erősítő erősítése:

$$\mu=\frac{\mu_0}{1+\frac{s}{\omega_0}},$$

és a visszacsatolt erősítő erősítése:

$$K=\frac{K_0}{1+\frac{s}{\omega_H}}$$

Ennek hatása kifejezhető az alaptag paramétereiben (ω_p ; Q_p). A gyakorlatban mindig fenn kell hogy álljon az

$$\omega_p \ll \omega_H$$

feltétel. Ebben az esetben a példában szereplő kapcsolás megváltozott paraméterei:

$$\omega_p' \cong \omega_p\left(1-\frac{S_K^{Q_p}}{2Q_p}\cdot\frac{\omega_p}{\omega_H}\right) \tag{20}$$

és

$$Q_p' \cong Q_p\left(1+\frac{S_K^{Q_p}}{2Q_p}\cdot\frac{\omega_p}{\omega_H}\right) \tag{21}$$

ahol $S_K^{Q_p}$ az 1. táblázatban megtalálható, ω_H értéke pedig a műveleti erősítő típusától és annak kompenzálásától függ.

Ezek után az alaptag paramétereinek megváltozása kiszámítható:

$$\frac{\Delta\omega_p}{\omega_p}=-\frac{S_K^{Q_p}}{2Q_p}\cdot\frac{\omega_p}{\omega_H} \tag{22}$$

és

$$\frac{\Delta Q_p}{Q_p}=\frac{S_K^{Q_p}}{2Q_p}\cdot\frac{\omega_p}{\omega_H} \tag{23}$$

Látható, hogy a véges határfrekvencia miatt csökken és Q_p növekszik. Az egyszerűbb jelölés kedvéért:

$$\frac{\Delta Q_p}{Q_p}=-\frac{\Delta\omega_p}{\omega_p}=\Delta$$

A visszacsatolt erősítő határfrekvenciája azonban elég nagy gyártási szórást mutat. A legkedvezőtlenebb esetet pedig nem feltétlenül a minimális érték adja. Ezt figyelembe véve:

$$\Delta_{\max}=\frac{S_K^{Q_p}}{2Q_p}\,\frac{\omega_p}{\omega_{H_{\min}}} \tag{24}$$

és

$$\Delta_{\min}=\frac{S_K^{Q_p}}{2Q_p}\,\frac{\omega_p}{\omega_{H_{\max}}} \tag{25}$$

$\omega_{H\min}$ és $\omega_{H\max}$ meghatározásánál figyelembe vehető a műveleti erősítő gyártási szórása, hőmérséklet- és tápfeszültség függése.

Az így nyert eredményeket a P vektorba építjük be:

$$P^+=\begin{bmatrix}\frac{\Delta\omega_p^+}{\omega_p}-\Delta_{\max}\\ \frac{\Delta Q_p^+}{Q_p}+\Delta_{\min}\end{bmatrix} \tag{26}$$

és

$$P^-=\begin{bmatrix}\frac{\Delta\omega_p^-}{\omega_p}-\Delta_{\min}\\ \frac{\Delta Q_p^-}{Q_p}+\Delta_{\max}\end{bmatrix} \tag{27}$$

Az erősítő bemenetével párhuzamosan kapcsolódó szórt kapacitás.

A szórt kapacitás hatása az alaptag paramétereire:

$$\omega_p' \cong \omega_p\left(1-\frac{C_p}{C_4}\right) \tag{28}$$

és

$$Q_p' \cong Q_p\left\{1+\frac{C_p}{C_4}\left[1-S_K^{Q_p}\left(1+\frac{C_p}{C_4}\right)\right]\right\} \tag{29}$$

A paraméterek relatív megváltozása:

$$\frac{\Delta\omega_p}{\omega_p}=-\frac{C_p}{C_4} \tag{30}$$

és

$$\frac{\Delta Q_p}{Q_p}=\frac{C_p}{C_4}\left[1-S_K^{Q_p}\left(1+\frac{C_p}{C_4}\right)\right] \tag{31}$$

Amennyiben a szórt kapacitás minimális és maximális értékét meg lehet határozni, úgy kiszámítható:

$$\frac{\Delta\omega_{p\max}}{\omega_p}=-\frac{C_{p\max}}{C_4} \tag{32}$$

és

$$\frac{\Delta\omega_{p\min}}{\omega_p}=-\frac{C_{p\min}}{C_4} \tag{33}$$

illetve

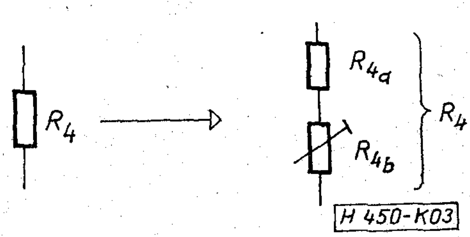
$$\frac{\Delta Q_{p\max}}{Q_p}=\frac{C_{p\max}}{C_4}\left[1-S_K^{Q_p}\left(1+\frac{C_{p\max}}{C_4}\right)\right] \tag{34}$$

és

$$\frac{\Delta Q_{p\min}}{Q_p}=\frac{C_{p\min}}{C_4}\left[1-S_K^{Q_p}\left(1+\frac{C_{p\min}}{C_4}\right)\right] \tag{35}$$

Ezeket az eredményeket a (26) és (27) egyenletekhez hasonlóan a P vektorba építjük be.

A (18) és (19) egyenletek segítségével olyan beállító elem tartományokat kapunk, melyeket valamilyen szabványos értéksorral le kell fednünk. Mivel a beállítás után csak fix szabványos értékű elemet építhetünk be, a tartományt egy diszkrét értéksorral fedjük le. A beállíthatóság feltétele, hogy a diszkrét értékek közötti lépések okozta paraméter változások a követelményben megadott tűrésmező szélességénél kisebbek legyenek. Olyan esetekben, amikor a beállító elem érzékenysége (pl. (7) egyenletek) viszonylag nagy, az egyes lépések túl nagy paraméter válto-



3. ábra

zásokat okoznak. Ilyenkor a beállító elemet két soros tagra bontjuk a 3. ábra szerint.

A soros tagokra bontásnál azonban nemcsak az a cél, hogy teljesüljön a beállíthatóság feltétele, hanem a beállítást minimális elemkészlettel lehessen elvégezni. Ezért a megosztás arányát a következőképpen lehet meghatározni:

$$\frac{R_{4b}}{R_4} \leq \frac{2\Delta Q_p}{\left(\sqrt[E]{10}-1\right) \cdot S_{R_4}^{\omega_p}} \tag{36}$$

ahol $2\Delta Q_p$ a követelményben megszabott tűrésmező szélessége, $\sqrt[E]{10}-1$ a szabványos értéksor relatív lépésköze, E a szabványos értéksor egy dekádjában levő értékeinek száma.

Alkalmazási tapasztalatok

A módszert nyólcadfokú aktív RC szűrők tervezésénél és gyártásánál alkalmaztuk. A szűrők frekvenciamódulált adatátviteli modemek csatornaszűrői, melyeknél az áteresztő tartományban egyes esetekben az amplitúdó karakterisztika ± 1 dB-es, és a csoportfutási idő karakterisztika ± 100 μs-os pontossággal való realizálása volt szükséges.

A sorozatgyártás során több ezer szűrő legyártása és beállítása a számítások helyességét igazolta.

IRODALOM

[1] *Sallen, R. P.—Key, E. L.:* A Practical Method of Desigηing RC Active Filters. IRE-trans.-Circuit Theory, Vol. CT—2 Mar. 1955. pp 74-85

[2] *Dr-Ing. Zumühl, R.:*Matrizen und ihre technischen Anwendungen. Springer Verlag 1964.

[3] *Saraga, W.:*Sensitivity of 2-nd Order Sallen-Key-type Active RC Filters. Electronics Letters, Vol. 3 Nr. 10 Oct. 1967. pp 442-444.

[4] *Moschytz, G. S.:* FEN Filter Desing Using Tantalum and Silicon Integrated Circuits. Proc. of the IEEE, Vol. 58 Nr. 4., Apr. 1970. pp 550-566.