

Gingl Zoltán, Szeged, 2017.

Elektronika

Diódák, tranzisztorok

Diódák

Diódák

- ▶ Egyenirányító (rectifier)
 - ▶ Mint egy szelep
- ▶ Ideális dióda
 - ▶ Nyitó irányban tökéletes vezető (rövidzár)
 - ▶ Záró irányban tökéletes szigetelő (szakadás)
- ▶ Valódi dióda:

$$I(U) = I_0 \left(e^{m \frac{U}{kT}} - 1 \right) = I_0 \left(e^{\frac{U}{U_T}} - 1 \right)$$

I_0 =záró irányú áram

(1nA..1uA)

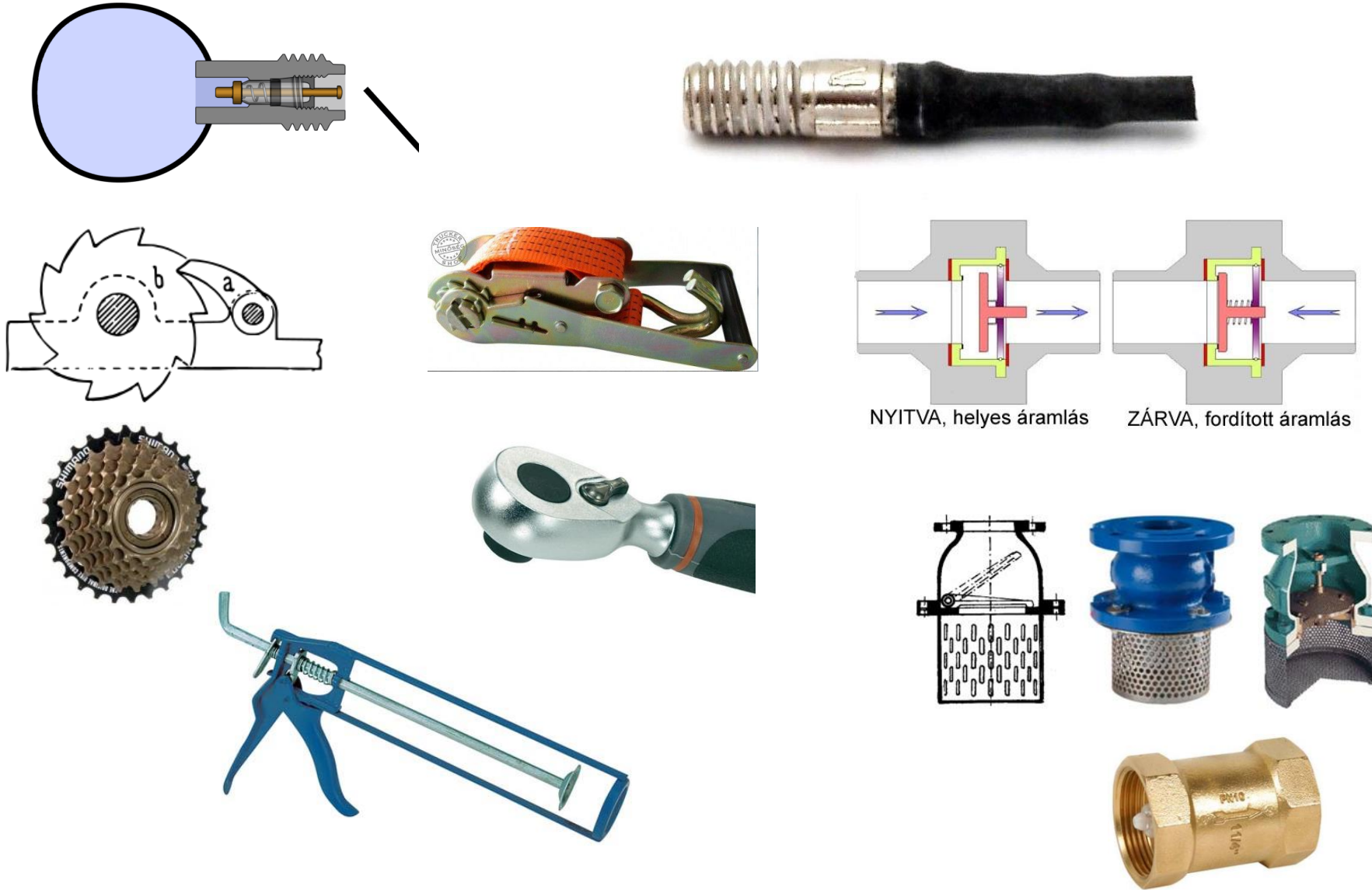
$K=1,38 \cdot 10^{-23} \text{J/K}$

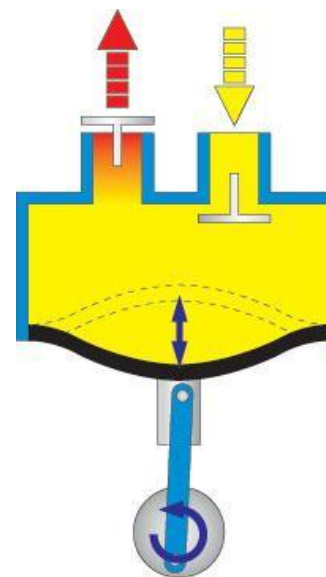
T = hőmérséklet [K]

M : korrekció (0,5..1)

$U_T=26\text{mV}..40\text{mV}$

Egyenirányítás

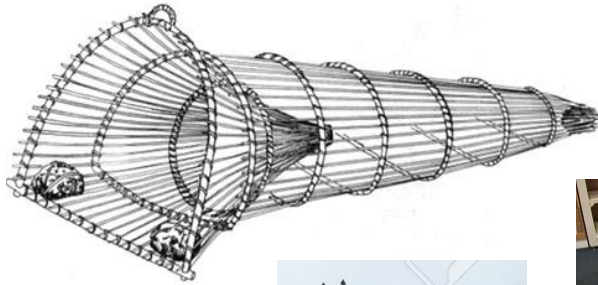




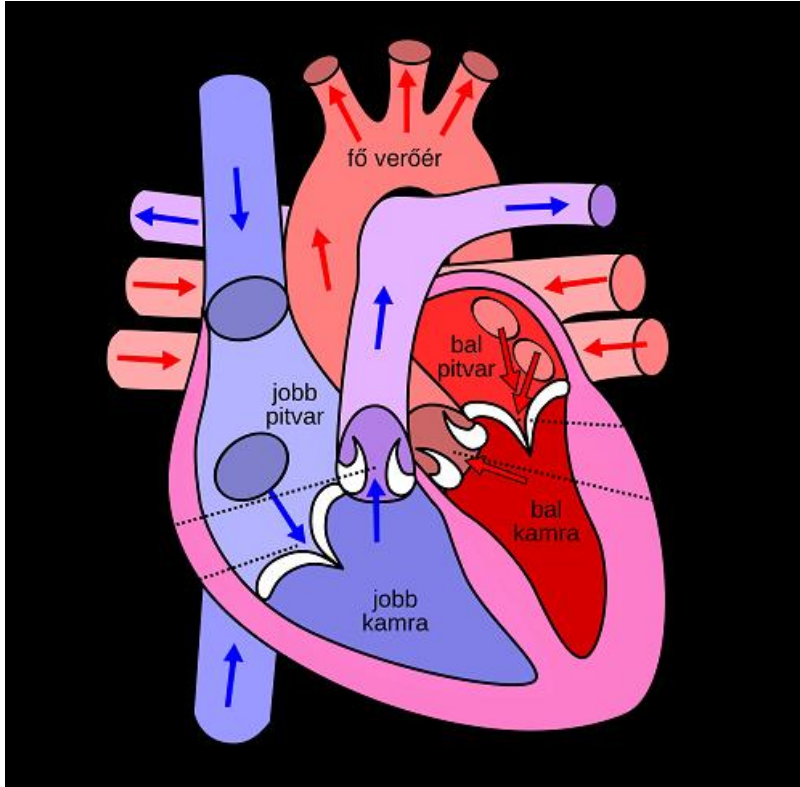
Egyenirányítás



Egyenirányítás



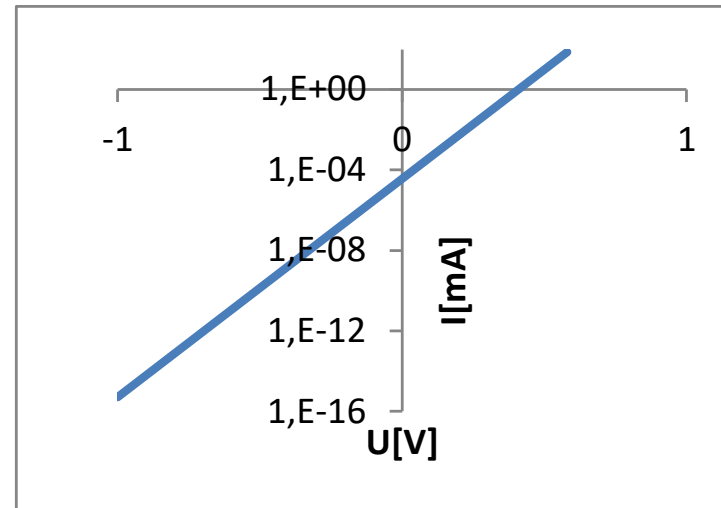
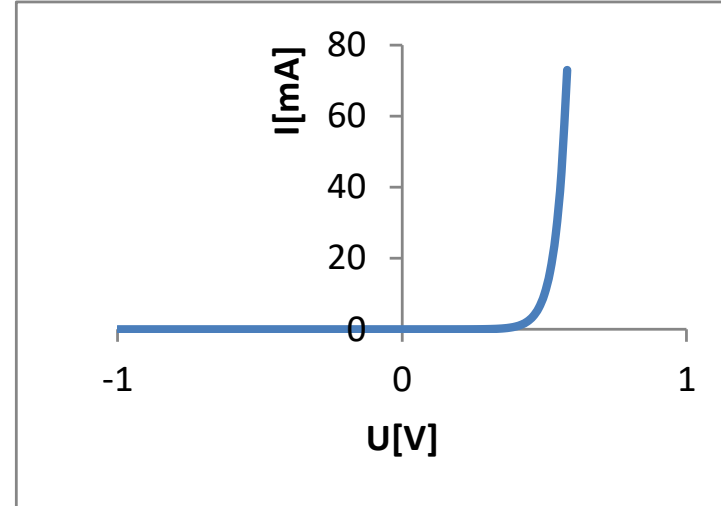
Egyenirányítás



Diódakarakterisztika

$$I(U) = I_0 \left(e^{\frac{U}{U_T}} - 1 \right)$$

$$U = U_T \ln \left(\frac{I}{I_0} + 1 \right)$$



Nyitó irányú közelítés

- ▶ Kellően nagy áramoknál:
 - ▶ $U \gg U_T$
 - ▶ $I \gg I_0$
- ▶ Mivel I_0 igen kicsi, így ez nyitó irány esetén jó

$$I(U) = I_0 \left(e^{\frac{U}{U_T}} - 1 \right) \approx I_0 e^{\frac{U}{U_T}}$$

$$U = U_T \ln \left(\frac{I}{I_0} + 1 \right) \approx U_T \ln \left(\frac{I}{I_0} \right)$$

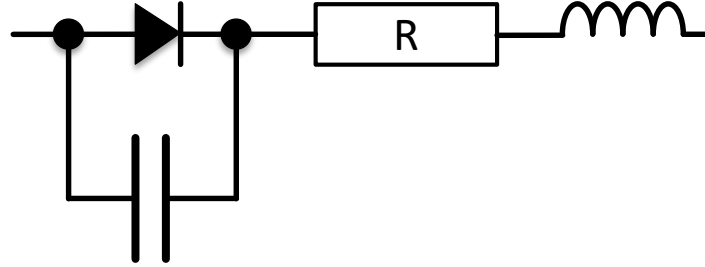
Nyitófeszültség

- ▶ A feszültség kevéssé függ az áramtól nyitó irány esetén
- ▶ Nyitófeszültség rendelhető a diódához
- ▶ Tipikusan 1mA vagy 10mA áramnál adják meg
 - ▶ Nagyáramú diódáknál akár több ampernél
- ▶ **Értéke**
 - ▶ **1mA-10mA esetén 0,5V-0,7V körül van**
 - ▶ Nagy áramoknál akár 1V felett

Jellemzők

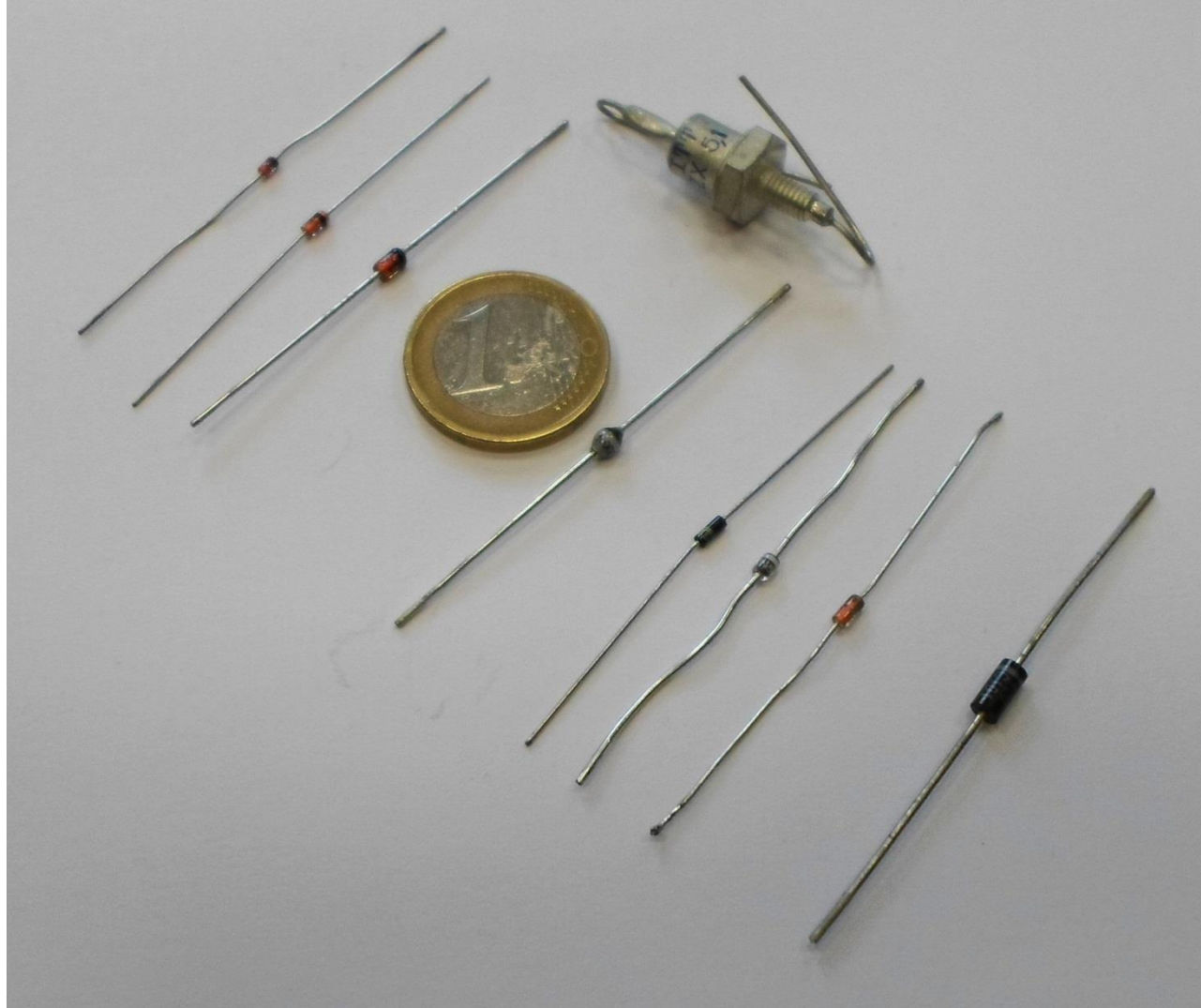
- ▶ Maximális nyitó irányú áram
 - ▶ Folyamatos vagy rövid idejű
 - ▶ Kisjelű diódáknál 100mA-200mA
 - ▶ Nagyáramú 1A felett
 - ▶ Rövid időre ennek párszorosa
- ▶ Maximális záró irányú feszültség (50V..1000V)
- ▶ Letörési feszültség (záró irányban elkezd vezetni)
 - ▶ Káros a diódára
- ▶ Kapcsolási idő (pár ns-tól us-ig)

Valódi dióda modell

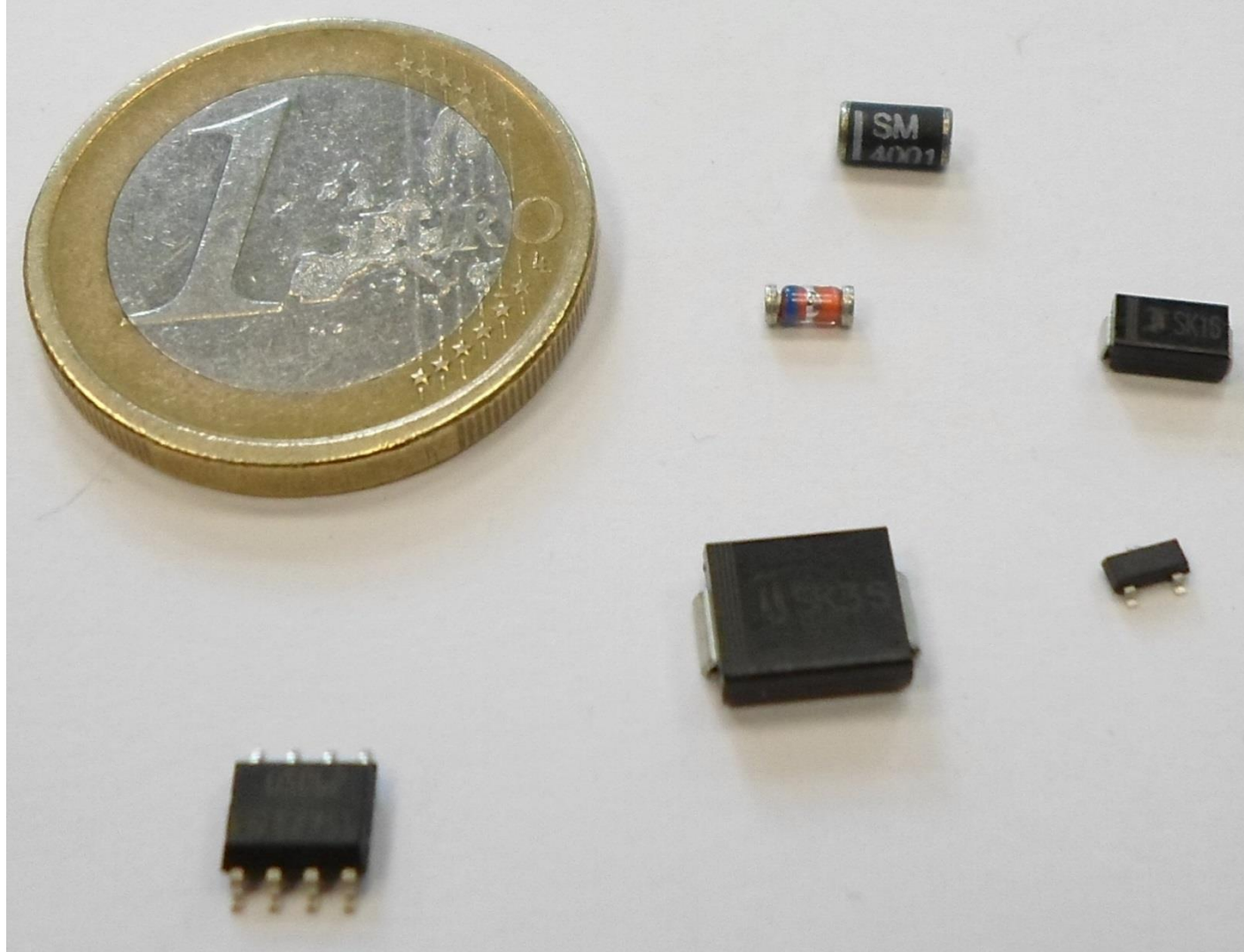


- ▶ Ellenállás: nagyobb áramoknál
 - ▶ lineáris lesz a karakterisztika, nem exponenciális
 - ▶ megnő a nyitófeszültség
- ▶ Kapacitás: lassabb kapcsolási idők
- ▶ Induktivitás: ritkán van jelentősége, nagy frekvencián

Diódatípusok

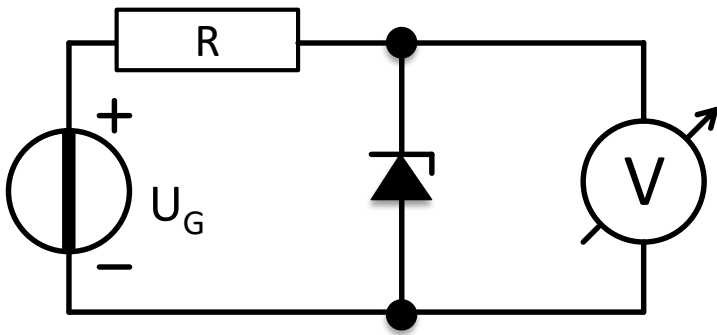


Diódatípusok – SMD diódák

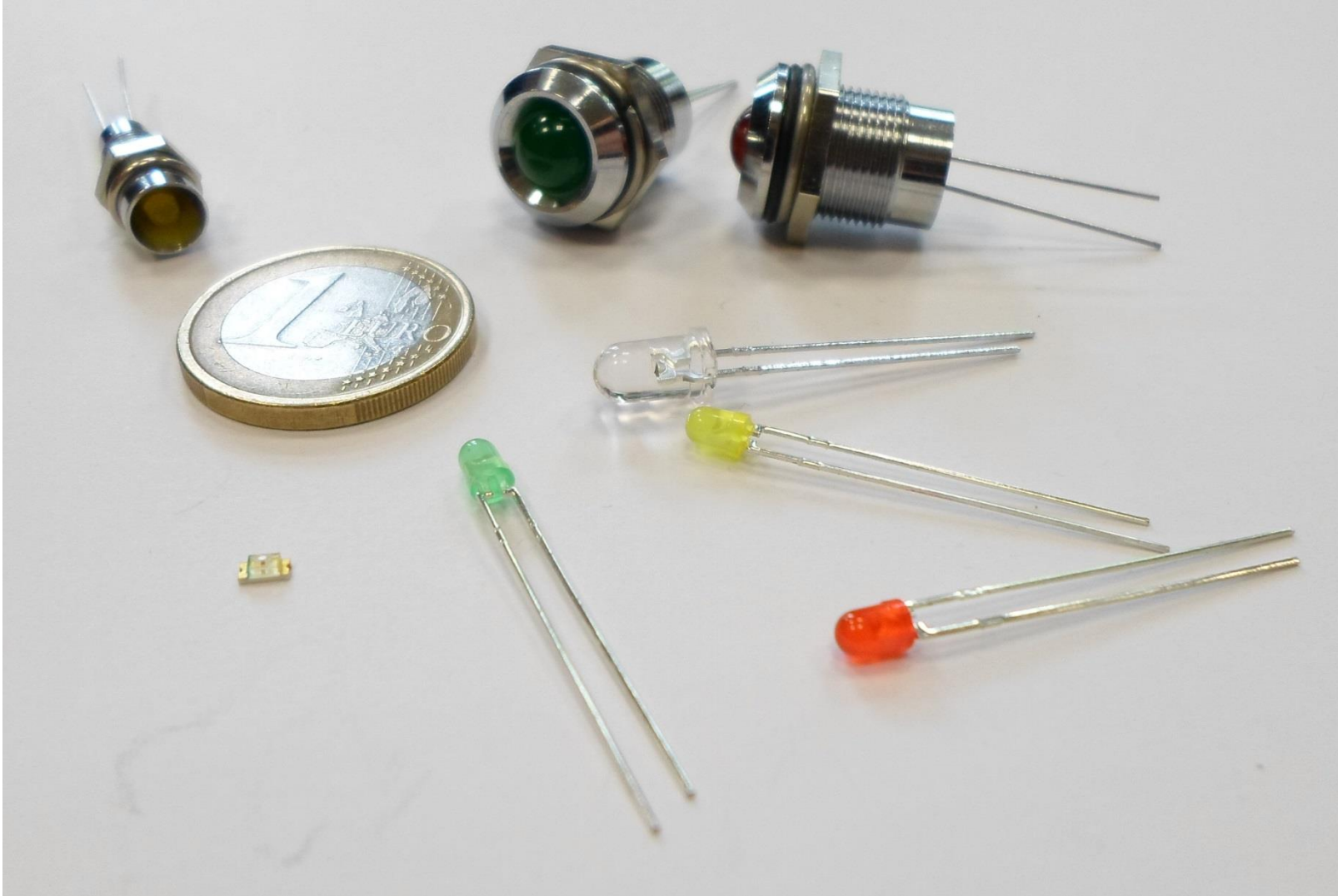


Zener diódák

- ▶ Bizonyos zárófeszültség értéknél vezetni kezd
- ▶ Többféle kapható: 2V7-től akár 100V felett is
- ▶ Tipikus: 2V7, 3V3, 4V7, 6V8, 10V, 12V
- ▶ Adott feszültség előállítására
- ▶ Feszültségesés létrehozása
- ▶ Áramkörök védelmére

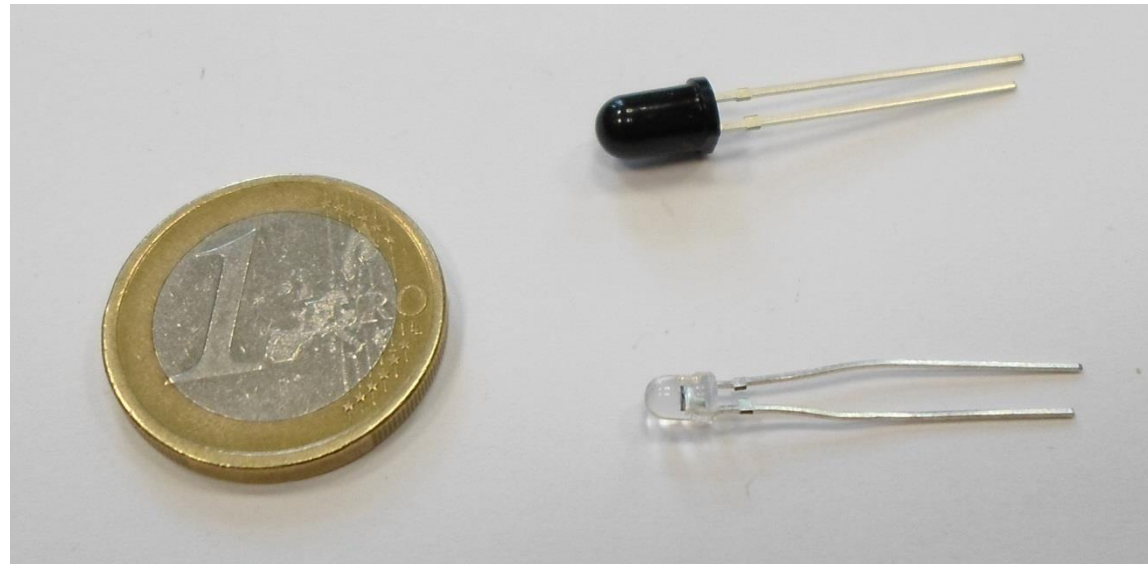


LED-ek



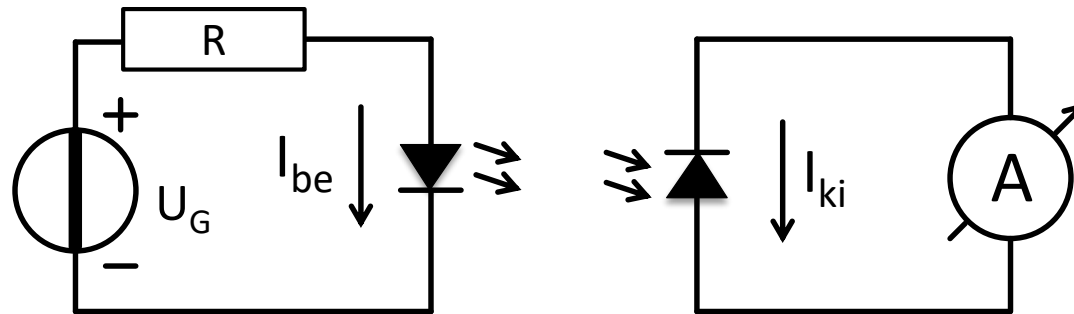
Fotodiódák

- ▶ Fény hatására záró irányú áram folyik
- ▶ Látható fény
- ▶ Infravörös – távirányítók, kommunikáció



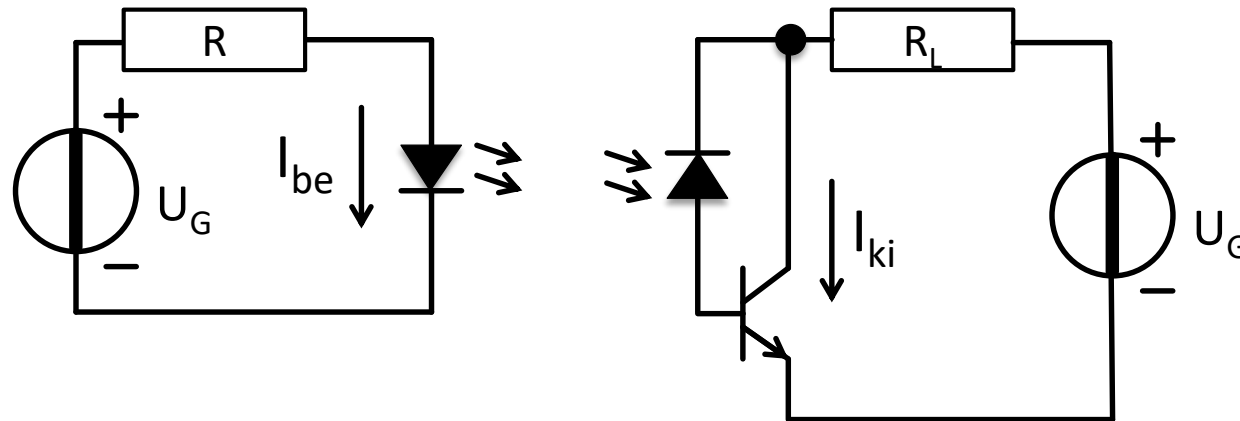
Fotokapuk, optocsatolók

- ▶ LED+fotodióda
- ▶ A kimenő áram jóval kisebb
 - ▶ Fototranzisztor – erősíti ezt
- ▶ A kimenetre köthető ellenállás is
 - ▶ Korlátozott tartományban jó csak
 - ▶ Általában erősítés kell



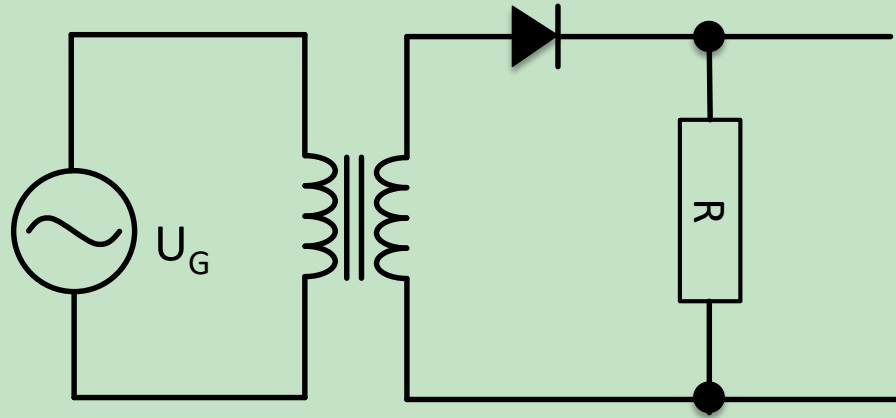
Fotokapuk, optocsatolók

- ▶ LED+fototranzisztor
- ▶ Tranzisztor: áramerősítő (x100..x1000)
- ▶ Hatékonyabb – sokkal nagyobb a kimeneti áram
- ▶ Lassabb működés

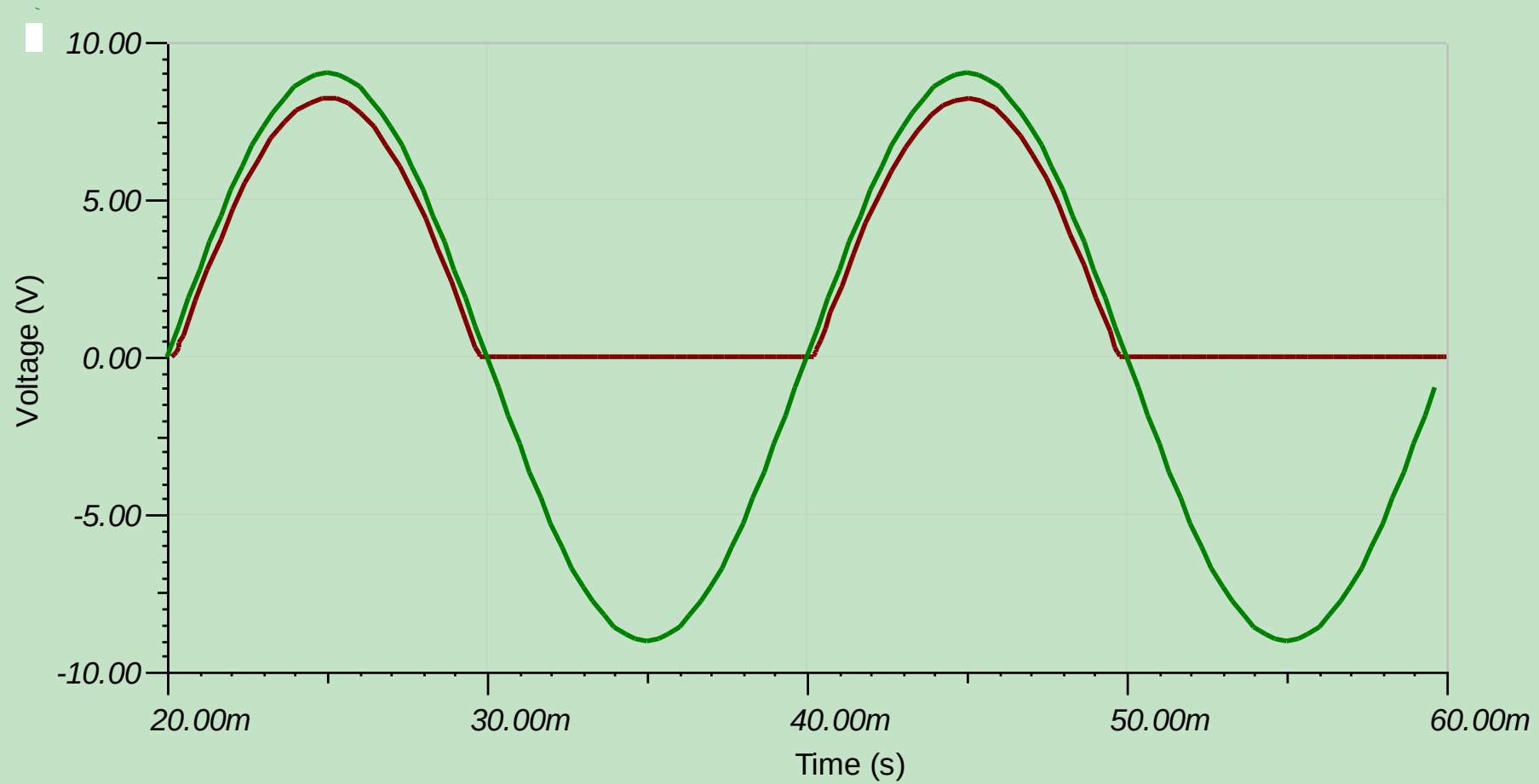


Diódák alkalmazásai

Egyenirányítás tápegységekben – egyutas

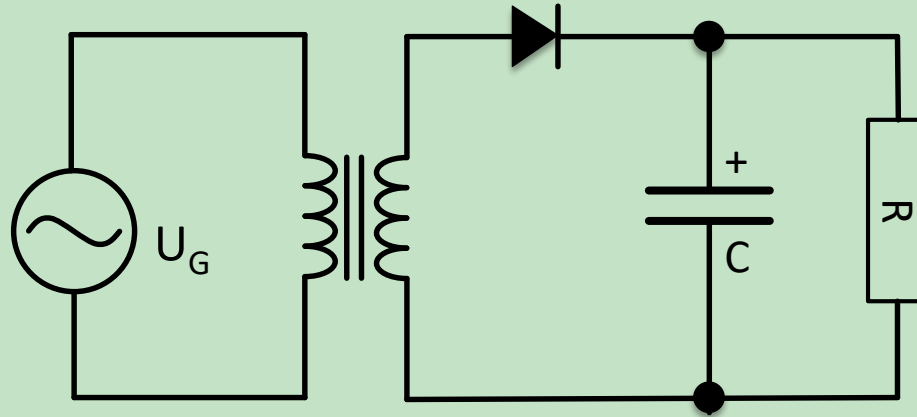


9V amplitúdó, terhelés: 100Ω



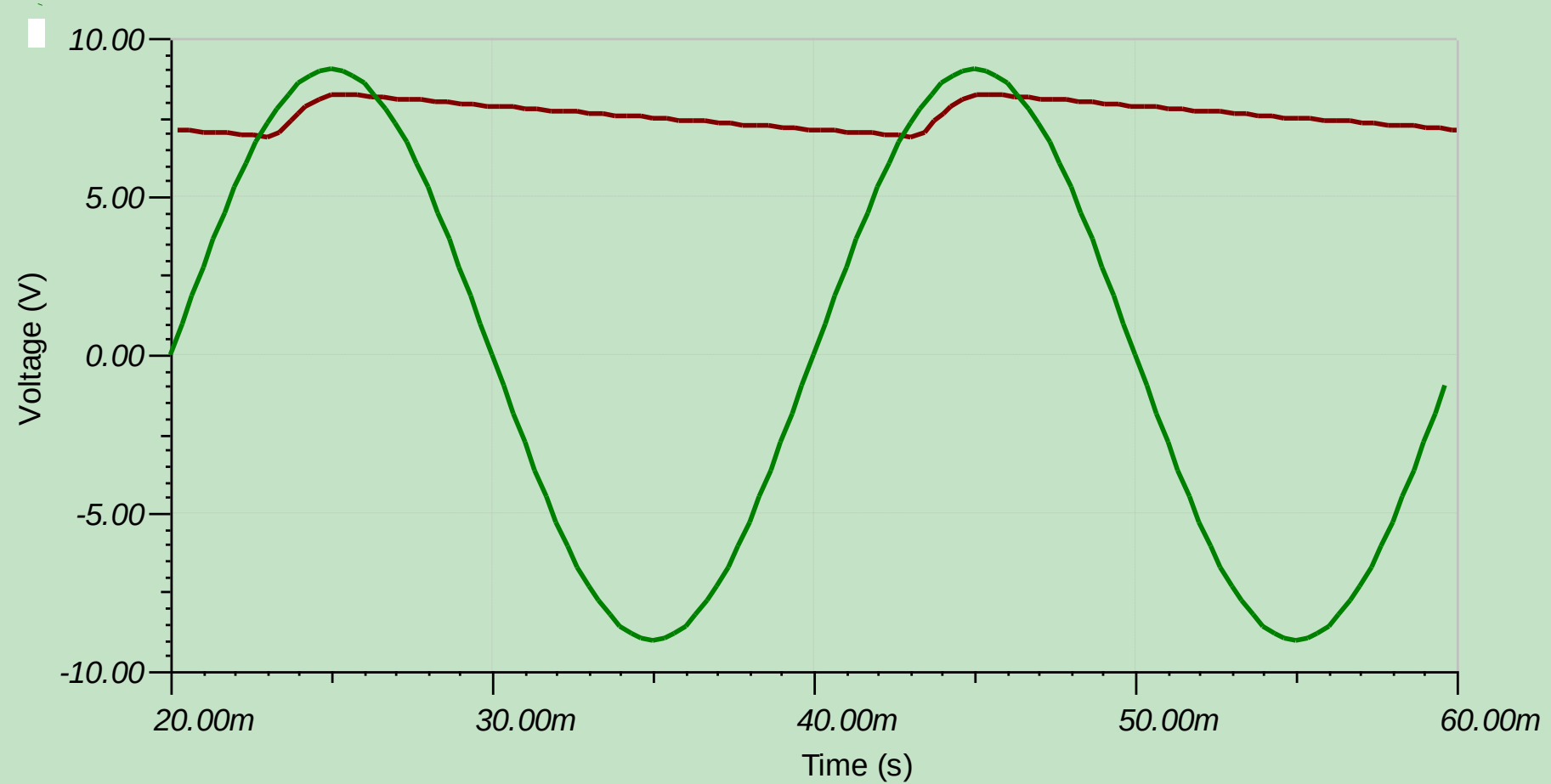
Szimuláció

Egyenirányítás tápegységekben – egyutas

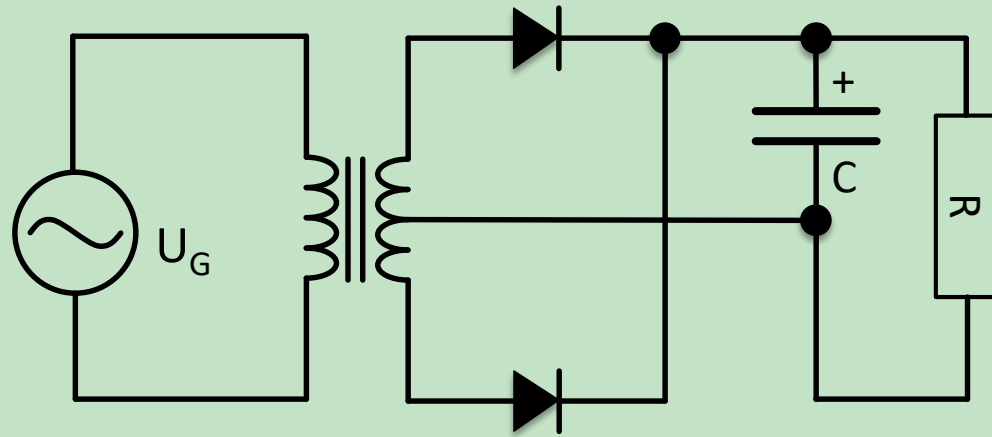


Szimuláció

9V amplitúdó, $C=1000\mu\text{F}$, terhelés: 100Ω

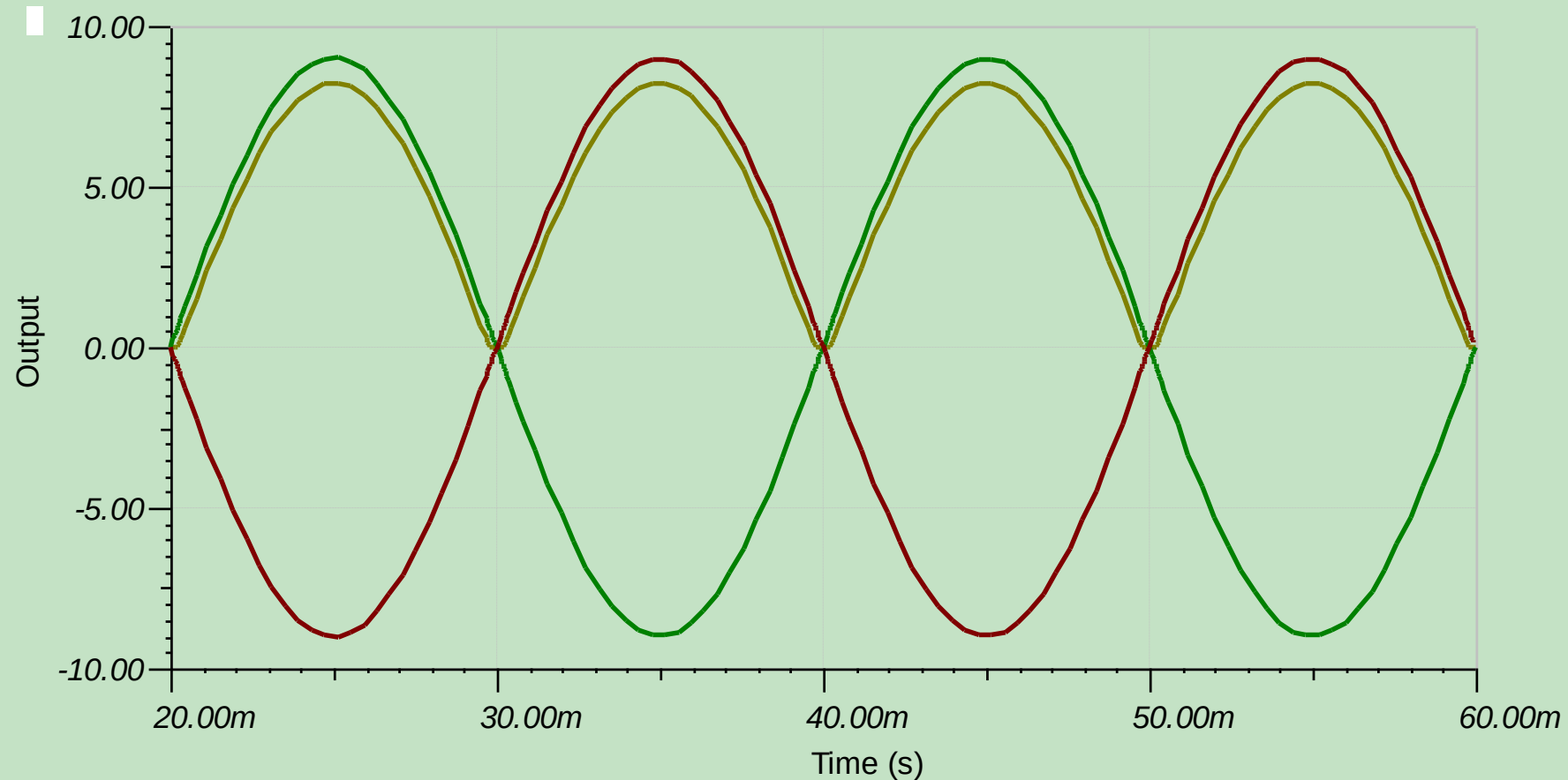


Kétutas egyenirányítás

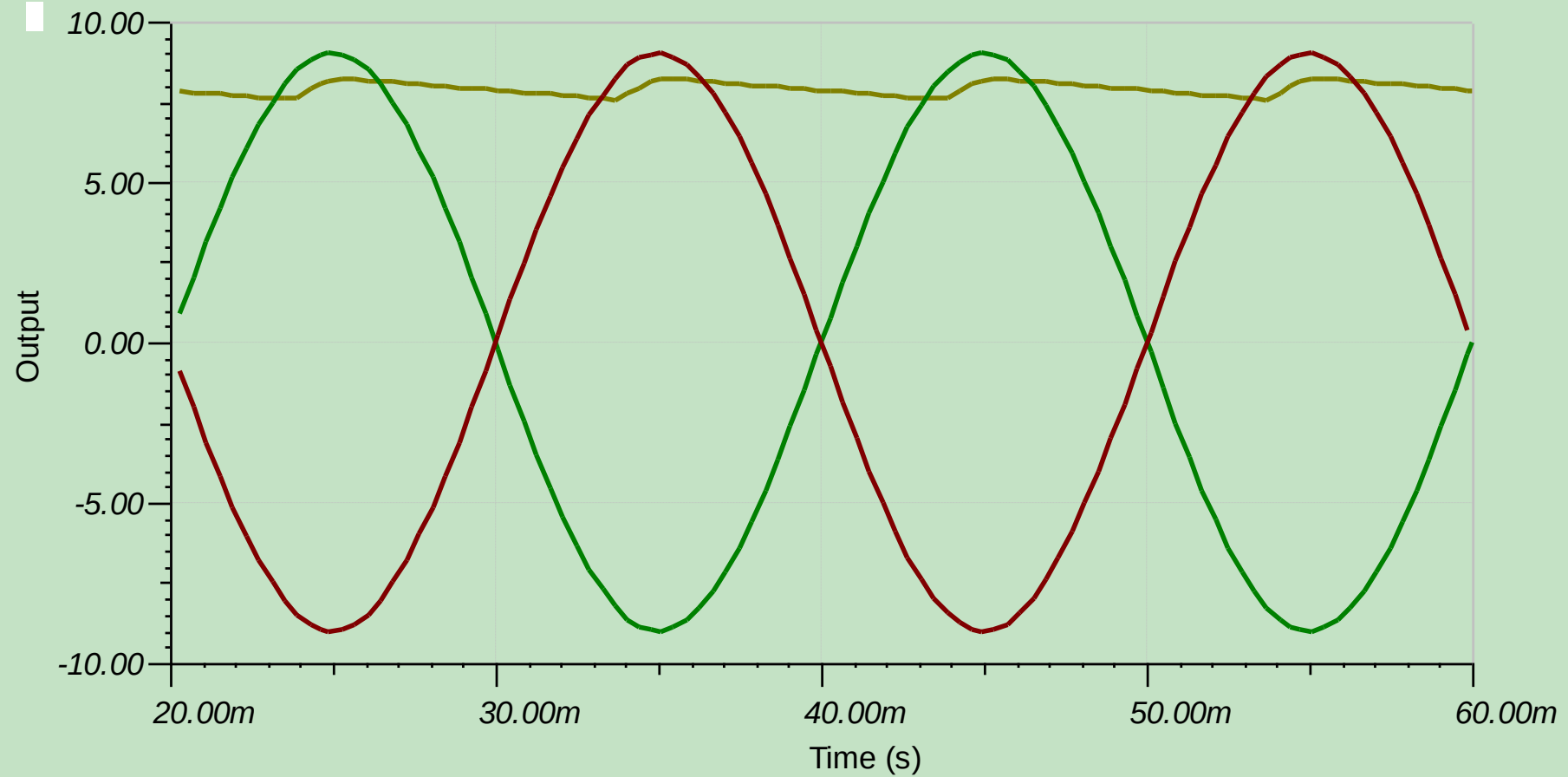


Szimuláció

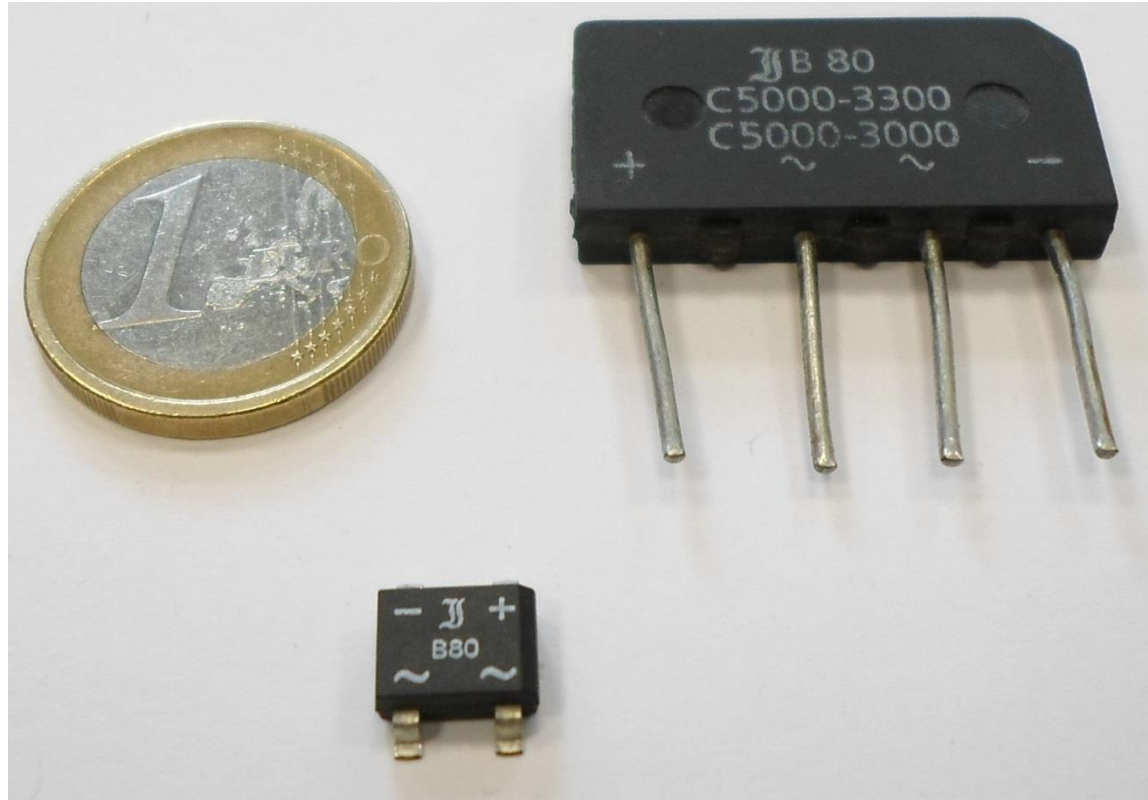
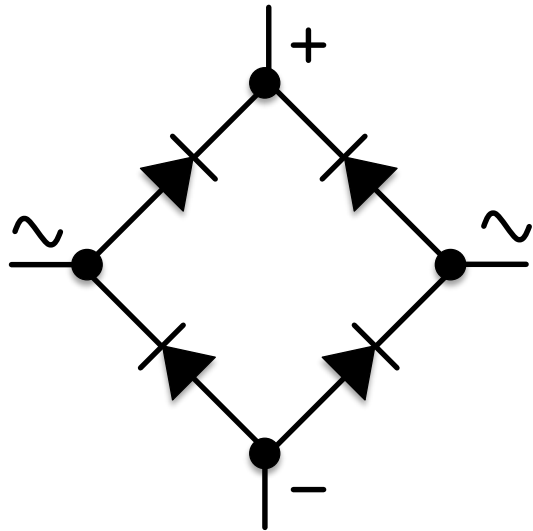
9V amplitúdó, $C=0\mu\text{F}$, terhelés: 100Ω



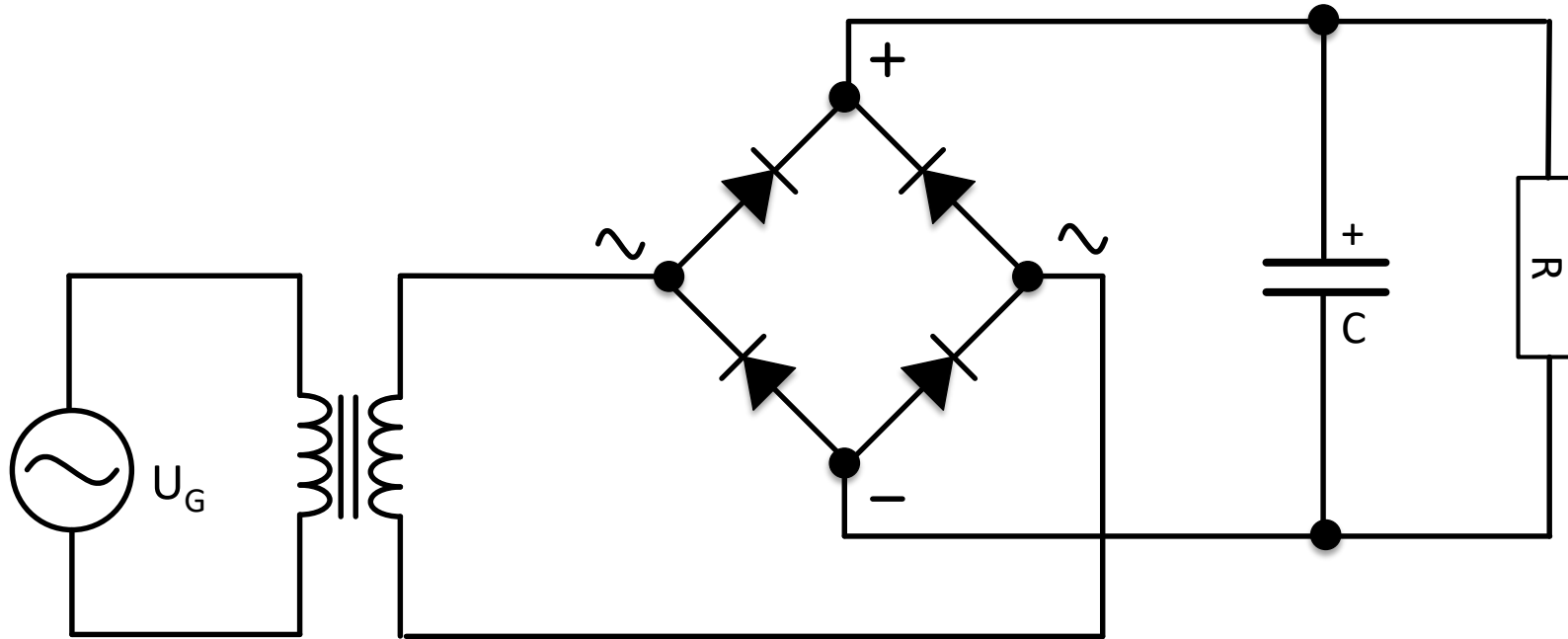
9V amplitútó, $C=1000\mu\text{F}$, terhelés: 100Ω



Graetz-híd, diódahíd

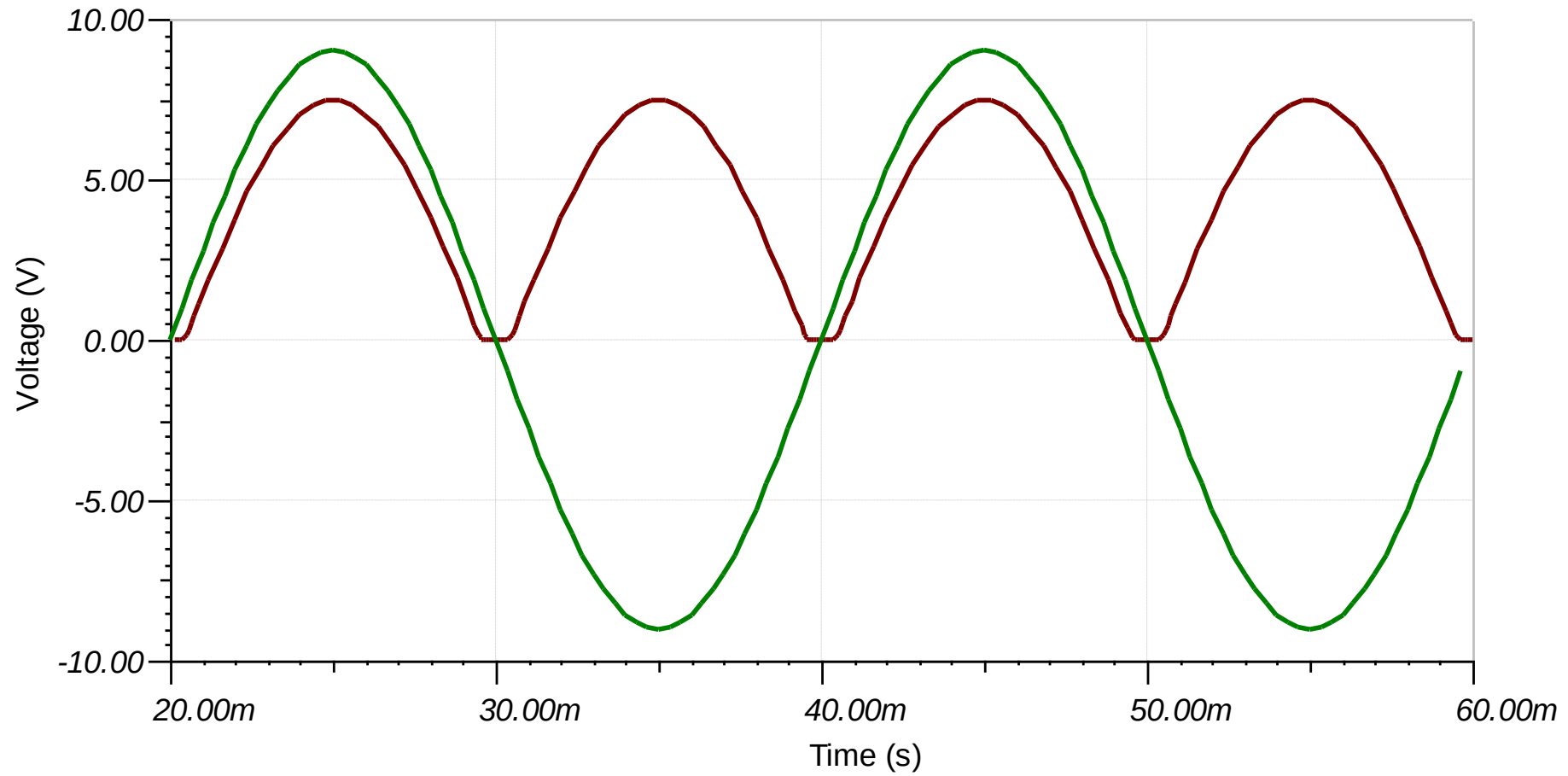


Kétutas egyenirányítás – Graetz-híd

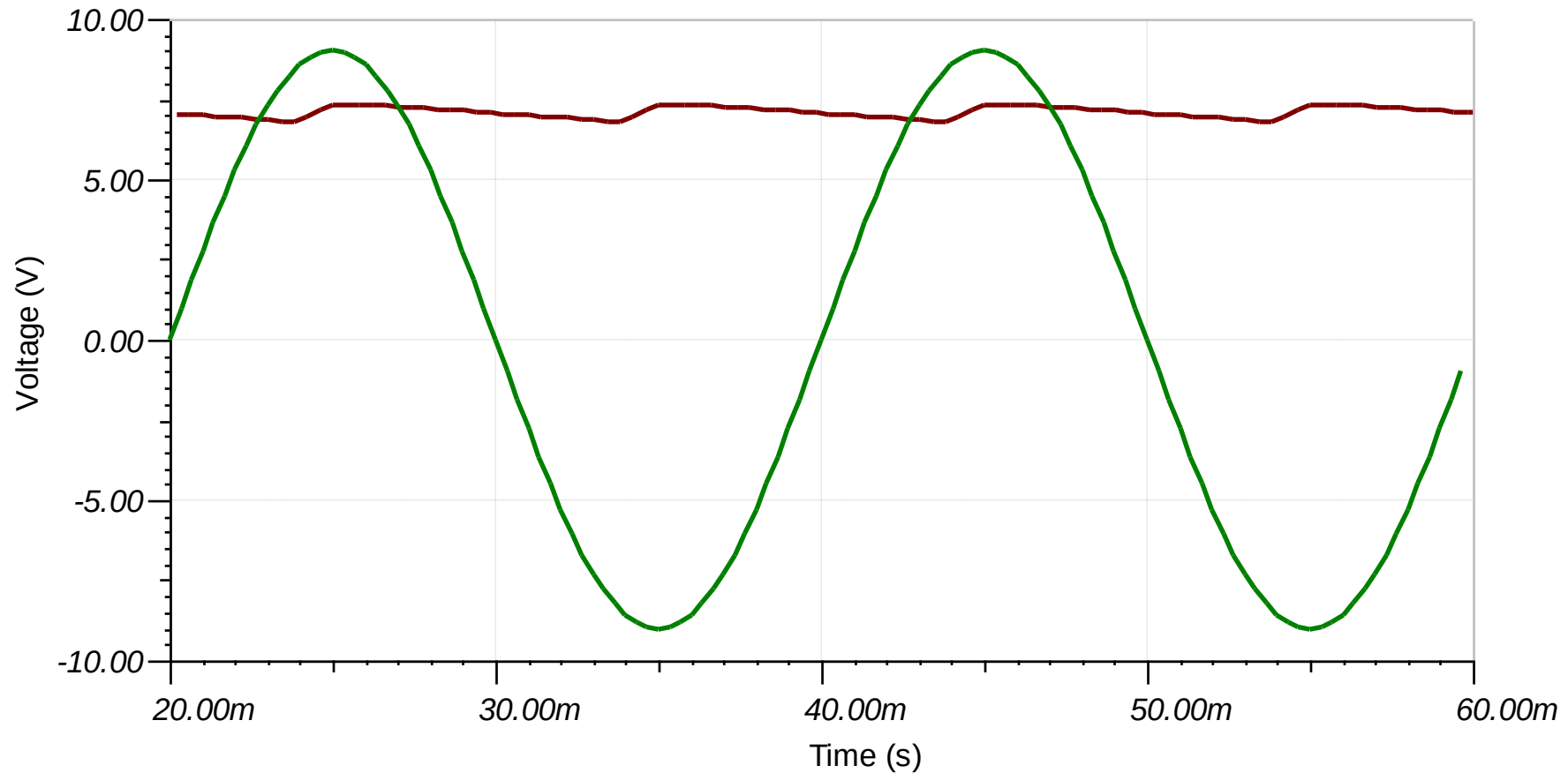


Szimuláció

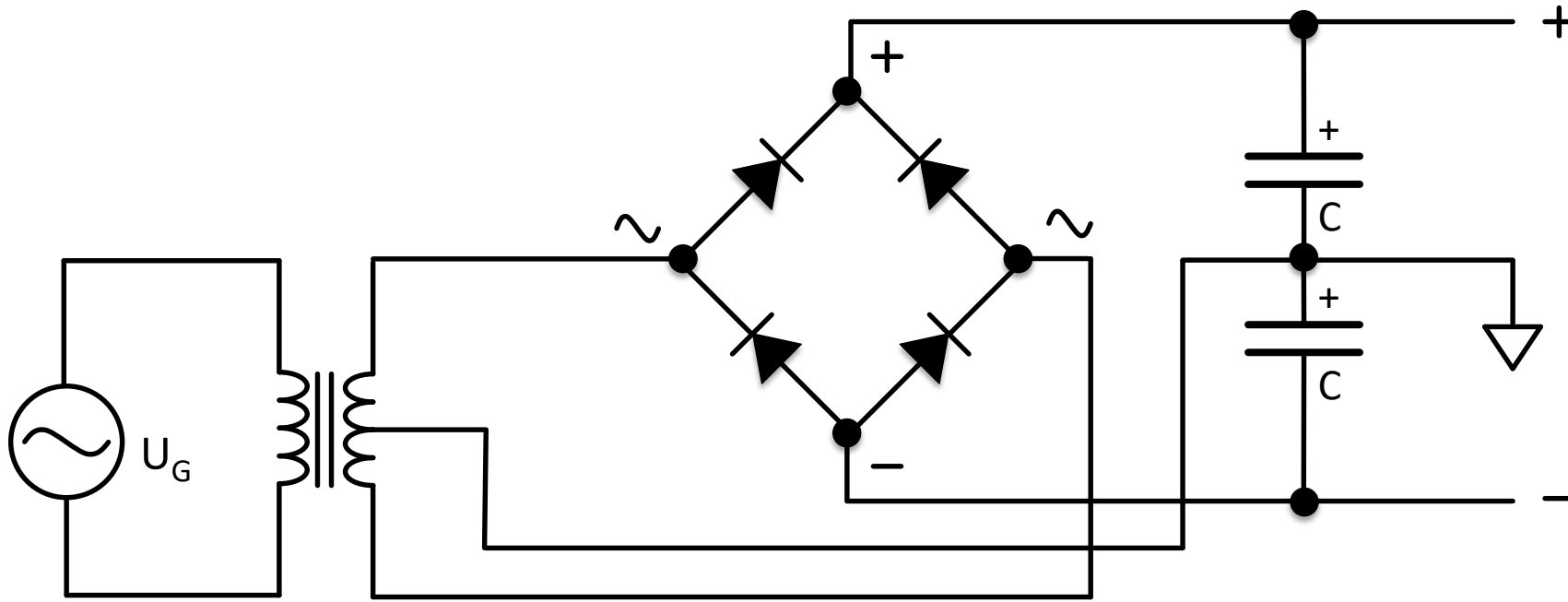
9V amplitúdó, $C=0\mu\text{F}$, terhelés: 100Ω



9V amplitúdó, $C=1000\mu\text{F}$, terhelés: 100Ω



Kétutas egyenirányítás – Graetz-híd



Szimuláció

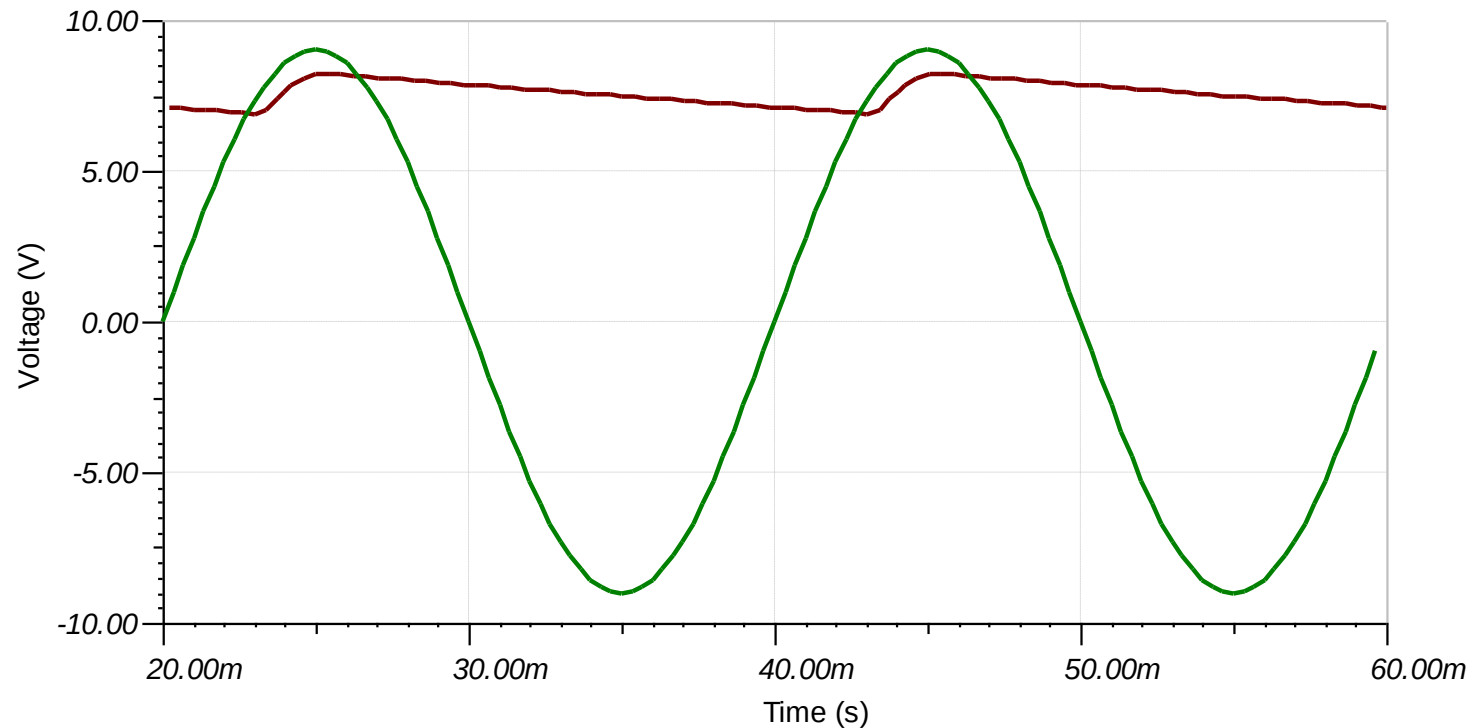
Búgófeszültség számítása

- ▶ ΔU : feszültségesés, amikor a dióda zárt
- ▶ Ennek ideje Δt
 - ▶ Egyutas egyenirányításnál T
 - ▶ Kétutas egyenirányításnál $T/2$

$$\Delta U = \frac{\Delta Q}{C} \approx \frac{I \cdot \Delta t}{C}$$

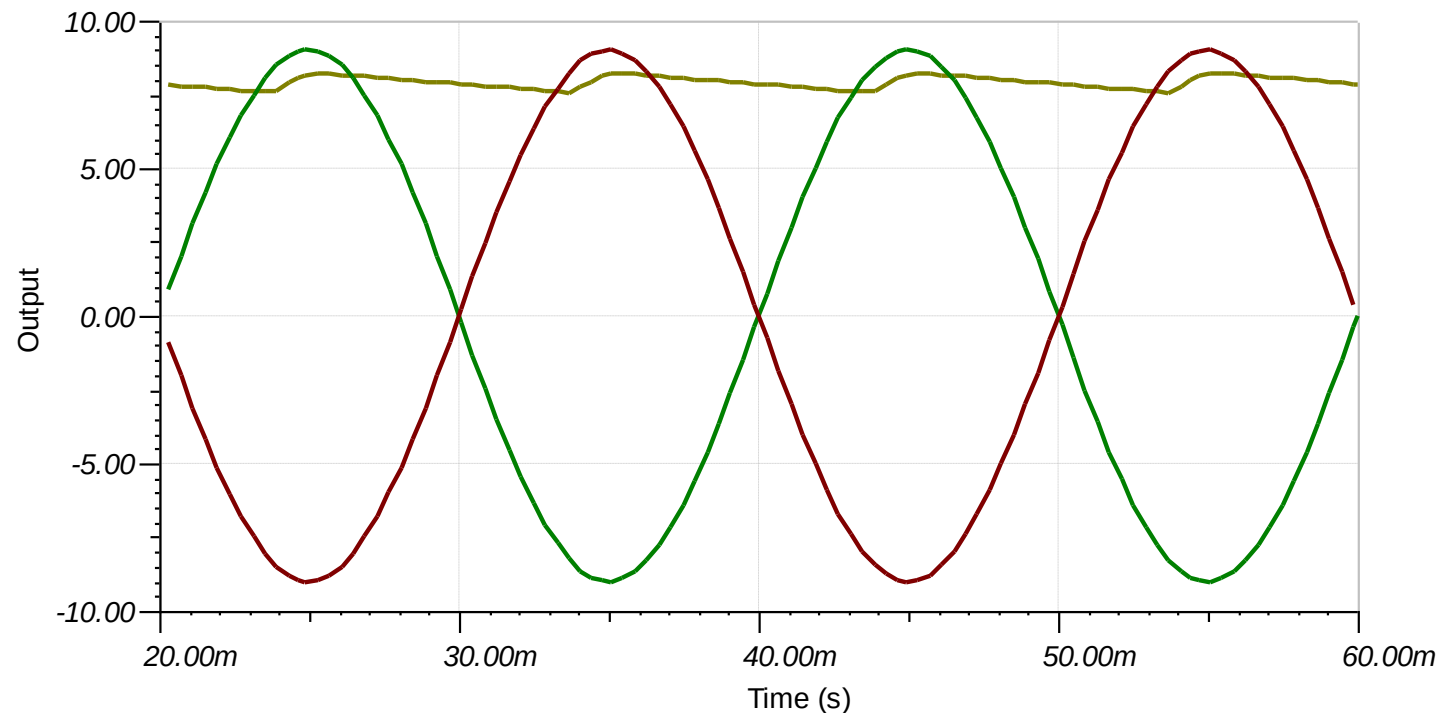
Búgófeszültség egyutas egyenirányításnál

$$\Delta U = \frac{\Delta Q}{C} \approx \frac{I \cdot \Delta t}{C} \approx \frac{I \cdot T}{C}$$

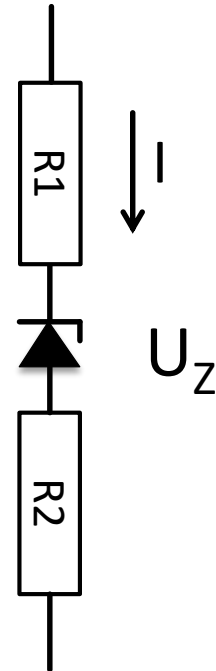
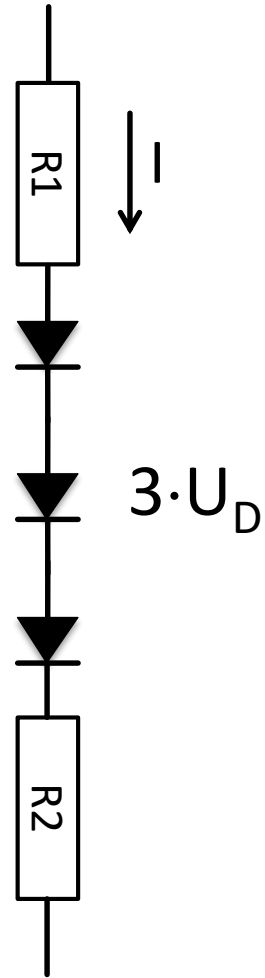
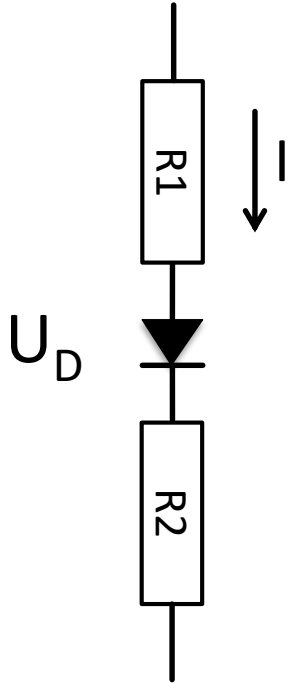


Bűgőfeszültség kétutas egyenirányításnál

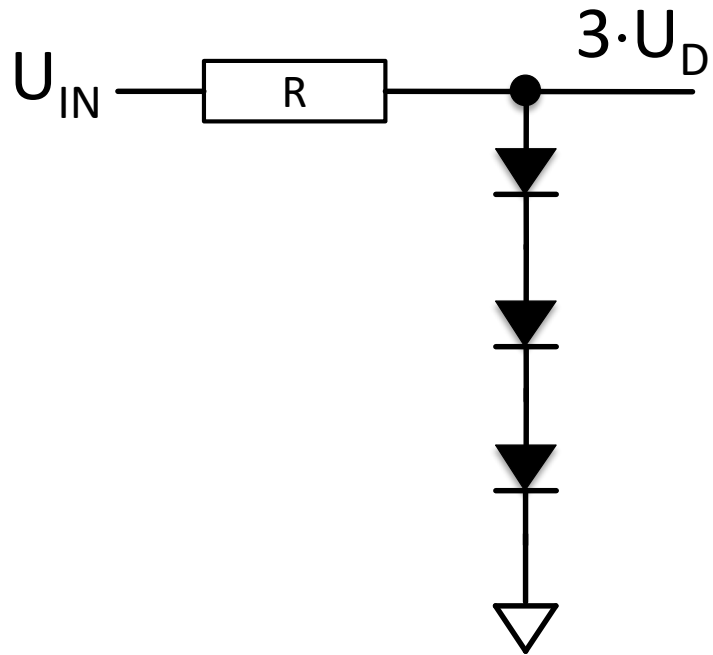
$$\Delta U = \frac{\Delta Q}{C} \approx \frac{I \cdot \Delta t}{C} \approx \frac{I \cdot T}{2 \cdot C}$$



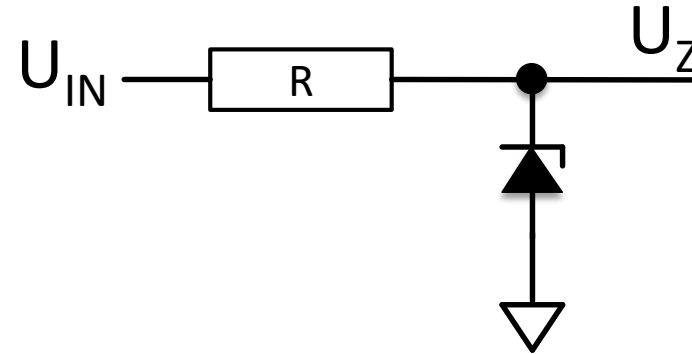
Szinteltolás



Feszültség csökkentése

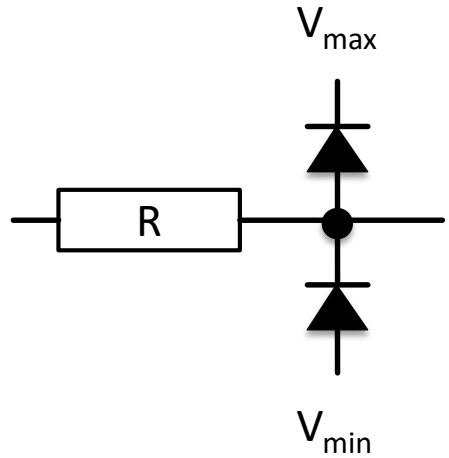


Szimuláció



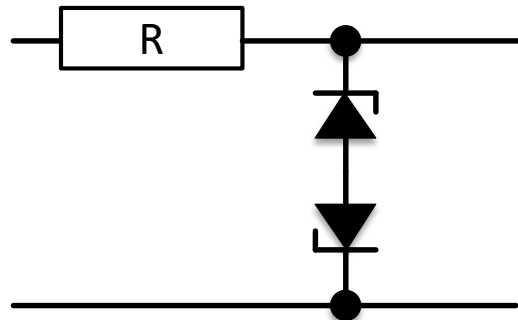
Szimuláció

Védőáramkörök



$$V_{\min} - U_D < U_{ki} < V_{\max} + U_D$$

[Szimuláció](#)

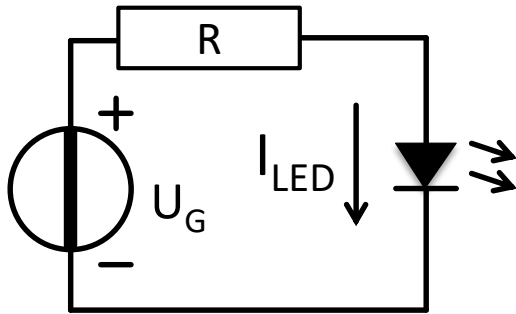


$$U_Z - U_D < U_{ki} < U_Z + U_D$$

[Szimuláció](#)

LED-ek meghajtása

- ▶ Kisméretű LED-ek: 1mA-10mA
- ▶ Teljesítmény LED-ek: akár amperek is
- ▶ Lézerdióda – adott áram felett lézerefény



Tipikus egyszerű kapcsolás:

- ellenállás állítja be az áramot (fényerőt)
- közel állandó áram
- ***szükséges az ellenállás!***

$$R = \frac{U_G - U_{LED}}{I}$$

U_{LED} @ 20mA

IR: 1.5V

R,O,Y:1.7-2.2

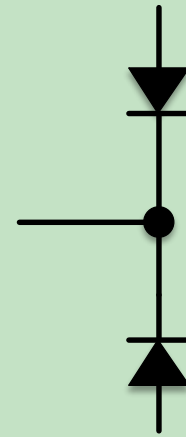
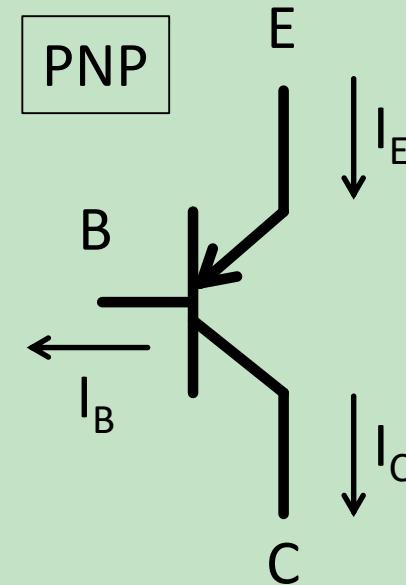
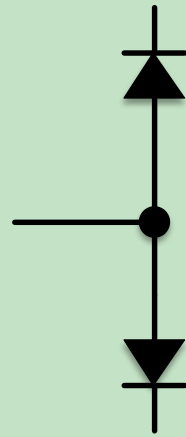
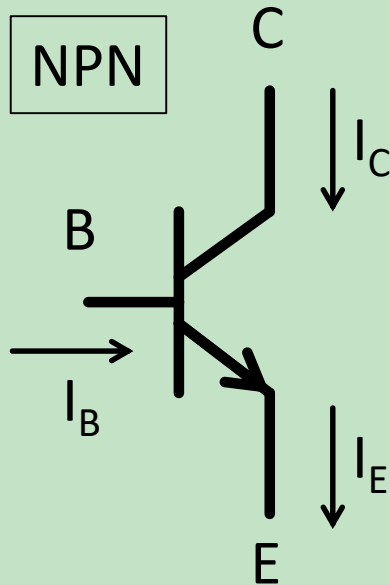
G,B:2..4

Tranzisztorok

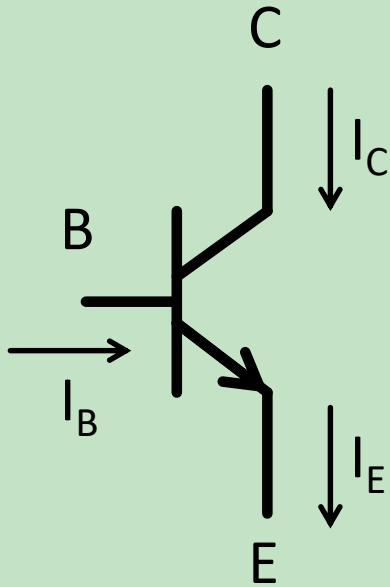
Bipoláris tranzisztorok

- ▶ Árammal vezérelhető nagyobb áram
- ▶ Csak egy irányban
- ▶ Diódák

$$I_C = \beta \cdot I_B, \quad \beta \gg 1$$
$$I_E = I_B + I_C = (\beta + 1) \cdot I_B$$

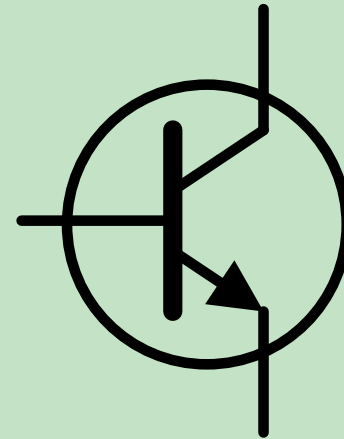
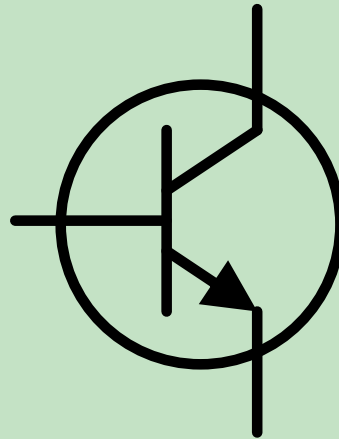
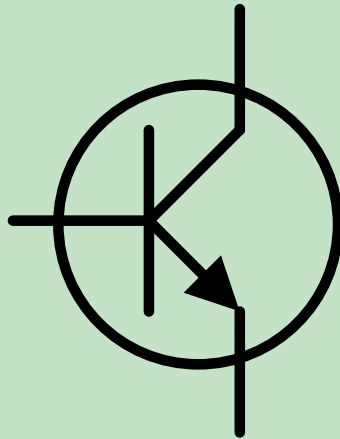
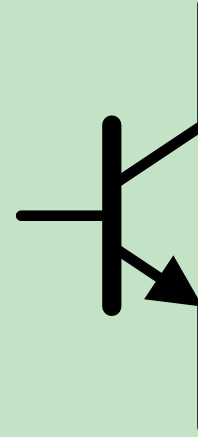
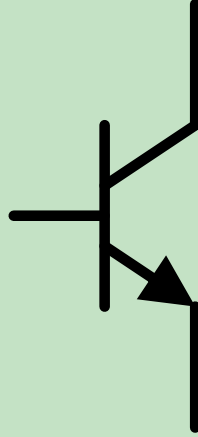
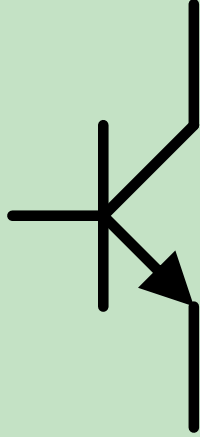


Feszültségek?



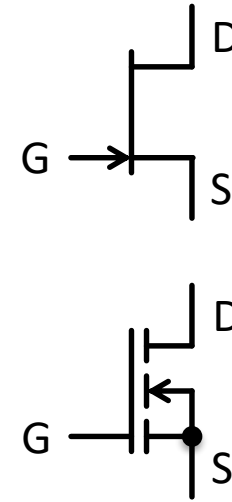
- ▶ U_{BE} : diódaegyenlet
 - ▶ A bázisáram kicsi
 - ▶ Tipikusan 0,6V-0,7V
- ▶ U_{CE} : a külső elemektől függ
 - ▶ Kollektorköri ellenállás
 - ▶ Emitterköri ellenállás
 - ▶ Külső feszültségforrások

Gyakori szimbólumok

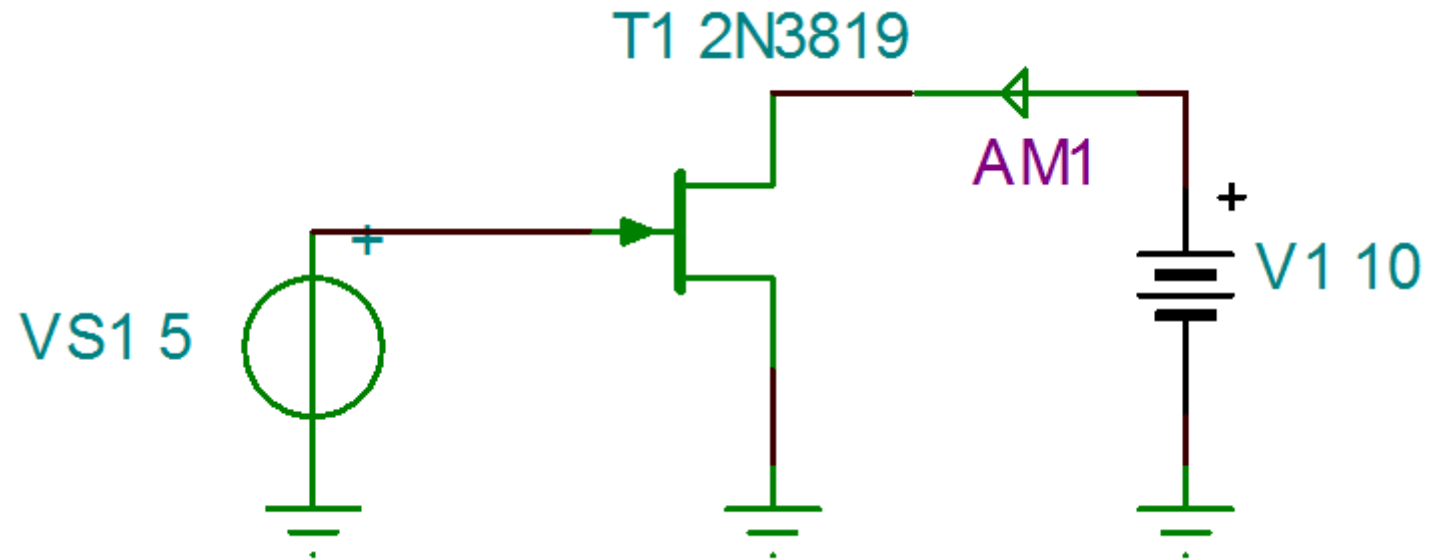


Térvezérlésű tranzisztorok

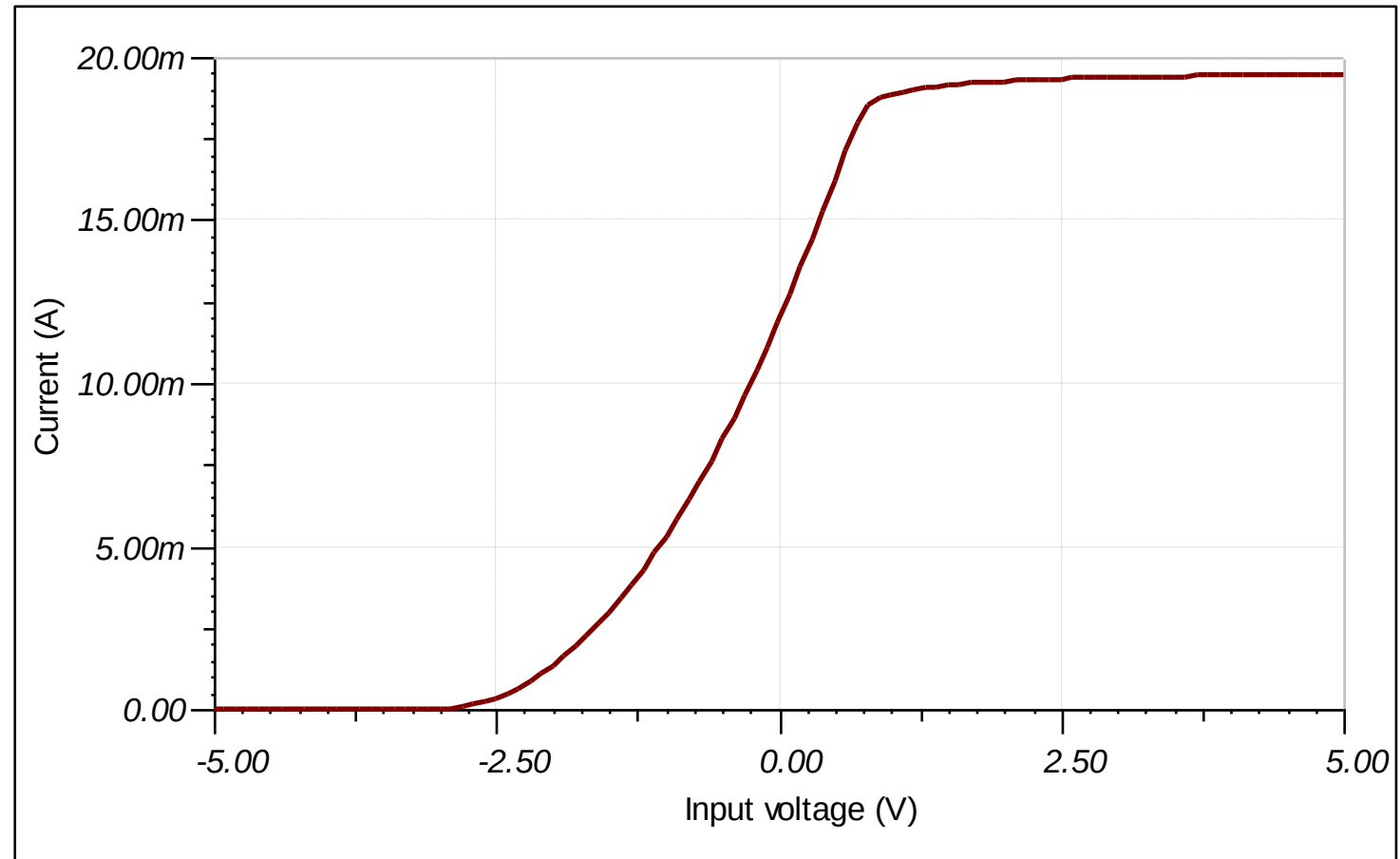
- ▶ Feszültséggel vezérelhető áram, ellenállás
 - ▶ Bázis → Gate (nagyon kicsi áram)
 - ▶ Collector → Drain
 - ▶ Emitter → Source
- ▶ JFET
- ▶ MOSFET
 - ▶ Depletion mode (kiürítéses)
 - ▶ Önvezető: $V_{GS}=0V$ esetén vezet, negatív V_{GS} zár
 - ▶ Enhancement mode (növekményes)
 - ▶ Önzáró: $V_{GS}=0V$ esetén nem vezet, pozitív V_{GS} nyit
- ▶ Leggyakrabban használt általános célra: MOSFET (növekményes)
 - ▶ Mai digitális áramkörök építőeleme



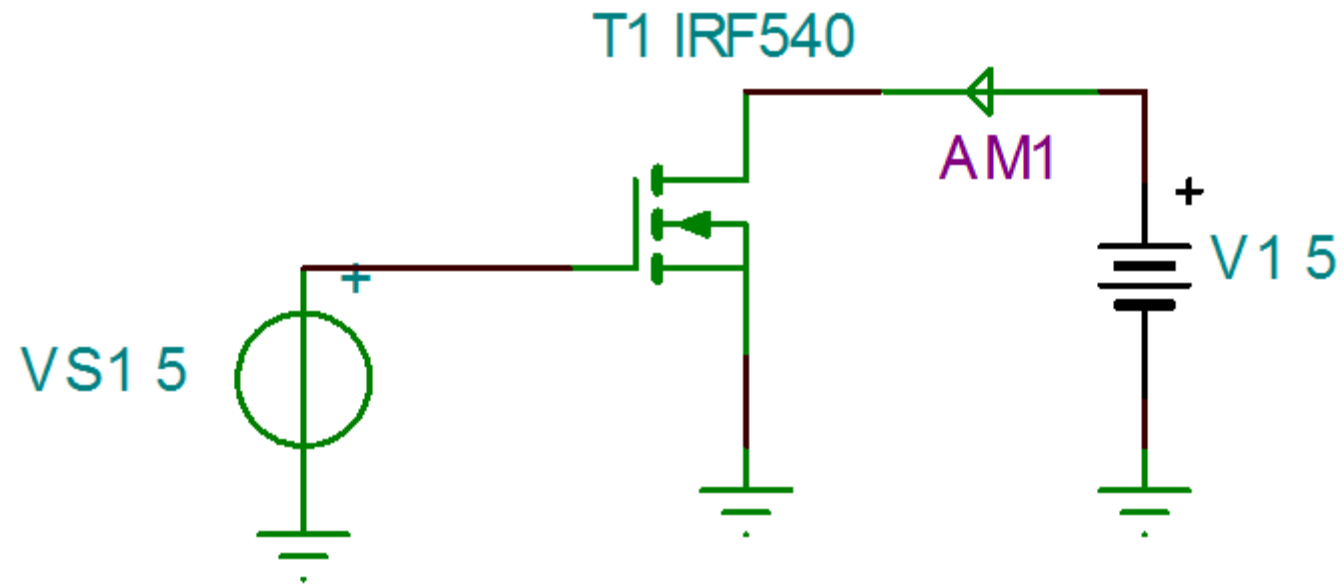
JFET



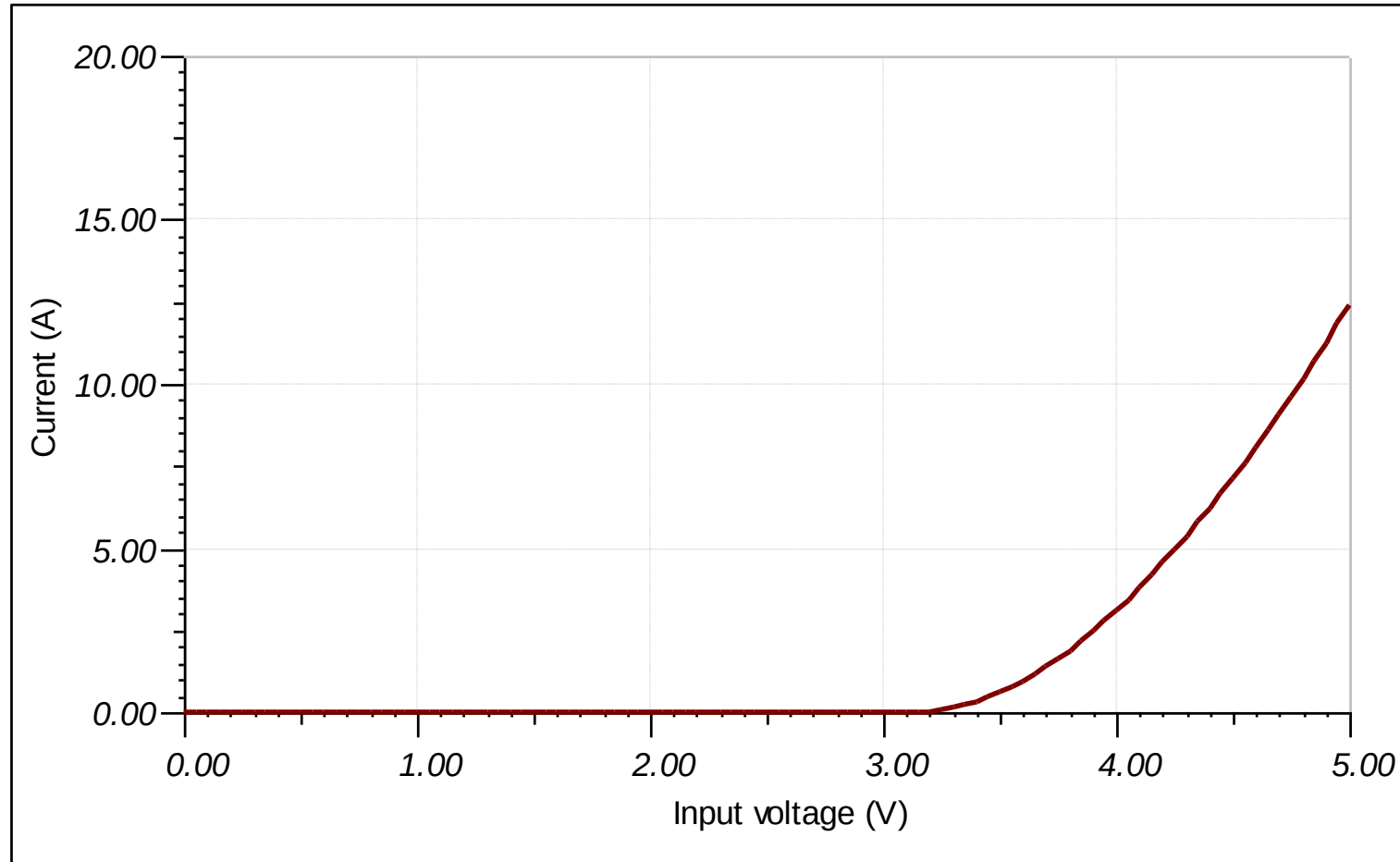
JFET



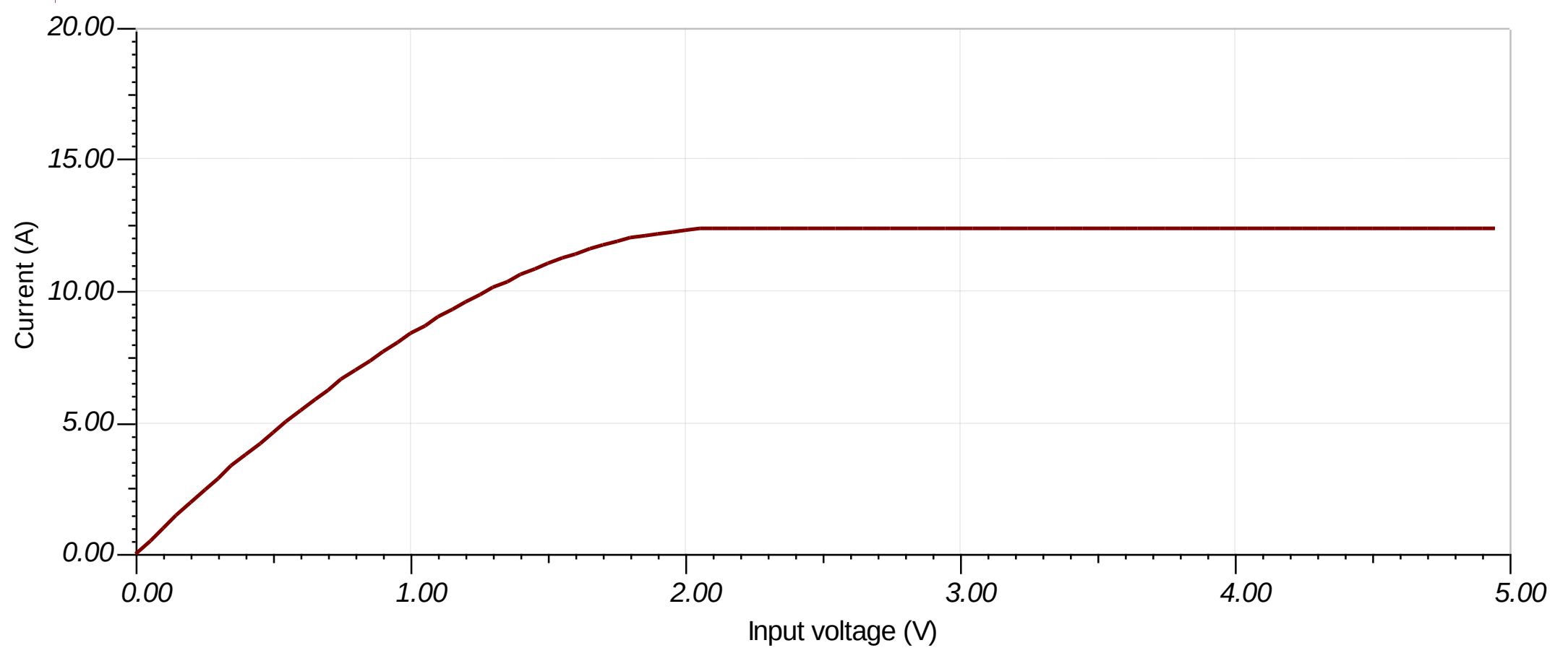
MOSFET – n típus



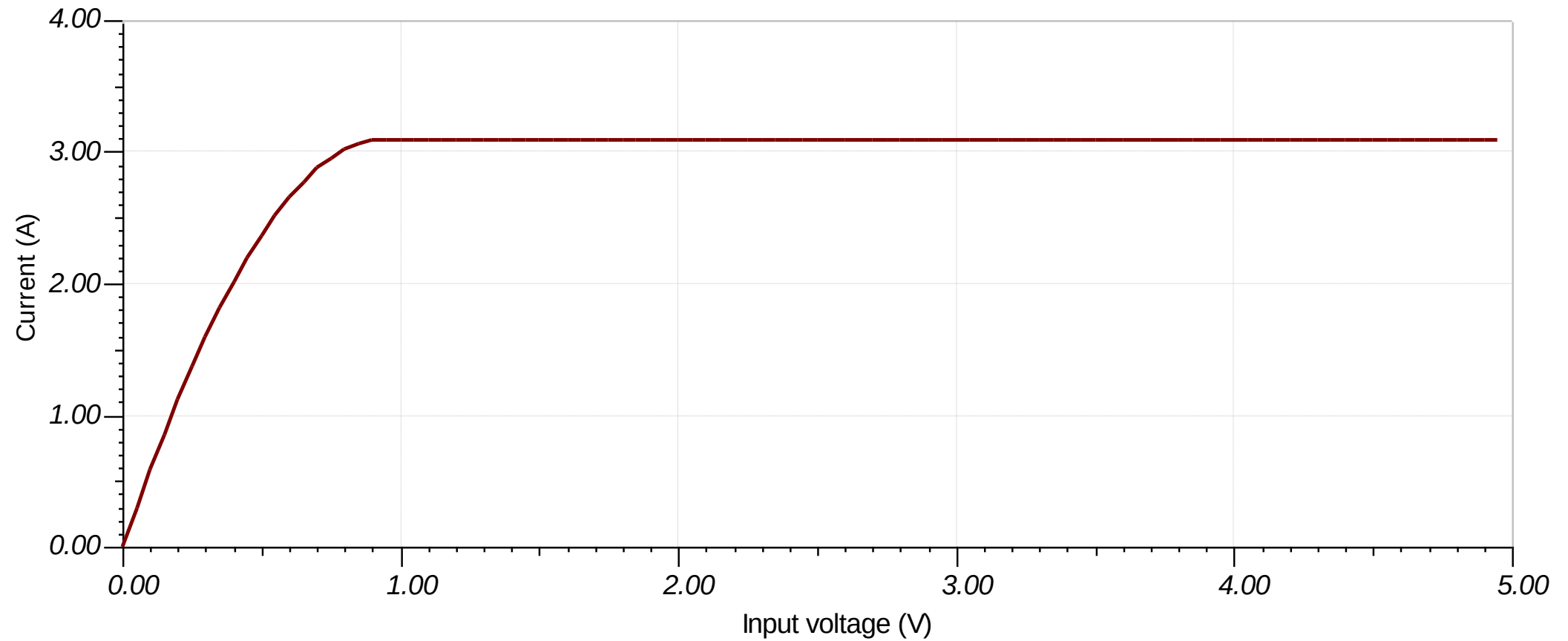
MOSFET – n típus, $I_D - V_{GS}$, $V_{DS}=5V$



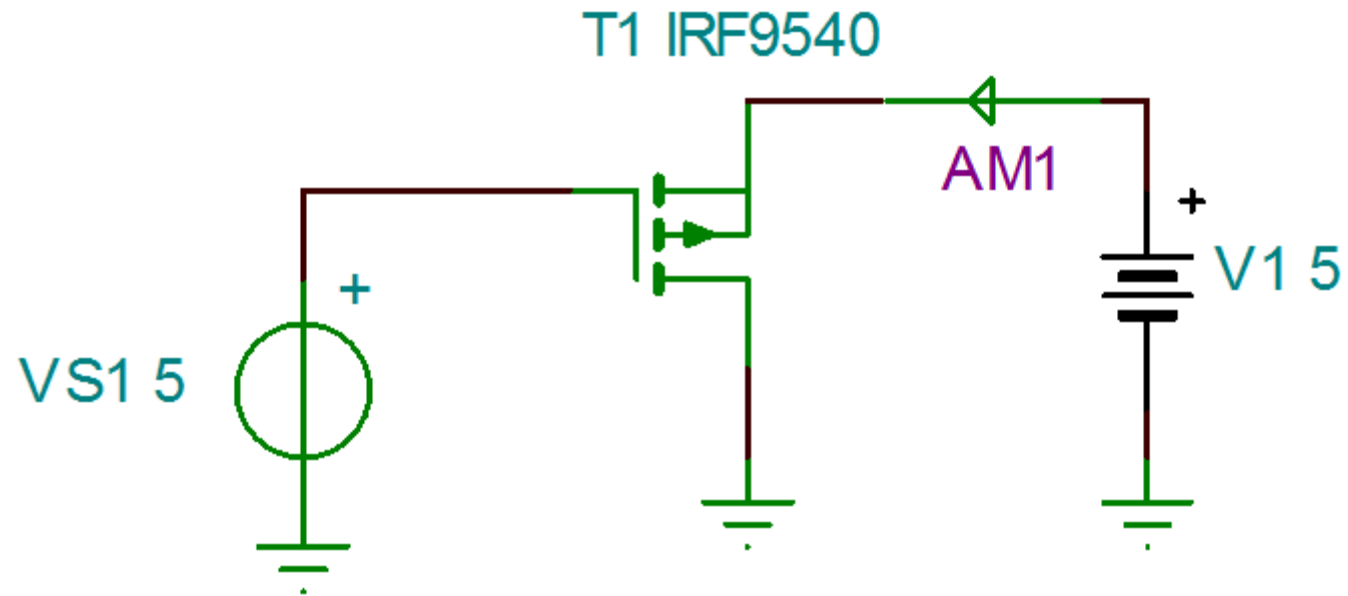
MOSFET – n típus, $I_D - V_{DS}$, $V_{GS}=5V$



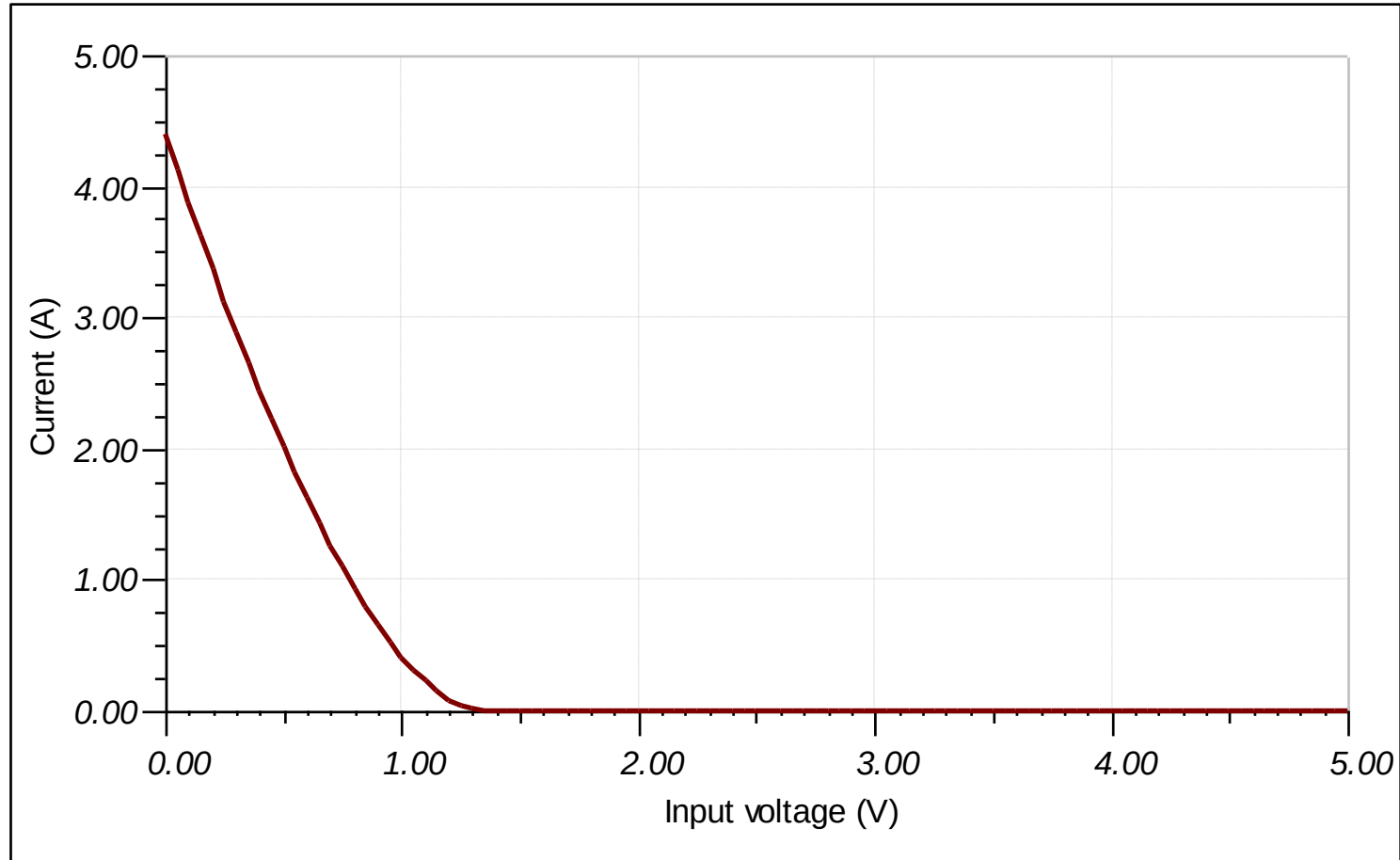
MOSFET – n típus, $I_D - V_{DS}$, $V_{GS}=4V$



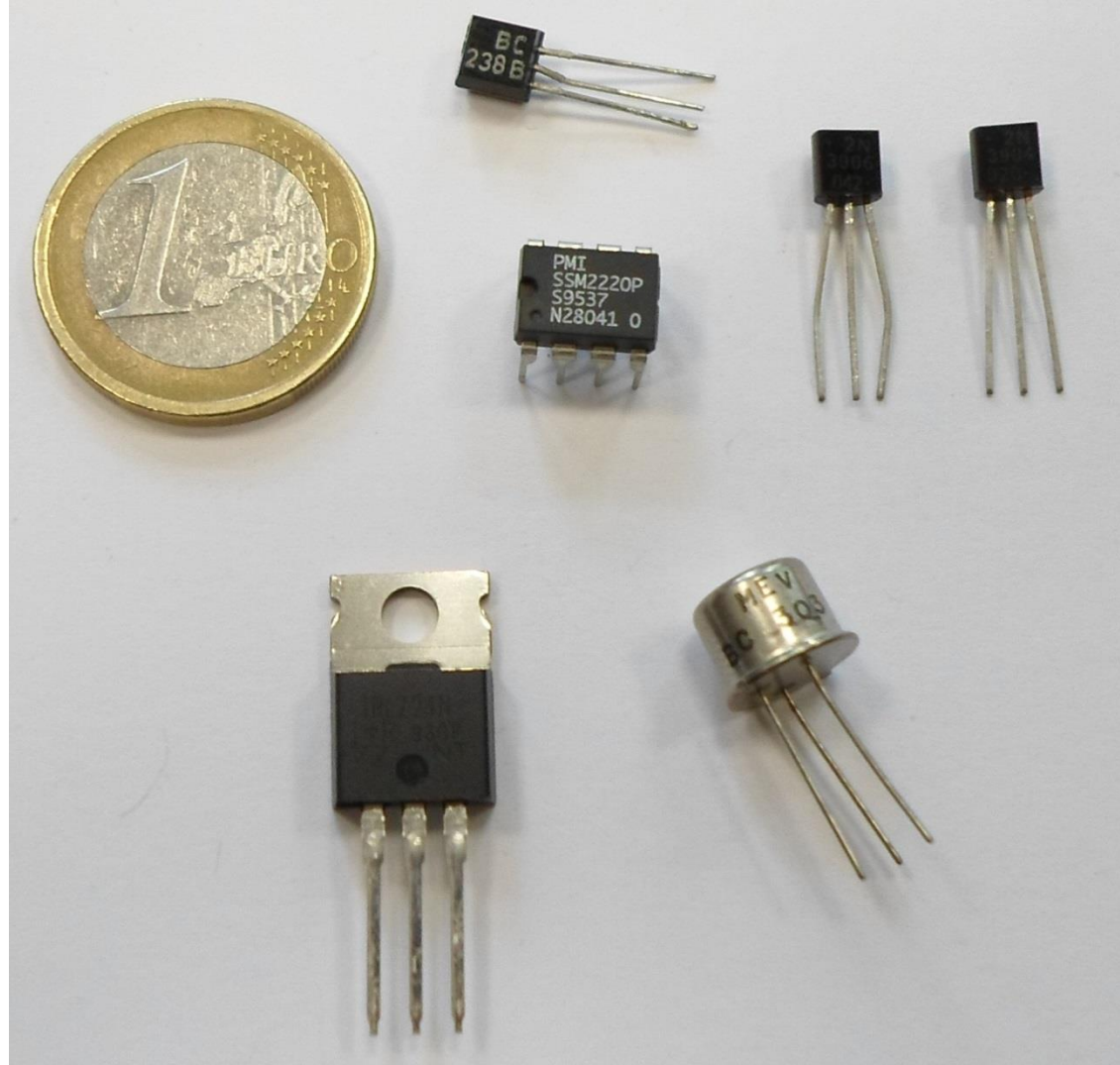
MOSFET – p típus



MOSFET – p típus



Tranzisztorok – teljesítményük más



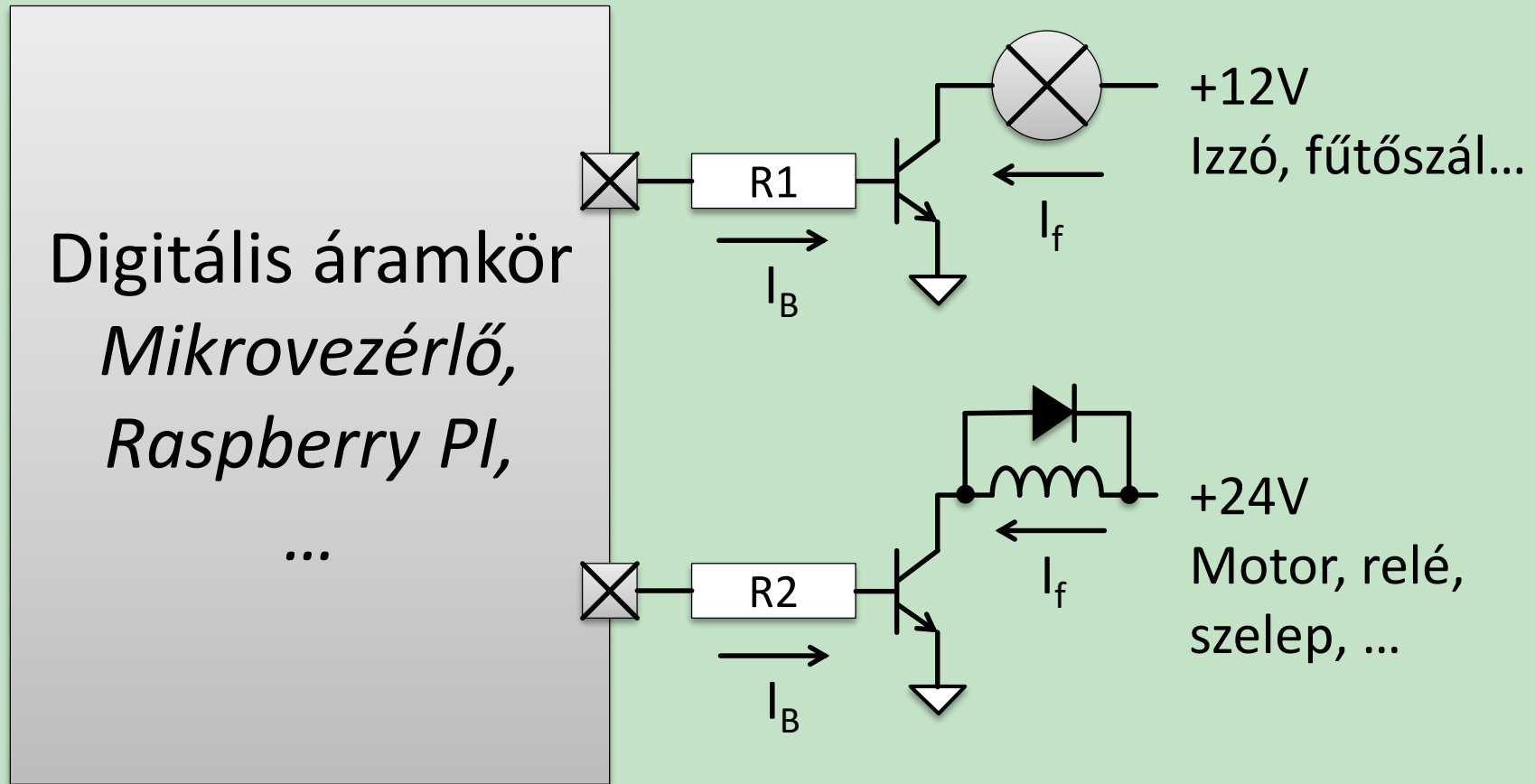
Tranzisztorok – SMD tokozás



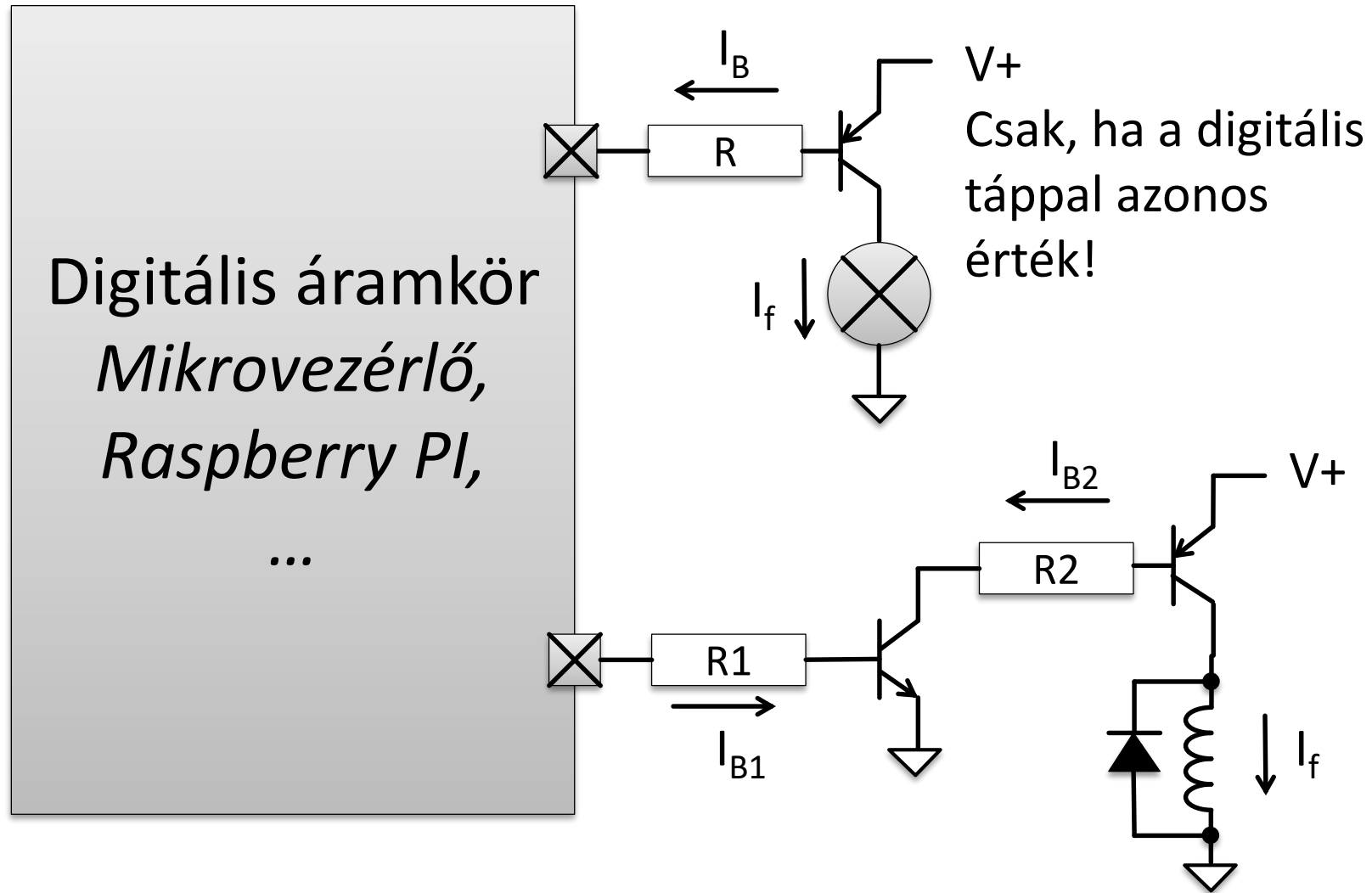
Tranzisztorok jellemzői

- ▶ Áramerősítési tényező, **β :50..1000**
- ▶ Maximális kollektoráram, I_C : 50mA.. $>10A$
- ▶ Maximális kollektor-emitter feszültség
- ▶ Maximális teljesítmény (amit elfűt)
 - ▶ $P = U_{CE} \cdot I_E$
- ▶ Tokozás

Tranzisztor, mint kapcsoló

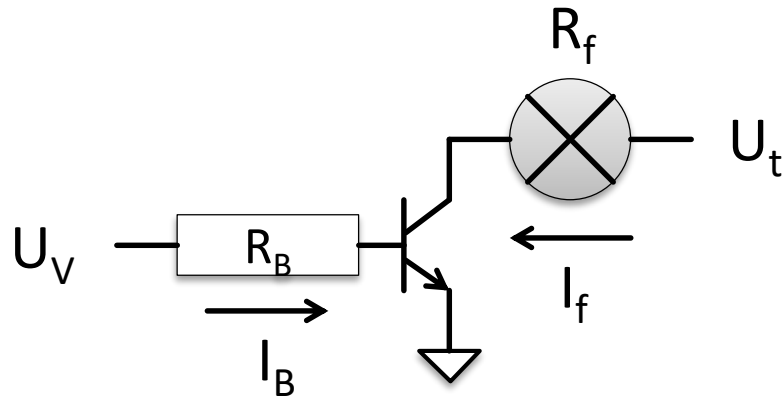


Tranzisztor, mint kapcsoló – p típus



Tranzisztor, mint kapcsoló

► Mekkora legyen az ellenállás?



$$I_f = \frac{U_t}{R_f} = \beta \cdot I_B$$

$$I_B = \frac{U_V - U_{BE}}{R_B} = \frac{U_V - 0,6V}{R_B}$$

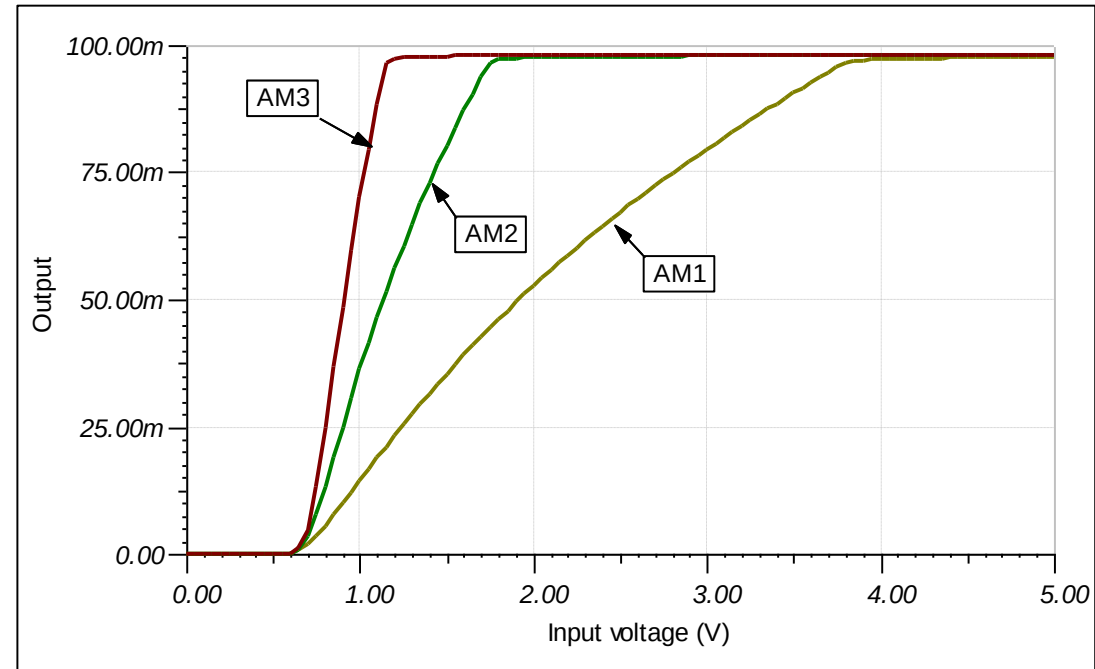
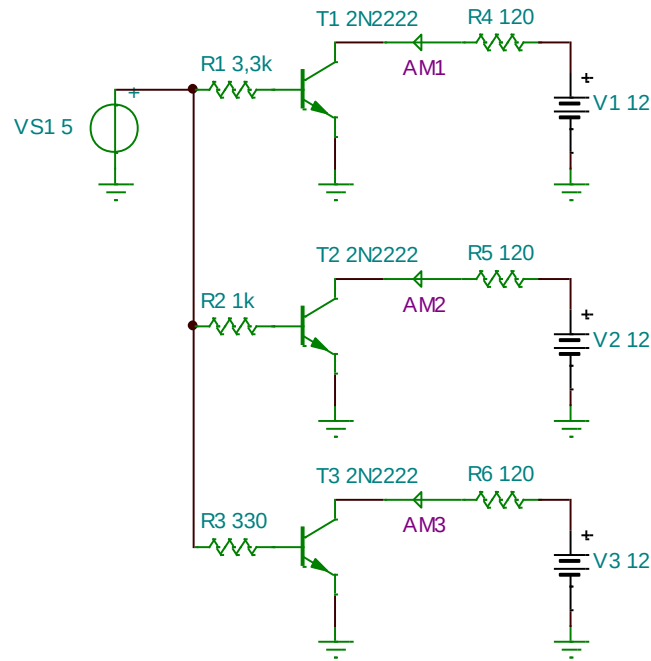
Bekapcsolás: $U_V > U_{BE,min}$ (2V..5V)

Kikapcsolás: $U_V < U_{BE,min}$ (0V..0,4V)

[Szimuláció](#)

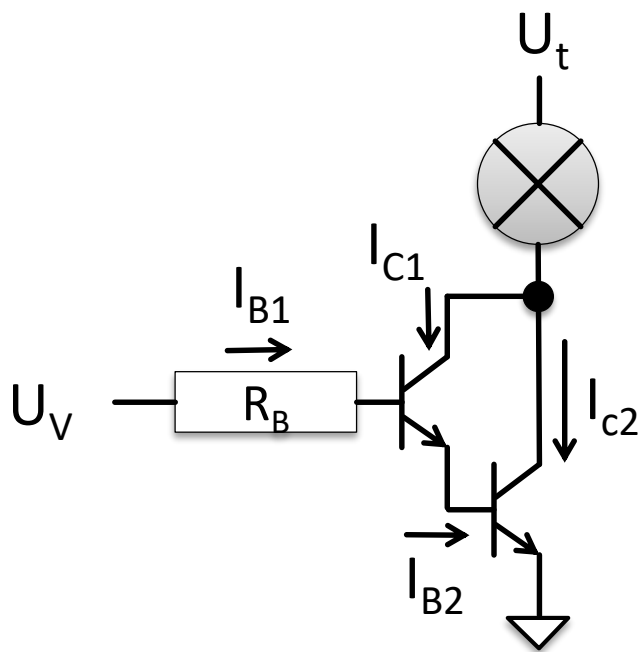
$$R_B < \beta \frac{U_V - 0,6V}{I_f}$$

Szimuláció különböző ellenállásokkal (áram a vezérlő feszültség függvényében)



Kicsi a β ? Nagyobb áram kellene?

- Két tranzisztor sorosan: Darlington kapcsolás



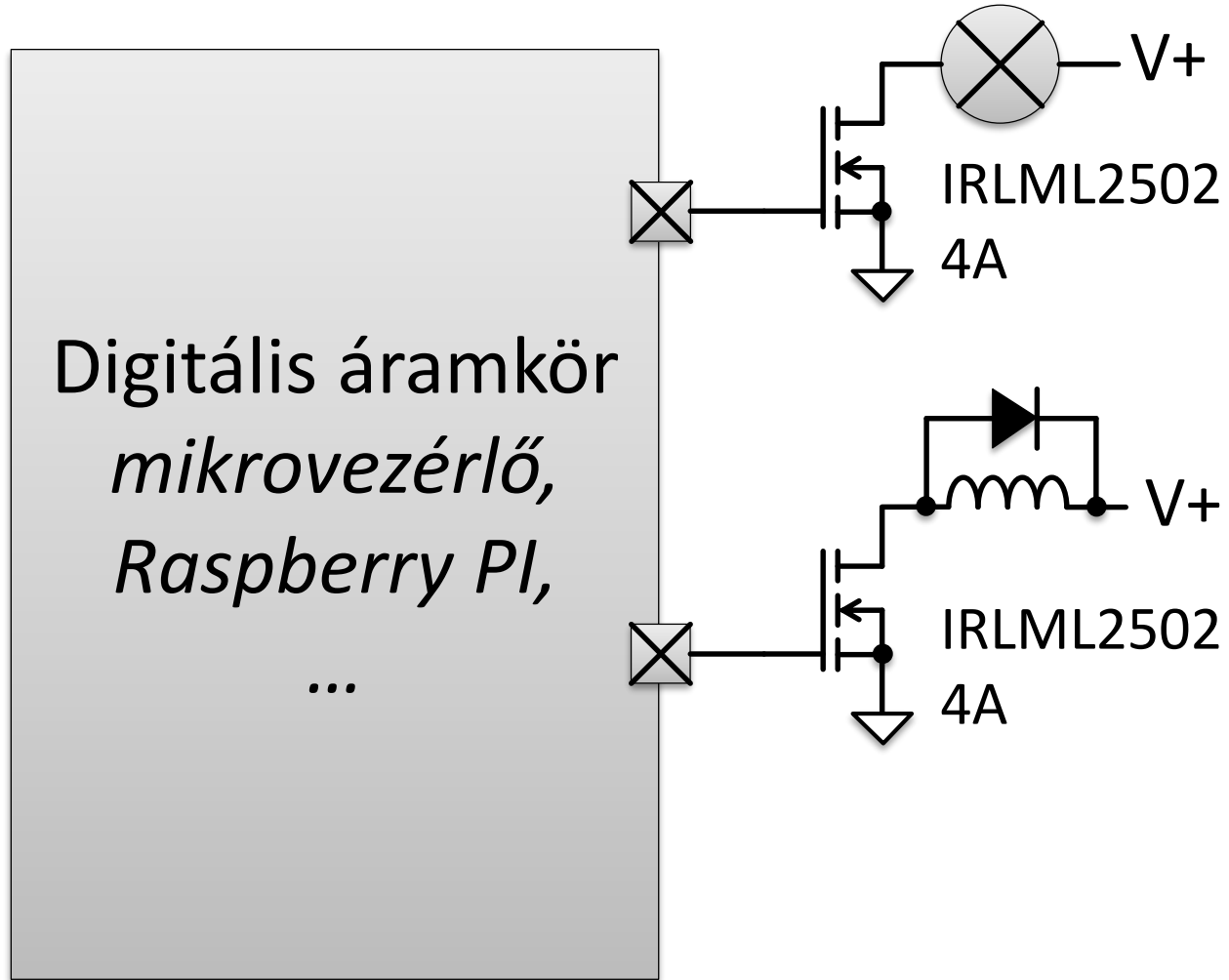
$$I_{C1} = \beta_1 \cdot I_{B1}$$

$$I_{B2} = I_{C1} + I_{B1}$$

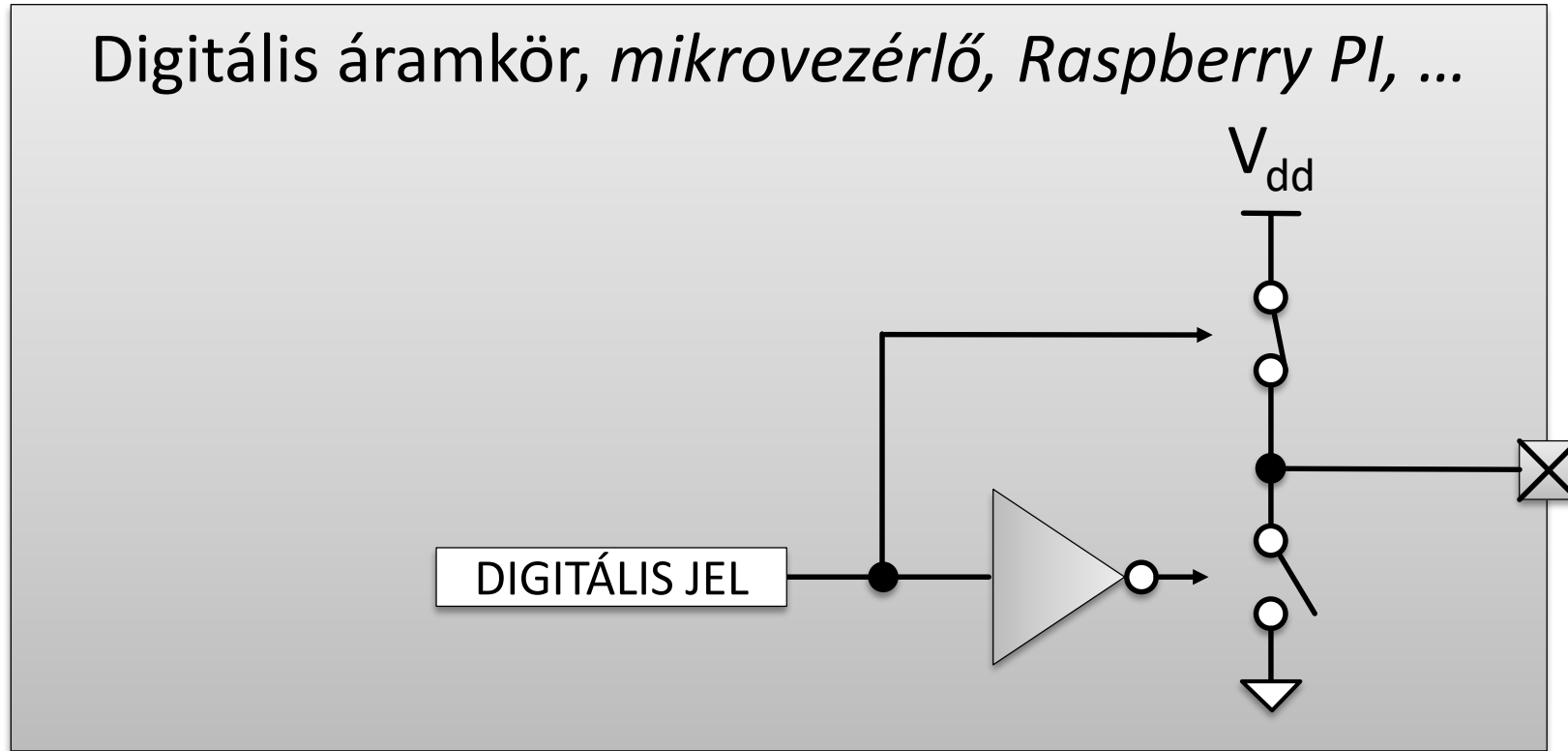
$$I_{C2} = \beta_2 \cdot I_{B2}$$

$$I_{C2} = \beta_2 \cdot (\beta_1 + 1) \cdot I_{B1} \approx \beta_2 \cdot \beta_1 \cdot I_{B1}$$

MOSFET kapcsoló: közvetlen feszültségvezérlés



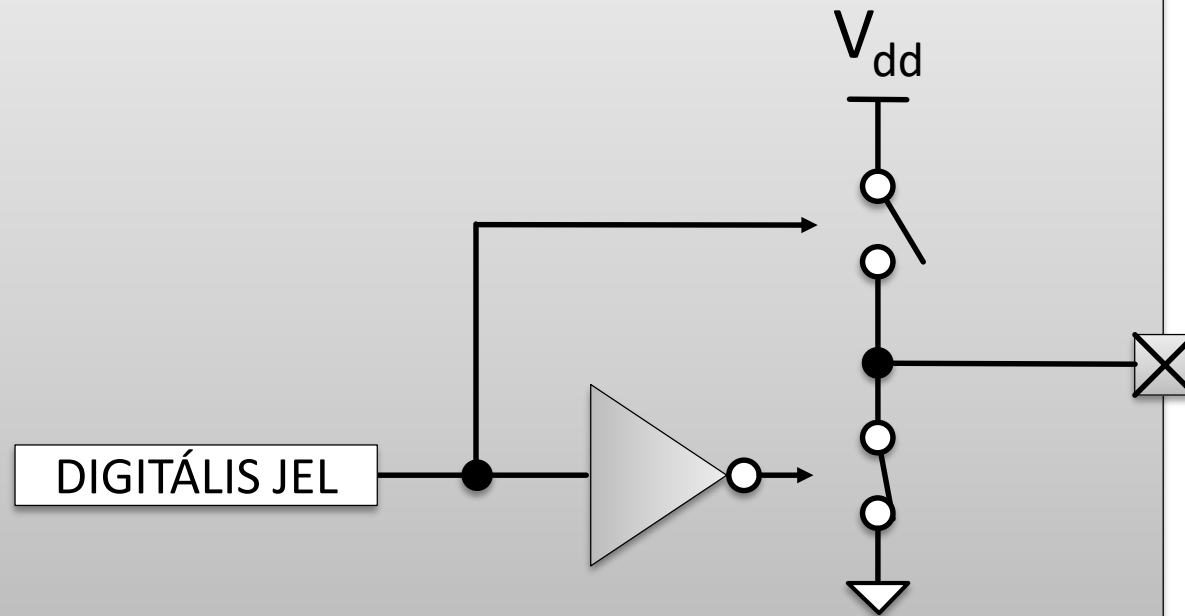
De milyen a digitális áramkör belül?



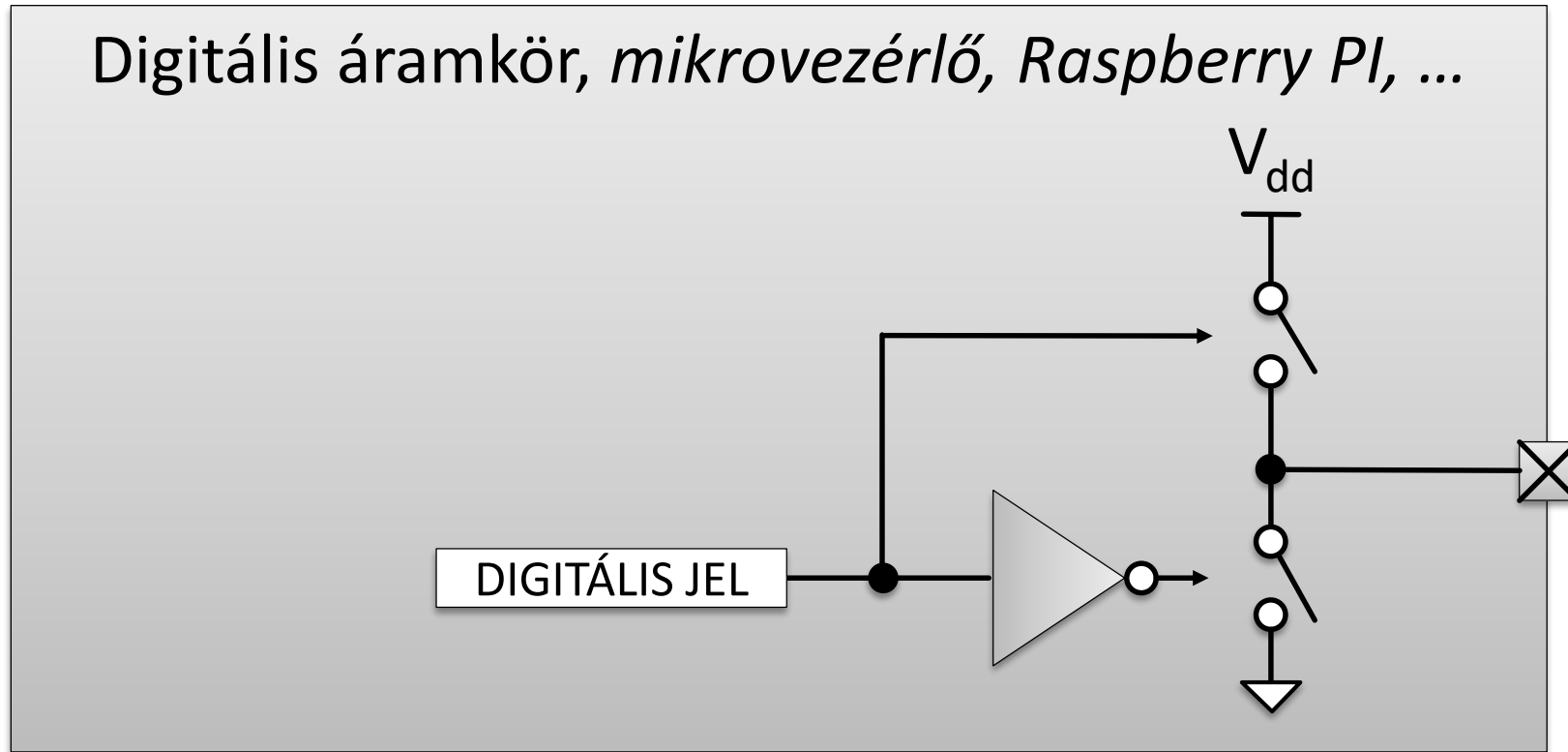
Logikai 1

Logikai 0

Digitális áramkör, *mikrovezérlő, Raspberry PI, ...*



Nagy-impedanciás állapot (Hi-Z) (ezzel együtt három állapot lehetséges)



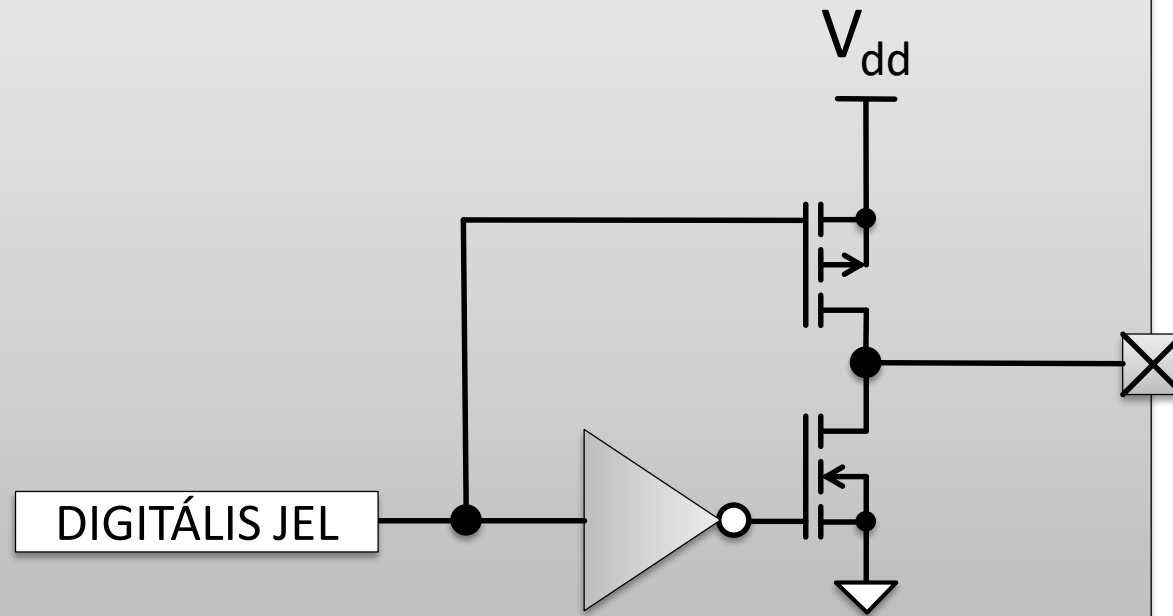
Kikapcsolt állapot

Több áramkör kimenete vezérelhet egy jelet

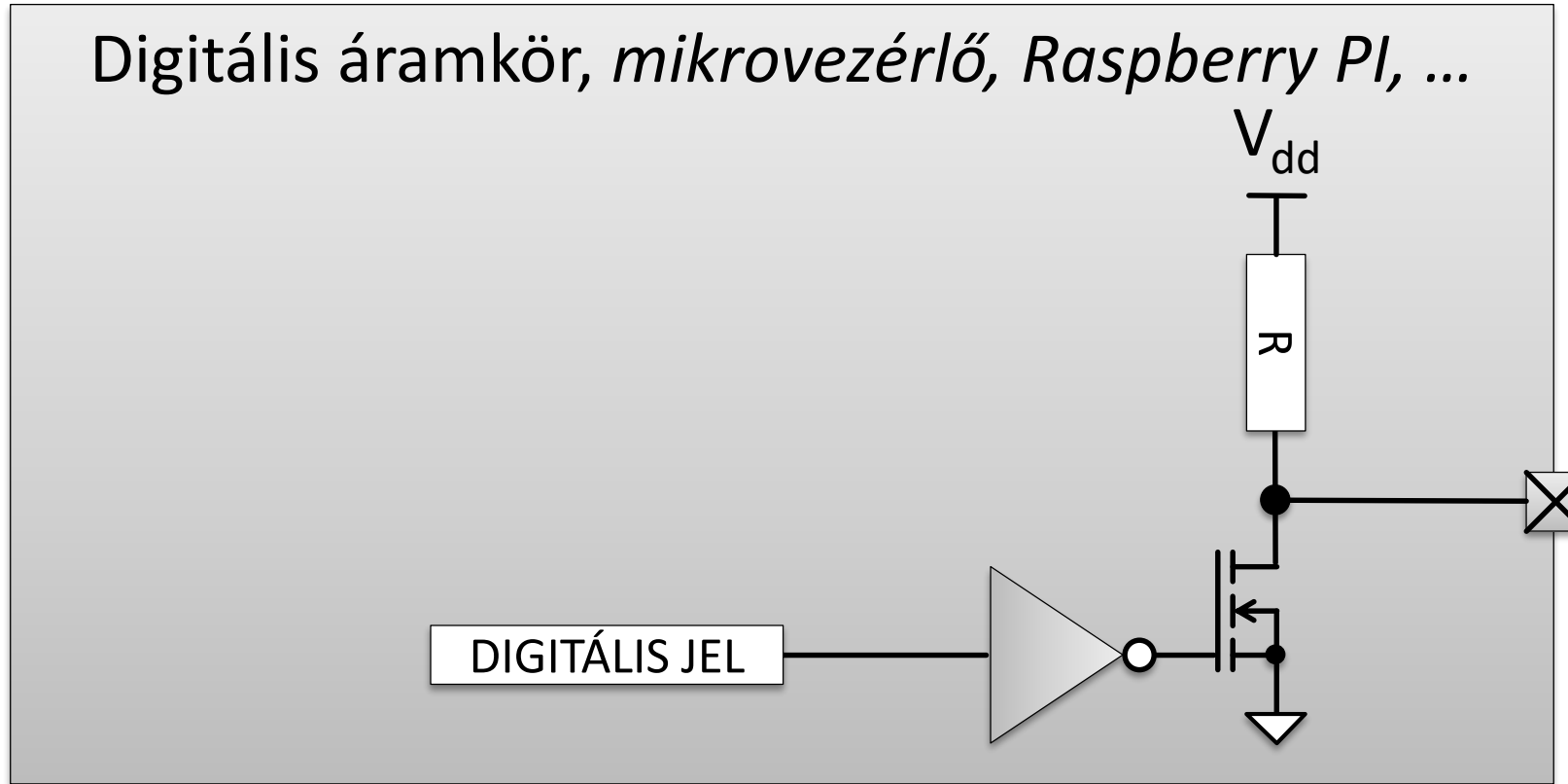
Példa: processzor adatbusz bitjei, kétirányú adatáramlás

De milyen a digitális áramkör belül?

Digitális áramkör, *mikrovezérlő, Raspberry Pi, ...*

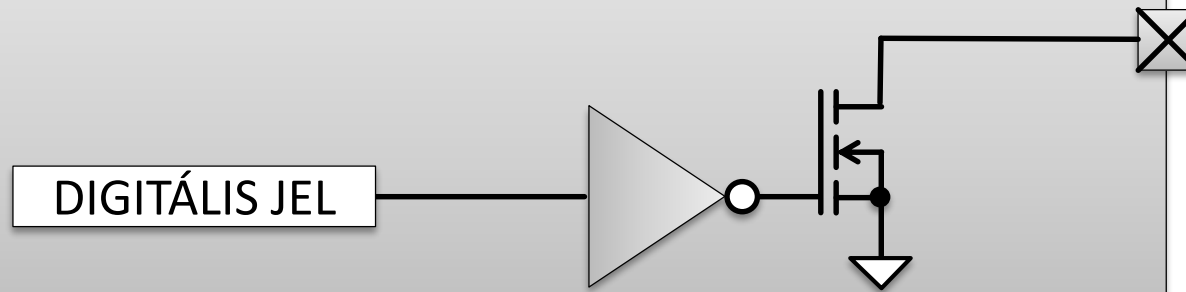


Lehetséges: logikai 1 felhúzó ellenállással!



Ekkor nem használható az n-típusú bipoláris tranzisztor!
Túl kicsi az áram, mivel $R \approx 50k..100k$

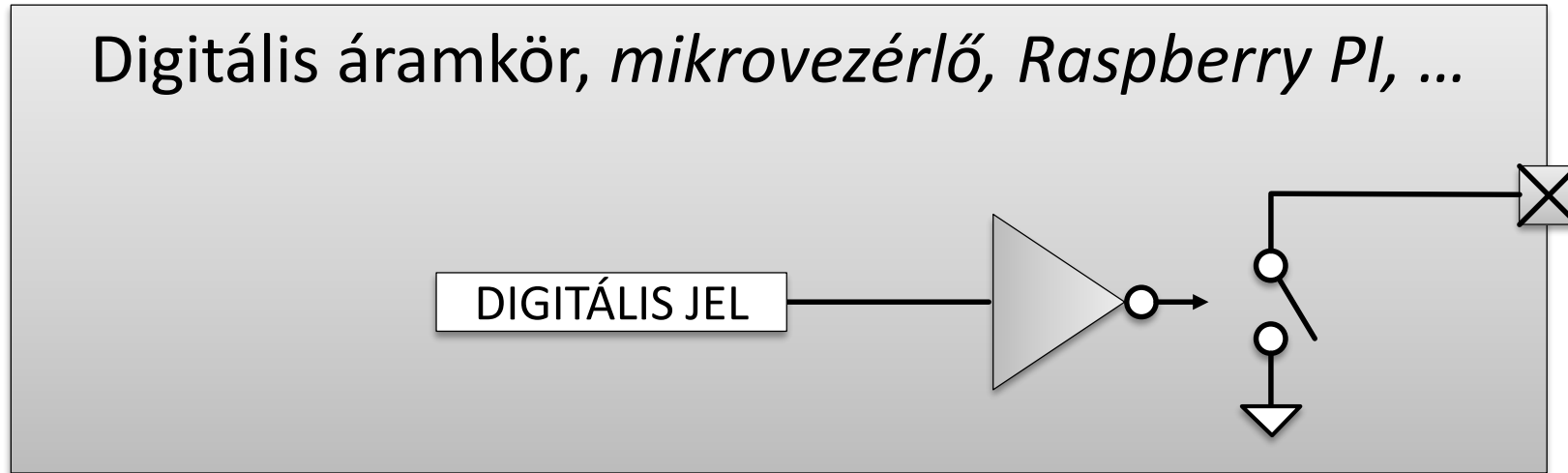
Digitális áramkör, *mikrovezérlő, Raspberry Pi, ...*



Nyitott „kollektoros” kimenet, **csak 0-t tud előállítani**
(open collector, open drain output)

Ekkor külső felhúzó ellenállás kell a logikai 1-hez
Logikai 1 esetén akár bemenet is lehet

Ekvivalens modell



Digitális kimenet tulajdonságai

- ▶ Logikai szintek
 - ▶ 0: pár tized V
 - ▶ 1: tápfeszültség alatt pár tized V
- ▶ Maximális kimenő áram csak néhány mA
- ▶ Lehet aszimmetrikus, ekkor logikai 1 esetén igen kicsi a kimeneti áram!
- ▶ Nem szabad tápfeszültségként használni
- ▶ Nem szabad túlterhelni
- ▶ Külső tranzisztor képes nagy teljesítményre

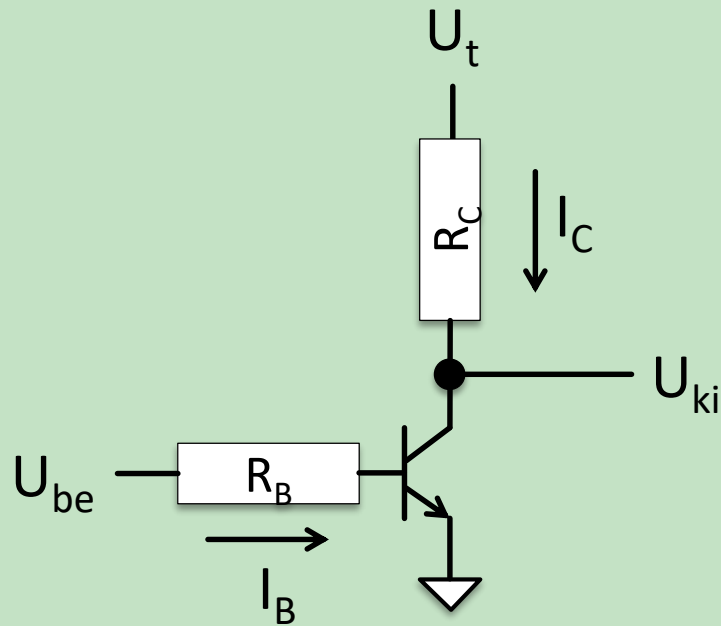
Tranzisztoros kapcsoló – összefoglalás

- ▶ Bipoláris: csak kisebb áramokra
 - ▶ A bázisáram legfeljebb a digitális kimeneti áram
 - ▶ Ennek β -szorosa a maximális kollektoráram
 - ▶ Nagyteljesítményű tranzisztornál kicsi a β (30-50)
- ▶ MOSFET
 - ▶ Feszültséggel vezérelt, küszöbszinttel rendelkezik
 - ▶ Kiválasztási szempont: a logikai szint biztosan nyissa ki
 - ▶ Nagy áramok kapcsolása is lehetséges
- ▶ p-típus: jelentősen korlátozott a kapcsolható feszültség (tipikusan a digitálissal azonos)

Feszültség erősítése

- ▶ A bipoláris tranzisztor áramot erősít
- ▶ Feszültség erősítése?
 - ▶ Áram ellenállásokon átvezetve: feszültség
 - ▶ Bemeneti feszültség → bázisáramot hoz létre
 - ▶ Kollektoráram → kimeneti feszültséget hoz létre
- ▶ Csak egy irányú áramok
 - ▶ Váltakozó feszültség? DC szintre ültetve.

Egyszerű kapcsolás: földelt emitteres



U_{BE} : bázis-emitter feszültség

$$I_B = \frac{U_{be} - U_{BE}(U_{be})}{R_B}$$

$$I_C = \beta \cdot I_B$$

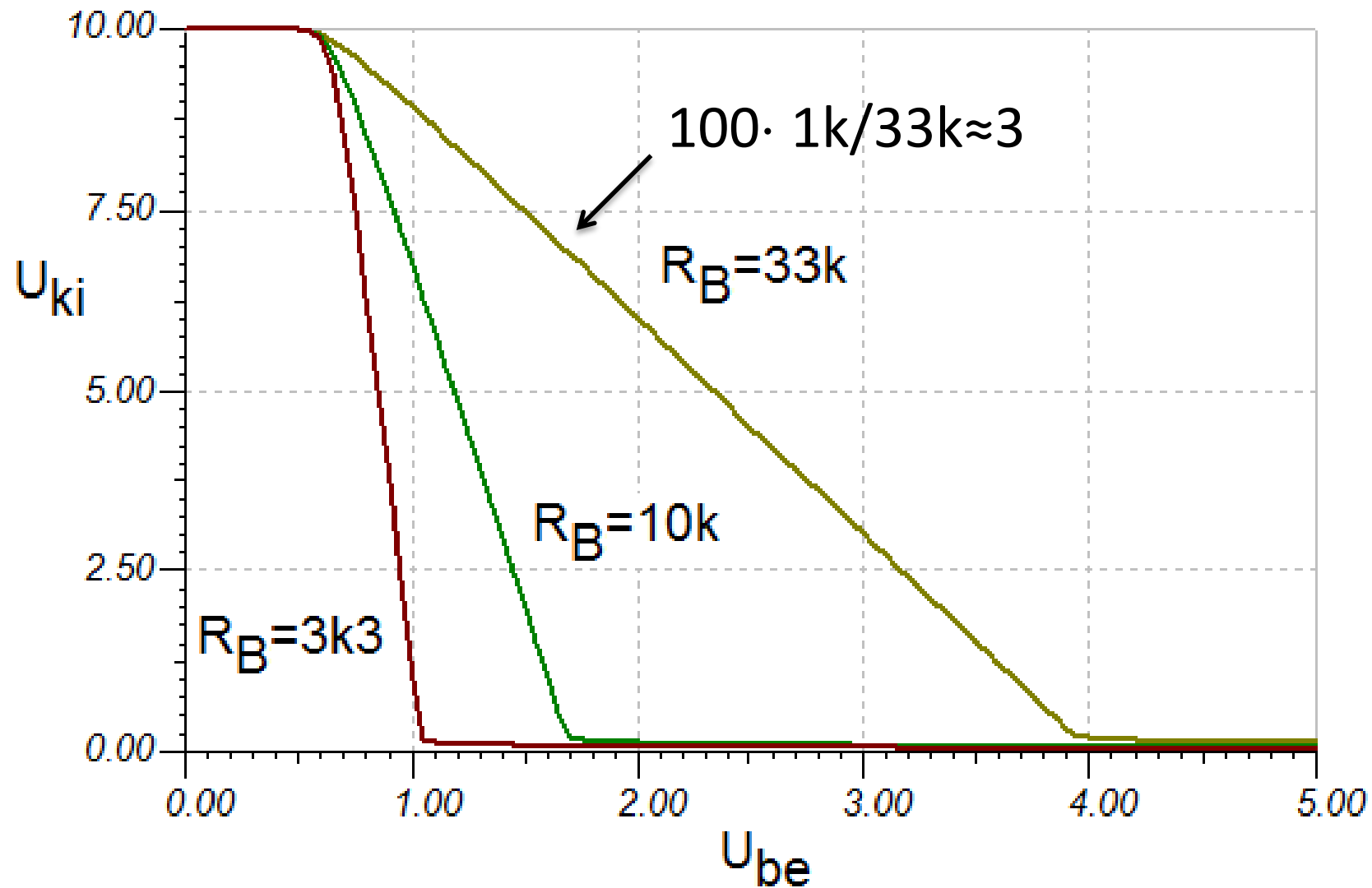
$$U_{ki} = U_t - I_C \cdot R_C$$

$$U_{ki} = U_t - \beta \frac{U_{be} - U_{BE}(U_{be})}{R_B} R_C$$

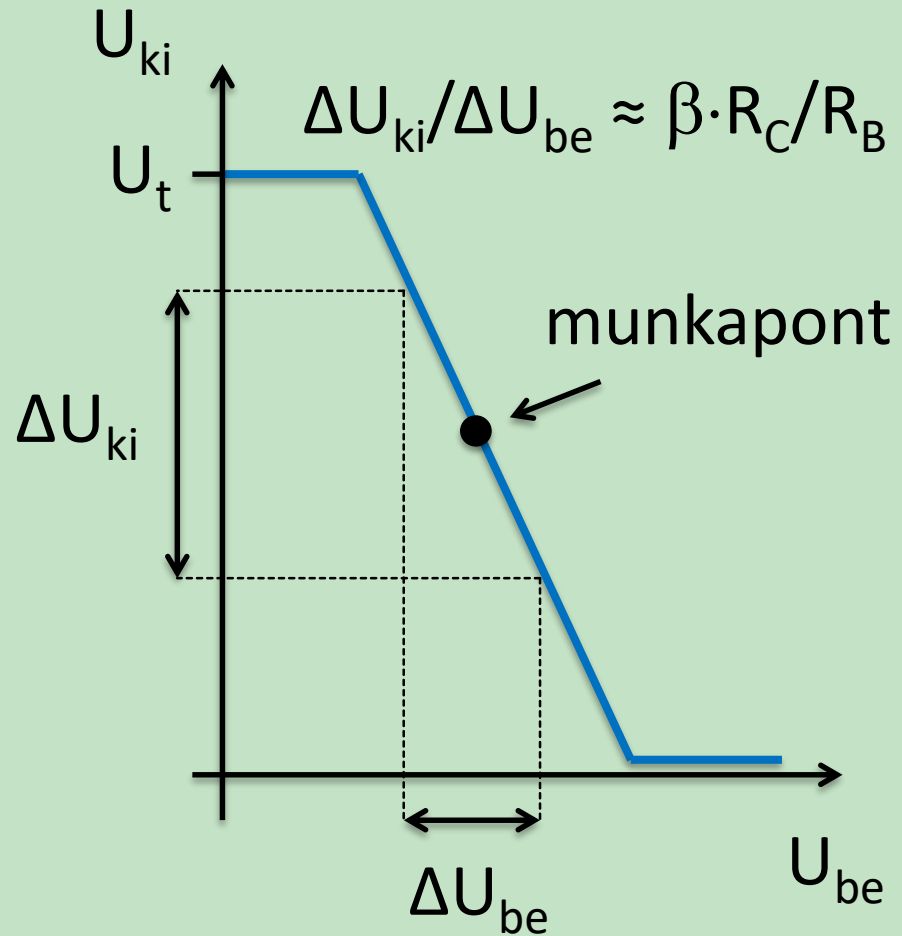
$$U_{ki} \approx -\beta \frac{R_C}{R_B} U_{be} + U_t + \beta \frac{R_C}{R_B} 0,6V$$

$$U_{ki} \approx -\beta \frac{R_C}{R_B} U_{be} + U_0$$

$R_C=1k$, $U_t=10V$, $\beta=100$

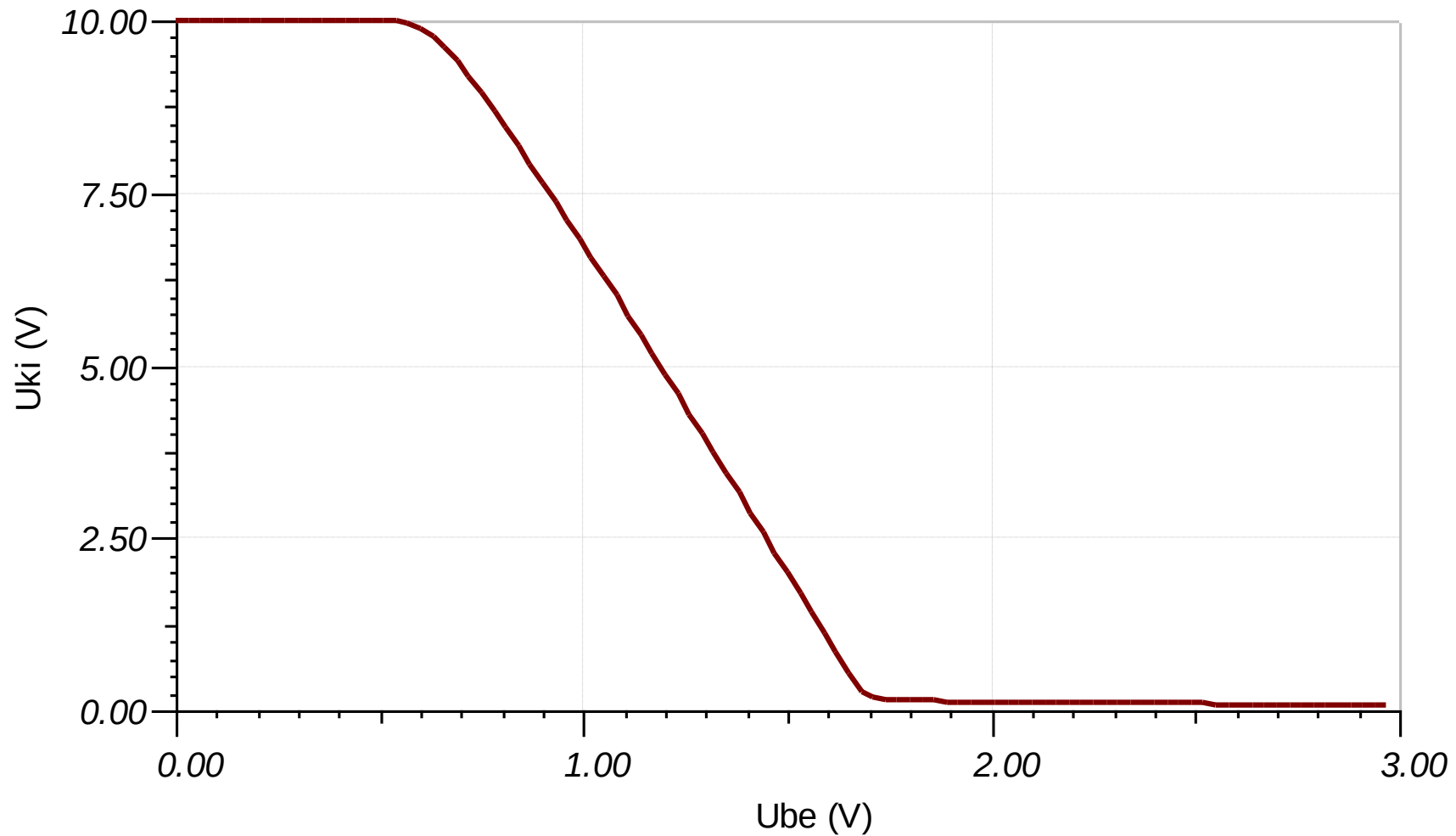


Csak AC erősítés van – speciális körülmények

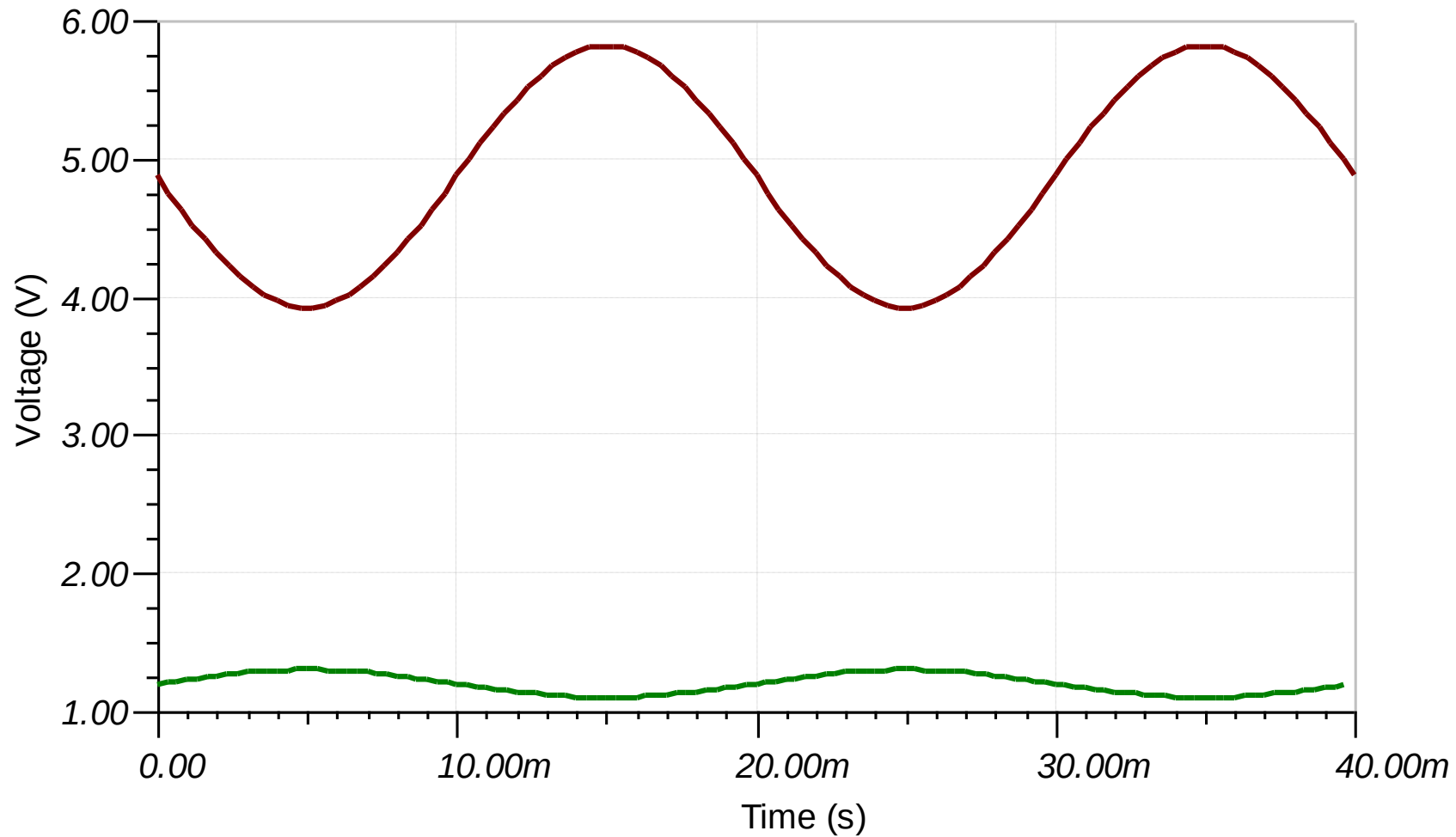


- ▶ Munkapont $\approx U_t/2$
- ▶ Ha nem itt van: torzítás
- ▶ U_{be} korlátos
- ▶ Ha meredek a görbe, nehéz a munkapontot beállítani
- ▶ A lineáris csak közelítés

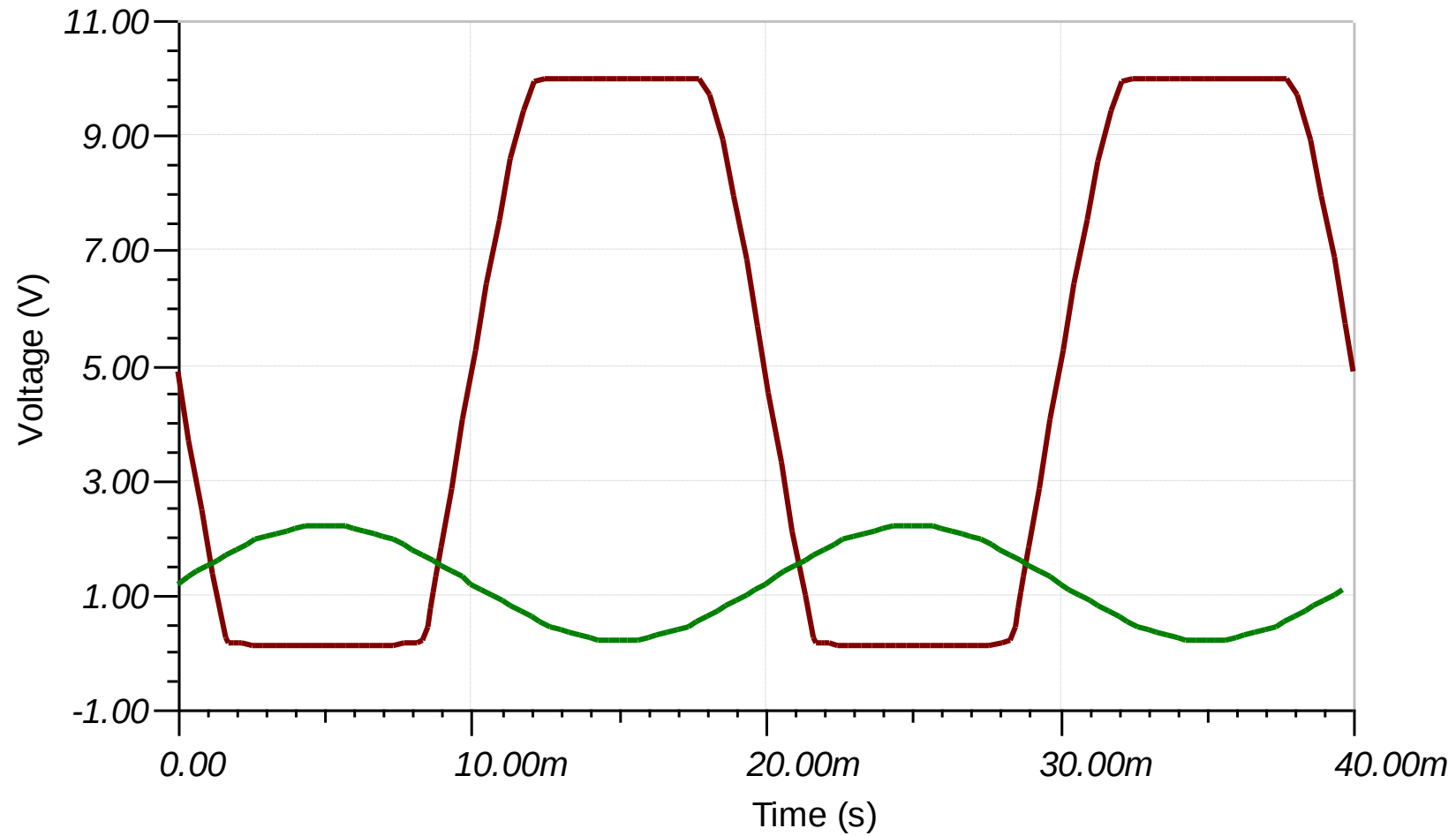
$R_B=10k$, $R_C=1k$, $U_t=10V$, $\beta=100 \rightarrow A \approx 10$



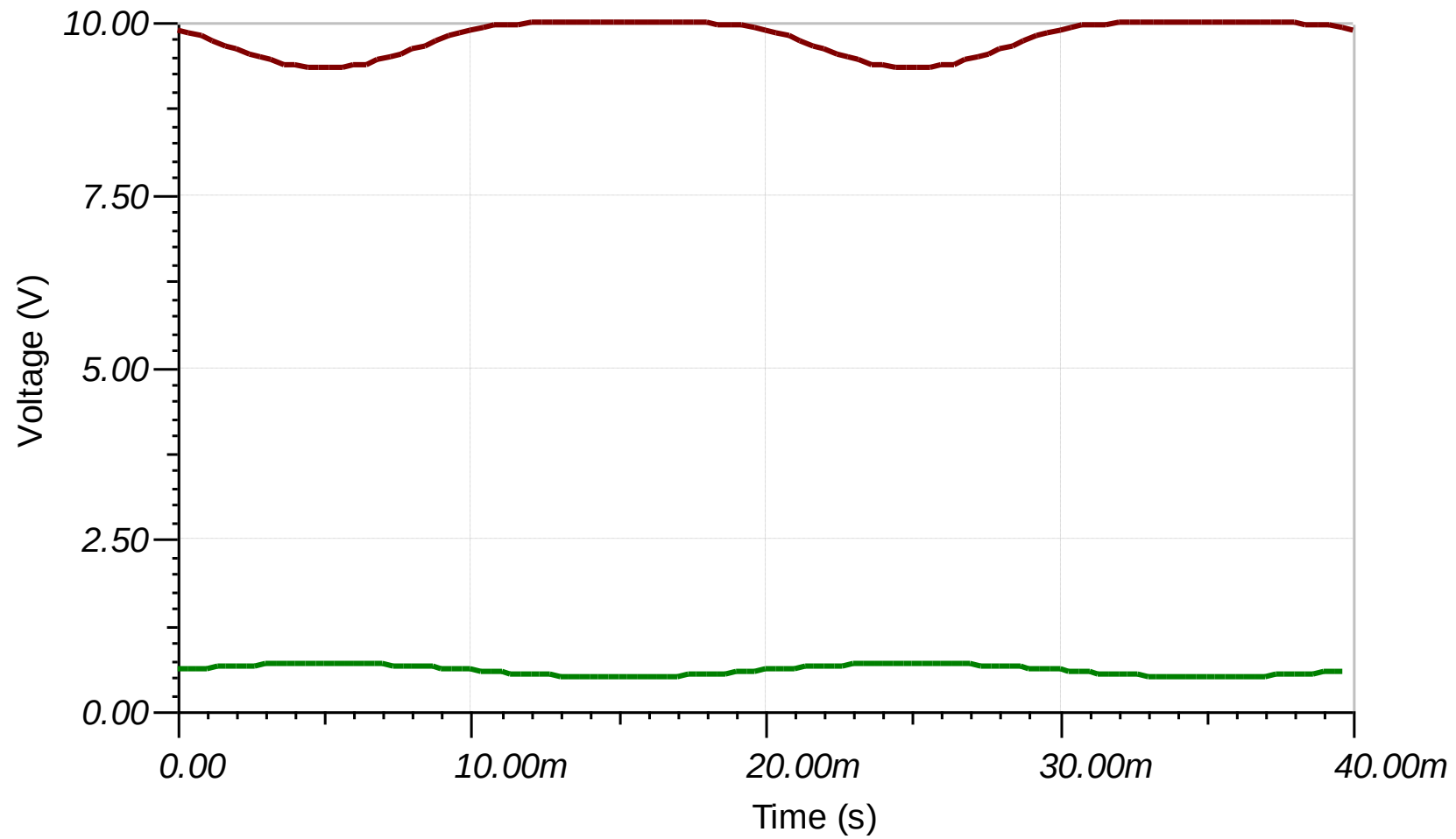
Helyes beállítás: $U_M=1,2V$; $U_{be}=1,1V..1,3V$



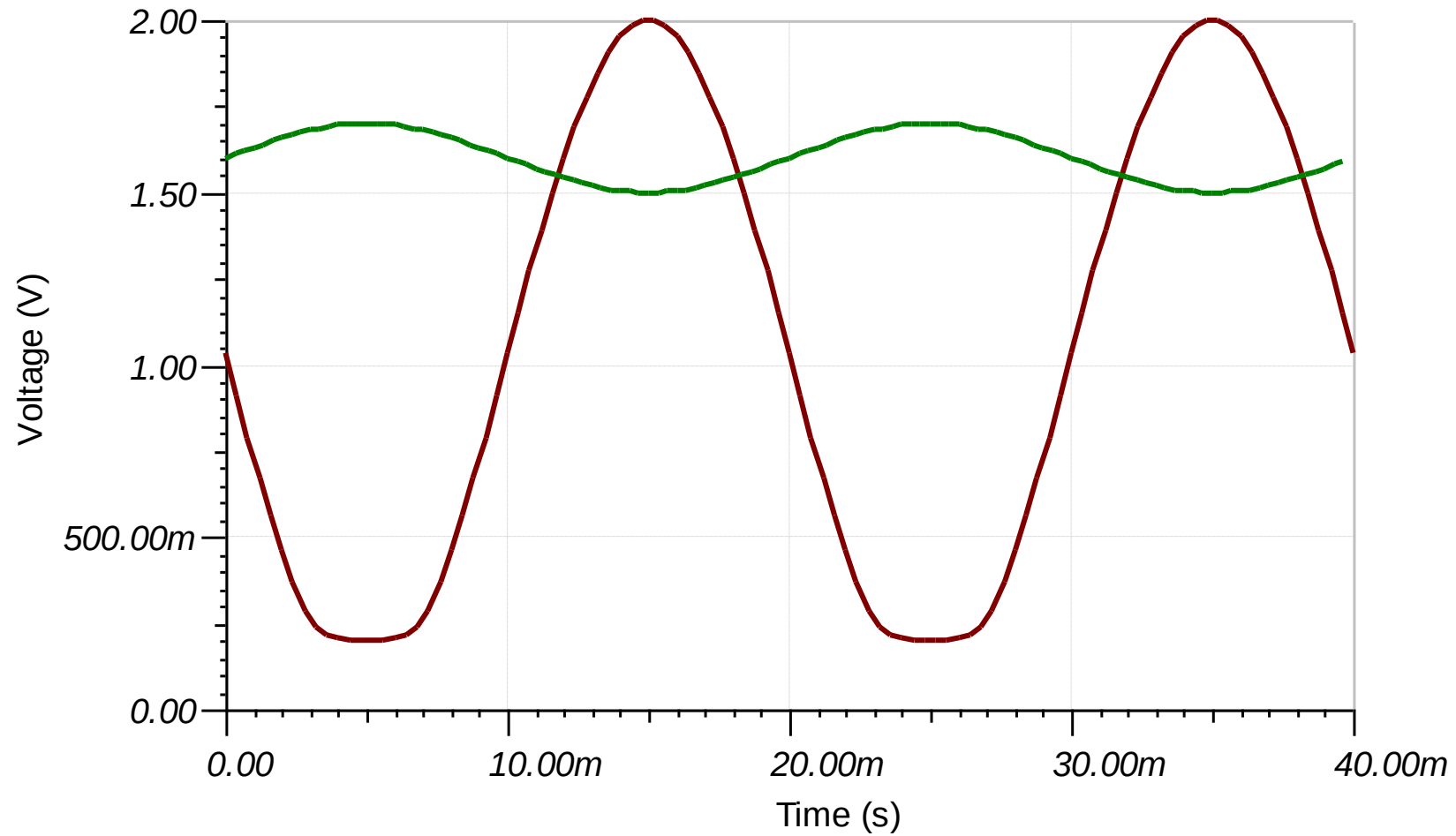
$U_M = 1,2V$; $U_{be} = 0,2V..2,2V$



$U_M = 0,6V$; $U_{be} = 0,4V..0,6V$



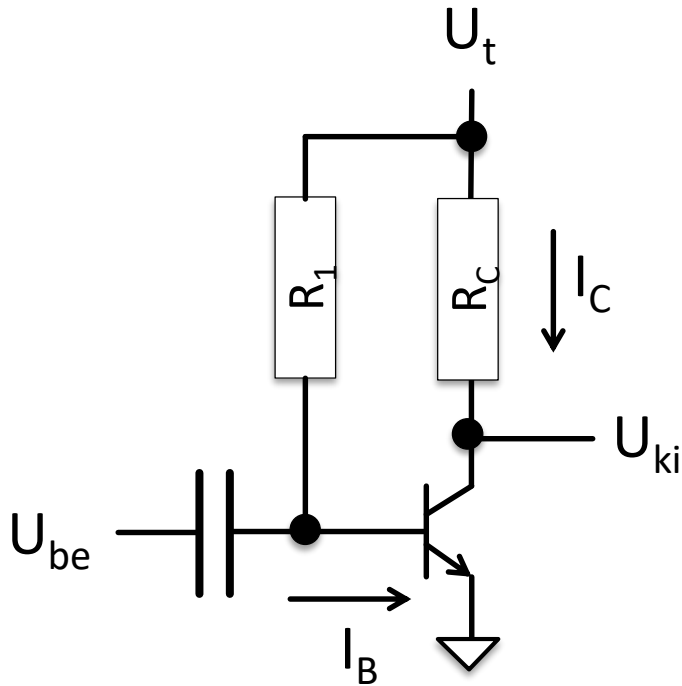
$U_M = 1,6V$; $U_{be} = 1,5V..1,7V$



Munkapontbeállítási módszerek, AC erősítés

- ▶ A jelnek tehát kell legyen egy átlagértéke:
 - ▶ ez tulajdonképpen a munkapont
- ▶ Elég szűk tartomány nagy erősítéseknel
- ▶ A jel illet tipikusan nem tartalmaz
- ▶ Oldja ezt meg az erősítőkapcsolás!
 - ▶ a bemenő jelnek csak az AC részét vegyük
 - ▶ adjunk ehhez egy egyenkomponenst, ami a munkapontot beállítja

Munkapont-beállítás



$$I_B \approx \frac{U_t - 0,6V}{R_1}$$

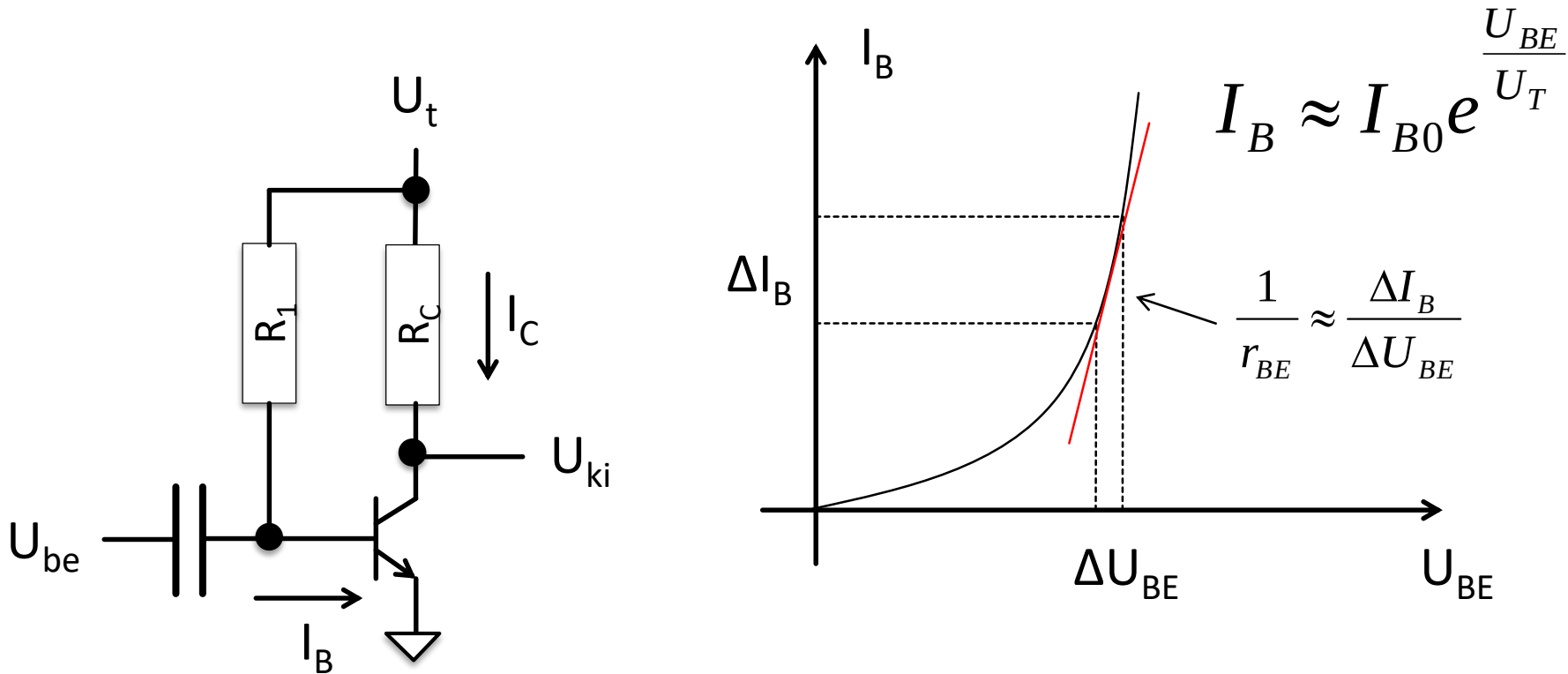
$$I_C = \beta \cdot I_B \approx \beta \frac{U_t - 0,6V}{R_1}$$

$$U_{ki} = U_t - I_C \cdot R_C$$

$$U_{ki} = \frac{U_t}{2}$$

$$R_1 = 2 \cdot \beta \cdot R_C \frac{U_t - 0,6V}{U_t} \approx 2 \cdot \beta \cdot R_C$$

Erősítés? U_{be} egy diódán hoz létre áramot



U_{BE} : bázis-emitter közötti feszültség

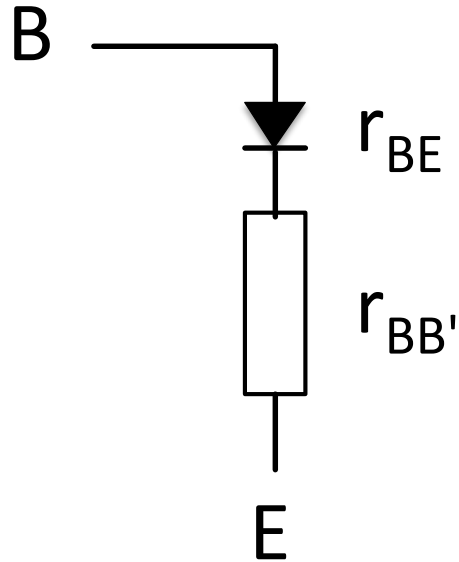
Bázis-emitter dinamikus ellenállás

$$I_B = I_{B0} e^{\frac{U_{BE}}{U_T}}$$

$$\frac{1}{r_{BE}} = \frac{\partial I_B}{\partial U_{BE}} = I_{B0} e^{\frac{U_{BE}}{U_T}} \frac{1}{U_T} = \frac{I_B}{U_T}$$

$$r_{BE} = \frac{U_T}{I_B}$$
$$r_E = \frac{U_T}{I_E} = \frac{r_{BE}}{\beta + 1}$$

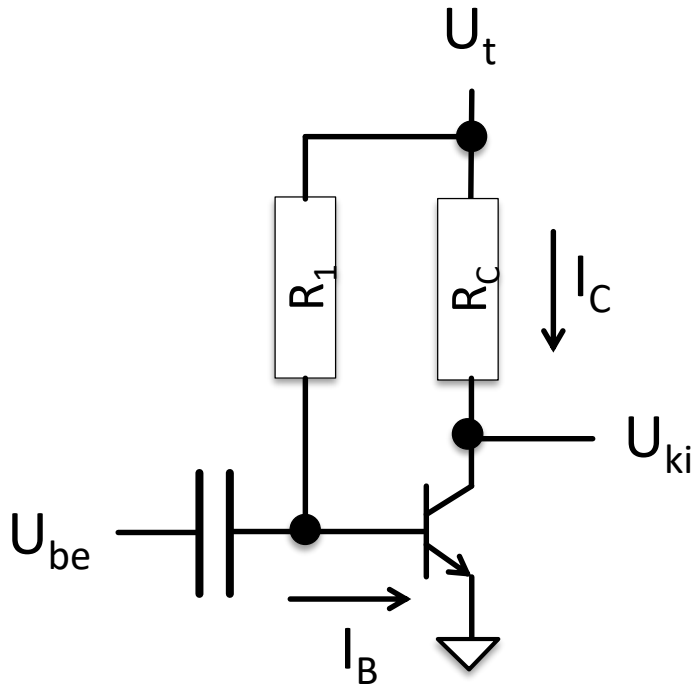
Valódi esetben lehet soros ellenállás is: $r_{BB'}$



$$\Delta U_{BE} = \Delta I_B \cdot (r_{BE} + r_{BB'})$$

$$\Delta U_{BE} = \Delta I_B \cdot ((\beta + 1) \cdot r_E + r_{BB'})$$

Δ helyett kisbetűk használata

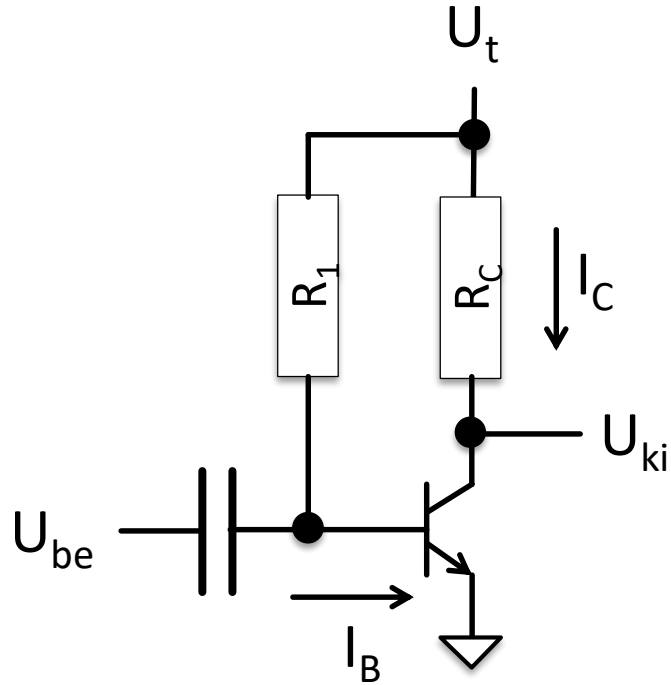


$$\Delta I_B = \frac{1}{r_{BE} + r_{BB'}} \Delta U_{be}$$

vagy:

$$i_B = \frac{1}{r_{BE} + r_{BB'}} u_{be}$$

Az AC erősítés végül:



$$i_B = \frac{1}{r_{BE} + r_{BB'}} u_{be} = \frac{1}{\beta + 1} \frac{1}{r_E + \frac{r_{BB'}}{\beta + 1}} u_{be}$$

$$u_{ki} = u_C = -R_C \cdot i_C = -R_C \cdot \beta \cdot i_B$$

$$u_{ki} = -\frac{\beta}{\beta + 1} \frac{R_C}{r_E + \frac{r_{BB'}}{\beta + 1}} u_{be}$$

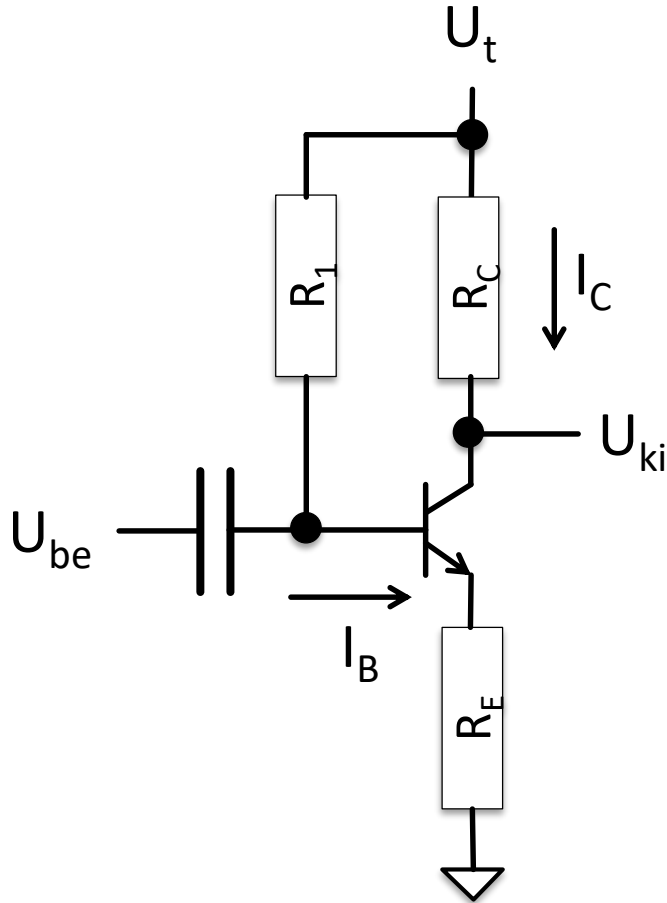
$$\frac{u_{ki}}{u_{be}} \approx -\frac{R_C}{r_E + \frac{r_{BB'}}{\beta + 1}} \approx -\frac{R_C}{r_E}$$

r_E értéke nem pontos, mert U_T és I_E sem

- ▶ **Az erősítés így túlságosan függ a tranzisztor paramétereitől**
- ▶ Hogyan lehetne javítani?
- ▶ Adjunk hozzá r_E -hez ellenállást
 - ▶ Csökkenti a bizonytalanságot
 - ▶ Ára van: csökken az erősítés is

$$u_{ki} \approx -\frac{R_C}{r_E} u_{be}$$

Az emitterkörbe is tehetünk ellenállást



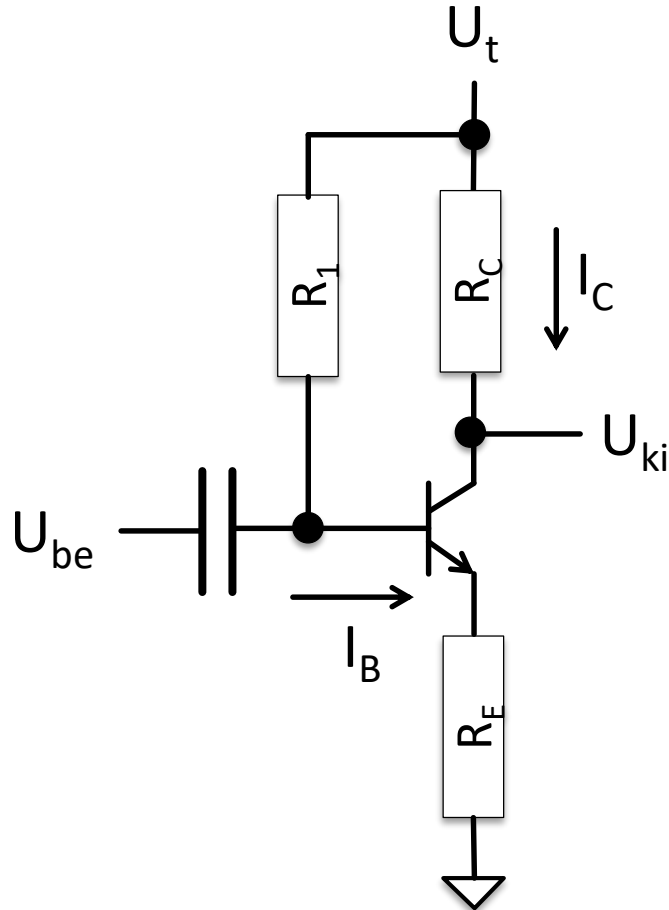
$$u_{be} = u_{BE} + u_E = i_B (r_{BE} + r_{BB'}) + i_E R_E$$

$$u_{be} = i_B (r_{BE} + r_{BB'}) + (\beta + 1) i_B R_E$$

$$u_{ki} = -R_C \beta \cdot i_B$$

$$\frac{u_{ki}}{u_{be}} = - \frac{R_C \beta}{r_{BE} + r_{BB'} + (\beta + 1) R_E}$$

Az emitterkörbe is tehetünk ellenállást

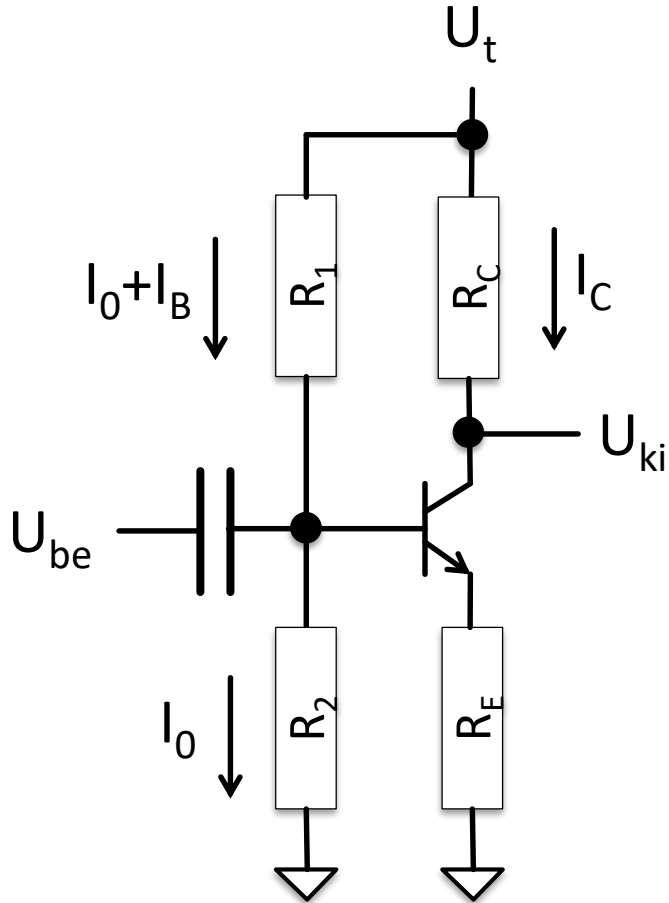


$$\frac{u_{ki}}{u_{be}} = - \frac{R_C \beta}{r_{BE} + r_{BB'} + (\beta + 1) R_E}$$
$$\frac{u_{ki}}{u_{be}} = - \frac{\beta}{\beta + 1} \frac{R_C}{r_E + \frac{r_{BB'}}{\beta + 1} + R_E}$$

$$\frac{u_{ki}}{u_{be}} \approx - \frac{R_C}{r_E + R_E}$$

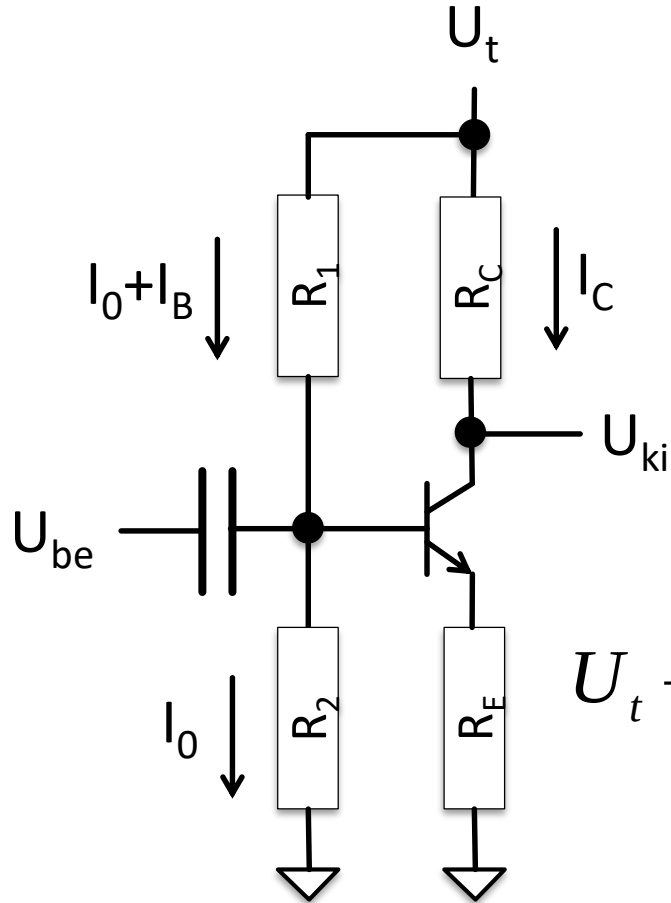
$$\boxed{\frac{u_{ki}}{u_{be}} \approx - \frac{R_C}{R_E}}$$

Javított munkapontbeállítás: R_1 és R_2 is van



- ▶ U_{ki} kevésbé függ β -tól
- ▶ $I_0 \approx I_B \cdot 10$
- ▶ Ekkor az osztó kimenetét elenyészően befolyásolja I_B

Beállítás



► Emitteren: $\approx U_t \cdot R_2 / (R_1 + R_2) - 0,6V$

► Mivel:

► $I_C R_C = U_t / 2$ a jó munkaponthoz,

► $I_C \approx I_E$ és $I_E \approx (U_t \cdot R_2 / (R_1 + R_2) - 0,6V) / R_E$

$$U_t \frac{R_2}{R_1 + R_2} \approx 0,6V + I_E R_E \approx 0,6V + \frac{U_t \cdot R_E}{2 \cdot R_C}$$

Tranzisztorok – összefoglalás

- ▶ Teljesítménynövelés
 - ▶ Kis jellel nagy jel vezérlése
- ▶ N és P típus
 - ▶ Különböző áramirányokra, „tükrözött” vezérlés
 - ▶ Ezek kombinációja:
 - ▶ kétirányú áramok
 - ▶ + és – feszültségek kezelése
- ▶ Teljesítményveszteség/melegedés
 - ▶ $P = \text{tranzisztoron eső feszültség} \times \text{átfolyó áram}$
 - ▶ Minimális: teljesen nyitott vagy teljesen zárt állapot

Tranzisztorok – összefoglalás

- ▶ Bipoláris tranzisztorok
 - ▶ Árammal vezérelhető nagyobb áram
 - ▶ Kapcsolóként
 - ▶ Analóg áramkörökben
- ▶ MOSFET
 - ▶ Feszültséggel vezérelt áram, ellenállás
 - ▶ Digitális áramkörökben
 - ▶ Kapcsolóként
 - ▶ Analóg áramkörökben