

JÓZSEF ATTILA TUDOMÁNYEGYETEM  
TERMÉSZETTUDOMÁNYI KAR  
S Z E G E D

## Az analóg számítástechnika alapjai

Készítette: Bóla Attila  
fizika szakos hallgató

Témavezető: PhD. Dr. Gingl Zoltán  
adjunktus

1997

## 1. Tartalomjegyzék

1. Tartalomjegyzék.....	2
2. Bevezetés.....	4
3. Az analóg számítógép általános ismertetése.....	6
3.1 Az analóg számítógép alapelve.....	6
3.2 Az analóg számítógép felépítése.....	6
3.3 Eredményrögzítés.....	7
4. A műveleti erősítő.....	9
4.1 A műveleti erősítő tulajdonságai.....	9
4.2 Fázist nem fordító erősítő.....	13
4.3 Fázisfordító erősítő.....	15
5. Lineáris műveleti egységek.....	17
5.1 Állandóval való szorzás.....	17
5.2 Összegző áramkör.....	19
5.3 Kivonó áramkör.....	20
5.4 Differenciáló áramkör.....	25
5.5 Integráló áramkör.....	27
6. Nemlineáris műveleti egységek.....	33
6.1 Függvénygenerátorok.....	33
6.1.1 Logaritmáló egység.....	33
6.1.2 Exponenciális függvénygenerátor.....	36
6.1.3 Logaritmikus és exponenciális függvénygenerátorokkal megvalósítható további függvénygenerátorok.....	36
6.1.4 Szinusz- és koszinuszfüggvény-generátor.....	39
6.1.5 Változtatható függvénygenerátor.....	44
6.2 Analóg szorzók.....	47
6.2.1 Az analóg szorzó áramkör.....	47
6.2.2 Analóg szorzót használó műveleti egységek.....	49
6.3 Egyéb speciális nemlinearitások.....	51
6.3.1 Komparátorok.....	51

6.3.2 Előjel függvény.....	52
6.3.3 Abszolút érték .....	53
7. Gyakorlati alkalmazás.....	54
7.1 Közönséges egyenletek megoldása.....	55
7.2 Differenciálegyenletek megoldása .....	57
8. Analóg számítógép építése .....	60
8.1 A cél .....	60
8.2 Az egységek ismertetése .....	60
8.2.1 Tápegység .....	61
8.2.2 Órajel-generátor .....	61
8.2.3 Állandóval való szorzás .....	63
8.2.4 Összeadás, kivonás .....	63
8.2.5 Integrátorok .....	63
8.2.6 Szorzás, négyzetre emelés, osztás, négyzetgyök vonás .....	64
8.2.7 Egyebek .....	65
9. Irodalomjegyzék .....	66
10. Köszönetnyilvánítás.....	67
11. Függelék .....	68
11.1 Kapcsolási rajzok.....	68
11.2 Alkatrészlista .....	76

## 2. Bevezetés

A legtöbb fizikai probléma visszavezethető matematikai egyenletek megoldására, miközben eltekinthetünk a mennyiségek konkrét fizikai tartalmától. A számítások során alapvetően kétfajta módon reprezentálhatjuk az adott matematikai mennyiségeket.

Az egyik módszer szerint a matematikai mennyiségeket számjegyek (digit) segítségével fejezzük ki, a velük való műveleteknek ekkor számokkal végzett aritmetikai műveletek felelnek meg. Az ilyen elven működő számítógépeket *digitális számítógépeknek* nevezzük. Fontos tulajdonságuk, hogy csak diszkrét (nem folytonos) mennyiségekkel dolgoznak. Ebbe a csoportba tartoznak a kézi számológépek és az összetettebb hétköznapi értelemben vett számítógépek (pl. a személyi számítógép, a PC) is.

A másik módszer szerint a matematikai mennyiségeknek bizonyos fizikai mennyiségeket feleltetünk meg. Ilyen mennyiség lehet pl. hosszúság, szög, de elektromos feszültség is. Ezután választunk egy fizikai modellt, melyben a megfeleltetett fizikai mennyiségek ugyanolyan szabályok szerint transzformálódnak, mint a hozzájuk tartozó matematikai mennyiségek, és a megfigyeléseket ezen a fizikai modellen végezzük. Az ilyen elven működő számítógépeket *analóg számítógépeknek* nevezzük. Egyik legfontosabb tulajdonságuk, hogy a feldolgozott mennyiségek bizonyos tartományokban folyamatosan változhatnak, ezért nevezhetnénk e gépeket folytonos műveletű számítógépeknek is. Ilyen például a logarléc, melyen a matematikai mennyiségek szorzatának (azaz logaritmusuk összegének) hosszúságok összege felel meg.

Célomul az elektromos analógiákra épülő analóg számítógépek ismertetését tűztem ki. Ezekben a matematikai mennyiségeknek legtöbbször elektromos feszültséget feleltetünk meg. Dolgozatomban vázolni kívánom az analóg számítógépek működési elveit, részletezni szeretném a modern elektronikai eszközök segítségével megvalósítható műveleti egységeket, ki szeretnék térni ezen készülékek gyakorlati alkalmazásának szempontjaira: arra, hogy hogyan lehet a segítségükkel egyes fizikai és matematikai problémákat megoldani. Ezen kívül szeretnék egy

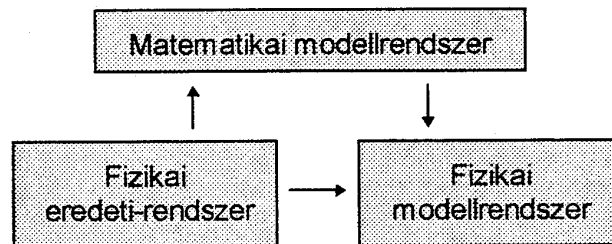
olyan elektromos analóg számítógépet tervezni, melynek segítségével akár egyszerűbb fizikai tárgyú differenciálegyenletek is megoldhatók.

Az elektronika című tantárgy anyagához kapcsolódva munkámban szeretnék áttekintést adni az analóg számítástechnika alapjairól, jegyzetszerűen össze kívánom foglalni a témakörbe tartozó alapismereteket. Egy általam tervezett egyszerű analóg számítógép komplett kapcsolási rajzaival pedig szerény mértékben hozzá szeretnék járulni ahhoz, hogy a jövőben a fizikus és fizika szakos hallgatók laboratóriumi mérésgyakorlataik során megismerkedhessenek az analóg számítógéppel.

### 3. Az analóg számítógép általános ismertetése

#### 3.1 Az analóg számítógép alapelve

Az analóg rendszer fogalmát vázlatosan 1. ábra segítségével mutatjuk be. Adott egy tetszőleges jellegű (mechanikai, kvantummechanikai, termodinamikai, stb.) fizikai eredeti-rendszer. Egy ilyen rendszer általában leírható a differenciálegyenletével. Ez a differenciálegyenlet a fizikai eredeti-rendszer matematikai absztrakciója. Ilyen egyenlet segítségével írjuk le a rendszeren belül az összefüggést az ok és az okozat között. Az eredeti-rendszer sok esetben leképezhető valamilyen más fizikai struktúrába. Ezzel fizikai modellrendszert kapunk, melyet gyakran egyszerűbb megérteni. Az eredeti- és modellrendszer akkor analóg, ha matematikai leírásuk ugyanolyan típusú differenciálegyenletre vezet. A két rendszer ekvivalenciája csak akkor áll fenn, ha mindkét rendszer azonos viselkedésű. A modellrendszer tehát egyet jelent az eredeti-rendszer funkcionális leképezésével. A differenciálegyenlet az absztrakt híd az eredeti-rendszer és modellrendszer között.



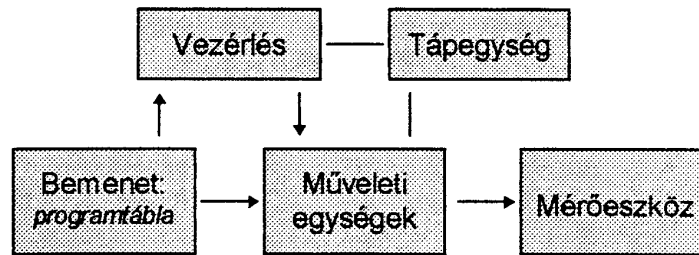
1. ábra

Az analóg számítógép műveleti egységek készleteiből áll. A fizikai eredeti-rendszer differenciálegyenletéből kiindulva, a rendelkezésre álló műveleti egységek megfelelő kombinációjával épül fel a fizikai modellrendszer.

#### 3.2 Az analóg számítógép felépítése

Az analóg számítógép (éppúgy, mint digitális társa) információ-feldolgozó rendszer. Az analóg számítógép az információt analóg jelek alapján dolgozza fel. Az információ-feldolgozó rendszer felépítését a megoldandó konkrét feladathoz kell illeszteni. Ezt a programtáblán a műveleti egységek értelemszerű, a feladatnak

megfelelő kombinálásával végezzük el.



2. ábra

A programot tehát (ami szerint számolni kell) a programtábla révén manuálisan közöljük a számítógéppel. Ez a programtábla (dugaszoló mező) a digitális számítógép beviteli szerveivel hasonlítható össze (2. ábra).

Alkalmos berendezésekkel az információ-feldolgozás menete bizonyos mértékig vezérelhető. A számítást például egyes esetekben (oszilloszkópos kijelzésnél) ciklikusan meg kell ismételtetni. Gondoskodni kell az egyes számítási részleteknek egy időben történő indításáról, vagy éppen arról, hogy egymáshoz képest meghatározott idő elteltével induljanak. A későbbiekben részletesen tárgyalt műveleti egységek közül az integrátorokat például adott időpontokban át kell kapcsolni a különböző üzemmódok között. Ilyen, és ehhez hasonló feladatok automatikus ellátásához van szükség a vezérlő egységre, amely a célszerűség érdekében természetesen digitális áramköröket is tartalmazhat.

Az információ feldolgozása után (pl. egy differenciálegyenlet megoldása után) az eredményt megfelelő kimeneti egységek révén kapjuk meg. Az eredmények rögzítését a későbbiekben még részletesen tárgyaljuk.

A teljes számítási kapcsoláshoz természetesen feszültségellátás is szükséges, melyet a tápegység biztosít.

### 3.3 Eredményrögzítés

Az analóg számítógépekhez eredményrögzítési célra a következő berendezések használatosak:

- **Voltmérő:** segítségével állandó vagy lassan változó feszültségek megfigyelése lehetséges. Jelentősége korlátozott, inkább csak ellenőrzésre használatos. Ered-

ményrögzítésre akkor alkalmas, ha nem maga a kimeneten megjelenő  $U(t)$  függvény a megoldás, hanem a számítás eredményét a kialakuló végfeszültség reprezentálja.

- **Koordinátaíró ( $x$ - $y$  író):** ez a berendezés már használható függvényábrázolásra. Írószerkezete rendszerint toll, melyet gyors, jól csillapított szervomechanizmusok mozgatnak  $x$ - $y$  koordináta-rendszerben egy papírlap fölött. Két bemenettel rendelkezik; az egyik a toll  $x$  irányú, a másik az  $y$  irányú kitérését vezérli. Ha az  $x$  bemenet a készülékbe épített generátorról hajtjuk meg, az  $y$  bemenetre pedig az analóg számítógép  $U(t)$  kimeneti feszültségét kapcsoljuk, akkor egyenletes  $x$  irányú előretolás mellett a készülék papírra rajzolja a megoldás-függvényt.
- **Oszcilloszkóp:** szintén függvényábrázolásra használható. A megjelenítést katód-sugárcső-képernyőn egy gyakorlatilag tehetetlenség nélküli elektronsugár végzi, ezért segítségével nagy frekvenciájú, periodikus váltakozó feszültségek megfigyelése és fényképezési rögzítése lehetséges. Szintén  $x$  és  $y$  (hasonló funkciójú) bemenettel rendelkezik. Ha az  $x$  bemenet a készülékbe épített (megfelelő frekvenciára állított) fűrészfog-generátorról hajtjuk meg, az  $y$  bemenetre pedig az analóg számítógép  $U(t)$  kimeneti feszültségét kapcsoljuk, akkor a készülék a képernyőre rajzolja a megoldás-függvényt. Használata esetén gondoskodni kell arról, hogy az analóg számítógép a számítást, és végső soron a megoldás-függvényt periodikusan ismétlgesse. Hogy stabil, vibrálásmentes képet kapjunk, ahhoz az analóg számítógép oldaláról pontos vezérlésre és gyors (azaz sűrűn ismétlődő) számításra van szükség. Olykor a számítási ciklusok kezdetét jelző, az  $x$ -eltérést megfelelő pillanatban indító jel kivezetése is szükséges lehet.
- **A/D átalakító, digitális számítógép:** analóg-digitális átalakítás után a számítások eredményét digitális számítógéppel is feldolgozhatjuk. Szükség lehet egy olyan jel előállítására is, amely megmutatja, hogy mikor van a kimeneten érvényes számított érték, és melyek az átmeneti beállítási szakaszok. Ezzel az eredményrögzítési módozattal nemcsak kirajzoltatható a megoldás, hanem a digitális számítógép memóriájában vagy háttértárolójában is rögzíthető, feldolgozható.



## 4. A műveleti erősítő

Egyszerűbb műveletek elvégzésére (mint például feszültségek összeadása, leosztása) alkalmazhatunk passzív áramkörü elemeket (ellenállás, kondenzátor, induktivitás, dióda, stb.), de ezek használata több hátránnyal is jár. A passzív alkatrészekkel felépített műveleti egységek kimenetén például mindig kisebb a teljesítmény, mint a bemenetükön. A passzív egységeket egymás után kapcsolva, azok bemeneti és kimeneti ellenállásuk révén hatnak egymásra, befolyásolják egymás működését, ezzel hibát okoznak a számításban.

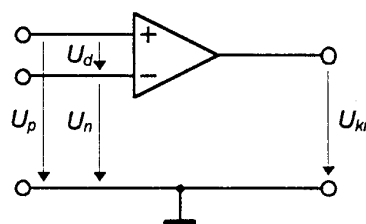
Ezeket a hátrányokat aktív áramkörü elemek (tranzisztorok, elektroncsövek, erősítők) felhasználásával küszöbölhetjük ki. Az ilyen egységeknek a feszültség illetve teljesítmény megnöveléséhez az energia-megmaradás értelmében természetesen energiaforrásra van szükségük, ezért külső tápfeszültséget kell hozzájuk csatlakoztatni. Az aktív áramkörü elemek segítségével nagy bemeneti- és kis kimeneti ellenállású műveleti egységeket lehet építeni, és ezzel az egyes egységek egymásra hatását minimálisra lehet csökkenteni.

Ebben a fejezetben egy ilyen aktív áramkörü elemnek (egyfajta összetett erősítőnek), az úgynevezett műveleti erősítőnek a működésével ismerkedünk meg.

### 4.1 A műveleti erősítő tulajdonságai

Mint minden erősítő, a műveleti erősítő is feszültség illetve teljesítmény erősítésére való. Kiváló elektromos tulajdonságai révén ideális esetben viselkedését nem a belső felépítése határozza meg, hanem a hozzá tartozó külső alkatrészek. Neve onnan származik, hogy az ilyen különleges tulajdonságú erősítőket korábban csak matematikai műveletek elvégzésére használták. Ma már kaphatók olcsó integrált áramkörü kivitelben, így sokkal szélesebb a felhasználási körük.

A műveleti erősítő áramkörü jelölését a 3. ábra szemlélteti. Két bemenettel rendelkezik. A + jelű bemenet neve **fázist nem fordító bemenet** (vagy nem invertáló bemenet), a – jelű pedig **fázisfordító bemenet** (vagy invertáló bemenet).



3. ábra

A bemenetek és a kimenet feszültségének pozitív és negatív irányú változása úgy biztosítható, hogy a műveleti erősítőt (a közös földponthoz képest) egy pozitív és egy negatív tápfeszültséggel működtetjük. Az elvi kapcsolási rajzokon a tápfeszültség-csatlakozásokat nem szoktuk feltüntetni.

Csak az elméletben létező **ideális műveleti erősítő** alatt egy tökéletes tulajdonságokkal rendelkező erősítőt értünk. Legfontosabb tulajdonságai: végtelenül nagy bemeneti és nulla kimeneti ellenállás, végtelenül nagy erősítés. A valóságos műveleti erősítők paraméterei ettől természetesen eltérnek. Az

$$A = \frac{\Delta U_{ki}}{\Delta U_d} = \frac{\Delta U_{ki}}{\Delta(U_p - U_n)} = \begin{cases} \Delta U_{ki} / \Delta U_p & \text{ha } U_n = \text{konst.} \\ -\Delta U_{ki} / \Delta U_n & \text{ha } U_p = \text{konst.} \end{cases}$$

**differenciális erősítés** (más néven nyílt hurkú, azaz visszacsatolás nélküli erősítés) véges érték,  $10^4 \dots 10^7$  nagyságrendű. A gyakorlatban ez ritkán jelent korlátozást, de néha figyelembe kell venni. A műveleti erősítő kimeneti feszültsége:

$$U_{ki} = AU_d = A(U_p - U_n).$$

Komolyabb megszorítást jelent, hogy sem a bemeneti, sem pedig a kimeneti feszültség nem lehet nagyobb a tápfeszültségeknél. A kimeneti feszültségtartomány általában néhány voltal szűkebb is a tápfeszültség-tartománynál. Azt a tartományt, amelyben a kimenet feszültsége lineárisan függ  $U_d$ -től,  $U_{ki \max}$  kimeneti **kivezérelhetőség**nek nevezzük. Ha elérjük ezt a határt, akkor  $U_d$  további növelésével  $U_{ki}$  már nem nő tovább.

További eltérés az ideálistól, hogy a reális műveleti erősítők bemeneteire feszültségkülönbséget kell adni ahhoz, hogy a kimeneti feszültség 0 legyen. (Az ideális természetesen az volna, ha  $U_d = 0$  értékhez tartozna az  $U_{ki} = 0$ .) Ezt a feszültségkülönbséget  $U_0$  **offsetfeszültség**nek nevezzük. Nagyságrendje néhány mV,

ami a legtöbbször ugyan elhanyagolható, de mint látni fogjuk, egyes esetekben számolni kell vele. Az ofszetfeszültség kis mértékben sajnos függ még a hőmérséklettől és a tápfeszültség értékétől, sőt hosszú idő elteltével is változik. Sok integrált műveleti erősítő rendelkezik az ofszetfeszültség nullázására szolgáló kimenetekkel.

Ha az ofszetfeszültség 0, és mindkét bemenetre ugyanazt az  $U_k$  feszültséget kapcsoljuk, akkor  $U_d = 0$ , és ezért az ilyen úgynevezett **közös módusú vezérlésnél** a kimeneten is 0 feszültségnek kellene lenni. A valóságos műveleti erősítőknél azonban

$$A_k = \frac{\Delta U_{ki}}{\Delta U_k} \neq 0.$$

$A_k$  neve **közös módusú erősítés**. Az ideálistól való eltérést az úgynevezett **közös módusú elnyomás** jobban jellemzi:

$$KME = \frac{A}{A_k}.$$

Jellemző értéke  $10^4 \dots 10^5$ .

A két legfontosabb hibaforrás figyelembe vételével a valóságos műveleti erősítőre:

$$U_{ki} = A \left[ (U_d - U_0) + \frac{1}{KME} U_k \right].$$

Ha  $U_0 \rightarrow 0$  és  $KME \rightarrow \infty$  (esetleg  $U_k \rightarrow 0$ ), akkor visszkapjuk az ideális műveleti erősítőre vonatkozó egyenletet. Az előző képletből  $U_d$ -t kifejezve:

$$U_d = U_0 + \frac{U_{ki}}{A} - \frac{U_k}{KME}.$$

Ha  $U_0 \rightarrow 0$ , illetve  $KME$  és  $A \rightarrow \infty$ , akkor  $U_d \rightarrow 0$ . Ez azt jelenti, hogy  $U_d$  differenciálisan kis értéke is elég minden véges  $U_{ki}$  kimeneti feszültség beállításához. Ez azt jelenti, hogy az ideális műveleti erősítő két bemenete azonos feszültségen van.

A valóságos műveleti erősítő nem végtelenül nagy bemeneti ellenállású. Beszélhetünk a két bemenet közötti úgynevezett  $r_d$  **differenciális bemeneti ellenállásról**, és a bemenetek illetve a földpont között mérhető  $r_k$  **közös módusú bemeneti ellenállásról**. Az előbbi értéke  $M\Omega$  nagyságrendű, a másodiké pedig  $G\Omega$  körüli érték bipoláris tranzisztorokkal felépített bemeneti áramkört tartalmazó mű-

veleti erősítőnél. A bemenetükön fetekkel felépített erősítőknél ezek az értékek öthat nagyságrenddel még ennél is magasabbak lehetnek.

Gyakorlati szempontból sokkal jelentősebbek a bemenetek állandó áramai. Ha a fázisfordító bemenetről  $I_{b-}$ , a fázist nem fordító bemenetről pedig  $I_{b+}$  állandó áram folyik a földpont felé, akkor definíció szerint a **bemenő munkaponti áram**:

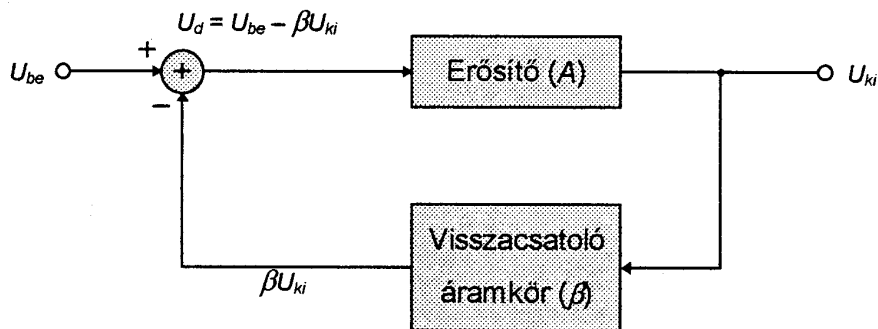
$$I_b = \frac{1}{2}(I_{b+} + I_{b-}).$$

A **bemenő ofszetáram** definíciója pedig:

$$I_o = |I_{b+} - I_{b-}|.$$

Általában a bipoláris műveleti erősítők bemenő munkaponti árama nA-es, fetes műveleti erősítőké pedig pA-es nagyságrendű.

A műveleti erősítő úgynevezett negatív visszacsatolásának elvi elrendezését a 4. ábra szemlélteti. A kimeneti feszültség egy részét a visszacsatoló hálózaton keresztül a visszavezetjük a bemenetre. Akkor beszélünk negatív visszacsatolásról, ha ez a visszacsatolt feszültség kivonódik a bemeneti feszültségből. Ha hozzáadódna, akkor pozitív visszacsatolásról beszelnénk.



4. ábra

A  $\beta$  **visszacsatolási tényező** a visszacsatoló áramkörre jellemző 0 és 1 közötti érték. Az erősítő kimeneti feszültsége a fentiek alapján:

$$U_{ki} = A(U_{be} - \beta U_{ki}).$$

Ebből a  $\beta A \gg 1$  feltétellel a kimeneti és a bemeneti feszültség hányadosa, azaz a visszacsatolt műveleti erősítő erősítése:

$$A_v = \frac{U_{be}}{U_{ki}} = \frac{A}{1 + \beta A} \approx \frac{1}{\beta}$$

Ilyen esetben tehát a (visszacsatolt vagy zárthurkú) erősítést a visszacsatoló áramkör határozza meg, és nem függ az erősítőtől.

A többször is előforduló  $\beta A$  kifejezés neve **hurokerősítés**:

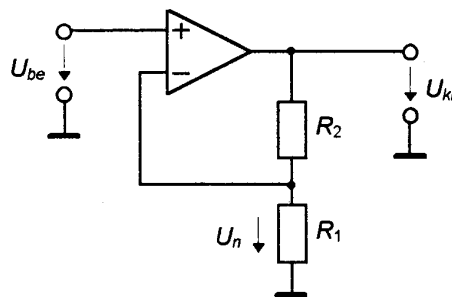
$$H = \beta A \approx \frac{A}{A_v}$$

Minél nagyobb a  $H$  hurokerősítés, negatív visszacsatolás esetén annál pontosabban igaz az, hogy csak a visszacsatoló áramkör határozza meg az erősítést.

A gyakorlat szempontjából fontos egyéb olyan kérdésekkel, mint a valóságos műveleti erősítők frekvenciakompenzálása, működésük stabilitásának kérdései, a [4] és a [9] szakirodalom részletesen foglalkozik.

#### 4.2 Fázist nem fordító erősítő

A fázist nem fordító erősítő alapkapsolását az 5. ábra mutatja be. Visszacsatolásra egyszerű feszültségosztót használunk. A leosztott feszültséget a fázisfordító bemenetre csatlakoztatva negatív visszacsatolást valósítunk meg.



5. ábra

Korábban láttuk, hogy a műveleti erősítő két bemenete gyakorlatilag azonos feszültségen van, ezért a kimeneti feszültség leosztott értéke megegyezik a bemenet feszültségével:

$$U_n = U_{ki} \frac{R_1}{R_1 + R_2} \approx U_{be}$$

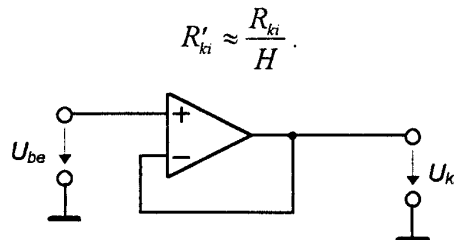
Ebből az erősítés értéke:

$$A_v = \frac{U_{ki}}{U_{be}} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

A közös módusú erősítéssel mindig kell számolni, hiszen a bemenetek feszültsége 'együtt mozog'. Mivel az  $U_0$  offsetfeszültséget úgy kell elképzelnünk, mintha a bemenetre kapcsolt feszültségforrással sorba volna kapcsolva, ezért az erősítő ezt is  $A_v$  erősítéssel erősíti.

A fázist nem fordító erősítő bemeneti ellenállása igen nagy. Gyakorlatilag a műveleti erősítő közös módusú bemeneti ellenállásával egyezik meg, ez pedig a bipoláris műveleti erősítőknél is  $G\Omega$  körüli érték, a fetes erősítők esetében pedig még ennél is több nagyságrenddel nagyobb. Ezért a bemenet feszültségének megváltozásával igen kis áramváltozás jár. A jóval nagyobb bemeneti munkaponti áram persze továbbra is 'terheli' a bemenetre kapcsolt feszültségforrást.

Vizsgáljuk meg a kimeneti ellenállást! A valóságos műveleti erősítőknél ez közel sem ideális, ám a visszacsatolás ezen is segít. A kimeneti feszültség terhelés okozta csökkenése a feszültségosztón keresztül visszajut a bemenetre, ezzel növekszik az az  $U_d$  feszültség, amit az erősítő felerősít, és így növekszik a kimenet feszültség is. A negatív visszacsatolás tehát a kimenet feszültségcsökkenése ellen hat, azaz csökkenti a kimeneti ellenállást. Itt nem részletezett közelítő számítások alapján a negatív visszacsatolású műveleti erősítő kimenet ellenállása:



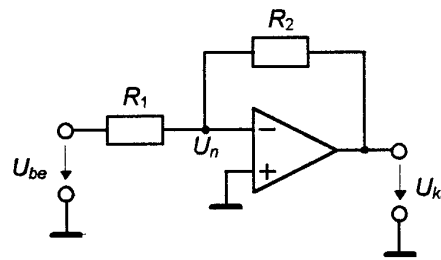
6. ábra

Fontos különleges eset az  $A_v = 1$  erősítésű, úgynevezett **feszültségkövető** kapcsolás. Neve szemléletes, hiszen a kimenet feszültsége követi a bemenet feszültségét, azonos vele. A képlet alapján ez  $R_2 = 0$ , és  $R_1 = \infty$  értékekkel valósítható meg. A feszültségkövetőt a 6. ábra mutatja. Összetett kapcsolások két egymást követő egysége között kiválóan alkalmazható úgynevezett **impedanciaváltó**ként:

az első egységet (nagy bemeneti ellenállása révén) alig terheli, a következő egységet pedig nagyon kicsi belső ellenállású feszültséggenerátorként hajtja meg. Ráadásul mindezt úgy teszi, mintha ott sem volna, hiszen be- illetve kimenetén azonos feszültség van.

### 4.3 Fázisfordító erősítő

A fázisfordító erősítő alapkapcsolását az 7. ábra mutatja be.



7. ábra

Korábban láttuk, hogy a műveleti erősítő két bemenete gyakorlatilag azonos feszültségen van, és a bemeneteibe gyakorlatilag nem folyik áram. Ebben az esetben ez azt jelenti, hogy a fázisfordító bemenet feszültsége is megközelítőleg 0 (ezért virtuális földpontnak is nevezik), és hogy a két ellenálláson azonos áram folyik. Ezek után írjuk fel a csomóponti törvényt a fázisfordító bemenetre:

$$U_n = 0 = \frac{U_{be}}{R_1} + \frac{U_{ki}}{R_2}$$

$$U_{ki} = -U_{be} \frac{R_2}{R_1}$$

Ebből az erősítés értéke:

$$A_v = \frac{U_{ki}}{U_{be}} = -\frac{R_2}{R_1}$$

Mint látjuk, a kimenet feszültség a bemenet feszültségéhez képest ellentétes előjelű, más szóval vele ellenfázisú. Innen ered az elrendezés neve.

A közös módusú erősítés itt nem okoz gondot, hiszen mindkét bemenet feszültsége 0, tehát nincs is közös módusú vezérlés.

A fázisfordító erősítő bemeneti ellenállását  $R_1$  értéke adja, mivel  $U_n = 0$ . Az

$R_1$  ellenállás értéke általában úgy van megválasztva, hogy a rajta folyó áram jóval nagyobb mint a bemeneti munkaponti áram, tehát ez utóbbi hatásával a legtöbbször nem kell számolni.

A negatív visszacsatolás a kimenet feszültségcsökkenése ellen hat, azaz csökkenti a kimeneti ellenállást. A közelítő számítás itt is a következő értéket adja a kimenet ellenállására:

$$R'_{ki} \approx \frac{R_{ki}}{H}.$$

Fontos különleges eset az  $A_v = -1$  erősítésű, úgynevezett **inverter** kapcsolás. A képlet alapján ez  $R_2 = R_1$  értékekkel valósítható meg.



## 5. Lineáris műveleti egységek

### 5.1 Állandóval való szorzás

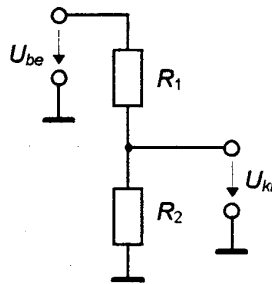
Az ilyen feladatot ellátó áramkörök a kimenetükön a bemenetükre adott feszültség meghatározott  $k$  állandóval szorzott értékét adják:

$$U_{ki} = kU_{be}$$

Az állandóval való szorzást megvalósító *passzív* elemekből felépülő egységek közül a legegyszerűbb a **feszültségosztó** (8. ábra). A szorzótényező:

$$k = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Az elrendezés egyik hátránya, hogy a  $k$  csak a  $[0,1]$  intervallumba eshet. A másik hátrány, hogy a bemeneti feszültségforrás belső ellenállása párhuzamosan kapcsolódik a teljes feszültségosztóval, a kimenetre csatlakoztatott eszköz bemeneti ellenállása pedig  $R_2$ -vel. Ezek hatása a szorzótényező megváltozásával jár, de ez a számításban figyelembe vehető.



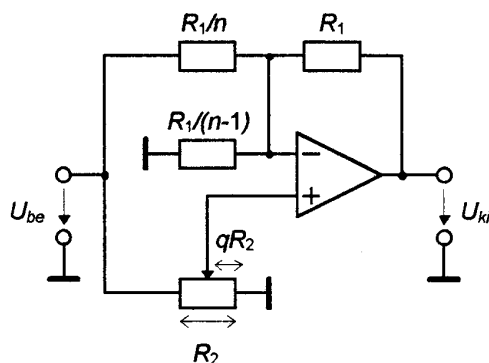
8. ábra

Ha potenciométert használunk feszültségosztóként a két ellenállás helyett, akkor a  $k$  szorzótényező a potenciométer csúszkájának helyzetével változtatható. Természetesen ez a megoldás is épp olyan hátrányokkal rendelkezik, mint az előző.

Ha a feszültségosztót *aktív* elemekkel egészítjük ki, akkor ezek a problémák kiküszöbölhetők. Az aktív elemek erősítése révén nagyobb, sőt negatív szorzótényezők is megvalósíthatóak. Azzal, hogy közel ideális erősítőt (pl. műveleti erősítő feszültségkövetőt) kapcsolunk a feszültségosztó elé vagy mögé, az ellenállás-

gondokat csak az egyik oldalról oldottuk meg. Ha ahelyett, hogy két erősítőt használnánk (egyet-egyet a feszültségosztó előtt illetve mögött), a feszültségosztót egy műveleti erősítő visszacsatolására alkalmazzuk, akkor a műveleti erősítő alapkötéséhez jutunk. Fázist nem fordító erősítővel akár egynél sokkal nagyobb, fázisfordító erősítővel pedig akár mínusz egynél sokkal kisebb erősítés is elérhető. Van két nagyon gyakran használt speciális eset: az egyik az egyszeres erősítésű úgynevezett feszültségkövető (fázist nem fordító erősítő,  $R_1 = \infty$ ,  $R_2 = 0$ ), a másik a mínusz egyszeres erősítésű úgynevezett inverter (fázisfordító erősítő,  $R_1 = R_2$ ).

A 9. ábra kapcsolásával egy áramkörön belül valósítható meg olyan, akár pozitív, akár negatív szorzótényező, amely az  $R_2$  potenciométerrel  $\pm n$  érték között szabályozható.



9. ábra

Ha a potenciométer csúszkája a jobb oldali szélső helyzetben van, akkor  $q = 0$  és az  $R_1 / (n - 1)$  értékű ellenálláson nem esik feszültség, hiszen a nem invertáló bemenet földelésével az invertáló bemenet is földpontként viselkedik. Figyelembe véve, hogy a potenciométer (semelyik állásában) nem játszik szerepet a visszacsatolásban, csupán a bemeneti feszültséget terheli, visszakapjuk a fázisfordító erősítő alapkötését. Ilyenkor a szorzótényező:

$$k = A_v = -\frac{R_1}{R_1/n} = -n$$

Ha a potenciométer csúszkája a bal oldali szélső helyzetben van, akkor  $q = 1$  és a teljes  $U_{be}$  bemeneti feszültség rákerül a nem invertáló bemenetre. Mivel

az invertáló bemenet itt is követi a nem invertáló bemenet feszültségét, az  $R_1/n$  értékű ellenálláson keletkező feszültségesés 0, és a kapcsolás fázist nem fordító műveleti erősítőként működik. Ilyenkor a szorzótényező:

$$k = A_v = 1 + \frac{R_1}{R_1/(n-1)} = n$$

Általános esetben (közbülső állásnál) a szorzótényező értéke  $q$ -tól függ:

$$k = A_v = n(2q - 1)$$

A megfelelő érték egy hiteles skálájú potenciométer, vagy ellenőrző mérés segítségével beállítható. Az  $n$  értéke az együttható-tartományt határozza meg. A megvalósítható legkisebb ilyen érték az  $n = 1$ , és ilyenkor az  $R_1/(n-1)$  értékű ellenállás elmaradhat.

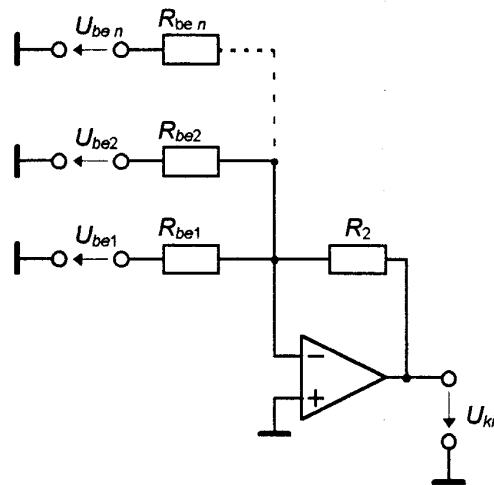
## 5.2 Összegző áramkör

Több feszültség összeadására fázisfordító műveleti erősítőt használunk. A bemeneti feszültségeket soros ellenállásokon keresztül csatlakoztatjuk a műveleti erősítő fázisfordító bemenetére (10. ábra). Mivel ez a pont virtuális földnek tekinthető, a kimeneti feszültség kiszámítására a csomóponti törvényt alkalmazva:

$$\frac{U_{be1}}{R_{be1}} + \frac{U_{be2}}{R_{be2}} + \dots + \frac{U_{be n}}{R_{be n}} + \frac{U_{ki}}{R_2} = 0$$

Átrendezve:

$$-U_{ki} = \frac{R_2}{R_{be1}} U_{be1} + \frac{R_2}{R_{be2}} U_{be2} + \dots + \frac{R_2}{R_{be n}} U_{be n}$$



10. ábra

Amint az látható, az  $R_{be\ i}$  ellenállások értékeivel súlyozható az összegzés. Ha minden bemeneti ellenállás azonosan  $R_{be}$  értékű, akkor a kimeneten a bemeneti feszültségek súlyozatlan összegének konstans-szorosa jelenik meg:

$$-U_{ki} = \frac{R_2}{R_{be}} \sum_{i=1}^n U_{be\ i} = k \sum_{i=1}^n U_{be\ i}.$$

Ha az összes ellenállás értéke azonos ( $R_2 = R_{be}$ ), akkor a kimeneten a bemeneti feszültségek valódi összegének  $(-1)$ -szerese jelenik meg.

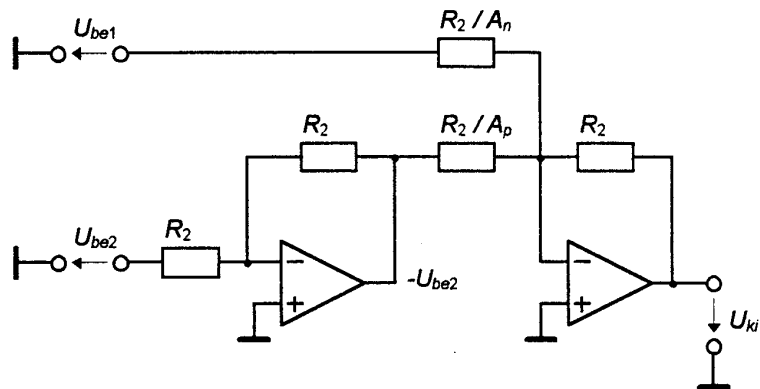
A fázisfordító összeadó nagy nullponteltolási tartományú erősítőként is használhatjuk, ha a jelfeszültséghez egyenfeszültséget adunk. Ha például  $n = 2$ ,  $R_{be1} = R_{be2} = R_2$ ,  $U_1 = A = 5V$ ,  $U_2 = A \sin(\omega t)$ , akkor a kimeneten olyan időben szinuszosan változó feszültséget kapunk, mely sohasem vesz fel negatív értéket.

Ha nem felel meg, hogy a kimeneten az összeg  $(-1)$ -szeresét kapjuk, akkor a kapcsolás után egy invertert kell helyezni.

### 5.3 Kivonó áramkör

A kivonás visszavezethető összeadásra, ha a kivonandó jel fázisát megfordítjuk. A kapcsolást a 11. ábra szemlélteti. Az első műveleti erősítő invertálja az  $U_{be2}$  bemeneti feszültséget. Ezzel a kimeneti feszültség:

$$U_{ki} = A_p U_{be2} - A_n U_{be1}$$



11. ábra

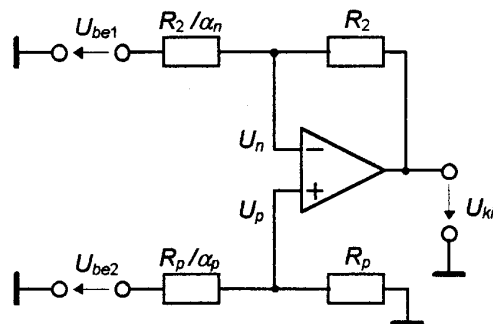
Valódi különbségképzés akkor adódik, ha a két erősítés pontosan megegyezik, azaz ha  $A_p = A_n = A$ . Ekkor a kimeneti feszültség kifejezése:

$$U_{ki} = A \cdot (U_{be2} - U_{be1})$$

Ha pontosan  $U_{be2} - U_{be1}$  feszültséget szeretnénk kapni a kimeneten, akkor ehhez a kapcsolás összes ellenállásának értékét azonosra kell választani.

Kivonó áramkör felépíthető egyetlen műveleti erősítővel is (12. ábra). A kimeneti feszültség kiszámítására alkalmazzuk a szuperpozíció-tételt:

$$U_{ki} = k_1 U_{be1} + k_2 U_{be2}$$



12. ábra

Ha  $U_{be2} = 0$ , akkor a kapcsolás fázisfordító erősítőként működik, tehát  $U_{ki} = -\alpha_n U_{be1}$ . Mindezt a szuperpozíciós képlettel összevetve adódik, hogy

$$k_1 = -\alpha_n$$

Ha  $U_{be1} = 0$ , akkor a kapcsolás egy feszültségosztóból, és egy fázist nem fordító alapkapcsolású elrendezésből áll. A nem invertáló bemenet feszültsége a feszültségosztás miatt:

$$U_p = \frac{R_p}{R_p + \frac{R_p}{\alpha_p}} U_{be2} = \frac{\alpha_p}{1 + \alpha_p} U_{be2}.$$

Ezt a feszültséget a fázist nem fordító erősítő  $(1 + \alpha_n)$ -szeresre erősíti, tehát

$$U_{ki} = (1 + \alpha_n) U_p = (1 + \alpha_n) \frac{\alpha_p}{1 + \alpha_p} U_{be2}.$$

Ezt a szuperpozíciós képlettel összevetve adódik, hogy

$$k_2 = \alpha_p \frac{1 + \alpha_n}{1 + \alpha_p}.$$

Ha  $k_1$  és  $k_2$  értékét visszahelyettesítjük a szuperpozíciós képletbe, a kimeneti feszültség:

$$U_{ki} = \alpha_p \frac{1 + \alpha_n}{1 + \alpha_p} U_{be2} - \alpha_n U_{be1}.$$

Ha a két ellenállásarány egyenlő, azaz  $\alpha_n = \alpha_p = \alpha$ , akkor a kimeneti feszültség:

$$U_{ki} = \alpha (U_{be2} - U_{be1}).$$

Vizsgáljuk meg a két, illetve egy műveleti erősítővel működő kapcsolást a számítási pontosság szemszögéből!

Az első kapcsolás esetén tételezzük fel, hogy a két erősítés majdnem egyforma, és csak aránylag kis  $\Delta A$  értékkel térnek el egymástól. A közös módusú elnyomás (itt nem részletezett számítás szerint) a két erősítés együttfutására vonatkozó relatív hiba reciproka:

$$KME = \frac{A}{\Delta A}.$$

A második kapcsolás esetén, feltételezve, hogy az együtthatók egyenlőségére vonatkozó feltétel itt is majdnem teljesül, a közös módusú elnyomás fordítva arányos az ellenállásarányok toleranciájával:

$$KME \approx (1 + \alpha) \frac{\alpha}{\Delta\alpha}$$

Ha két közel azonos feszültség különbségét kell képezni úgy, hogy a különbségi feszültséget még erősíteni is kell, akkor a második kapcsolás azért is előnyösebb a két műveleti erősítő kapcsolásnál, mert (kizárólag a közös módusú vezérlés okozta hibát tekintve) azonos számítási pontosság eléréséhez itt a kapcsolás két ágának szükséges együttfutási toleranciájára kevésbé szigorúbb feltételek adódnak. Más szemszögből nézve ez azt jelenti, hogy azonos értéktűrésű alkatrészekből felépítve a kétféle áramkört, a második konstrukciónál várható nagyobb számítási pontosság.

Bővítsük a második kapcsolást további összeadó és kivonó bemenetekkel!

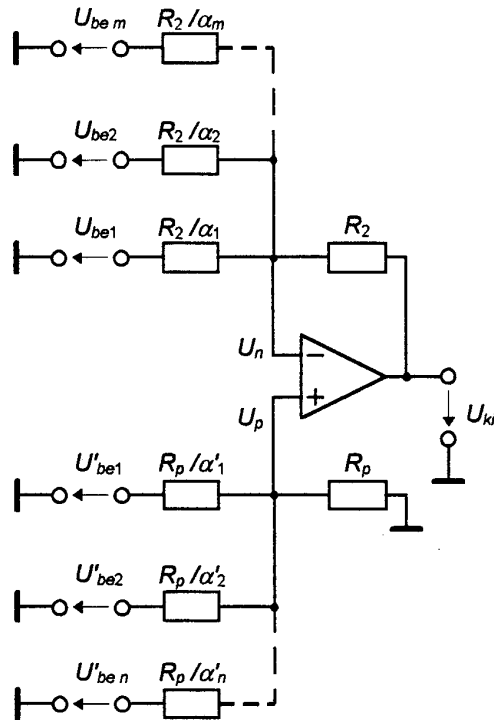
(13. ábra) Alkalmazzuk a csomóponti törvényt az invertáló bemenetre:

$$\sum_{i=1}^m \frac{U_{be i} - U_n}{\left(\frac{R_2}{\alpha_i}\right)} + \frac{U_{ki} - U_n}{R_2} = 0$$

Ebből

$$\sum_{i=1}^m \alpha_i U_{be i} - U_n \left( \sum_{i=1}^m \alpha_i + 1 \right) + U_{ki} = 0$$

következik.



13. ábra

Teljesen hasonlóan a nem invertáló bemenetre:

$$\sum_{i=1}^n \alpha'_i U'_{be i} - U_p \left( \sum_{i=1}^n \alpha'_i + 1 \right) = 0.$$

Ha a két utóbbi egyenletet az  $U_n = U_p$  és a

$$\sum_{i=1}^n \alpha'_i = \sum_{i=1}^m \alpha_i$$

feltételekkel kiegészítve kivonjuk egymásból, akkor:

$$U_{ki} = \sum_{i=1}^n \alpha'_i U'_{be i} - \sum_{i=1}^m \alpha_i U_{be i}$$

Ha  $n = m = 1$ , akkor visszakapjuk az előző kivonó kapcsolást.

A megfelelő működés feltétele, hogy az együtthatókra megfogalmazott feltétel teljesüljön. Ha ez az együttható-feltétel nem teljesülne, akkor (a még hiányzó együtthatónak megfelelő súlyozással) 0 feszültséget adjunk hozzá, vagy vonjunk ki.

A műveletvégző kapcsolások bemenetei terhelik a jelgenerátorokat. Láttuk,



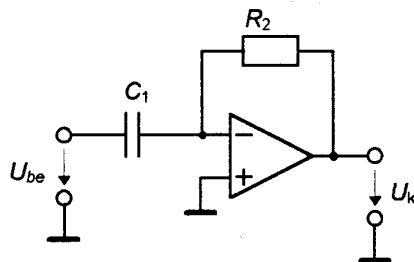
hogy a közös módusú elnyomást főleg az  $\alpha_n$  és az  $\alpha_p$  ellenállásarányok együttfutásának toleranciája határozza meg. Ezekbe az arányokba a jelgenerátorok belső ellenállásai is beleszólnak. Ahhoz hogy emiatt járulékos hiba ne keletkezzen, a jelgenerátorok kimeneti ellenállásainak elég kicsiknek kell lenniük. Ha a generátorok maguk is negatív visszacsatolt műveleti erősítős kapcsolások, akkor ez a feltétel általában jól teljesül. Más jelgenerátorok kimenetét általában fázist nem fordító impedanciaváltó fokozat közbeiktatásával kell csatlakoztatni a bemenetre. Az ilyen kivonókat nagy bemeneti impedanciájú különbségképzőknek nevezzük, és integrált áramkör formájában is kaphatók.

#### 5.4 Differenciáló áramkör

A differenciáló áramkörök kimeneti feszültségének általános alakja:

$$u_{ki} = k \frac{du_{be}}{dt}$$

ahol  $k$  egy az áramkörre jellemző konstans.



14. ábra

A 14. ábra kapcsolása abban különbözik a fázisfordító erősítőtől, hogy a bemeneti ellenállást kondenzátor helyettesíti. Ez a differenciáló áramkör alapkioscsolása. Írjuk fel a csomóponti törvényt az invertáló bemenetre:

$$C_1 \frac{du_{be}}{dt} + \frac{u_{ki}}{R_2} = 0$$

$$u_{ki} = -R_2 C_1 \frac{du_{be}}{dt}$$

Az  $u_{be} = \hat{U}_{be} \sin \omega t$  szinuszos bemeneti feszültség hatására

$$u_{ki} = -\omega R_2 C_1 \hat{U}_{be} \cos \omega t$$

kimeneti feszültséget kapunk. Az amplitúdó egyenesen arányos  $\omega$ -val, tehát ha az amplitúdókarakterisztikát kettős logaritmikus koordináta-rendszerben ábrázoljuk, akkor  $+6$  dB/oktáv meredekségű egyenest kapunk. Ez a tulajdonság alkalmas annak ellenőrzésére, hogy bizonyos frekvenciatartományban egy adott áramkör valóban differenciálóként viselkedik-e.

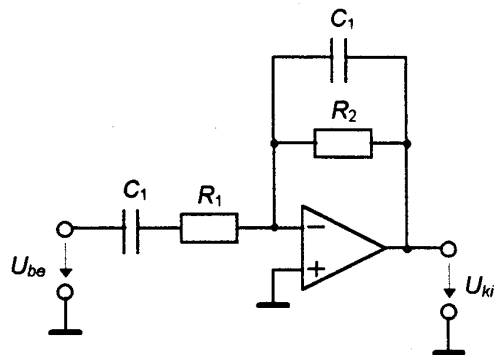
Vizsgáljuk meg a kapcsolást a *stabilitás* szempontjából! A visszacsatoló hálózat nagyfrekvencián  $90^\circ$  határértékű fázisforgatást okoz. Ehhez még hozzáadódik a műveleti erősítő minimum  $90^\circ$ -os fázisforgatása, így a teljes fázistolás legalább  $180^\circ$ . A kapcsolat gerjedékeny. A gyakorlati kivitelezést tovább nehezíti, hogy a frekvencia emelkedésével az elrendezés bemenő ellenállása tart a nullához.

A problémákat úgy oldhatjuk meg, hogy a kondenzátorral sorbakötünk egy az  $R_2$ -nél jóval kisebb értékű  $R_1$  ellenállást. Ezzel nagyfrekvencián csökkentjük a visszacsatoló hálózat fázistolását, amiért azzal kell fizetnünk, hogy megszűnik a kapcsolat differenciáló jellege. Az  $R_1C$  tag határfrekvenciájára ezért olyan értéket válasszunk, ahol a hurokerősítés már amúgy is majdnem 1-re esett vissza. Ezzel a kihasználható frekvenciatartományt a lehető legkevésbé csökkentjük.  $R_1$  beiktatása esetén a frekvencia emelkedésével az elrendezés bemenő ellenállása  $R_1$ -hez tart.

A stabilitást tovább javíthatjuk, ha  $R_2$ -vel párhuzamosan pedig egy akkora  $C_2$  kapacitást kapcsolunk, hogy az így kialakuló  $R_2C_2$  tag határfrekvenciája megegyezzen az  $R_1C_1$  tag határfrekvenciájával. Ezzel a gerjedés szempontjából veszélyes nagyfrekvenciás tartományban, tovább csökkentjük a visszacsatoló hálózat fázistolását, a kapcsolat még stabilabbá válik.

A kihasználható frekvenciatartományt felülről a stabilizáló tagok határfrekvenciája, alulról pedig az eredeti  $R_2C_1$  differenciáló tag határfrekvenciája határolja. A kapcsolat csak ezen két érték között működik differenciálóként:

$$\frac{1}{2\pi R_2 C_1} \ll f \ll \frac{1}{2\pi R_1 C_1} = \frac{1}{2\pi R_2 C_2}$$



15. ábra

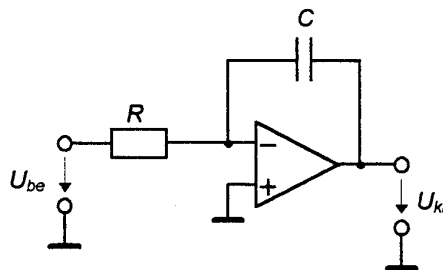
A stabilizáló tagokkal kiegészített kapcsolást a 15. ábra szemlélteti.

### 5.5 Integráló áramkör

A műveleti erősítők nagyon fontos alkalmazási területe az analóg számítástechnikában az integrátor. Az integrátorok kimeneti feszültségének általános alakja:

$$u_{ki} = k \int_0^t u_{be}(t) dt + U_{ki0}$$

ahol  $U_{ki0}$  a kimeneti feszültség  $t = 0$  időpillanatban,  $k$  pedig egy az áramkörre jellemző konstans.



16. ábra

A 16. ábra integrátora abban különbözik a fázisfordító erősítőtől, hogy a negatív visszacsatoló ellenállást kondenzátor helyettesíti. A kimeneti feszültség:

$$u_{ki} = \frac{Q}{C} = \frac{1}{C} \left( \int_0^t i_C(t) dt + Q_0 \right)$$

$Q_0$  az a töltés, amely az integrálás kezdetén a kondenzátoron volt. Ha figyelembe

vesszük, hogy az invertáló bemenet virtuális földpont, és a műveleti erősítő bemenetébe gyakorlatilag nem folyik áram, így  $i_C = -u_{be}/R$ , akkor

$$u_{ki} = -\frac{1}{RC} \int_0^t u_{be}(t) dt + U_{ki0}$$

A kimeneti feszültség  $t = 0$  időpillanatban  $U_{ki0} = Q_0/C$ . Ez képviseli a kezdeti feltételt, melynek meghatározott értékéről külön gondoskodni kell.

Az  $u_{be} = \hat{U}_{be} \sin \omega t$  szinuszos bemeneti feszültség hatására

$$u_{ki} = -\frac{1}{RC} \int_0^t \hat{U}_{be} \sin \omega t dt + U_{ki0} = \frac{\hat{U}_{be}}{\omega RC} \cos \omega t + U_{ki0}$$

kimeneti feszültséget kapunk. A kimeneti feszültség amplitúdója fordítottan arányos  $\omega$ -val, tehát ha az átvitel frekvenciamenetét kettős logaritmikus koordináta-rendszerben ábrázoljuk, akkor  $-6$  dB/oktáv meredekségű egyenest kapunk. Ez a tulajdonság alkalmas annak ellenőrzésére, hogy bizonyos frekvenciatartományban egy adott áramkör valóban integrátorként viselkedik-e.

A *stabilitás* vizsgálatához figyelembe kell venni, hogy a visszacsatolás fázistolást okoz, ám nagyfrekvencián ez a fázistolás 0. Olyan viszonyok állnak elő, mint a teljesen visszacsatolt erősítőnél. Az ilyenkor szükséges frekvenciakompenzálást is el kell végezni. Integrátornak a belső kompenzálású műveleti erősítők is használhatók.

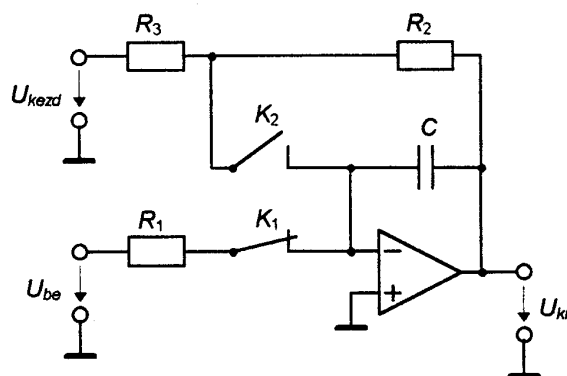
Vizsgáljuk meg, hogy milyen *hibaforrások* jelentkeznek! Az  $I_{be}$  bemeneti munkaponti áram és az  $U_0$  offsetfeszültség nagyon zavaró lehet, mert hatásuk időben halmozódik. Akkor is folyik áram a kondenzátorba, ha a bemeneti feszültséget nullázzuk. Ennek értéke:

$$I_C = \frac{U_0}{R} + I_{be}$$

Ekkora áram hatására a kimeneten a feszültség változási sebessége:

$$\frac{du_{ki}}{dt} = \frac{dQ/dt}{C} = \frac{I_C}{C} = \frac{1}{C} \left( \frac{U_0}{R} + I_{be} \right) = \frac{U_0}{\tau} + \frac{I_{be}}{C}$$

1  $\mu$ A áram, illetve 1  $\mu$ F-os kondenzátor esetén a kimeneti feszültség másodpercen-



17. ábra

ként 1 V-tal nő! Látható, hogy rögzített időállandónál a bemenő munkaponti áram hatása annál kisebb, minél nagyobb a kondenzátor kapacitása, mialatt az ofszetfeszültség hozzájárulása állandó marad.

A bemenetükön bipoláris tranzisztorokat tartalmazó műveleti erősítők munkaponti árama általában nagyságrendekkel nagyobb mint a fet-bemenetűeké, ezért (az ofszetfeszültségre is figyelve) célszerű fet-bemenetű erősítőt használni, mert így nincs szükség különböző kapcsolástechnikai fogásokra a számítási pontosság megfelelő értéken tartása érdekében. Mint láttuk, célszerű minél nagyobb kapacitást alkalmazni, de sajnos az elektrolit-kondenzátorok  $\mu\text{A}$  nagyságrendű átvezetési árama további hibaforrást jelentene, így csak fóliaszigetelésű kondenzátor használható, melyek viszont kizárólag néhány  $\mu\text{F}$ -os értékig gyárthatók megfelelő méretben.

Az analóg számítógépekben biztosítani kell, hogy az integrátor  $U_{ki0}$  kezdeti kimeneti feszültsége az  $U_{be}$  bemeneti feszültségtől függetlenül beállítható legyen. A 17. ábra kapcsolása mindezt lehetővé teszi. Három működési üzemmódot biztosít: integrálás, tartás, kezdeti feltétel beállítása.

Ha a  $K_1$  kapcsoló zárva van, a  $K_2$  pedig nyitva, akkor az áramkör úgy működik, mint az 16. ábra kapcsolása. Ez az **integrálás** üzemmód.

Ha ezek után nyitjuk  $K_1$ -et is (tehát mindkét kapcsoló nyitva lesz), akkor a kimeneti feszültség akkora marad, mint az átkapcsolás pillanatában, mivel a műveleti erősítő bemenetébe gyakorlatilag nem folyik áram. Ez az integrálási folyamat

megszakítására, a kimeneti feszültség zavartalan mérésére, leolvasására használható. Ez a **tartás** üzemmód. Ha erre nincs szükség, akkor a két kapcsoló helyett elegendő egy morzekapcsolót beépíteni, hiszen csak a másik két üzemmód között kell váltani.

Ha a  $K_1$  kapcsolót nyitjuk, a  $K_2$ -t pedig zárjuk, akkor az áramkör fázisfordító erősítőként működik, amelynek a kimeneti feszültsége  $\tau = R_2C$  időállandóval közelít a következő értékhez:

$$U_{ki} = -\frac{R_2}{R_3} U_{kezd}$$

Ezzel a módszerrel állítható tetszőleges értékre  $U_{ki0}$ . Ez a **kezdeti feltétel beállítása** üzemmód.

A kapcsolók működtetése többféle módon történhet. **Kézi működtetés** csak lassú működésű (nagy időállandójú) integrátorhoz használható. Ilyenkor az egyes üzemmódok közötti (helyes időpillanatban történő) átkapcsolás csak több tíz másodpercig tartó számításoknál végezhető el a megfelelő relatív pontossággal.

Ha az átkapcsolások időzítését valamilyen vezérlő áramkör biztosítja, akkor a átkapcsolást végezheti **relé**. Ezzel a megoldással már gyorsabb számítás is végezhető. Ekkor a helyes időzítés (figyelembe véve a relék tehetetlenségét is) a vezérlésen múlik. A korlátozott kapcsolási frekvencián túl a kapcsolóknak és a reléknek (révén mindkettő mechanikus érintkezőkkel rendelkezik) további közös hátrányaik is vannak: a kontaktusok pergése, kopás, elhasználódás, hangos működés.

A vezérelt átkapcsolást végezheti **elektronikus analóg kapcsoló** is. Az ilyen áramkörök kapcsolóelemként feteket, ritkább esetben diódákat vagy bipoláris tranzisztorokat használnak. A gyakorlatban a legkedvezőbb eredmény mosfetes kapcsolókkal érhető el. Nagyon sokféle CMOS analóg kapcsoló kapható integrált áramkör formájában<sup>1</sup>. Az átkapcsolásokat olyan ütemben (több MHz-cel) képesek végezni, hogy az analóg számítógépekben való használatukkal az elérhető számítási sebességet maguk a műveleti erősítős kapcsolások korlátozzák a (megfelelő számítási pontosságot még garantáló) legmagasabb üzemi frekvenciájukkal. To-

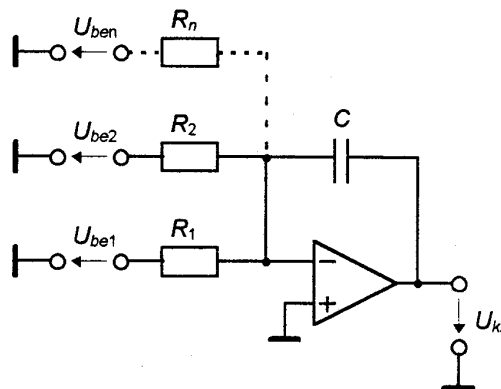
---

<sup>1</sup> pl. TL601, TL604, TL607, CD4016, CD4053, CD4066.

vábbi előnyük a mechanikus kapcsolóelemekkel szemben a kontaktusok pergésmentessége, és az elhasználódás-mentesség, és a halk működés. Hátrányuk a zárt kapcsolóállás mellett jelentkező soros ellenállás, a korlátozott kapcsolási áram és feszültségtartomány. Az első hiba kiküszöbölhető, ha az integrátor ellenállásait úgy méretezzük, hogy több nagyságrenddel nagyobbak legyenek a kapcsoló soros ellenállásánál. A korlátozott feszültségtartomány általában nem jelent gondot, a megengedett legnagyobb kapcsolóáramra viszont ügyelni kell a nagy értékű kapacitások áttöltésekor.

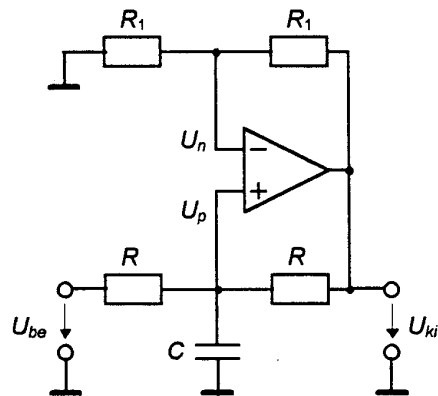
Az integrátor ugyanúgy bővíthető **összegző integrátor**rá, ahogyan az egyszerű invertáló erősítőt bővítettük ki összeadó fázisfordító műveleti erősítővé (18. ábra). A kimeneti feszültség értéke itt is a nem invertáló bemenetre felírt csomóponti törvény segítségével vezethető le:

$$u_{ki} = -\frac{1}{C} \int_0^t \left( \frac{u_{be1}}{R_{be1}} + \frac{u_{be2}}{R_{be2}} + \dots + \frac{u_{ben}}{R_{ben}} \right) dt + U_{ki0}$$



18. ábra

Ha fázist nem fordító integrátorra van szükség, akkor két lehetőség kínálkozik: a fázisfordító integrátor kiegészítése fázisfordító műveleti erősítővel, vagy a 19. ábra kapcsolása, amelyhez csak egy műveleti erősítő szükséges. A kapcsolás felfogható egy olyan integráló aluláteresztő szűrőként, melyet a veszteségeket kompenzáló, impedanciaváltó műveleti erősítés kapcsolással egészítettünk ki.



19. ábra

Alkalmazzuk a csomóponti törvényt a nem invertáló bemenetre!

$$\frac{u_{ki} - u_p}{R} + \frac{u_{be} - u_p}{R} - C \frac{du_p}{dt} = 0$$

Mivel a két  $R_1$  értékű ellenállásból felépülő feszültségosztó felezi a kimenet feszültségét, és mivel a műveleti erősítő két bemenete között gyakorlatilag 0 a potenciálkülönbség, így  $u_p$  és  $u_n$  helyére is  $u_{ki}/2$  írható. Ezzel az előző egyenlet:

$$\frac{u_{ki} - \frac{u_{ki}}{2} + u_{be} - \frac{u_{ki}}{2}}{R} - C \frac{d \frac{u_{ki}}{2}}{dt} = 0$$

$$\frac{u_{be}}{R} - \frac{C}{2} \frac{du_{ki}}{dt} = 0$$

$$u_{ki} = \frac{2}{RC} \int_0^t u_{be} dt$$

A kapcsolatban pozitív és negatív visszacsatolást is alkalmazunk. A *stabilitás* feltétele, hogy a teljes működési frekvenciatartományban a negatív visszacsatolás (1/2) meghaladja a pozitív visszacsatolás értékét. Ehhez gondoskodni kell a bemeneti feszültséggenerátor kis belső ellenállásáról. A nagy generátor-ellenállás miatt a kapcsolat begerjedhet.

Mivel ennél a veszteségkompenzációs módszernél nagy értékek kis különbségét képezzük, ezért ez a fajta integrátor közel sem olyan pontos működésű, mint a korábban ismertetett fázisfordító integrátor.



## 6. Nemlineáris műveleti egységek

### 6.1 Függvénygenerátorok

Ha egy  $U_1$  feszültséghez  $U_2 = f(U_1)$  feszültséget kell rendelni, ahol  $f$  analitikus függvény, akkor a probléma megoldására három lehetőség kínálkozik. A legegyszerűbb dolgunk akkor van, ha ki lehet használni egy olyan *fizikai jelenséget*, amely az adott függvény szerint zajlik (mint például a félvezető diódák exponenciális jellegű karakterisztikáját). Ezenkívül alkalmazhatunk *hatványsoros*, vagy úgynevezett *töréspontos* (más néven törtvonalas) közelítést is. Az utóbbi két módszer segítségével bármely függvény elméletileg tetszőleges pontossággal közelíthető, ellenben az ilyen elven működő függvénygenerátorok megépítése bonyolultabb, a közelítés pontossága pedig csak egyre több alkatrész beépítése révén fokozható.

#### 6.1.1 Logaritmáló egység

Célunk egy olyan áramkör megalkotása, melynek kimeneti feszültsége arányos a bemeneti feszültség logaritmusával.

Induljunk ki a félvezető dióda karakterisztikájából, az úgynevezett ideális diódaegyenletből:

$$I = I_S \left( \exp \frac{U_{AK}}{mU_T} - 1 \right)$$

$I_S$  és  $m$  az adott diódára jellemző konstansok.  $I_S$  az elméleti visszáram (vagy telítési áram), melynek tipikus értéke germánium diódáknál 100 nA, szilícium diódáknál 10 pA.  $m$  a korrekciós (vagy emissziós) együttható, melynek értéke 1 és 2 közé esik.  $U_T$  az úgynevezett termikus feszültség (vagy temperatúrafeszültség):

$$U_T = \frac{kT}{q},$$

ahol  $k$  a Boltzmann-féle állandó,  $q$  pedig az elemi töltés. A termikus feszültség értéke szobahőmérsékleten kb. 25,5 mV. Áteresztő tartományban  $I \gg I_S$ , így a diódaegyenlet leegyszerűsödik:

$$I = I_S \exp \frac{U_{AK}}{mU_T},$$

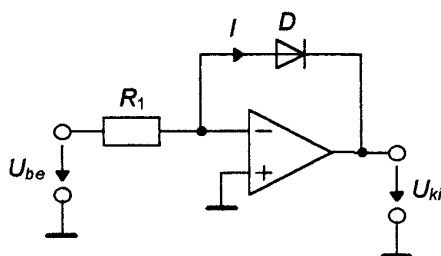
ebből

$$U_{AK} = mU_T \ln \frac{I}{I_S}$$

Tehát áteresztő tartományban (pozitív bemeneti feszültségnél) a dióda kapcsain mérhető feszültség egyenesen arányos a rajta átfolyó áramerősség logaritmusával.

E jelenség felhasználásával működő legegyszerűbb logaritmáló áramkört az 20. ábra mutatja. A kapcsolás egy diódával visszacsatolt műveleti erősítő. A kimeneten  $-U_{AK}$  feszültség jelenik meg. A dióda árama viszont  $U_{be} / R_1$ . Ebből:

$$U_{ki} = -mU_T \ln \frac{U_{be}}{R_1 I_S}$$



20. ábra

A kapcsolás  $U_T$  miatt természetesen érzékeny a hőmérsékletre. Kis áramoknál a fenti közelítés helytelen (nem hagyható el a  $-1$ ), nagy áramoknál pedig a valóságos diódák soros ellenállásán esik számottevő feszültség. További hibaforrás az  $m$  tényező áramfüggősége. Mindezen hibák figyelembevételével csak egy-két dekádtartományban használható az áramkör kielégítő pontossággal.

Mivel a tranzisztorok esetén az  $m$  korrekciós tényező jó közelítéssel eggyel egyenlő, az utóbbi hiba például kiküszöbölhető, ha dióda helyett tranzisztort használunk a 21. ábra szerinti kapcsolásban.

Az ideális tranzisztor kollektorárama:

$$I_C = \alpha I_{ES} \left( \exp \frac{U_{BE}}{U_T} - 1 \right) - I_{CS} \left( \exp \frac{U_{BC}}{U_T} - 1 \right),$$

ahol  $I_{CS}$  és  $I_{ES}$  a tranzisztorra jellemző konstansok (a kollektor-bázis, illetve az emitter-bázis dióda elméleti visszárama).  $\alpha$  tényező azt mutatja meg, hogy az emit-

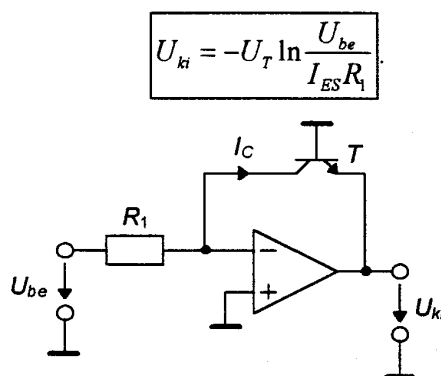
ter-bázis dióda milyen mértékben injektál áramot a kollektorba. Ha tekintetbe vesszük, hogy  $U_{BC} \approx 0$  (hiszen a műveleti erősítő nagy erősítése miatt a nem invertáló bemenet is közel földpotenciálon van), hogy  $\alpha \approx 1$ , illetve hogy  $I_C \gg I_{ES}$  (ha  $U_{BE}$  meghaladja a termikus feszültség néhányszorosát), akkor a kollektoráram kifejezése a következő alakúra egyszerűsödik:

$$I_C = I_{ES} \exp \frac{U_{BE}}{U_T}.$$

Ebből pedig a bázis-emitter feszültség:

$$U_{BE} = U_T \ln \frac{I_C}{I_{ES}}.$$

Figyelembe véve, hogy a tranzisztor kollektorárama  $U_{be}/R_1$ , és hogy  $U_{ki} = -U_{BE}$ , a kimeneti feszültség:



21. ábra

Ezzel a kapcsolással (megfelelő alkatrészek és beállítás esetén) akár kilenc dekád is átfogható. A kapcsolat egyik hátránya a gerjedékenység, hiszen a tranzisztor feszültségerősítése révén nő a hurokerősítés. A legnagyobb hátrány viszont az erős hőmérsékletfüggés.  $I_{ES}$  értéke még  $U_T$ -nél is érzékenyebb a hőmérsékletváltozásra. Különböző kapcsolástechnikai fogásokkal persze ezek a hibák is nagymértékben kompenzálhatóak. Ilyen pontos logaritmáló áramkörök kaphatók integrált áramköri kivitelben is. Arra természetesen minden kapcsolásnál ügyelni kell, hogy a bemeneti feszültség csak pozitív lehet.

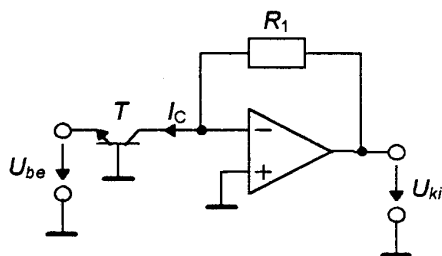
### 6.1.2 Exponenciális függvénygenerátor

A logaritmáló kapcsoláshoz nagyon hasonló elven működő exponenciális függvénygenerátort a 22. ábra mutatja. A bemenetre negatív feszültséget adva a kollektor árama:

$$I_C = I_{ES} \exp \frac{U_{BE}}{U_T} = I_{ES} \exp \left( -\frac{U_{be}}{U_T} \right).$$

A kimeneti feszültség:

$$U_{ki} = I_C R_1 = I_{ES} R_1 \exp \left( -\frac{U_{be}}{U_T} \right).$$



22. ábra

Az áramkör fő hibaforrása itt is a hőmérsékletfüggés. Megfelelő kapcsolástechnika révén persze ez kompenzálható, pontos exponenciális függvénygenerátort is lehet kapni integrált áramkörként.

### 6.1.3 Logaritmikus és exponenciális függvénygenerátorokkal megvalósítható további függvénygenerátorok

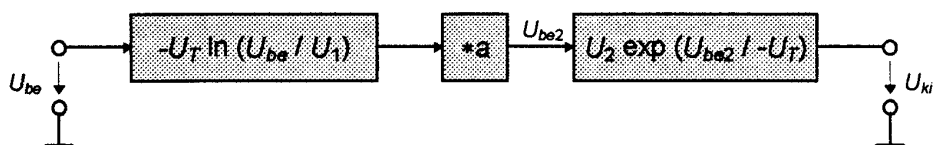
Logaritmikus és exponenciális függvénygenerátorral több egyéb függvénygenerátor is megvalósítható, például négyzetre emelő, hatványozó, gyökvonó, sőt szorzó és osztó áramkörök is. E két függvénygenerátor segítségével a megvalósítandó műveletet 'eggyel egyszerűbb' műveletre vezethetjük vissza. A bemeneti feszültség logaritmusát képezve hatványozás (gyökvonás) helyett csak egy állandóval való szorzást (osztást) kell elvégeznünk, majd az így kapott jelet egy exponenciális függvénygenerátorra vezetünk. Két feszültség összeszorozása (osztása) helyett pedig a két tényező logaritmusának összegét (különbségét) vezetjük exponenciális függvénygenerátorra. Az ilyen típusú függvénygenerátorok készítésének meg-

könnyítésére kapható olyan integrált áramkör, mely már eleve tartalmaz egy-egy logaritmikus és exponenciális függvénygenerátort.

Ha  $x > 0$ , akkor az  $y = x^a$  **hatványfüggvény** ( $0 < a < 1$  estén **gyökfüggvény**) megvalósítására a következő azonosságot használjuk fel:

$$x^a = [\exp(\ln x)]^a = \exp(a \ln x).$$

A kapcsolás elvi elrendezését a 23. ábra mutatja.



23. ábra

A második műveleti blokkot (tehát az állandóval való szorzást, azaz a hatványkitevő beállítását)  $a > 1$  esetén az 5.1 alatti műveleti erősítő kapcsolással,  $a < 1$  esetén pedig feszültségosztóval realizálhatjuk. A kimeneti feszültség:

$$U_{ki} = U_2 \exp\left(\alpha \frac{-U_T \ln(U_{be}/U_1)}{-U_T}\right),$$

ebből pedig

$$U_{ki} = U_2 \left(\frac{U_{be}}{U_1}\right)^a = c(U_{be})^a$$

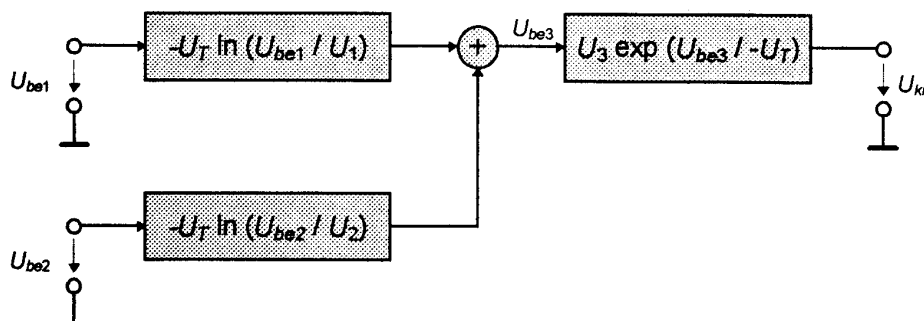
ahol  $U_1$  a logaritmálóra,  $U_2$  pedig az exponenciális függvénygenerátorra jellemző állandó. Az előző két pontban tárgyalt kapcsolások esetén mindkettő értéke az  $I_{ES}R_1$  képlettel számítható, értéküket – ha lehet – az adott feladathoz célszerű illeszteni.

A kapcsolás  $a = 2$  értékkel természetesen **négyzetreemelő** áramkört ad,  $a = 0,5$  értékkel pedig **négyzetgyökvonó** áramkört kapunk. Természetesen mindkét esetben tekintettel kell lenni a  $c$  konstansra is.

Ha  $x_1, x_2 > 0$ , akkor az  $y = x_1 x_2$  **szorzatfüggvény** megvalósítására a következő azonosságot használjuk fel:

$$x_1 x_2 = \exp(\ln x_1 + \ln x_2).$$

A kapcsolás elvi elrendezését a 24. ábra szemlélteti.



24. ábra

A kimeneti feszültség:

$$U_{ki} = U_3 \frac{U_{be1}}{U_1} \frac{U_{be2}}{U_2} = c U_{be1} U_{be2}.$$

Ha az összeadás helyett különbségképzést végzünk, akkor az

$$\frac{x_1}{x_2} = \exp(\ln x_1 - \ln x_2)$$

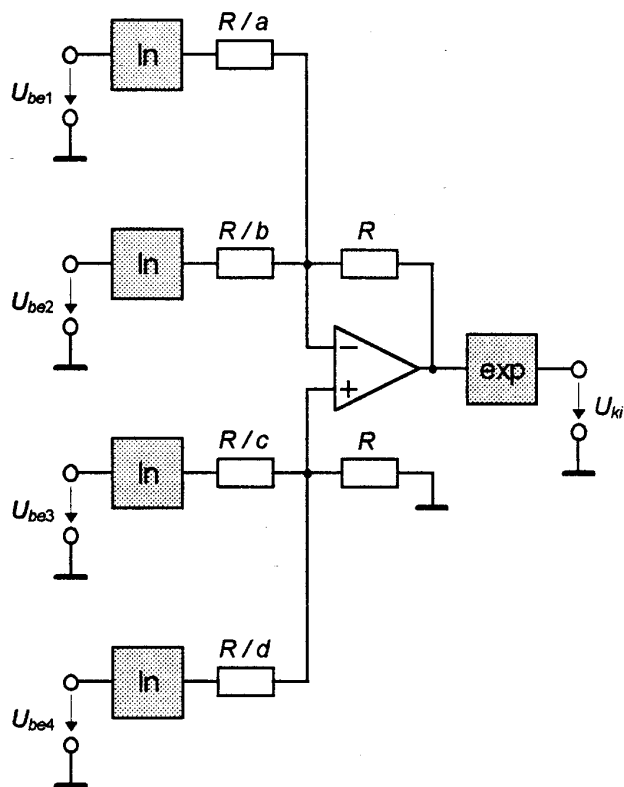
azonosság szerint a kimeneti feszültség:

$$U_{ki} = U_3 \frac{U_{be1}/U_1}{U_{be2}/U_2} = c \frac{U_{be1}}{U_{be2}}$$

azaz **hányadosfüggvényt** (osztóáramkört) kapunk.

A 25. ábra egy praktikus, szorzásra, osztásra, hatványozásra, és gyökvonásra egyaránt használható univerzális áramkör blokkvázlatát mutatja. Kimeneti feszültsége a fentiek alapján:

$$U_{ki} = c \frac{(U_{be3})^c (U_{be4})^d}{(U_{be1})^a (U_{be2})^b}$$



25. ábra

A bemeneti feszültség minden kapcsolásnál természetesen csak pozitív lehet a logaritmálók miatt.

#### 6.1.4 Szinusz- és koszinuszfüggvény-generátor

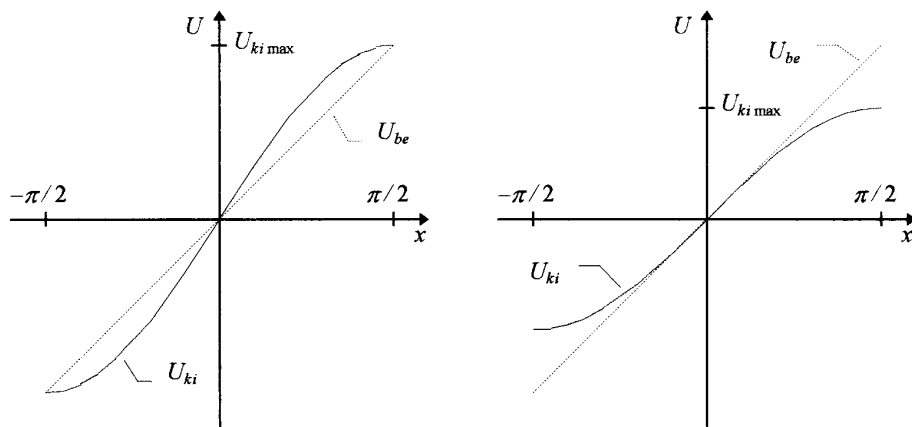
Az  $y = \sin x$  kapcsolatot megvalósító **szinuszfüggvény-generátor** tárgyalása előtt meg kell állapodnunk a be- és kimeneti feszültségek jelentésében. Az  $x$  változó értékét  $-\pi/2$  és  $\pi/2$  közötti értékekre korlátozzuk. Ez a függvénynek egy olyan monoton növvő szakasza, melynek lefutása a függvény egészét jellemzi. Ezen  $x$  értékeknek feleltessük meg az  $U_{be}$  feszültség  $-U_{be \max}$  és  $U_{be \max}$  közötti értékeit, az  $y$  változó  $-1$  és  $1$  közötti értékeit pedig reprezentálják az  $U_{ki}$  feszültség  $-U_{ki \max}$  és  $U_{ki \max}$  közötti értékei. Tehát

$$x = \frac{\pi}{2} \frac{U_{be}}{U_{be \max}} \quad \text{és} \quad y = \frac{U_{ki}}{U_{ki \max}}$$

Ezekkel a feltételekkel a kimeneti feszültség:

$$U_{ki} = U_{ki \max} \sin\left(\frac{\pi}{2} \frac{U_{be}}{U_{be \max}}\right).$$

Míg az  $U_{be \max}$  értéke egy-egy feladatban kötött (a bemenetre adott jel egy tulajdonsága), addig az  $U_{ki \max}$  értéke többféleképpen is megválasztható. Az  $U_{ki \max} = U_{be \max}$  választást szemlélteti a 26. ábra első grafikonja. Más esetben célszerű lehet  $U_{ki \max}$  értékét  $2U_{be \max}/\pi$  értékűre választani, mert ekkor a nullpont közelében  $U_{ki} = U_{be}$ . Ezt az esetet mutatja a második grafikon.



26. ábra

Színuszos függvénygenerátor építésére sajnos nem igazán lehet a logaritmi-  
kus és az exponenciális függvénygenerátorokhoz hasonlóan egy (az adott függvény  
szerinti) *fizikai jelenséget* kihasználni. Olyan rendszer viszont létezik, amely a  $\sin x$   
függvényt valósítja meg. (A két tranzisztorból álló differenciálerősítő ágáramainak  
különbsége arányos a bemeneti feszültség  $\sin x$ -ával.) A  $\sin x$  függvény kis  $x$  értékek-  
nél a  $\sin x$  függvényhez hasonló menetű. A közelítés jósága a bemeneti feszültség  
csúcserősségétől függ. Csak egy adott  $U_{be \max}$  érték esetén ideális a közelítés.

A másik módszer a szinuszfüggvény *hatványsorán* alapul:

$$\sin x = x - \frac{1}{3!}x^3 + \frac{1}{5!}x^5 - \frac{1}{7!}x^7 + \dots$$

A  $-\pi/2 \leq x \leq \pi/2$  értelmezési tartományban közelítsünk csak az első két taggal:



$$\sin x \approx x - \frac{1}{6}x^3$$

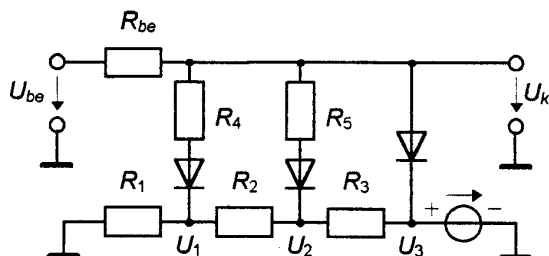
Minimális hibára törekedve kismértékben változtassuk meg az együtthatókat:

$$\sin x = 0,9825x - 0,1402x^3.$$

Ez a közelítés hibátlan az  $x = 0, \pm 0,9615$  és  $\pm \pi/2$  helyeken. A hiba sehol sem éri el az amplitúdó 0,58 % -át, sőt az átlagos hiba csak 0,08 %.

A fenti képletben előforduló összes műveletet (a hatványozást és a súlyozott különbségképzést) meg tudjuk valósítani az eddig megismert áramkörökkel is, de a köbre emelés a továbbiakban megismert analóg szorzók segítségével is realizálható.

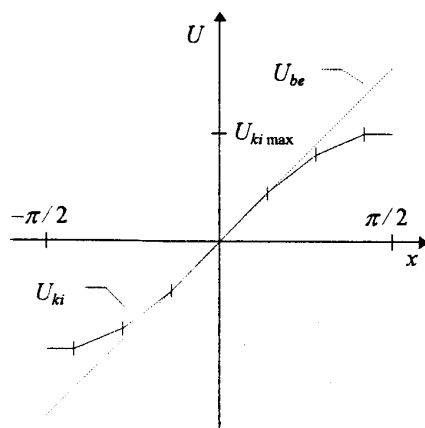
A harmadik módszer azon alapul, hogy olyan áramkört is használhatunk, melynek az erősítése a bemeneti feszültség kis értéke estén 1, nagyobb feszültségeknél pedig a megfelelő mértékben egyre csökken (lásd az 26. ábra második grafikonját). Az ilyen áramkörök működésének alapja a *töréspontos* vagy *törtvonalas* közelítés. A működési tartományt több különböző meredekségű szakaszra osztjuk. Ez olyan, diódákat is tartalmazó feszültségosztó hálózattal valósítható meg, amelynek egyes részei csak akkor éreztetik hatásukat, ha a bemeneti feszültség meghalad egy adott értéket. Ilyen a 27. ábra kapcsolása is.



27. ábra

Az  $R_1, R_2, R_3$  ellenállások jobboldali kivezetésein rendre  $U_1 < U_2 < U_3$  feszültségek mérhetők. Kis bemeneti feszültség esetén minden dióda zárva van, és  $U_{be} = U_{ki}$ . Ha a bemeneti feszültség meghaladja az  $U_1 + U_D$  értéket ( $U_D$  a dióda nyitófeszültsége), az első dióda nyitni kezd, ezáltal  $R_4$  és  $R_1$  terhelésén lép fel (az  $R_{be}$  ellenállással feszültségosztót alkotnak), a kimeneti feszültség lassabban nő, azaz a feszültségnövekedés meredeksége csökken. Ha a bemeneti feszültség az  $U_2 + U_D$  értéket is meghaladja, akkor a második dióda nyitásával a kimeneti feszültség nö-

vekedése tovább lassul, a meredekség még inkább csökken. Az utolsó dióda (hasonló módon) határozza meg a kimeneti feszültség maximumát azáltal, hogy a meredekséget közel nullára csökkenti (Ha  $U_{be} > U_3 + U_D$ , akkor  $U_{ki} \approx U_3 + U_D$ ). Ez az elrendezés persze csak pozitív bemeneti feszültségek esetén működik, de ha kiegészítjük egy szimmetrikusan felépített hálózatrésszel, melyben az ottani feszültséggenerátor illetve a diódák polaritása megfordul, akkor a teljes  $-\pi/2$  és  $\pi/2$  közötti tartomány használható. Az  $R_{be}$ ,  $R_4$ ,  $R_5$  ellenállások megkettőzésére nincs szükség. A feszültségtartományt  $2 \times 3$  törésponttal (elméletileg egyenes) szakaszokra bontottuk. Az eredményt a 28. ábra szemlélteti. A töréspontok (és az alkatrészek) számának növelésével finomítható az eredmény.



28. ábra

Tekintetbe véve, hogy a diódák nem hirtelen nyitnak, hanem fokozatosan (exponenciális jelleggel), és hogy a hálózat egyes részei is hatnak egymásra, a törtevonalak közötti átmenet az elméletileg várhatónál simább lesz. A hálózat elemeinek helyes méretezésével már kevés diódával is csak csekély hiba adódik. Hogy a kimenetre kapcsolt berendezés terhelő hatása ne rontsa le a pontosságot, a hálózat kimenetére feszültségkövető (de 1-től különböző erősítésű erősítő is) kapcsolható.

Az  $y = \cos x$  kapcsolatot megvalósító **koszinuszfüggvény-generátor** tárgyalása előtt itt is tisztáznunk kell a be- és kimeneti feszültségek jelentését. Az  $x$  változó értékét 0 és  $\pi$  közötti értékekre korlátozzuk. Ez a függvénynek egy olyan monoton csökkenő szakasza, melynek lefutása a függvény egészét jellemzi. Ezen  $x$

értékeknek feleltessük meg az  $U_{be}$  feszültség 0 és  $U_{be \max}$  közötti értékeit. Az  $y$  változó értelmezése megegyezik a szinuszfüggvény-generátor estén megtárgyalttal.

Tehát

$$x = \pi \frac{U_{be}}{U_{be \max}} \quad \text{és} \quad y = \frac{U_{ki}}{U_{ki \max}}$$

Ezekkel a feltételekkel a kimeneti feszültség:

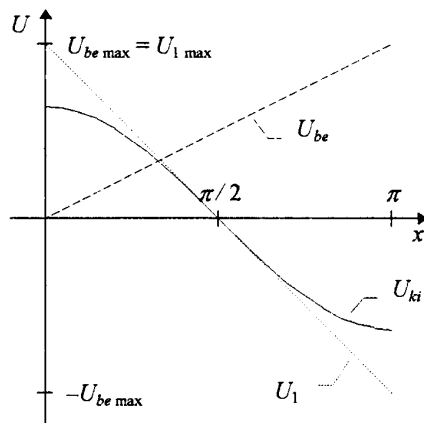
$$U_{ki} = U_{ki \max} \cos\left(\pi \frac{U_{be}}{U_{be \max}}\right)$$

Természetesen az  $U_{ki \max}$  értéke itt is többféleképpen megválasztható.

Ha előállítunk egy

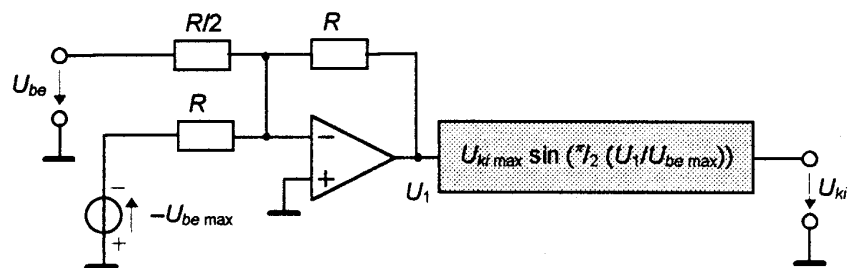
$$U_1 = U_{be \max} - 2U_{be}$$

értékű segéd feszültséget, és ezt egy szinuszfüggvény-generátor bemenetére vezetjük, akkor az adott tartományban a bemeneti feszültség koszinuszát kapjuk. A jelek alakulását a 29. ábra szemlélteti.



29. ábra

Tehát a koszinuszfüggvény-generátor előállítható egy súlyozott összeadó és egy szinuszfüggvény-generátor segítségével. A kapcsolási elrendezést a 30. ábra szemlélteti.



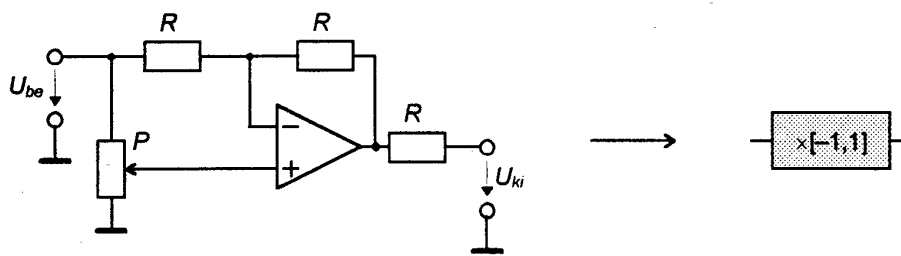
30. ábra

### 6.1.5 Változtatható függvénygenerátor

A változtatható függvénygenerátor feladata egy  $x$  változó valamely tetszőleges  $y = f(x)$ , egyértelmű függvényének közelítése poligonon. A szinuszfüggvénygenerátor tárgyalása során már megismerkedtünk egy olyan hálózattal, mely a kívánt függvényt törtvonalakkal közelítette. Az univerzális, változtatható függvénygenerátorok is előfeszített diódákat használnak a töréspontok előállítására, de nem meghatározott feladat ellátására készülnek, hanem a beállíthatóság a fő szempont. Az ilyen áramkörök több azonos felépítésű szegmenst tartalmaznak, melyekkel az egyes karakterisztika-szakaszok töréspontjának helye és meredeksége külön-külön szabályozható. Az ilyen szegmensek kimenőjelének összegeként áll elő a kívánt poligon. Változtatható függvénygenerátor kialakítására több kapcsolástechnikai megoldás is lehetséges.

A bemutatott áramkör esetén az volt a fő tervezési szempont, hogy az egyes szegmensek egymásra hatása minél kisebb legyen, paramétereiket minél függetlenebbül és minél tágabb határok között lehessen beállítani. A függvénygenerátor megalkotásához három építőelemet használunk fel.

Az első építőelem (31. ábra) az 5.1 alatti műveleti erősítő kapcsolás speciális esete  $n = 1$  értékkel. Erősítése a potenciométerrel  $-1$  és  $1$  között szabályozható. A kimenetre kapcsolt ellenállásnak az egyes szegmensek feszültségének összeadásában lesz szerepe. Ezt az áramkört a későbbi blokkvázlaton az ábrán látható jobboldali jellel fogjuk helyettesíteni.

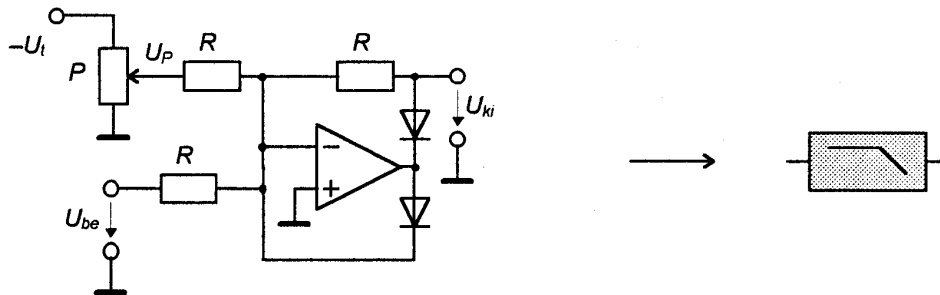


31. ábra

A második építőelem egy töréspontot valósít meg (32. ábra). Jelölje a potenciométer csuszkájáról levett negatív feszültséget  $U_P$ . Ha  $U_{be} < |U_P|$ , akkor a felső dióda zárva, az alsó pedig nyitva van. Ekkor a kapcsolás úgy működik, mint egy feszültségkövető, melynek bemenetét földre kötötték, tehát a kimeneten 0 V van. Ha  $U_{be} > |U_P|$ , akkor a felső dióda van nyitva, az alsó pedig zárva. Ekkor a kapcsolás úgy működik, mint egy fázisfordító összegző. A kimeneti feszültség:

$$U_{ki} = -(U_P + U_{be}) = |U_P| - U_{be}.$$

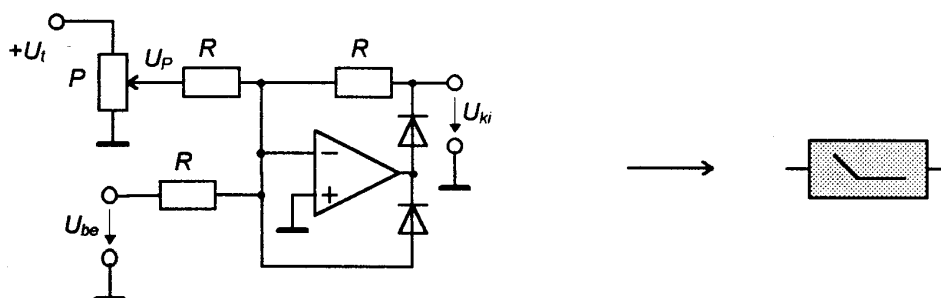
Összefoglalva: amíg a bemenet feszültsége el nem ér egy pozitív feszültséghatárig, a kimeneti feszültség 0 V, ám e fölött csökkenő negatív értékeket vesz fel. Az első szakasz meredeksége 0, a másodiké  $-1$ , a töréspont helye ( $|U_P|$ ) a potenciométerrel beállítható. Az ábra jobb oldalán itt is a kapcsolás szimbolikus jele van feltüntetve.



32. ábra

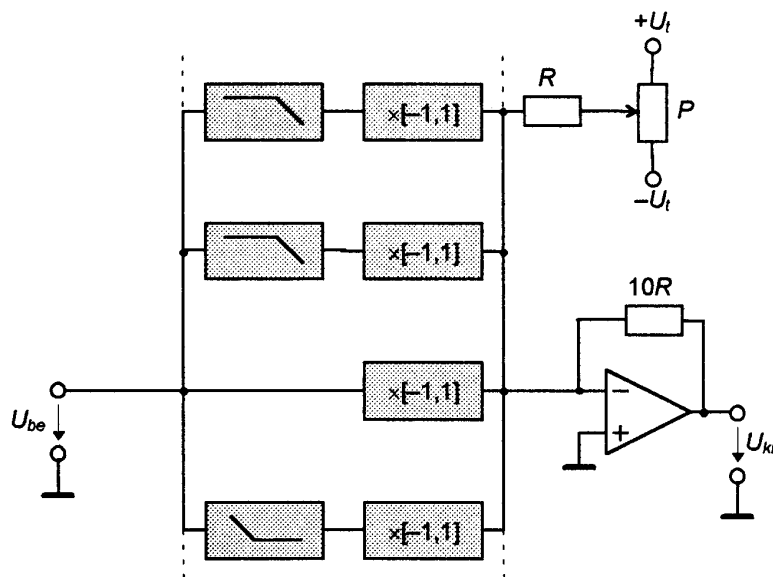
A harmadik építőelem szintén egy töréspontot valósít meg (33. ábra). Működési elve azonos az előző kapcsolásával, de fordított polaritásokkal dolgozik ( $U_P$  pozitív, és a diódák kapcsai fel lettek cserélve). Itt is két szakaszra bomlik a karakterisztika. Az első szakasz meredeksége  $-1$ , a másodiké 0, a töréspont helye ( $-U_P$ )

potenciométerrel beállítható. Az ábra jobb oldalán itt is a kapcsolás szimbolikus jele látható.



33. ábra

Ezekből az építőelemekből összerakott változtatható függvénygenerátor blokkvázlatát a 34. ábra mutatja. A magányos, konstanssal való szorzást végző áramkör határozza meg a nullátmenet körüli meredekséget. A felette és alatta látható ágak egy-egy beállítható paraméterű rész-szegmenst adnak. Az alsó ág negatív, a felső ágak pedig pozitív bemeneti feszültség esetén hatásosak. Minden ágra igaz, hogy az első építőelem potenciométerével szabályozható a töréspont helye, a második potenciométerével pedig a lejtős szakasz meredeksége állítható be  $-1$  és  $1$  között. A  $P$  potenciométerrel tetszőleges egyenfeszültség adható az eredményhez. A  $P$ -ről levett feszültség és a konstanssal szorzó áramkörök is mind-mind azonos  $R$  értékű ellenállással kapcsolódnak a műveleti erősítő invertáló bemenetére, a visszacsatoló ellenállás pedig  $10R$  értékű. Így az erősítő a szegmens-feszültségek összegének  $-10$  szeresét képezi. Természetesen tetszőleges számú további pozitív és negatív szegmens építhető a kapcsoláshoz. Végző soron minden ág egy beállítható kezdőpontú, legfeljebb  $\pm 10$  meredekségű szakaszt ad az eredményhez.



34. ábra

## 6.2 Analóg szorzók

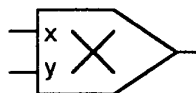
### 6.2.1 Az analóg szorzó áramkör

Az analóg szorzó áramkörök két, időben egymástól függetlenül változó feszültség szorzatát állítják elő. Ha a két bemenet feszültségét  $U_x$  és  $U_y$  jelöli, akkor a kimeneti feszültség:

$$U_{ki} = \frac{U_x U_y}{E}$$

ahol  $E$  skálatényező az analóg szorzó áramkörre jellemző, feszültség dimenziójú konstans. Értékét úgy kell megválasztani, hogy az előforduló szélsőséges bemeneti feszültségértékek esetén se keletkezzen túlsordulás a kimeneten.

Az analóg szorzó rajzjelének kérdésében a szakirodalom sajnos nem egységes. Az általunk használt jelet a 35. ábra mutatja be.



35. ábra

Az analóg szorzó áramkörök realizálására többféle módszer is kínálkozik.

Egyet már megismertünk: a logaritmikus és exponenciális függvénygenerátor segítségével megvalósítottat. Az egyéb kapcsolástechnikák ismertetésére e dolgozatban nem nyílik mód, de akárcsak a műveleti erősítők estén, az analóg szorzók alkalmazásához sem szükséges a belső felépítésük pontos ismerete. Csupán felsorolásszinten megemlítenék néhány további módszert: pulzusszélesség / magasság moduláció, meredekségszorzó, vezérelt áramosztó, vezérelt feszültségosztó. E módszerek részletes tárgyalása megtalálható a szakirodalomban<sup>2</sup>.

A már említett exponenciális-logaritmikus módszer hátránya az úgynevezett egy síknegyedes működés. Ez azt jelenti, hogy mindkét bemeneti feszültség csak egyféle előjelű (unipoláris) lehet. Az adott esetben mindkettő pozitív kell hogy legyen. Persze más kapcsolástechnikával építhetők két síknegyedes (az egyik bemeneti feszültség kétféle előjelű, bipoláris is lehet), sőt négy síknegyedes (mindkét bemenet bipoláris) analóg szorzó áramkörök is.

Az **ideális analóg szorzó** bemeneti ellenállása végtelen, kimeneti ellenállása zérus, skálátényezője független a bemenetek feszültségétől és frekvenciájától, és ha akármelyik bemenete zérus feszültségű, akkor a kimenete is az, más szóval az áramkör ofszetmentes.

A **valóságos analóg szorzó** áramkörök esetén a gyakorlat szempontjából az ideálistól való legnagyobb eltérés az ofszetfeszültségek terén mutatkozik. A gyakorlatban minden feszültségre szuperponálódik egy kis hibafeszültség, tehát általános esetben:

$$U_{ki} + U_{ki0} = \frac{1}{E} (U_x + U_{x0})(U_y + U_{y0}).$$

Ha valamelyik bemenet feszültsége zérus, a kimeneten csak akkor lehet szintén 0 V, ha mindhárom ofszetfeszültség külön-külön elhanyagolhatóan kicsi. Ezek kiegyenlítésére az analóg szorzó áramkörök három nullpontbeállító bemenettel is rendelkeznek. A beállítás a következő lépésekben történik:

- Az  $x$  bemenetre nullát adva  $y$  feszültségét változtatjuk. Az  $x$  bemenethez tartozó nullpont-kiegyenlítőt addig hangoljuk, míg a kimenet feszültsége független nem

---

<sup>2</sup> [1] 2.7.2 pont, [4] 8.1 – 8.5 pontok, [6] 10.8 pont, [7] 13. és 14. oldal, [9] 12.8.1 – 12.8.3 pontok.



lesz  $y$ -től. Ekkor  $U_{x0} = 0$ . Az  $y$  feszültség változtatásának egyszerű módja, ha egy szinuszos jelgenerátorral hajtjuk meg. Ilyenkor a legkisebb amplitúdójú kimeneti feszültség esetén helyes a beállítás.

- A két bemenet szerepét felcserélve ugyanilyen módszerrel az  $U_{y0}$  hibafeszültséget állítjuk nullára.
- Mindkét bemenetre nullát adva a kimenethez tartozó nullpontbeállító szervvel nullára állítjuk a kimeneti feszültséget. Ezzel  $U_{ki0} = 0$ .
- Legtöbbször a skálatényező előírt értékre történő beállítására is szükség van. Ez általában az egyik bemenet feszültségének előzetes leosztásával történik.

Meg kell említeni, hogy kereskedelmi forgalomban nagyon sokféle analóg szorzó kapható, melyek további speciális be- és kimenetekkel rendelkezhetnek<sup>3</sup>. Gyakorlati felhasználásuk előtt ezért feltétlenül tájékozódjunk az adott integrált áramkör tulajdonságairól, lehetőségeiről. Bár a kapható IC-k legtöbbször négy síknegyedes működésű, ellenőrizzük ezt is. Ezen kívül el kell mondani, hogy léteznek olyan áramkörök is, amelyek kimenete fázisfordító, amit úgy is értelmezhetünk, hogy a skálatényező negatív.

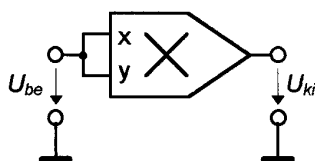
### 6.2.2 Analóg szorzót használó műveleti egységek

Az analóg szorzót használó műveleti egységek közül a legegyszerűbb a **négyzetre emelő** áramkör, amelyet úgy kapunk, hogy az analóg szorzó két bemenetét összekötjük. A négyzetre emelő kapcsolást az 36. ábra szemlélteti. Kimeneti feszültsége:

$$U_{ki} = \frac{(U_{be})^2}{E}$$

---

<sup>3</sup> Néhány típus: AD 436, AD 530 ... 534, AD 539, ICL 8013, LH 0094, MC 1594L, MC 1595L, MC 1596G, MPY 100, RC 4200.

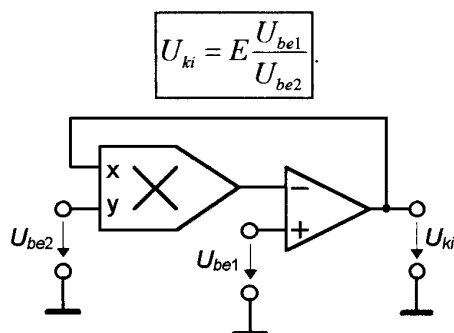


36. ábra

Ha az analóg szorzó áramkört egy műveleti erősítő negatív visszacsatoló ágába helyezzük, **osztó** áramkört kapunk (37. ábra). A negatív visszacsatolás hatására a műveleti erősítő kimeneti feszültsége úgy áll be, hogy a bemenetein azonos legyen a feszültség:

$$U_{be1} = \frac{U_{be2} U_{ki}}{E}$$

Ezt átrendezve megkaphatjuk a kimeneti feszültséget:



37. ábra

A kapcsolás csak addig működik helyesen, amíg  $U_{be2}$  elegendően nagy pozitív feszültség. A kis pozitív feszültségeknél ugyanis túlvezérlődik a kapcsolás, negatív feszültségeknél pedig a negatív visszacsatolásból pozitív lesz.

Ha a négyzetre emelő áramkört helyezzük egy műveleti erősítő negatív visszacsatoló ágába, akkor **négyzetgyökvonó** áramkört kapunk (38. ábra). A negatív visszacsatolás hatására a műveleti erősítő kimeneti feszültsége:

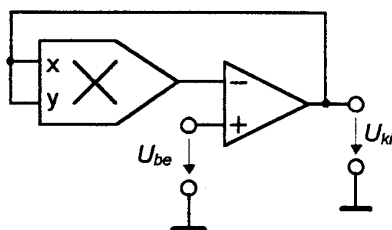
$$U_{be} = \frac{(U_{ki})^2}{E}$$

Ebből a kimeneti feszültség:

$$U_{ki} = \sqrt{E U_{be}}$$

A bemeneti feszültség itt is csak pozitív lehet. Ráadásul a kimeneten sem lehet

(még rövid időre sem) negatív feszültség, ami pedig például bekapcsolásnál előfordulhat. Negatív kimenő jelnél ugyanis a négyzetre emelő miatt pozitív visszacsatolás keletkezik, a kimenet egyre negatívabb lesz, míg el nem éri a negatív kivezérlehetőségi határt. Ezt a jelenséget reteszelőedésnek (kiakadás, latch up) hívjuk. A reteszelőődött áramkör normális működése ilyenkor csak a visszacsatoló hurok megszakításával állítható vissza. A gyakorlatban ezért az áramkör csak kiegészítésekkel használható (például a műveleti erősítő kimenete és az  $U_{ki}$  pont közé kapcsolt megfelelő polaritású diódával).

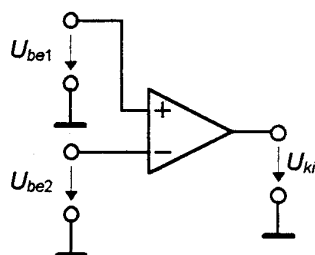


38. ábra

### 6.3 Egyéb speciális nemlinearítások

#### 6.3.1 Komparátorok

A komparátor két feszültség összehasonlítására alkalmas áramkör. A legegyszerűbb műveleti erősítős komparátort a 39. ábra szemlélteti.



39. ábra

Működése azon alapul, hogy a műveleti erősítő kimeneti feszültsége a nagy differenciális erősítés miatt már kis bemeneti feszültségkülönbség esetén is eléri az  $U_{ki\ max}$  pozitív, vagy az  $U_{ki\ min}$  negatív kivezérlehetőségi határt. A túlvezérlődés feltétele matematikai alakban:

$$A(U_{be1} - U_{be2}) \geq U_{ki \max} \text{ illetve } A(U_{be1} - U_{be2}) \leq U_{ki \min}.$$

Átrendezve, és figyelembe véve, hogy  $A$  értéke nagy:

$$U_{be1} \geq U_{be2} + \frac{U_{ki \max}}{A} \approx U_{be2} \text{ illetve } U_{be1} \leq U_{be2} + \frac{U_{ki \min}}{A} \approx U_{be2}.$$

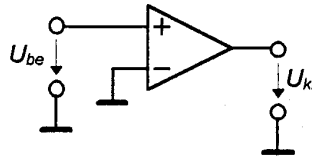
Tehát a közelítő összefüggés a kimeneti feszültségre:

$$U_{ki} = \begin{cases} U_{ki \max} & \text{ha } U_{be1} \geq U_{be2} \\ U_{ki \min} & \text{ha } U_{be1} \leq U_{be2} \end{cases}$$

Sokféle egyéb komparátor-kapcsolás is létezik<sup>4</sup>. Adott esetben követelmény lehet más kimeneti feszültségszint. Bár komparátorként hagyományos műveleti erősítőket is használhatunk, mégis léteznek kifejezetten visszacsatolás nélküli üzemre tervezett, gyors működésű integrált komparátorerősítők is<sup>5</sup>. Ezek között olyanok is találhatóak, melyek kimeneti feszültségszintjei digitális áramkörök feszültségszintjeihez illeszkednek (pl. TTL logikai szintekhez), hiszen a komparátor gyakori összekötő tag az analóg és a digitális építőelemek között (pl. fontos része az A/D konvertereknek).

### 6.3.2 Előjel függvény

Az előjel függvény (signum függvény) a legegyszerűbben egy olyan komparátorral valósítható meg, melynek invertáló bemenetét földre kötöttük. Ez mutatja be a 40. ábra.



40. ábra

A kimeneti feszültség:

$$U_{ki} = \begin{cases} U_{ki \max} & \text{ha } U_{be} \geq 0 \\ U_{ki \min} & \text{ha } U_{be} \leq 0 \end{cases}$$

<sup>4</sup> További példák találhatóak a [3] forrás 6.11 pontja alatt.

<sup>5</sup> Pl.  $\mu A$  710,  $\mu A$  734,  $\mu A$  760, LM 111, LM 211, LM 311, LM 339, LM 393, NE 529.

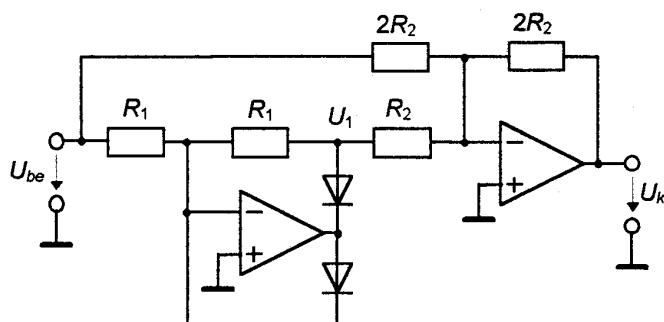
Ha a bemenetek szerepét felcseréljük (a jel az invertáló bemenetre kerül és a nem invertáló bemenetet földeljük), akkor a hozzárendelés megfordul. Ha más kimeneti feszültség szint a követelmény (pl.  $\pm 1$  V), akkor kimeneti feszültség értékét csökkenteni kell (pl. feszültségosztóval, Z-diódás stabilizálással, stb.).

### 6.3.3 Abszolút érték

Az abszolút érték függvény megvalósítható a korábban tárgyalt változtatható függvénygenerátor segítségével. Két szegmensre van szükség: egy negatív bemeneti feszültség esetén hatásos  $-1$  meredekségű, és egy pozitív bemeneti feszültség esetén hatásos  $+1$  meredekségű részre. Mindkét szegmens töréspontja  $0$  V-nál kell legyen.

Egyszerűbb az 41. ábra kapcsolása. A második műveleti erősítő fázisfordító összegzőként működik:

$$U_{ki} = -(U_{be} + 2U_1).$$



41. ábra

Az első műveleti erősítő működése azonos a változtatható függvénygenerátor tárgyalásánál látottakkal. Kimeneti feszültsége:

$$U_1 = \begin{cases} -U_{be} & \text{ha } U_{be} \geq 0 \\ 0 & \text{ha } U_{be} \leq 0 \end{cases}$$

Az utóbbi két egyenlet összevetéséből adódik, hogy

$$U_{ki} = \begin{cases} U_{be} & \text{ha } U_{be} \geq 0 \\ -U_{be} & \text{ha } U_{be} \leq 0 \end{cases}$$

## 7. Gyakorlati alkalmazás

Az analóg számítástechnika elemei széles körben alkalmazhatók a gyakorlatban. Használatosak a mérés- és szabályozástechnikában, de megoldható velük sok matematikai, fizikai probléma is.

Akkor célszerű analóg számítógépet alkalmazni, ha folytonos jelek gyors, nem túl nagy pontosságú feldolgozására van szükség. A számítási pontosság általában egy százalék körüli, de különleges gonddal felépített áramkörök esetén sem jobb egy ezredrésznél. Az esetek döntő többségében azonban ez elegendő. A maximális számítási sebesség elég nagy lehet, azt jobbára a felhasznált alkatrészek határozzák meg, az elvégzendő műveletek bonyolultsága kisebb szerepet játszik. Ellentétben a digitális számítógépekkel, az integrálás például éppen olyan egyszerűen és gyorsan elvégezhető, mint az összeadás. Analóg számítógéppel gyakran olyan problémák is "egyszerűnek" számítanak, melyeknek nincs egzakt matematikai megoldásuk, vagy azok csak nagyon bonyolult úton számíthatók. Például az  $1/\sqrt{x^3+1}$  függvény elemi úton nem integrálható, analóg számítógéppel viszont könnyen elvégezhető e függvény integrálása is.

Ha egyes mennyiségeken végzendő számítások során a keresett eredmény nem függ az adott mennyiségek differenciálhányadosaitól, akkor a probléma analóg számítógépes megoldása egyszerűen a megfelelő műveleti egységeknek az adott képlet szerinti összeállításából áll. Ellenben ha differenciálegyenleteket kell megoldanunk, akkor figyelembe kell venni, hogy az integrátorok stabilabb működésűek, pontosabbak mint a differenciáló kapcsolások, ezért a számításokhoz az előbbieket célszerű alkalmazni. Következésképpen a differenciálegyenleteket előbb át kell írunk integrálegyenletekké, hogy azok csak integrálást tartsanak. Ezek után a számítógép műveleti egységeivel már realizálhatjuk a kapott integrálegyenletet.

Az analóg számítógépben a meghatározandó  $y(x)$  mennyiségnek a modellezés során az  $U(t)$  feszültséget feleltetjük meg. Persze a berendezés nem képes tetszőleges feszültség- és időtartományokban dolgozni. Ha a feldolgozható tartományokat túllépjük, akkor hamis eredményhez jutunk. Az eredeti rendszert leíró

egyenletek 'léptékét' (és dimenzióit) úgy kell átalakítanunk, hogy az az analóg számítógép számára feldolgozható legyen, tehát a feszültség- és időintervallumokat megfelelően korlátoznunk kell. Az  $x, y$  változókról  $\tau$  és  $U_0$  választható paraméterek segítségével az alábbi módon térünk át  $t$  időre és  $U$  feszültségre:

$$t = \tau x, \text{ és } U = U_0 y.$$

Az  $U_0$  paramétert úgy kell megválasztani, hogy a feszültség minden pillanatban és minden ponton a műveleti erősítők által feldolgozható (a tápfeszültségek köztinél némileg szűkebb) tartományban maradjon, de azt minél jobban kitöltse.

A  $\tau$  paraméter választása attól függ, hogy milyen gyorsan zajló számítási folyamatot szeretnénk. Nagyon kis értéket (gyors számítás) nem választhatunk, mert a műveleti egységek nem képesek tetszőlegesen gyorsan változó jelek feldolgozására. Túl nagy  $\tau$  (lassú számítás) esetén pedig többek között túl nagy kapacitásokat kellene alkalmazni. Értéke célszerűen az integrátorok időállandója lehet.

Ha már összeállítottuk az adott matematikai egyenletet reprezentáló áramköröket, akkor gondoskodjunk a megfelelő bemeneti értékeket (függvényeket) reprezentáló feszültségekről, és csatlakoztassuk az eredményeket rögzítő műszereket. Integrálás esetén állítsuk be a kezdeti feltételeket. A mérést a kapcsolás minél több pontján célszerű elvégezni, hogy az esetleges feszültségtúlcsordulásokat észlelhessük. Ügyeljünk arra, hogy a nagy kimeneti ellenállású jeleket csak elválasztó erősítőn keresztül kössük egy másik egység bemenetére.

Az alább feldolgozott gyakorlati példánál a matematikai tárgyalás után teljes kapcsolási rajz helyett mindenütt csak blokkvázlat szintű összeállítási rajzot adok, az analóg számítógép minden komplett műveleti egységét csupán egy-egy jellel fogjuk szimbolizálni.

### **7.1 Közönséges egyenletek megoldása**

Közönséges egyenletek alatt a nem differenciálegyenleteket értem. Ekkor az eredmény nem függ az adott mennyiségek differenciálhányadosaitól, csak maguktól a mennyiségektől. Az analóg számítógép esetében ez azt jelenti, hogy a kimeneti feszültséget csak a bemeneti feszültségek pillanatnyi értéke határozza meg, a rendszerre nincs hatással annak korábbi állapota.

Ha a független változó eredeti fizikai jelentése éppen a  $t$  idő, akkor az eredmény is ugyanennek függvényeként adódik, nincs szükség a  $\tau$  paraméter bevezetésére, a feladat megoldása 'valódi' időmértékkel történik. Nézzünk két ilyen gyakorlati példát!

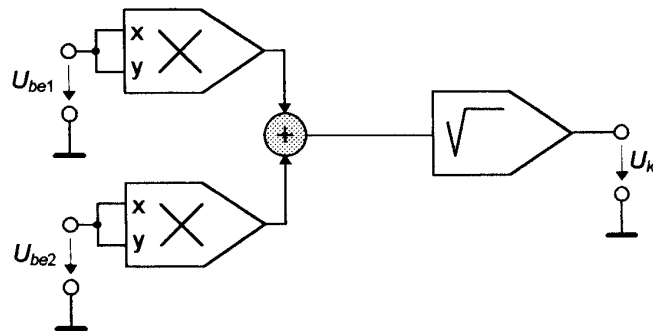
Tegyük fel, hogy két érzékelő egy tárgy Descartes-i koordinátaival arányos feszültséget szolgáltat. A feladat a tárgynak az origótól való távolságával arányos feszültség előállítása. Ez egy **vektor abszolút értékének** kiszámításának felel meg:

$$x, y, r = \sqrt{x^2 + y^2} .$$

Ezen mennyiségeknek megfelelő feszültségek:

$$U_{be1} = U_0 x, U_{be2} = U_0 y, U_{ki} = U_0 r = \sqrt{U_{be1}^2 + U_{be2}^2} .$$

Az utóbbi egyenletet reprezentáló kapcsolást a 42. ábra mutatja abban az esetben, ha az analóg számítógép tartalmaz külön gyökvonó áramkört.



42. ábra

Ha az analóg számítógép csak analóg szorzókat tartalmaz, akkor a gyökvonó áramkör a 6.2.2 pontban leírt kapcsolással (egy analóg szorzó és egy műveleti erősítő kombinációjával) helyettesítendő.

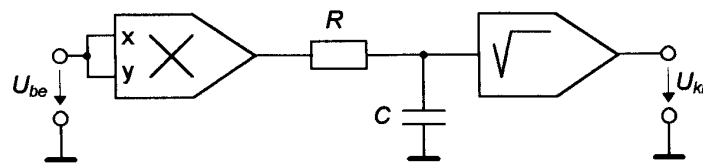
Tekintsünk egy másik példát! Egy  $U(t)$  feszültség jelalaktól független effektív értéke definíció szerint:

$$U_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U^2 dt} .$$

Most nem csak a  $\tau$  paraméterre nincs szükség, hanem  $U_0$ -ra sem. Az egyenletet



reprezentáló kapcsolást a 43. ábra mutatja<sup>6</sup>.



43. ábra

A bemeneti feszültség négyzetének átlagértékét egy egyszerű elsőfokú aluláteresztő szűrő képezi, de alkalmazhatnánk műveleti erősítővel működő integrátort is (ekkor az előjelre is figyelni kell). Mindkét esetben fontos, hogy az időállandót úgy kell megválasztani, hogy az nagyobb legyen a mérendő jelben előforduló legkisebb frekvenciájú összetevő periódusidejénél is.

## 7.2 Differenciálegyenletek megoldása

A differenciálegyenletek megoldása az analóg számítógép egyik erőssége. Egy  $n$ -ed rendű differenciálegyenlet megoldása egy  $n$  paraméterrel rendelkező görbesereg. Egy elsőrendű differenciálegyenletnél ez például egy változtatható paramétert jelent. Az analóg számítógép esetén a változó paramétereket egy-egy potenciométer forgatásával lehet megvalósítani. Oszcilloszkópos kijelzésnél gyorsan, átmenetek nélkül 'vándorolhatunk' a görbeseregben a potenciométerbeállítás módosításával. Digitális számítógéppel mindez szinte lehetetlen.

Differenciálegyenlet megoldásakor különválasztjuk a legmagasabb rendű differenciálhányadost. Ezt ismertnek feltételezve integráljuk. A módszert szükség esetén megismételve így egyre alacsonyabb rendű differenciálhányadosokhoz jutunk, és végül megkapjuk magát a keresett függvényt. Ezután a műveleti egységekből a megadott alakban összeállítjuk a differenciálegyenletet reprezentáló kapcsolást.

A módszert egy példával tehetjük szemléletessé. A másodrendű lineáris differenciálegyenlet általános alakja:

<sup>6</sup> Az effektív érték analóg számítógéppel történő mérésére további gyakorlati kapcsolások találhatók a következő művekben: [2] 240. – 241. o., [4] 9.6 pont, [9] 25.3.2 pont.

$$y'' + k_1 y' + k_0 y = f(x).$$

A fent említett módon térjünk át az  $x$  független változóról  $t$  időre:  $t = \alpha x$ . Ekkor

$$y' = \tau \dot{y}, \quad y'' = \tau^2 \ddot{y} \Rightarrow \tau^2 \ddot{y} + k_1 \tau \dot{y} + k_0 y = f(t/\tau)$$

alakot ölt az egyenlet. Most fejezzük ki a differenciálást nem tartalmazó tagokat, szorozzunk  $(-1/\tau)$ -val, és integráljunk idő szerint:

$$-\frac{1}{\tau} \int [k_0 y - f(t/\tau)] dt = \tau \dot{y} + k_1 y.$$

A baloldali kifejezés egy összegző integrátorral (vagy egy összegző és egy integráló áramkörrel) megvalósítható. A kimeneti feszültségére jellemző mennyiséget tekintjük ismertnek, és jelöljük  $z_2$ -vel:

$$z_2 = \tau \dot{y} + k_1 y.$$

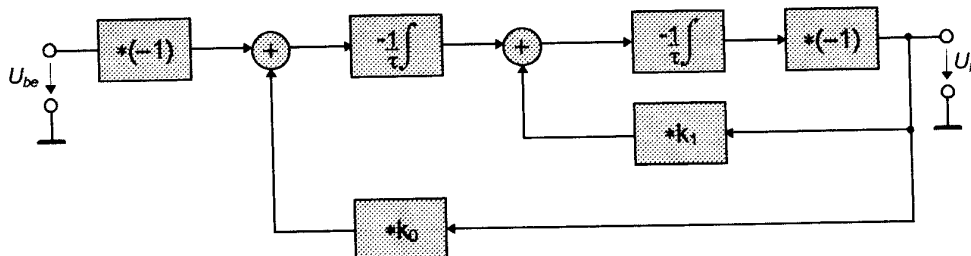
Most is fejezzük ki a differenciálást nem tartalmazó tagot, szorozzunk  $(-1/\tau)$ -val, és integráljunk idő szerint:

$$-\frac{1}{\tau} \int [z_2 - k_1 y] dt = -y.$$

A baloldali kifejezés ismét megvalósítható egy összegző integrátorral. A kimeneti feszültségére jellemző mennyiséget most is ismertnek tekintjük, és  $z_1$ -gyel jelöljük, akkor megkapjuk a keresett függvényre vonatkozó összefüggést:

$$y = -z_1.$$

A számítási műveletek menetét a fentiek alapján a 44. ábra szemlélteti. A nyolc művelet megvalósításához a gyakorlatban elég ha csak négy műveleti erősítőt használunk, hiszen az állandóval való szorzás, az összeadás, és az integrálás kapcsolástechnikailag összevonható olyan összegző integrátorrá, melynek bemeneti ellenállásai nem egyenlők.



44. ábra

A fenti gondolatmenet nem csak a másodrendű lineáris differenciálegyenletekre alkalmazható, az algoritmust követve más kapcsolás is megszerkeszthető.

Érdekessé azonban a nemlineáris problémák megoldásánál válik az analóg számítógép. Nemlinearitásokat, mint láttuk, az analóg számítógépben viszonylag egyszerűen lehet technikai elemekkel ábrázolni. A megoldást itt is hasonló elven lehet megkapni, alkalmasan kombinálva lineáris és nemlineáris egységeket az analóg számítógép programtábláján.

## **8. Analóg számítógép építése**

### **8.1 A cél**

Az analóg számítógép kapcsolásának tervezésekor az volt a fő cél, hogy lehetővé tegye az egyszerű, fizikai vonatkozású differenciálegyenletek megoldását. Mindez tükröződik a műveleti egységek megválasztásában. Törekedtem arra, hogy a műveleti egységek minél univerzálisabban legyenek használhatók. Ezen kívül fontosnak tartottam azt is, hogy a készülék minél függetlenebb legyen, saját belső vezérléssel, órajellel rendelkezzen. Tervezéskor további cél volt, hogy az analóg számítógép csak modern, kis fogyasztású alkatrészeket tartalmazzon. A fizika laborgyakorlatokon való használhatóság feltételeként ítélt meg azt, hogy a készülék csatlakoztatható legyen mind koordinátáíró berendezéshez, mind pedig oszcilloszkóphoz. A készülék számítási pontosságának fokozását nem tekintettem fő célnak, fontosabbnak ítélt meg, hogy a differenciálegyenletek szemléletes módon legyenek megoldhatók a készülékkel, hogy a berendezés egyes paramétereit széles határok közt legyenek változtathatók.

### **8.2 Az egységek ismertetése**

Az analóg számítógép kapcsolási rajzai és alkatrészlistája a függelékben találhatóak. Az áramköröket az OrCAD elvi kapcsolási rajz szerkesztő program 3.22 verziójával terveztem.

A készülék minden részegysége egyetlen fémdobozban helyezhető el. A kezelőszerveket (kapcsolókat, potenciométereket) és a műveleti egységek ki- illetve bemeneteit reprezentáló csatlakozó aljzatokat az előlapra (programtáblára) kell kivezetni. A programozás a kezelőszervek megfelelő beállításával és az adott feladat szerinti huzalozással (a csatlakozók összekötésével) történik.

A számítások eredményének megjelenítésére a konstrukció két lehetőséget is kínál. Koordinátáíró üzemmód választása esetén (S2 kapcsoló '1' helyzete) egyetlen lassan végbemenő számítási ciklust végez az analóg számítógép a START gomb (S1) megnyomása után. Oszcilloszkópos üzemmód esetén pedig (S2 kapcsoló 'N' helyzete) azonosan ismétlődő, gyors számítási ciklusokat végez a gép.

Az integrátorok időállandójának az üzemmód "sebességéhez" történő illesztését automatikusan végzi a berendezés. Az időállandók egy-egy üzemmódon belül manuálisan négy különböző értékre állíthatók. Minden integrátorra külön meghatározható (az SW1 ... SW8 kapcsolók segítségével), hogy egy cikluson belül mikor váltson a kezdeti érték beállításáról integrálásra, illetve hogy mikor váltson vissza.

### 8.2.1 Tápegység

Mivel az analóg számítógépben aktív elemként modern integrált áramköröket használunk (fet-bemenetű műveleti erősítőket, CMOS logikai áramköröket), ezenkívül nem tartalmaz relét, izzókat stb., ezért fogyasztása alacsony, így táplálása megoldható egy kisméretű, nyomtatott áramkörbe forrasztható, 3 W teljesítményű transzformátorról. A tápegység egyszerű kialakítású: egyenirányítás és szűrés után a 78L15, 79L15 integrált áramkör-páros stabilizálja a feszültséget. A 100 nF-os kerámia kondenzátorok nagyfrekvenciás szűrést végeznek, a stabilizátor IC-k gerjedésének megelőzését biztosítják. A bekapcsolásjelző áramkör úgy van kialakítva, hogy a LED csak akkor világítson, ha mindkét tápfeszültség megvan.

### 8.2.2 Órajel-generátor

Ezen áramköri részlet feladata az integrátorok vezérléséhez használt analóg kapcsolók megfelelő ütemben történő átbillentése, illetve a koordinátáiró berendezés rajzeszközének és az oszcilloszkóp elektronsugarának megfelelő pillanatban történő indítása.

A 4060-as IC-ben egy oszcillátor, és egy 14 fokozatú bináris osztólánc van integrálva. Ezt az áramkört használjuk a két alapfrekvencia előállítására. Az oszcillátorhoz tartozó alkatrészek 1 kHz körüli frekvenciára vannak méretezve. A Q10 kimeneten  $2^{10} = 1024$ -gyel osztott frekvenciát kapunk. A trimmer potenciométert úgy kell beállítani, hogy e két jel frekvenciája a lehető legjobban megközelítse az 1 Hz-et illetve az 1 kHz-et.

Az alap- és a leosztott frekvencia ezek után a 4019-es, 2-ről 1-re típusú adatválasztó egy bemenetpárjára kerül. Az IC az S2 kapcsoló egyik állásában ('1') az 1 Hz-et, a másik állásában ('N') pedig az 1 kHz-et vezeti a 4017-es ötfokozatú, Johnson-típusú 10-es osztó órajel bemenetére. A Q0-Q9 kimenetek mindegyikén

tízzel osztott frekvenciájú impulzussorozat keletkezik, az előző kimenethez képest mindig egy órajelnyi késleltetéssel, tehát az egyes kimenetek sorban egymás után kerülnek egy-egy órajel-periódusnyi időre magas szintre.

Az utolsó kimenet rá van kötve az adatválasztó egyik bemenetére, ami a kapcsoló '1' állásában ezt a jelet a számláló engedélyező bemenetére juttatva letiltja a további számlálást, ezért csak egy számlálási ciklus fut le. A 'START' nyomógomb megnyomásával a számláló alaphelyzetbe hozható, aminek hatására a Q0 kimenet magas szintre kerül, a többi pedig (köztük a leállást okozó Q9 is) alacsonyra, ezáltal új ciklus indul. A másik állásban az engedélyező bemenet mindig alacsony szinten van: elindulhat a következő ciklus is, a számlálás folyamatos. Az adatválasztó egy további egysége egy olyan jelet (1-N) állít elő az integrátorok vezérlésére, amelyik megmutatja, hogy a rendszer melyik állapotban van: 1 ciklusos, vagy folyamatosan számláló üzemmódban. Az alábbi táblázat az egyes jelek állapotát foglalja össze:

kapcsolóállás	számlálás	CLK	ENA	1-N
1	1 ciklus	1 Hz	= Q9	L
N	folytonos	1 kHz	$\overline{L}$	H

Látható, hogy az '1' állás használható koordináta-írós üzemmóddhoz, az 'N' állás pedig az oszcilloszkópos üzemmóddhoz. A stabil kép érdekében a számláló (egy előlapi csatlakozóra vezetett) Q0-ás kimeneti jelét az oszcilloszkóp triggerelésére használhatjuk.

Az integrátorok 'integrálás' és 'kezdeti feltétel beállítás' üzemmódja közti átkapcsolást a TA, TB, TC, és a TD jelek ütemezik. Az ütemjelek közvetlen előállítására a 4043-as, négy darab független RS tárolót tartalmazó IC feladata. Az SW1, SW3, SW5, és az SW7 kapcsolókkal kiválaszthatjuk, hogy melyik pillanatban váltson egy-egy tároló kimenete magas szintre, azaz mikor kezdje a hozzá tartozó integrátor a számolást. A másik négy kapcsoló segítségével a tárolók törlése végezhető. Ezekkel határozhatjuk meg, hogy mikor váltsanak vissza az integrátorok kezdőérték beállításra. Az így előállított négy ütemjel az előlapra is ki van vezetve; az esetleges további külső készülékeknek ezzel 'adat érvényes' jelet biztosíthatunk.

Ha például A/D átalakító segítségével digitális számítógépen szeretnénk további kiértékeléseket végezni, akkor jelezniük kell, hogy mikor van a kimeneten érvényes számított érték, és melyek az átmeneti beállítási szakaszok.

### 8.2.3 Állandóval való szorzás

A kapcsolások felépítése egyezik az 5.1 alatt tárgyalt kapcsolás felépítésével. A kimeneten a bemeneti feszültség egy állandóval szorzott értéke jelenik meg. Ez az állandó (a potenciométer állásától függően) egy a 0-ra szimmetrikus intervallumban mozog. A két ellenállást tartalmazó kapcsolásokat az invertálástól a jelkövetésig hangolhatjuk:

$$U_{ki} = [-1,+1] \cdot U_{be}$$

A három ellenállást tartalmazó kapcsolások még tízszeresnek is:

$$U_{ki} = [-10,+10] \cdot U_{be}$$

A megfelelő számítási pontosság és szimmetria érdekében az ellenállások 1% tűrésűek legyenek.

### 8.2.4 Összeadás, kivonás

A kapcsolások felépítése megegyezik az összegző és kivonó áramköröknél leírtakkal. Tehát a kétbemenetű kapcsolások kimeneti feszültsége:

$$U_{ki} = \frac{U_{be1} - U_{be2}}{2}$$

A négybemenetű kapcsolások kimeneti feszültsége:

$$U_{ki} = \frac{U_{be1} + U_{be2} - U_{be3} - U_{be4}}{4}$$

A megfelelő számítási pontosság érdekében az ellenállások itt is 1% tűrésűek legyenek.

### 8.2.5 Integrátorok

A négy teljesen azonos integrátor három-három csatlakozóval és két-két kapcsolóval rendelkezik. A csatlakozók: az integrálandó bemeneti-, a kezdőérték-, és a kimeneti feszültségek számára. A két kapcsoló segítségével az integrátorok időállandója állítható. Segítségükkel koordináta-írós üzemmódban  $\tau = 0.1$  s,  $0.33$  s,

1 s, 3.3 s; oszcilloszkópos üzemmódban pedig  $\tau = 0.1$  ms, 0.33 ms, 1 ms, 3.3 ms választható.

A kezdeti érték beállítása esetén a kondenzátorok feszültsége az órajelciklus idejénél sokszorta kisebb időállandóval közelít a szükséges értékhez, ezzel biztosított a kezdeti feltétel pontos elérése.

Az átkapcsolásokat a 4053-as típusú, tokonként három analóg váltókapcsolót tartalmazó IC-k végzik. Négy kapcsoló az 1-N vezérlőjel állapota szerint az adott üzemmódban tartozó kondenzátor kiválasztását végzi. További négy kapcsoló vált az integrálási és a kezdőérték beállítási funkció között a TA, TB, TC, TD jelek állapota szerint.

A kondenzátorokat pontosságuk szerint válogatni kell (esetleg velük párhuzamosan kell kapcsolni kisebbeket). Az időállandót pontos próbafeszültség (pl. 1 V) integrálásával kell megállapítani.

A kondenzátorok jó minőségű fóliaszigetelésű típusok az átvezetési áram okozta hiba minimalizása érdekében. A műveleti erősítők bemeneti munkaponti árama (30 pA) által okozott hiba elhanyagolható, ám az ofszetfeszültség okozta hiba már sokkal jelentősebb. Szélsőséges esetben ( $U_0 = 5$  mV,  $\tau = 0.1$  s vagy 0.1 ms) egy órajelnyi idő alatt (1 s vagy 1 ms) a kimenet feszültsége 50 mV-tal is változhat, ezért ha az adott számítási feladat lehetővé teszi, mindig használjunk nagyobb időállandót (a hibaáram lassabb feszültségváltozást okoz).

### **8.2.6 Szorzás, négyzetre emelés, osztás, négyzetgyök vonás**

A szorzó, osztó, és négyzetgyök vonó áramköröket az AD530 négysíknegyedes analóg szorzó integrált áramkör<sup>7</sup> segítségével valósítjuk meg. A számítás csak akkor pontos, ha az IC be- és kimenetein legfeljebb  $\pm 10$  V feszültség van. Erre mindig figyelni kell!

Az ofszetfeszültségek kiegyenlítésére a 20 k $\Omega$ -os trimmer potenciométerek szolgálnak, a 4,7 k $\Omega$ -osak pedig a skálatényező beállítását teszik lehetővé. Helyes

---

<sup>7</sup> Részletes ismertetése a [4] 8.10.3 pontja alatt található.



beállításnál<sup>8</sup> az egyes műveleti egységek kimeneti feszültsége:

a szorzók esetén

$$U_{J7} = \frac{U_{J5}U_{J6}}{10} \text{ illetve } U_{J12} = \frac{U_{J2}U_{J3}}{10},$$

az osztó esetén

$$U_{J9} = \frac{10U_{J8}}{U_{J4}},$$

a négyzetgyök vonó esetén pedig

$$U_{J11} = -\sqrt{10U_{J10}}.$$

### 8.2.7 Egyebek

Az analóg számítógép az eddig ismertett műveleti egységeken kívül tartalmaz két további 100 k $\Omega$ -os potenciométert, és négy szabad műveleti erősítőt. Ezek minden kivezetése elérhető a készülék előlapján (programtábláján). A potenciométerek feszültségosztónak, a műveleti erősítők pedig csupán huzalozással feszültségkövetőnek, komparátornak, előjelfüggvény-generátornak használhatók, de néhány további külső alkatrész segítségével másra is alkalmasak.

Az analóg számítógéphez ezen kívül szükség van az előlapi csatlakozókat összekötő huzalokra is. Hogy elkerüljük a földhurkok kialakulását, árnyékolt összekötő kábelek esetén a külső fémharisnyát csak az egyik végén forrasszuk a dugóra!

---

<sup>8</sup> A részletes beállítási eljárás megtalálható a [2] szakirodalomban.

## 9. Irodalomjegyzék

- [1] *Bernhard, J.H.:* Analóg-számítástechnikai ABC. Műszaki könyvkiadó, Budapest, 1996.
- [2] *Rátkai L.:* Kísérletezőkészlet analóg és digitális áramkörök-höz (4. rész), Hobby Elektronika. 1996. 8. sz. 277-278. o.
- [3] *Herpy M. – Berka, J.C.:* Aktív RC szűrők. Műszaki könyvkiadó, Budapest, 1981.
- [4] *Herpy M.:* Analóg integrált áramkörök. Műszaki könyvkiadó, Budapest, 1974.
- [5] *Hesselmann, N.:* Digitális jelfeldolgozás. Műszaki könyvkiadó, Budapest, 1985.
- [6] *Lenk, J.D.:* Elektronikai alapkapcsolások gyűjteménye. Műszaki könyvkiadó, Budapest, 1986.
- [7] *Müller, H.:* Der elektronische Analogrechner. PdN-Ph. 3/35. Jg. 1986. 2-40 o.
- [8] *Székely V. – Poppe A.:* Áramkörszimuláció a PC-n. ComputerBooks, Budapest, 1996.
- [9] *Tietze, U. – Schenk, Ch.:* Analóg és digitális áramkörök (5., javított kiadás). Műszaki könyvkiadó, Budapest, 1993.
- [10] *Zeldovics, Ja.B. – Miskisz, A.D.:* Az alkalmazott matematika elemei. Gondolat, Budapest, 1978.
- [11] – OrCAD / SDT III kezelési utasítás. Kandó Kálmán Műszaki Főiskola Számítógéptechnikai Intézet, Hardver Fejlesztőcsoport, Székesfehérvár, 1991.

## **10. Köszönetnyilvánítás**

Mindenekelőtt köszönettel tartozom témavezetőmnek, Dr. Gingl Zoltán-nak, az érdekes témáért, a dolgozat megírása során nyújtott sokrétű, hathatós segítségért, hasznos javaslataiért, és rugalmasságáért.

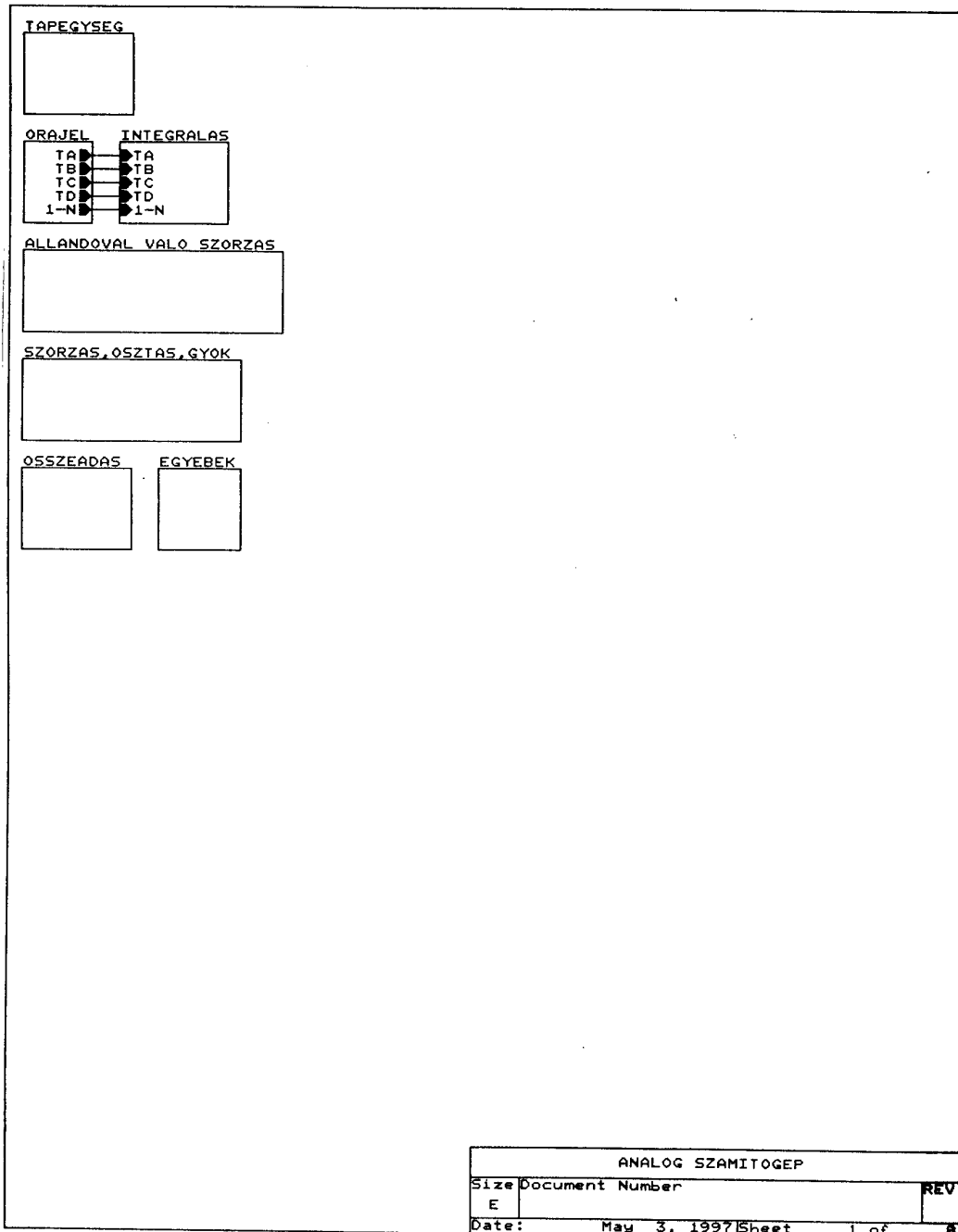
Köszönöm Dr. Török Miklósnak, hogy lehetővé tette számomra az elektronikai tárgyú programokkal való megismerkedést, hogy bevezetett a kapcsolási rajz szerkesztő program használatába.

Nem utolsó sorban köszönettel tartozom mindazoknak – legfőképpen a családomnak, feleségemnek – , akik munkám során tanúsított türelmükkel, megértésükkel segítettek e dolgozat létrejöttében.

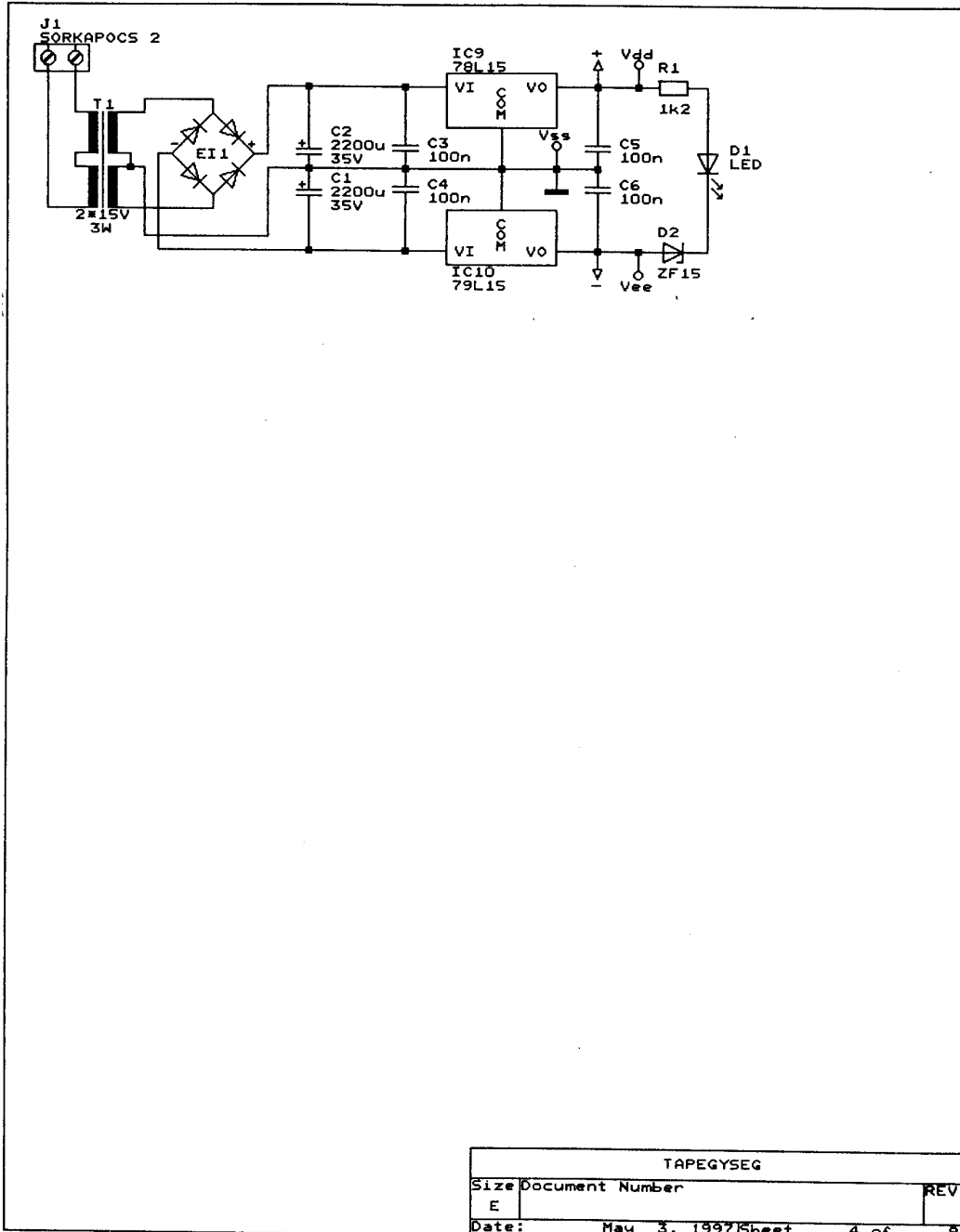
# 11. Függelék

## 11.1 Kapcsolási rajzok

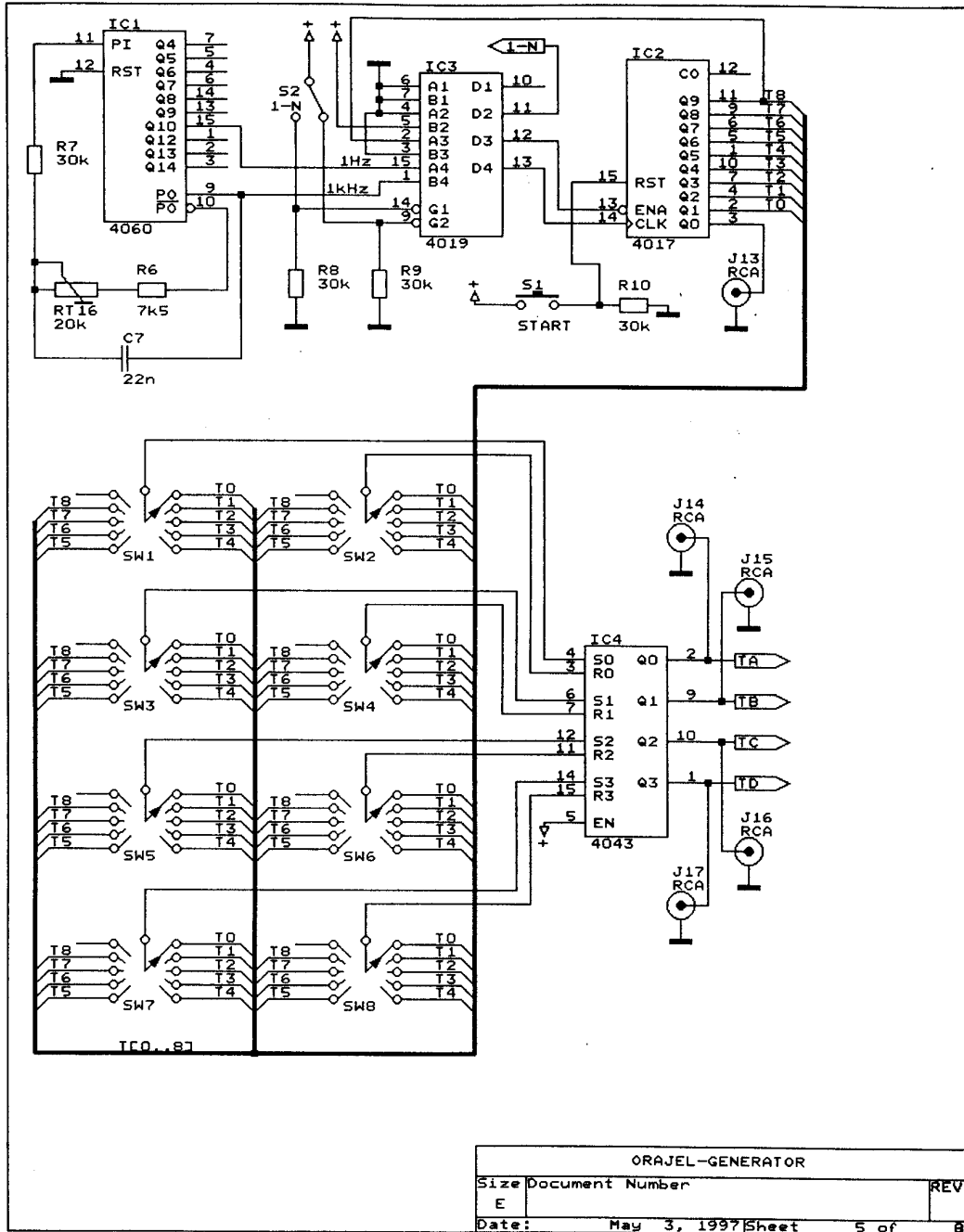
Az analóg számítógép egységei:



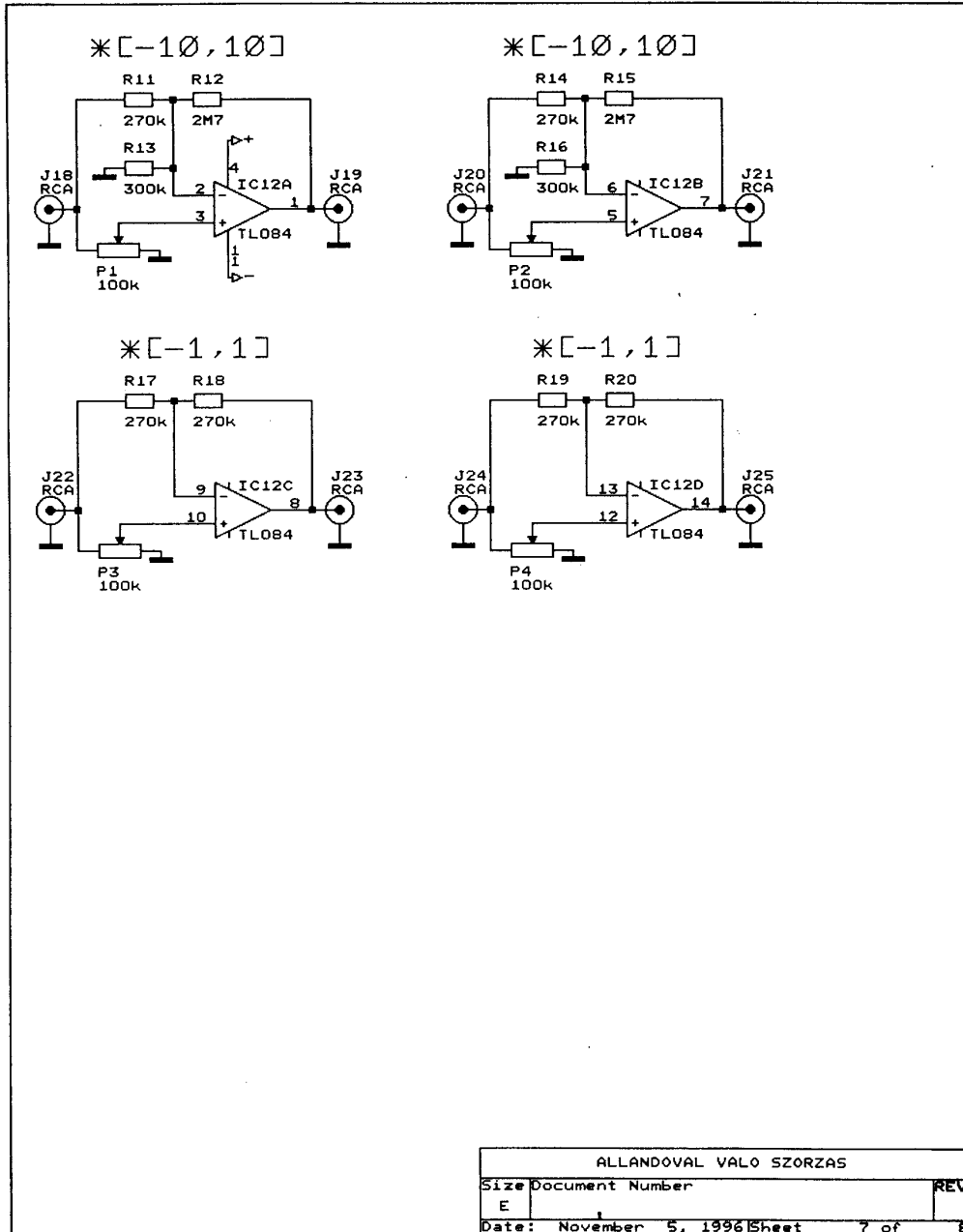
A tápegység:



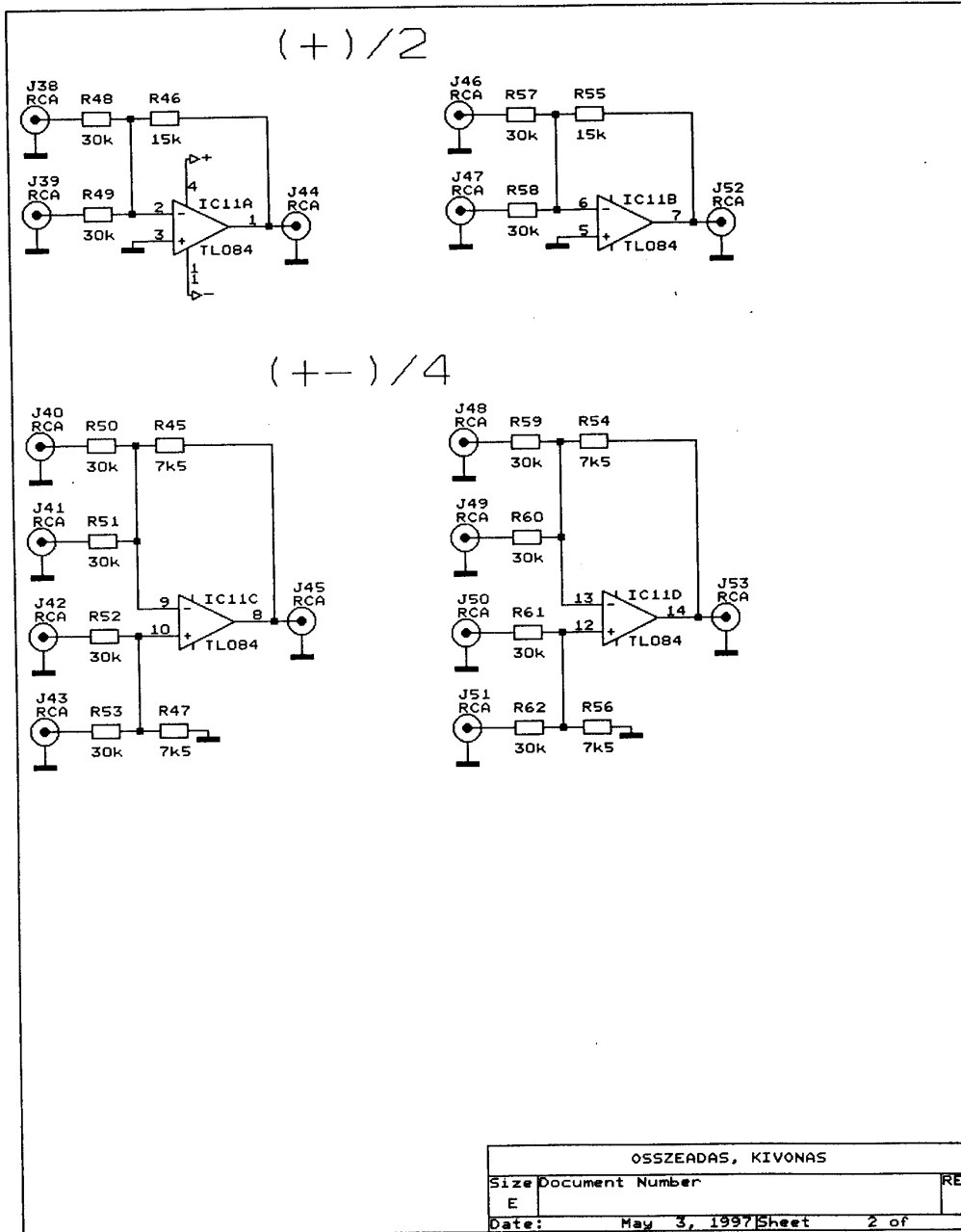
Az órajel-generátor:



Az állandóval való szorzást megvalósító áramkörök:

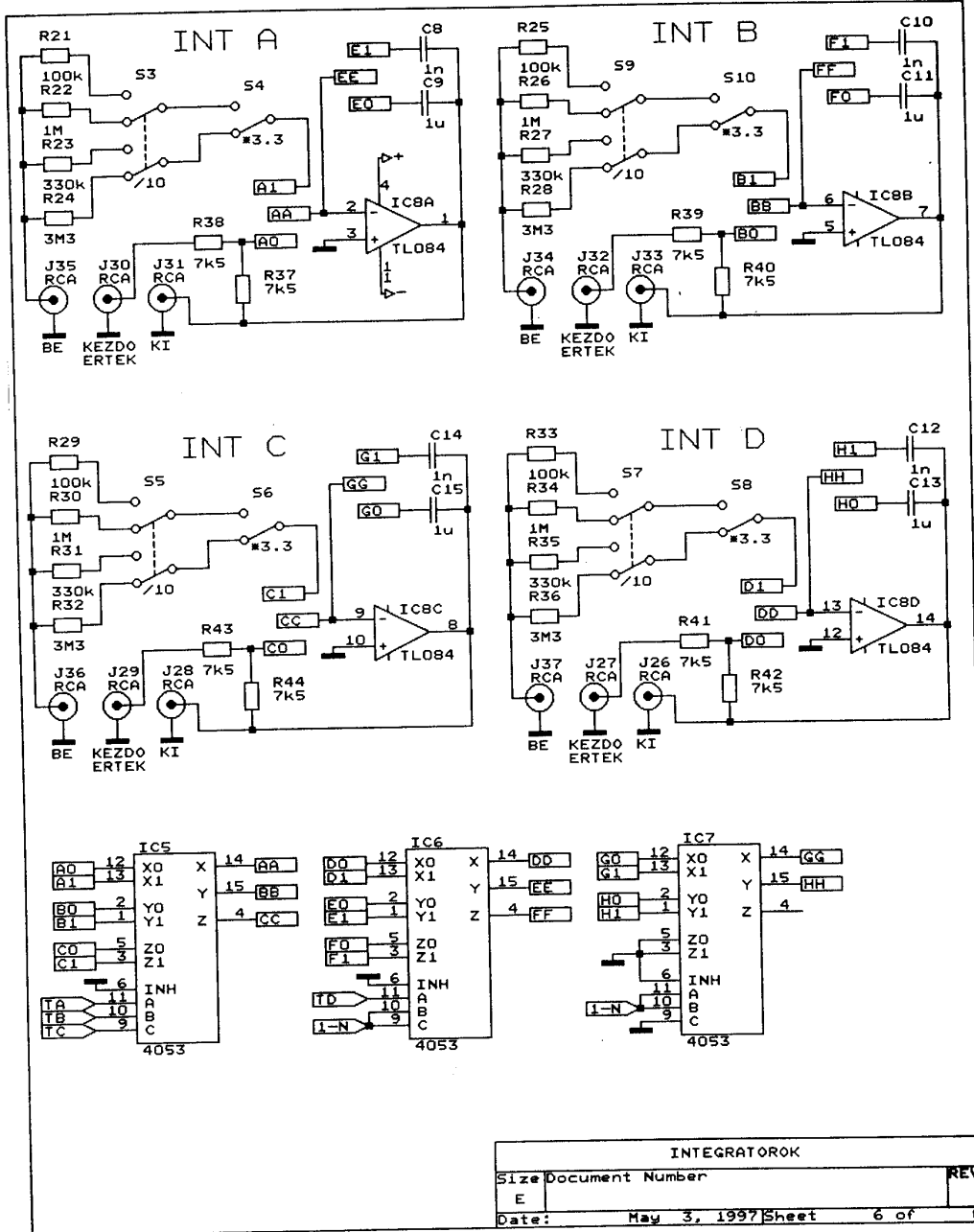


Az összeadást, kivonást megvalósító áramkörök:

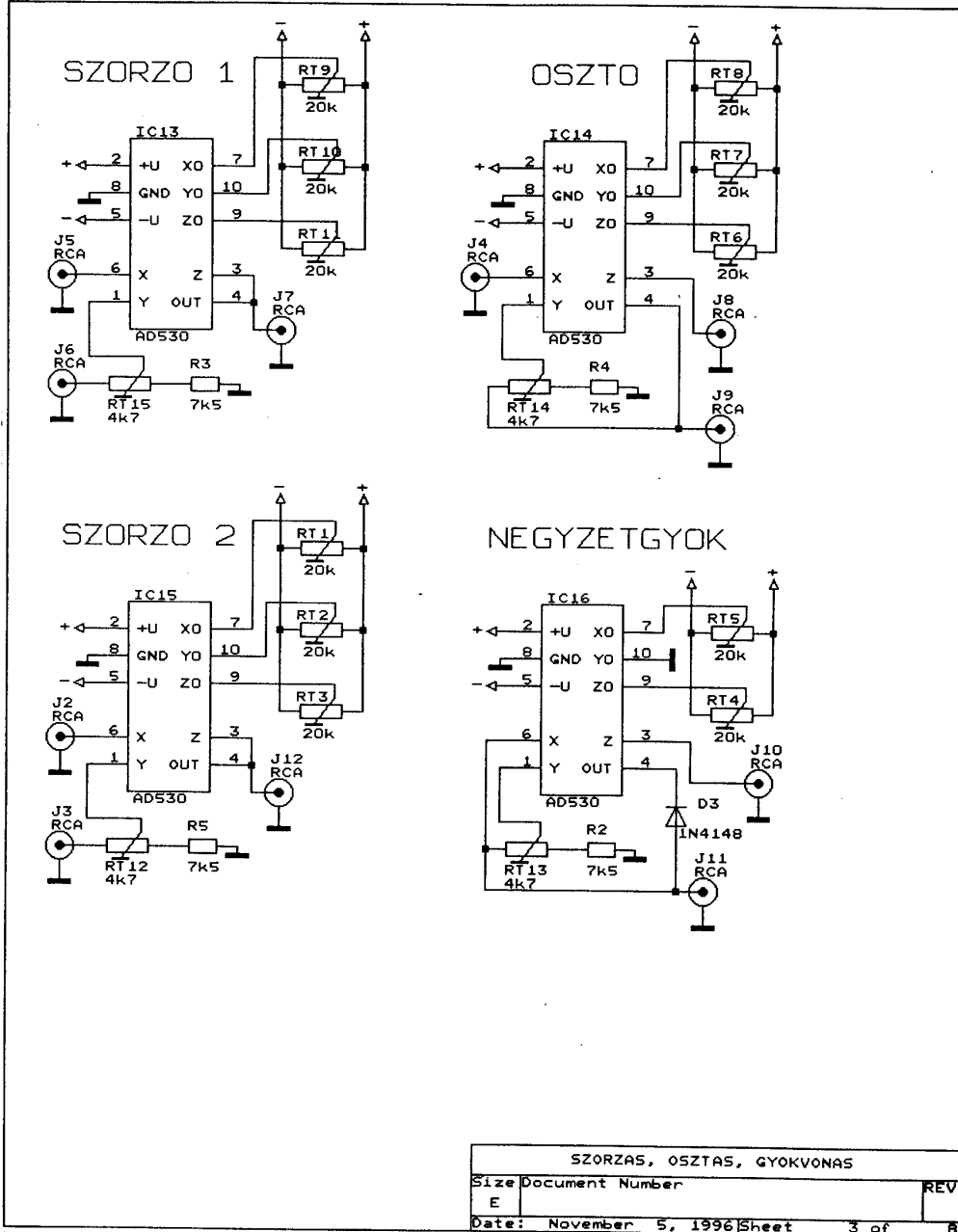




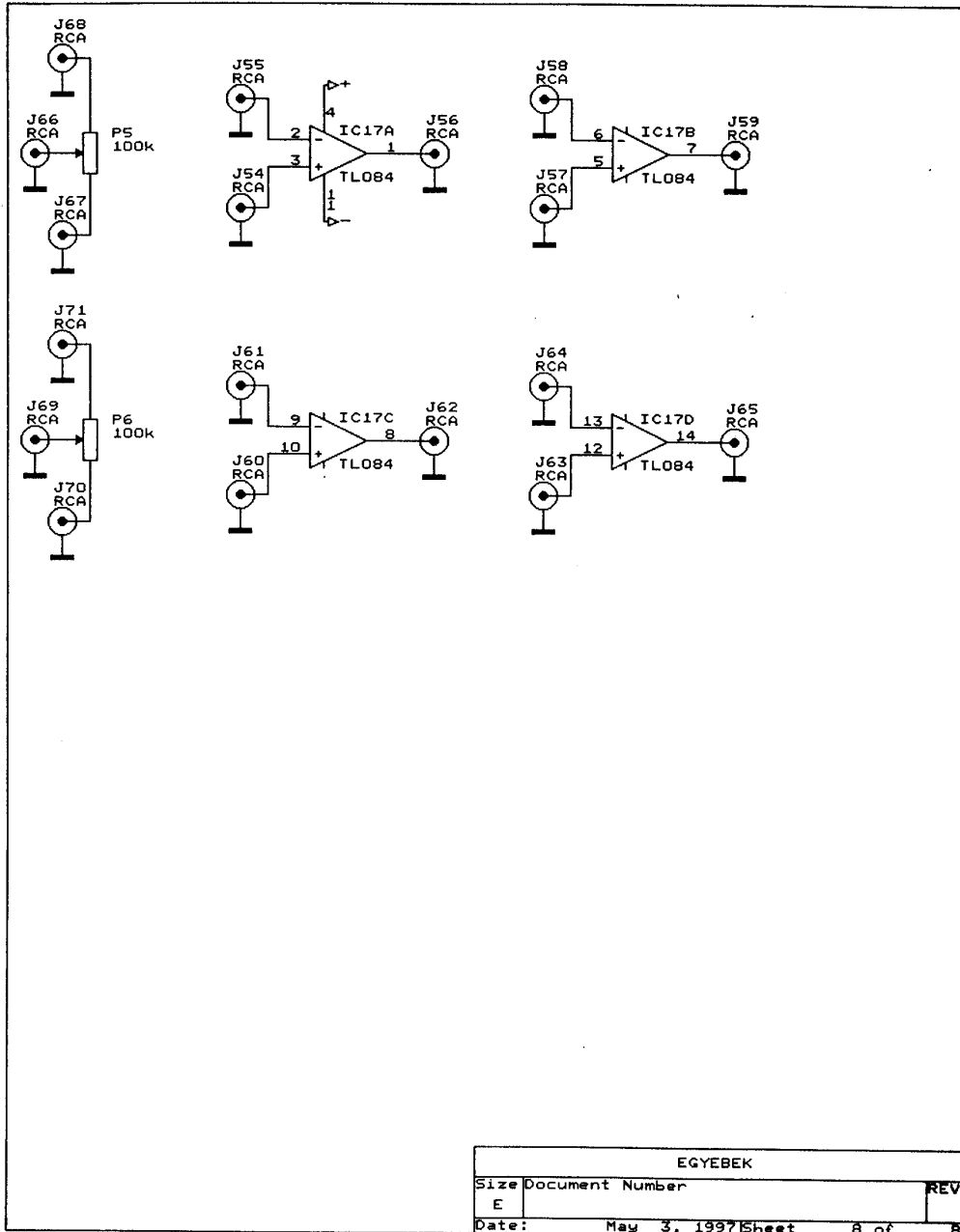
Az integrátorok, és az analóg kapcsoló áramkörök:



A szorzást, osztást, és négyzetgyök vonást megvalósító áramkörök:



Egyéb kapcsolások megvalósítását szolgáló kiegészítő alkatrészek:



## 11.2 Alkatrészlista

db	Pozíciószám	Az alkatrész leírása
2	C1, C2	2200 $\mu$ F, 35 V, elektrolit
4	C3, C4, C5, C6	100 nF, kerámia
1	C7	22 nF, fólia
4	C8, C10, C12, C14	1 nF, fólia
4	C9, C11, C13, C15	1 $\mu$ F, fólia
1	D1	piros LED
1	D2	ZF15
1	D3	1N4148
1	E11	Graetz-híd
1	IC1	CD4060
1	IC2	CD4017
1	IC3	CD4019
1	IC4	CD4043
3	IC5, IC6, IC7	CD4053
4	IC8, IC11, IC12, IC17	TL084
1	IC9	78L15
1	IC10	79L15
4	IC13 ... IC16	AD530
1	J1	kétpólusú, nyákba ültethető sorkapocs
70	J2 ... J71	RCA aljzat
6	P1 ... P6	100 k $\Omega$ A potenciométer
1	R1	1,2 k $\Omega$
5	R2 ... R6	7,5 k $\Omega$
4	R7 ... R10	30 k $\Omega$
6	R11, R14, R17 ... R20	270 k $\Omega$ , 1%
2	R12, R15	2,7 M $\Omega$ , 1%
2	R13, R16	300 k $\Omega$ , 1%

## 11.2 Alkatrészlista

db	Pozíciószám	Az alkatrész leírása
2	C1, C2	2200 $\mu$ F, 35 V, elektrolit
4	C3, C4, C5, C6	100 nF, kerámia
1	C7	22 nF, fólia
4	C8, C10, C12, C14	1 nF, fólia
4	C9, C11, C13, C15	1 $\mu$ F, fólia
1	D1	piros LED
1	D2	ZF15
1	D3	1N4148
1	E11	Graetz-híd
1	IC1	CD4060
1	IC2	CD4017
1	IC3	CD4019
1	IC4	CD4043
3	IC5, IC6, IC7	CD4053
4	IC8, IC11, IC12, IC17	TL084
1	IC9	78L15
1	IC10	79L15
4	IC13 ... IC16	AD530
1	J1	kétpólusú, nyákba ültethető sorkapocs
70	J2 ... J71	RCA aljzat
6	P1 ... P6	100 k $\Omega$ A potenciométer
1	R1	1,2 k $\Omega$
5	R2 ... R6	7,5 k $\Omega$
4	R7 ... R10	30 k $\Omega$
6	R11, R14, R17 ... R20	270 k $\Omega$ , 1%
2	R12, R15	2,7 M $\Omega$ , 1%
2	R13, R16	300 k $\Omega$ , 1%

4	R21, R25, R29, R33	100 k $\Omega$ 1%
4	R22, R26, R30, R34	1 M $\Omega$ , 1%
4	R23, R27, R31, R35	330 k $\Omega$ , 1%
4	R24, R28, R32, R36	3,3 M $\Omega$ , 1%
12	R37 ... R45, R47, R54, R56	7,5 k $\Omega$ , 1%
2	R46, R55	15 k $\Omega$ , 1%
12	R48 ... R53, R57 ... R62	30 k $\Omega$ , 1%
12	RT1 ... RT11, RT16	20 k $\Omega$ -os (esetleg többfordulatú) trimmer potenciométer
4	RT12 ... RT15	4,7 k $\Omega$ -os (esetleg többfordulatú) trimmer potenciométer
1	S1	nyomógomb
5	S2, S4, S6, S8, S10	kétállású kapcsoló
4	S3, S5, S7, S9	kétáramkörös, kétállású kapcsoló
8	SW1 ... SW8	tízállású körkapcsoló
1	T1	2 $\times$ 15 V, 3 W nyákba ültethető transzformátor