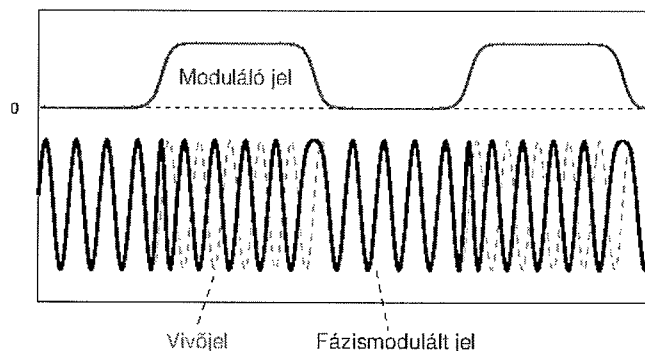


3.5.3. Fázis-moduláció

A frekvenciamoduláció közeli rokona a fázismoduláció. Itt a jel fázisa tolódik el a moduláló jel értékétől függően, ezt mutatja a 3.19 ábra. Matematikai formában a fázismodulált jel úgy adható meg, mintha a vivőfrekvenciás jelhez egy időfüggő $\Phi(t)$ fázist adnánk hozzá:

$$u(t)_{\text{mod}} = \sin(2\pi f_v t + \Phi(t)) \quad (3.20)$$

Fázismodulációról akkor beszélünk, ha a fáziseltérés éppen a moduláló jel értéke: $\Phi(t) = m(t)$. Egy közel négyszögjel alakú moduláló jele esetén a 3.19 ábra szemlélteti a fázismoduláció egy konkrét megvalósulását.



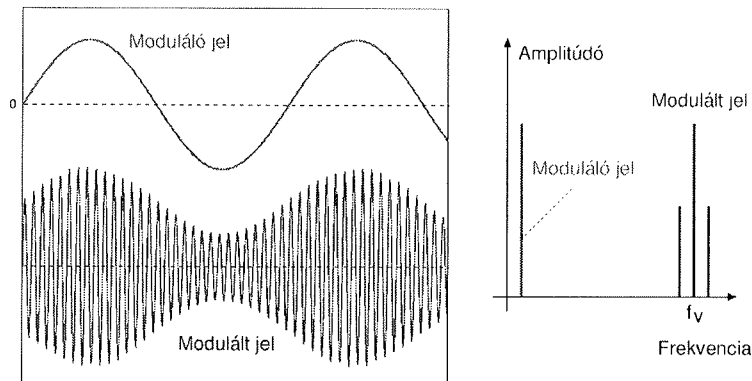
3.19. ábra. Fázismoduláció elve. A moduláló jel (felül) határozza meg a modulált jel fázisát (folytonos vonallal alul) a harmonikus vivőjelhez képest (szaggatott vonallal, alul).

A fázis- és frekvenciamoduláció nagyon közeli rokonságban vannak. A frekvenciamoduláció matematikai megfogalmazását is a fázismodulációból kiindulva érdemes felírni. Egy jel frekvenciáját az definiálja, hogy az adott időpillanat környékén milyen gyorsan változik a fázisa. Emiatt akkor fog egy kis konstanssal növekedni a modulált jelfrekvencia, ha $\Phi(t)$ értéke időben lineárisan növekszik, azaz a moduláló jel a $\Phi(t)$ idő szerinti deriváltjaként adódik:

$$m(t) = \frac{d\Phi(t)}{dt} \quad (3.21)$$

Ezt a $\Phi(t)$ -t, azaz az $m(t)$ moduláló jel idő szerinti integrálját kell visszahelyettesíteni a 3.20 egyenletbe, hogy a frekvenciamoduláció formális felírását megkapjuk. A fázis- és frekvenciamoduláció tehát ekvivalens: a modulált jel ugyanaz, ha a fázismodulációt az FM moduláló jel deriváltjával végezzük.

A modern adatátviteli rendszerek (WiFi, mobiltelefon, ADSL, stb) esetén egyik központi feladat olyan moduláló jel alkalmazása, ami nem más mint egy bináris számsor.



3.16. ábra. Amplitúdó-moduláció szinuszos moduláló jel esetén (bal oldalon). A moduláló és a modulált jel frekvenciaspektruma (jobb oldalon), a 3.19 egyenletnek megfelelően

tartománya. Amplitúdómodulációnál a kétszerese, de van olyan optimalizált moduláció is ahol jelentősen kisebb (ezért lehet telefonvonalon aránylag nagy adatátviteli sebességet elérni).

A moduláció célja minden esetben a moduláló jel tényleges átvitele, a visszaállításra ezért megoldást kell keresni. Ez a feladat, azaz a demoduláció AM esetén elég egyszerű, és például a 3.17 ábra szerinti kapcsolással lehet elérni. A dióda egyenirányítja a jelet, ami miatt a felső félhullámok mennek csak át az ellenállásra. A kondenzátorral a jel szűrését lehet megvalósítani.

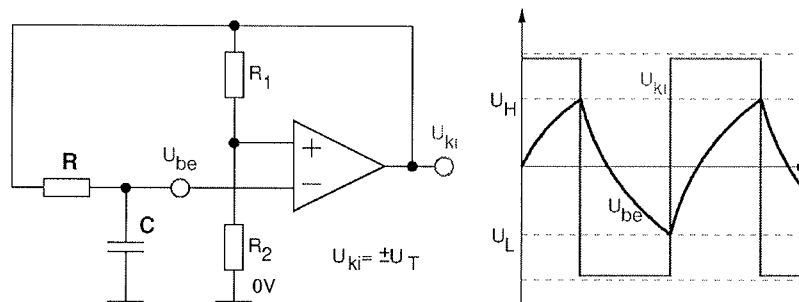
Az RC tag időállandójának reciproka (a felső határfrekvencia) jól láthatóan a moduláló jel és a vivő jel közé kell, hogy essen. Mindez hasonlít a ?? ábra szerinti, egyutas egyenirányítás esetére, illetve a brumm-szűrés megvalósítására. A 3.17 ábra jobb oldala mutatja a demoduláció után kapott jelet (amit tovább lehet simítani aluláteresztő szűrőfokozatokkal).

3.5.2. Frekvencia-moduláció

A frekvencia-moduláció (FM) a klasszikus modulációk másik típusa az AM mellett. Az FM jelenleg a domináns módja a kereskedelmi rádióhullámú műsorszórásnak, ami jobb hangminőségével kiszorította az AM-et.

A frekvenciamoduláció lényege, hogy a modulált jel frekvenciája változik, a vivőfrekvencia fölé vagy alá menve kicsivel, a moduláló jeltől függően. A módszert a 3.18 ábra illusztrálja. Fontos kiemelni, hogy a jel amplitúdója nem hordoz információt: ha növekszik vagy csökken a modulált jel amplitúdója széles határok között, a demodulált jel akkor sem változik.

A frekvenciamodulált (FM) jelek demodulációja általában nem egyszerű. Első lépés-



3.15. ábra. Schmitt-triggeres oszcillátor kapcsolás (bal oldalon), a kimeneti jel és a Schmitt-trigger U_{be} bemenetén mérhető jel alakja (jobb oldalon).

XXXX ábrára). Egy idő után C feszültsége, azaz a Schmitt-trigger bemenete eléri a felső billenési szintet. Ekkor a kimenet átbillen a negatív tápfeszültség közeli értékéig (3.10 ábra). Az R ellenálláson ekkor megfordul a feszültség, és ezzel együtt az áram iránya, a kondenzátor feszültsége pedig csökkenni kezd. Egy idő után elérjük az alsó billenési szintet. A Schmitt-trigger kimenete ismét váltani fog, ezúttal pozitívba. A folyamat ciklikusan zajlik, a legelső lépést kivéve egy konstans frekvenciájú négyszögjelet kapunk a kimeneten.

Az U_H és U_L billenési szinteket az R_1 és az R_2 ellenállások határozzák meg (l. XXXX fejezet). A billenési szinteket a műveleti erősítő U_+ bemenetének feszültség szintjének módosításával (pl. egy ellenálláson át egy külső feszültséggel) eltolhatjuk. Ennek hatására a 3.15 ábrán látható idődiagramm is módosul, a frekvencia a feszültséggel változik. Ez egy egyszerű példa egy feszültség vezérelt oszcillátorra (Voltage-controlled oscillator, VCO).

Ezt a fajta oszcillátortípust olyan rendszerekben használják előszeretettel, ahol a jel értéke csak rögzített értéket vehet fel: a Schmitt-trigger kimenete olyankor éppen úgy van beállítva, hogy a két rögzített (HI és LO) tartományba kerüljön periodikusan.

3.5. Moduláció és jelkódolás

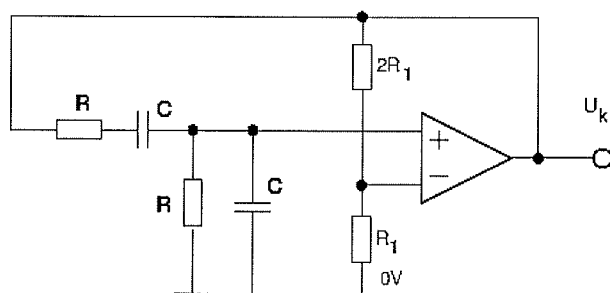
Modulációnak azt az elektronikai feladatot nevezzük, amikor egy lassan változó jel és egy harmonikus (szinuszos) nagy frekvenciájú jel kombinációjából állítunk elő egy olyat, ami valamilyen értelemben tartalmazza a lassabb jel által hordozott információt. Jó példa erre amikor emberi hang elektronikus jellé alakított változatát (ez tipikusan 20Hz-20kHz tartományban bármi lehet) egy nagyfrekvenciás, rádiójel által továbbítható jellé alakítjuk. Az információhordozó jelet moduláló jelnek nevezzük. A nagyfrekvenciás harmonikus jelet vivőjelnek, a kombinációképpen kapott eredményt pedig modulált jelnek fogjuk hívni.

A modulációnak akkor van értelme, ha a modulált jeltől vissza tudjuk állítani a mod-

- Ha $A\beta$ hurokerősítés éppen 1, a *pozitív visszacsatolásnak* olyan esetét kapjuk, amikor a 3.17 egyenlet nevezője végtelen. Ilyenkor a kimenet lehet véges érték külső bemenet nélkül. Egy ilyen kapcsolást, ami $U_{be} = 0$ mellett egy adott frekvenciájú jelet ad, oszcillátornak nevezünk. Ha a $A\beta$ 1-nél nagyobb, az áramkör általában nem egyértelműen jósolható viselkedést ad: a kimenet egyre növekszik, amíg eléri a tápfeszültség környékét, ahol általában a rendszer telítésbe megy, nemlineárisan viselkedik, és átvitele ezért már nem írható le egyszerűen az amplitúdó és a fázis frekvenciafüggésével.

3.4.2. Wien-hidas oszcillátor

A pozitív visszacsatolással megvalósított oszcillátoroknak tekintsük egy konkrét, gyakorlatban is használt megvalósítását. A fentiekben láttuk, hogy ha a $A\beta = 1$ feltétel teljesül, a rendszer oszcillátorként viselkedhet. Amennyiben (és ez a tipikus eset) egyetlen frekvencián teljesül a feltétel, a kimenet harmonikus (szinuszos jel) lesz. A Wien-féle szűrőkapcsolás (XXX ábra) átvitele a frekvencia függvényében egy határozott maximummal rendelkező (XXXX ábra), és ott éppen $1/3$ volt a ki- és bemenet aránya. Egy $A=3$ -as erősítővel éppen teljesíteni lehet az oszcilláció feltételét. A teljes áramkör a 3.13 ábrán látható. Egyértelmű ahogy a kimenet bejut egy Wien-kapcsolás bemenetére. Az áramkörnek külső bemenete nincs is, a Wien-kapcsolás kimenete egy 3-as erősítésű, műveleti erősítés nem-invertáló erősítőkapcsolására jut.



3.13. ábra. Wien-hidas oszcillátor. A kimenetet egy Wien-szűrő bemenetére kötjük, annak a kimenetét pedig egy háromszoros erősítésű nem-invertáló erősítőkapcsolásra.

Érdekes kérdés, hogy a kimenet éppen zérus, és a bemenet is zérus, miképpen lesz egy idő után jel a kapcsolás kimenetén, azaz hogyan indul be az oszcilláció. Ez érdekes matematikai problémákhoz is elvezet, melyek túlmutatnak jelen jegyzet keretein. Tegyük fel, hogy a $A\beta$ picit nagyobb mint 1. Ekkor akármilyen kis jel a kimeneten visszacsatolódva kicsit felerősödik: lassan, exponenciálisan felfut a jel amplitúdója. A zérus kimenő feszültség egy instabil egyensúlynak felel meg, ahonnan a rendszer valamilyen ütemben kibillen. Az amplitúdó növekedésének az szab gátat, hogy az áramkör a kimenetén

akkor a komparátor referenciafeszültségét zérusnak választhatjuk. A kimenet viszont a zaj miatt éles oszcillációkat tartalmaz. A 3.11 ábra jobb oldalán ugyanezt a bemenetet egy Schmitt-trigger áramkörre vezethetjük. Ha a jel (zajjal együtt) meghaladja a felső U_H billenési szintet, a kimenet vált, hasonlóan ha lefelé irányban a U_L alsó billenési szint alá megyünk. Addig viszont amíg a gyors oszcilláló zaj amplitúdója a két billenési szint különbségét nem éri el, a komparátornál tapasztalt gyors váltások nem láthatók a kimeneten: a Schmitt-trigger a bemeneti jelet regularizálta, egyértelmű alakúvá formálta. A Schmitt-trigger áramköröknek ez az egyik legalapvetőbb alkalmazási területe.

A hiszterézis jelensége nagyon sok egyéb területen előfordul, a biofizikától a közgazdaságtanig. Minden olyan jelenségnek sajátja, ahol a rendszernek valamilyen értelemben emlékezete, memóriája van. Klasszikus fizikai példa a ferromágneses anyagok mágnesezhetősége, de klimatikus és időjárásirányító folyamatokban is szerepe van: egy hóval borított területen a fényvisszaverés miatt alacsonyabb az elnyelés, azaz a hőmérséklet, ami tovább növeli a hó mennyiségét.

Másik ilyen példa az elektromos vízmelegítő (bojler): ennek hőszabályozója egy adott érték alatt kapcsol be, és egy adott (magasabb) hőmérséklet felett kapcsol ki. Ezáltal elkerülhetők a nagyszámú ki-bekapcsolásból eredő zavarok és a mechanikus (kétfajta fémből készült bimetall) kapcsoló tönkremenetele.

3.4. Oszcillátorok és visszacsatolások

Az eddig megismert áramköri kapcsolások jellemzően egy vagy több külső jeltől állítanak elő más (erősített, módosított) jelet. Az elektronikában az 1920-as évek óta használják a *visszacsatolást*, ez egyszerűen annyit jelent, hogy a kimeneti jelet valamilyen áramkörön keresztül visszavezetik a bemenetre. A visszacsatolások nem csak az elektronikában, de máshol is (pl. a kémia, biológia, társadalomtudomány, közgazdaság) fontos szerepet játszanak a rendszerek működésében.

Ha a kimenet növekedése a visszacsatoláson keresztül csökkenti a kimenetet, akkor *negatív visszacsatolásról* beszélünk. Mint látni fogjuk, ez stabilizálja, javítja az áramkör tulajdonságait.

Vannak emellett olyan áramkörök is, amelyek önmagukban jelet keltenek: ilyenek például a fix frekvenciájú váltakozó feszültséget keltő oszcillátorok. Jelen alfejezetben áttekintjük az oszcillátorok elvi felépítését illetve konkrét megvalósításait is.

3.4.1. Visszacsatolás hatása az átvitelre

Induljunk ki egy fix A erősítésű áramkörből (például 3.5 ábrán bemutatott a nem-invertáló erősítőtől). Ennek jelét csatoljuk vissza a bemenetre: ez jelentse azt, hogy a kimenet és egy külső bemenet összegét kötjük az erősítő bemenetére. A helyzet legyen annyiban általánosabb, hogy a kimenetet egy frekvenciafüggő lineáris kapcsoláson vezessük

indul. Ekkor, tekintve hogy pozitív a visszacsatolás, a nem-invertáló bemenet is pozitív irányba mozdul. Ez, a 3.1 egyenletnek megfelelően nagyon erősen pozitív irányba indítja a kimenetet, ami tovább növeli pozitív irányba a bemenetek különbségét – a bevezetőben említett effektust látjuk tehát konkrétan. A kimenet növekedésének csak a maximális (vagy minimális) kiadható feszültség, a $\pm U_T$ tápfeszültség szab határt.

Próbáljuk most megérteni hogy a 3.10 ábra kapcsolása hogyan viselkedik. Adjunk először a bemenetre egy igen jelentős negatív feszültséget. A kimenet emiatt biztosan a pozitív tápfeszültséget veszi fel: $U_{ki} = U_T$. A nem-invertáló bemenetre a feszültségosztó formula szerint $U_+ = R_2/(R_1 + R_2)U_T$ jut, egy véges pozitív érték.

- (a) Kezdjük most növelni a $U_{be} = U_-$ bemenő feszültséget. Egészen addig amíg ez kisebb mint az U_+ értéke, a kimenet marad a pozitív tápfeszültség környékén.
- (b) Amint viszont U_- eléri U_+ -t, a pozitív visszacsatolás miatt nagyon gyorsan leesik a kimenet a negatív tápfeszültség értékéig. Ezzel egyidőben a nem-invertáló bemenet feszültsége $U_+ = -R_2/(R_1 + R_2)U_T$ lesz a feszültségosztó formula szerint, ami egy véges negatív érték. A kimenet negatív marad mindaddig amíg a bemenet értéke magas.
- (c) Kezdjük most csökkenteni a bemenetet. A nem-invertáló bemenet értéke negatív, emiatt ameddig a bemenettel nem érjük el ezt a negatív értéket, a kimenet is fixen negatív marad.
- (d) Amint elérjük lefelé menet az U_+ -t, a kimenet pozitív irányba billen, és U_+ értéke is pozitív lesz.

A fenti szakaszokat (a,b,c,d) a 3.10 ábra jobb oldalán követhetjük, ahol a kimenet értéke a bemenet függvényében van ábrázolva. Az összefüggés azért bonyolult, mert a kimenet függ attól, hogy milyen irányban követjük végig a görbét (ezt a nyilak is mutatják). Van egy olyan tartomány közepén, ahol a kimenet (egy adott bemenet mellett!) kétféle lehet. Gyakorlatilag a rendszer emlékszik arra, hogy a bemenet fentről vagy letről érkezett a középső tartományba.

Azon a tartományon, ahol a bemenet felülről vagy alulról eléri az aktuális nem-invertáló bemenet értéket, a függvény igen gyorsan változik. Egy instabil egyensúlyból kibillenő rendszer analógiájára ezeket a feszültség szinteket *billenési szinteknek* nevezzük. Értékük a fentiekben már látható volt. A felső U_H billenési szint értéke:

$$U_H = R_2/(R_1 + R_2)U_T \quad (3.14)$$

az alsó U_L billenési szint értéke pedig

$$U_L = -R_2/(R_1 + R_2)U_T \quad (3.15)$$

méréssel meghatározandók, ismertek. Konkrétan a teljesül, hogy $U_{be} = U_F$ illetve $U_{ki} = U_G$, ugyanis az invertáló bemenet virtuális földpont. Követve a fentiekben már többször járt utat, adódik, hogy:

$$I = -f(U_{be}) = g(U_{ki}) \quad (3.9)$$

Ha ebből kifejezzük U_{ki} -t, akkor a g függvény g^{-1} -gyel jelölt inverze jelenik meg:

$$U_{ki} = g^{-1}(f(U_{be})) \quad (3.10)$$

A kimenet két ismert függvény egymásbaágyazásával (sőt, az egyik inverzét használva) adódik. Tekintsünk két példát ennek a gyakorlati alkalmazására. Egy dióda esetén egy 0,6V körüli néhány tíz millivoltos, erősen típusfüggő tartományban teljesül, hogy az áram a feszültséggel exponenciálisan növekszik:

$$I \approx I_0 e^{U/U_0} \quad (3.11)$$

(1. XXXX egyenlet, itt I_0 és U_0 az eszköz paraméterei). Kössünk az F alkatrész helyére egy ilyen diódát, a G alkatrész pedig legyen egy R ellenállás, a 3.9 ábra középső kapcsolása szerint. Ekkor g az Ohm-törvényt fogalmazza meg: $I = g(U) = U/R$, f pedig épp a 3.11 egyenletnek felel meg. A 3.10 egyenlet alapján a kimenet a bemenet exponenciális függvényeként adódik:

$$U_{ki} = -RI_0 e^{U_{be}/U_0} \quad (3.12)$$

Ha most a diódát a G alkatrész helyére rakjuk, F helyére pedig az R értékű ellenállást a 3.9 ábra jobb oldala szerint, akkor f lesz az Ohm-törvény megfelelője, g pedig az exponenciális függvény. Az inverzképzés miatt a kimenet ekkor a bemenet logaritmusával lesz arányos:

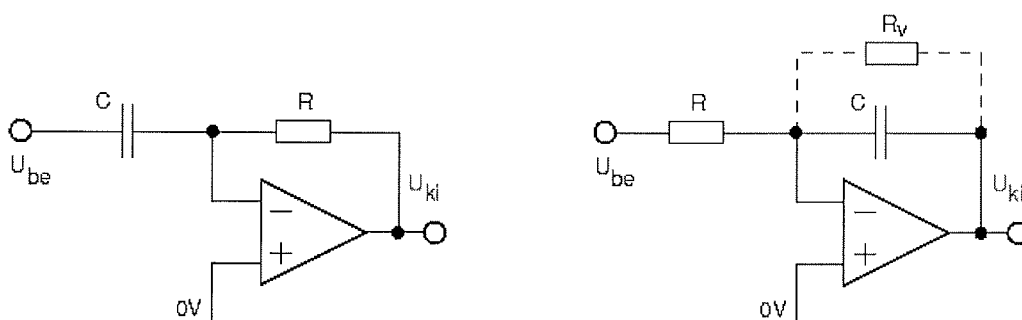
$$U_{ki} = -U_0 \ln \left(\frac{U_{be}}{I_0 R} \right) \quad (3.13)$$

Ha egy feszültségérték logaritmusát és exponenciális függvényét elő tudjuk állítani, akkor ilyenek és számmal való szorzás egymásutánjából tetszőleges valós kitevős hatványt is megadhatunk.

A fenti fejezetben tárgyalt kapcsolásokkal szinte tetszőleges művelet elvégezhetünk precíz módon, időben változó feszültségzintekkel. Az alkalmazások köre igen széles. Képzeljük el, hogy egy adott feszültség akárhanyad rendű deriváltjait meghatározzuk, és ezek lineárkombinációját vagy tetszőleges függvényét képezzük – majd ezt az értéket a rendszer bemenetére visszakötjük. Ez nem jelent mást, mint egy (akár magasabb rendű, nemlineáris) differenciálegyenlet elektronikus megoldását. Valóban használtak ilyen eszközöket, ebben a klasszikus formában leginkább a múlt század 40-es és 60-as

3.2.5. Differenciáló és integráló áramkör

Az invertáló és nem-invertáló erősítőkapcsolások esetén a kimenet mindig szigorúan arányos volt a bemenettel, minden időpillanatban. A műveleti erősítők negatív visszacsatolása esetén nem csak ellenállásokat használhatunk az áramkörben, hanem kondenzátort (ritkább esetben tekercset) is. Ez a lehetőség igen érdekes, nem triviális időfüggésű kapcsolatot teremthet a ki- és bemenet között. Tekintsük a két alapesetet a 3.8 ábrán. A kapcsolások az invertáló erősítőkapcsolásra emlékeztetnek, de a visszacsatoló vagy bemeneti ágba egy kondenzátort raktunk most. Kövessük ismét a 3.4 egyenlethez vezető gondolatmenetet, először a bal oldali kapcsolásra.



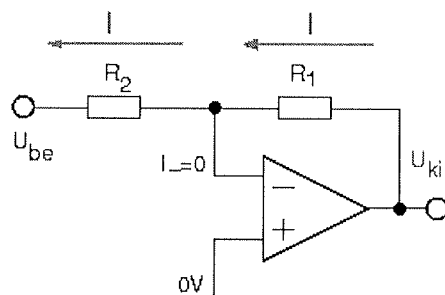
3.8. ábra. Differenciáló (balra) és integráló (jobbra) kapcsolás, ami a bemenet időbeli deriválását illetve nagy pontosságú integrálását oldja meg.

A kondenzátoron és az ellenálláson ugyanakkora áram folyik (M2 szabály). Mivel az invertáló bemenet virtuális földpont, a kondenzátoron éppen a bemenő feszültség esik, az ellenálláson pedig éppen a kimenő. Az ellenállásra az Ohm-törvényt írhatjuk fel: $U_{ki} = IR$, a kondenzátorra pedig a megfelelő differenciálegyenletet (a $Q = CU$ analógiájára), figyelembe véve hogy az áramirány ismét ellentétes a feszültséggel: $-I = C(dU_{be}/dt)$. Ezekből következik, hogy:

$$U_{ki} = -RC \frac{dU_{be}}{dt} \quad (3.6)$$

Azt kaptuk tehát, hogy a kimenet éppen a bemenet idő szerinti deriváltjával arányos (egy negatív konstans erejéig). Ha visszaemlékszünk a XXXX fejezet gondolatmenetére, látható hogy ezúttal a differenciálás mint lineáris művelet igen nagy pontossággal megvalósítható, és nem csak mint közelítés ahogy a kvázi-differenciáló szűrő (felüláteresztő szűrő) esetén volt. A 3.8 ábra szerinti bal oldali kapcsolásra igaz az, hogy a kimenő feszültség amplitúdója jelentősen nagyobb lehet, mint a bemeneté: ezt nyerjük a műveleti erősítő alkalmazásával.

A 3.8 ábra jobb oldalán olyan áramkört látunk, ahol a kondenzátort és az ellenállást felcseréljük. A differenciáló áramkörhöz nagyon hasonló gondolatmenettel jutunk a ki-



3.6. ábra. Invertáló erősítőkapcsolás. A nem-invertáló bemenet virtuális földpontként szerepel, mert az M1 szabály szerint épp akkora kell legyen, mint a zérusra kötött nem-invertáló bemenet. A két ellenálláson egyforma nagyságú I áram folyik, mert az invertáló bemeneten nem folyik áram ($I_- = 0$). A rajz egyszerűsítése miatt felül van az invertáló (-), alul a nem-invertáló (+) bemenet.

Másik furcsaság, hogy a műveleti erősítő nem-invertáló bemenete fixen zérus feszültségre van kötve.

Határozzuk meg a ki- és bemenő feszültség között a kapcsolatot. Az M1 szabály alapján $U_+ = U_-$, és mivel az előbbi éppen zérus, az utóbbi is zérus feszültségen van. Az M2 szabály alapján az invertáló bemeneten nem folyik áram, emiatt az R_1 és R_2 ellenállásokon (egy csomópontban vannak) azonos I nagyságú áram folyik. Az R_1 ellenállásra, amelyen éppen U_{ki} feszültség esik, alkalmazhatjuk az Ohm-törvényt: $U_{ki} = IR_1$. Az Ohm-törvényt alkalmazhatjuk az R_2 ellenállásra is: $U_{be} = -IR_2$, ahol figyelembe vesszük, hogy az áram iránya ellentétes értelmű mint a feszültségé. Fontos még egyszer kiemelni, hogy az Ohm-törvény utóbbi két konkrét, igen egyszerű azon múlt, hogy az ellenállások invertáló bemenethez kötött pontja éppen zérus feszültségen van. Az egyenletekből kifejezhetjük a keresett kapcsolatot U_{ki} és U_{be} között:

$$U_{ki} = -\frac{R_2}{R_1}U_{be} \quad (3.4)$$

A kimenet tehát egy nagy pontossággal, R_1 és R_2 által adott számaránynak megfelelően negatív számszorosa a bemenetnek. Az ellentétére fordítás, idegen szóval invertálás kifejezés miatt kapta a kapcsolás az invertáló erősítő nevet.

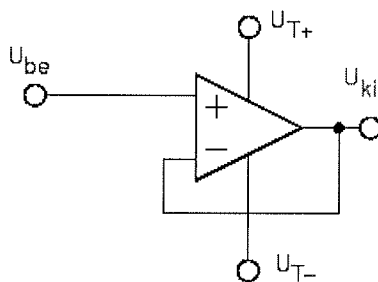
Az invertáló erősítő 3.6 szerinti formájában a (negatív) erősítés tetszőleges lehet, akár egynél kisebb abszolút értékű is. A kapcsolás bemenő ellenállása pontosan R_2 , azaz nem kifejezetten nagy. Ha a bemenő ellenállást nagyon nagyra szeretnénk választani, akkor a 3.4 ábra szerinti egységnyi erősítésű kapcsolással ki kell egészíteni a bemenő oldalt.

A kapcsolás érdekessége volt, hogy az invertáló bemenet éppen zérus feszültségre kényszerítődött (bár nem volt fizikailag odakötve), és ezt nagyban ki is használtuk. A kapcsoláson első ránézésre nem is látszik, hogy az áramkör tulajdonságai miatt ennek így

pozitív, akár negatív irányban), akkor annál tovább a kimenet nem megy, a két bemenet között pedig jelentős feszültségkülönbség jelenik meg. Ezen kivétel világosan következik a 3.1 ábra jobb oldalán mutatott karakterisztika alapján. A negatív visszacsatolás tárgyalása során feltételezzük hogy nem megyünk olyan szélsőséges tartományba a bemenetekkel, hogy ezen kivétel elrontsa az M1 szabályt.

3.2.2. Nem-invertáló erősítőkapcsolás

Tekintsük a negatív visszacsatolás legegyszerűbb példáját, melyet a 3.4 ábra mutat. Itt egyetlen vezetékkel kössük vissza a kimenetet az invertáló bemenetre: $U_{ki} = U_+$. Az M1 szabályt alkalmazhatjuk, ami alapján $U_+ = U_-$. De az áramkör tényleges bemenete éppen a nem-invertáló bemenetre van kötve: $U_{be} = U_+$. Mindebből következik, hogy $U_{ki} = U_{be}$, az áramkör kimenetén pontosan a bemenő feszültség jelenik meg. Az áramkör tehát egy egységnyi erősítésű rendszer. A XXXX fejezetben már láttunk hasonlót, és ott ki is elemeztük, hogy mi értelme van egységnyi erősítésű rendszert készíteni: a 3.4 kapcsolás bemeneti ellenállása végtelen (hiszen az M2 szabály szerint a bemeneten zérus áram folyik!), a kimeneti ellenállása pedig közel zérus (hiszen jelentős áramot vehetünk ki az eszközből anélkül hogy a kimenet bármit is változna). A XXXX ábra szerinti emitterkövető kapcsoláshoz képest fontos különbség, hogy az U_{ki}/U_{be} arány rendkívül közel van 1-hez, tipikusan 4-5 jegyig megközelíti azt – ezt a precizitást nyertük tehát azzal, hogy az egyetlen tranzisztorhoz képest a sokkal összetettebb műveleti erősítőt használjuk.



3.4. ábra. Egységnyi erősítésű műveleti erősítő kapcsolás. A kimenet mindig pontosan követi a bemenetet, a bemeneti ellenállás nagyon nagy.

Alakítsuk ki most a 3.5 ábra szerinti kapcsolást. Ha megfigyeljük itt is az invertáló bemenet irányába csatoljuk vissza a kimenetet, de ezúttal az R_1 és R_2 ellenállások alkotta osztón keresztül. A bemenő feszültséget most is a nem-invertáló bemenetre kötjük: $U_{be} = U_+$. Az invertáló bemeneten nem folyik áram (M2 szabály), ezért alkalmazhatjuk a potenciométer-formulát az U_{ki} és az U_- kapcsolatára:

kezdve az A erősítés jelentősen csökkenni kezd hasonlóan egy aluláteresztő szűrőhöz. Ez nem csak a váltakozó jelek esetén érdekes: a felső határfrekvencia és a kimenő jel lehetséges leggyorsabb felfutása szoros (közelítőleg reciprok) kapcsolatban vannak, ez fontos lehet a gyors kapcsolásoknál.

- fontos a műveleti erősítőtől kivehető maximális áram ill. feszültség, bizonyos erősítők jelentős terhelést is meg tudnak hajtani. Megfelelő külső elemekkel (pl. FET, tranzisztor) és ügyes áramköri elrendezéssel egy egyszerű műveleti erősítő is jelentős teljesítményt tud szabályozni.
- a 3.2 ábra a bemenő áramkör egy differenciálerősítő tranzisztor-kapcsolást, ami a gyártás során sohasem állítható elő tökéletesen szimmetrikusan. Ennek eredménye, hogy 0 bemenő feszültségnél is van egy kicsit (néhány 10 mV-os) feszültség a kimeneten (holott 0-nak kellene lennie!). Ezt az ún. *offset feszültséget* az IC-k egy részénél egy külső potenciométer bekötésével és beállításával csökkenteni lehet a μV tartományba

3.1.2. A műveleti erősítő mint komparátor

A műveleti erősítőt a legegyszerűbb módon az 3.3 ábra szerinti áramkörben alkalmazhatjuk. Itt az egyik bemenetre (legyen ez az invertáló, U_-) adjunk konstans U_0 feszültséget (az R_1 és R_2 ellenállásokból mint feszültségosztóból képezve), a másik bemenetre (legyen most a nem-invertáló, U_+) pedig egy időben változó U_{be} jelet. A 3.1 karakterisztika alapján látható, hogy amíg az $U_{be} = U_+$ bemenet értéke magasabb mint U_0 , addig a kimenet a pozitív tápfeszültség közelében van, ha ez alatti, akkor a negatív tápfeszültségnek felel meg. A kimenet a két szélső érték között gyorsan vált. Tekintve hogy a bemenő jelet összehasonlítjuk, azaz komparáljuk a konstans U_0 -lal, az eszköz neve, mint elektronikai kapcsolat, a komparátor.

Komparátornak elvileg bármilyen műveleti erősítő használható, mégis vannak erre tervezett, optimális működésű eszközök.

3.2. Negatív visszacsatolás

A műveleti erősítőket legtöbbször olyan áramkörben helyezük el, ahol – a komparátorral szemben – a kimenetet valamilyen módon visszakötjük a bemenetre. Ez a lehetőség teszi nagyon szélessé az alkalmazások körét. Ha a kimenetet valamilyen módon az invertáló bemenetre kötjük vissza, akkor ezt a műveleti erősítővel kapcsolatos értelemben negatív visszacsatolásnak nevezzük. Tegyük fel hogy a kimenet megnövekszik: a visszacsatolás miatt az invertáló bemenet feszültsége is megnövekszik, ami negatív irányba viszi a bemenetek közti különbséget. A kimenet emiatt a 3.1 egyenlet alapján csökken, azaz

3.1.1. Műveleti erősítők felépítése

A műveleti erősítőnek (angolul operational amplifier, op-amp) két bemenete van, ezeket jelöljük U_+ -szal és U_- -szal. Az eszköz egyetlen U_{ki} kimenettel rendelkezik. Tekintve hogy összetett alkatrészből van szó, ezért külső tápfeszültséget (energiaforrást) igényel, jellemzően néhány V-os pozitív és negatív (leggyakrabban szimmetrikus) értéket, ezeket U_{T+} -nak és U_{T-} -nek fogjuk jelölni. Az eszköz rajzjele a 3.1 ábrán látható bal oldalt. Az áramköri rajzokban a tápfeszültség kivezetéseket általában nem jelöljük (bár fizikailag mindig ott vannak). Fontos még, hogy a bemenetek meg vannak jelölve a háromszögön belül írt + és - jelekkel is, ez azonosítja egyértelműen U_+ -t és U_- -t.

A kimenet a bemenetek értékétől a következőképpen függ igen jó közelítéssel:

$$U_{ki} = A(U_+ - U_-) \quad (3.1)$$

A kimenet tehát a bemenő feszültségek különbségétől függ. A műveleti erősítő ilyen értelemben differenciálerősítő, a bemenetek értéke külön-külön nem határozza meg a kimenet értékét.

Az A erősítés értéke jellemzően igen nagy, tipikusan tízezer és egymillió között (10^4 - 10^6). Gyakorlati szempontból az erősítés olyan nagy, hogy végtelennek tekinthető. Ez az oka a bevezetőben említett egyszerű működésnek, hiszen bár sokféle tényleges megvalósítása van a műveleti erősítőknek, a funkció mindig a fenti séma szerinti.

A 3.1 egyenlet természetesen nem lehet tetszőleges tartományban igaz, hiszen az eszköz fizikailag nem tud a tápfeszültségek tartományán kívül eső feszültséget kiadni magából. A bemenetek függvényében a kimenetet egy tipikus esetben a 3.1 ábra jobb oldalán láthatjuk. Valóban egy nagy meredekségű, egyenes szakaszt kapunk az $U_+ - U_- \approx 0$ környékén (látható hogy a vízszintes skála mikrovoltos nagyságrendű!), de a kimenetet a tápfeszültségek értéke lehatárolja.

A fenti elveket követő műveleti erősítők a 70-es években terjedtek el és váltak domináns elemeivé az időben folytonosan változó precíziós feszültségzintekkel dolgozó eszközöknek. Az egyik legnépszerűbb típus, a $\mu A741$ -es tényleges kapcsolási rajza látható a 3.2 ábrán bal oldalt. Felismerhetjük rajta a két bemenet szempontjából (+IN és -IN) kialakuló differenciálerősítő tranzisztor-kapcsolást, ami a XXXX ábra optimalizált verziója. Tekintve hogy egy megfelelő szakterületen kívüli elektromérnök is könnyen zavarba jöhet a közel két tucat tranzisztor aránylag bonyolult rendszerétől, az ábra egyetlen fontos üzenete az, hogy ezzel a fenti, 3.1 egyenlettel leírt funkció ténylegesen megvalósul. Az eszköz egy példányának fényképe is látható a 3.2 ábrán jobb oldalt, az áramköri tok egyes kivezetései megfeleltethetők a be- és kimeneteknek. Az eszköz néhány tíz forintos áron beszerezhető elektronikai boltokban.

A műveleti erősítők U_+ és U_- bemenetei egységes nevet kaptak. A 3.1 egyenletben nagyon fontos hogy az U_- negatív előjellel szerepel, azaz ha növekszik, akkor az U_{ki} kimenet csökken. Ezt nevezzük az invertáló bemenetnek. A másik bemenet előjele pozitív, tehát a másikkal ellentétes – jobb híján a nem-invertáló bemenet nevet kapta.

2. fejezet

Félvezetők

Tartalomjegyzék

1. Elektronikai alapfogalmak	2
2. Félvezetők	3
3. Műveleti erősítők és visszacsatolások	4
3.1. Műveleti erősítők tulajdonságai	4
3.1.1. Műveleti erősítők felépítése	5
3.1.2. A műveleti erősítő mint komparátor	7
3.2. Negatív visszacsatolás	7
3.2.1. Az ideális műveleti erősítő kapcsolások szabályai	8
3.2.2. Nem-invertáló erősítőkapcsolás	9
3.2.3. Invertáló erősítőkapcsolás	10
3.2.4. Összeadó áramkör	12
3.2.5. Differenciáló és integráló áramkör	13
3.2.6. Nem-lineáris átviteli karakterisztikák megvalósítása	14
3.3. Pozitív visszacsatolás	16
3.3.1. A Schmitt-trigger kapcsolás	16
3.3.2. A hiszterézis szerepe elektronikai rendszerekben	18
3.4. Oszcillátorok és visszacsatolások	19
3.4.1. Visszacsatolás hatása az átvitelre	19
3.4.2. Wien-hidas oszcillátor	21
3.4.3. Schmitt-triggeres oszcillátor	22
3.5. Moduláció és jelkódolás	23
3.5.1. Amplitúdó-moduláció	24
3.5.2. Frekvencia-moduláció	25
3.5.3. Fázis-moduláció	27