

Elektronika és mérés technika

Varga Dezső és Bagoly Zsolt

Tue Jun 5 12:00:00 CEST 2013

1. fejezet

Elektronikai alapfogalmak

3. fejezet

Műveleti erősítők és visszacsatolások

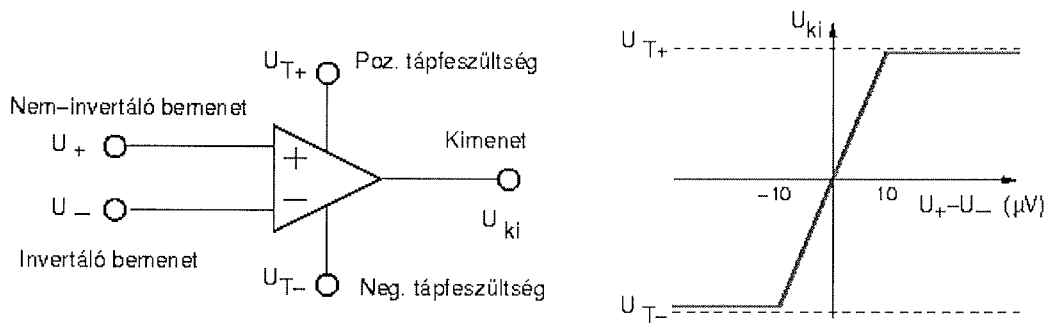
3.1. Műveleti erősítők tulajdonságai

Az előző fejezetekben megismerkedünk az elektronikai rendszerek alapvető építőköveivel, amelyekből elvileg tetszőleges funkciójú kapcsolás kialakítható. Ennek gyakorlati akadályai viszont, hogy a bonyolult kapcsolások hamar átláthatatlanná válnak, az összetett feladatok pedig nagyszámú alkatrészt igényelnek.

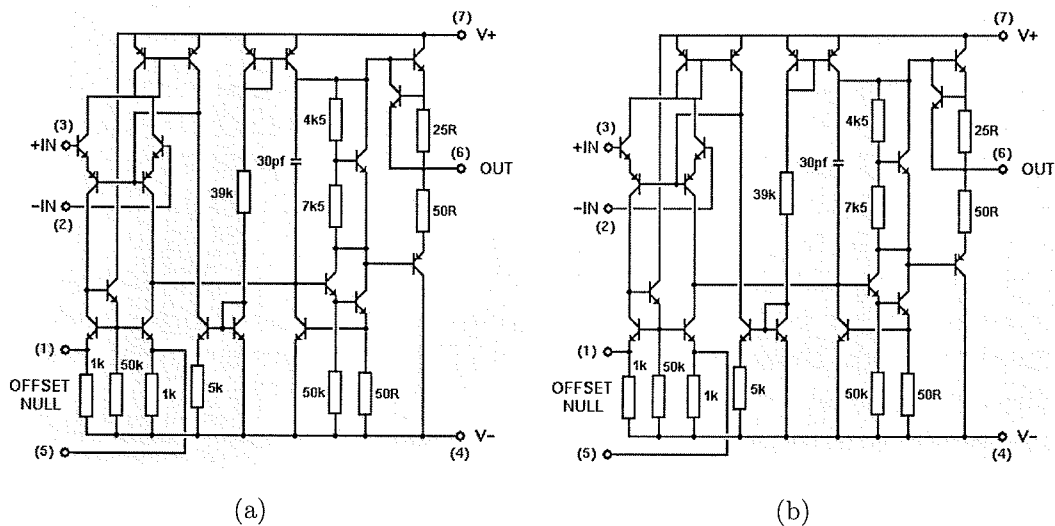
Hasonlóan a gépiparhoz, a javíthatóság és tervezhetőség fontos szempontként itt is megjelent, a megoldás is hasonló lett: szabványosan kezelhető részegységeket fejlesztettek ki, amelyek egymással felcserélhetőek, a belőlük kialakított összetett rendszerek *funkciói* áttekinthetőek, működésük egyszerű és igen jól jósolható. A gépiparban ilyen pl. a csavargyártás, ennek az elektronikában az integrált áramkörök (IC, Integrated Circuit) kifejlesztése felel meg.

A sok alkatrészes, bonyolult felépítésű, de egyszerűen viselkedő részegységek használata egyszerűsíti a gyártást és a tervezést. Ez az ellentmondásnak tűnő koncepció két okból megalapozott. Egyik, hogy egyetlen tranzisztort valójában kellemetlenül bonyolult eszköz, karakterisztikája típus- és hőmérsékletfüggő, ^{viszteség} esetleges (lásd XXXX fejezet). Másik, hogy a modern technológiákkal egyetlen tranzisztort kialakítani nagyságrendileg ugyanannyiba kerül, mint ugyanazon a félvezető kristályszemcsén 10 vagy 100 darabot, az egyszerűbb IC-k árát jelentős mértékben a tokozás határozza meg. A fizikai méret és az alkatrészek száma egyidejűleg csökkenthető, ami a gyártási költségeket csökkenti.

Jelen fejezetben áttekintjük a félvezetők legfontosabb, összetett de egyszerű funkciójú kombinációjának, a műveleti erősítőnek a tulajdonságait. Tekintve hogy modern rendszerekben szinte minden analóg, időfüggő feszültségekkel kapcsolatos elektronikai feladatot műveleti erősítővel oldanak meg, ezeken keresztül áttekintjük magukat a tipikus feladatok, felhasználási területeket is.



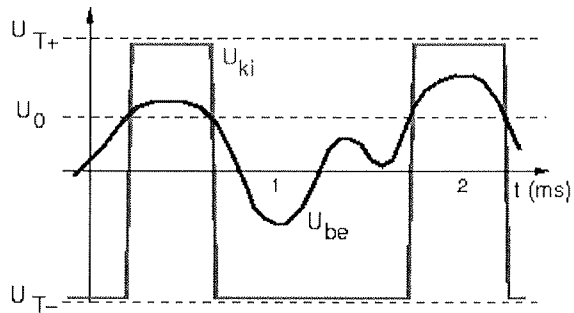
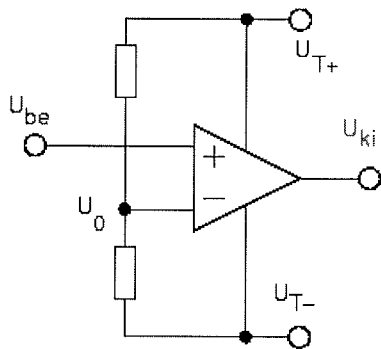
3.1. ábra. Műveleti erősítő rajzjele (balra). A döntött háromszög függőleges oldala mentén vannak a bemenetek (+ jel a nem-invertáló, - jel az invertáló bemenetnél), a háromszög ellentétes csúcsánál a kimenet. A tápfeszültségek bemeneteit gyakran nem jelölik, ha igen akkor leginkább az itt látható módon. Az ábra jobb oldalán a műveleti erősítő tipikus karakterisztikája látható, azaz a bemenetek különbségének függvényében a kimenet



3.2. ábra. A népszerű $\mu A741$ (más néven UA741 vagy LM741) kapcsolási rajza (balra). Felismerhetők a bemenetek (+IN és -IN), ezek jutnak a differenciálerősítő-kapcsolásra. Jobbra az eszköz leggyakoribb kivitelezéséről készített fénykép MEG NINCS!!!

A műveleti erősítőkkel megvalósított áramkörök tervezésekor fontos paraméterek még a következők (ezeket itt nem tárgyaljuk részletesen, mivel túlmutatnak az anyagon):

- az erősítők frekvenciamenete: ahogy az minden áramkörnél, így pl. a 3.2 ábra áramkörénél is igaz, a kapcsolásnak van felső határfrekvenciája, azaz ahonnan



3.3. ábra. Komparátor kapcsolási rajza (balra), az invertáló bemeneten konstans U_0 feszültséggel. A kimenet a maximális pozitív érték ha az áramkör bemenete (a nem-invertáló bemenetre kötve) nagyobb mint U_0 , és minimális negatív, ha kisebb. Jobb oldalon látható vázlatosan a be- és kimenő jel időfüggése.

a kimenet stabilizálja önmagát. A visszacsatolásnak változatos módjai vannak, ezeket tekinti át az alábbi alfejezet.

3.2.1. Az ideális műveleti erősítő kapcsolások szabályai

A negatív visszacsatolású áramkörök elemzését, működésük feltérképezését az teszi könnyűvé, hogy két egyszerűen megfogalmazható és alkalmazható szabály teljesül első közelítésben:

- M1** A műveleti erősítő U_{ki} kimenete úgy igyekszik változni, hogy a bemenetek közötti feszültségkülönbség közel zérus legyen.
- M2** A műveleti erősítő bemenetein (U_+ és U_-) nem folyik áram.

Az M1 szabály tulajdonképpen a 3.1 egyenlet átfogalmazása, feltételezve hogy az A erősítés közel végtelen: eszerint a 3.1 egyenlet bal oldala (a kimenet) csak úgy lehet véges érték ha a $U_+ - U_-$ különbség zérus. Az M2 szabály azzal ekvivalens hogy a műveleti erősítő bemenő ellenállása végtelenül nagy, azaz az őt megelőző fokozatból áramot nem vesz ki, azt nem terheli.

Az M1 és M2 szabálytól való eltérést bizonyos esetekben nem lehet elhanyagolni. Vannak viszont olyan speciális műveleti erősítő típusok, amelyek az ideálist ($A = \infty$ és $I_{be} = 0$) rendkívül jól közelítik – a tervező feladata tehát meghatározni hogy milyen pontossággal szükséges az idealizált eset feltételeit teljesíteni.

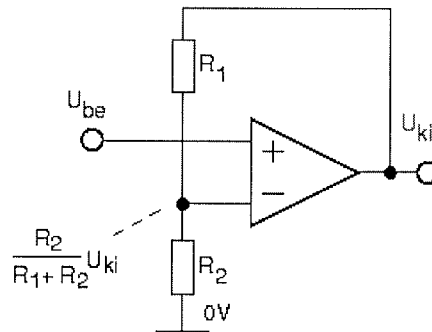
Az M1 szabály alól van egy fontos kivétel, amit éppen a komparátornál is láttunk. Ha a kimenet akkora kellene legyen, hogy az a tápfeszültség értékét meghaladná (akár

$$U_- = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_{ki} \quad (3.2)$$

Alkalmazhatjuk még az M1 szabályt, ami ismét egyszerűen: $U_+ = U_-$. A fentiekből átrendezéssel adódik a ki- és bemenet közötti kapcsolat:

$$U_{ki} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} U_{be} \quad (3.3)$$

Ez érdekes módon a potenciométer-formula reciproka. A kimenet egy fix, egynél nagyobb számszorosa a bemenetnek, az arányt szigorúan a külső alkatrészek, R_1 és R_2 értéke határozza meg. A 3.5 ábrán látható és fentiekben tárgyalt kapcsolást nem-invertáló erősítőkapcsolásnak nevezzük. Jellemzője hogy közel ideális: bemeneti ellenállása igen nagy, kimeneti ellenállása nagyon kicsi.



3.5. ábra. Neminvertáló erősítőkapcsolás. Az invertáló bemeneten a feszültségosztó-formula szerinti hányada esik a kimenetnek, emiatt a ki- és bemenetek aránya éppen ennek reciproka: tetszőleges 1-nél nagyobb szám.

A 3.4 és 3.5 ábrák kapcsolási rajzát összehasonlítva észrevehetjük, hogy az egységnyi erősítésű kapcsolásnál az áramkörnek egyetlen pontját sem kellett a zérushoz (földponthoz) kötni. A nem-invertáló erősítőnél viszont egyértelműen a fizikailag is megjelenő zérushoz képest mérjük a ki- és bemenetet.

3.2.3. Invertáló erősítőkapcsolás

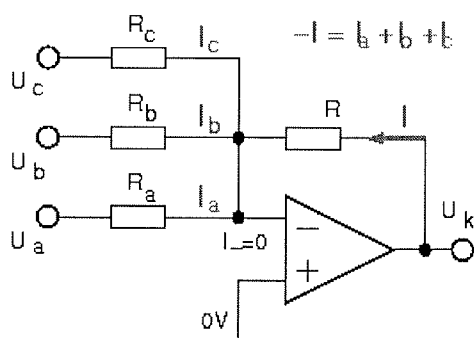
A nem-invertáló erősítőkapcsolás tulajdonsága az volt, hogy egy tetszőleges pozitív számszorosa lehetett a kimenet a bemenetnek. A 3.6 ábra mutatja a negatív értékű számmal való szorzást megvalósító, invertáló erősítőnek nevezett kapcsolást.

A kapcsolat több szempontból is érdekes. Itt is negatív visszacsatolásról van szó (hiszen a kimenet az R_1 ellenálláson keresztül vissza van kötve az invertáló bemenetre), de a külső bemenő feszültség is egy R_2 értékű ellenálláson keresztül ugyaneide csatlakozik.

kell lennie – ilyen és hasonló esetben ezt a földpotenciálú pontot „virtuális földpontnak” nevezik. Virtuális földpont legtöbbször éppen ezen a módon alakul ki, azaz mint egy műveleti erősítő invertáló bemenete, ha a nem-invertáló bemenetet zérus feszültségre kötjük.

3.2.4. Összeadó áramkör

Két vagy több feszültség precíz módon képzett összegét vagy tetszőleges lineárkombinációját megvalósíthatjuk a 3.7 ábra szerinti, összeadó áramkörnek nevezett kapcsolással. A hangsúly ismét azon van, hogy ezt nagy pontossággal tesszük, úgy, hogy az áramkör kimenő ellenállása nagyon alacsony.



3.7. ábra. Összeadó áramkör. A kimenet az U_a , U_b és U_c bemenetek lineárkombinációjaként adódik, ami azon múlik hogy az R ellenálláson folyó I áram éppen a bemeneteken befolyó áramok összege.

A 3.7 kapcsolási rajz nagyon hasonlít az invertáló erősítőre, csak ezúttal több bemenetet (U_a , U_b , U_c , stb) kötünk a műveleti erősítő invertáló bemenetére, megfelelő ellenállásokkal. Az előző alfejezet gondolatmenetét követhetjük ismét: az invertáló bemenet virtuális földponttá válik, a kimenet felől (R ellenálláson) folyó áram pedig a bemenetek felől érkező áramok összege. A kimeneti feszültség értéke:

$$U_{ki} = -R \left(\frac{U_a}{R_a} + \frac{U_b}{R_b} + \frac{U_c}{R_c} \right) \quad (3.5)$$

Tekintve hogy a bemenetek felől tetszőlegesen megválasztható az ellenállások értéke, a 3.5 egyenlet azt fejezi ki hogy tetszőleges negatív együtthatós lineárkombinációját képezni tudjuk akármilyen bemenetnek. Az hogy az együttható negatív, nem jelent korlátozást: ha egy újabb invertáló erősítőfokozatot kapcsolunk a kimenetre, visszafordíthatjuk a feszültséget.

és bemenő feszültségek közötti kapcsolathoz:

$$U_{be} = -RC \frac{dU_{ki}}{dt} \quad (3.7)$$

azaz a kimenetet felírva,

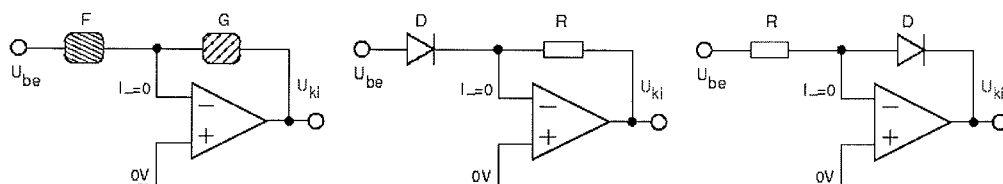
$$U_{ki} = -\frac{1}{RC} \int U_{be} dt \quad (3.8)$$

A kimenő feszültség tehát a bemenet idő szerinti integrálja, nagy pontossággal. Az integrálás kezdőpontja nem igazán jól definiált: ha az áramkört technikailag megvalósítjuk, figyelembe kell venni, hogy egy kicsi konstans feszültség (offset) a bemeneten a kimenet folyamatos emelkedését vagy csökkenését vonja magával (a konstans érték integrálja egy idővel arányos mennyiség). Gyakorlatilag az áramkör kimenete egy idő után a pozitív vagy negatív tápfeszültség közelébe jut, ami megzavarja a működést. Ennek kiküszöbölésére a pontos integrálást kicsit „elrontjuk” egy R_v nagy értékű visszacsatoló ellenállással, de ettől még az áramkör általában nagy pontossággal közelíti az időbeli integrál tényleges értékét.

A 3.8 és 3.7 ábra szerinti áramkörökkel deriválást, integrálást és számmal való szorzást (lineárkombinációt) tetszés szerint meg tudunk valósítani.

3.2.6. Nem-lineáris átviteli karakterisztikák megvalósítása

Az előző alfejezetekben a műveleti erősítő köré lineáris alkatrészeket helyeztünk el, és a működés is ennek megfelelően lineárisnak adódott (feltéve hogy a tápfeszültséget nem éri el a kimenet). Ezzel szemben általánosíthatjuk is az 3.6 ábra szerinti invertáló erősítőkapcsolást, úgy, hogy bemenet felől és a visszacsatoló ágba tetszőleges, nem lineáris karakterisztikájú alkatrészt teszünk. Ezt mutatja a 3.9 ábra bal oldala.



3.9. ábra. Nemlineáris karakterisztikájú eszközt tartalmazó műveleti erősítés kapcsolás megvalósítási lehetősége (balra). Konkrétan az exponenciális (középen) és a logaritmikus (jobbra) függvénykapcsolatot jó közelítéssel előállító kapcsolások.

Tegyük fel hogy az F alkatrész mint általános kétpólus (az ezzel kapcsolatos előzetes ismereteket lásd a XXXX fejezetben) karakterisztikája, azaz feszültsége és árama közötti kapcsolat: $I = f(U_F)$, a G alkatrész esetén pedig $I = g(U_G)$. A g és f függvények

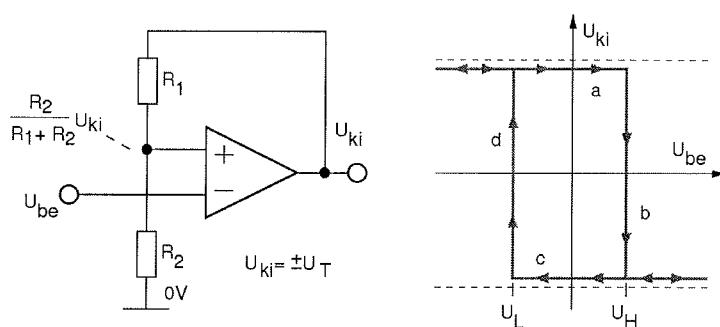
évei között, nem kis részben katonai alkalmazásokban. Példa erre a lövedékek röppályájának kiszámítása (kilőtt vagy repülőből kidobott bombák esetén is), ahol figyelembe lehet venni a geometriai paramétereket (irány, sebesség) illetve a külső körülményeket is (közegellenállás, szélesség). Modern rendszerekben hasonló, jelentősen fejlett áramköröknek például időben torzult jelek nagysebességű helyreállításánál van szerepe.

3.3. Pozitív visszacsatolás

A műveleti erősítők kimenetét visszacsatolhatjuk nemcsak az invertáló bemenetre (ahogy az előző fejezetben láttuk), hanem a nem-invertáló bemenetre is. Ez utóbbi esetben, melyet pozitív visszacsatolásnak nevezünk, az történik, hogy ha a kimenet emelkedik, akkor a bemenetek közti különbség pozitív irányban növekszik, ami tovább növeli a kimenetet – ez egy olyan instabil helyzetet teremt, hogy a kimenet a pozitív vagy negatív tápfeszültség környékén fog általában tartózkodni. A negatív visszacsatolásnál alkalmazható M1 szabály tehát kifejezetten nem teljesül. Pozitív visszacsatolással erősen nemlineáris viselkedésű áramköröket kapunk.

3.3.1. A Schmitt-trigger kapcsolás

Tekintsük a következő, 3.10 ábra szerinti kapcsolást, ami a pozitív visszacsatolás legtipikusabb kialakítása. Az áramkör bemenete a műveleti erősítő invertáló bemenete. A kimenetet visszacsatoljuk egy R_1 és R_2 ellenállásokból álló osztó segítségével a *nem-invertáló bemenetre*.



3.10. ábra. Pozitív visszacsatolást tartalmazó áramkör: egy műveleti erősítővel megvalósított Schmitt-trigger. A bal oldali áramköri rajz ki- és bemenete közötti kapcsolatot a jobb oldali diagram szemlélteti

Példaképpen legyen az U_{be} bemenő feszültség zérus, és a kimenet is közel zérus. Ekkor az invertáló bemenet is zérus közeli. Tegyük fel hogy a kimenet kicsit felfelé

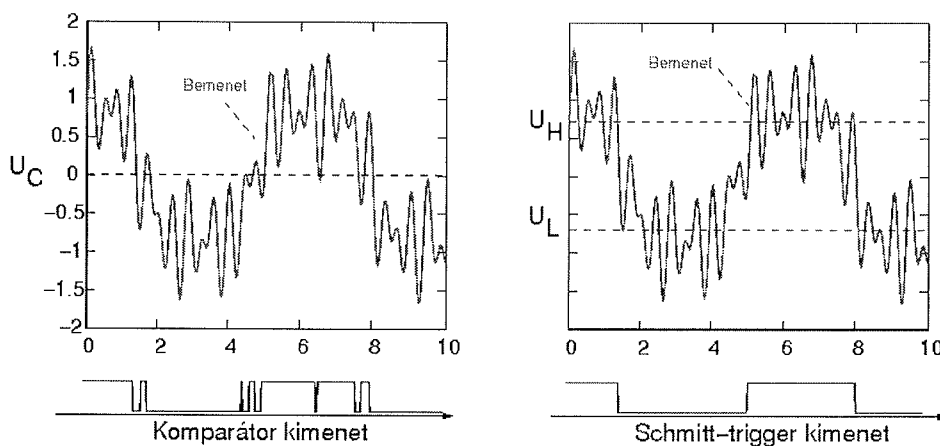
feltételezve hogy a kimenet a szimmetrikus $\pm U_T$ tápfeszültség értékét jó közelítéssel eléri.

Az ilyen, kétféle adott billenési szinttel és kétféle határozott kimeneti feszültséggel rendelkező kapcsolásokat *Schmitt-triggernek nevezik*. A Schmitt-trigger fizikai megvalósítása mindig pozitív visszacsatolással történik, és az itt tárgyalt műveleti erősítés megoldáson kívül sokféle változata létezik.

3.3.2. A hiszterézis szerepe elektronikai rendszerekben

A Schmitt-trigger olyan eszköz, ahol a bemenő feszültség nem minden tartományon határozta meg a kimenetet: volt olyan tartomány, ahol a rendszer előélete (itt konkrétan az, hogy pozitív, vagy negatív irányból közelítettünk az adott bemeneti érték felé) számít a kimeneti érték szempontjából. Ezt a jelenséget *hiszterézisnek nevezik*. A Schmitt-trigger működése pozitív visszacsatoláson alapult, és igaz is, hogy *az elegendően erős pozitív visszacsatolás hiszterézishez vezet*.

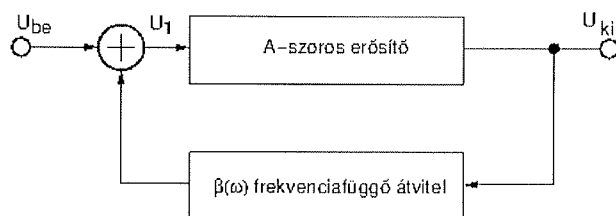
Elektronikai rendszerekben kiemelt szereppel bír a hiszterézis. Tekintsünk egy példát: adjunk egy időben változó feszültséget a 3.10 ábra szerinti Schmitt-trigger, illetve egy komparátor (3.3 ábra) bemenetére. Ezt az összehasonlítást a 3.11 ábra szemlélteti.



3.11. ábra. Jelformálás Schmitt-triggerrel. Balra: egy komparátor a bemenőjelet egy U_C komparációs szinttel (itt zérus) hasonlítja össze, a kimeneten (alul) az átmenet környékén gyors változások láthatók. Jobbra: a Schmitt-trigger akkor vált, ha a bemeneti jel a felső U_H szintet eléri, illetve ha lejut az alsó U_L billenési szintig. A kimenet (alul) még ebben az igen zajos esetben is egyértelműen vált fel vagy le

A bemenő feszültség egy főleg magas, illetve főleg alacsony tartományokban lévő jel, de erre tevődik egy gyors oszcilláció, egy külső zajforrás modellje. Ha a jelben lévő információt alapvetően az hordozza, hogy az „alacsony” vagy „magas” (LO vagy HI),

át, ami tipikusan egy szűrőáramkör: ennek átviteli függvénye (lásd XXXX fejezet) legyen $\beta(\omega)$. Az egész áramkorról feltételezzük hogy lineáris rendszer. A 3.12 ábra mutatja az elrendezés vázlatát.



3.12. ábra. Visszacsatolás modellje: egy A-szoros erősítő és egy frekvenciafüggő $\beta(\omega)$ átvitelű kapcsolás egyetlen hurokban. Az erősítő bemenetére a külső bemenet és a szűrőáramkör kimenetének összege jut.

A külső bemenő feszültség legyen U_{be} , a kimenő feszültség pedig U_{ki} . Feltételezzük hogy mindkettő harmonikus jel adott ω frekvenciával: egy alapvetően lineáris rendszerben ezzel tetszőleges időfüggésű jel leírható. Emiatt nem írjuk ki expliciten az ω függést. A szűrőáramkörtől áthaladva a kimenet értéke βU_{ki} lesz, tehát az erősítőkapcsolás bemenetére jutó feszültség:

$$U_1 = U_{be} + \beta U_{ki} \quad (3.16)$$

Tekintve hogy fix erősítésünk van, ezért teljesül az is, hogy $AU_1 = U_{ki}$. Mindezekből a külső bemenet és a kimenet arányára adódik:

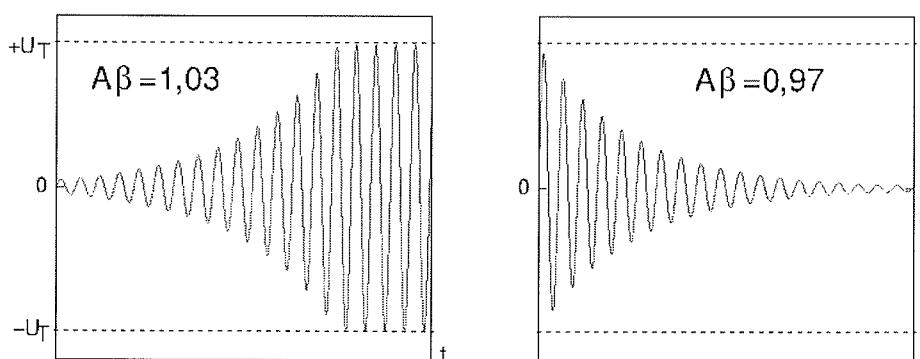
$$U_{ki} = \frac{A}{1 - A\beta} U_{be} \quad (3.17)$$

Abban a határesetben, amikor $\beta = 0$, visszkapjuk a fix A-szoros erősítést. Ha β , azaz a visszacsatolás nem elhanyagolható, három érdekes tartományt találhatunk: ezeket a $A\beta$ szorzat értéke határoolja be. A $A\beta$ szorzatot *hurokerősítésnek* nevezzük szokásosan.

- Ha $A\beta$ negatív, akkor a 3.17 egyenlet nevezője egynél nagyobb. Ez azt jelenti hogy a visszacsatolás nélküli esethez képest csökken ki- és bemenet aránya. *Ez a negatív visszacsatolás esete.* Határesetben, amikor A végtelen, a ki- és bemenet A -tól függetlenül $-1/\beta$ lesz. Ezt az effektust a műveleti erősítőknél is láttuk, ahol a műveleti erősítő rendkívül nagy erősítése helyett egy pontosan megadható erősítést kaptunk.
- Ha $A\beta$ pozitív (de 1-nél kisebb), a visszacsatolás nélküli esethez képest az erősítés növekszik: ez a *pozitív visszacsatolás*. Ilyen módon lehetőség van egy nem túl nagy A erősítést szükség szerint növelni.

nem tud a tápfeszültség tartományán túljutni. Innentől a rendszer nem tekinthető lineárisnak, a kimeneti jel pedig jó közelítéssel szinuszos, konstans amplitúdójú érték lesz. Ha a $A\beta$ picit kisebb mint 1, akkor egy stabil egyensúlyi helyzet a zérus kimenet. Ha a kimenet valamiért mégis véges lenne, akkor exponenciálisan elhaló oszcillációk folyamata során közelít a zérushoz. Mindezeket a 3.14 ábra szemlélteti.

A fentiek alapján látható, hogy növekedés miatt az elért amplitúdót valamilyen (remélhetőleg enyhe) nemlineáris effektus határozza meg: pl. ilyen lehet a kimenőjel tápfeszültséghez közeli értéke, ahol a szinuszos jelek csúcsa kicsit torzul, levágódik. Ez a jel már nem ~~lesz~~ leírható tisztán egy adott frekvenciájú szinusszal, megjelennek a felharmónikusok is --tiszta szinusz nehéz előállítani!



3.14. ábra. Kimenő jel az idő függvényében Wien-hidas kapcsolásnál $A\beta = 1,03$ (balra) illetve $A\beta = 0,97$ (jobbra) esetben. A kimenet exponenciálisan növekszik vagy csökken, viszont a gyakorlatban a tápfeszültség értékét nem haladhatja meg.

3.4.3. Schmitt-triggeres oszcillátor

Oszcillációt nem csak akkor tudunk előállítani, ha $A\beta$ az 1 közelében van, hanem akkor is, ha annál sokkal nagyobb. A jel ilyenkor messze van a harmonikustól, az erősítő kimenetén általában a maximális és minimális értéket (általában ezek a tápfeszültségek) láthatjuk, az erősítő nemlineáris üzemmódban működik, az M1 szabály ~~lesz~~ érvényes.

Tekintsük a pozitív visszacsatolás szélsőséges esetét, a Schmitt-triggert a 3.10 ábra szerint. A kimenetét kössük egy aluláteresztő (kvázi-integráló) szűrőkapcsolás (XXXX ábra) bemenetére, és ez utóbbi kimenetét csatoljuk vissza a Schmitt-trigger bemenetére. A kapcsolás a 3.15 ábrán látható. A rendszer oszcillálni kezd, amit az ábra jobb oldala mutat.

Kövessük végig az áramkör működését. Tegyük fel hogy a kezdeti pillanatban a C kondenzátor feszültsége zérus. A kimenet csak $\pm U_T$ tápfeszültségen lehet, legyen most ez pozitív. Az R ellenálláson keresztül a C kondenzátor lassan töltődni kezd (emlékezzünk a

uláló jelet, a vivőjel frekvenciájának ismeretében. A fentiekben ezt a visszafele műveletet egy rádióvevő el tudja végezni, ami a rádióhullámból visszaállítja a közölni kívánt, hallható hangot. Ezt a visszafele műveletet demodulációnak nevezik.

A különböző modulációs technikák feladata elsősorban az, hogy a moduláló jelet egy nagyobb frekvenciatartományba transzformálja, ahol bizonyos szempontból, például a fizikai jelátvitel szempontjából kedvezőbbek a körülmények.

3.5.1. Amplitúdó-moduláció

A modulációk legklasszikusabb példája az amplitúdó-moduláció (AM). Alapelve és matematikai formája aránylag egyszerű. Tekintsünk egy $m(t)$ időfüggő moduláló jelet, melynek abszolút értéke kisebb mint 1. Az $u(t)_{\text{mod}}$ modulált jelet úgy kapjuk, hogy a moduláló jellel növeljük vagy csökkentjük egy f_v frekvenciájú harmonikus jel amplitúdóját:

$$u(t)_{\text{mod}} = (1 + m(t)) \sin(2\pi f_v t) \quad (3.18)$$

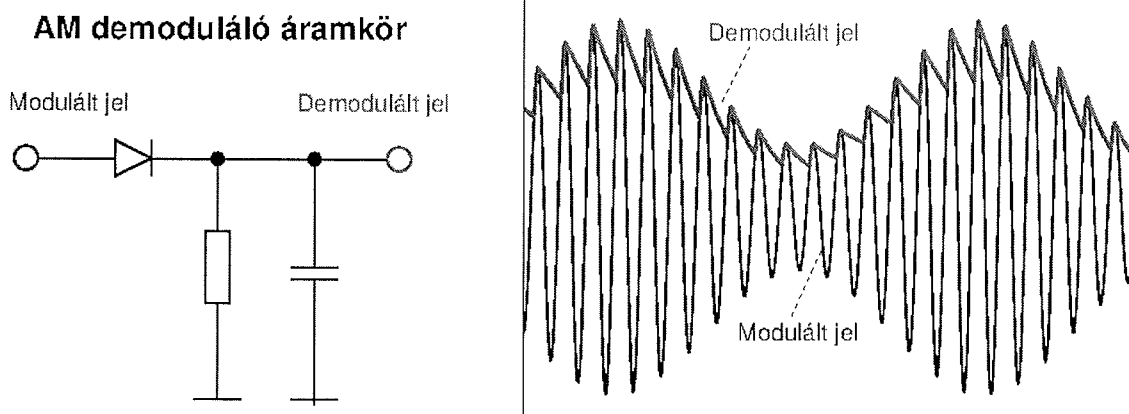
Láthatóan a vivőjel f_v frekvenciájú, ez utóbbit vivőfrekvenciának hívjuk. Feltételezzük, hogy az $m(t)$ moduláló jel tipikus változási sebessége jóval kisebb mint a vivőjel periódusideje, azaz mint $1/f_v$. Abban az esetben, ha a moduláló jel egy f_m frekvenciájú, M amplitúdójú szinuszfüggvény, a modulált jelet felbonthatjuk három harmonikus jel összegére:

$$u(t)_{\text{mod}} = (1 + M \sin(2\pi f_m t)) \sin(2\pi f_v t) = \dots \downarrow \quad (3.19)$$

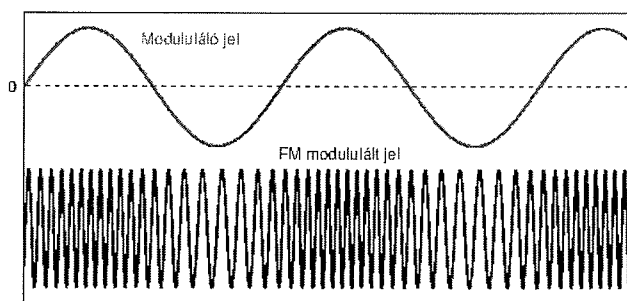
A 3.16 ábra mutatja az utóbbi esetben a moduláló és a modulált jel időbeli alakját. Ha a moduláló jel pozitív, az amplitúdó növekszik, ha negatív, akkor csökken. A fent említett feltétel, hogy $m(t)$ (vagy M) nem lehet nagyobb mint 1, szintén érthető az ábra alapján: a modulált jel amplitúdója pozitív kell, hogy maradjon.

A 3.19 egyenlet alapján levonhatunk egy fontos következtetést. Ha a moduláló jel egy adott frekvenciájú harmonikus függvény, akkor Fourier-transzformálja, azaz harmonikus összetétele, éppen azt az egyetlen frekvenciát tartalmazza. Az amplitúdó-moduláció után három komponenst fog tartalmazni: egyrészt az eredeti vivőfrekvenciát (ráadásul annak a legnagyobb az amplitúdója), másrészt a moduláló frekvencia értékével ennél lejjebb és feljebb egy-egy komponenst. Mindezeket a 3.16 ábra jobb oldalán láthatjuk. A modulált jel tehát csak nagyfrekvenciákat tartalmaz, ami valóban megoldja az eredetileg felvetett problémát. Konkrétan a két megjelenő frekvenciacsúcsot oldalsávnak nevezik, és jellemző, hogy ezek szimmetrikusan jelennek meg amplitúdómoduláció esetén.

Tegyük fel azt a kérdést, hogy mennyi helyet foglal el a modulált jel a frekvenciatartományban. Ha a moduláló jel legmagasabb frekvencia-komponense f_m , akkor a két oldalsáv egymástól való távolsága ennek duplája. Egy olyan szabályszerűség konkrét megvalósulását látjuk, mely szerint bármilyen moduláció esetén a modulált jel frekvenciatartománya tipikusan akkora (néhányszor nagyobb vagy kisebb), mint a moduláló jel



3.17. ábra. Amplitúdó-demodulációra alkalmas áramkör (balra), illetve ennek kimenetén megjelenő jel (jobbra), összehasonlítva a modulált jellel.



3.18. ábra. Frekvencia-moduláció módszere: a modulált jel (alul) frekvenciája változik a moduláló jeltől (felül) függően, amplitúdója változatlan (pontosabban: irreleváns, nem hordoz információt).

ben az amplitúdó értékét konstansnak rögzítjük: fontos hogy az amplitúdó változása valóban ne hordozzon információt. Ezután a jelfrekvencia mérése történik: legegyszerűbb egy rezgőkör meredek karakterisztikájának az oldalát használni a frekvenciaváltozás amplitúdóváltozássá alakítására, majd ezt az AM esetben látott demodulátorral az eredeti moduláló jellel alakítjuk. Az FM elsősorban amiatt elterjedt, mert a légköri eredetű amplitúdóváltozások nem torzítják az átvinni kívánt, hallható hangot. A műsorszórásban tipikusan 100MHz körüli rádiójelekkel érkezik az információ, a moduláció nagysága (tipikus frekvenciaváltozás) pedig 50kHz nagyságrendű. Az FM csatornák a középhullámú (amplitúdómodulált) rádiók 9kHz-es sávszélességű jeleinél jóval nagyobb sávszélességet igényelnek, cserébe a zavarvédettebb, nagyobb információtartalmú (HiFi, sztereo) jeleket tudunk átvinni.

A demoduláció során is a számsort kell „dekódolni” a lehető legnagyobb megbízhatósággal. Ezek a rendszerek szinte kivétel nélkül fázismodulációt alkalmaznak, sőt, általában a fázis- és amplitúdómoduláció optimális kombinációját. A demoduláció jellemzően bonyolult feladat, és megoldása azon múlik, hogy a vivőjel frekvenciája rendkívül stabil maradjon, hiszen az ehhez képesti jelfázist kell meghatározni. Cserébe a fázismoduláció nagyon érzéketlen a külső zajokra, torzításokra.