

# Az elektronika alapismeretei

dr. Mihály Zsigmond\*

*BME – Híradástechnikai Tanszék*

1999. augusztus

Ez az olvasmány a BME Villamosmérnöki és Informatikai Karon oktatott *Elektronika tárgyhoz* készült. A tárlt ismeretek többségét a hallgatók már megszerezték korábbi tanulmányaik során, ez az anyag csak az ismeretek felrissítését, az „áram-körös” szemlélet bemutatását célozza meg.

## Tartalomjegyzék

<b>1. Az alapok alapjai</b>	<b>2</b>
1.1. A legfontosabb alkatrészek . . . . .	2
1.1.1. Ideális feszültséggenerátor . . . . .	2
1.1.2. Ideális áramgenerátor . . . . .	2
1.1.3. Furcsaságok . . . . .	3
1.1.4. Ellenállás . . . . .	3
1.1.5. Mértékegységek . . . . .	4
1.1.6. Esik? Folyik? . . . . .	4
1.1.7. Vezeték . . . . .	4
1.2. Kirchoff törvények . . . . .	5
1.2.1. Huroktörvény . . . . .	5
1.2.2. Csomóponti törvény . . . . .	5
1.3. Ellenállások eredője . . . . .	6
1.3.1. Soros eredő . . . . .	6
1.3.2. Párhuzamos eredő . . . . .	6
1.3.3. Vezetés . . . . .	7
1.4. Ellenállás-osztók . . . . .	7
1.4.1. Feszültségosztó . . . . .	7
1.4.2. Áramosztó . . . . .	8
1.5. Szuperpozíció . . . . .	8
1.6. Helyettesítő képek . . . . .	9
1.6.1. Thevenin kép . . . . .	10
1.6.2. Norton kép . . . . .	10
1.6.3. Norton - Thevenin átalakítás . . . . .	11

<b>2. AC – DC</b>	<b>11</b>
2.1. DC . . . . .	11
2.2. AC . . . . .	12
2.3. AC + DC . . . . .	12
<b>3. Jel és föld</b>	<b>12</b>
3.1. Aszimmetrikus jelkezelés . . . . .	12
3.2. Szimmetrikus jelkezelés . . . . .	12
<b>4. Erősítő modellezése</b>	<b>13</b>
4.1. Bemenő ellenállás . . . . .	14
4.2. Feszültségerősítés . . . . .	14
4.3. Kimenő ellenállás . . . . .	14
4.3.1. Aktív módszer . . . . .	15
4.3.2. Passzív módszer . . . . .	15
<b>5. Nemlineáris eszközök kezelése</b>	<b>16</b>
5.1. Munkapont . . . . .	16
5.2. Munkaponti linearizálás . . . . .	16
5.3. Kisjelű paraméterek . . . . .	17
5.4. Hogyan használjuk . . . . .	17
<b>6. Lineáris eszközök helyettesítése</b>	<b>17</b>
6.1. Tápfeszültség . . . . .	18
6.2. Egyenáramú áramgenerátor . . . . .	18
6.3. Ellenállás . . . . .	18
6.4. Kondenzátor . . . . .	18
6.4.1. Munkapont (DC) . . . . .	19
6.4.2. Jel (AC) . . . . .	19
6.5. Tekercs (induktivitás) . . . . .	19
6.5.1. Munkapont (DC) . . . . .	19
6.5.2. Jel (AC) . . . . .	19
<b>7. Félvezetők modelljei</b>	<b>20</b>
7.1. Dióda . . . . .	20
7.1.1. Karakterisztika . . . . .	20
7.1.2. Kisjelű helyettesítő kép . . . . .	21
7.2. Bipoláris tranzisztor . . . . .	21
7.2.1. Alapok . . . . .	21

\* e-mail: [mihaly@hit.bme.hu](mailto:mihaly@hit.bme.hu)  
weblap: <http://www.hit.bme.hu/people/mihaly>

7.2.2.	Általános modell . . . . .	23
7.2.3.	Karakterisztikák . . . . .	24
7.2.4.	Kisjelű helyettesítő kép . .	26
7.2.5.	PNP tranzisztor . . . . .	27
7.3.	JFET . . . . .	28
7.3.1.	Karakterisztikák . . . . .	28
7.3.2.	Általános modell . . . . .	30
7.3.3.	Kisjelű modell . . . . .	30

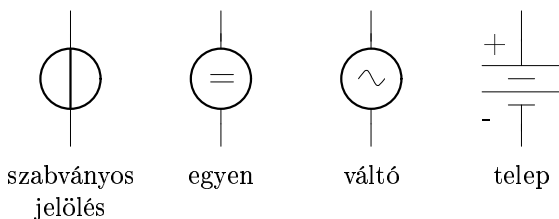
# 1. Az alapok alapjai

## 1.1. A legfontosabb alkatrészek

### 1.1.1. Ideális feszültséggenerátor

Kapcsain a feszültség értéke a generátor által beállított érték. Nem függ tehát a feszültség a terhelő hálózattól: bármekkora áram folyik keresztül a feszültséggenerátoron, az általa szolgáltatott feszültség mindig ugyanakkora.

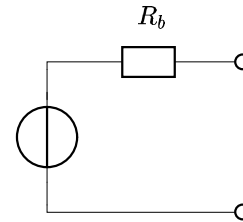
A nulla feszültséget szolgáltató generátor *rövidzárként* viselkedik – a feszültség értéke a rajta átfolyó áramtól függetlenül nulla. A feszültséggenerátor jelölése erre a viselkedésre utal (1. ábra). Néha a szabványostól eltérő jelölést is alkalmazunk – ha például utalni akarunk a feszültséggenerátor jelének alakjára.



1. ábra. A feszültséggenerátor jelölései.

Az ideális feszültséggenerátort elég jól megközelítik a gyakorlati megvalósítások: ilyen a gépkocsi akkumulátora, vagy például a ceruza elem. A minden háztartásban megtalálható konnektor szintén feszültséggenerátorként viselkedik, de időben változó feszültséget szolgáltat (névlegesen 240V effektív értékű, 50Hz frekvenciájú szinuszos jelet). Egyetlen megvalósítás sem tökéletes azonban: a terhelés hatására folyó áram következtében a valóságos generátor kapcsain mérhető feszültség *csökken*. Ezt a „hibát” egy soros ellenállással model-

lezzük, az ellenállást *belső ellenállásnak* nevezzük (2. ábra).



2. ábra. Nem ideális feszültséggenerátor.

**Két feszültséggenerátor kapcsait nem szabad egymással összekötni (párhuzamos kapcsolás),** mert elvileg végtelen nagy áram folyik az összekötő vezetéken<sup>1</sup>.

Feszültséggenerátorok *soros* kapcsolását gyakran használják, ilyenkor a generátorok feszültsége összeadódik (előjelesen!). Gyakorlati alkalmazásként a walkman-t említhetjük: két ceruzaelem soros kapcsolásával 3V egyenfeszültséget állítanak elő, és ez táplálja az elektronikát.

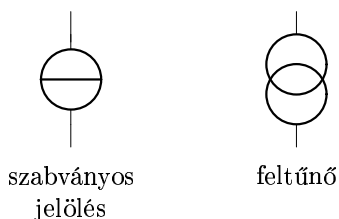
### 1.1.2. Ideális áramgenerátor

Kapcsain az áram értéke a generátor által beállított érték. Nem függ tehát az áram a táplált hálózattól.

A nulla áramot szolgáltató generátor *szakadás-ként* viselkedik – bármit teszünk, nem folyik rajta keresztül áram. Az áramgenerátor jelölése erre emlékeztet. Néha a szabványostól eltérő jelölést is alkalmazunk – a két egymásba fonódó karika egyetlen pillantással jól megkülönböztethetővé teszi az áramgenerátort a feszültséggenerátortól (3. ábra).

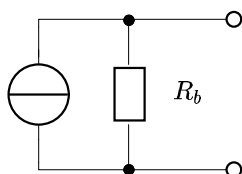
Ideális áramgenerátorra emlékeztető elem a valóságban nem található, de a gyakorlatban használt *aktív eszközök* többnyire *vezérelt áramgenerátorként* viselkednek. A gyakorlati megvalósítások nem tökéletesek: az áramgenerátor által táplált hálózaton létrejövő feszültségtől többé-kevésbé függ a generátor árama. Ezt a hibát a

<sup>1</sup>Személygépkocsi akkumulátorokat néha párhuzamosan kötnek, ha egy lemerült akkumulátorú gépkocsit be akarnak indítani. Ilyenkor az összekötő vezetékek ellenállása, valamint a lemerült akkumulátor nagy belső ellenállása korlátozza az áramot.



3. ábra. Az áramgenerátor jelölései.

generátorral párhuzamosan kapcsolt ellenállással modellezzük, az ellenállást itt is *belső ellenállásnak* nevezzük (4. ábra).

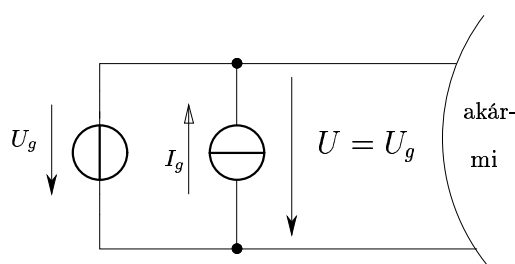


4. ábra. Nem ideális áramgenerátor.

**Két áramgenerátort nem szabad egymással sorosan összekötni**, mert össze fognak veszni azon, hogy mekkora legyen az áram a közös ágon.

Párhuzamosan összeköthetők az áramgenerátorok, az eredő áram a két áram előjeles összege lesz.

### 1.1.3. Furcsaságok



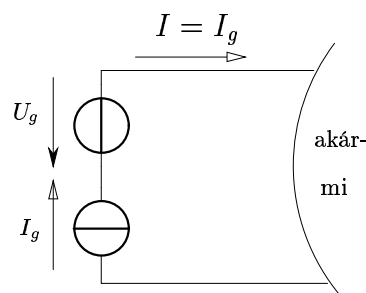
5. ábra. Bármit kapcsolunk *párhuzamosan* egy feszültséggenerátorral, az eredő hálózat *feszültséggenerátorként* viselkedik.

Az ideális feszültséggenerátorral bármit *párhuzamosan* lehet kapcsolni<sup>2</sup>, akkor sem változik meg

<sup>2</sup>Kivéve egy másik feszültséggenerátort, illetve annak

kapcsain a feszültség. Például feszültség- és áramgenerátor *párhuzamos* kapcsolása *feszültséggenerátornak látszik* (5. ábra).

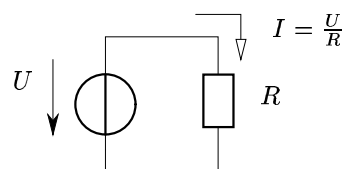
Az ideális áramgenerátorral viszont *sorosan* lehet akármit kapcsolni<sup>3</sup>, akkor sem változik meg a soros ág árama. Például feszültség- és áramgenerátor *soros* kapcsolása *áramgenerátornak látszik* (6. ábra).



6. ábra. Bármit kapcsolunk *sorosan* egy áramgenerátorral, az eredő hálózat *áramgenerátorként* viselkedik.

### 1.1.4. Ellenállás

Az ellenállás *lineáris* eszköz, a rajta folyó áram arányos a kapcsain mérhető feszültséggel<sup>4</sup> (7. ábra).



7. ábra. Ohm törvény.

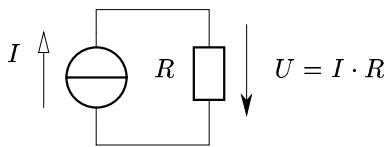
A dolog fordítva is működik: ha áramgenerátorral hajtjuk meg az ellenállást, akkor az Ohm törvény szerinti feszültség alakul ki rajta (8. ábra).

Az ellenállás jó pontossággal előállítható, olcsó elektronikai alkatrész. Tipikusan  $\pm 1\%$  pontosságú

speciális esetét: rövidzárat.

<sup>3</sup>Kivéve egy másik áramgenerátort, illetve annak speciális esetét: szakadást.

<sup>4</sup>Az áram mérőirányát szándékosan a fizikai működéshez illeszkedő irányban vettük fel: így elkerülhető a negatív előjel.



8. ábra. Ez is Ohm törvény.

ellenállásokat szabványosított érték-skála szerint gyártanak a  $10\Omega \dots 10^6\Omega$  tartományban.

### 1.1.5. Mértékegységek

Az eddig használt mennyiségek mértékegységei a következők:

**Feszültség.** Mértékegysége a Volt [V]. Egy ceruzaelem névleges feszültsége 1,5V, a gépkocsi akkumulátora kb. 13V.

**Áram.** Mértékegysége az Amper [A]. Egy gépkocsi fényszórójának izzója kb. 4A áramot vesz fel, egy walkman kb. 0,1A áramot fogyaszt az elemekből. Elektronikus áramkörökben általában ennél nagyságrendekkel kisebb áramokkal találkozunk.

**Ellenállás.** Mértékegysége az Ohm [ $\Omega$ ]. Az Ohm törvényből eredően:

$$1\Omega = \frac{1V}{1A}$$

A mérnöki gyakorlatban az egységnyi mennyiségnél nagyságrenddel nagyobb és kisebb mennyiségek gyakran előfordulnak. Három nagyságrendenként egy-egy előtaggal egészítjük ki a mértékegységet, ezzel megkönnyítjük a nagyságrendek kezelését (1. táblázat).

**Példák:**

$$100k\Omega = 10^5\Omega$$

$$20\mu A = 2 \cdot 10^{-5} A$$

**Koherens mértékrendszer.** Egy-egy áramkör vizsgálata során általában azonos nagyságrendbe eső mennyiségekkel dolgozunk. El lehet kerülni azt a kellemetlenséget, hogy minden képletbe a behelyettesítés során bejegyezzük az adott mennyiség nagyságrendjét is. Megállapodhatunk abban,

Jel	Név	Szorószám
G	Giga	$10^9$
M	Mega	$10^6$
k	kilo	$10^3$
-	-	1
m	milli	$10^{-3}$
$\mu$	mikro	$10^{-6}$
n	nano	$10^{-9}$
p	pico	$10^{-12}$

1. táblázat. Nagyságrendek.

hogy minden feszültséget V-ban, minden áramot mA-ben értve helyettesítünk be, és természetesen  $k\Omega$ -ban kell helyettesítenünk az ellenállások értékét. Így *koherens mértékrendszerhez* jutunk (2. táblázat).

U	I	R
V	A	$\Omega$
V	mA	$k\Omega$
mV	mA	$\Omega$

2. táblázat. Koherens mértékrendszerek.

### 1.1.6. Esik? Folyik?

A feszültség esik, az áram pedig folyik, ezt nem illik összekeverni.

Képzeld el egy duzzasztógátat! A gát előtt magasabb a víz szintje (potenciálja), utána pedig alacsonyabb. A vízszintek különbsége a *feszültség*, melynek hatására a víz lefolyik – illetve az áram folyik.

Bár a töltéshordozók mit sem törődnek a gravitációval, kapcsolási rajzainkat igyekszünk úgy megszerkeszteni, hogy a nagyobb potenciálú pont a rajzon magasabbra kerüljön<sup>5</sup>.

### 1.1.7. Vezeték

A kapcsolási rajzon vonallal jelölt vezetéket ideálisnak tekintjük – ellenállása zérus. Az áramkörnek azon pontjai, amelyek egy vagy több veze-

<sup>5</sup>Nem kötelező, de sokat segít, ha lehetőség szerint betartjuk ezt a szabályt.

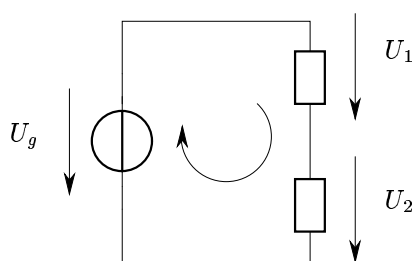
téssel össze vannak kötve, egyetlen csomópontnak tekinthetők.

## 1.2. Kirchoff törvények

### 1.2.1. Huroktörvény

Egy összefüggő hálózat elemein egy tetszőleges vonalon lefektetett, önmagába záródó görbe mentén az elemeken mért feszültség előjeles összege nulla.

Az állítást nem bizonyítjuk, csupán illusztráljuk (9. ábra).



9. ábra. Huroktörvény (példa).

A huroktörvény a 9. ábrára:

$$U_1 + U_2 - U_g = 0$$

A gyakorlatban igen sokszor *nem a nullára redukált alakot használjuk*, hanem a „duzzasztómű” szemlélet<sup>6</sup> alapján dolgozunk:

$$U_g = U_1 + U_2$$

A legjobban akkor járunk, ha azonnal a keresett mennyiséget írjuk fel<sup>7</sup>. Ha például  $U_2$ -re vagyunk kíváncsiak, akkor így okoskodunk: „A generátor feszültségéből kiindulva elveszítjük az  $U_1$  feszültséget, és ami marad, az jut  $U_2$ -re”. Tehát:

$$U_2 = U_g - U_1$$

**FONTOS!** Nem csak a 9. ábrán bemutatott „tisztá” helyzetben működik a hurokegyenlet, hanem bármilyen bonyolult hálózatban. A lényeg csak az, hogy egy *zárt görbére* írjuk fel az egyenletet. Egy-egy bonyolultabb példa megoldásánál látni fogjuk, hogy a siker éppen azon múlik,

<sup>6</sup>Képzeld el egy kétlépcsős duzzasztóművet!

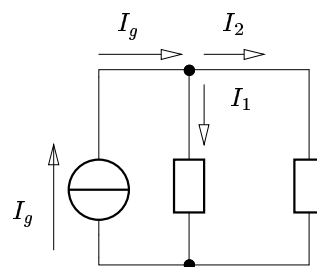
<sup>7</sup>Ez nem kötelező, de minél több egyenlet-átrendezés szükséges egy feladat megoldásához, annál több esély adódik a hibázásra.

sikerül-e ügyesen megválasztani a hurkot, amelyre felírjuk az egyenletet.

### 1.2.2. Csomóponti törvény

Egy hálózat bármely pontjában a befolyó áramok előjeles összege zérus.

Az állítást most sem bizonyítjuk, csupán illusztráljuk (10. ábra).



10. ábra. Csomóponti törvény (példa).

A csomóponti törvény a 10. ábrára:

$$I_g - I_1 - I_2 = 0$$

A gyakorlatban itt is igyekszünk a nullára redukált alak helyett azonnal a keresett mennyiséget felírni. Ha például  $I_2$ -re vagyunk kíváncsiak, akkor így okoskodunk: „A csomópontba befolyik  $I_g$ , abból elveszítjük az  $I_1$  áramot, és ami marad, az lesz az  $I_2$ ”. Tehát:

$$I_2 = I_g - I_1$$

A törvényt mindenki megtapasztalhatta a gyakorlatban, úgy hívják, hogy „elveszett a fürdőkád dugója”. Ha kinyitod a hideg csapot: ami víz befolyik a kádba, az mindjárt ki is folyik a lefolyón. Ha a meleg csapot is kinyitod, akkor már két csőből folyik be a víz<sup>8</sup>, de mind ki is folyik a lefolyón.

A csomóponti törvény alkalmazásában a hálózat bármely, zárt felületbe foglalt része is csomópontnak tekinthető. Otthon ez úgy érvényesül, hogy nem csak a kád lehet csomópont, hanem annak tekinthető az egész lakás, vagy az egész ház, vagy akár a lakótömb.

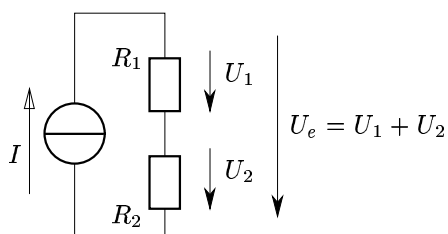
<sup>8</sup>Keverő csapterlep kizárva.

### 1.3. Ellenállások eredője

Bonyolultabb hálózatok kezelését megkönnyíti, ha bizonyos gyakran előforduló rész-hálózatokat azok egyenértékű eredőjével helyettesítjük. Most két ellenállás soros és párhuzamos eredőjét mutatjuk be.

#### 1.3.1. Soros eredő

A két ellenállás soros kapcsolásából álló egykaput *áramgenerátorral* meghajtva érdemes vizsgálni – így az egyes ellenállásokon keletkező feszültség azonnal számítható (11. ábra).



11. ábra. Ellenállások soros eredőjének meghatározása.

Az Ohm törvény alapján:

$$U_1 = I \cdot R_1 \quad \text{és} \quad U_2 = I \cdot R_2$$

A huroktörvény alapján:

$$U_e = U_1 + U_2,$$

tehát a két soros ellenállásból álló egykapu eredő ellenállása:

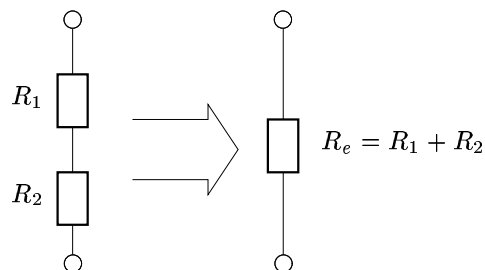
$$R_e = \frac{U_e}{I} = \frac{I \cdot R_1 + I \cdot R_2}{I} = R_1 + R_2$$

Az eredő felhasználásával a két ellenállásból álló egykapu *egyetlen* eredő ellenállással helyettesíthető (12. ábra).

A „külvilág” felől nézve az eredő ellenállás minden szempontból úgy viselkedik, mint az eredeti egykapu. Természetesen a helyettesítés után már nem állapíthatók meg az eredeti alkatrészek paramétere<sup>9</sup>.

Az eredő képzésének szabálya tetszőlegesen sok ellenállás soros kapcsolására is kiterjeszthető.

<sup>9</sup>Nem lehet megmondani például, hogy mekkora teljesítmény disszipálódik az  $R_1$  ellenálláson –  $R_1$  „elveszett”.

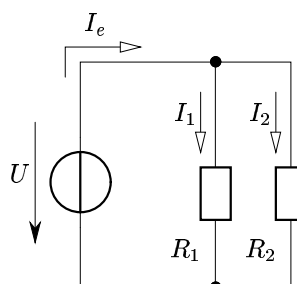


12. ábra. Soros ellenállások helyettesítése egyetlen eredővel.

Arra kell csak vigyázni, hogy a helyettesítendő ellenállás-lánc *egykapuként* csatlakozzon a külvilághoz (azaz két végpontjával).

#### 1.3.2. Párhuzamos eredő

A két ellenállás párhuzamos kapcsolásából álló egykaput *feszültséggenerátorral* meghajtva érdemes vizsgálni (13. ábra).



13. ábra. Ellenállások párhuzamos eredőjének meghatározása.

Az Ohm törvény alapján:

$$I_1 = \frac{U}{R_1} \quad \text{és} \quad I_2 = \frac{U}{R_2}$$

A csomóponti törvény alapján:

$$I_e = I_1 + I_2,$$

tehát a két párhuzamos ellenállásból álló egykapu eredő ellenállása:

$$R_e = \frac{U}{I_e} = \frac{U}{\frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2}} = \dots = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

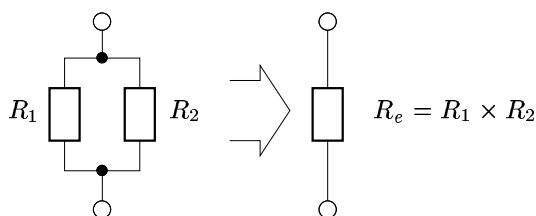
Az eredményül kapott művelet:

$$\frac{\text{a kettő szorzata}}{\text{a kettő összege}}$$

olyan gyakran előfordul, hogy érdemes volt a műveletet külön definiálni: ez a *replusz* művelet, amit egy megdöntött „+” jellel jelölünk: „×”. Az ellenállások párhuzamos eredője a replusz művelettel:

$$R_e = R_1 \times R_2$$

Az eredő felhasználásával a két ellenállásból álló egykapu *egyetlen* eredő ellenállással helyettesíthető (14. ábra).



14. ábra. Párhuzamos ellenállások helyettesítése egyetlen eredővel.

### 1.3.3. Vezetés

A vezetés az ellenállás reciproka:

$$G = \frac{1}{R} = \frac{I}{U}$$

Dimenziója a Siemens:

$$1S = \frac{1}{\Omega} = \frac{1A}{1V}$$

Viszonylag ritkábban fordul elő, hogy egy ellenállást a *vezetésével* jellemzünk, de párhuzamosan kapcsolt ellenállások esetén kétségkívül hatékonyabb, ha az ellenállások értéke helyett a vezetésükkel számolunk.

Példaként tekintünk a 13. ábrát! A csomóponti törvény:

$$I_e = I_1 + I_2 = G_1 \cdot U + G_2 \cdot U,$$

ahol

$$G_1 = \frac{1}{R_1}, \quad G_2 = \frac{1}{R_2}$$

Az eredő vezetés:

$$G_e = \frac{I_e}{U} = G_1 + G_2$$

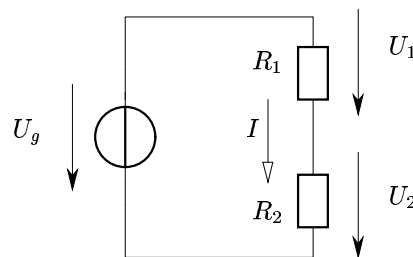
Tehát míg a soros kapcsolásnál az ellenállások értéke adódik össze, a párhuzamos kapcsolásnál a *vezetések értéke adódik össze*.

## 1.4. Ellenállás-osztók

Ellenállás hálózatok kezelésénél gyakran előfordul két jellegzetes eset, ezeket mutatjuk most be. Az eredményeket érdemes fejből tudni.

### 1.4.1. Feszültségosztó

Soros ellenállások egy-egy tagján az ellenállásláncre kapcsolt feszültség hányada mérhető. Példaként tekintünk a 15. ábrát!



15. ábra. Feszültségosztó.

Az ellenállásokon folyó áram:

$$I = \frac{U_g}{R_1 + R_2}$$

A feszültség az egyes ellenállásokon:

$$U_1 = I \cdot R_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_g$$

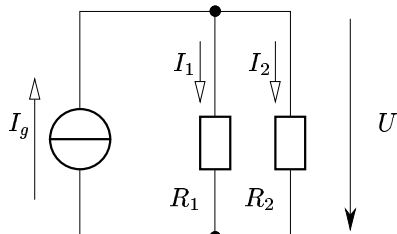
$$U_2 = I \cdot R_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_g$$

A kapott eredményt *feszültségosztó képletnek* hívjuk. Több ellenállásból álló ellenállás-lánc esetén is alkalmazható. A formulát igen könnyű megjegyezni:

$$\frac{\text{a vizsgált ellenállás értéke}}{\text{valamennyi ellenállás összege}} \cdot U_g$$

### 1.4.2. Áramosztó

Párhuzamos ellenállások egy-egy tagján az eredő áram hányada mérhető. Példaként tekintsük a 16. ábrát!



16. ábra. Áramosztó.

Az ellenállásokon eső feszültség:

$$U = \frac{I_g}{G_1 + G_2}$$

Az áram az egyes ellenállásokon:

$$I_1 = U \cdot G_1 = \frac{G_1}{G_1 + G_2} I_g$$

$$I_2 = U \cdot G_2 = \frac{G_2}{G_1 + G_2} I_g$$

A kapott eredmény a feszültségosztó képlet megfelelője – áramosztóra. Ebben a formában több párhuzamos ellenállásra is működik, a keresett áram:

$$\frac{\text{a vizsgált vezetési értéke}}{\text{valamennyi vezetési összege}} \cdot U_g$$

Általában szívesebben dolgozunk az ellenállásokkal, ezért érdemes azonos átalakításokkal átírni a formulát, és így megjegyezni:

$$I_1 = U \cdot G_1 = \frac{G_1}{G_1 + G_2} I_g = \dots = \frac{R_2}{R_1 + R_2} I_g$$

**Vigyázat!** Ebben az alakban csak 2 ellenállásra érvényes a képlet!

### 1.5. Szuperpozíció

Képzeljünk el egy hálózatot, ami ideális feszültség- és áramgenerátorokból<sup>10</sup>, valamint ellenállásokból<sup>11</sup> áll. Az ilyen *lineáris* hálózatban minden

<sup>10</sup>Vezérelt generátor is lehet benne, de a vezérlő mennyiséggel arányos feszültséget vagy áramot kell adnia.

<sup>11</sup>Az energiatárolókkal később foglalkozunk.

feszültség és minden áram a generátorok jelének lineáris kombinációja.

A lineáris hálózat bármely két pontja közötti feszültség:

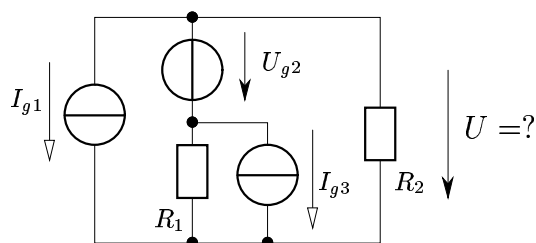
$$U_x = \sum_i R_i I_{gi} + \sum_j G_j U_{gj}$$

alakban keletkezik. Hasonlóan írható fel minden áram is.

A szuperpozíció gyakorlati alkalmazása során az összeg egyes tagjait külön-külön meghatározzuk, végül a részeredmények összegeként kapjuk a végeredményt. Egy-egy tagot úgy tudunk kiszámolni, hogy egyetlen generátor kivételével az összes többi generátort kikapcsoljuk – értékük nulla:

- a nulla értékű feszültséggenerátor *rövidzár*,
- a nulla értékű áramgenerátor *szakadás*.

A szuperpozíció alkalmazását egy példán mutatjuk be. A 17. ábrán 3 generátor szerepel, ennek megfelelően 3 lépés szükséges a részeredmények meghatározásához. Az egyes lépéseket a 18...20. ábrákon mutatjuk be.



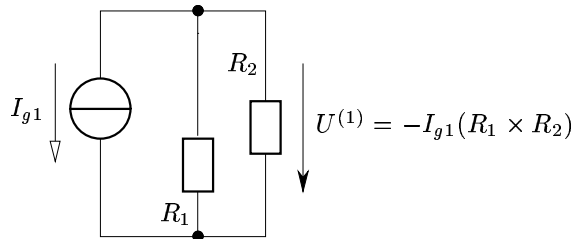
17. ábra. Példa-áramkör szuperpozíció alkalmazásának bemutatásához.

A 18...20. ábrákon látható eredmények összegzésével kapjuk a 17. ábra példájának végeredményét:

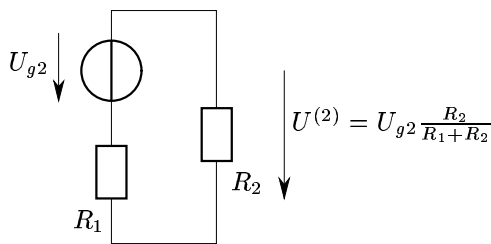
$$U = \sum_i U^{(i)} = \dots$$

$$\dots = U_{g2} \frac{R_2}{R_1 + R_2} - (I_{g1} + I_{g3})(R_1 \times R_2)$$

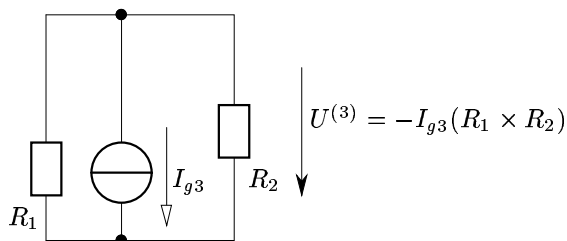




18. ábra. A 17. ábra megoldása: **1. lépés.**



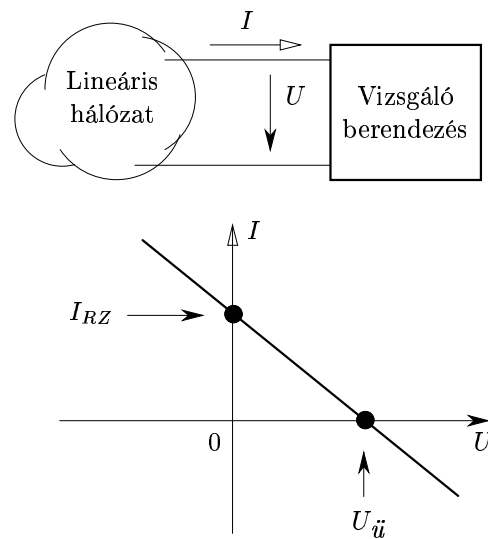
19. ábra. A 17. ábra megoldása: **2. lépés.**



20. ábra. A 17. ábra megoldása: **3. lépés.**

## 1.6. Helyettesítő képek

Ha egy *lineáris hálózat* bármely két pontját ki-vezetjük, akkor az így kapott egykapu feszültség-áram karakterisztikája egy *egyenes* (21. ábra). A „vizsgáló hálózattal” kényszeríthetjük a feszültséget vagy az áramot, de bármit teszünk is, az  $\{U; I\}$  paraméter-páros által kijelölt pont mindig a mért hálózatra jellemző egyenesen lesz.



21. ábra. Lineáris hálózat karakterisztikája.

Két-dimenziós térben az egyenes 2 paraméterrel meghatározható. Áramkőről lévén szó: érdemes a két paramétert úgy megválasztani, hogy értékük egyszerűen számítható illetve mérhető legyen. A célnak jól megfelel a 21. ábrán jelölt két mennyiség:

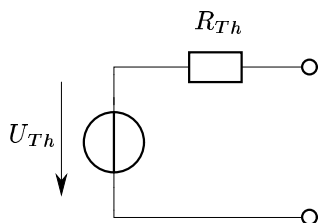
$U_{\ddot{u}}$ : üresjárási feszültség. Értékét úgy kapjuk, hogy *szakadással* zárjuk le a vizsgált áramkört ( $I = 0$ ), és ebben az állapotban megmérjük a feszültséget.

$I_{RZ}$ : rövidzárási áram. Értékét úgy kapjuk, hogy *rövidre zárjuk* a vizsgált áramkört ( $U = 0$ ), és megmérjük a rövidzáron folyó áramot.

Összetett hálózatok vizsgálata során nagy segítséget jelenthet, ha a hálózat egy jól elkülöníthető részét egy jól kezelhető, egyszerű *helyettesítő kép*pel modellezzük.

### 1.6.1. Thevenin kép

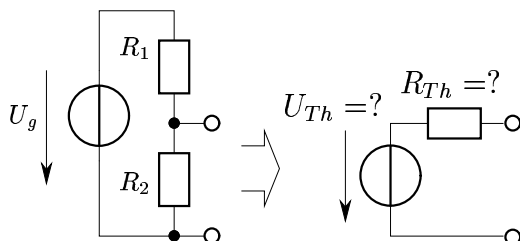
Bármely lineáris egykapu helyettesíthető egy feszültséggenerátort és egy ellenállást tartalmazó hálózattal (22. ábra).



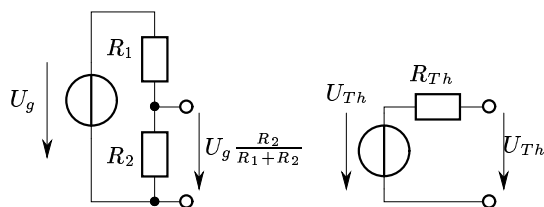
22. ábra. Thevenin kép.

Egy konkrét hálózat Thevenin képének paramétereit úgy határozzuk meg, hogy két pontban megegyezzen az állapot egyenes. Tipikusan az üresjárási feszültség és a rövidzárási áram értékét egyeztetjük.

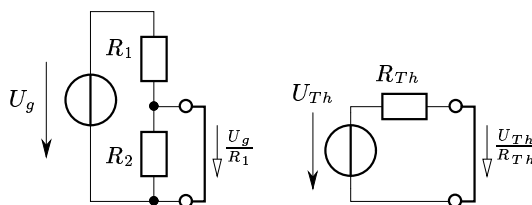
Példaként egy feszültségosztó kapcsolás helyettesítő képének paramétereit fogjuk kiszámolni (23. ábra).



23. ábra. Példa Thevenin kép paramétereinek meghatározására.



24. ábra. Üresjárási feszültségek meghatározása (a példa a 23. ábrán látható).



25. ábra. Rövidzárási áramok meghatározása (a példa a 23. ábrán látható).

Kiszámítjuk az eredeti kapcsolás és a Thevenin kép kimenetén<sup>12</sup> az *üresjárási feszültséget*, a két értéknek meg kell egyeznie (24. ábra):

$$U_g \frac{R_2}{R_1 + R_2} = U_{Th}$$

Az egyenlőségből megkaptuk  $U_{Th}$  értékét.

Ugyancsak kiszámítjuk az eredeti kapcsolás<sup>13</sup> és a Thevenin kép kimenetén a *rövidzárási áramot*, a két értéknek ismét meg kell egyeznie (25. ábra):

$$\frac{U_g}{R_1} = \frac{U_{Th}}{R_{Th}}$$

Az egyenletbe behelyettesítjük  $U_{Th}$  korábban kiszámított értékét, végül a keresett változóra rendezzük az egyenletet. Az eredmény:

$$R_{Th} = R_1 \times R_2$$

Részeredményeinket összegezve a 26. ábrán rajzoltuk meg az átalakítás eredményét.

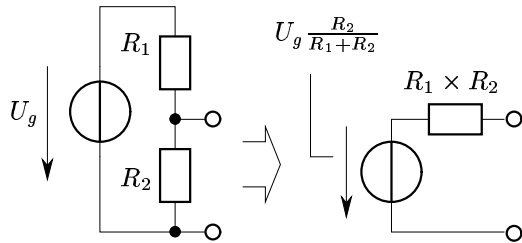
### 1.6.2. Norton kép

Bármely lineáris egykapu helyettesíthető egy *áramgenerátort* és egy ellenállást tartalmazó hálózattal is (27. ábra).

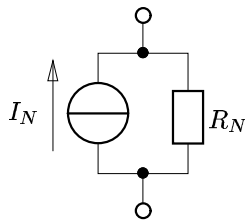
Egy konkrét hálózat Norton képének paramétereit ugyanúgy határozzuk meg, ahogy azt a Thevenin képnél tettük. Példaként – levezetés nélkül – bemutatjuk az átalakítás eredményét a 23. ábrán látható példára (28. ábra).

<sup>12</sup> 24. ábra:  $R_{Th}$ -n nem folyik áram, ezért rajta nulla a feszültség. Emiatt a Thevenin kép kimenetén  $U_{Th}$  mérhető.

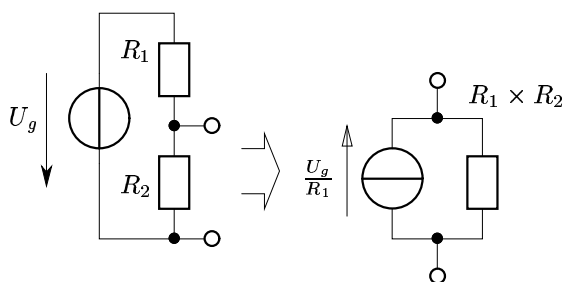
<sup>13</sup> 25. ábra:  $R_2$ -t a rövidzár „söntöli”, emiatt nem folyik rajta áram.



26. ábra. A 23. ábrán kitűzött feladat megoldása.



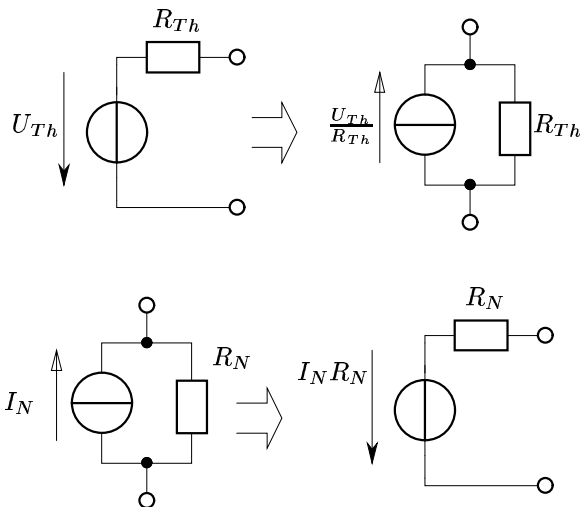
27. ábra. Norton kép.



28. ábra. Példa Norton képre.

### 1.6.3. Norton - Thevenin átalakítás

Gyakran előforduló eset, hogy egy hálózat helyettesítő képe Norton alakban áll rendelkezésünkre – holott a Thevenin képet tudnánk jobban használni. Vagy éppen fordítva. Ilyen esetekre célszerű megjegyezni a két kép közötti átalakítást, melyet a 29. ábrán mutatunk be. A paraméterek meghatározása a korábban ismertetett módon történik, így nem nehéz az ábrát reprodukálni.



29. ábra. Norton - Thevenin átalakítás – és vissza.

## 2. AC – DC

A jeleknek ez a fajta felosztása végső soron a spektrális felbontáson alapul. Elektronikus áramkörök vizsgálata során igen fontos szerephez jut.

### 2.1. DC

A **D**irect **C**urrent kifejezés rövidítéséből származó *DC*<sup>14</sup> megjelölést időben állandó jelekre (egyenfeszültség, egyenáram), valamint tetszőleges jelek *egyen-összetevőjére* használjuk.

DC feszültségforrás például az elektronika energia-ellátását biztosító tápfeszültség.

<sup>14</sup>Magyarul egyszerűen *décé*-nek ejtjük, külföldiül *díszí*-nek.

## 2.2. AC

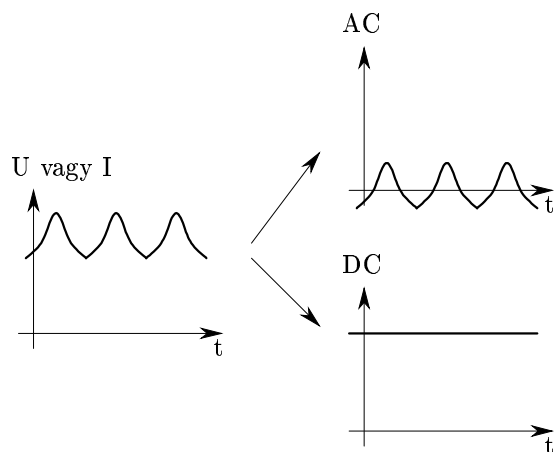
Az Alternating Current kifejezés rövidítéséből származó  $AC^{15}$  megjelölést olyan időben változó jelekre (váltófeszültség, váltóáram) használjuk, amelyeknek várható értéke zérus (azaz nem tartalmaznak DC összetevőt). Ugyancsak használjuk az AC megjelölést tetszőleges jelek *váltóösszetevőjére* is.

AC feszültségforrás például a hálózati feszültség (240V AC), de AC jel származik bármely mikrofonról is.

## 2.3. AC + DC

Bármely áramkörben a mérhető jelek többsége AC és DC összetevőt is tartalmaz. Sok áramköri részegység eltérően viselkedik a két összetevőre, ezért gyakorta AC és DC összetevőire bontjuk az eredeti (összetett) jelet.

Az AC – DC összetevőkre bontást egy példán mutatjuk be (30. ábra).



30. ábra. Példa: összetett jel AC és DC komponensei.

## 3. Jel és föld

Az elektronikus rendszerek többségében kiválasztunk egy pontot, és annak potenciálját referenciaként használjuk. A referenciának választott pontot *közös pontnak*, de még gyakrabban *földpont*

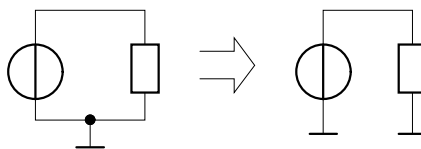
<sup>15</sup>Magyarul *ácé*, külföldiül *éjszi*.

*nak*<sup>16</sup> hívjuk. Jelölését a 31. ábrán mutatjuk be.



31. ábra. Földpont jelölései.

Egy áramkörnek tipikusan több vezetéke csatlakozik a földpontra. A bevezetett jelölés használatával nem szükséges hosszú (föld) vezetékét rajzolni, elegendő valamennyi földre kötendő vezeték végét a *föld* jellel lezárni (32. ábra). Természetesen ez csak jelöléstechnikai egyszerűsítés, a fizikai valóságban ezeket a földpontokat tényleges vezeték köti össze.



32. ábra. Példa földpont kapcsolástechnikai használatára.

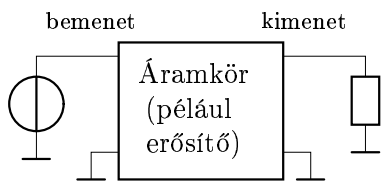
### 3.1. Aszimmetrikus jelkezelés

A laboratóriumi mérőgenerátorok többségének egyik kivezetése a földre van kötve. Az elektronikai egységek többsége jól illeszkedik ehhez: a bemeneti egykapu egyik végződése megegyezik az áramkör földpontjával, és ugyanez a helyzet a kimeneten is (33. ábra).

### 3.2. Szimmetrikus jelkezelés

A kapcsolási rajzon jelölt vezeték a fizikai valóságban nem ideális: ellenállása véges, induktivitása van, továbbá kapacitív és induktív csatolásban van környezetével. Emiatt aszimmetrikus jelkezeléssel nem lehet nagyobb távolságra elvezetni a jelet – az

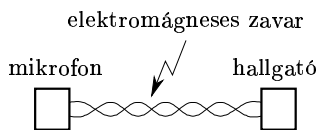
<sup>16</sup>Az elnevezés eredetét az magyarázza, hogy sok bevezetésnek valóban összekötjük a Földdel a referenciapontját - a referenciapontot összekötjük a 240V-os hálózat védőföldjével. Hordozható készülékeknél ez persze eleve kizárt, mégis, mikor vizsgáljuk az áramkört, földpontnak nevezzük a referenciapontot.



33. ábra. Aszimmetrikus jelkezelés.

átviteli úton a vezetéket érő külső elektromágneses hatások *zavarjelként* megjelennek a vételi oldalon.

A probléma megoldására találták ki a *szimmetrikus* jelkezelést. Két azonos „értékű” vezetéket használnak a jel továbbítására. Ilyen megoldás a telefontechnikában használatos *sodrott érpár*. A két vezetéket valóban fizikailag összesodorják<sup>17</sup>, még az is elő van írva, hogy méterenként hány sodrásnak kell lennie. A sodrásnak köszönhetően a két vezeték rövid szakaszokon „helyet cserél”, így biztosítható, hogy mindkét vezetéket azonos környezeti hatások ériék (34. ábra).



34. ábra. Szimmetrikus jeltovábbítás.

A vételi oldalon megérkező mindkét vezeték zavarral terhelt a vevő földpontjához mérve, a *két vezeték közötti* feszültség azonban csak a hasznos jelet tartalmazza. A vett jel szokásos modellezése a 35. ábrán látható.

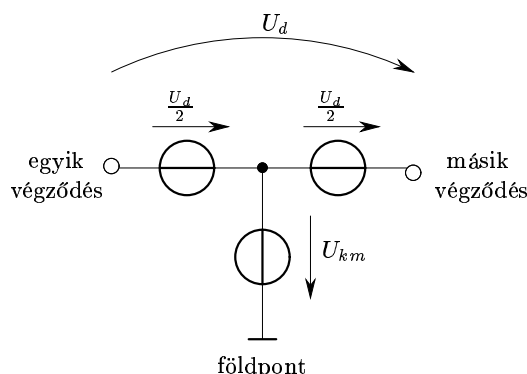
A szimmetrikus jelpár leírására két mennyiséget használunk:

$U_d$ : differenciális feszültség. A vételi oldalon ez a *hasznos jel*.

$U_{km}$ : közös módusú feszültség. A vételi oldalon a mindkét beérkező jelben azonos zavaró jelet írja le.

Az előzőektől függetlenül: ha egy áramkör bemenetére két vezeték érkezik (a harmadik a föld), akkor el kell döntenünk, hogyan írjuk le a bemeneti jelet.

<sup>17</sup>Nem azért, hogy el ne kószáljanak egymástól.



35. ábra. Szimmetrikus jelpár modellje.

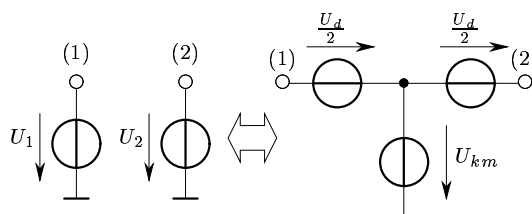
- Ha a két jel egymástól független, akkor célszerű két aszimmetrikus generátort használni.
- Ha a két jel azonos forrásból származik, akkor célszerűbb a differenciális módusú és közös módusú felbontást használni.

A kétféle leírás formálisan bármikor felcserélhető egymással (36. ábra). A feszültségek a következőképpen számíthatók át:

$$U_d = U_1 - U_2 \quad ; \quad U_{km} = \frac{U_1 + U_2}{2}$$

Ellenkező irányban:

$$U_1 = U_{km} + \frac{U_d}{2} \quad ; \quad U_2 = U_{km} - \frac{U_d}{2}$$



36. ábra. Aszimmetrikus – szimmetrikus leírás.

## 4. Erősítő modellezése

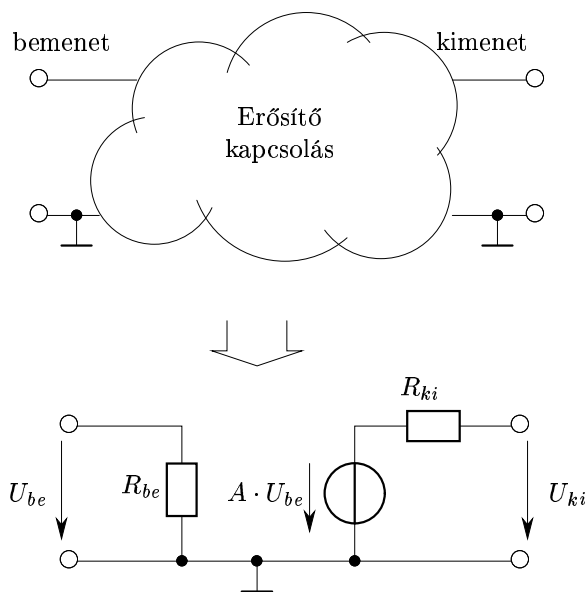
Egy elektronikus berendezés megtervezésének nagyon fontos, csaknem mindent eldöntő lépése a

*rendszerterv* megalkotása. A rendszerterv elkészítésénél az egyes áramköröket funkcionális blokkokként kezelik: nem foglalkoznak azzal, hogy milyen elemekből épül fel az áramkör, csak az a fontos, hogy kívülről hogyan látszik, azaz hogyan illeszkedik bemenetével és kimenetével a környező áramköri blokkokhoz.

A következő leírásban aszimmetrikus jelkezelést tételezünk fel.

A legegyszerűbb megközelítésben az erősítőn csak a bemenet felől a kimenet felé terjed a jel<sup>18</sup> (37. ábra). A bemenetet meghajtó jelet egy egykapu fogadja, ennek ellenállása az erősítő *bemenő ellenállása*.

A kimeneten az erősítő egy, a bemenetére kapcsolt jel által *vezérelt jelet* állít elő. A kimeneten általában Thevenin képpel<sup>19</sup> modellezzük az erősítőt. A Thevenin kép generátora egy *vezérelt generátor*



37. ábra. Erősítő legegyszerűbb modellje.

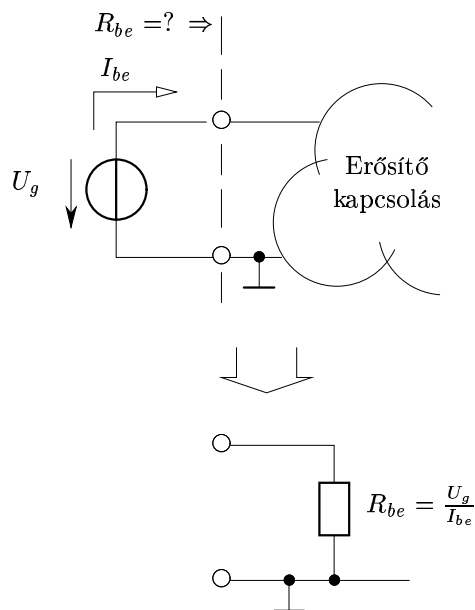
A következőkben a modell három paraméterének mérési (illetve számítási) módszereit ismertetjük.

<sup>18</sup>A valóságban minden erősítőnél fellép a vissza-irányú jelterjedés is – tipikusan parazita elemeken keresztül. E jelenséget szokás *viszahatásnak* nevezni.

<sup>19</sup>Néha Norton képpel.

#### 4.1. Bemenő ellenállás

Ez a paraméter az előző fokozat kimenetéhez való illeszkedés miatt fontos. Mérése és számítása többféleképpen is lehetséges, most a legegyszerűbb módszert mutatjuk be: ismert feszültséget adunk a bemenetre, és mérjük a bemeneten folyó áramot<sup>20</sup> (38. ábra).



38. ábra. Bemenő ellenállás meghatározása.

#### 4.2. Feszültségerősítés

Az erősítő modelljében szereplő  $A$  paraméter meghatározásakor hatástalanítani kell az  $R_{ki}$  kimenő ellenállást, ezért a kimenetet szakadással zárjuk le. A bemenetet ismert feszültséggel hajtjuk meg<sup>21</sup>, és mérjük az üresjárású kimenő feszültséget (39. ábra).

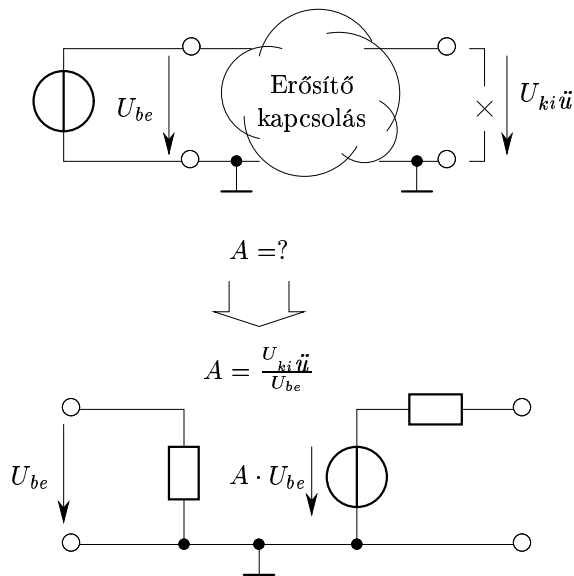
Az  $A$  paraméter *dimenzió nélküli szám*.

#### 4.3. Kimenő ellenállás

A kapcsolás kimenetén a feszültségvezérelt generátor és a kimenő ellenállás együttes hatása jelent-

<sup>20</sup>Lehet ismert árammal táplálni a bemenetet, és a feszültséget mérni – az eredmény ugyanaz lesz.

<sup>21</sup>Voltaképpen bármilyen aktív egykapuval meghajthatjuk a bemenetet, csak  $U_{be}$  értékét ismerni kell.



39. ábra. Üresjárású feszültséggerősítés meghatározása.

kezik – miközben most kizárólag a kimenő ellenállás értékére vagyunk kíváncsiak. Attól függően, hogyan kezeljük ezt a problémát, két különböző módszer közül választhatunk.

#### 4.3.1. Aktív módszer

Passzívva tesszük a vizsgált áramkört, és *aktív mérőhálózattal* fogjuk meghatározni  $R_{ki}$  értékét.

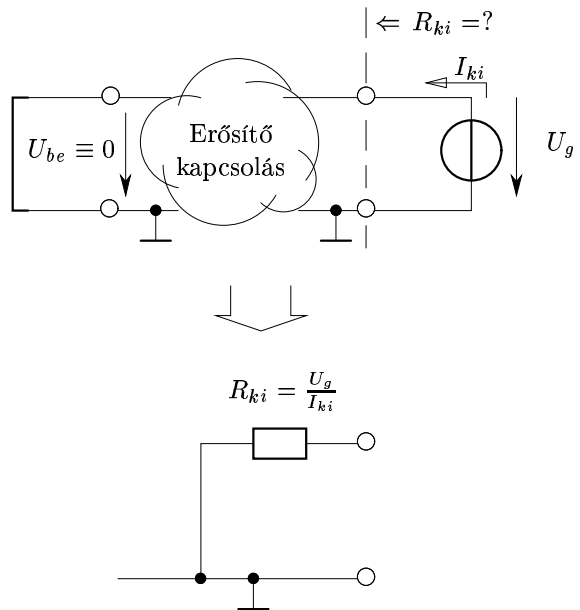
Az erősítő bemenetére zérus feszültséget adunk<sup>22</sup>, emiatt az  $A$  paraméter értékétől függetlenül zérus feszültséget ad a vezérelt generátor – azaz rövidzárként viselkedik. A kimenő ellenállást ugyanúgy határozhatjuk meg (40. ábra), mint ahogy azt a bemenő ellenállásnál tettük.

#### 4.3.2. Passzív módszer

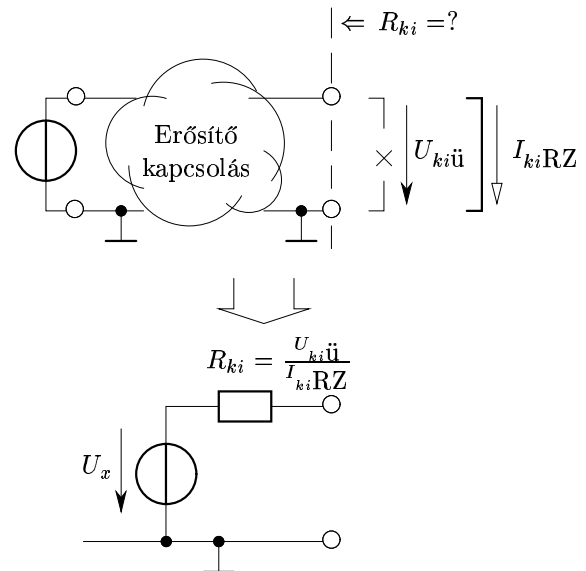
A méréshez (számításhoz) felhasználjuk az erősítő vezérelt generátora által szolgáltatott jelet, és *passzív mérőhálózattal* végezzük  $R_{ki}$  meghatározását.

Az erősítő bemenetét tetszőleges aktív egykappal hajtjuk meg, fontos, hogy  $U_{be} \neq 0$  le-

<sup>22</sup>Ezt a bemenet rövidre zárásával lehet elérni.



40. ábra. Kimenő ellenállás meghatározása (aktív módszer).



41. ábra. Kimenő ellenállás meghatározása (passzív módszer).

gyen. Megmérjük a kimeneten az üresjárású kimenő feszültséget, majd a rövidzárási kimenő áramot: a kettő hányadosa a keresett kimenő ellenállás (41. ábra). Az eredmény szempontjából  $U_{be}$  tényleges értéke érdektelen.

Természetesen egy adott kapcsolás vizsgálatakor mindkét ismertett eljárással pontosan ugyanazt az eredményt fogjuk kapni.

## 5. Nemlineáris eszközök kezelése

Az ellenállások, kondenzátorok és induktivitások elég jól megvalósíthatók, a gyártott eszközök karakterisztikája lineárisnak tekinthető.

A félvezető eszközök azonban - a fizikai működésből eredően - többnyire erősen nemlineáris karakterisztikával rendelkeznek. Hogyan kezeljük ezt a nemlineáris viselkedést?

1. Ha a nemlineáris eszközt *nemlineáris feladatra* használjuk, akkor a tényleges karakterisztikát, vagy annak valamilyen (nemlineáris) közelítését vesszük figyelembe számításaink során. Ezekben az esetekben örömmel szolgál a nemlineáris karakterisztika, mert anélkül az adott feladat nem volna megoldható<sup>23</sup>.
2. Ha alapvetően lineáris célra használjuk az eszközt, de eközben kihasználjuk nemlineáris karakterisztikáját is, akkor *kvázi lineáris* alkalmazásról beszélünk<sup>24</sup>. Általában egy *leíró függvényt* használunk az eszköz karakterisztikájának leírására.
3. Ha kifejezetten lineáris rendszert akarunk létrehozni, akkor az eszközök karakterisztikájának nemlinearitását sajnálatos, de nem elkerülhető rossznak tartjuk, és igyekszünk olyan feltételeket teremteni az áramkörben, hogy a

<sup>23</sup>Példaként említhetjük az egyenirányítást. Az egyenirányító egy periodikus váltakozó feszültségből annak amplitúdójával arányos (de legalábbis monoton) egyenfeszültséget állít elő. Belátható, hogy lineáris rendszerrel ez a funkció nem állítható elő.

<sup>24</sup>Kézenfekvő példa az izzólámpa. Ha periodikus váltófeszültséget kapcsolunk az izzóra, akkor az izzószál hőmérséklete (és ezzel *ellenállása*) függ a váltójel amplitúdójától. Egy rögzített amplitúdó mellett azonban lineáris ellenállásként viselkedik az eszköz.

karakterisztika nemlinearitása a lehető legkevésbé tudjon érvényre jutni.

A jelen fejezetben *alakhű jelfeldolgozásra* alkalmas áramköröket fogunk vizsgálni, ezért az utóbbi szempontot fogjuk szem előtt tartani.

### 5.1. Munkapont

Az erősítő áramkörrel feldolgozandó jelek többsége *kétpolaritású*, azaz pozitív és negatív értéket egyaránt felvesz. Ilyen jelet ad egy mikrofon, egy lemezjátszó pickup, stb. Az erősítés céljára felhasználható félvezető eszközök ezzel szemben *egypolaritású* karakterisztikával rendelkeznek: az eszközök fizikai működéséből eredően csak egypolaritású feszültségek mellett működnek a félvezetők, illetve kivezetéseiken csak meghatározott irányban folyhat áram.

Ezen a problémán úgy leszünk úrrá, hogy a feldolgozandó jelhez hozzáadunk egy konstans értéket úgy, hogy az eredmény egypolaritású jel legyen. A feldolgozandó jelek mindig korlátosak, ezért ez az eltolás mindig megvalósítható. Önmagában az „eltolás” létrehoz egy *alaphelyzetet* az áramkörben, amit munkapontnak hívunk. Az áramkör különböző pontjain különböző mértékű eltolás lehet szükséges, amit egy - a jel feldolgozásától általában elkülöníthető - hálózat állít be, ezt *munkapontbeállító hálózatnak* hívjuk. Az áramkörben zérus vezérlő jel mellett mérhető feszültségeket és áramokat *munkaponti* feszültségeknek illetve áramoknak nevezzük.

A munkaponti értékeket nagy betűvel és „0” indexszel fogjuk jelölni ( $I_{C0}$ ,  $U_{CE0}$ , stb.).

### 5.2. Munkaponti linearizálás

Az áramkörben létrehozott munkaponti értékek a nemlineáris eszközök karakterisztikáin egy-egy pontot (munkapont) jelölnek ki. E pont kis környezetében a tényleges nemlineáris karakterisztikát az érintőjével közelítjük, tehát a nemlineáris rendszert a munkapont kis környezetében *lineárisnak tekintjük* számításaink során.

Általában külön kezeljük a munkapontbeállítást és a jel feldolgozását. A munkaponti értékek meghatározásához az eszközök nemlineáris karakterisztikáját (illetve a tényleges karakterisztika egyszerűsített, de szintén nemlineáris közelítését)



vesszük alapul. A jeltől származó összetevőket a lineáris közelítésből nyert kisjelű modell alapján számítjuk.

### 5.3. Kisjelű paraméterek

Az áramkör minden pontján minden feszültség és áram a *munkaponti* érték, és az arra szuperponált (lényegesen kisebb) *jel* összege, tehát  $U_0 + \Delta U$  és  $I_0 + \Delta I$  mérhető mindenütt. A „ $\Delta$ ” jel használata elég körülményes, ezért a munkaponti értékekhez képest kis megváltozásokat *kisbetűvel* fogjuk jelölni:

$$\Delta U \Rightarrow u ; \quad \Delta I \Rightarrow i$$

Hasonlóan kisbetűvel fogjuk jelölni a munkapont környezetében kis megváltozásokhoz tartozó *kisjelű* ellenállásokat és vezetéseket. Például egy nemlineáris feszültség-áram karakterisztikával rendelkező eszköz esetében a munkapont kis környezetében érvényes kisjelű ellenállást (a karakterisztika meredekségét a munkapontban)

$$r = \left. \frac{\Delta U}{\Delta I} \right|_{U=U_0} = \frac{u}{i}$$

módon fogjuk jelölni.

### 5.4. Hogyan használjuk

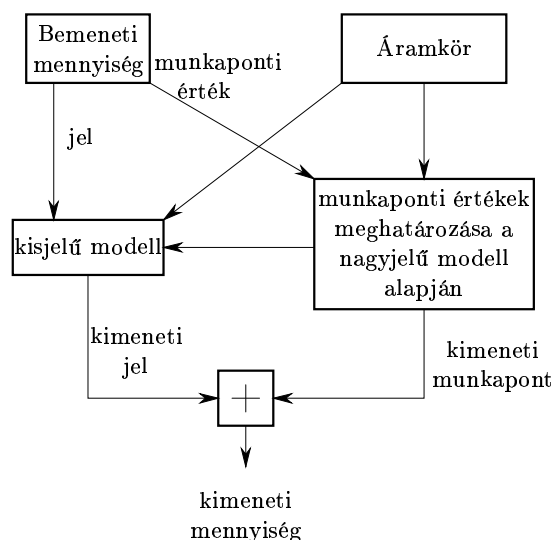
A munkaponti linearizálás módszerét a gyakorlatban a következőképpen használjuk (42. ábra):

1. A bemeneten zérus értékű jel-összetevőt feltételezve kiszámoljuk az áramkörben létrejövő munkaponti értékeket. A számítások során a nemlineáris eszközöket nemlineáris karakterisztikájukkal vesszük figyelembe.

A munkaponti értékek meghatározása két eredményt hoz:

- (a) Ismertté válik a kapcsolás kimenetén keletkező *munkaponti összetevő*.
- (b) Ismertté válik a kapcsolás minden munkaponti paramétere, ezek az értékek lehetővé teszik a nemlineáris eszközök érintő egyenesének meghatározását.

2. Az ismert munkaponti értékek alapján számítható érintő egyenesek alapján megalkotjuk a kapcsolás kisjelű modelljét.



42. ábra. A munkaponti linearizálás módszerének használata.

3. A bemeneti mennyiség jel-összetevőjéből a (lineáris) kisjelű modell felhasználásával kiszámítjuk a kapcsolás kimenetén a *jel összetevőt*.
4. Végül a két összetevő összegeként kapjuk a kimeneti mennyiséget.

A gyakorlatban általában elmarad az utolsó lépés, mert tipikus esetekben külön kezeljük a munkapont és a jel értékét.

## 6. Lineáris eszközök helyettesítése

Az áramkör munkapontja egy nyugalmi helyzetet jelent, melyet az áramkör a bekapcsolása (a tápfeszültség ráadása) után – egy tranziens állapotot követően – véges idő elteltével felvesz. A munkaponti értékek meghatározásakor *DC szemüveget* öltünk, azaz minden eszközt az egyenáramon érvényes működése alapján kezelünk.

A feldolgozandó jelek többsége ezzel szemben olyan időben változó jel, amely nem tartalmaz egyen-összetevőt<sup>25</sup>, azaz várható értéke zérus.

<sup>25</sup>Vagy tartalmaz, de az egyen-összetevő nem hordoz információt, tehát figyelmen kívül hagyható.

Ilyen jel nyerhető a mikrofonról, a lemezjátszó pickup-járól, de ilyen a leggyakrabban használt mérőjel, a szinuszel is<sup>26</sup>. Az ilyen jelek hatásának vizsgálatakor AC szemüveget használunk.

Most sorra vesszük a lineáris elemeket, és bemutatjuk azok DC és AC „helyettesítő képét”.

### 6.1. Tápfeszültség

Az „erősítők” vezérelt energia-átalakítást végeznek, a működéshez (a „felerősített” kimenőjel előállításához) szükséges energiát egy egyenfeszültségű generátorból nyerik – ezt hívjuk tápfeszültségnek.

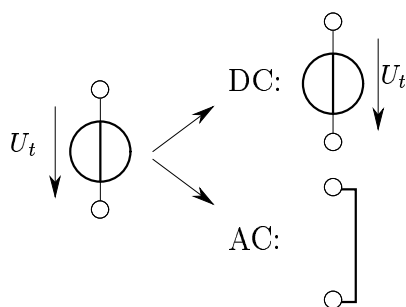
DC szempontból a tápfeszültség generátor önmagát adja:  $U_{DC} = U_t$ , tehát mindenféle helyettesítés nélkül vesszük figyelembe.

AC vizsgálat esetén azt tapasztaljuk, hogy a telepen átfolyó váltóáram hatására nem változik meg a telep feszültsége (hiszen *feszültséggenerátor*). Tehát a telepen a váltó-összetevőkre nézve:

$$\frac{U_{AC}}{I_{AC}} = 0$$

azaz AC szempontból a telep egy 0 értékű ellenállás, vagyis *rövidzár*.

A tápfeszültség generátor kétféle helyettesítését a 43. ábrán is bemutatjuk.



43. ábra. Tápfeszültség generátor helyettesítése.

### 6.2. Egyenáramú áramgenerátor

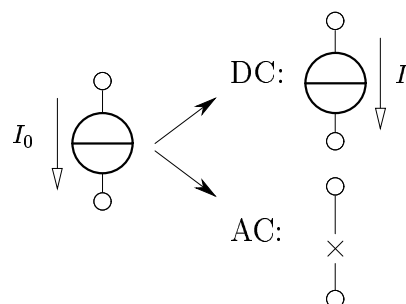
Az elektronika munkapontbeállító hálózatában gyakran használunk áramgenerátort. A tápfeszültség

<sup>26</sup>Vannak esetek, amikor a jel DC összetevője is hordoz információt, ilyenkor DC-csatolt erősítőket használunk.

szültség generátorával ellentétben, itt a váltófeszültség hatására nem jön létre váltóáram, azaz:

$$\frac{I_{AC}}{U_{AC}} = 0$$

Tehát AC szempontból az egyenáramú áramgenerátor egy 0 értékű vezeték (végtelen ellenállás), vagyis *szakadás* (44. ábra).



44. ábra. Egyenáramú áramgenerátor helyettesítése.

### 6.3. Ellenállás

No, ez az egyetlen alkatrész, amit soha semmilyen szempontból nem kell valami mással helyettesítenünk. A képletek rajongóinak kedvéért:

$$R = \frac{U_{DC}}{I_{DC}} = \frac{U_{AC}}{I_{AC}}$$

### 6.4. Kondenzátor

A kondenzátor lineáris eszköz. Kapacitását  $C$ -vel jelöljük, mértékegysége a Farad [F]. A kondenzátoron a feszültség és áram viszonya az

$$I = C \cdot \frac{dU}{dt}$$

képlettel adható meg.

Mivel a kondenzátoron a feszültség és áram kapcsolatában szerepet kap az idő, a kondenzátor felhasználásával lehetséges:

- előírt frekvenciafüggő viselkedés létrehozása (szűrő, hangszín-szabályzó, stb.).
- munkaponti érték és jel szétválasztása.

Most az utóbbira koncentrálnak.

### 6.4.1. Munkapont (DC)

Nyugalmi helyzetben semmi nem változik az idő függvényében ( $\frac{dU}{dt} \equiv 0$ ), ezért a kondenzátorokon nem folyik áram. **Az áramkör munkaponti értékeinek meghatározásakor minden kondenzátor szakadásnak tekinthető.**

### 6.4.2. Jel (AC)

A kapacitás értékének helyes méretezésével el lehet érni, hogy az áramkör működési frekvenciatartományában a kondenzátor rövidzárnak legyen tekinthető:

$$I = C \cdot \frac{dU}{dt} \Rightarrow U(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt + U_0$$

ahol

$i(t)$  a kondenzáron folyó váltóáram (egyen összetevőt nem tartalmaz)

$U_0$  a kondenzátor feszültsége  $t = 0$ -ban (munkaponti feszültség)

és ebből a váltóáramú komponensek közötti kapcsolat:

$$u(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt \Rightarrow \lim_{C \rightarrow \infty} \frac{u}{i} = 0$$

Eredményünk alapján **a kellően nagy kapacitású kondenzátor váltóáramú szempontból rövidzárnak tekinthető.** Egyelőre nem foglalkozunk a kapacitás értékének méretezésével, a tárgyalt viselkedés jelzésére egyszerűen  $\infty$  jelet rajzolunk a kondenzátor mellé.

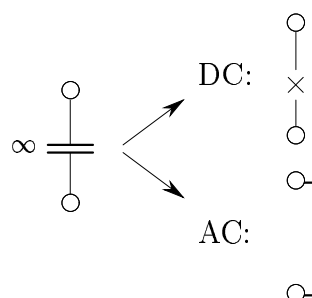
A kondenzátor viselkedésének kezelését a 45. ábrán foglaltuk össze.

### 6.5. Tekercs (induktivitás)

Az induktivitás is lineáris eszköz. Az önindukciós tényezőt  $L$ -vel jelöljük, mértékegysége a Henry [H]. Az induktivitáson a feszültség és áram viszonya az

$$U = L \cdot \frac{dI}{dt}$$

képlettel adható meg.



45. ábra. Kondenzátor helyettesítése.

### 6.5.1. Munkapont (DC)

Az áram nem változik, tehát  $\frac{dI}{dt} \equiv 0$ . **Az áramkör munkaponti értékeinek meghatározásakor minden induktivitás rövidzárnaknak tekinthető<sup>27</sup>.**

### 6.5.2. Jel (AC)

Az induktivitás értékének helyes méretezésével el lehet érni, hogy az áramkör működési frekvenciatartományában az induktivitás szakadásnak legyen tekinthető:

$$U = L \cdot \frac{dI}{dt} \Rightarrow I(t) = \frac{1}{L} \int_0^t u(t) dt + I_0$$

ahol

$u(t)$  az induktivitáson keletkező váltófeszültség (egyen összetevőt nem tartalmaz)

$I_0$  a tekercsen folyó áram  $t = 0$ -ban (munkaponti áram)

és ebből a váltóáramú komponensek közötti kapcsolat:

$$i(t) = \frac{1}{L} \int_0^t u(t) dt \Rightarrow \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{i}{u} = 0$$

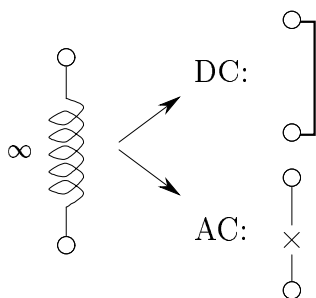
Eredményünk alapján **a kellően nagy induktivitású váltóáramú szempontból szakadásnak tekinthető.**

Ahogy a kondenzátornál tettük, most az induktivitás értékének méretezésével sem foglalkozunk,

<sup>27</sup>A tekercssel megvalósított induktivitás soros ellenállása elég nagy lehet (akár néhányszor 100ohm). Az egyenáramon mérhető ellenállás a feltekercselt huzal ellenállásából adódik.

a tárgyalt viselkedés jelzésére egyszerűen  $\infty$  jelet rajzolunk az induktivitás mellé.

Az induktivitás viselkedésének kezelését a 46. ábrán foglaltuk össze.



46. ábra. Induktivitás helyettesítése.

## 7. Félvezetők modelljei

A félvezetők működését igen pontosan lehet modellezni, és technológiai jellegű problémák kezeléséhez szükséges is a lehető legpontosabb modellt használni.

A jelen anyagban azonban az elektronika alapelemeit tárgyaljuk, mondjuk: ez egy alapfokú kurzus. Annak érdekében, hogy alapvető elveket jól megértsünk, hogy összetett kapcsolásokat jól át tudjuk tekinteni, szükséges, hogy az adott feladathoz illeszkedő *legegyszerűbb modellt* használjunk.

### 7.1. Dióda

#### 7.1.1. Karakterisztika

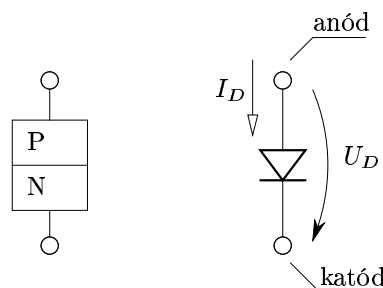
A  $P$  és  $N$  típusú szennyezett félvezető-tömbből kialakított eszköz fizikai felépítését és kapcsolási jelét a 47. ábrán rajzoltuk meg.

A  $P$ - $N$  átmenet aszimmetrikus elektromos viselkedése exponenciális összefüggéssel közelíthető:

$$I_D = I_s \cdot \exp\left(\frac{U_D}{U_T}\right)$$

ahol a két paraméter:

$I_s$  a saturációs áram. Értéke arányos a  $P$ - $N$  átmenet felületével, és arányos a réteghőmérséklet (Kelvinben mérjük!) köbével. Átlagos diszkrét, szilícium alapú planár epitaxiális technológiával gyártott diódánál  $I_s \cong$



47. ábra. Félvezető dióda.

$10^{-13}$  A. Nagy áramú (nagy felületű) teljesítménydiódák esetében néhány nagyságrenddel nagyobb lehet.

$U_T$  a termikus potenciál. Értéke arányos a réteghőmérséklettel, szobahőmérsékleten:  $U_T \cong 26\text{mV}$ .

A megadott paraméterek mellett a dióda karakterisztikája a 48. ábrán látható.

A karakterisztikával kapcsolatban a következőket érdemes tudni:

1. Ha az áramot kényszerítjük a diódára, akkor rajta a karakterisztika egyenletéből számítható feszültség keletkezik:

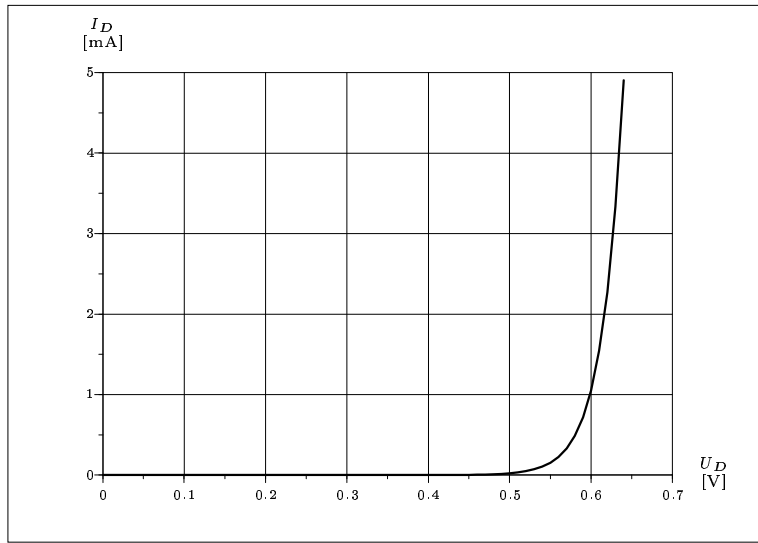
$$U_D = U_T \cdot \ln\left(\frac{I_D}{I_s}\right)$$

2. Az átlagos áramkörben tipikusnak mondható 1mA körüli áramhoz kb. 0,6V feszültség tartozik. Azt a feszültséget, amelynél *számszerűen* áram kezd folyni a diódán, *nyitófeszültségnek* hívjuk.
3. Az exponenciális karakterisztika miatt egy feszültség-növekedés áram-sokszorozódást eredményez.

Jelölje  $1$  és  $2$  index a karakterisztika két pontjában a dióda áramát és feszültségét.

$$\frac{I_{D1}}{I_{D2}} = \frac{I_s \exp\left(\frac{U_{D1}}{U_T}\right)}{I_s \exp\left(\frac{U_{D2}}{U_T}\right)} = \exp\left(\frac{U_{D1} - U_{D2}}{U_T}\right)$$

**Példa:** mekkora feszültség-változás tartozik 10-szeres áramváltozáshoz?



48. ábra. Félvezető dióda karakterisztikája  $I_s = 10^{-13} A$ ;  $U_T = 26 mV$  paraméterek mellett. (Negatív feszültség esetén az áram nulla, ezt a tartományt nem ábrázoltuk.)

**Megoldás:**

$$U_{D1} - U_{D2} = U_T \ln \left( \frac{I_{D1}}{I_{D2}} \right) = \dots \cong 60 mV$$

**Tehát:** ha 60mV-tal megnöveljük a dióda feszültségét, akkor az árama a 10-szeresére nő!

4. A karakterisztika függ a hőmérséklettől.  $I_s$  és  $U_T$  egyaránt monoton nő a hőmérséklettel, a kettő együttes hatására a karakterisztika Celsius fokként 2mV-tal balra tolódik. Képlettel kifejezve:

$$\left. \frac{dU_D}{dT} \right|_{I_D = konstans} = - \frac{2mV}{C^\circ}$$

**7.1.2. Kisjelű helyettesítő kép**

Egy rögzített  $U_{D0}$ ;  $I_{D0}$  munkapontban az érintő meredeksége:

$$\left. \frac{dI_D}{dU_D} \right|_{U_D = U_{D0}} = I_s \exp \left( \frac{U_{D0}}{U_T} \right) \cdot \frac{1}{U_T} = \frac{I_{D0}}{U_T}$$

A kapott mennyiség *vezetés* dimenziójú, mivel jobban szeretjük az ellenállást, ezért ennek reciprokát használjuk *dinamikus ellenállás* (vagy *kisjelű ellenállás*) néven:

$$r_d = \frac{U_T}{I_{D0}}$$

A dinamikus ellenállás függ a munkaponti áramtól.  $I_{D0} = 1 mA$  mellett  $r_d \cong 26 \Omega$ , kisebb áramnál  $r_d$  nagyobb lesz, nagyobb áramnál pedig kisebb.

Ha a diódára egy egyenfeszültség és egy kisjelű feszültség összegét kapcsoljuk, akkor az  $r_d$  kisjelű ellenállás segítségével számítható a diódán folyó *kisjelű* áram (49. ábra).

Természetesen a dolog fordítva is működik: ha a diódára – adott munkapontban – kisjelű  $i$  áramot kényszerítünk, annak hatására  $u = r_d \cdot i$  kisjelű feszültség keletkezik a diódán.

**7.2. Bipoláris tranzisztor**

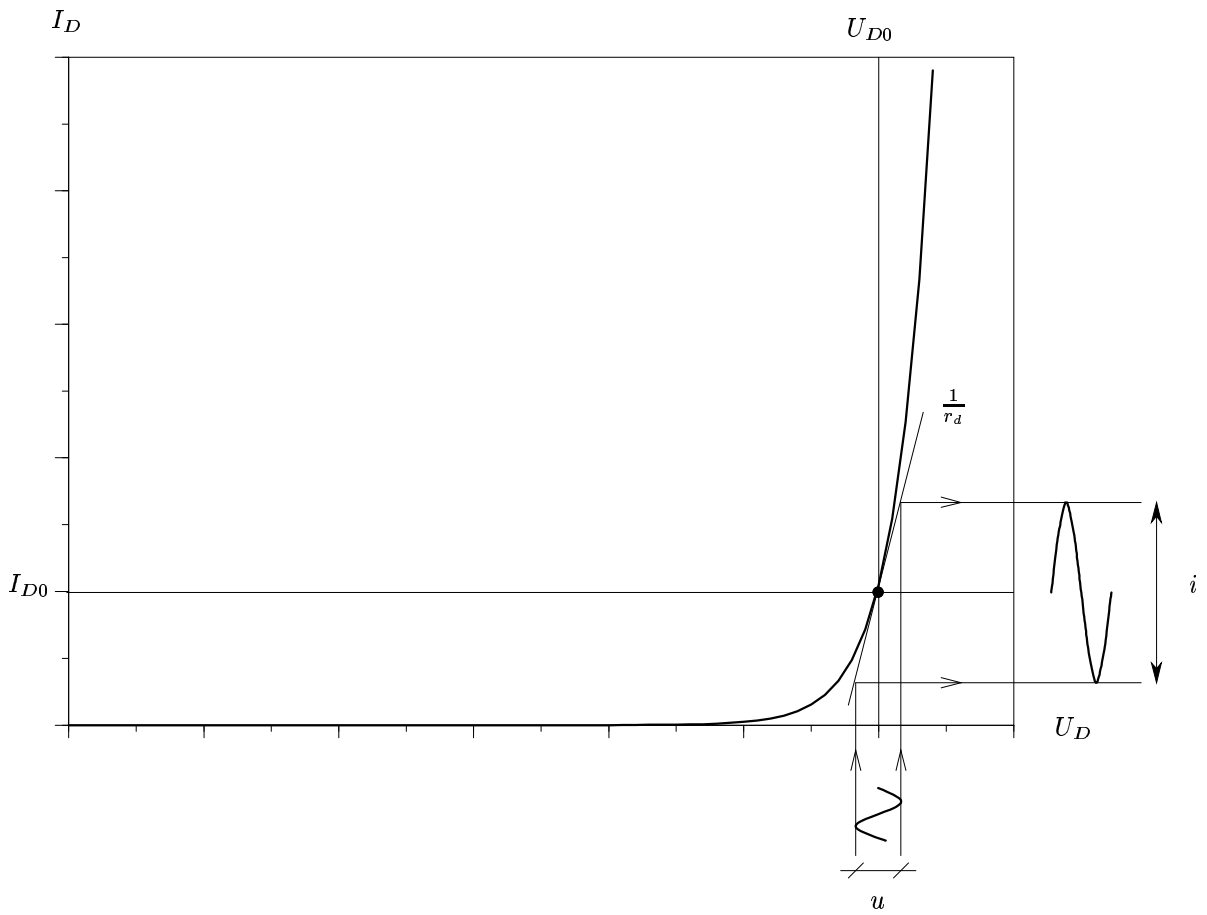
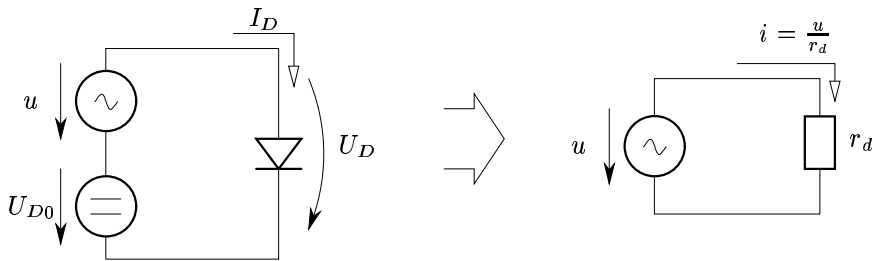
A továbbiakban le fogjuk hagyni a *bipoláris* jelzõt, és egyszerűen csak tranzisztornak fogjuk hívni az eszközt.

**7.2.1. Alapok**

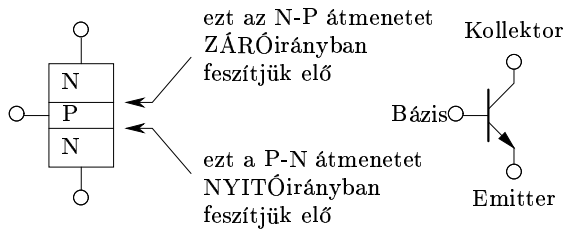
A lehető legegyszerűbb módon próbáljuk elképzelni a tranzisztor felépítését és működését: a diódát (47. ábra) tovább-építjük egy harmadik réteggel (50. ábra).

A tranzisztor elektródáin folyó áramok, valamint az elektródák között mérhető feszültségek jellemölését az 51. ábrán mutatjuk be.

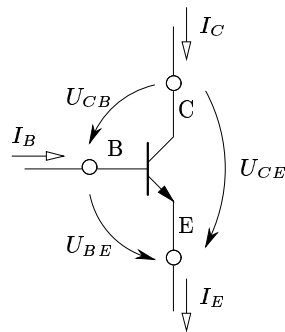
Néhány fontos dolog:



49. ábra. Kiszjelű áram meghatározása a kiszjelű ellenállás segítségével.



50. ábra. NPN tranzisztor.



51. ábra. MÉRŐIRÁNYOK tranzisztoron.

1. A tranzisztor sematikus jelében a nyíl iránya a bázis-emitter dióda irányát mutatja.
2. A tranzisztor elektródáira **NAGYBETŰVEL** hivatkozunk az indexben.
3. A feszültség-indexekben a betűk sorrendje a mérőirányra utal (pl:  $U_{CE} = U_C - U_E$ ).
4. A *normál aktív tartományban*<sup>28</sup> a B-E átmenet nyitóirányú, a C-B átmenet viszont záróirányú feszültséget kap, tehát:

$$U_{BE} > 0 \text{ és } U_{CB} \geq 0$$

5. Az 51. ábrán úgy vettük fel a mérőirányokat, hogy normál aktív tartományban minden mennyiség *pozitív*. Azaz normál aktív tartományban az 51. ábrán jelölt irányú áramok és feszültségek mérhetők a tranzisztoron.
6. A huroktörvény alapján:

$$U_{CE} = U_{CB} + U_{BE}$$

<sup>28</sup>A normál aktív tartomány a tranzisztor lehetséges feszültség- és áram-viszonyainak az a részhalmaza, amelyben a tranzisztor erősítő céljára használható.

7. A csomóponti törvény alkalmazása szempontjából az egész tranzisztor egyetlen csomópontnak tekinthető, tehát:

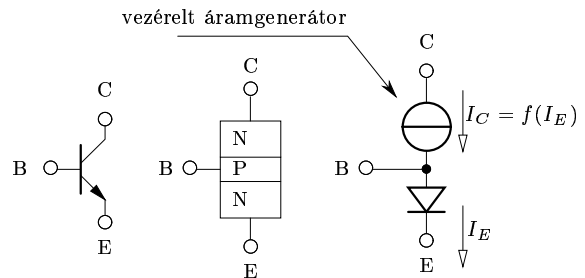
$$I_E = I_B + I_C$$

### 7.2.2. Általános modell

Kizárólag a normál aktív tartomány vizsgálatával foglalkozunk!

A tranzisztor nyitóirányban használt B-E átmenete változatlanul *dióda*ként működik

A záróirányban előfeszített C-B átmeneten elvileg nem szabadna áramnak folynia. Az eszköz megfelelő geometriai kialakításával<sup>29</sup>, valamint megfelelő szennyezési karakterisztika létrehozásával elérhető, hogy a B-E átmeneten átkelt töltéshordozók döntő többsége áttörje a B-C átmenetet, és csak kis hányaduk távozzon a bázis elektróda kivezetésén. A B-C átmeneten folyó áramot tehát a B-E átmeneten folyó áram határozza meg, következésképpen a B-C átmenet áramát egy *vezérelt áramgenerátorral* modellezzük (52. ábra).



52. ábra. Tranzisztor modellje (csak normál aktív tartományban érvényes).

Az 51. ábra mérőirányait alkalmazva néhány fontos dolog az 52. ábra kapcsán:

1. A kollektor-bázis átmenet árama a kollektor elektródán mérhető:

$$I_{C-B} = I_C$$

2. A bázis-emitter átmenet árama az emitter elektródán mérhető:

$$I_{B-E} = I_E$$

<sup>29</sup>Nagyon vékony bázis réteg.

3. A kollektoráram majdnem azonos nagyságú az emitterárammal, de mindig kisebb annál:

$$I_C \cong I_E \quad \text{de} \quad I_C < I_E$$

4. A bázisáram mindig pozitív, és sokkal kisebb a másik két áramnál:

$$I_B = I_E - I_C \Rightarrow I_B > 0 \quad \text{és} \quad I_B \ll I_C ; I_E$$

5. A kollektor–bázis feszültség nincs hatással az áramokra<sup>30</sup>, de pozitívnak kell lennie<sup>31</sup> a normál aktív működési tartomány biztosításához.

6. Az  $f(\cdot)$  függvény inverze matematikailag előállítható ugyan, de az eszköz fizikai működéséből eredően a tranzisztorra kényszerített **kollektorárammal nem vezérelhető az emitteráram!**

Az utolsó pont annyira fontos, hogy megismételjük:

**A B–E átmenet elektromos viszonyai határozzák meg a C–B átmenet áramát. A kettő között ok–okozati viszony van:  $I_E$  az ok,  $I_C$  pedig az okozat. Fordított irányban nem működik a dolog!**

### 7.2.3. Karakterisztikák

Csak a legfontosabb karakterisztikákat ismertetjük.

$$\boxed{U_{BE} - I_E}$$

Ez a B–E dióda karakterisztikája, melyet az

$$I_E = I_S \cdot \exp\left(\frac{U_{BE}}{U_T}\right)$$

összefüggéssel közelítünk. A karakterisztika rajza a 48. ábrán látható. Minden érvényes, amit a diódáról a 7.1. fejezetben leírtunk, csak az indexeket

<sup>30</sup>A másodlagos hatásoktól eltekintünk.

<sup>31</sup>Kis nyitóirányú feszültség megengedhető. Az a lényeg, hogy a C–B átmeneten a dióda-karakterisztikából eredő nyitóirányú áram-összetevő sokkal kisebb legyen, mint a B–E átmenet árama.

kell aktualizálni. A B–E átmenet kisjelű ellenálása adott munkapontban:

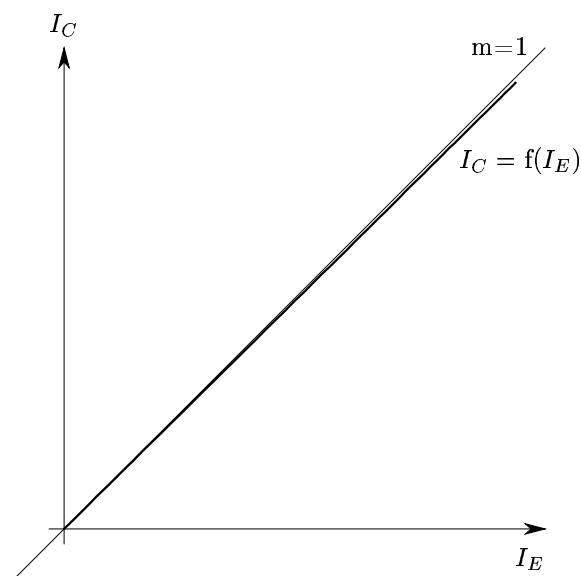
$$r_d = \frac{U_T}{I_{E0}}$$

$r_d$  a tranzisztor kisjelű bázis–emitter feszültsége és kisjelű emitterárama között teremt kapcsolatot:

$$\frac{u_{BE}}{i_E} = r_d$$

$$\boxed{I_E - I_C}$$

Ilyet normális ember nem rajzol<sup>32</sup>, tipikus körülmények között a kollektoráram 1%-on belül megközelíti az emitteráramot. A próbálkozás eredménye az 53. ábrán látható.



53. ábra. Kollektoráram az emitteráram függvényében.

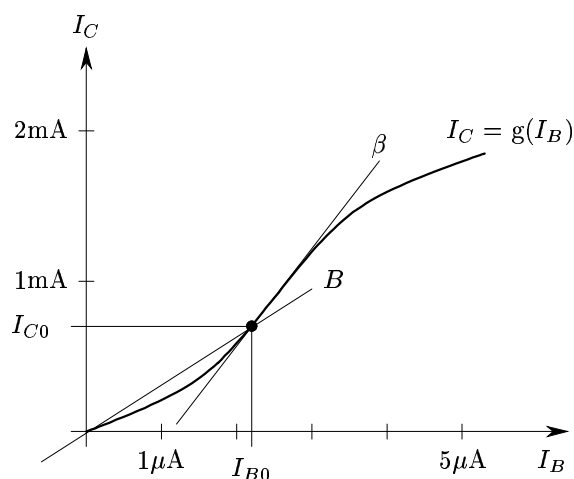
$$\boxed{I_B - I_C}$$

Ez minden amatőr öröme: a kollektoráram tipikusan 2 nagyságrenddel nagyobb, mint a bázisáram. Jóval később majd látni fogjuk, hogy nem (csak) ettől erősít a tranzisztor.

<sup>32</sup>...csak *pedagógus* üzemmódban.



A nemlineáris függvényt az 54. ábrán kissé eltúlozva rajzoltuk meg, mert az ábrát az áramerősítési tényezők fogalmának bemutatására is fel akarjuk használni. A két tengelyen durván eltérő skálaosztást használtunk!



54. ábra. Kollektoráram a bázisáram függvényében.

A nemlineáris  $I_B - I_C$  kapcsolatot körülményes volna kezelni az áramkörök vizsgálata során, ezért bevezetünk két *áramerősítési tényezőt*. Jelölje  $g(\cdot)$  a nemlineáris függvényt:

$$I_C = g(I_B)$$

#### Nagyjelű áramerősítési tényező:

A tranzisztor egy adott munkaponti állapotában az origóból a munkapontba húzott egyenes meredeksége (54. ábra) a *földelt emitteres*<sup>33</sup> *nagyjelű áramerősítési tényező*:

$$B = \frac{g(I_{B0})}{I_{B0}} = \frac{I_{C0}}{I_{B0}}$$

A  $B$  paramétert egy adott kapcsolásban a tranzisztor *munkaponti* áramának kiszámításához használjuk.  $B$  értékét a tranzisztor adatlapja alapján a várható (becsült) munkaponti áram figyelembevételével kalkuláljuk.

<sup>33</sup>Egy gyakran használt kapcsolás elnevezése, melyben a tranzisztor emittere a földponthoz van csatolva. A kapcsolat bemenő áram a bázisárammal, kimenő árama a kollektorárammal van kapcsolatban.

#### Kisjelű áramerősítési tényező:

A tranzisztor egy adott munkaponti állapotában a görbéhez a munkapontban húzott érintő egyenes meredeksége a *földelt emitteres kisjelű áramerősítési tényező*:

$$\beta = \frac{d}{dI_B} g(I_B) = \left. \frac{dI_C}{dI_B} \right|_{I_C=I_{C0}} = \frac{i_C}{i_B}$$

A  $\beta$  paraméter a kisjelű bázis- és kollektoráram közötti kapcsolatot fejezi ki, a kapcsolás kisjelű paramétereinek kiszámításakor használjuk.

Számértékét tekintve a gyakorlatban nincs olyan jelentős eltérés a  $B$  és  $\beta$  paraméterek között, hogy érdemes lenne ezeket külön-külön kalkulálni. Elsősorban elvi jelentősége van a megkülönböztetésnek.

#### Ismét $I_E - I_C$

Miután sikerült ismertetnünk a földelt emitteres áramerősítési tényezőt, most visszatérünk a *földelt bázisú* áramerősítési tényező részletezésére (53. ábra). A fogalmak ugyanolyanok, csak sajnos nem lehet látványosan szemléltetni őket.

#### Nagyjelű áramerősítési tényező:

A *földelt bázisú nagyjelű áramerősítési tényező*:

$$A = \frac{f(I_{E0})}{I_{E0}} = \frac{I_{C0}}{I_{E0}}$$

Az  $A$  paramétert a tranzisztor *munkaponti* áramának kiszámításához használjuk.

#### Kisjelű áramerősítési tényező:

A *földelt bázisú kisjelű áramerősítési tényező*:

$$\alpha = \frac{d}{dI_E} f(I_E) = \left. \frac{dI_C}{dI_E} \right|_{I_E=I_{E0}} = \frac{i_C}{i_E}$$

Az  $\alpha$  paramétert a kisjelű vizsgálat során használjuk. Számértékét tekintve  $A$  és  $\alpha$  egyaránt *majdnem egy, de mindig kisebb annál*.

**Átszámítások.** A földelt bázisú és földelt emitteres áramerősítési tényezők értéke egymástól függ, az egyik a másikba átszámítható. A csomóponti egyenletből származó  $i_E = i_B + i_C$  helyettesítést felhasználva:

$$\alpha = \frac{i_C}{i_E} = \frac{i_C}{i_B + i_C} = \frac{\frac{i_C}{i_B}}{1 + \frac{i_C}{i_B}} = \frac{\beta}{1 + \beta}$$

Az egyenlet  $\beta$ -ra rendezve:

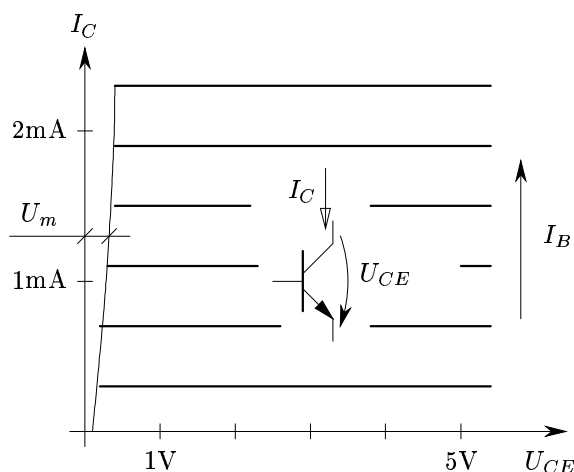
$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

Az átalakítások a nagyjelű áramerősítési tényezőkre is érvényesek:

$$A = \frac{B}{1 + B} \quad \text{és} \quad B = \frac{A}{1 - A}$$

**$U_{CE} - I_C$**

A diagram (55. ábra) azt fejezi ki, hogy a tranzisztorra kapcsolt feszültség (lényegében  $U_{CB}$ ) nincs hatással a vezérelt áramgenerátor áramára.



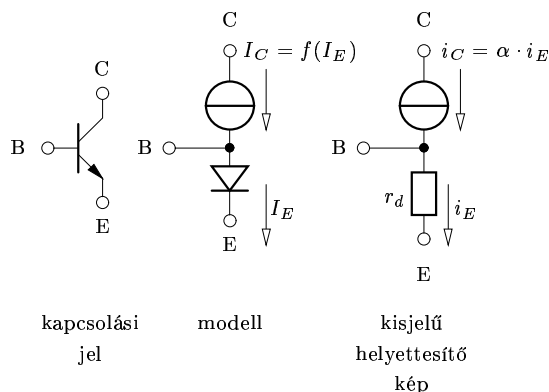
55. ábra. Kollektoráram a kollektor-emitter feszültség függvényében.

Az ábrán egy görbesereg látható: a karakterisztika a *bázisáram* függvénye<sup>34</sup>. Minél nagyobb a bázisáram, annál magasabban fut a görbe (... hm... szóval, az egyenes)<sup>35</sup>.

Az ábrán jelölt  $U_m$  a *maradékfeszültség*, a normál aktív működési tartomány határa.  $U_m$  értéke növekszik a kollektorárammal.

<sup>34</sup> $I_B$  helyett lehet paraméterezni  $U_{BE}$ -vel is.

<sup>35</sup>Másodlagos hatások miatt a valóságban emelkedő jellegű a görbesereg – a vezérelt áramgenerátornak belső ellenállása van.

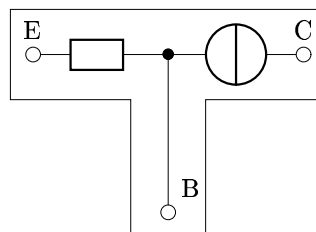


56. ábra. Tranzisztor kijelű helyettesítő képe a fizikai működés alapján.

#### 7.2.4. Kijelű helyettesítő kép

„T” *helyettesítő kép*. A bázis-emitter dióda kijelű helyettesítő képe ismert (49. ábra), a vezérelt áramgenerátornál pedig a kijelű áramerősítési tényezőt használjuk (56. ábra).

A fizikai működés alapján megrajzolt helyettesítő képet *T helyettesítő képnek* hívjuk. Nevét onnan kapta, hogy „T” betűre emlékeztet, de ez csak akkor látszik, ha elforgatjuk (57. ábra).

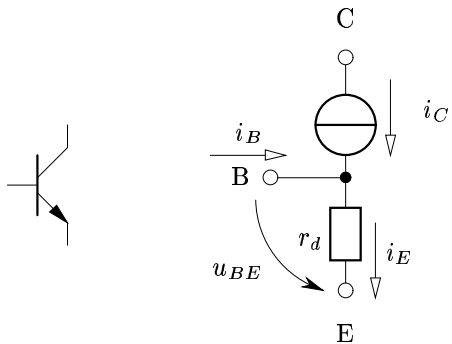


57. ábra. Tranzisztor kijelű „T” helyettesítő képe.

A kijelű mennyiségek közül a következők **egyike** kényszeríthető a tranzisztorra:

$$u_{BE} \quad \text{vagy} \quad i_B \quad \text{vagy} \quad i_E$$

Bizonyára önállóan is boldogul az eddigiek alapján az olvasó, csak a biztonság kedvéért adjuk meg az eredményeket. Az 58. ábra szerinti referencia-irányokat használjuk.



58. ábra. Tranzisztor kisjelű „T” helyettesítő képe – referencia-irányok.

Ha  $u_{BE}$  ismert, akkor

$$i_E = \frac{u_{BE}}{r_d} ; i_C = \alpha \cdot i_E = \alpha \cdot \frac{u_{BE}}{r_d}$$

$$i_B = \frac{i_E}{\beta + 1} = \frac{u_{BE}}{(\beta + 1) \cdot r_d}$$

Ha  $i_B$  ismert, akkor

$$i_E = (\beta + 1) \cdot i_B ; u_{BE} = r_d \cdot i_E = (\beta + 1) \cdot r_d \cdot i_B$$

$$i_C = \beta \cdot i_B$$

Ha  $i_E$  ismert, akkor

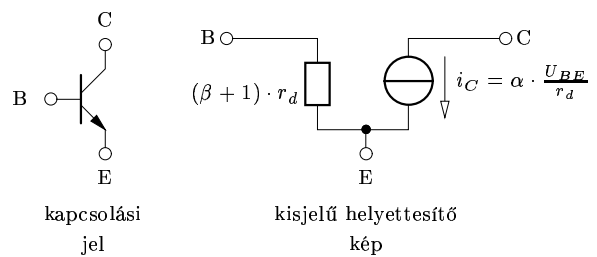
$$u_{BE} = r_d \cdot i_E ; i_B = \frac{i_E}{\beta + 1} ; i_C = \alpha \cdot i_E$$

**$i_C$  nem kényszeríthető a tranzisztorra!**

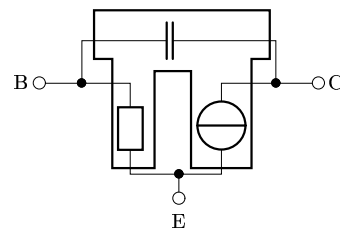
**„II” helyettesítő kép.** Néhány esetben – különösen földelt emitteres kapcsolások vizsgálatakor – kedvezőbb lehet a „II” helyettesítő kép használata (59. ábra).

Az 59. ábrán nem látszik jól, hogy miért is „II” a helyettesítő kép neve. A tranzisztor parazita bázis-kollektor kapacitását leíró kondenzátort is feltüntetjük a 60. ábrán, így már érthető az elnevezés.

A „T” és „II” helyettesítő képek tökéletesen egyenértékűek, de ahol csak lehet, igyekezzünk a „T” helyettesítő képet használni.



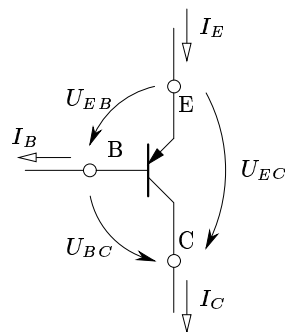
59. ábra. Tranzisztor kisjelű „II” helyettesítő képe.



60. ábra. Ezért „II”.

### 7.2.5. PNP tranzisztor

Számtalan kellemetlenségtől óvhatjuk meg magunkat, ha a PNP tranzisztort úgy rajzoljuk fel, hogy magasabb potenciálú elektródája a rajzon magasabbra kerüljön, és a mérőirányokat a fizikai irányokkal egyezően vesszük fel (61. ábra).



61. ábra. Méréirányok PNP tranzisztoron.

Ha PNP tranzisztor esetén az

$U_{BE} \Rightarrow U_{EB} ; U_{CB} \Rightarrow U_{BC}$  és  $U_{CE} \Rightarrow U_{EC}$   
megfeleltetéseket alkalmazzuk, akkor minden

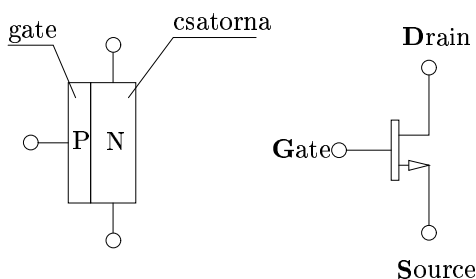
egyenlet és grafikon érvényes, amit NPN tranzistorra bemutattunk.

Mivel a *megváltozásokat* tekintve a fizikai iránnyal ellentétes mérőirány semmilyen zavart nem okoz, a „T” és „Π” helyettesítő képek minden további nélkül használhatók.

### 7.3. JFET

A tervezérlésű tranzisztorok világa igen színes, most csak az elzáródásos réteg-FET, a JFET bemutatásával foglalkozunk.

A 62. ábrán *N csatornás* JFET szerkezeti felépítését és áramköri jelét rajzoltuk meg.



62. ábra. N csatornás JFET.

Az áramköri jel nagyjából tükrözi a fizikai felépítést: a FET egy elnyújtott dióda, amelynek katódján keresztirányban folyik a szabályozott áram.

Általában *lezárva* tartjuk a gate és a csatorna közötti P-N átmenetet, ezen az átmeneten nem folyik áram<sup>36</sup>, azaz  $I_G = 0$ . Ha feszültséget kapcsolunk a csatornára ( $U_{DS} > 0$ ), akkor a csatornán áram folyik. Az csatornán folyó áram nagyságát a gate és a csatorna közötti P-N átmenetre adott feszültség szabályozza. Ez a feszültség a csatorna mentén a hely függvényében változik, mert a csatornán folyó áram hatására a csatornán feszültségesés jön létre. A P típusú gate ekvipotenciálisnak tekinthető. Az egyszerű leírás kedvéért a vezérlést az  $U_{GS}$  gate-source feszültséggel jellemezzük.

Ha a gate és a csatorna között valahol a feszültség eléri az *elzáródási feszültséget*, akkor a csatornán folyó áram csak a vezérlő feszültségtől függ.

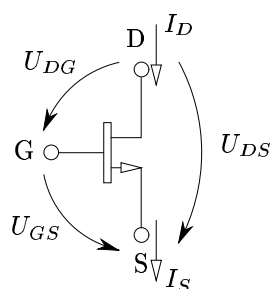
<sup>36</sup>Bizonyos kapcsolásokban nyitóirányú feszültséget kap az átmenet, ilyenkor folyik rajta áram. Ezt a ritkán használatos üzemmódot nem tárgyaljuk.

Ezt az üzemmódot *elzáródási tartománynak* nevezzük: ilyenkor a csatornán folyó áram nem függ a csatornára kapcsolt feszültségtől, csak az  $U_{GS}$  vezérlő feszültségtől.

**A továbbiakban csak az elzáródási tartományt vizsgáljuk.**

#### 7.3.1. Karakterisztikák

A karakterisztikák megrajzolásához a 63. ábrán leölt referencia-irányokat használjuk



63. ábra. Szokásos mérőirányok FET-en.

A JFET karakterisztikái csak egy-egy síknyegyben érdekesek, ezért elterjedt az a módszer, hogy a két legfontosabb görbét közös (öszvér) koordináta-rendszerben ábrázoljuk (64. ábra).

A karakterisztikát az elzáródásos tartományban négyzetes összefüggéssel közelítjük:

$$I_D = I_S \cong I_{DSS} \cdot \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_P}\right)^2$$

$$U_P \leq U_{GS} \leq 0$$

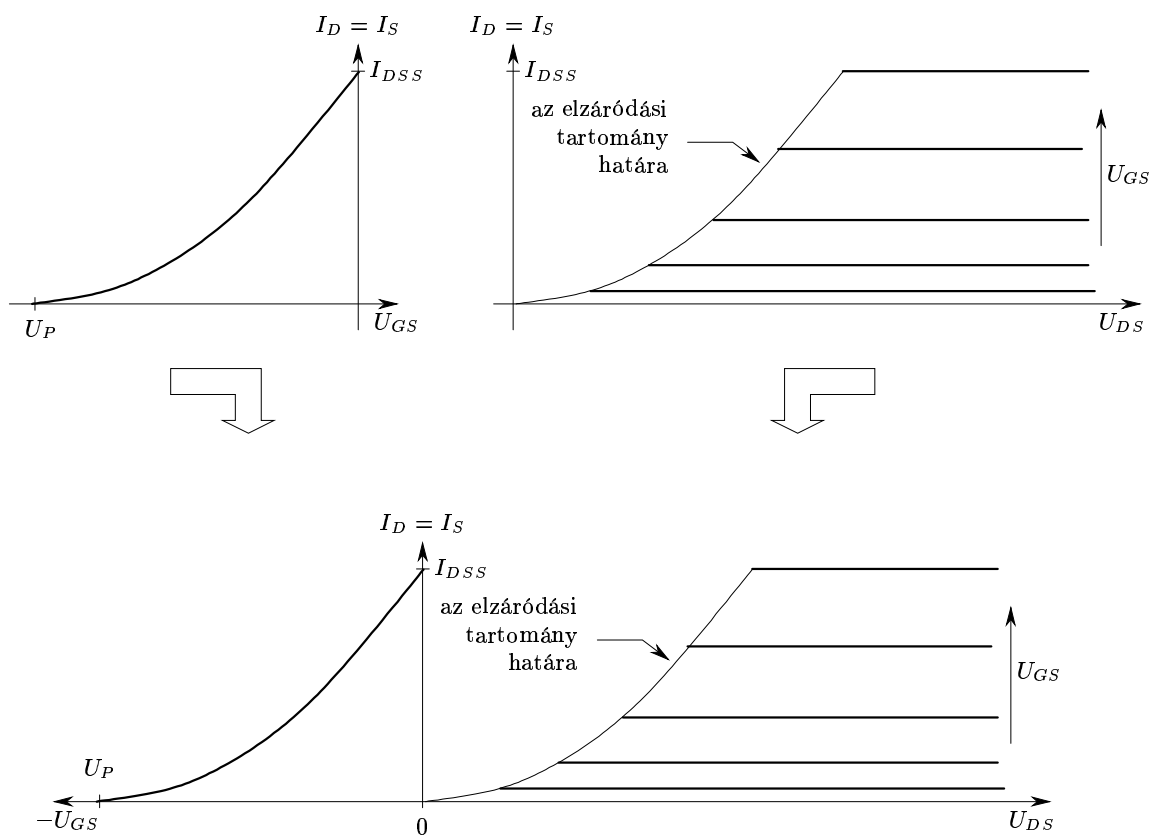
ahol

$I_{DSS}$  a szaturációs áram, értéke 2...10mA.

$U_P$  az elzáródási feszültség, értéke -4...-10V.

*N csatornás* FET-nél az  $U_P$  elzáródási feszültség *negatív*. Ha az  $U_{GS}$  feszültség ennél negatívabb, akkor a csatorna mentén a P-N átmeneten minden ponton a feszültség negatívabb, mint az elzáródási feszültség, és a csatornán nem folyik áram.

Ha  $U_{GS} > U_P$ , akkor a csatornán áram folyik. Az elzáródási tartományban a csatornán folyó áram nem függ a csatornára kapcsolt feszültségtől, csak az  $U_{GS}$  vezérlő feszültségtől, azaz vezérelt áramgenerátorként működik a csatorna.

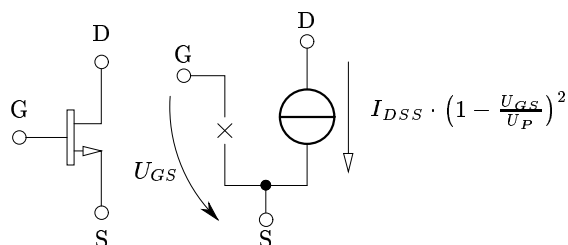


64. ábra. N csatornás JFET karakterisztikái. Az ábra alsó része a két koordináta-rendszer „összezsúntásával” kapott ösvér koordináta-rendszert mutatja.

Az elzáródási tartomány határát az a feltétel jelöli ki, hogy a csatorna mentén legalább egy ponton a P-N átmeneten legalább  $U_P$  nagyságú záróirányú feszültségnek kell lennie. Mivel  $U_{GS} < 0$  és  $U_{DS} > 0$ , valójában a drain és gate közötti feszültségnek kell legalább  $U_P$  nagyságúnak lennie. Ennek megfelelően a 64. ábrán az elzáródási tartomány határát mutató vonal az  $U_{GS} - I_D$  karakterisztika  $|U_P|$  értékkel való eltolásával kapható.

### 7.3.2. Általános modell

A FET fizikai működéséhez a „ $\Pi$ ” helyettesítő kép áll közel. Elzáródási tartományt feltételezve a csatorna egy vezérelt áramgenerátorral modellezhető (65. ábra).



65. ábra. FET általános modellje az elzáródási tartományban.

### 7.3.3. Kisjelű modell

A fizikai kép alapján alkotott „ $\Pi$ ” helyettesítő kép kisjelű verziójához ki kell számítanunk a vezérelt áramgenerátor karakterisztikájának meredekségét – adott munkapontban. Jelölje  $U_{GS0}$  a munkaponti gate–source feszültséget,  $I_{D0}$  pedig a munkaponti áramot. Természetesen a munkaponti értékek kielégítik a karakterisztika egyenletét, azaz

$$I_{D0} = I_{DSS} \cdot \left(1 - \frac{U_{GS0}}{U_P}\right)^2$$

A vezérelt áramgenerátor meredeksége (transzfer vezetése) a munkapontban:

$$S = \frac{i_D}{u_{GS}} = \frac{d}{dU_{GS}} \left( I_{DSS} \cdot \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_P}\right)^2 \right) \Big|_{U_{GS}=U_{GS0}} =$$

$$= I_{DSS} \cdot 2 \cdot \left(1 - \frac{U_{GS0}}{U_P}\right) \cdot \frac{1}{-U_P}$$

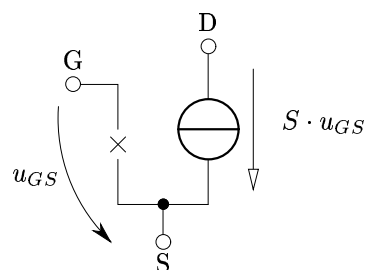
Általában nem  $U_{GS0}$ , hanem  $I_{D0}$  ismert, ezért célszerű  $I_{D0}$  függvényében megadni a meredekséget. A karakterisztika egyenletéből levezethető

$$\sqrt{I_{D0}} = \sqrt{I_{DSS}} \cdot \left(1 - \frac{U_{GS0}}{U_P}\right)$$

összefüggés felhasználásával:

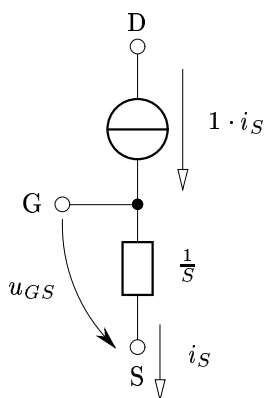
$$S = \frac{i_D}{u_{GS}} = 2 \cdot \frac{\sqrt{I_{D0}} \cdot I_{DSS}}{-U_P}$$

„ $\Pi$ ” helyettesítő kép. Az  $S$  meredekség ismeretében az általános modell alapján igen egyszerűen megkapjuk a kisjelű „ $\Pi$ ” helyettesítő képet (66. ábra).



66. ábra. FET kisjelű „ $\Pi$ ” helyettesítő képe.

**„T” helyettesítő kép.** Formális átalakítással kapjuk a „II” helyettesítő képpel azonos értékű „T” helyettesítő képet (67. ábra).



67. ábra. FET kisjelű „T” helyettesítő képe.

A „T” helyettesítő képben egy  $\frac{1}{S}$  értékű kisjelű ellenállás fejezi ki a gate–source feszültség és a csatorna árama közötti kapcsolatot. A csomóponti törvény értelmében a gate elektródán folyó áram zérus.



1976. óta dolgozom a BME Híradástechnikai Tanszékén. Az Elektronika tárgyon kívül a Mobil Hírközlő Rendszerek tárgyat tanítom.

Korábban katonai és polgári célú, egyedi rádiórendszerekkel foglalkoztam, elsősorban a moduláció és demoduláció megvalósításával, valamint az összeköttetés algoritmusainak tervezésével és programozásával.

Jelenleg az IP alapú kommunikáció és a WEB alapú szolgáltatások érdekelnek.

---

Szívesen veszek az anyaggal kapcsolatos minden megjegyzést és kiegészítést.

Mihály Zsigmond: mihaly@hit.bme.hu

---

BME-HT – 1999.