

Állománynév: aramkorok_06nemlin_eszkozok11short.pdf

Irodalom: Tankönyv: R. J. Smith & R. C. Dorf, „Circuits, Devices and Systems,” Wiley, (5th Edition), pp. 340-349, 364-375, 590-599, 612-645.

Előadó jegyzetei: <http://users.itk.ppke.hu/~kolumban/aramkorok/>

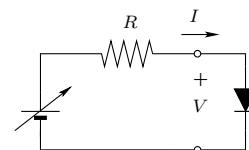
6. NEMLINEÁRIS ESZKÖZÖK: DIÓDA, BIPOLÁRIS TRANZISZTOR ÉS MOSFET TRANZISZTOROK

Nemlineáris rendszerek:

- Néhány egyszerű esettől eltekintve zárt alakú megoldás nem létezik, általában csak numerikus vagy grafikus megoldás található
- Unicitás tétele nem igaz, különböző kezdeti feltételekhez sokszor más megoldás tartozik (pl. hisztérézis, káosz)
- Szuperpozíció tétele nem alkalmazható
- Impedanciamódszer nem alkalmazható, átviteli függvények nem generálhatók
- Nemlineáris rendszerek nem konzervatívok a gerjesztő frekvenciákra nézve

VALÓSÁGOS ESZKÖZÖK TIPIKUS KARAKTERISZTIKÁI

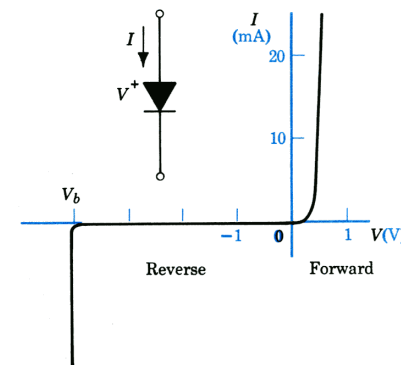
(a) A félvezető dióda feszültség-áram karakterisztikája



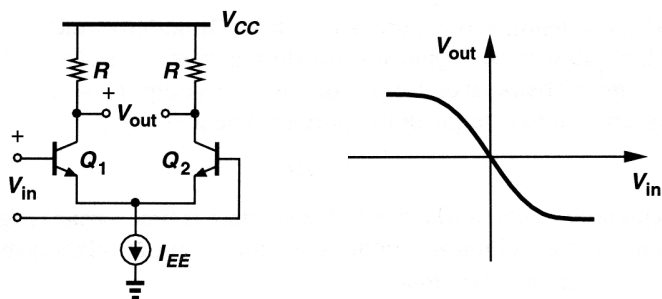
$$I = I_S \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right)$$

ahol szobahőmérsékleten

$$V_T = \frac{kT}{e} = 25 \text{ mV}$$



(b) Tranzisztoros differenciál erősítő átviteli karakterisztikája



$$V_{out} = -\alpha R I_{EE} \tanh \left(\frac{V_{in}}{2V_T} \right) \approx C_1 V_{in} + C_2 V_{in}^2 + C_3 V_{in}^3 \text{ ahol } C_1 \text{ és } C_2 > 0, \text{ de } C_3 < 0$$

A rossz hír:

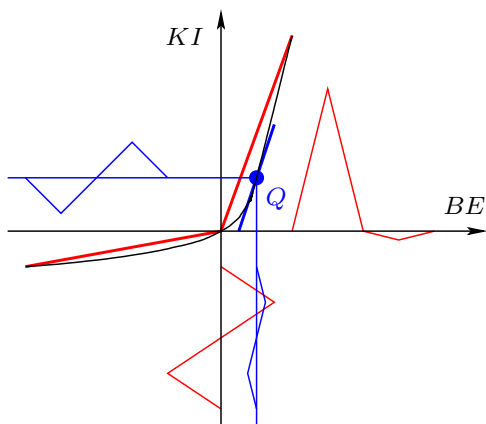
- Minden fizikai rendszer nemlineáris, tipikusan előbb-utóbb *telítésbe megy*
- Zárt alakú tervezési módszerek csak lineáris rendszerekre léteznek, azok használatának feltétele a nemlineáris rendszer *linearizálása*
- Mit lehet tenni?**

Modellek és megoldások

- Nagyjelű analízis
 - Grafikus és numerikus megoldások
 - Nem linearizálás, tehát a lineáris rendszerekre kidolgozott módszerek nem alkalmazhatók
- Törtvonalas közelítés — *large-signal model*
Matematikai háttér: Nemlineáris karakterisztikát szakaszonként lineárisan közelítjük
- Kisjelű modell — *small-signal model*
 - Linearizálás az adott munkapontban
 - Matematikai háttér: Taylor soros közelítés

A nemlineáris eszköz karakterisztikáját kétféle módon linearizálhatjuk

Cél: Linearizáljuk a fekete átviteli függvénnel megadott nemlineáris eszközt



- Piros:
Nagyjelű modell
(törtvonalas közelítés)
- Kék:
Kisjelű modell
a Q munkapontbeli linearizálás

Analóg rendszerek analízisének mérnöki módszere (teljes kép)

NEMLIN ÁRAMKÖR

Linearizálás:

1. Nagyjelű modell
2. Kisjelű modell

LTI ÁRAMKÖRÖK

1. Matematikai modell: **Differenciál egyenlet**
2. **Impedancia** módszer bevezetése
 - Diff. egy. helyett **algebrai egyenlet**
 - **Átviteli függvények**
3. Impedancia módszer csak akkor használható, ha **korlátozzuk a gerjesztéseket** a komplex exponenciálisok osztályára

GERJESZTÉSEK

1. **Tetszőleges gerjesztés**
2. Lineáris rendszer => **szuperpozíció**
3. **Szinuszos bázis** függvények:
 - Fourier sor
 - Fourier transzformáció

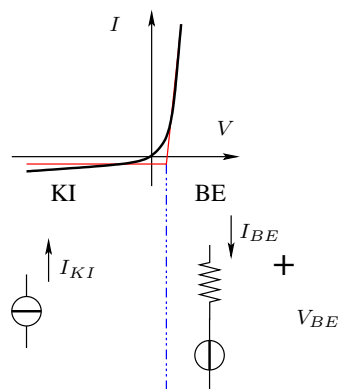
ELEKTRONIKÁBAN HASZNÁLT, LINEÁRIS HELYETTESÍTŐ KÉPET (AZAZ ZÁRT ALAKÚ MEGOLDÁST ADÓ) MÓDSZEREK

I. Nagyjelű modell: A nemlineáris karakterisztika törtvonalas közelítése

1. A nemlineáris eszköz karakterisztikáját törtvonalasan közelítjük
2. Különböző, de lineáris modelleket rendelünk az egyes tartományokhoz
3. Meghatározzuk, vagy feltételezést teszünk a nemlineáris eszköz működési tartományára
4. Egy tartományon belül az eszközt lineárisnak tekintjük

Megjegyzések:

- Nehézséget a működési tartomány meghatározása jelenti (próbálkozás)
- Tipikus alkalmazás:
Munkapont meghatározása, kapcsolóüzemű és logikai áramkörök



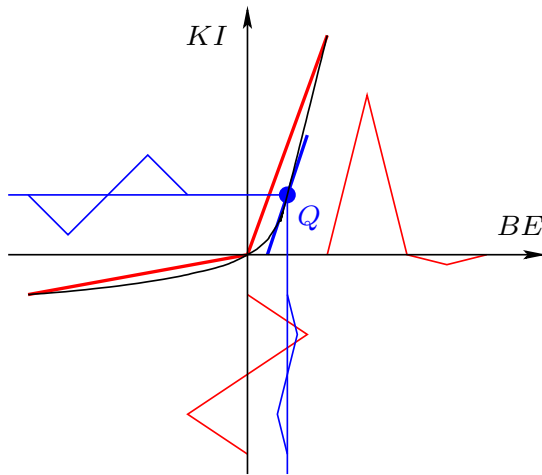
II. Kisjelű közelítés, azaz munkaponti linearizálás módszere

- Matematikai háttér: Taylor vagy hatványsoros közelítés

$$\underbrace{f(Q + \Delta x) - f(Q)}_{\Delta y} = \underbrace{\frac{1}{1!} \frac{df}{dx} \bigg|_{x=Q} \Delta x + \frac{1}{2!} \frac{d^2 f}{dx^2} \bigg|_{x=Q} \Delta x^2 + \dots + \frac{1}{n!} \frac{d^n f}{dx^n} \bigg|_{x=Q} \Delta x^n + \dots}_{\text{maradéktag}}$$

- Eredmény: A perturbációkra a Q munkapontban érvényes *kisjelű modell* (pirossal jelölve)
- Mivel a kisjelű modell lineáris, a kisjelű modellt tartalmazó rendszer is lineáris, azaz rá a lineáris rendszerekre kidolgozott módszerek alkalmazhatók
- Vedd észre, a kisjelű modell **csak a perturbációkra** érvényes!!!
- Kisjelű modell tipikus alkalmazása: Kisjelű erősítők (small-signal amplifier)

Az alkalmazandó modell típusát a bemeneti jel nagysága határozza meg



Jelmagyarázat:

- Fekete:
Eszköz nemlineáris karakterisztikája
- Piros:
Nagyjelű modell, törtvonalas közelítés
- Kék:
Kisjelű modell, a Q munkapontbeli lineárizálás

A lineáris közelítő modellekre érvényes megjegyzések:

Törtvonalas közelítés (nagyjelű modell):

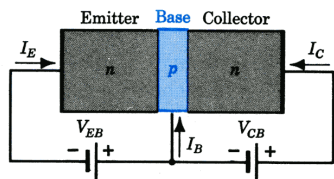
- Durva közelítés (nagy hiba)
- Nagy kivezélés esetén is alkalmazható
- Leginkább a munkapont meghatározására használják
- Az eszközparaméterekben mért nagy szórás miatt a durva közelítés által okozott hiba nem érdekes. A munkapontot egyéb módszerekkel stabilizáljuk

Munkaponti linearizálás (kisjelű modell):

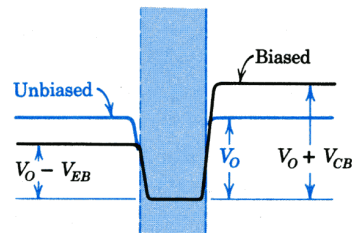
- Csak az adott munkapont szűk környezetében érvényes
- Kis kivezélés esetén alkalmazható
- Az adott munkapontban pontos modellt biztosít
- Csak a perturbációkra igaz
- A DC munkapontot és az AC feldolgozandó jelet csatoló kondenzátorokkal választjuk szét

6.2 A (BIPOLÁRIS RÉTEG-)TRANZISZTOR (BJT)

BJT emitter és bázisrétegeinek előfeszítése



Potenciáeloszlás a BJT-ban



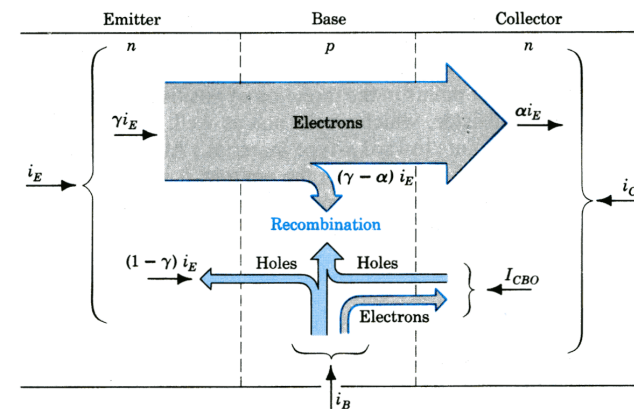
Tranzisztor előfeszítése a normál aktív tartományban:

- EB átmenet: nyitó irányú
- CB átmenet: záró irányú

Például egy nnp tranzisztor esetén:

- $v_{EB} \approx -0,7 \text{ V}$ (azaz $v_{BE} = -v_{EB} \approx 0,7 \text{ V}$)
- $v_{CB} \geq 0 \text{ V}$

Többségi és kisebbségi töltéshordozók mozgása egy npn tranzisztorban



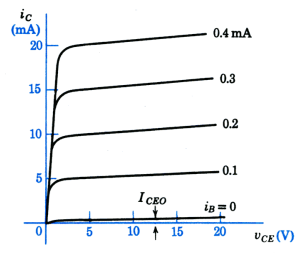
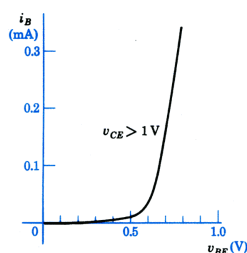
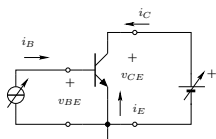
Tranzisztorhatás: Rekombináció a bázisban igen kicsi, azaz $\alpha \approx 1$

Egy npn típusú bipoláris tranzisztor karakterisztikái

Bemeneti kar.

Kimeneti karakterisztika

A karakterisztikák felvétele



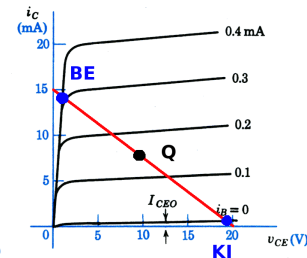
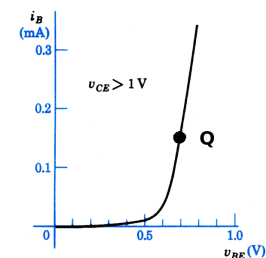
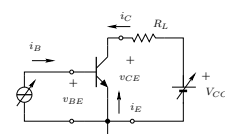
- Mivel $i_B > 0$, a tranzisztor vezérléséhez teljesítmény szükséges
- A pnp tranzisztor karakterisztikái teljesen megegyeznek a fenti be- és kimeneti karakterisztikával, de minden feszültség és áram -1 -vel szorzandó
- Fizikai áramirányt az emittert azonosító nyíl iránya adja meg

Egy npn típusú bipoláris tranzisztor üzemmódjai

Bemeneti kar.

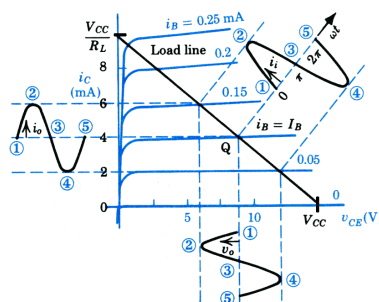
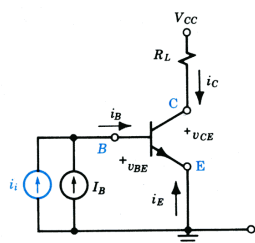
Kimeneti karakterisztika

A kapcsolási rajz



- Erősítő üzemmód (Q)
Normál, aktív: BE átmenet nyitó, míg BC átmenet záró irányban van előfeszítve
- Kapcsoló üzemmód (Kapcsoló és digitális áramkörök)
Ugrás (BE) és (KI) pontok között

Az npn bipoláris tranzisztor erősítő üzemmódjának grafikus analízise



Vedd észre, Thévenin ekvivalens

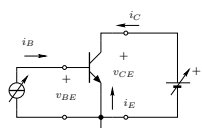
$$v_{CE} + i_C R_L = V_{CC}$$

$$i_C = -\frac{1}{R_L} v_{CE} + \frac{V_{CC}}{R_L}$$

- Ahol:
- Q a munkapont helyét adja meg
 - „Load line” a munkaegyenest jelenti

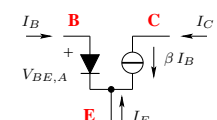
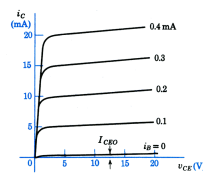
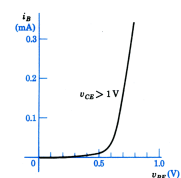
Egy npn típusú bipoláris tranzisztor nagyjelű modellezése

A karakterisztikák felvétele



Bemeneti kar.

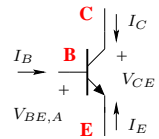
Kimeneti karakterisztika



6.2(a) AZ npn FE TRANZISZTOROK MODELLJE

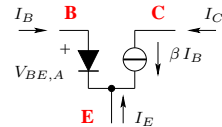
Erősítő üzemmód, azaz normál aktív tartomány:

Feszültség és áram mérőirányok



$$\begin{aligned} I_E &< 0 \\ I_B &> 0, I_C > 0 \\ V_{BE,A} &\approx 0,7 \text{ V} \\ V_{CE} &> 0,5 \text{ V} \end{aligned}$$

Nagyjelű modell



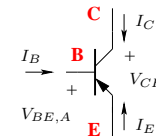
$$\begin{aligned} I_E + I_B + I_C &= 0 \\ I_C &= \beta I_B \text{ és } V_{BE,A} \approx 0,7 \text{ V} \\ \beta &\text{ a földelt emitteres áramerősítési tényező} \end{aligned}$$

- Ahol:**
- Erősítőben a tranzisztorokat normál aktív üzemmódba kell előfeszíteni
 - Segítség az ellenőrzéshez: Az emitteren lévő nyíl a fizikai áramírányt mutatja

6.2(b) A pnp FE TRANZISZTOROK MODELLJE

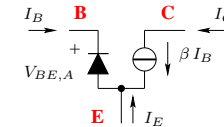
Erősítő üzemmód, azaz normál aktív tartományban:

Feszültség és áram mérőirányok



$$\begin{aligned} I_E &> 0 \\ I_B &< 0, I_C < 0 \\ V_{BE,A} &\approx -0,7 \text{ V} \\ V_{CE} &< -0,5 \text{ V} \end{aligned}$$

Nagyjelű modell

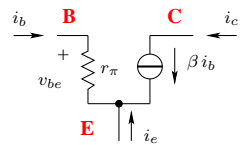


$$\begin{aligned} I_E + I_B + I_C &= 0 \\ I_C &= \beta I_B \text{ és } V_{BE,A} \approx -0,7 \text{ V} \\ \beta &\text{ a földelt emitteres áramerősítési tényező} \end{aligned}$$

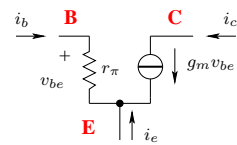
- Ahol:**
- Erősítőben a tranzisztorokat normál aktív üzemmódba kell előfeszíteni
 - Segítség az ellenőrzéshez: Az emitteren lévő nyíl a fizikai áramírányt mutatja

6.2(c) Mindkét tranzisztorra érvényes kisjelű modellek:

Az $|I_E|$ bevezetésével a npn/pnp tranzisztorok kisjelű modelljei megegyeznek



Áramvezérelt áramgenerátor



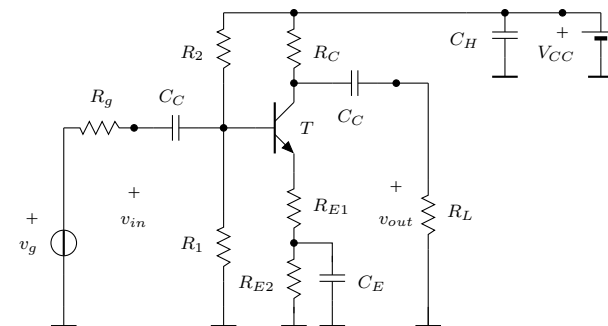
Feszültségvezérelt áramgenerátor

$$r_e = \frac{V_T}{|I_E|} \quad \text{ahol} \quad V_T = 25 \text{ mV}$$

$$r_\pi = (\beta + 1)r_e$$

$$g_m = \frac{1}{r_e} = \frac{|I_E|}{V_T} \approx \frac{|I_E|}{V_T}$$

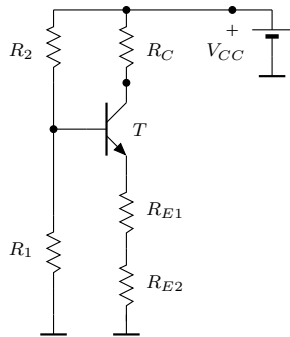
6.2(d) FE TRANZISZTOROS KISJELŰ ERŐSÍTŐ ANALÍZISE



- A tranzisztor munkapontjának meghatározása
Nemlineáris, állandósult állapotú DC analízis
- A tranzisztor adott munkaponthoz tartozó kisjelű modell paramétereinek meghatározása
- A kisjelű modell felrajzolása és a jelúti paraméterek kiszámítása
Állandósult állapotú, lineáris AC analízis

I. A tranzisztor munkapontjának meghatározása

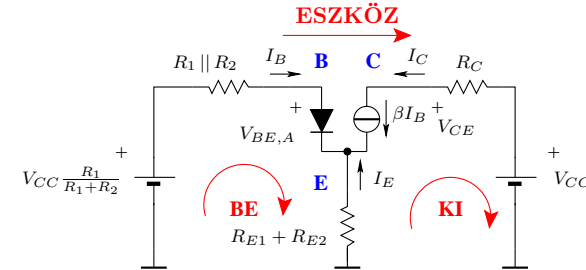
- Nemlineáris, állandósult állapotú DC analízis
- Kondenzátorok szakadással ill. az induktivitások rövidzárral helyettesítendő



Rossz hír: A BJT munkapontja **érzékeny** a réteghőmérsékletre

A tranzisztort helyettesíteni kell az FE nemlineáris tranzisztor modellel

Az *nnp* tranzisztor FE nagyjelű modellje és a Thèvenin tétel alapján



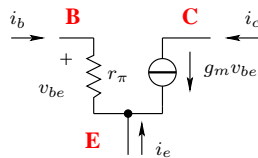
Mindig három egyenlet írható és írandó fel

- Hurokegyenlet a bemeneti (bázis) körre
- Hurokegyenlet a kimeneti (kollektor) körre
- Tranzisztorra vonatkozó egyenlet

Ez függ az eszköz típusától és működési tartományától

Ebben az esetben: normál aktív tartományban üzemelő, *nnp* tranzisztor

II. A tranzisztor adott munkaponthoz tartozó kisjelű modelljének, és a kisjelű modell paramétereinek meghatározása



A $\pi - g_m$ modell paramétereit a munkaponti emitteráram függvényei

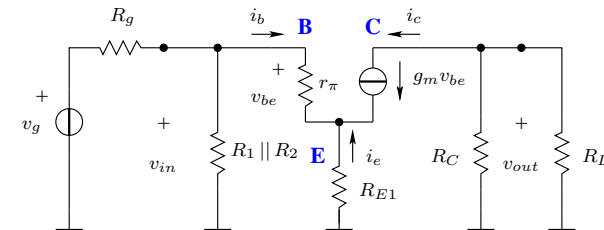
$$r_{\pi} = (\beta + 1) \frac{V_T}{|I_E|} = (\beta + 1) \frac{25}{|I_E^{[mA]}|} \Omega @ T = 25^\circ C$$

$$g_m = \frac{|I_E^{[mA]}|}{0,025} \left[\frac{mA}{V} \right] @ T = 25^\circ C$$

Ne feledd: A kisjelű modell **független** a tranzisztor típusától

III. A kisjelű modell felrajzolása és a jelúti paraméterek meghatározása

- Lineáris AC analízis
- Hidegítő és csatoló kondenzátorok rövidzárként viselkednek az üzemi frekvencián
- Fojtó tekercsek szakadásként viselkednek az üzemi frekvencián



Analóg rendszerek analízisének mérnöki módszere (teljes kép)

NEMLIN ÁRAMKÖR	LTI ÁRAMKÖRÖK	GERJESZTÉSEK
Linearizálás: 1. Nagyjelű modell 2. Kisjelű modell	1. Matematikai modell: Differenciál egyenlet 2. Impedancia módszer bevezetése <ul style="list-style-type: none">Diff. egy. helyett algebrai egyenletÁtviteli függvények 3. Impedancia módszer csak akkor használható, ha korlátozzuk a gerjesztéseket a komplex exponenciálisok osztályára	1. Tetszőleges gerjesztés 2. Lineáris rendszer => szuperpozíció 3. Szinuszos bázis függvények: <ul style="list-style-type: none">Fourier sorFourier transzformáció