

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/>

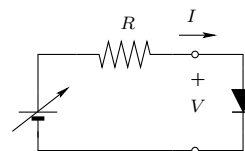
6. NEMLINEÁRIS ESZKÖZÖK: DIÓDA, BIPOLÁRIS TRANZISZTOR ÉS MOSFET TRANZISZTOROK

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. hiszterézis, káosz)
- Szuperpozíció tétele nem alkalmazható
- Impedanciamódszer nem alkalmazható, átviteli függvények nem generálhatók
- Nemlineáris rendszerek nem konzervatívok a gerjesztő frekvenciákra nézve

VALÓSÁGOS ESZKÖZÖK TIPIKUS KARAKTERISZTIKÁI

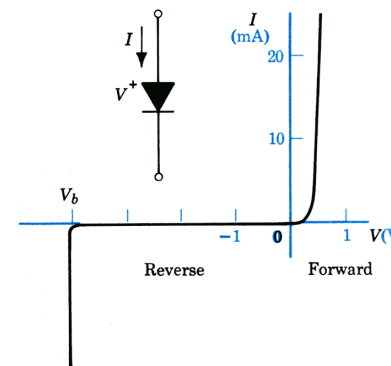
(a) A félvezető dióda feszültség-áram karakterisztikája



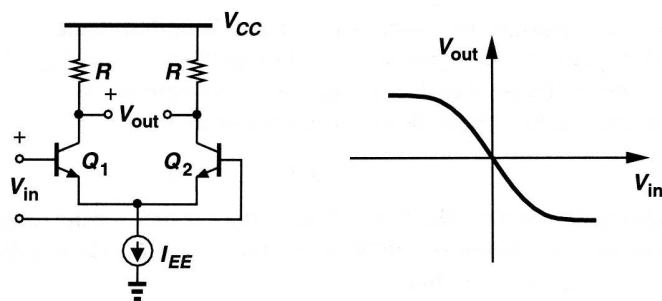
$$I = I_S \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right)$$

ahol szobahőmérsékleten

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



(b) Transzisztoros 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:

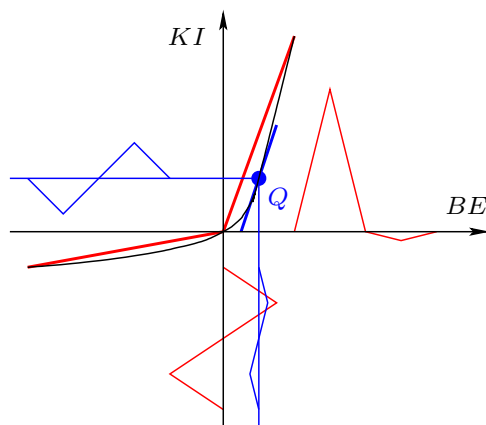
- Minden fizikai rendszer nemlineáris, tipikusan előbb-utóbb *telítésbe megy*
- Zárt alakú tervezési módszerek csak lineáris rendszerekre léteznek, azok használatának feltétele a nemlineáris rendszer *linearizálása*
- **Mit lehet tenni?**

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

A linearizált helyettesítő kép, ami egy LTI áramkör, analízise

Linearizált helyettesítő kép = LTI Áramkör \Rightarrow Egyszerűsített áramkör	
Időtartomány	Transzformált tartomány
<p>↓</p> <p>Lineáris rendszer</p> <p>↓</p> <p>Differenciál egyenlet</p> <p>↓</p> <p>Diff. egy. megoldása</p> <p>↓</p> <p>Válaszjel</p>	<p>↓</p> <p>Transzformált rendszer</p> <p>Impedancia koncepció</p> <p>↓</p> <p>Algebrai egyenlet</p> <p>↓</p> <p>Algebrai módszerek</p> <p>↓</p> <p>Megoldás a transzformált tartományban</p>
<p>\Rightarrow</p> <p>Transzformáció</p> <p>Matematikus</p>	
<p>\Leftarrow</p> <p>Inverz transzformáció</p>	

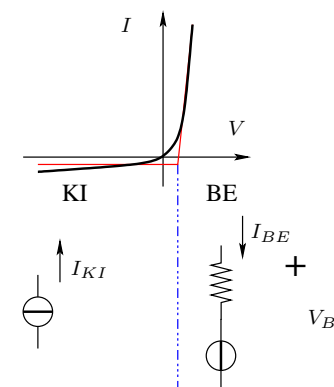
ELEKTRONIKÁBAN HASZNÁLT, LINEÁRIS HELYETTESÍTŐ KÉPET (AZAZ ZÁRT ALAKÚ MEGOLDÁST ADÓ) MÓDSZEREK

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 jelent (próbálkozás)
- Tipikus alkalmazás:
Munkapont meghatározása, kapcsolóüzemű és logikai áramkörök



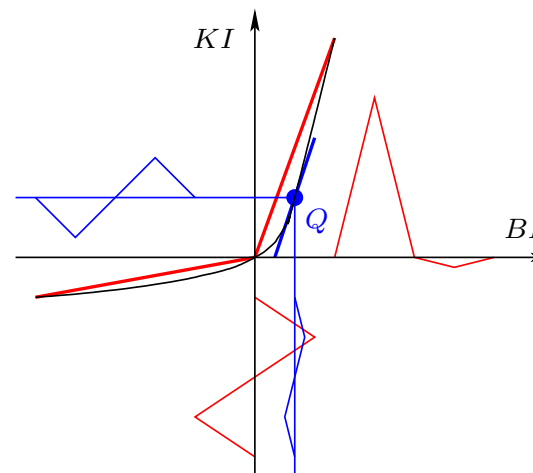
II. Kisjelű közelítés, azaz munkaponti linearizálás módszere

- Matematikai háttér: Taylor vagy hatványsoros közelítés

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

- 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 lineárisítás

A lineáris közelítő modellekre érvényes megjegyzések:

Törtvonalas közelítés (nagyjelű modell):

- Durva közelítés (nagy hiba)
- Nagy kivezérlés 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

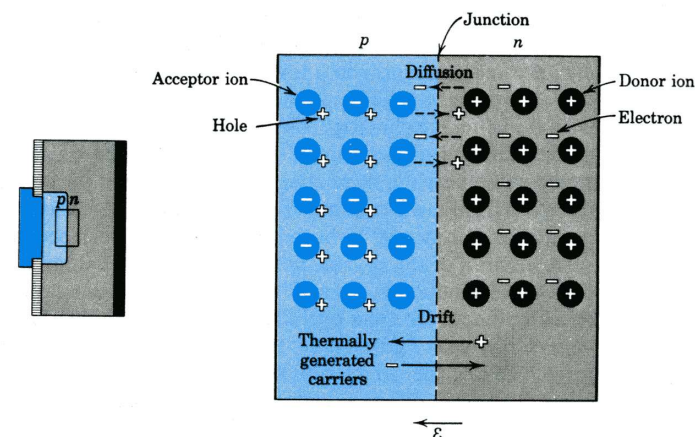
Munkaponti linearizálás (kisjelű modell):

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

6.1 A FÉLVEZETŐ DIÓDA

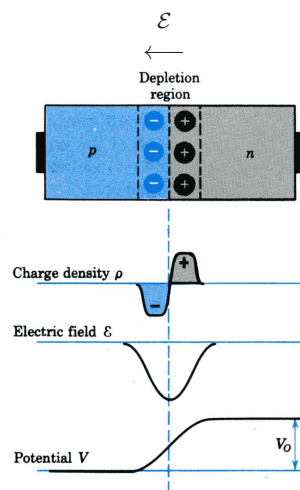
A dióda keresztmetszete

A kiürített réteg kialakulása

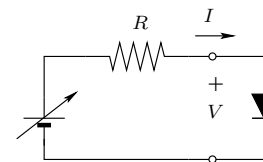


Kettősréteg és potenciálgát a szakadással lezárt diódában

- Külső záró feszültség alkalmazása
(**Záró irányú előfeszítés**):
 - Szélesíti a kiürített réteget és megnöveli a potenciálgátat
 - Exponenciálisan csökken annak a valószínűsége, hogy egy töltéshordozó átjut a potenciálgáton
- Külső nyitó feszültség alkalmazása
(**Nyitó irányú előfeszítés**):
 - Keskenyíti a kiürített réteget és lecsökkenti a potenciálgátat
 - Exponenciálisan nő annak a valószínűsége, hogy egy töltéshordozó átjut a potenciálgáton



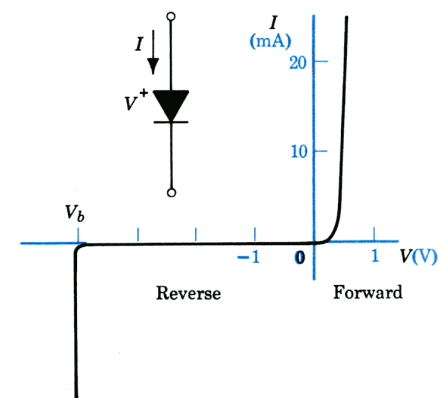
A dióda karakterisztikája és kapcsolási rajzban használt szimbóluma



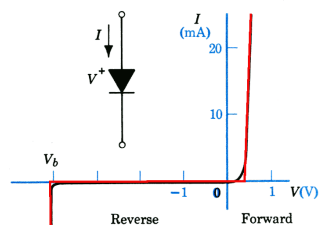
$$I = I_S \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right) \text{ ahol } V_T \approx 25 \text{ mV}$$

Megjegyzések:

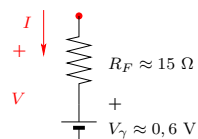
- Feszültségforrást **tilos** nyitó irányban előfeszített pn átmenettel párhuzamosan kapcsolni
- pn átmenet nyitó irányú karakterisztikája függ a hőmérséklettől $\approx -2 \frac{\text{mV}}{^\circ\text{C}}$



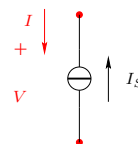
Dióda törtvonalas **nagyjelű** modelljének származtatása



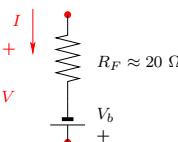
Nyitó irányú előfeszítés
Feltétel: $I > 0$
 $V_F = V_\gamma + I_F R_F$
 $\approx 0,7 \text{ V}$



Záró irányú előfeszítés
Feltétel:
 $I < 0$ és $V_b < V < 0$



Letörési tartomány
Feltétel: $I < 0$ és $V \leq V_b$



Dióda **kisjelű** modelljének származtatása

Dióda egyenlete

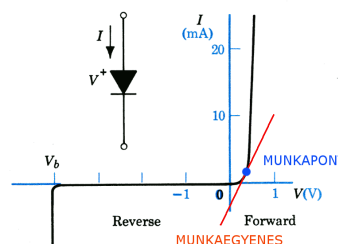
$$I = I_S \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right) \text{ ahol } V_T \approx 25 \text{ mV}$$

A dióda dinamikus vezetése (azaz a Taylor sor lineáris tagja az adott I_Q munkapontban)

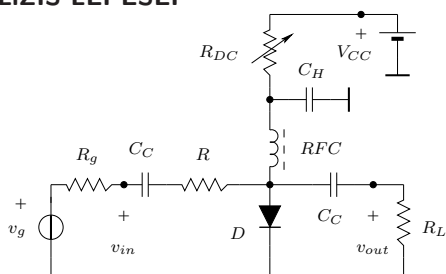
$$g_d = \frac{dI}{dV} \bigg|_{V_Q} = \frac{d}{dV} I_S \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right) \bigg|_{V_Q} \\ = \frac{1}{V_T} I_S e^{\frac{V_Q}{V_T}} = \frac{I_Q + I_S}{V_T} \approx \frac{I_Q}{V_T}$$

A dióda dinamikus ellenállása, azaz kisjelű modellje

$$r_d = \frac{1}{g_d} = \frac{v}{i} = \frac{V_T}{I_Q} = \frac{25}{I_Q^{[\text{mA}]}} [\Omega] \quad \text{@ } T = 25^\circ\text{C}$$



A KISJELŐ ANALÍZIS LÉPÉSEI



I. A nemlineáris eszköz munkapontjának kiválasztása ill. meghatározása

Nemlineáris, állandósult állapotú DC analízis

II. A nemlineáris eszköz adott munkaponthoz tartozó kisjelű modelljének, és a kisjelű modell (helyettesítő kép) paramétereinek meghatározása

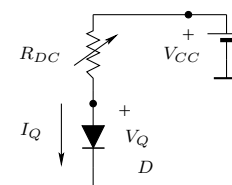
III. Az áramkör kisjelű modelljének (helyettesítő képének) és a jelúti paraméterek meghatározása

Lineáris AC analízis

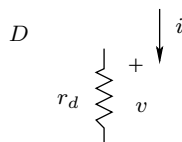
Hidgítések és szűrések, csatoló kondenzátorok

I. A dióda munkapontjának meghatározása

- Nemlineáris, állandósult állapotú DC analízis
- Kondenzátorok szakadással helyettesítendő
- Induktivitások rövidzárral helyettesítendő



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

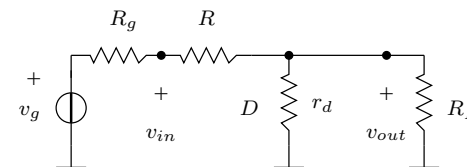


A dióda dinamikus ellenállása a munkaponti áram függvénye

$$r_d = \frac{v}{i} = \frac{V_T}{I_Q} = \frac{25}{I_Q^{[mA]}} \quad [\Omega]$$

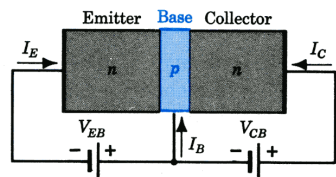
III. A kisjelű modell és a jelúti paraméterek meghatározása

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

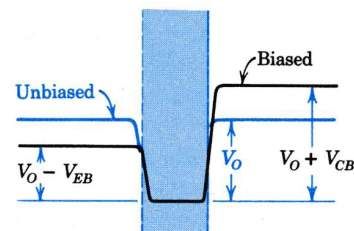


6.2 A (BIPOLÁRIS RÉTEG-)TRANZISZTOR (BJT)

BJT emitter és bázisrétegeinek előfeszítése

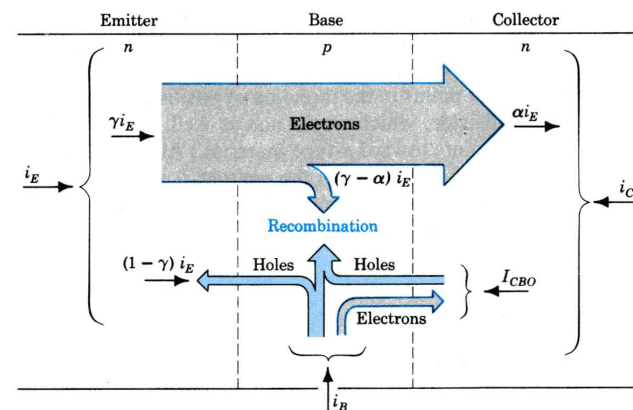


Potenciáeloszlás a BJT-ban



- Tranzisztor előfeszítése a normál aktív tartományban:
- EB átmenet: nyitó irányú
 - CB átmenet: záró irányú
- Például egy npn 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



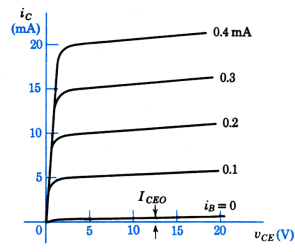
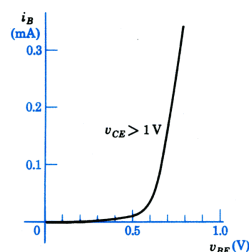
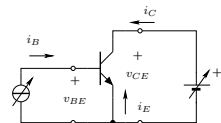
Tranzisztorhatás: Rekombináció a bázisban igen kicsi, azaz $\alpha \approx 1$

Egy npn típusú bipoláris tranzisztor karakterisztikái

Bemeneti kar.

Kimeneti karakterisztika

A karakterisztikák felvétele



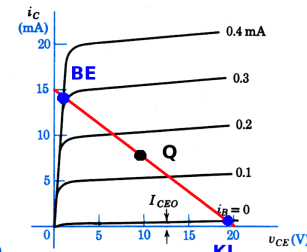
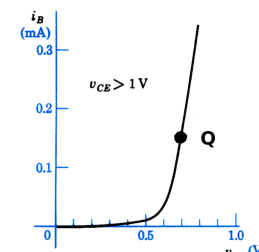
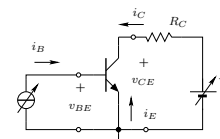
- Mivel $i_B > 0$, a tranzisztor vezérléséhez teljesítmény szükséges
- A pnp tranzisztor karakterisztikái teljesen megegyeznek a fenti be- és kimeneti karakterisztikával, de minden feszültség és áram -1 -vel szorzandó
- Fizikai áramirányt az emittert azonosító nyíl iránya adja meg

Egy npn típusú bipoláris tranzisztor üzemmódjai

Bemeneti kar.

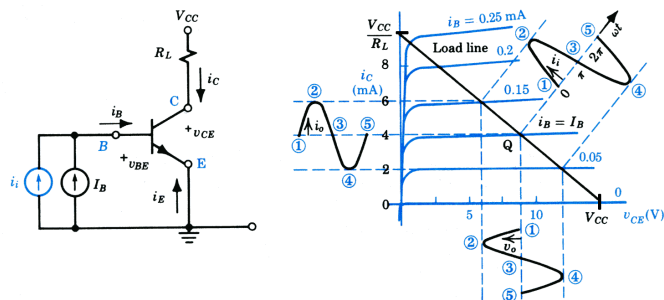
Kimeneti karakterisztika

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

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

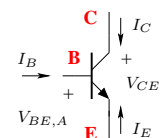
$$i_C = -\frac{1}{R_C} v_{CE} + \frac{V_{CC}}{R_C}$$

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

6.2(a) AZ npn FE TRANZISZTOROK MODELLJE

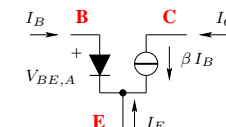
Erősítő üzemmód, azaz normál aktív tartomány:

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



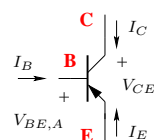
$$\begin{aligned} I_E + I_B + I_C &= 0 \\ I_C &= \beta I_B \text{ és } V_{BE,A} \approx 0,7 \text{ V} \\ \beta &\text{ a földelt emitteres áramerősítési tényező} \end{aligned}$$

- Ahol:
- Erősítőekben 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

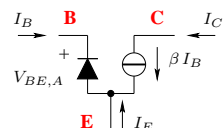
Erősítő üzemmód, azaz normál aktív tartományban:

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

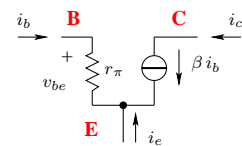


$$\begin{aligned} I_E + I_B + I_C &= 0 \\ I_C &= \beta I_B \text{ és } V_{BE,A} \approx -0,7 \text{ V} \\ \beta &\text{ a földelt emitteres áramerősítési tényező} \end{aligned}$$

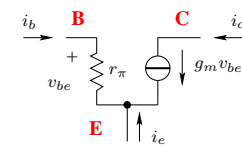
- Ahol:
- Erősítőekben a tranzisztorokat normál aktív üzemmódba kell előfeszíteni
 - Segítség az ellenőrzéshez: Az emitteren lévő nyíl a fizikai áramírányt mutatja

6.2(c) Mindkét tranzisztorra érvényes kisjelű modellek:

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



Áramvezérelt áramgenerátor



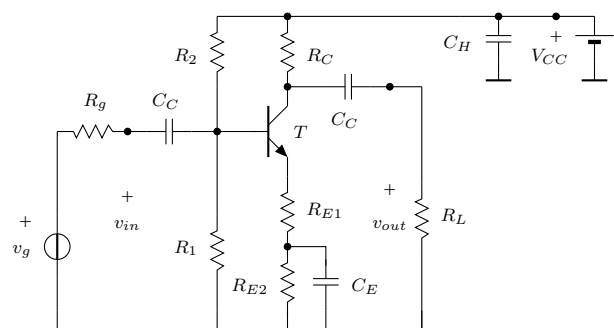
Feszültségvezérelt áramgenerátor

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

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

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

6.2(d) FE TRANZISZTOROS KISJELŐ ERŐSÍTŐ ANALÍZISE



I. A tranzisztor munkapontjának meghatározása

Nemlineáris, állandósult állapotú DC analízis

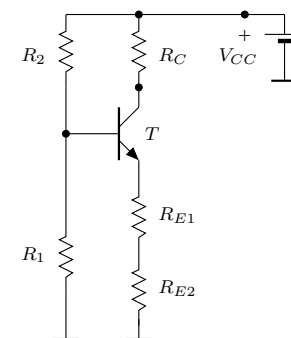
II. A tranzisztor adott munkapontához tartozó kisjelű modell paramétereinek meghatározása

III. A kisjelű modell felrajzolása és a jelúti paraméterek kiszámítása

Lineáris AC analízis

I. A tranzisztor munkapontjának meghatározása

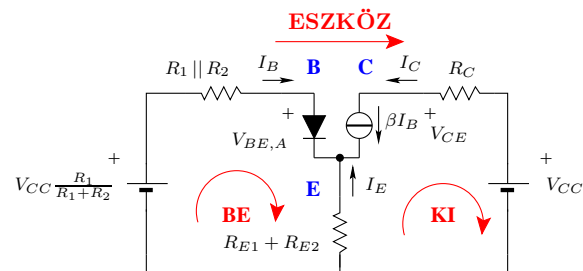
- Nemlineáris, állandósult állapotú DC analízis
- Kondenzátorok szakadással ill. az induktivitások rövidzárral helyettesítendő



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

A tranzisztort helyettesíteni kell az FE nemlineáris tranzisztor modellel

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



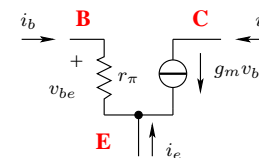
Mindig három egyenlet írható és írandó fel

- 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, *npn* tranzisztor

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



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

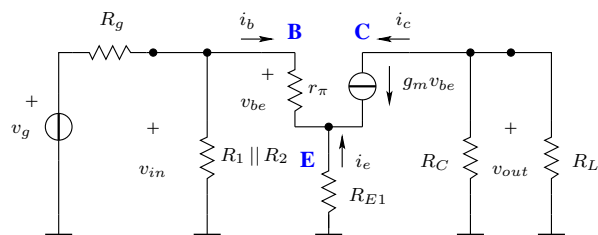
$$r_{\pi} = (\beta + 1) \frac{V_T}{|I_E|} = (\beta + 1) \frac{25}{|I_E^{[mA]}|} \Omega @ T = 25^\circ\text{C}$$

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

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



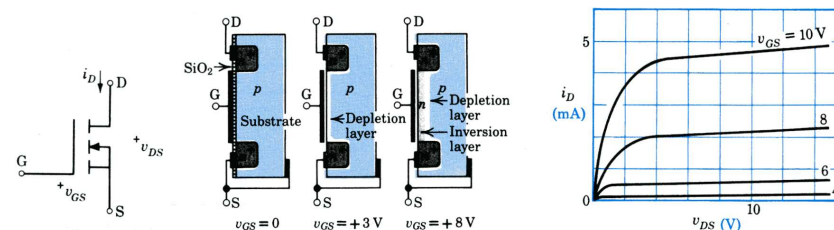
6.3 A MOSFET TRANZISZTOROK

Növekményes (E) módú, n-csatornás MOSFET tranzisztor

Áramköri
szimbólum

MOSFET keresztmetszete
Töltéshordozók eloszlása
alacsony v_{GS} mellett

Kimeneti karakterisztika



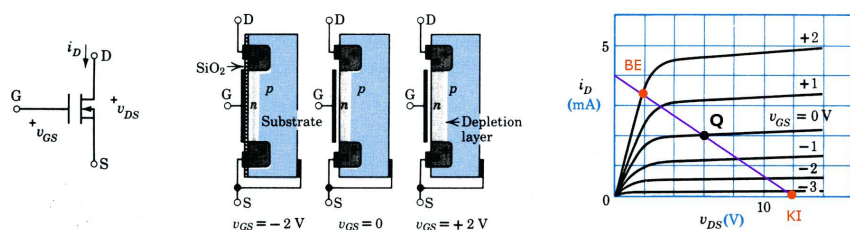
Vedd észre: A kimeneti karakterisztika függ v_{DS} -től (\sim lineárisan)

Kiürítésses/növekményes (DE) módú, n-csatornás MOSFET tranzisztor

Szimbólum

MOSFET keresztmetszete

Kimeneti karakterisztika



- Üzem módok:
- **Q**: Telítésses üzemmód, itt használható erősítésre
 - **BE** és **KI**: Kapcsoló üzemmód
 - $v_{DS} \sim 0$ V: Rezisztív tartomány (vezérelhető ellenállás)

Vedd észre: A kimeneti karakterisztika függ v_{DS} -től (\sim lineárisan)

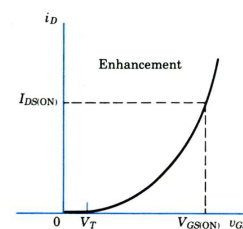
n-csatornás MOSFET-ek szimbólumai

Növekményes (E) MOSFET

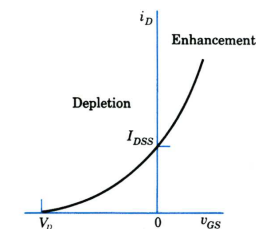
Kiürítésses (DE) MOSFET



n-csatornás MOSFET-ek transzfer karakterisztikái



ahol V_T a küszöbfeszültség



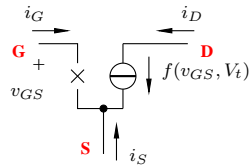
ahol V_p az elzáródási feszültség

6.3(a) A MOSFET TRANZISZTOROK NAGYJELŰ MODELLJE

A MOSFET erősít, ha a telítési tartományba van előfeszítve, amelynek feltétele

$$v_{DS} \geq v_{GS} - V_t$$

A nagyjelű modell:



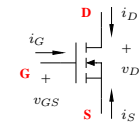
Transzfer karakterisztika: $i_D = K(v_{GS} - V_t)^2$ és $i_S = -i_D$

Bemenetre vonatkozó egyenlet: $i_G = 0 \quad \forall \quad v_{GS}$ -re

azaz a MOSFET tranzisztorok **vezérléséhez nem kell teljesítmény** (se erősítő, se kapcsoló üzemmódban!!!)

A nagyjelű modellek gyakorlatban használt egyenletei (***n***-csatornás MOSFET)

Növekményes (E) MOSFET



$$V_t = V_T > 0$$

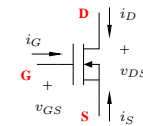
$$i_D = K(v_{GS} - V_T)^2 \text{ és } i_S = -i_D$$

$$i_G = 0$$

A telítés feltétele:

$$v_{DS} \geq v_{GS} - V_T$$

Kiürítéses (DE) MOSFET



$$V_t = V_p < 0$$

$$i_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{v_{GS}}{V_p}\right)^2 \text{ és } i_S = -i_D$$

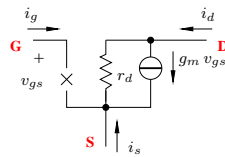
$$i_G = 0$$

A telítés feltétele:

$$v_{DS} \geq v_{GS} - V_p$$

6.3(b) E és DE MOSFET TRANZISZTOROK KISJELŰ MODELLJE

Vedd észre, a MOSFET egy feszültségvezérelt áramgenerátorral modellezhető



ahol • MOSFET kimeneti csatorna ellenállása: $n \times 1 \text{ k}\Omega \leq r_d \leq n \times 10 \text{ k}\Omega$

• meredeksége: $g_m = \frac{di_D}{dv_{GS}}|_{V_{GS}}$

Növekményes (E) MOSFET

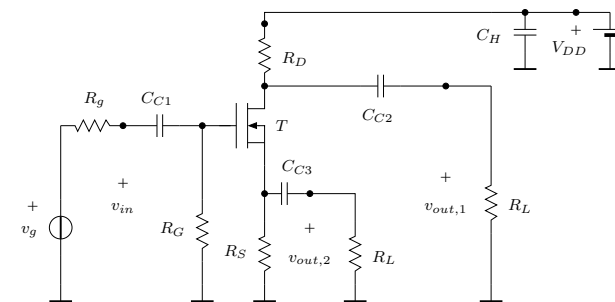
$$g_m^E = 2K(V_{GS} - V_T)$$

Kiürítéses (DE) MOSFET

$$g_m^{DE} = -\frac{2I_{DSS}}{V_p} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_p}\right)$$

MOSFET jellemzők: $i_G = 0$, de g_m nagyon kicsi \Rightarrow kis erősítés!!!

6.3(c) MOSFET KISJELŰ ERŐSÍTŐ ANALÍZISE



I. Az ***n***-csatornás kiürítéses MOSFET munkapontjának meghatározása

Nemlineáris, állandósult állapotú DC analízis

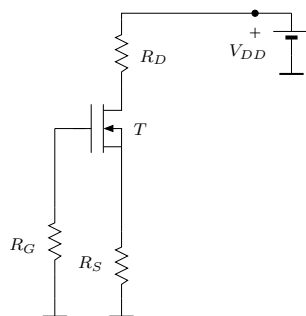
II. A MOSFET adott munkapontához tartozó kisjelű modell paramétereinek meghatározása

III. A kisjelű modell felrajzolása és a jelúti paraméterek kiszámítása

Lineáris AC analízis

I. A MOSFET munkapontjának meghatározása

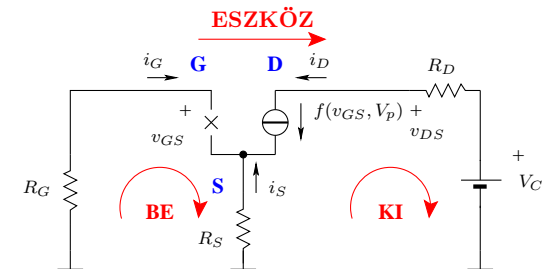
- Nemlineáris, állandósult állapotú DC analízis
- Kondenzátorok szakadással ill. az induktivitások rövidzárral helyettesítendők



Jó hír: A MOSFET munkapontja **nem érzékeny** a hőmérséklet változására

MOSFET-et helyettesíteni kell a nemlineáris nagyjelű modellel

Az előző ábrát a MOSFET eszközök nagyjelű modellje alapján átrajzolva kapjuk



Mindig három egyenlet írható és írható fel

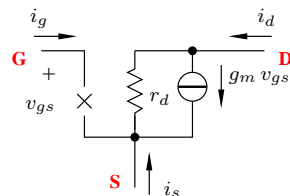
- Hurokegyenlet a bemeneti (gate) körre
- Hurokegyenlet a kimeneti (drain) körre
- MOSFET eszközre vonatkozó egyenlet

Ez függ az eszköz típusától és működési tartományától

Ebben az esetben: Telítési tartományban üzemelő, n -csatornás kiürítéses MOSFET

A négyzetes transzfer karakterisztika miatt két megoldás adódik: (1) $V_p < V_{GS}$, a keresett megoldás és (2) $V_{GS} < V_p$, nem fizikai, hanem csak matematikai megoldás

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



Az n -csatornás kiürítéses (DE) MOSFET kisjelű modellje a munkaponti gate-source feszültség függvénye

$$g_m^{DE} = -\frac{2I_{DSS}}{V_p} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_p}\right)$$

Az r_d kimeneti csatorna ellenállás a katalógusból keresendő ki

A MOSFET paraméterek **függetlenek** a hőmérséklettől

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

