

## 24. MŰVELETI ERŐSÍTŐK ALKALMAZÁSAI

### Célkitűzés:

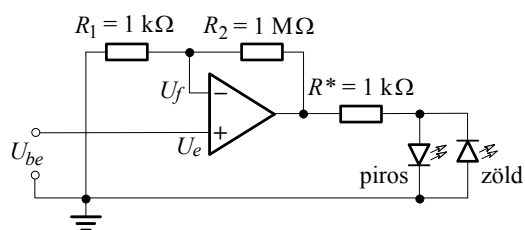
- Az elektronikai gondolkodásmód fejlesztése.

### I. Elméleti áttekintés

A műveleti erősítővel (továbbiakban *ME*) csaknem minden, nem túlságosan nagyfrekvenciás elektronikai feladat megoldható. A *ME* az analóg elektronika univerzális kapcsolási eleme, amelyekkel készült kapcsolások problémamentesen illeszthetők egymáshoz és a bonyolult feladatok egyszerű funkciókat megvalósító modulokkal oldhatók meg. A gyakorlat keretén belül néhány elemi kapcsolás működésével ismerkedünk meg.

#### 1. Feszültség detektor

Hídmódszerrel való méréseknél a híd kiegyenlítetttségét érzékeny műszerrel („galvanométer”) detektálják. Ezek drágák, de igen egyszerűen pótolhatók az 1. ábrán látható kapcsolás segítségével. Ennél a kapcsolásnál pozitív bemenő feszültség esetén a piros, negatívnál a zöld világító dióda (*LED*) világít. A kapcsolás lényege egy ezerszeres erősítésű egyenes erősítő, amelynek kimenetére *LED*-eket kapcsolunk. Az  $R^*$  ellenállás feladata a *LED*-ek áramának korlátozása. Egy intenzíven világító *LED*-en típustól függően kb. 1 - 1,5 V feszültség esik. Ez – az 1000-szeres erősítés figyelembevételével – azt jelenti, hogy 1 mV bemeneti feszültség már észrevehető fényt hoz létre. (Megjegyezzük, hogy az offset feszültséget kompenzálni kell; l. „Ismerkedés a műveleti erősítővel” című gyakorlat.)

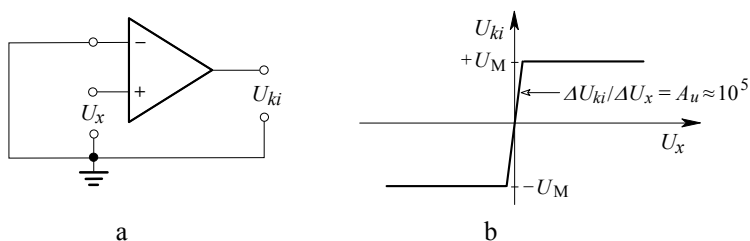


1. ábra

#### 2. Komparátorok

A komparátorok két feszültséget hasonlítanak össze (l. 2. ábra). Az összehasonlítás eredményét a kimeneten jelzik. A kimenet csak két feszültség értéket vehet fel. A kompará-

tor célra gyártott áramkörök kimeneti feszültsége a logikai áramkörök feszültség szintjeihez illeszkedik. A visszacsatolás nélküli *ME*-kel megvalósított komparátor-kapcsolások általában más – nem logikai – kapcsolások részét képezik.



2. ábra

Ismeretes, hogy a *ME*-k kimenő feszültsége

$$U_{ki} = A_u (U_e - U_f). \quad (1)$$

Ez az összefüggés addig érvényes, amíg  $U_{ki}$  el nem ér egy maximális értéket, ami általában megközelíti a tápfeszültséget. Egyébként

$$U_{ki} = U_{+MAX}, \quad \text{ha} \quad U_e - U_f > U_{+MAX} / A_u, \quad (2)$$

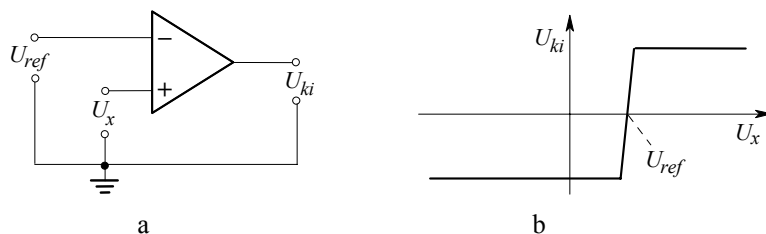
és

$$U_{ki} = U_{-MAX}, \quad \text{ha} \quad U_e - U_f < U_{-MAX} / A_u, \quad (3)$$

ahol  $U_{+MAX}$  és  $U_{-MAX}$  a kimenőfeszültség lehetséges legpozitívabb, illetve legnegatívabb értéke. Ezek abszolút értéke általában kismértékben különböző, de az egyszerűség kedvéért ettől a továbbiakban eltekintünk és az  $U_{+MAX} = U_M$ ,  $U_{-MAX} = -U_M$  jelöléseket fogjuk használni.

A 2. ábrán látható kapcsolásnál – egy szűk tartományt kivéve –  $U_{ki} = +U_M$ , vagy  $-U_M$ . Ez a kapcsolás az ún. nullkomparátor (pontosabban nem invertáló nullkomparátor). A kimenő feszültség azt jelzi, hogy  $U_x$  pozitív, vagy negatív.

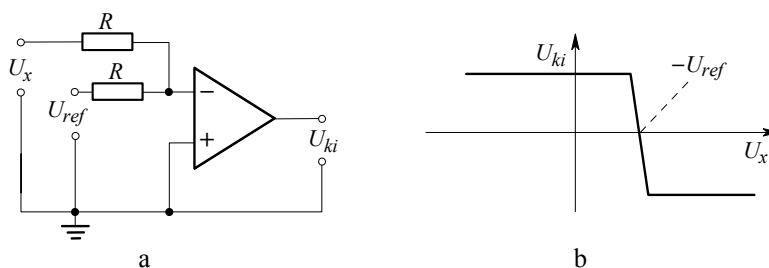
Ha a kimenő feszültséget nem 0 V-tal, hanem egy adott feszültséggel ( $U_{ref}$ ) akarjuk összehasonlítani, akkor a 3. ábrán látható kapcsolás alkalmazható.



3. ábra

A 4. ábra egy fordító (invertáló) komparátor kapcsolását mutatja be. Könnyen belátható, hogy ennél a kapcsolásnál a fordító bemenet feszültsége:

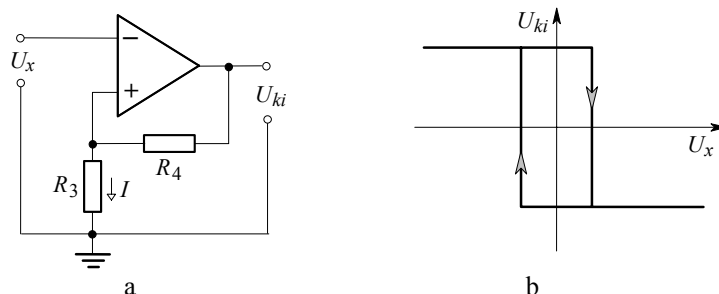
$$U_f = \frac{U_{ref} + U_x}{2} . \quad (4)$$



4. ábra

Mivel  $U_e = 0$ , a feszültség a fordító bemeneten és a kimeneten ellentétes előjelű. Az átváltás az  $U_f = 0$ , azaz  $U_x = -U_{ref}$  feszültségnél jön létre. Ha a fordító nullkomparátorra van szükség, akkor az  $U_{ref}$  feszültséget szolgáltatató feszültségforrás és az ellenállások elhagyandók,  $U_x$ -et közvetlenül a fordító bemenetre kell kapcsolni.

Az 5. ábrán a fordító nullkomparátor ilyen kapcsolását kiegészítettünk egy pozitív visszacsatolással. Ekkor



5. ábra

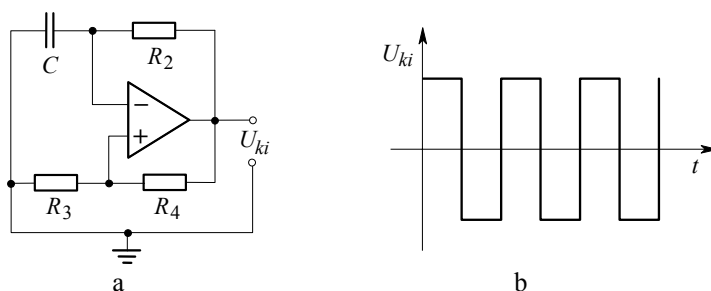
$$U_e = IR_3 = \frac{R_3}{R_3 + R_4} U_{ki} = \alpha U_{ki} , \quad (5)$$

ahol  $\alpha$  azt fejezi ki, hogy a kimenőfeszültség hányad része jut vissza az egyenes bemenetre. E kapcsolás tulajdonságainak megértéséhez először tegyük fel, hogy  $U_x$  nagy negatív feszültség,  $U_x \gg \alpha U_M$ . Ebben az esetben  $U_{ki} = U_M$ , és az egyenes bemeneten is pozitív feszültség van,  $U_e = \alpha U_M$ . Ha  $U_x$  értékét pozitív irányban változtatjuk, a kimenő feszültség csak akkor fog megváltozni, ha a fordító bemenet feszültsége eléri az egyenes bemenet feszültségét.

ségét, tehát  $U_x = U_f = \alpha U_M$ . Ekkor a kimenet először nullává válik, de emiatt az egyenes bemenet feszültsége is megszűnik. Ennek következtében a fordító bemenet lényegesen pozitívabbá válik, mint az egyenes, az erősítő kimenetén a feszültség negatív lesz és  $U_x$  további növelésével az is marad. Ha most ebből az állapotból kiindulva  $U_x$  negatív irányban változik, a feszültségugrás  $U_x = U_e = -\alpha U_M$  értéknél következik be. A komparálási szintek értéke tehát függ az áramkör előző állapotától. Az áramkör a korábbi behatásra „emlékezik”, az  $U_{ki}(U_x)$  karakterisztikának hiszterézise van. Az ilyen áramköröket *Schmitt-trigger*nek nevezik.

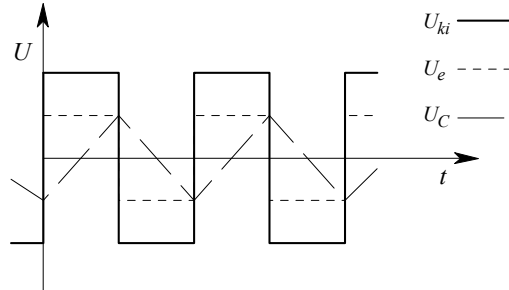
### 3. Négyszöggenerátor

Az 6. ábrán látható áramkör kimenőfeszültsége egy periodikus négyszögjel. Az ilyen áramkört astabil multivibrátornak, vagy négyszöggenerátornak nevezik. Az áramkör működésének áttekintését segíti a 7. ábra, amelyen a kimenőjelet folytonos, az egyenes, illetve fordító bemeneten mérhető feszültséget pontozott, illetve szaggatott vonallal tüntettük fel. Látható, hogy a két bemenet feszültsége között általában jelentős különbség van, ennek következtében  $U_{ki} = U_M$ , vagy  $U_{ki} = -U_M$ . Tegyük fel, hogy egy adott pillanatban  $U_{ki} = U_M$ . Ez azt jelenti, hogy  $U_e = \alpha U_M > U_f = U_C$ , ugyanis a fordító bemenetre a kondenzátoron lévő feszültség hat. A kimenő feszültség az  $R_2$  ellenálláson keresztül tölti a kondenzátort, ezért  $U_C$  egyre pozitívabb lesz. Egy pillanatban a kondenzátor feszültsége eléri  $U_e$ -t. Ekkor a kimenet feszültsége csökkenni kezd, ezzel együtt  $U_e$  is csökken. Az  $U_f - U_e$  különbség megnövekszik,  $U_f > U_e$ , a kimenet  $-U_M$ -re vált. Ettől kezdve a kimenő feszültség ellentétes irányban változtatja a kondenzátor feszültségét addig, amíg az  $U_C = U_e = -\alpha U_M$  feltétel bekövetkezik és a kimenő feszültség ismét átvált. Ezt követően a folyamat periodikusan ismétlődik.



6. ábra

Ez a kapcsolás tekinthető úgy is, mint egy olyan *Schmitt-trigger*, amely az  $R_2$  és  $C$ -ből álló integrálókör feszültségét vizsgálja.



7. ábra

A periódusidő kiszámításához tegyük fel, hogy  $\alpha < 0,2$ . Ekkor egy egyszerűsített számolás alkalmazható, amelynek relatív hibája kisebb, mint  $\alpha^2$ . Először számítsuk ki pl. egy pozitív félperiódus  $T^*$  idejét! A negatív-pozitív átváltás pillanatához tartozó időt jelöl-jük 0-val. Ekkor  $U_C(0) = U_f(0) = U_e(0) = -\alpha U_M$ . A pozitív félperiódus végén  $U_C = \alpha U_M$ , tehát a kondenzátor feszültségének megváltozása egy félperiódus alatt:

$$\Delta U_C = 2\alpha U_M. \quad (6)$$

A kondenzátort töltő áram az átkapcsolás pillanatában:

$$I_t(0) = \frac{U_M - U_C(0)}{R_2} = \frac{(1 + \alpha)U_M}{R_2}. \quad (7)$$

Az áttöltés befejezése után:

$$I_t(T^*) = \frac{U_M - U_C(T^*)}{R_2} = \frac{(1 - \alpha)U_M}{R_2}. \quad (8)$$

A félperiódus alatt a töltőáram folytonosan változik, de  $\alpha \ll 1$  esetén az  $I_t \approx U_M/R$  közelítés elegendően pontos.  $T^*$  idő alatt a töltőáram a kondenzátoron

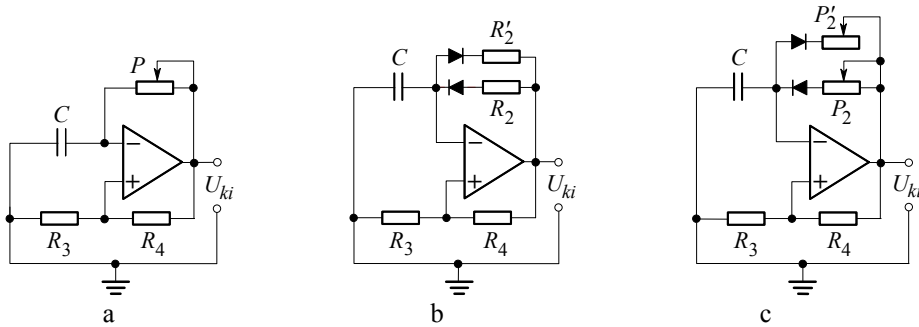
$$\Delta U_C = \frac{\Delta Q}{C} = \frac{U_M T^*}{C R_2} \quad (9)$$

feszültségváltozást hoz létre. Ebből (6) figyelembevételével a félperiódusidő:  $T^* = 2\alpha R_2 C$ . A teljes periódusidő ennek kétszerese:

$$T = 4\alpha R_2 C. \quad (10)$$

Megjegyezzük, hogy a pontosabb számítás  $T^* = R_2 \ln(1 + \alpha)/(1 - \alpha)$  értékre vezet, ami még  $\alpha = 0,2$  esetén is 1,5%-nál kisebb mértékben tér el a fenti közelítő kifejezés által adott időtől.

Ha a periódusidőt változtatni akarjuk, akkor pl. az  $R_2$  ellenállást szabályozható ellenállással (potenciométerrel) kell helyettesíteni. (8.a ábra). Az áramkört könnyű úgy módosítani,

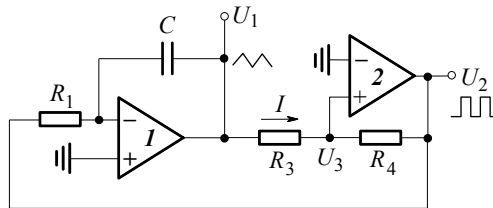


8. ábra

tani, hogy a negatív és a pozitív időszakok hosszúsága eltérjen. Ehhez a kondenzátort töltő áramot kell előjelfüggővé tenni (8.b,c ábrákon).

#### 4. Háromszöggenerátor

A kapcsolás a 9. ábrán látható. A működés értelmezéséhez vegyük szemügyre az  $I$  jelű  $ME$ -t. A fordító bemenetre ható (pl. pozitív) feszültség hatására a kimenet feszültsége negatív irányban változik úgy, hogy  $U_f \approx 0$  maradjon. (A fordító bemenet virtuális földpont.) Ha az  $R_1$  ellenállásra kapcsolt feszültség (a 2 jelű  $ME$  kimenete) állandó, akkor  $R_1$ -en állandó feszültség esik, így a kondenzátort töltő áram állandó, ezért  $U_1$  lineárisan változik. Ha  $U_2$  pozitív, akkor  $U_1$  egyre negatívabb lesz (l. 10. ábrán). A 2 jelű  $ME$  egy hiszterézissel rendelkező zéró komparátort képez, amely a másik  $ME$  kimenő feszültségét figyeli.



9. ábra

A kapcsolási rajz alapján könnyű belátni, hogy

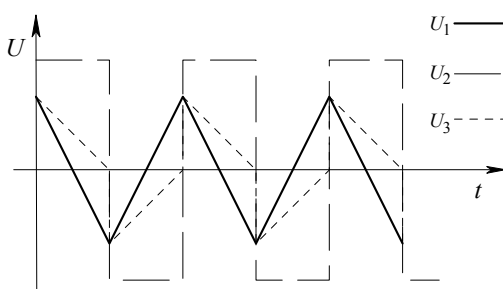
$$U_3 = U_1 - IR_3 = U_1 - \frac{U_1 - U_2}{R_3 + R_4} R_3 = \frac{U_1 R_4 + U_2 R_3}{R_3 + R_4}. \quad (11)$$

Feszültségugrás akkor lép fel, ha  $U_3 = 0$ , tehát az

$$U_1 R_4 = -U_2 R_3 \quad (12)$$

feltételt kielégítő pillanatban. Jelöljük a 2 jelű  $ME$  maximális kimenő feszültségét  $U_M$ -mel, a háromszöggenerátor csúcsfeszültségét  $U_H$ -val. A  $t=0$  pillanatot a 10. ábrának megfelelően a négyszöggenerátor negatív-pozitív átváltásánál vegyük fel. Az átváltást megelőző pillanatban  $U_1(0) = U_H$ ,  $U_2(0) = -U_M$ , így (12)-ből

$$U_H R_4 = U_M R_3. \quad (13)$$



10. ábra

Vezessük be a

$$\gamma = \frac{R_3}{R_4} \quad (14)$$

jelölést. Ezzel  $U_H = \gamma U_M$ . A háromszöggenerátor feszültsége egy félperiódusban  $2U_H = 2\gamma U_M$  értékkel változik meg. Mivel a  $C$  kondenzátor egyik végpontja a fordító bemenetre csatlakozik, ami virtuális földpont, a másik végpont a kimeneten van, így a kondenzátor feszültségváltozása a  $T^*$  félperiódusidő alatt

$$\Delta U_C = 2\gamma U_M. \quad (15)$$

Ezt a feszültségváltozást az  $R_1$  ellenálláson átfolyó  $I$  áram hozza létre:

$$\Delta U_C = \frac{\Delta Q_C}{C} = \frac{IT^*}{C} = \frac{U_M T^*}{R_1 C}. \quad (16)$$

A teljes  $T$  periódusidő  $T^*$  kétszerese. (15) és (16) felhasználásával:

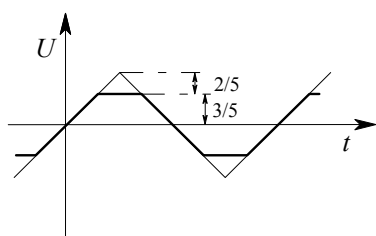
$$T = 2T^* = 4\gamma R_1 C. \quad (17)$$

A generátor méretezésénél arra kell ügyelni, hogy  $U_H$  semmiképpen sem lehet nagyobb, mint amit a ME képes kiadni, tehát  $U_H < U_M$ , azaz  $\gamma < 1$  legyen.  
A háromszöggenerátor periódusidejét legkönnyebb  $R_1$  változtatásával szabályozni.

### 5. Kváziszinusz generátor

Ha egy háromszögjel mindkét csúcsát a 11. ábrának megfelelően  $2/5 - 3/5$  arányban levágjuk, akkor olyan jelet kapunk, amelynek *Fourier*-sora:

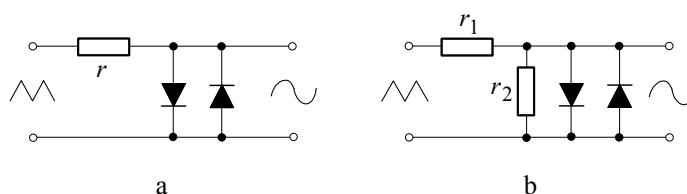
$$f(t) = K \left( \sin \omega t - \frac{1}{5^2} \sin 5 \omega t + \frac{1}{7^2} \sin 7 \omega t - \dots \right), \quad (18)$$



11. ábra

ahol  $K$  egy arányossági tényező. Ebben a sorban a felharmonikusok amplitúdója olyan kicsi, hogy sok esetben figyelmen kívül hagyható. Ha a csúcsok levágását diódával végezzük, akkor a trapéz alakú jel „legömbölyödik” és első pillantásra nem lehet a „tiszta szinuszos” jeltől megkülönböztetni. A háromszögjelet a 9. ábrán látható kapcsolással lehet előállítani. Az ilyen kváziszinusz generátor sok gyakorlati célra megfelelő. Különösen kényelmes, hogy a frekvenciát az  $R_1$  ellenállás helyére kapcsolt potencióméterrel, tehát egyetlen alkatrészrel egyszerűen lehet változtatni.

Szilícium diódáknál a nyitófeszültség kb. 0,6 V, ezért a 2:3 arány betartásához 1 V csúcsfeszültségű háromszögjelet kell előállítani. Ha a háromszöggenerátor jele nagyobb, akkor feszültségosztóval érdemes az amplitúdót csökkenteni. (12.a,b ábrán).



12. ábra

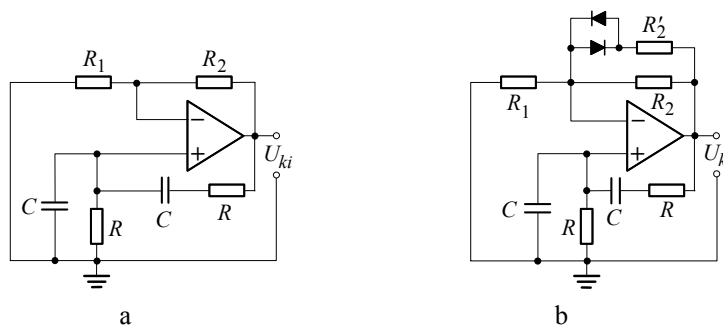
### 6. Oszcillátor

A periodikus jeleket előállító elektronikus kapcsolásokat oszcillátoroknak nevezzük. Oszcillátoron néha csak „tiszta szinuszos” jelet előállító kapcsolásokat értenek, ezért nem szokták a négyszög- és a háromszöggenerátorokat ide sorolni.

*ME*-vel és egy *Wien*-osztóval egyszerű oszcillátort készíteni. Ismeretes, hogy a *Wien*-osztó saját frekvenciájánál ( $\omega_0 = 1/RC$ ) a kimenő feszültség a bemenő feszültség  $1/3$ -ad ré-



sze, és nincs fáziseltolás. Más frekvencián a fázis eltolódik és az átvitel kisebb. Ha egy *ME*-nél *Wien*-osztóval pozitív visszacsatolást hozunk létre, és a negatív visszacsatolással pontosan 3-szoros erősítést állítunk be (l. 13. ábra), akkor a kimeneten – elvileg – stabil amplitúdójú és frekvenciájú szinuszos feszültség lép fel. A valóságban azonban az arányokat nem lehet pontosan megvalósítani. Ha a negatív visszacsatolás miatt az erősítés kisebb a szükségesnél, akkor a rezgések nem jönnek létre, vagy ha valahogyan megindítanánk, akkor gyorsan lecsillapodnának. Ha az erősítés a szükségesnél nagyobb, akkor az amplitúdó fokozatosan addig növekedne, míg eléri a tápfeszültséget és ettől kezdve „vágott” szinusz jelet kapunk. Stabil oszcilláció úgy hozható létre, ha az erősítés függ az amplitúdótól: kis feszültség esetén az erősítés legyen nagyobb 3-nál (pl. 3,2), nagyobb feszültségnél pedig legyen 3-nál kisebb. Ennek legegyszerűbb megoldása a 13.b ábrán látható kapcsolás. Ha a kimenet feszültsége kicsi, a diódák nem nyitnak ki, tehát az erősítés  $(R_1 + R_2)/R_1$ . Nagyobb jelamplitúdónál a dióda kinyit, ekkor  $R_2$  és  $R'_2$  párhuzamosan kapcsolódik és az erősítés csökken. A stabil állapot úgy valósul meg, hogy a dióda „éppen kinyit”, tehát az ellenállása hozzáadódik  $R'_2$ -hez.



13. ábra

## II. A mérés menete

A műveleti erősítő egy kapcsolótáblán található. A kapcsolások összeállítása előtt győződjön meg arról, hogy a tápegység ki van-e kapcsolva, majd a mérőtábla  $+U_i$ ,  $-U_i$  és föld jelzésű pontjait kösse össze a tápfeszültséggel. Az egyes kapcsolások összeállításához szükséges alkatrészek szabványos „banándugós” csatlakozókkal kapcsolhatók a mérőtáblához. Vannak olyan kapcsolások, amelyeknél a *ME* meghibásodik, ha csak az egyik tápfeszültséget kötjük be.

### Feladatok:

1. Állítsa össze az 1. ábrán látható kapcsolást és mérje meg, hogy milyen  $U_{be}$  értéknél világít a zöld és mikor a piros *LED*! Mérje meg azt a tartományt, amelyben egyik *LED* fénye sem látható!

2. Állítsa össze a 2., 3., 4. és 5. ábráknak megfelelő komparátorokat, mérje meg és ábrázolja az  $U_{ki}(U_x)$  karakterisztikákat! Legyen a 4. ábrán látható kapcsolásnál  $R = 10 \text{ k}\Omega$ , az 5. ábrán látható kapcsolásnál pedig  $R_3 = 2,2 \text{ k}\Omega$  és  $R_4 = 12 \text{ k}\Omega$ .
3. Állítsa össze az 6. ábrán látható négyszöggenerátort! Legyen  $R_3 = 12 \text{ k}\Omega$ ,  $R_4 = 68 \text{ k}\Omega$ . Határozza meg, hogy  $T = 5 \text{ ms}$ -hoz  $C = 100 \text{ nF}$  esetén mekkora  $R_2$  szükséges. Válassza ki az ellenálláskészletből a számított  $R_2$ -höz legközelebbi értéket és mérje meg oszcilloszkópon a periódusidőt. Vizsgálja meg oszcilloszkóppal és rajzolja le az egyenes és a fordító bemeneten mérhető jelek alakját!
4. Állítsa össze a 8. ábra alapján a gyakorlatvezető által kiválasztott kapcsolást. Legyen  $R_3 = 12 \text{ k}\Omega$ ,  $R_4 = 150 \text{ k}\Omega$ . A potenciométerek és a kondenzátor értékét a gyakorlatvezető mondja meg! Mérje meg a kapcsolás periódusidejét!
5. Állítsa össze a 9. ábrán látható kapcsolást. Legyen  $R_1 = 120 \text{ k}\Omega$ ,  $C = 47 \text{ nF}$ ,  $R_3 = 68 \text{ k}\Omega$ ,  $R_4 = 82 \text{ k}\Omega$ . Számítsa ki a periódusidőt és oszcilloszkóppal végzett méréssel ellenőrizze a kapott eredményt! Vizsgálja meg az  $U_3$  feszültség alakját! Magyarázza meg a jel alakját!
6. A háromszöggenerátor felhasználásával készítsen kváziszinusz generátort! Ehhez a 12.b ábrán látható kapcsolást kell a háromszöggenerátor kimenetére kapcsolni. Először az  $r_1$ - és  $r_2$ -ből álló feszültségosztót készítse el! Legyen  $r_1 = 3,6 \text{ k}\Omega$  és számítsa ki  $r_2$  értékét úgy, hogy a háromszögjel amplitúdója  $1 \text{ V}$  legyen! Méréssel ellenőrizze a kapott eredményt! Ezután egészítse ki a kapcsolást diódákkal és vizsgálja meg a jelalakot oszcilloszkópon!
7. Állítsa össze a 13.b ábra alapján a *Wien*-hidas oszcillátort! Legyen  $R_1 = 12 \text{ k}\Omega$ ,  $R'_2 = 47 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 120 \text{ k}\Omega$ . A *Wien*-osztóban szereplő alkatrészek értékei:  $C = 47 \text{ nF}$ ,  $R = 3,6 \text{ k}\Omega$ . Vizsgálja meg a kimenő jel alakját! Cserélgesse  $R_2$ -t  $47 \text{ k}\Omega$  és  $1 \text{ M}\Omega$  között! Hogyan változik a kimenő jel alakja? Változik-e a frekvencia? Számítsa ki a *Wien*-osztó karakterisztikus frekvenciáját és hasonlítsa össze a mért értékkel!

#### Kérdések:

1. Mi a komparátor?
2. Mi okozza a komparátor hiszterézisét?
3. Hogyan lehetne nem invertáló hiszterézises komparátort készíteni?
4. Miért lineáris a 9. ábránál a háromszöggenerátor jele?
5. Mi határozza meg a négyszöggenerátor átváltásának idejét?
6. Hogyan befolyásolná a négyszöggenerátor átváltásának idejét egy  $R_4$ -gyel párhuzamosan kapcsolt  $C^* = 100 \text{ pF}$  értékű kondenzátor?

7. Befolyásolhatja-e a tápfeszültség ingadozás a négyszöggenerátor periódusidejét?
8. Ha a tápfeszültségen nagyfrekvenciás zaj van, az hogyan befolyásolja a 9. ábrán látható generátor  $U_1$  és  $U_2$  kimenő feszültségét?
9. Miért kell a 13.b ábrán a két dióda?

Ajánlott irodalom:

1. Török M.: Elektronika, JATEPress, Szeged, 2000.
2. Herpy M.: Analóg integrált áramkörök, Műszaki Kiadó, Budapest, 1976.