

# Schmitt-trigger tanulmányozása

## 1. Bevezetés

Analóg makroszkopikus világunkban minden fizikai mennyiség folytonos értékészletű. Csak néhányat említve ilyenek a hossz, idő, sebesség, az elektromos mennyiségek (feszültség, áramerősség, ellenállás), stb.

Ahhoz, hogy az analóg világból át térjünk a digitális világba, az analóg mennyiségeket digitálissá kell alakítanunk. A legegyszerűbb digitális jelrendszer a kétértékű, azaz bináris rendszer. Ebben a digitális mennyiségek nagyságát a kettes számrendszerben adjuk meg. Itt összesen két számérték szükséges egy tetszőleges szám felírásához: a 0 és az 1.

A kettes számrendszert többféle módon reprezentálhatjuk. Például elektronikusan úgy, hogy egy áramkörben ha folyik áram, akkor az a digitális 1-et, ha pedig nem folyik, akkor az a digitális 0-át jelentse. Másik lehetőség, hogy ha valahol feszültség jelenik meg, akkor az digitális 1-et jelent, ha pedig nem mérünk feszültséget, akkor az digitális 0-át.

Amikor egy analóg jelet digitálissá alakítunk, az egyik alapfeladat az összehasonlítás. Ennek kapcsán két analóg értéket hasonlítunk össze, de az összehasonlítás eredménye már digitális érték, azaz csak két értéket vehet fel. Ha a két összehasonlítandó mennyiség feszültség ( $U_1, U_2$ ), akkor a két lehetséges eredmény:  $U_1 < U_2$ , ill.  $U_1 \geq U_2$  (miután csak két kimeneti érték lehetséges, olyan relációkat kell keresnünk, amelyek kölcsönösen kizárják egymást, ugyanakkor az összes lehetséges esetet lefedik).

Egy ilyen feladat megvalósításához olyan áramkörre van szükség, amelynek

- bemenete két analóg feszültséget tud fogadni
- kimenete két stabil állapot egyikébe billen.

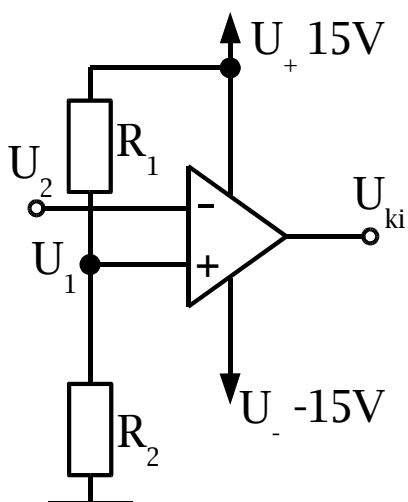
Az ilyen tulajdonságú áramköröket nevezzük komparátoroknak. Komparátort többféle módon meg lehet valósítani, mi a tranzisztorokkal és műveleti erősítővel felépíthető komparátorokkal foglalkozunk a továbbiakban.

A digitalizálás mellett a műszaki gyakorlatban nagyon gyakori feladat annak megállapítása, hogy egy mennyiség meghalad-e egy adott értéket. Ilyen feladat lehet egy tartály vízszintjének, egy helyiségben a radioaktív sugárzás szintjének a figyelése, de ilyen a hőmérséklet ellenőrzése figyelése egy hűtőgépben vagy egy sütődében. Mivel a figyelt mennyiségeket általában elektromos feszültséggé alakítjuk, így a feladatot feszültség szint összehasonlításra vezetjük vissza. A komparátorokat tehát a gyakorlatban sokszor felhasználjuk, így érdemes közelebbről is megismerkedni velük.

## 2. Komparátor kapcsolás műveleti erősítővel

A komparátor áramkör két feszültség jelet hasonlít össze, és meghatározza hogy melyik a nagyobb. Az összehasonlítás végeredménye a kimeneti feszültség szintben mutatkozik meg: ha például egy műveleti erősítő (ami tulajdonképpen már önmagában is egy komparátor) kimenete a pozitív tápfeszültségre billen, akkor a nem-invertáló (+) bemenetére vezetett jel nagyobb – pozitívabb – mint az invertáló bemenetén (-) lévő jel. Ha pedig negatív tápfeszültségre billen az erősítő kimenete, akkor az invertáló bemeneten (-) lévő jel a nagyobb, vagyis a pozitívabb.

Az 1. ábrán látható kapcsolásban az  $R_1$  és az  $R_2$  ellenállásokból létrehozott feszültségosztó adja meg az átbillenési feszültséget. Ha a bemenő feszültség ( $U_2$ ) ennél kisebb, a műveleti erősítő kimenete a pozitív tápfeszültségre billen (figyelem,  $U_2$  az invertáló bemenetre van kötve!), ha ennél nagyobb, akkor a negatív tápfeszültségre (ami ebben az esetben -15 V).



1. ábra Komparátor műveleti erősítővel

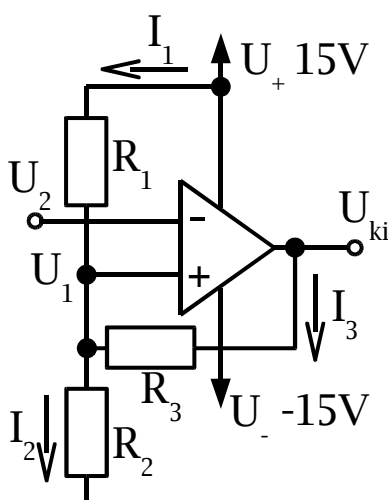
Ilyen kapcsolást ritkán szoktak alkalmazni, mert használatakor több probléma is adódik. Itt most csak kettőt említünk ezek közül:

- az erősítő a nagy bemenő ellenállása miatt erősen zajérzékeny
- mivel a bemeneti jel általában zajjal terhelt, ezért ha a jel átlagértéke az átbillenési feszültség közelében van, akkor a zaj ide-oda billenti az áramkört, s végülis a zaj amplitúdója fogja megszabni, hogy a kimenet mekkora feszültségnél nyugszik meg az egyik végállapotában.

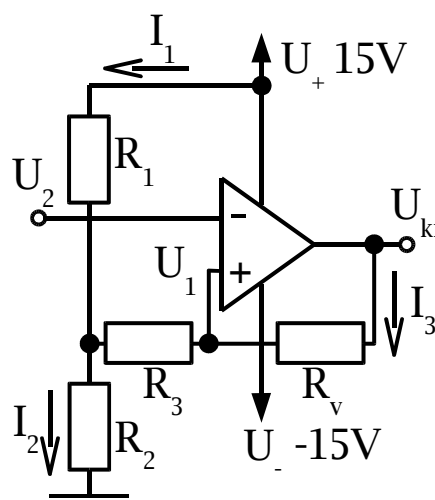
Ezek elkerülésére sokkal jobb lenne egy olyan áramkör, amelynél a kimenet magas és alacsony szintje közötti átbillenéshez tartozó bemeneti feszültség különböző, azaz hiszterézise van. Ezt valósítja meg a Schmitt-trigger.

### 3. Schmitt-trigger kapcsolás műveleti erősítővel

A Schmitt-trigger olyan jel-összehasonlító (azaz komparátor) billenő kapcsolás, amely hiszterézissel rendelkezik. Megvalósítása a 2. ábrán látható egyszerű kapcsolással lehetséges.



2. ábra Schmitt-trigger megvalósítása műveleti erősítővel



3. ábra Módosított Schmitt-trigger műveleti erősítővel

A műveleti erősítő tápfeszültsége +15 V és -15 V, ezért ezek jelentik a kimeneti feszültség szélső (telítési) értékeit is. Az átbillenési feszültséget most is az  $U_1$  feszültség adja meg, ez azonban most

– az  $R_3$  ellenállás által létrehozott pozitív visszacsatolás miatt – függeni fog a kimeneti feszültségtől. Mivel a műveleti erősítő ideálisnak tekintjük, az  $U_1$  feszültséget kizárólag a három ellenállás és két feszültség ( $U_{ki}$ , illetve  $U_+ = 15$  V) határozzák meg:

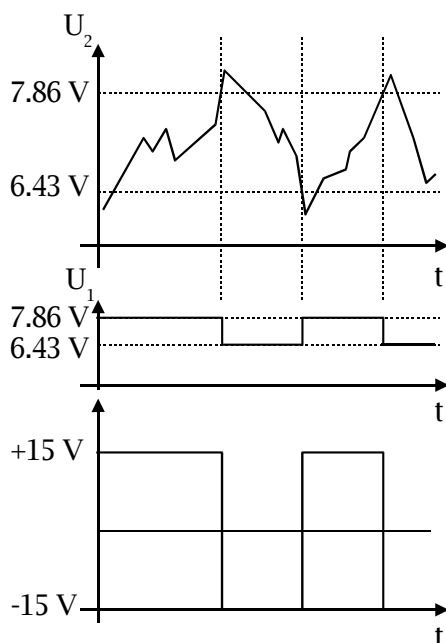
$$U_1 = R_2 \cdot (I_1 + I_3) = R_2 \cdot \left( \frac{15 - U_1}{R_1} + \frac{U_{ki} - U_1}{R_3} \right) \quad (1)$$

Az egyenletet  $U_1$ -re átrendezve :

$$U_1 = \frac{15}{1 + \frac{R_1}{R_2} + \frac{R_1}{R_3}} + \frac{U_{ki}}{1 + \frac{R_3}{R_2} + \frac{R_3}{R_1}} = \frac{R_1 \parallel R_2 \parallel R_3}{R_1} \cdot U_+ + \frac{R_1 \parallel R_2 \parallel R_3}{R_3} \cdot U_{ki}$$

A panelen  $R_1=10 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2=10 \text{ k}\Omega$ ,  $R_3=100 \text{ k}\Omega$ . Ezeket behelyettesítve:  $U_1 = \frac{15}{2.1} + \frac{U_{ki}}{21}$

A két átbillenési feszültséget  $U_{ki+}=15 \text{ V}$  és  $U_{ki-}=-15 \text{ V}$  behelyettesítésével kapjuk:  $U_{1+}=7,86 \text{ V}$ , ill.  $U_{1-}=6,43 \text{ V}$ . Ezért a Schmitt-triggerünk kimenete a 4. ábrán látható módon fog alakulni.



4. ábra Schmitt trigger kimenetének változása változó bemeneti jel esetén

Tehát a Schmitt trigger  $U_2$  bemenetére adott növekvő bemeneti feszültség esetén  $7,86 \text{ V}$ -nál fog átbillenni a kimeneti feszültség az eredeti pozitív ( $+15 \text{ V}$ ) tápfeszültségről a negatív ( $-15 \text{ V}$ ) tápfeszültségre, és csökkenő bemeneti feszültség esetén  $+6,43 \text{ V}$ -nál billen vissza a kimenet a  $+15 \text{ V}$ -os tápfeszültségre. Ez azt is jelenti, hogy  $\Delta U=7,86 \text{ V}-6,43 \text{ V}=1,43 \text{ V}$  hiszterézissel rendelkezik, azaz ha a zajok a bemeneti feszültségen ennél kisebbek, akkor azok nem fogják átbillenteni az áramkört.

### 3.1 Schmitt-trigger méretezése

A műveleti erősítővel felépített invertáló schmitt-trigger méretezéséhez a következő kiindulási paraméterekre van szükségünk:

Pozitív billenési feszültség ( $u_{b+}$ ), negatív billenési feszültség ( $u_{b-}$ ), tápfeszültség ( $u_t$ ), és a műveleti erősítő telítési kimeneti feszültsége ( $u_{sat}$ ),  $R_3$  értéke.

Nézzünk egy példát:  $u_{b+}=2 \text{ V}$ ,  $u_{b-}=1 \text{ V}$ ,  $u_{t\pm}=12 \text{ V}$ ,  $u_{sat}=11,2 \text{ V}$  (TL071 IC esetén),  $R_3=10 \text{ k}\Omega$ .

Az egyszerűsített kapcsolás (4. ábra) paraméterei:

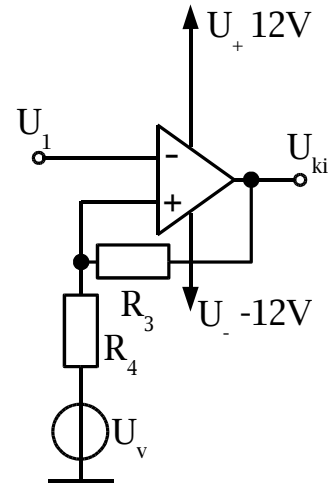
$$u_v = \frac{u_{sat} \cdot (u_{b+} + u_{b-})}{2 \cdot u_{sat} - u_{b+} + u_{b-}} = \frac{11,2 \cdot (2+1)}{2 \cdot 11,2 - 2 + 1} = 1,57 \text{ V}$$

$$R_4 = \frac{R_3 \cdot (u_{b+} - u_{b-})}{2 \cdot u_{sat} - u_{b+} + u_{b-}} = \frac{10 \text{ k} \cdot (2 - 1)}{2 \cdot 11,2 - 2 + 1} = 467 \text{ Ohm}$$

A 3. ábrán látható feszültségosztó ( $R_1$ - $R_2$ ) értékének meghatározása:

$$R_1 = \frac{\pm u_t \cdot R_4}{u_v} = \frac{12 \cdot 467}{1,57} = 3570 \text{ Ohm}$$

$$R_2 = \frac{\pm u_t \cdot R_4}{u_t - u_v} = \frac{12 \cdot 467}{12 - 1,57} = 537 \text{ Ohm}$$

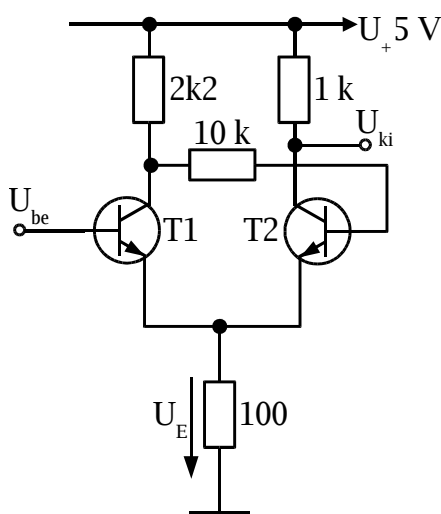


5. ábra Egyszerűsített Schmitt-trigger kapcsolás

### Elméleti feladatok:

- F1: Határozzon meg olyan ellenállás-hármaszt a 2. ábrán látható kapcsolásban, amelynél a bebillenés éppen 7,5 V-nál történik, a visszabillenés pedig 6,0 V-nál.
- F2: Írja fel a 3. ábrán látható módosított Schmitt-trigger kapcsolás billenési szintjeinek egyenletét (1)-hez hasonlóan! Mi az előnye ennek az áramkörnek az alap kapcsoláshoz képest?
- F3: Hogyan változtatná meg ezt az áramköri kapcsolást ahhoz, hogy folyamatosan szabályozni lehessen a bebillenési szintjét?
- F4: Vizsgálja a visszacsatoló ellenállás hatását. Mi történik, ha  $R_3 \rightarrow \infty$  (szakadás)? Mi történik, ha  $R_3 \rightarrow 0$  (rövidzár)?

## 4. Tranzisztoros Schmitt-trigger



6. ábra Tranzisztoros Schmitt-trigger

könnyedén kiszámíthatók.

### Elméleti feladatok:

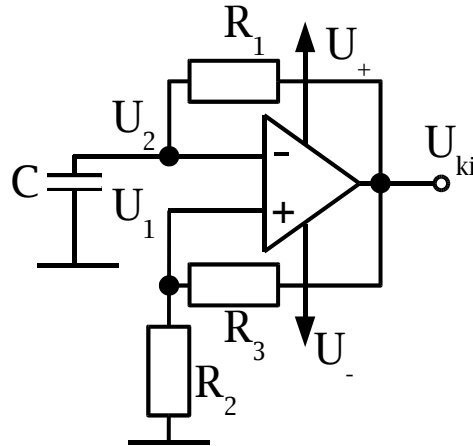
- F5: Határozza meg a 6. ábrán látható tranzisztoros Schmitt-trigger billenési szintjeit! (A tranzisztort tekintse ideális tranzisztornak,  $\beta=200$ . Segítség: telítéssel működő tranzisztor-üzem!)
- F6: Indokolja, miért fontos, hogy a  $T_1$  kollektorába kapcsolt ellenállás legyen nagyobb?

A 6. ábra egy tranzisztorokkal megvalósított Schmitt-trigger mutat. A pozitív visszacsatolás miatt az áramkör két állapotú: vagy az egyik tranzisztor vezet, vagy a másik.

A hiszterézist az egyes kollektorokba kapcsolt különböző nagyságú ellenállások biztosítják. Mivel értékük az emitterben lévő ellenállásnál egy nagyságrenddel nagyobb, ezért ezek állítják be a tranzisztorokon (és ezzel az emitter ellenálláson) átfolyó áram értékét. Fontos, hogy ha  $U_{be}$   $T_1$  bázisán van, akkor a  $T_1$  tranzisztor kollektorába kapcsolt ellenállás legyen a nagyobb. Az emitter ellenálláson eső feszültség megszabja a tranzisztorok nyitófeszültségét (ami az emitter-bázis diódán eső feszültséggel, azaz kb. 0,6 V-al nagyobb  $U_E$ -nél), s mivel mindkét tranzisztor telítéssel működik (azaz  $U_{CE} \sim 0$  V), az ellenállások ismeretében a billenési szintek

## 5. Astabil multivibrátor (relaxációs oszcillátor) műveleti erősítővel

A Schmitt-trigger kis módosításával négyzetjel-generátort (oszcillátort) is készíthetünk. A Schmitt-triggerhez hasonlóan ez az áramkör is az  $R_2$ - $R_3$  feszültségosztó kimeneti-feszültség függését használja ki. Figyelem! Ez egy oszcillátor, s működése nem igényel külső jelforrást. Visszacatolása a *pozitív* ágban történik! Vizsgáljuk az 7. ábrán látható kapcsolást:



7. ábra Astabil multivibrátor műveleti erősítővel

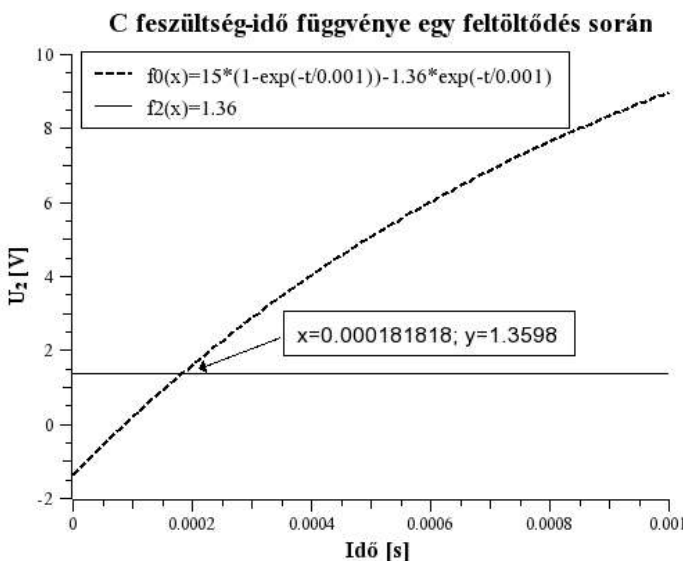
A  $R_2$  és  $R_3$  megszabja az áramkör billenési pontjait:  $U_{1b1} = U_+ \cdot \frac{R_2}{R_2 + R_3}$ , ill.  $U_{1b2} = U_- \cdot \frac{R_2}{R_2 + R_3}$ .

Ezek nyilván  $U_+$  és  $U_-$  közé esnek. Kiindulásképpen tegyük fel, hogy a műveleti erősítőnk éppen a pozitív tápfeszültségre billent ki. Ez azt jelenti, hogy  $U_2 < U_1$  hiszen ezért megy telítésbe az erősítő. Ekkor a  $C$  kondenzátor  $U_{1b2} \cdot C$  töltést halmozott fel, és elkezd áttöltődni az  $R_1$  ellenálláson keresztül  $U_{ki} = U_+$  irányába.

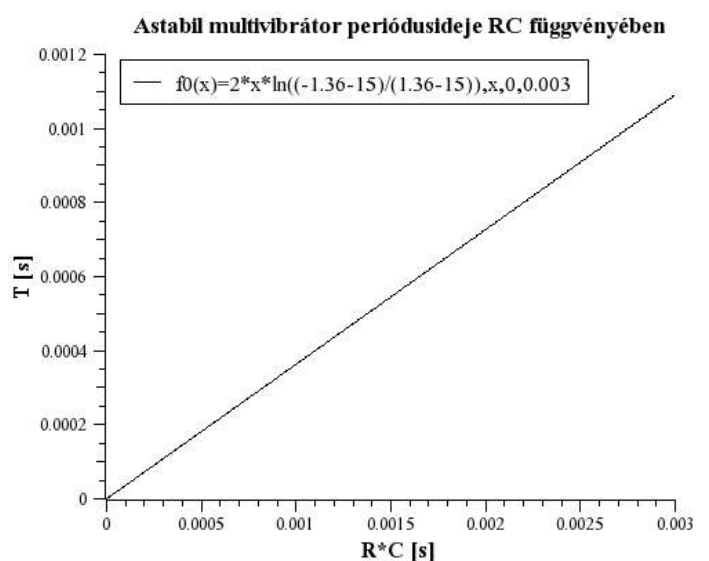
Egy kezdeti töltéssel rendelkező kondenzátor töltődésének egyenlete:

$$q = q_0 \cdot e^{\left(\frac{-t}{RC}\right)} + CU(1 - e^{\left(\frac{-t}{RC}\right)}). \text{ A mi esetünkben } U = U_{ki+}, \text{ és } q_0 = U_{1b2}C, \text{ tehát a töltődési egyenlet:}$$

$q = U_{ki+}C \cdot (1 - e^{\left(\frac{-t}{R_1C}\right)}) + U_{1b2}C \cdot e^{\left(\frac{-t}{R_1C}\right)}$ .  $U_2$  időbeli változását az  $U_2 = U_{ki+} \cdot (1 - e^{\left(\frac{-t}{R_1C}\right)}) + U_{1b2} \cdot e^{\left(\frac{-t}{R_1C}\right)}$  egyenlet írja le. Láthatjuk, hogy  $U_2$  exponenciális (lásd a 8. ábrán), időállandóját az  $R_1C$  szorzat adja meg. Ne feledjük, hogy  $C$  töltődési ideje csak az egyik félperiódusra vonatkozik, ezért  $t = T/2$ !

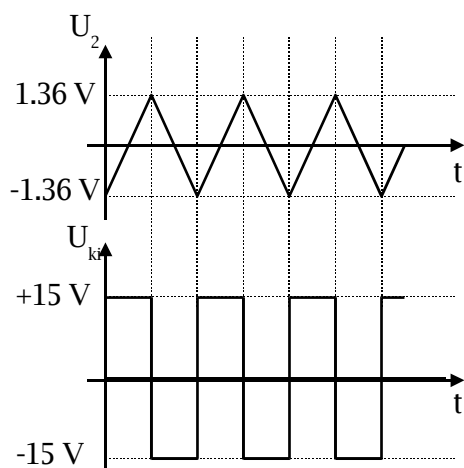


8. ábra  $C$  feszültség-idő függvénye a töltődés alatt



9. ábra Astabil multivibrátor  $T$ - $RC$  függvénye

A folyamatosan növekvő  $U_2$  el fogja érni az  $U_{1b1}$  billenési feszültséget (8. ábra, nyíllal jelölt pont), s akkor - a pozitív visszacsatolás miatt - az áramkör hirtelen átbillen a másik végállapotába, azaz  $U_{ki}=U_-$  és ennek megfelelően  $U_1=U_{b2}$  lesz (10. ábra).



10. ábra  $U_2$  és  $U_{ki}$  feszültségmenete

A billenésig eltelt idő az alábbi egyenletből számítható:

$U_{1b1} = U_+ \cdot (1 - e^{-\frac{T}{2R_1C}}) + U_{1b2} \cdot e^{-\frac{T}{2R_1C}}$ . Ezt az egyenletet T-re kifejezve megkapjuk a periódusidőt.

A relaxációs oszcillátor kimenetének periódusideje:

$$T = 2R_1C \cdot \ln\left(\frac{U_+ + U_{1b1}}{U_+ + U_{1b2}}\right).$$

A billenés után a kondenzátoron nem tud hirtelen megváltozni a feszültség, ezért az átbillenés utáni pillanatban  $U_2 = U_{b1}$ . Innentől kezdve azonban a kondenzátor elkezdi áttöltődni, és az  $U_2$  pont feszültsége exponenciálisan most már az új  $U_{ki}$  feszültséghez, azaz  $U_-$ -hoz kezd tartani, ameddig el nem éri az  $U_{b2}$  feszültséget. Itt a folyamat eljutott abba az állapotba amiből kiindultunk, s a kör újraindul.

### Elméleti feladat:

F7: Határozza meg a relaxációs oszcillátor frekvenciáját! ( $U_+ = +12$  V,  $U_- = -12$  V,  $R_1 = 100$  k $\Omega$ ,  $C = 100$  nF,  $R_2 = 10$  k $\Omega$ ,  $R_3 = 100$  k $\Omega$ )

### Ellenőrző kérdések:

- E1: Mik az egyszerű (visszacsatolatlan) komparátor hátrányai?
- E2: Mire szolgál a pozitív visszacsatolás egy komparátor-kapcsolásban?
- E3: Magyarázza meg a hiszterézis lényegét! (ábra alapján)
- E4: Rajzolja fel egy relaxációs oszcillátor sémáját! Rajzolja fel az invertáló bemeneten mérhető jelalakot!
- E5: Adja meg egy tranzisztoros schmitt-trigger sémáját! Mi határozza meg hiszterézisének nagyságát?

## 3. Mérés

Mérési feladatok:

- M1: Építse meg az 1. ábra szerinti kapcsolást,  $\mu A-741$ -es műveleti erősítőt használva.  $R_1 = 22$  k $\Omega$ ,  $R_2 = 10$  k $\Omega$ . Változtassa lassan, a billenési küszöb közelében a bemeneti feszültséget! Figyelje a kimenet változását! Írja le mit tapasztalt!
- M2: Alakítsa át a kapcsolást a 2. ábra szerint!  $R_3 = 100$  k $\Omega$ . Milyen változást tapasztalt?
- M3: Építse meg a 6. ábra szerinti kapcsolást, vizsgálja működését!  $T_{1,2} = BC182$
- M4: Építsen a 7. ábra alapján relaxációs oszcillátort ( $U_{\pm} = \pm 15$  V,  $R_2 = 10$  k $\Omega$ ,  $R_3 = 22$  k $\Omega$ )! Válassza úgy  $R_1$  és  $C$  értékét, hogy az oszcillátor 12 kHz-en rezegjen! Műveleti erősítőként TL071-et használjon. Ellenőrizze a jelalakokat a műveleti erősítő bemenetein és kimenetén! A kimeneti feszültség megfigyelése után cserélje ki a műveleti erősítőt  $\mu A-741$ -re! Milyen változást tapasztalt a jelalakban? Mi lehet a különbség oka (adatlapok összehasonlítása alapján)?