

Tranzformátor nélküli kétszeresen kiegyenlített tranzisztoros keverő vizsgálata

ETO 621.372.622:621.382.3

Elektronikus berendezésekben használt keverőkkel, modulátorokkal szemben gyakori az az igény, hogy a két bemenőjeltől ne jusson a kimenetre, vagy csak elenyésző mértékben. Ilyen célra kétszeresen kiegyenlített keverőket használnak.

A kétszeresen kiegyenlített keverők, modulátorok általában két szimmetrizáló transzformátort és négy diódát, vagy két tranzisztort tartalmaznak. Széles-sávú és nagyfrekvenciás keverő igénye esetén komoly problémát jelent a szimmetrizáló transzformátorok tervezése és kivitelezése. Ezeket általában ferrites tekerestápvonal átmenettel oldják meg. Ilyen technológiával készülnek a nálunk is ismert és több helyen használt HP és VARI-L cégek által gyártott széles-sávú keverők.

Egy olyan keverőtípust kívánunk bemutatni, amelynél nincs szükség a nehezen előállítható széles-sávú transzformátorra. Ezzel lehetőség nyílik ilyen áramkörök előállítására integrált áramkörös kivitelben is. Az elvi kapcsolás az 1. ábrán látható.

Az 1. ábra kapcsolásánál a fázisfordítás úgy történik, mind U_H , mind U_R -re nézve, hogy mindkét jel egyik tranzisztornál az emittert, másik tranzisztornál a bázist vezérli. Így bármelyik bemenő jelet tekintve, az egyik tranzisztor azonos fázisban juttatja a jelet a közös kollektorpontra, míg a másik tranzisztor fázist fordít.

A kapcsolás a további vizsgálatokhoz a 2. ábra szerinti blokkvázlattal jellemezhető.

A blokkvázlat felállítása és a további számítás a következő elhanyagolásokkal és kikötésekkel történik:

$$U_R < U_H, \quad (1)$$

mindkét tranzisztorra feltételezzük, hogy a meredekség az U_R (kisjel)-től független és csak U_H (nagyjel) és U_{BE0} -tól függ, azaz

$$S = S(U_{BE}) = f(U_H, U_{BE0}). \quad (2)$$

Az 1. ábra kimenetén keletkező kevert jel meghatározása a 2. ábra alapján történik két különböző kapcsoló jelalaknak megfelelően.

1. Az U_H feszültség egy ω_H frekvenciájú négyszög-hullám. Amplitúdója \hat{U}_H (Ideális kapcsolójel).

$$2. U_H = \hat{U}_H \sin \omega_H t.$$

A 2. ábra segítségével mind 1. mind 2. pontok számításaihoz a következő összefüggések írhatók fel:

$$U_{BE1} = U_{BE0} + U_H \quad (3)$$

$$U_{BE2} = U_{BE0} - U_H \quad (4)$$

$$S_1 = S_1(U_{BE1}) \quad (5)$$

$$S_2 = S_2(U_{BE2}) \quad (6)$$

$$I_{c2} = -S_1 U_R \quad (7)$$

$$I_{c2} = S_2 U_R \quad (8)$$

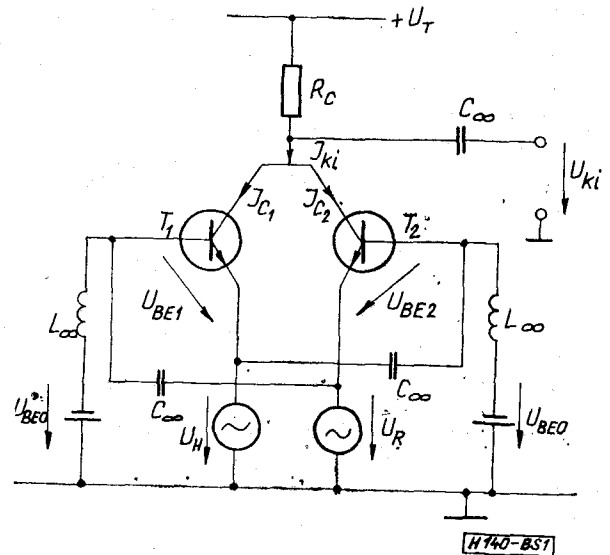
$$I_{ki} = I_{c1} + I_{c2} = U_R(S_2 - S_1) = U_R S_{ki} \quad (9)$$

$$U_{ki} = R_c I_{ki} = R_c U_R(S_2 - S_1) = R_c U_R S_{ki} \quad (10)$$

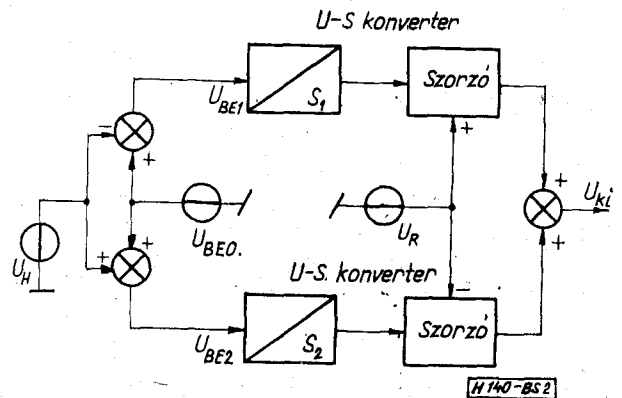
$$U_R = \hat{U}_R \sin \omega_R t \quad (11)$$

I. A keverő működése ideális kapcsolójel esetén

Miután ideális kapcsolójel esetén a kapcsoló-feszültség négyszög alakú, lehetséges kiindulni a



1. ábra



2. ábra

számításokhoz exponenciális tranzisztorkarakteristikából, így

$$I_c = K_0 \left| e^{\frac{U_{BE}}{K_1}} - 1 \right| \quad (12)$$

ebből az U_{BE} -re vonatkozó meredekség

$$S = \frac{\partial I_c}{\partial U_{BE}} = \frac{K_0}{K_1} e^{\frac{U_{BE}}{K_1}} \quad (13)$$

A számítások egyszerűsítéséhez célszerű közös koordináta-rendszerben ábrázolni a két tranzisztor meredekség karakterisztikáját, valamint a U_H hatására keletkező meredekség-idő-függvényt (3. ábra). A 3. ábra alapján az eredő meredekség amplitúdója meghatározható (3)–(13) összefüggések segítségével:

$$\hat{S}_{ki} = S_M - S_m \quad (14)$$

$$S_M = \frac{K_0}{K_1} e^{\frac{U_{BE0} + \hat{U}_H}{K_1}} \quad (15)$$

$$S_m = \frac{K_0}{K_1} e^{\frac{U_{BE0} - \hat{U}_H}{K_1}} \quad (16)$$

$$\hat{S}_{ki} = \frac{2K_0}{K_1} e^{\frac{U_{BE0}}{K_1}} \operatorname{sh} \frac{\hat{U}_H}{K_1} \quad (17)$$

Ezek után felírható $S_{ki}(t)$ Fourier sora.

$$S_{ki}(t) = \frac{8K_0}{\pi K_1} e^{\frac{U_{BE0}}{K_1}} \operatorname{sh} \frac{\hat{U}_H}{K_1} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(2n-1)\omega_H t}{2n-1} \quad (18)$$

$$U_{ki} = \frac{4\hat{U}_R R_c K_0}{K_1 \pi} e^{\frac{U_{BE0}}{K_1}} \operatorname{sh} \frac{\hat{U}_H}{K_1} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\pm \cos[(2n-1)\omega_H \mp \omega_R] t}{2n-1} \quad (20)$$

Az 1. fejezet összegezéséeként megállapítható (20) alapján, hogy periodikus négyszögjellel való vezérlés esetén a keverő kimenetén keletkező harmonikus komponensek mindegyikének amplitúdója a négyszög amplitúdójának függvényében monoton nő $\operatorname{sh} \frac{\hat{U}_H}{K_1}$ függvény szerint, ahol $K_1 = 26$ mV.

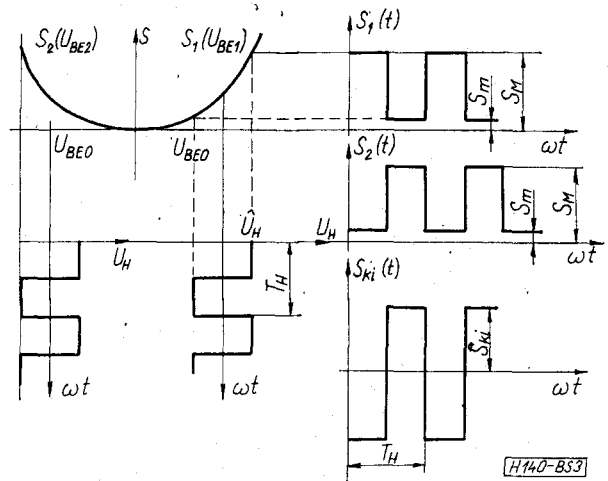
Továbbá mód nyílik egy adott \hat{U}_H érték mellett is \hat{U}_{ki} növelésére – az $e^{\frac{U_{BE0}}{K_1}}$ tényezőn keresztül – U_{BE0} növelésével, ismét hangsúlyozva, hogy az érvényesség kritériuma (12) fennállása, ahol

$$U_{BE_{\max}} = U_{BE0} + \hat{U}_H = U_2 \leq 0,8 \approx 1,2 \text{ V.}$$

(20) összefüggésbe valós értékeket behelyettesítve könnyen belátható, hogy $U_{BE0} = 0,5 - 0,75$ V, $U_H = 0,1 - 0,5$ V mellett $\frac{\hat{U}_{ki}}{U_R} \gg 1$, azaz kapcsolás erősítőként működik, nincs átalakítási veszteség.

2. Folyási szög üzemi működés

A gyakorlati esetek nagy többségénél nem áll rendelkezésre négyszöghullámú kapcsolófeszültség, helyette szinuszos U_H - t -helyi oszcillátor feszültség



3. ábra

Végül $U_{ki} = R_c U_R S_{ki}$ egyenlet alapján

$$U_{ki} =$$

$$= \frac{8\hat{U}_R R_c K_0}{K_1 \pi} e^{\frac{U_{BE0}}{K_1}} \operatorname{sh} \frac{\hat{U}_H}{K_1} \sin \omega_R t \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(2n-1)\omega_H t}{2n-1} \quad (19)$$

Elvégezve az időfüggő részek szorzását adódik (20) összefüggés, mely addig érvényes, míg a tranzisztorok nem érik el a telítés környezetét.

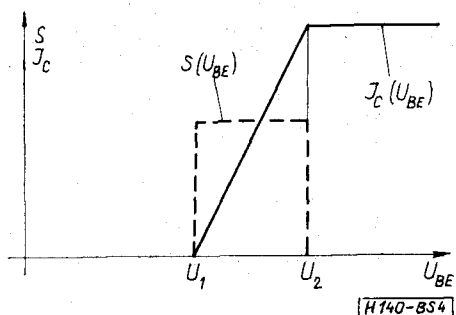
get alkalmaznak. Különösen igaz ez magasabb frekvenciákon. Szükséges tehát megvizsgálni, hogyan alakul a keverő kimenetén keletkező különböző frekvenciájú komponensek amplitúdója, szinuszos kapcsolófeszültség esetén is a kapcsolójel amplitúdójának és U_{BE0} függvényében.

Itt adódik lehetőség az előfeszíten diódás keverőkkel való összehasonlításra, ahol $U_{BE0} = 0$ helyettesítésével az itt kapott eredmények értelemszerűen felhasználhatók.

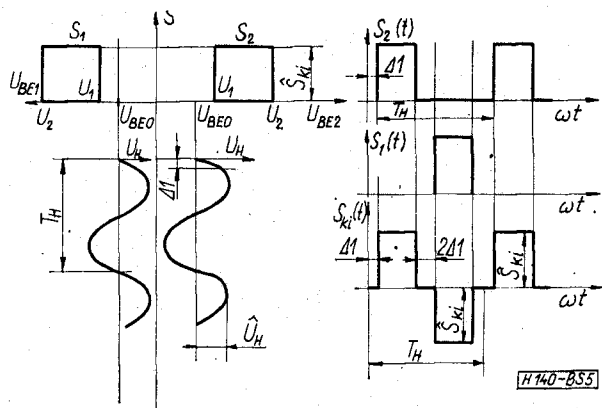
A további vizsgálatokhoz a számítások egyszerűsítése érdekében helyettesítsük töréspontos egyenesekkel a tranzisztorok $U_{BE} - I_c$ ill. $U_{BE} - S$ karakterisztikáját 4. ábra szerint.

4. ábrán U_2 töréspont a tranzisztoros telítésénél lép fel, diódás kapcsolásoknál természetesen ez nem létezik. U_1 az exponenciális karakteristika megfelelő érintőjének metszése. Célszerű kikötni, hogy $U_{BE} = U_{BE0} + \hat{U}_H$ nem éri el U_2 feszültséget, mert ilyen esetben (5. ábra alapján könnyen belátható) a kapcsolójel egy bizonyos szakaszában az U_R -re vonatkozó meredekség nulla, és a kimenőfeszültség csökkenését eredményezi.

Az 1. fejezethez hasonlóan rajzoljuk most is közös koordináta rendszerbe $U_{BE1} - S_1$, $U_{BE2} - S_2$, valamint a kapcsolójel hatására keletkező meredekség-idő függvényeket (5. ábra).



4. ábra



5. ábra

Az 5. ábrán szereplő \hat{S}_{ki} értékével a későbbiekben foglalkozunk. 5. ábra alapján a $s(t)$ eredő meredekség-idő-függvény Fourier-sora a következő:

$$S_{ki}(t) = \frac{4\hat{S}_{ki}}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(2n-1)\Delta_1 \sin(2n-1)\omega_H t}{2n-1} \quad (21)$$

az (1)–(11) összefüggések szerint a kimenő feszültség:

$$U_{ki} = \frac{4\hat{U}_R R_C \hat{S}_{ki}}{\pi} \sin \omega_R t \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(2n-1)\Delta_1}{2n-1} \sin(2n-1)\omega_H t \quad (22)$$

a (22) kifejezés időfüggő részeinek összevonásával adódik (23):

$$U_{ki} = \frac{2\hat{U}_R R_C \hat{S}_{ki}}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\pm \cos(2n-1)\Delta_1}{2n-1} \cos[(2n-1)\omega_H \mp \omega_R] t \quad (23)$$

Δ_1 5. ábra alapján a következő:

$$\Delta_1 = \arcsin \frac{U_1 - U_{BE0}}{\hat{U}_H} \quad (24)$$

A (23), (24)-ből látható, hogy a kimenő feszültség komponenseinek amplitúdó változását \hat{U}_H változásának hatására a $\cos(2n-1)$ tényező tartalmazza.

$$b_n = \cos(2n-1)\Delta_1 \quad (25)$$

A következő számításokhoz 5. ábrából adódik Δ_1 értelmezési tartománya (26)

$$0 \leq \Delta_1 \leq \frac{\pi}{2} \quad (26)$$

(25)-ből látható, ha $\Delta_1=0$ úgy $b_n=1$.

$$(24) \text{ szerint ha } U_1 - U_{BE0} = 0 \quad (27)$$

$$\text{úgy } \Delta_1 = 0 \quad (28)$$

$$\text{azaz } b_n = 1. \quad (29)$$

Ez látszólag azt eredményezi, hogy \hat{U}_{ki} független a kapcsolófeszültség amplitúdójától. A valóságban azonban 4. ábra $S(U_{BE})$ függvénye nem egy ugrásfüggvény, hanem egy monoton emelkedő görbe, ami azt jelenti, hogy (21)–(24)-ben szereplő \hat{S}_{ki} is emelkedik U_H függvényében egész addig, míg $U_{BE0} + \hat{U}_H < U_2$ fennáll. A kapcsoláson végzett mérések szerint nem követünk el nagy hibát, ha az \hat{S}_{ki} függvényt lineárisnak feltételezzük \hat{U}_H függvényében azaz

$$\hat{S}_{ki} = K_2 \hat{U}_H \quad (30)$$

ahol K_2 konstans az áramköri elemekből határozható meg.

Ez a lineáris meredekségemelkedés $\hat{U}_H=50-75$ mV tartományig értendő, azon felül \hat{S}_{ki} állandó, tehát a kimenőfeszültségek amplitúdói (23) alapján számíthatók $b_n=1$ helyettesítéssel, \hat{S}_{ki} (30)-ból adódik.

A következő részben határozzuk meg b_n változását $U_{BE0} \neq U_1$, azaz általános esetre, amit alkalmazni lehet diódás kapcsolások esetére is, ahol általában $U_{BE0}=0$.

Általános esetben (24) és (26) alapján \hat{U}_H értelmezési tartománya (31):

$$U_1 - U_{BE0} \leq \hat{U}_H \leq \infty \quad (31)$$

Ha megvizsgáljuk általános U_{BE0} esetén b_n tényezők menetét \hat{U}_H függvényben $n=1, 2, 3, \dots, k$ esetre, azt tapasztaljuk, hogy a $b_n(\hat{U}_H)$ függvények nem monoton függvények, hanem n -től függően különböző számú maximum és minimum helyeket tartalmaznak.

Bizonyítható, hogy bármilyen n -re fennáll:

$$\text{maximumok} + \text{minimumok száma} = 2n \quad (32)$$

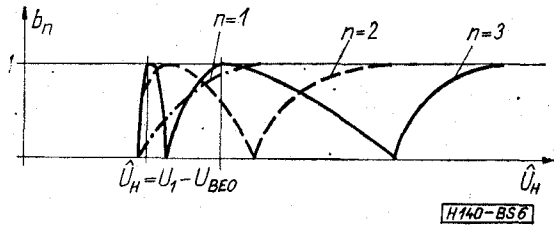
A szélsőértékek létezését könnyű belátni (24), (25) alapján, tekintve, hogy

$$b_n(\hat{U}_H) = \cos \left[(2n-1) \arcsin \frac{U_1 - U_{BE0}}{\hat{U}_H} \right] \quad (33)$$

többértékű függvény.

Részletes számítások nélkül közöljük a $b_n(\hat{U}_H)$ görbék menetét $n=1, 2, 3$ esetre (6. ábra).

Az $n=1, 2, 3$ esethez hasonlóan lehetséges lenne bármilyen n -re felrajzolni $b_n(\hat{U}_H)$ görbéket. Helyette azonban praktikusabb általános, $n=x$ -re vonatkozó következtetéseket levonni.



6. ábra

A gyakorlatban előforduló esetek nagy többségénél, ha már harmonikus keverőként használják a keverőt, nemcsak nem egy bizonyos n -re, hanem $n-1$, $n-2$, ..., n -i tényezőre is szükség van. (Ellenkező esetben kiválasztható $b_n(\hat{U}_H)$ függvények egy lokális maximumhelye.) Ezért olyan \hat{U}_H szinteket kell meghatározni, melynek hatására $n=1 \rightarrow n=x$ tartományban minden b_n tényező maximuma környezetében van.

Mivel azonban b_n tényezők csak végtelen \hat{U}_H érték mellett érik el az egységet, határozzuk meg a $b_n=0,9$ értékhez tartozó azon \hat{U}'_H értéket, melyre fennáll (34)

$$b_{n-i} \geq 0,9. \quad (34)$$

A keresett \hat{U}'_H érték $b_n=0,9$ behelyettesítéssel (25)-ből nyerhető (35)

$$0,9 = \cos(2n-1)\Delta_1 \quad (35)$$

Δ_1 -et behelyettesítve (24)-ből (35)-be

$$0,9 = \cos \left[(2n-1) \arcsin \frac{U_1 - U_{BE0}}{\hat{U}'_H} \right] \quad (36)$$

mivel $\arcsin \cos 0,9 = 26^\circ$

$$\sin \left(\frac{26^\circ}{2n-1} \right) = \frac{U_1 - U_{BE0}}{\hat{U}'_H} \quad (37)$$

U'_H -t kifejezve:

$$\hat{U}'_H = \frac{U_1 - U_{BE0}}{\sin \left(\frac{26^\circ}{2n-1} \right)} \quad (38)$$

Tehát, ha a keverő egy bizonyos n -re vonatkozó \hat{U}'_H -nál nagyobb szintet kap, úgy bármely n -nél kisebb indexre fennáll (34). Illetve (38) alapján egy adott \hat{U}_H szinthez $n=x$ -re meghatározható az optimális U_{BE0} előfeszítés.

Végül az 1. és 2. fejezetek összegezéséeként megállapítható, optimális harmonikus keverés négyszög-hullámú kapcsolójel esetén érhető el, a komponensek \hat{U}_H függvényében monoton nőnek, amplitúdójuk (20) szerint számítható. Míg szinuszos kapcsoló-feszültség esetén az $\hat{U}_{ki}(\hat{U}_H)$ függvény nem monoton függvény. A kikevert termékek mindegyik komponensének amplitúdója optimalizálható azáltal, hogy az $U_{BE} - I_c$, $U_{BE} - S$ karakterisztika töréspontja környékére vesszük fel az előfeszítés értékét, vagy adott U_{BE0} esetleg $U_{BE0}=0$ esetén (38) szerint választjuk meg a kapcsolójel amplitúdóját.

A kimenőfeszültség (23) szerint határozható meg. Végül ismét ki kell emelni 1. ábra kapcsolásának azon előnyét, hogy nincs átalakítási vesztesége, erősít.

IRODALOM

- [1] Dr. Komarik József: Nem lineáris áramkörök. Egyetemi jegyzet, 1967. 263—267. oldal.
- [2] T. B. M. Neill: Nonlinear Analysis of a Balanced Diode Modulator, Electronics Letters 5th March 1970. Vol. 6. No 5. pp. 125—128.
- [3] G. B. Gofman: Analysis of a Diode Mixer for Commensurable Levels of the Converted Signals Radio Engineering, Vol. 25, No 6, 1970. pp. 117—123.
- [4] J. G. Gardiner, A. R. Banerjee: Conversion-Loss Stability and Gain Compression in Scholtky-Barrier Mixers. Electronics Letters 31 st December 1970. Vol. 6. No 26. pp. 829—830.