

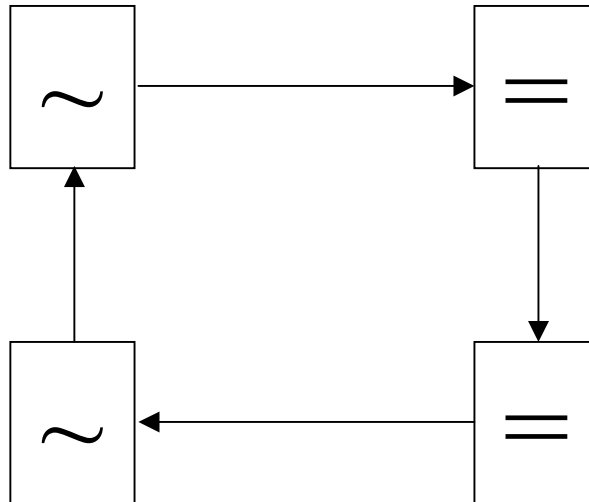
Teljesítményelektronika

Szakirodalom

- ✦ Csáky-Ganszky-Ipsits-Marti: Teljesítményelektronika, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1971.
- ✦ K. Heumann: A teljesítményelektronika alapjai, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1979.
- ✦ Rashid, M.H.: Power Electronics, Prentice-Hall International Inc., 1993.
- ✦ Bencze János: Új utakon a villamos hajtások, Magyar Elektronika, 1. Szám, 1994.

Teljesítményelektronika tárgyköre

☀️ A villamos energia lehetőleg
kisveszteségű átalakítása
elektronikus eszközökkel



Áramirányítók osztályozása

✱ Egyenirányító (rectifier):

AC (alternative current) \rightarrow DC (direct current)

✱ Váltóirányító (inverter):

DC (direct current) \rightarrow AC (alternative current)

✱ Frekvenciaváltó (frequency converter):

fázis : $m1 \rightarrow m2$

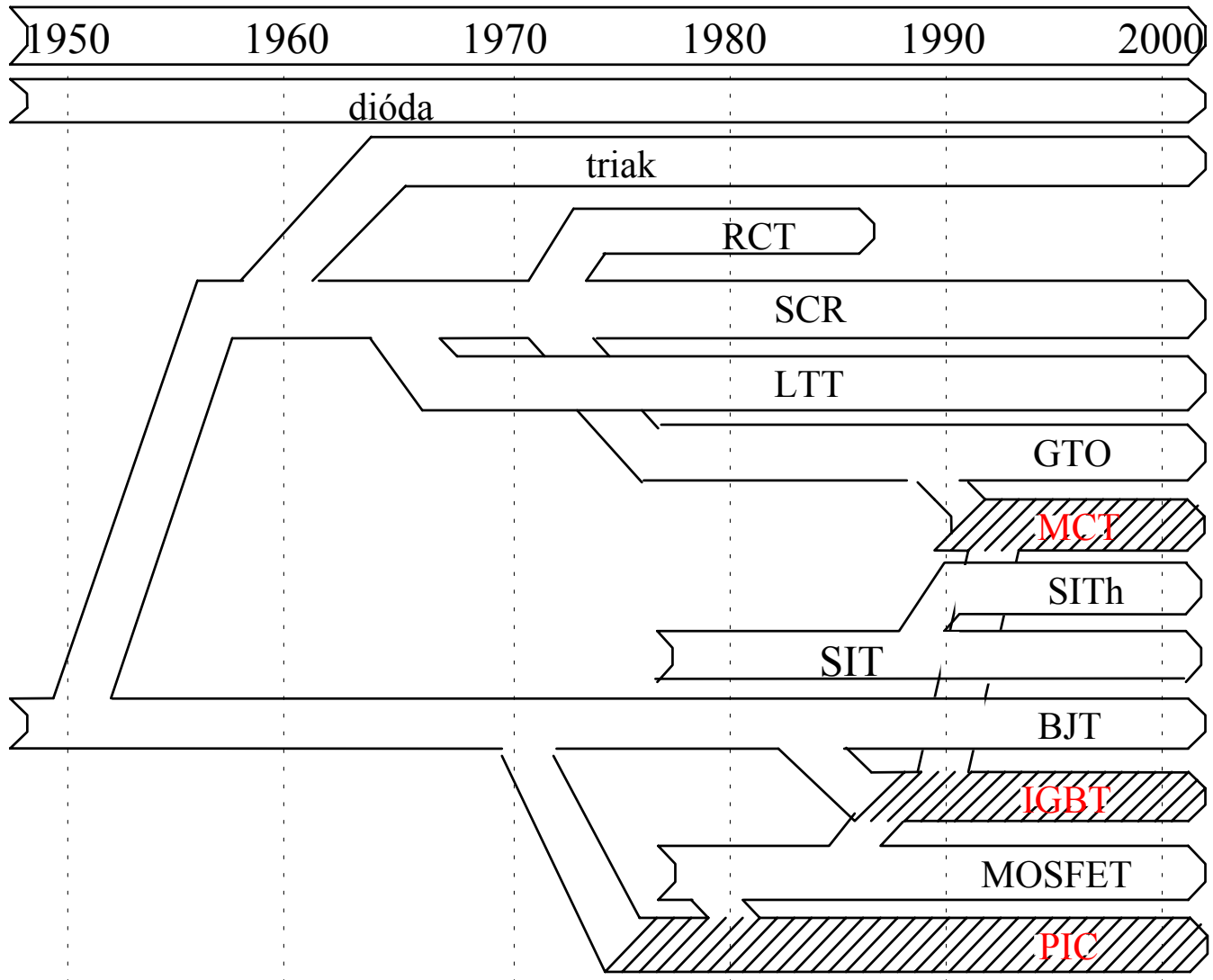
frekvencia: $f1 \rightarrow f2$

✱ Szaggató (chopper):

$U1 \rightarrow U2$

lehet DC/DC vagy AC/AC

Félvezető eszközök fejlődése



Teljesítmény félvezető eszközök

PSD=Power Semiconductor Device

✦ Thyristor = tirisztor

SCR = Silicon Controlled Rectifier

Triac = Triode Alternating Current

GTO = Gate Turn Off

RCT = Reverse Conducting Thyristor

SITh = Static Induction Thyristor

MCT = MOS Controlled Thyristor

LTT = Light Triggered Thyristor

LASCR = Light Activated Silicon Controlled Rectifier

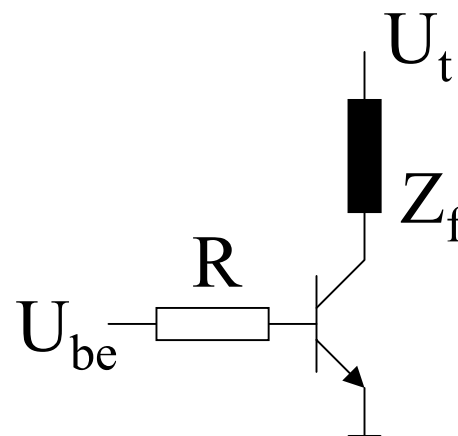
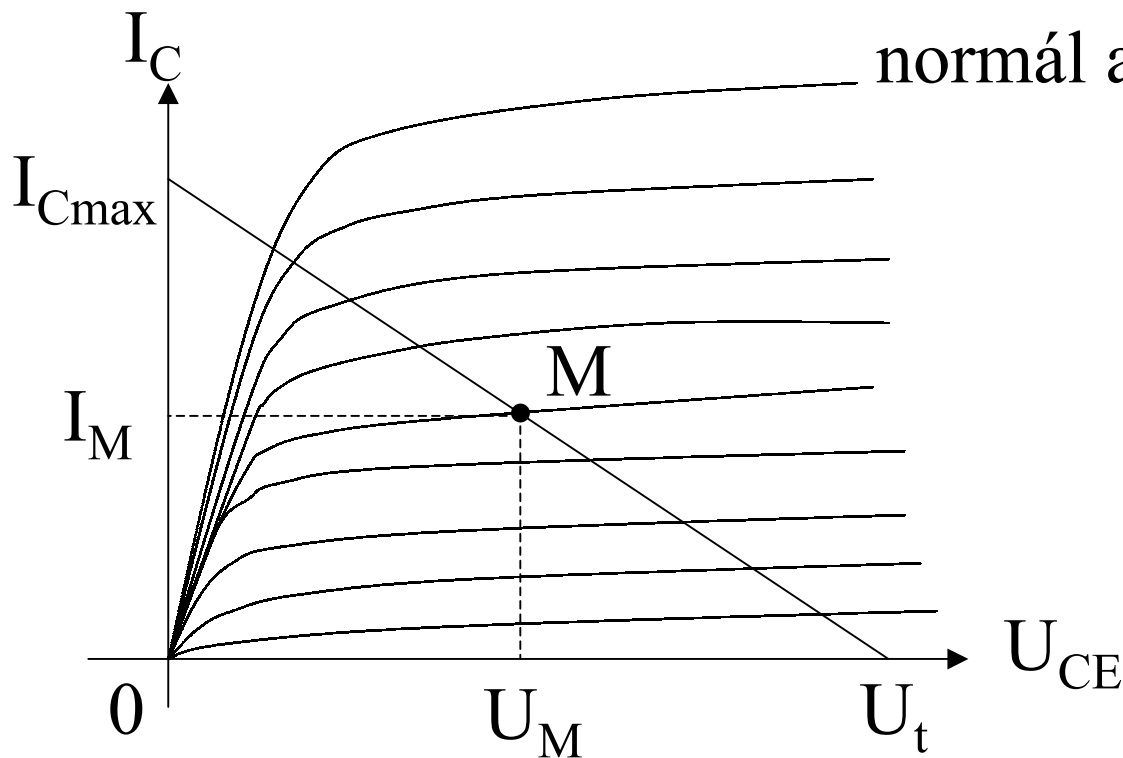
Teljesítmény félvezető eszközök

PSD=Power Semiconductor Device

- ✦ Transistor (Trans-fer Re-sistor) = tranzisztor
 - BJT = Bipolar Junction Transistor
 - FET = Field Effect Transistor
 - MOSFET = Metal Oxid Semiconductor FET
 - IGBT = Insulated Gate Bipolar Transistor
 - SIT = Static Induction Transistor
- ✦ PIC = Power Integrated Circuit
 - Power Modules, Intelligent Modules, Smart Power

Teljesítmény félvezető eszközök üzemmódja

Kis teljesítmény esetén: lineáris üzemmód a normál aktív tartományban

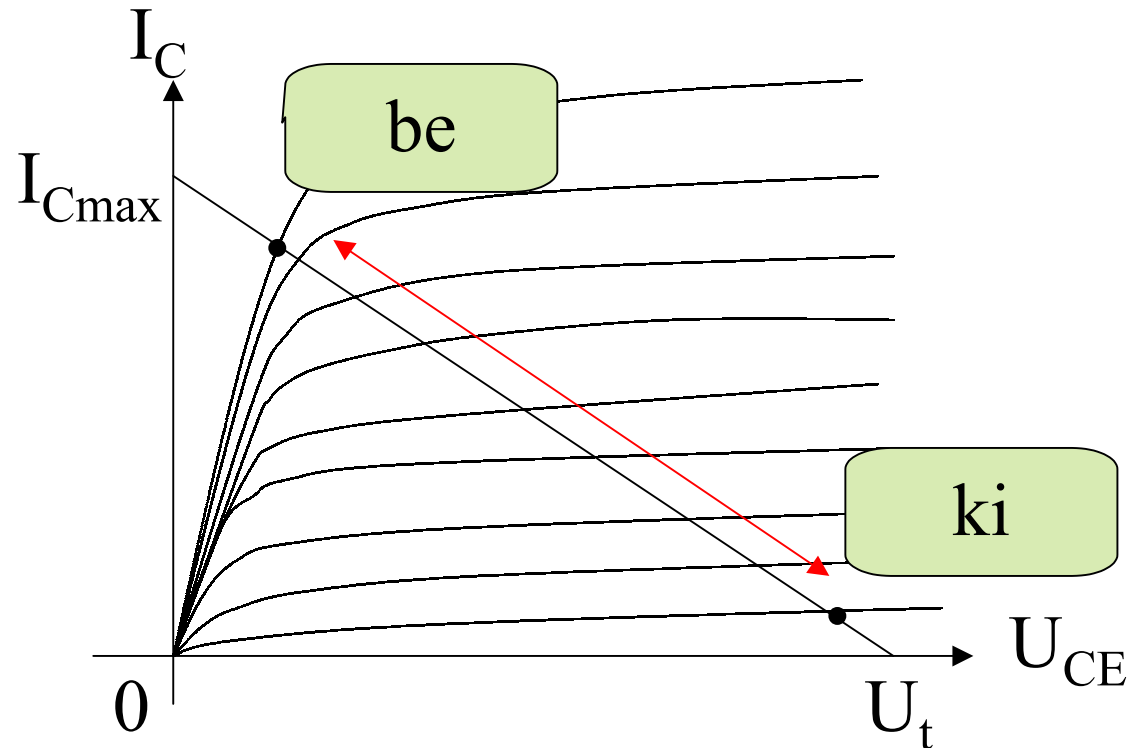


$$P = U_M I_M$$

állandó veszteség => hő => hűtés

Teljesítmény félvezető eszközök üzemmódja

Nagy teljesítmény esetén: kapcsolásos üzemmód

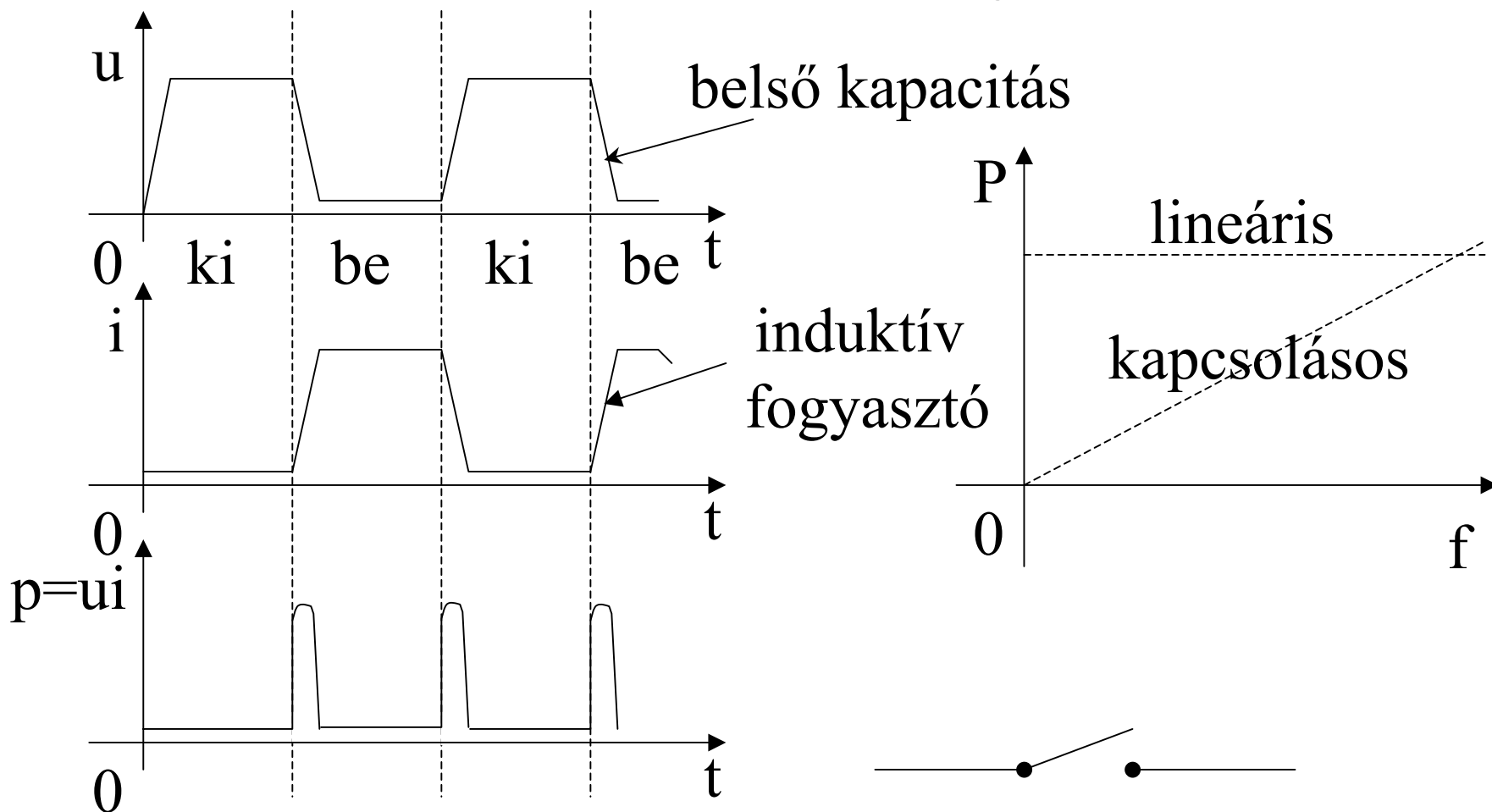


Ki: $I=0$

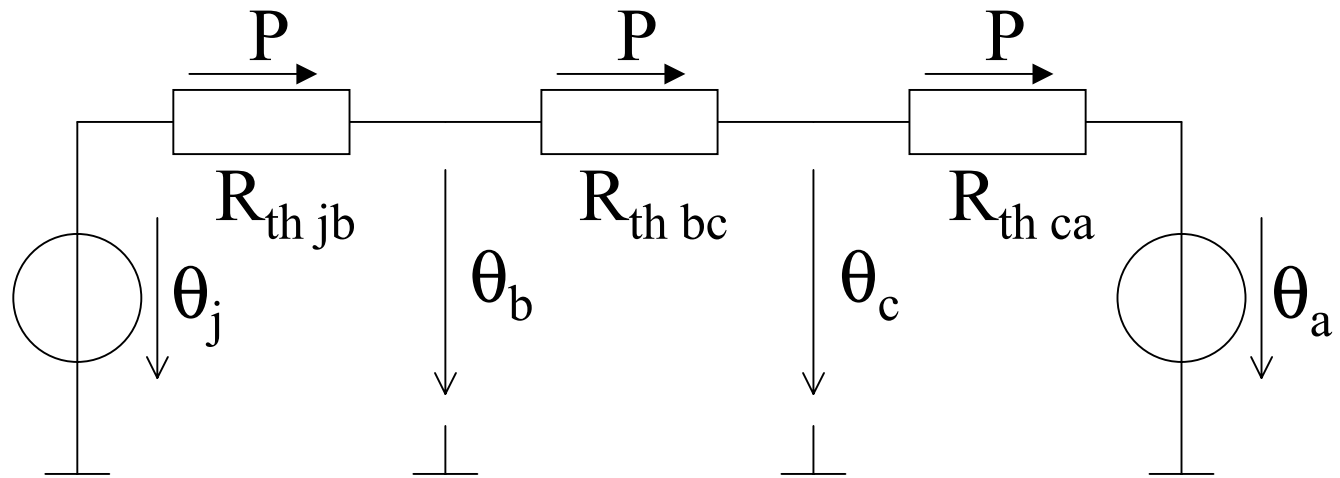
Be: $U=0$

$P = UI = 0 ?$

Teljesítmény félvezető eszközök üzemmmódja



Teljesítmény félvezető eszközök hűtése – hőtani modell



θ_j = p-n átmenet hőmérséklete (j=junction)

θ_b = alap hőmérséklete (b=base)

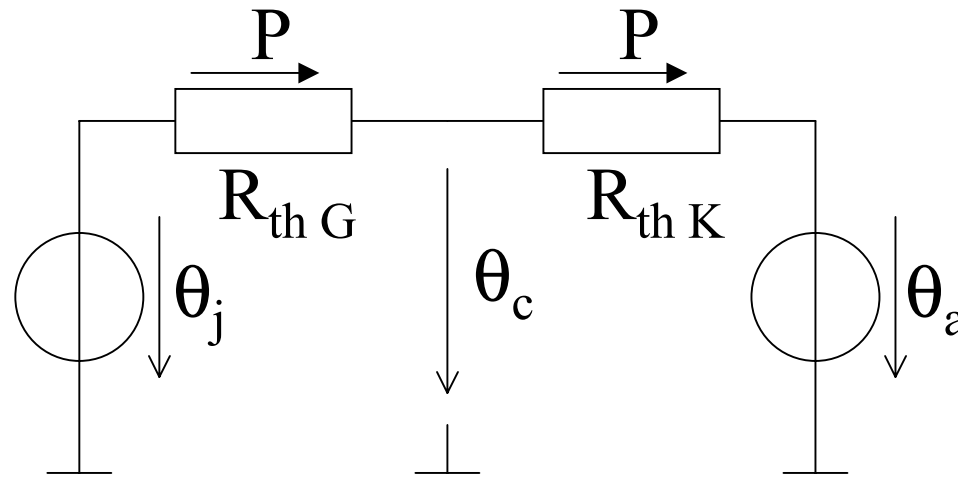
θ_c = tok hőmérséklete (c=case)

θ_a = környezet hőmérséklete (a=ambient)

R_{th} = hőellenállás (th=thermic)

P = hőteljesítmény

Teljesítmény félvezető eszközök hűtése – hőtani modell összevonása



θ_j = p-n átmenet hőmérséklete (j=junction)

θ_c = tok hőmérséklete (c=case)

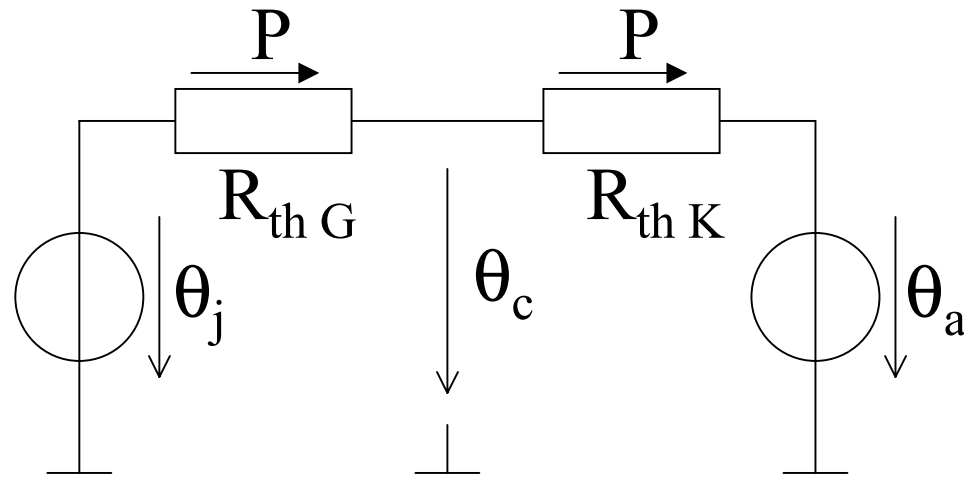
θ_a = környezet hőmérséklete (a=ambient)

$R_{th G}$ = saját belső hőellenállás

$R_{th K}$ = hűtőtök hőellenállása

P = hőteljesítmény

Teljesítmény félvezető eszközök hűtése – hőtani számolás



$$\theta_j - \theta_a = P(R_{thG} + R_{thK})$$

vagy

$$R_{thK} = \frac{\theta_j - \theta_a}{P} - R_{thG} \quad \left[\frac{K}{W} \right]$$

Teljesítmény félvezető eszközök hűtése – hűtőtönk választása

$R_{th K}$ fekete eloxált felületre vonatkozik

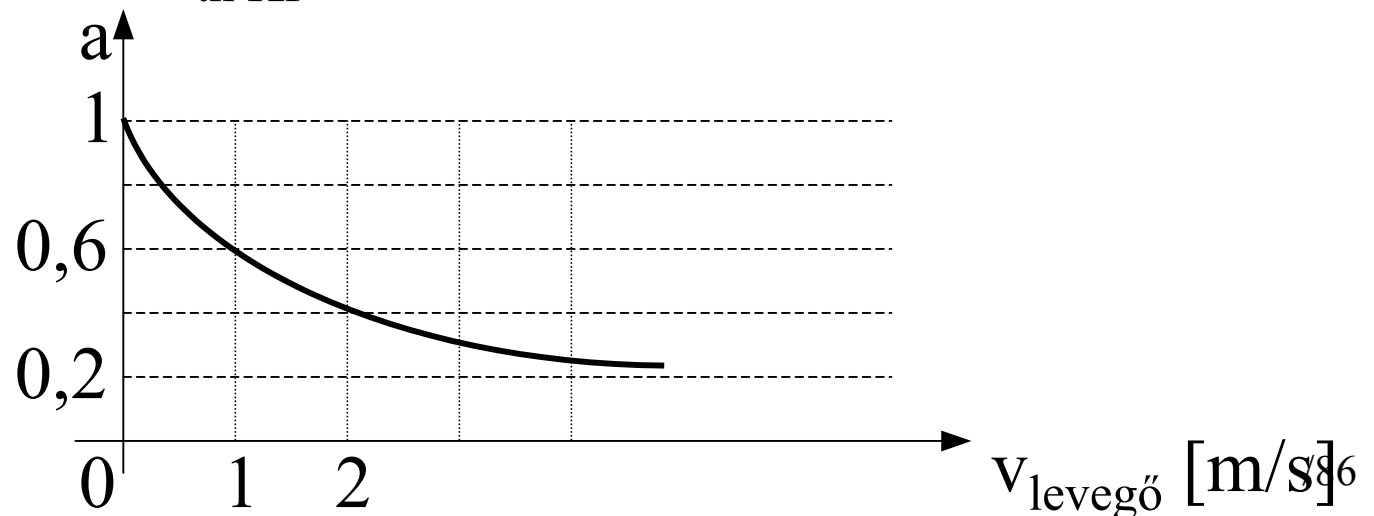
sima felület: +10%

vízszintes elhelyezés: +20%

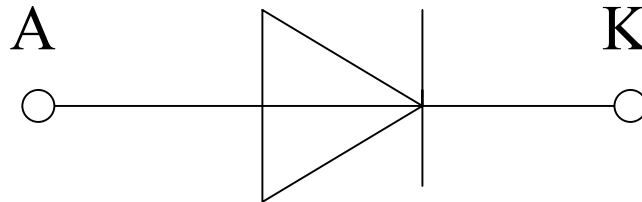
$$R_{th Kf} = a R_{th K}$$

$R_{th K}$ természetes hűtés

$R_{th Kf}$ mesterséges hűtés (ventillátor)



1. Teljesítmény dióda



önkéntes határ: $U_R \geq 250 \text{ V}$, $I_F \geq 1 \text{ A}$

R = reverse, F = forward

1.1. Bekapcsolási idő

forward recovery vagy turn-on time

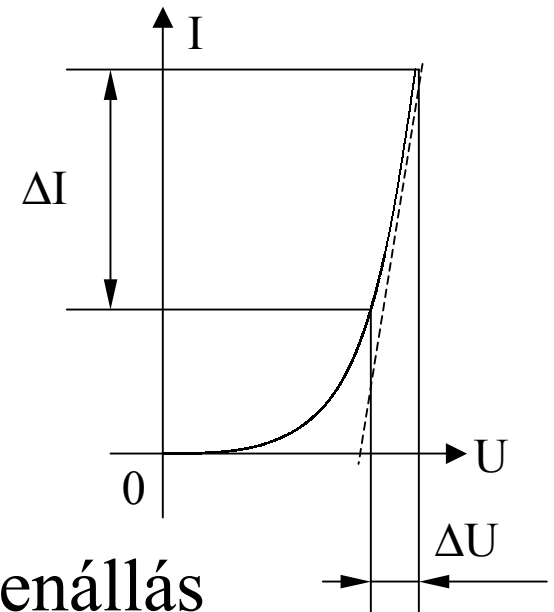
-ameddig az összes töltéshordozó el kezd vezetni
(kisebbségi)

Bekapcsolási időállandó:

$$T_{FR} = r_d C_D \cong (1 \dots 100) \mu s$$

r_d = vezető irányú dinamikus ellenállás

C_D = diffúziós kapacitás $\leq 100 \mu F$



$$r_d = \Delta U / \Delta I$$

$$r_d = dU/dI$$

1.2. Kikapcsolási idő

reverse recovery time = t_{rr}

- visszatérési vagy szabaddáválási vagy tárolási idő

ameddig az összes (kisebbségi) töltéshordozó visszatér és a pn átmenet visszanyeri záróképeségét

$$t_{rr} = t_a + t_b$$

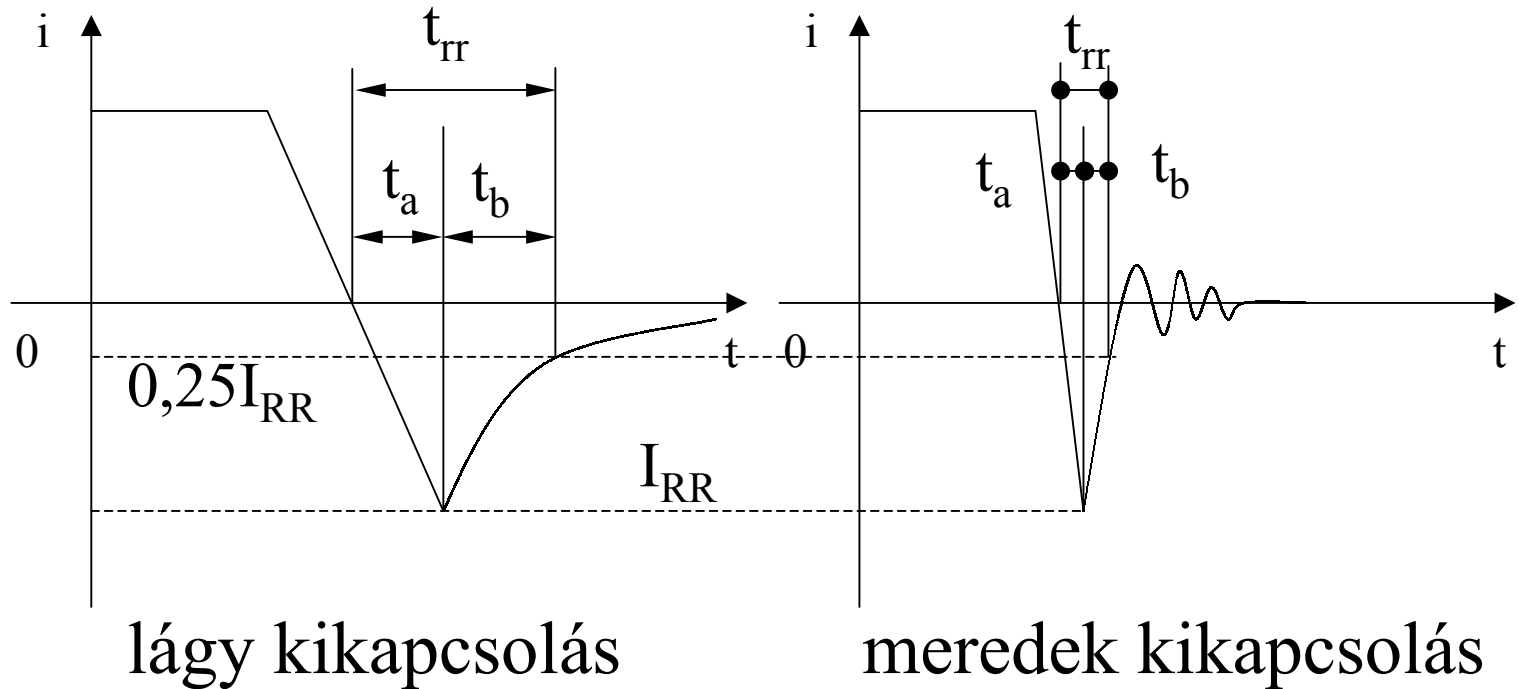
t_a = pn átmenetben tárolt kisebbségi töltéshordozók

t_b = a félvezető tömegében tárolt kisebbségi töltéshordozók

1.2. Felszabadulási idő jellemzői

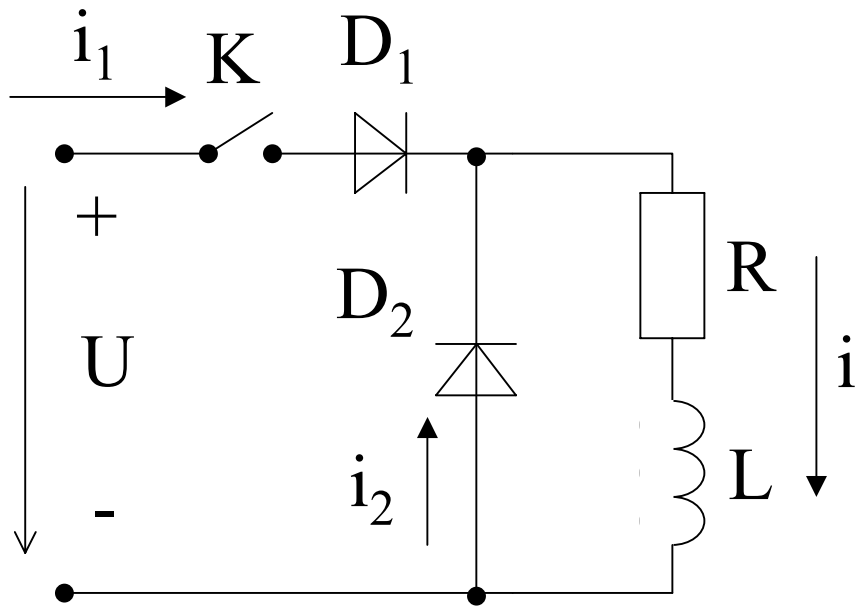
$$t_{rr} = f(I_F, di/dt, \vartheta^{\circ}\text{C}, \dots)$$

lágysági tényező: $SF = t_b/t_a$

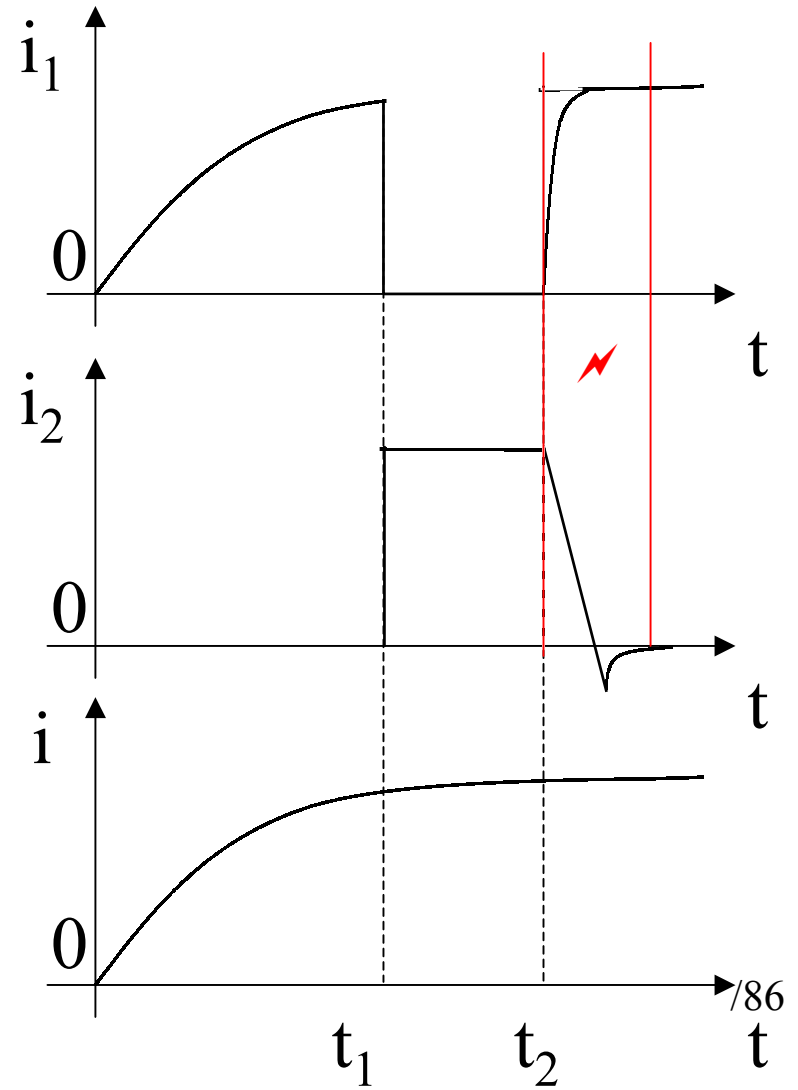


I_{RR} = felszabadulási áram

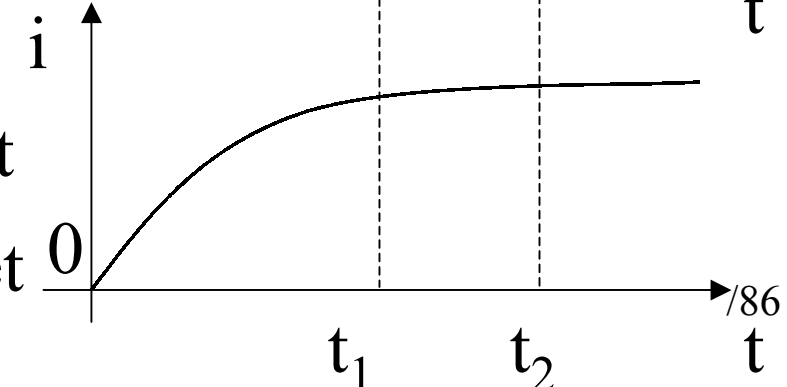
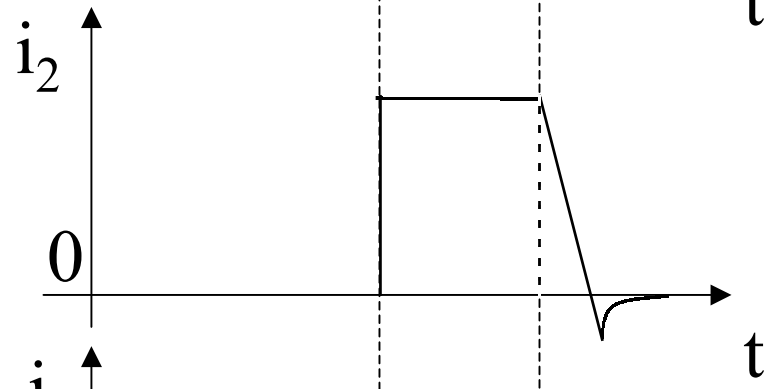
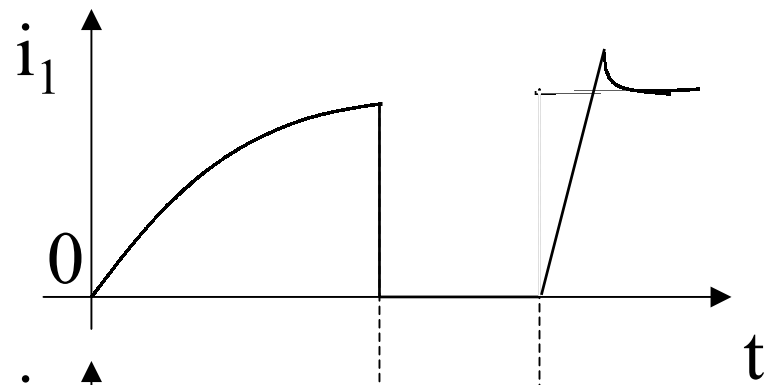
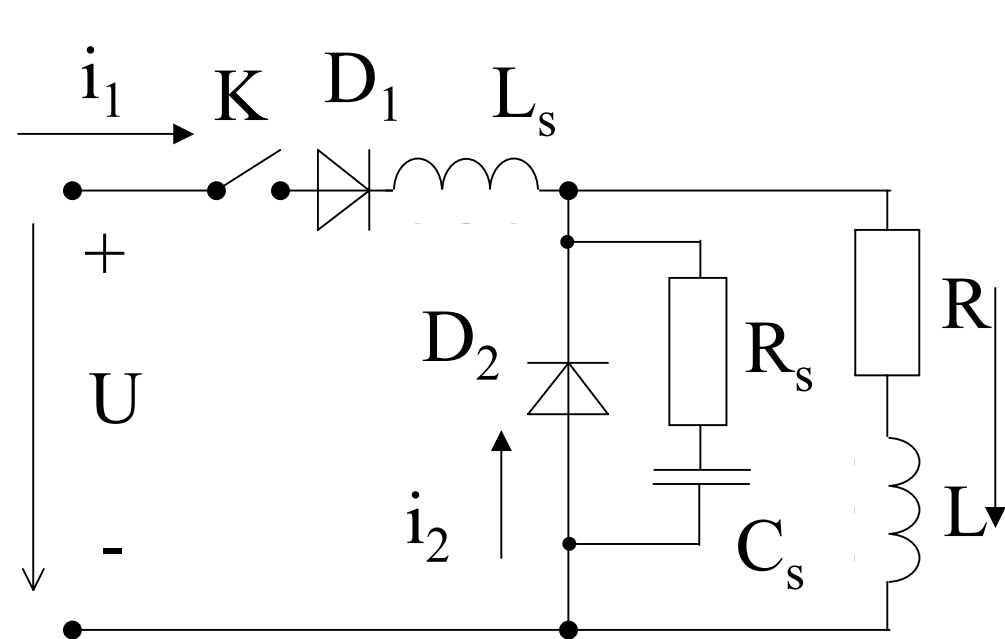
1.3. Bekapcsolási és felszabadulási idő hatása



rövidzár



1.3. Bekapcsolási és felszabadulási idő hatásának kiküszöbölése

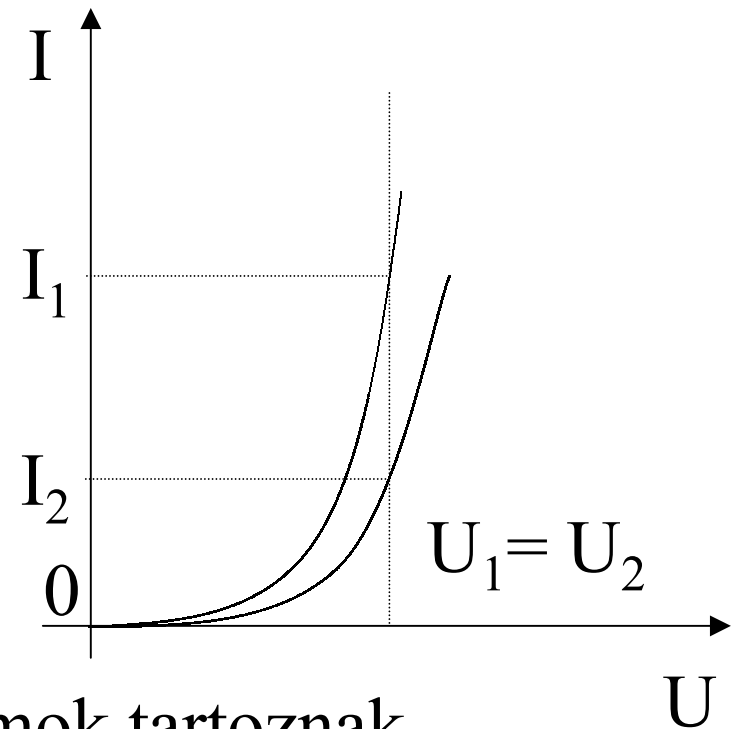
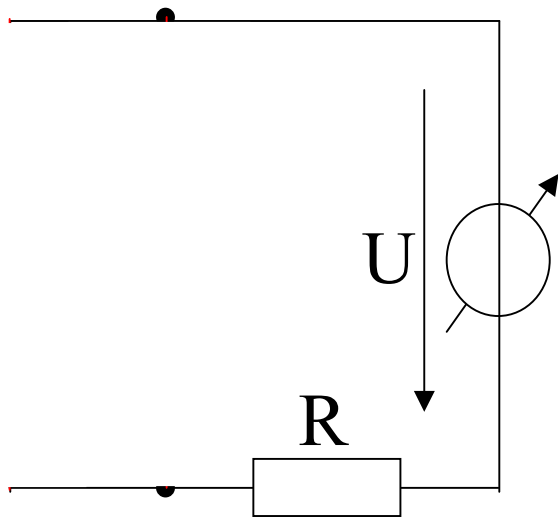


L_s csökkenti di/dt -t

C_s átveszi az L_s -ben tárolt energiát

R_s csillapítja a létrejövő rezgéseket

1.4. Párhuzamosan kapcsolt diódák



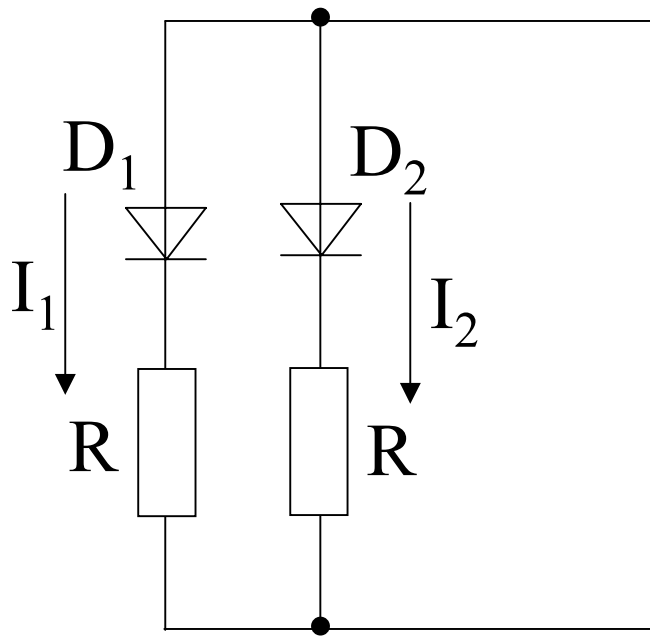
szórás => különböző karakterisztikák

ugyan ahhoz a feszültséghez más áramok tartoznak

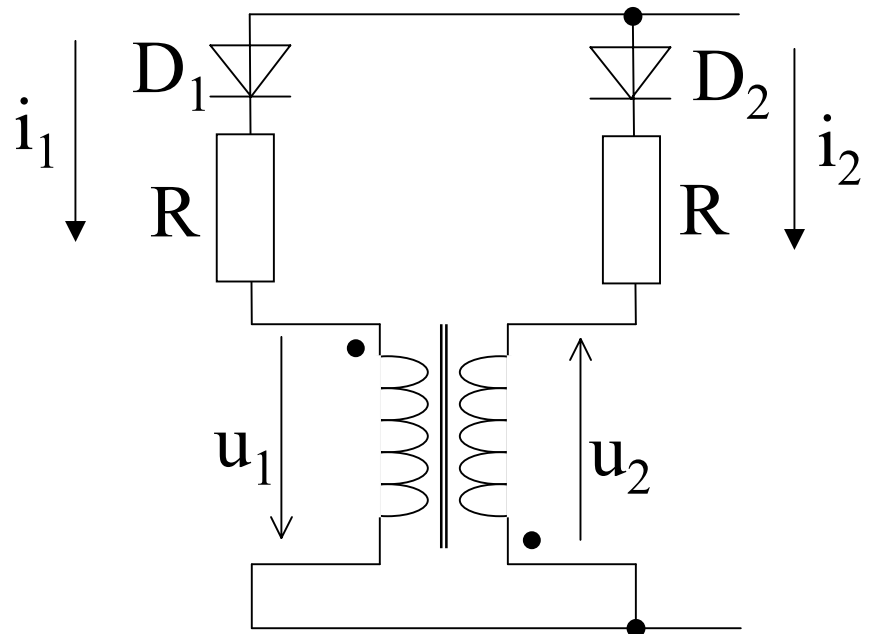
$P_1 = U_1 I_1 > P_2 = U_2 I_2 \Rightarrow D_1$ túl van terhelve \Rightarrow leég

D_2 veszi át a teljes áramot \Rightarrow az is leég₈₆

1.4. Megoldás a védelemhez



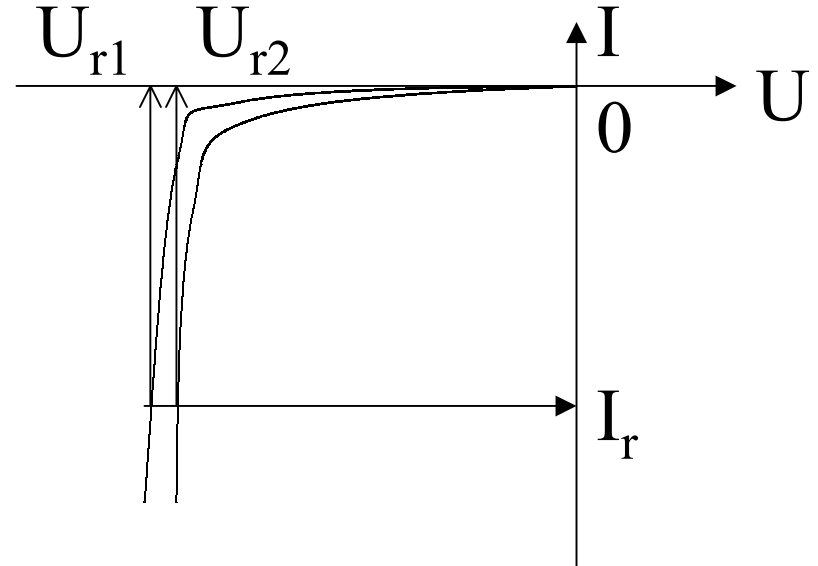
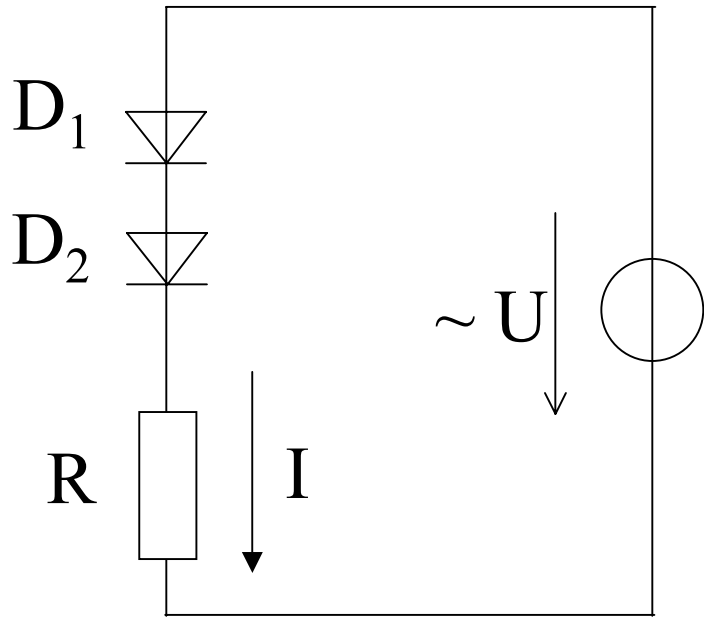
állandósult
állapotra



tranzien
állapotra

$$\begin{aligned}
 i_1 \uparrow &\Rightarrow di_1/dt \uparrow \Rightarrow u_1 \uparrow \Rightarrow U - u_1 \downarrow \Rightarrow i_1 \downarrow \\
 &\Rightarrow u_2 \uparrow \Rightarrow U + u_2 \uparrow \Rightarrow i_2 \uparrow \Rightarrow i_1 (= i - i_2) \downarrow
 \end{aligned}$$

1.5. Soroba kapcsolt diódák



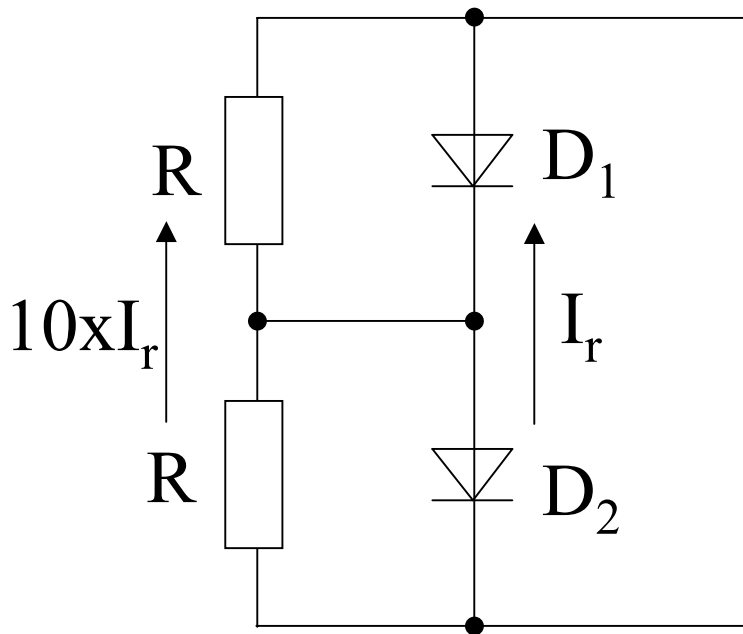
Ugyanaz a szivárgási áram

=> más zárófeszültségek

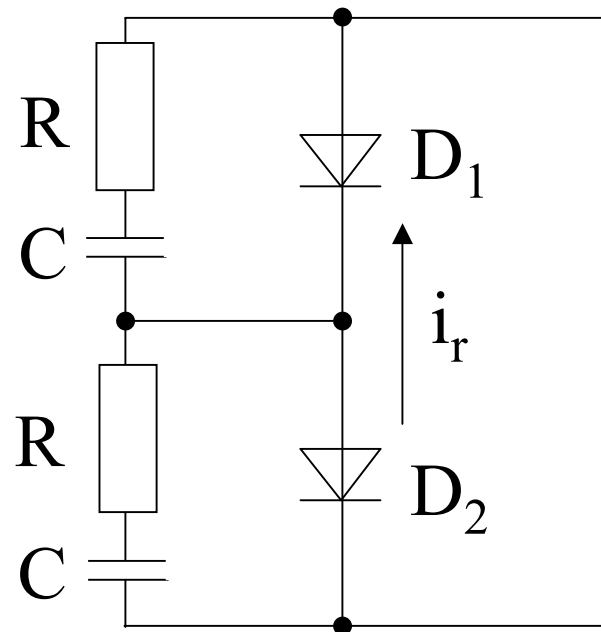
Különböző záróirányú
karakterisztikák

=> átüt vagy leég

1.5. Megoldás a védelemhez



Állandósult állapotra



Tranziens állapotra

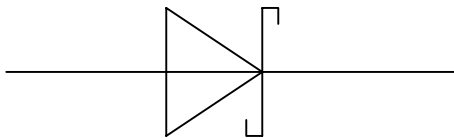
1.6. Dióda típusok

1. Általános rendeltetésű diódák $t_{rr}=(50\dots100) \mu s$
N (normal) $\sim \{50, 60\}$ Hz-es hálózat

2. Gyors diódák speciális eljárások $t_{rr}=(10\dots20) \mu s$
F (fast) különleges anyagok: Pt, Au
középfrekvencia, digitális rendszerek

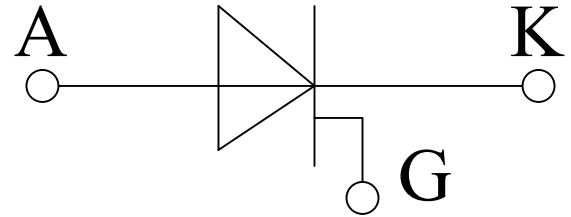
3. Schottky-diódák fém - Si (n típusú) $t_{rr}=100$ ps

kisebbségi töltéshordozók kiküszöbölve
még gyorsabb működés érhető el



detektorok

2. Tirisztor



Bekapcsolása:

hőmérséklet

=> nem kívánatos

fény

=> fényvezérelt: LTT

nagy feszültség

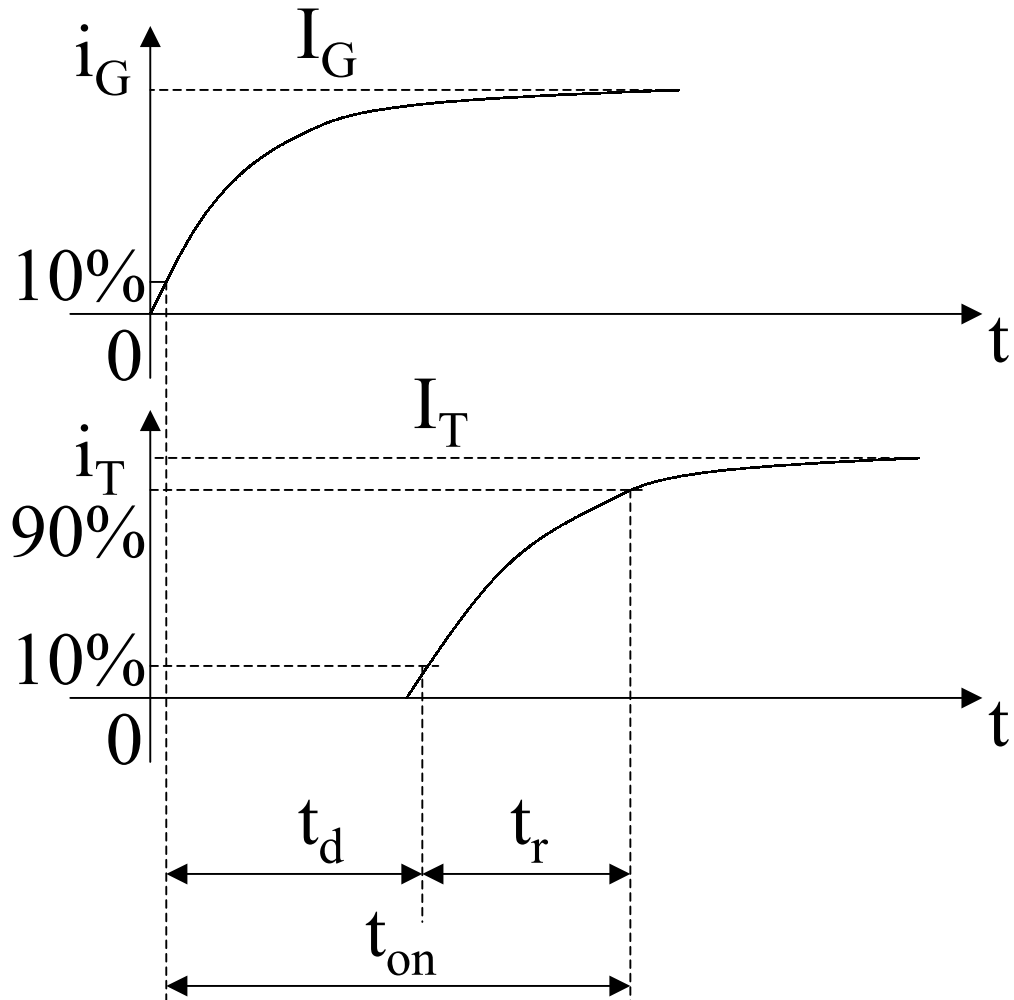
meredek feszültségnövekedés

} => tönkremehet

vezérlő elektródára kapcsolt áram

=> általános

2.1. Tirisztor bekapcsolási tranziense



t_d = delay time
késési idő

t_r = rise time
felfutási idő

t_{on} = turn on time
bekapcsolási idő

2.2. Tirisztor vezérlő árama

Gyújtó impulzusnak meglegyen a nagysága és időtartama a tartóáram kialakulásához

Tirisztor bekapcsolása után a vezérlőáramot megszüntetni (fölsleges veszteség)

Kikapcsolt tirisztoron ne legyen vezérlő jel (a szivárgási áram tönkreteszi)

2.3. Tirisztor kikapcsolódása

3 pn átmenet: 2 diódának megfelelő
1 ellentétes

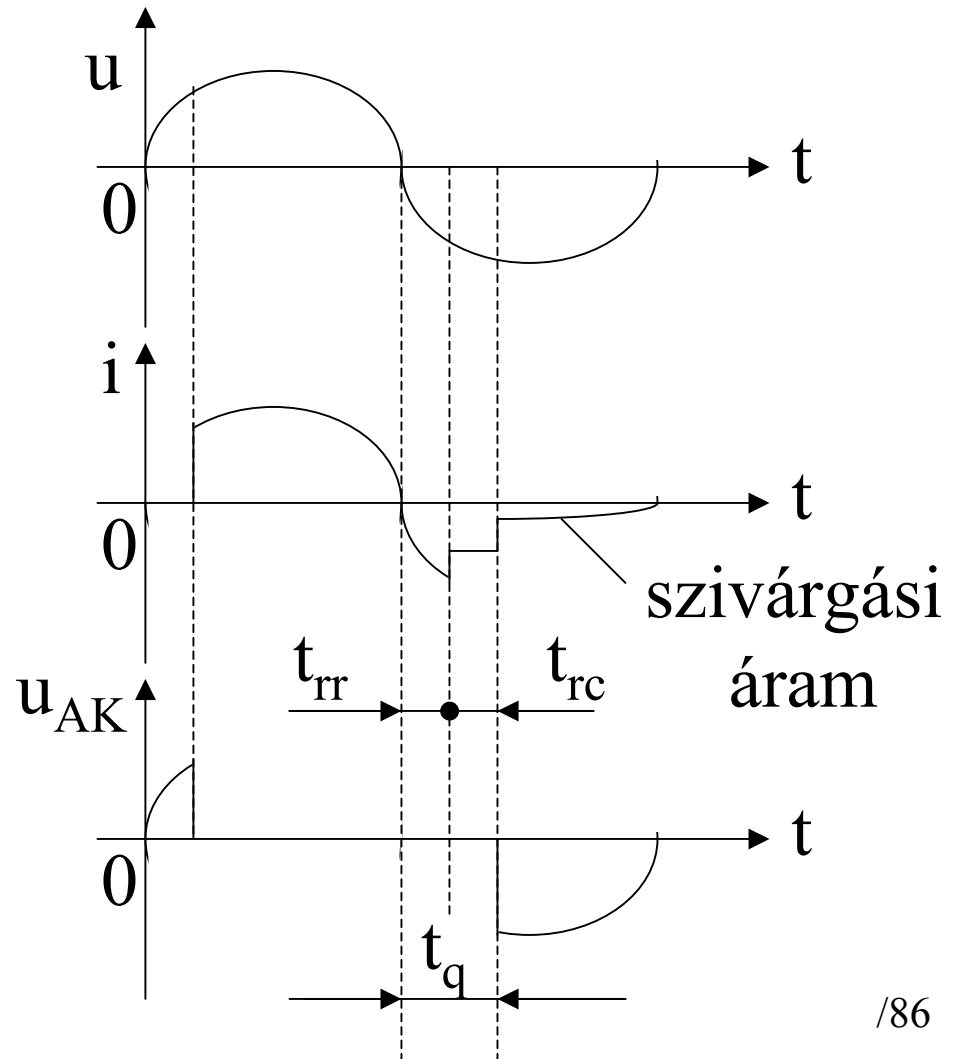
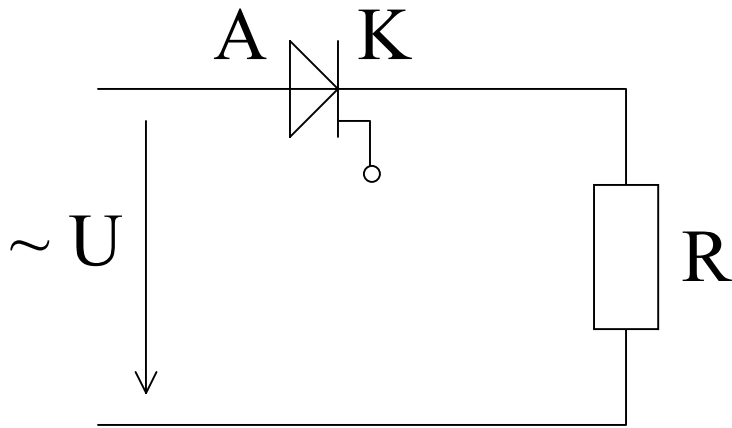
Diódának megfelelően $\Rightarrow t_{rr}$

Rekombinációs idő $\Rightarrow t_{rc}$

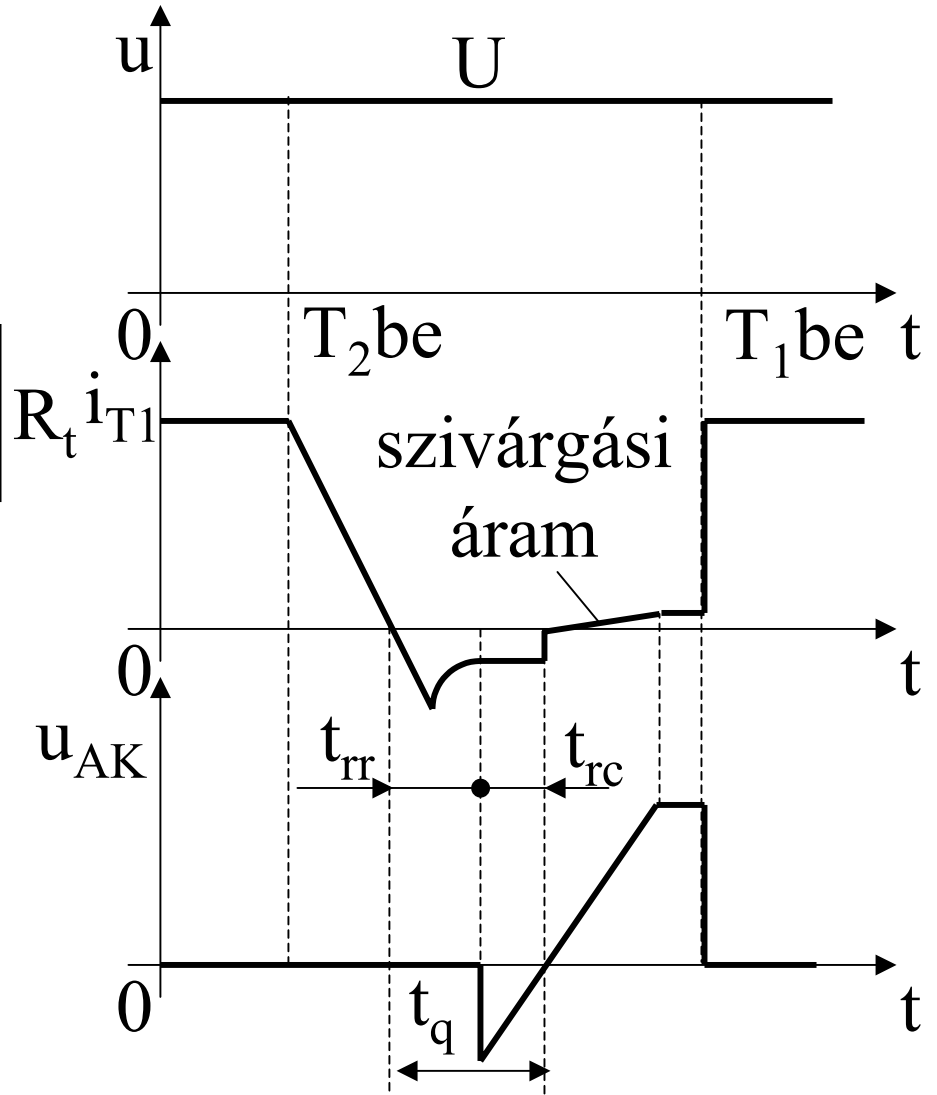
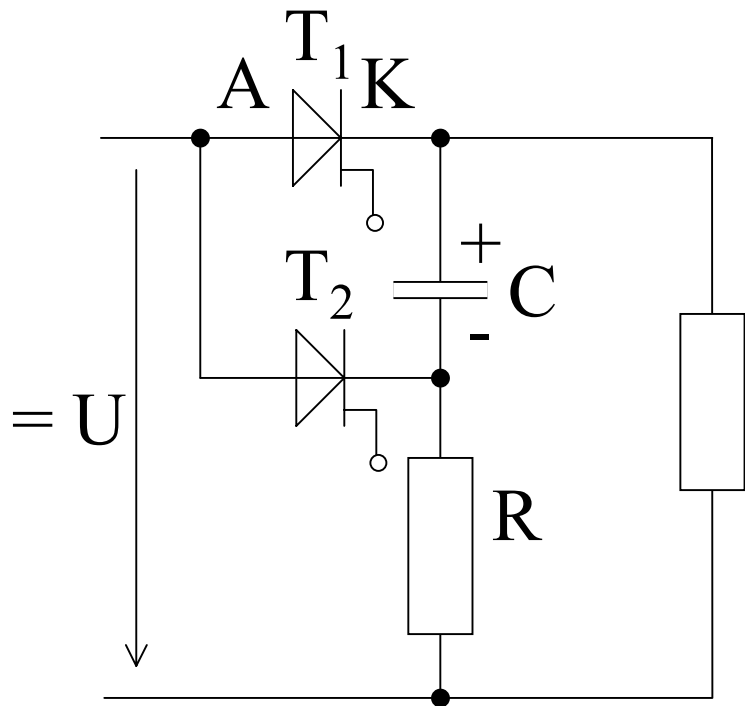
$t_q = t_{rr} + t_{rc}$ kikapcsolási idő

$$t_q = f(i_T, u_T)$$

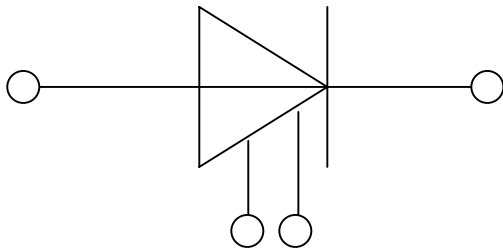
2.4. Tirisztor hálózati kommutációja



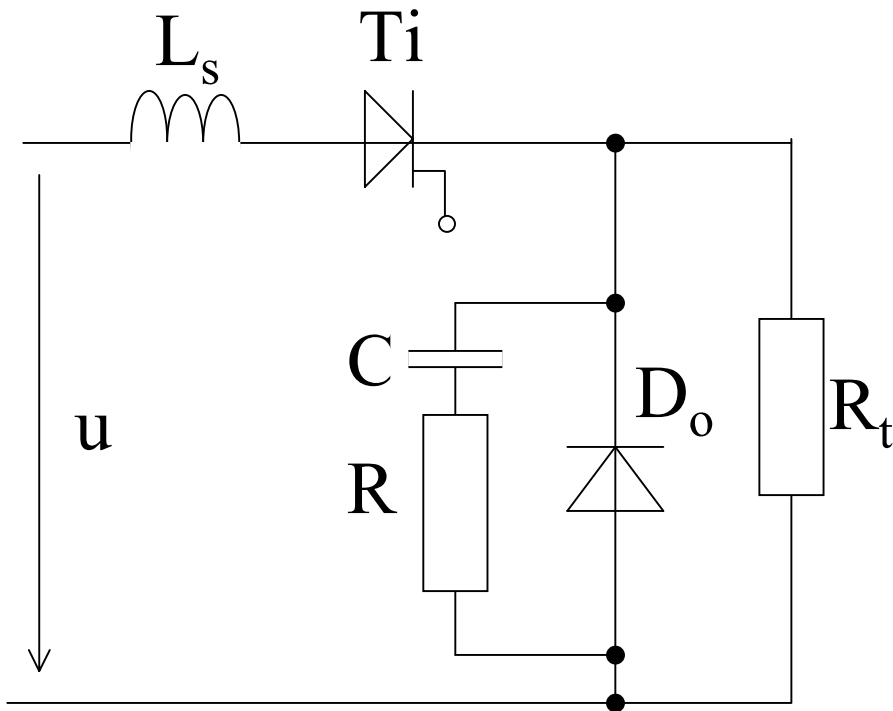
2.5. Tirisztor kényszer kommutációja



oltóköros tirisztor:

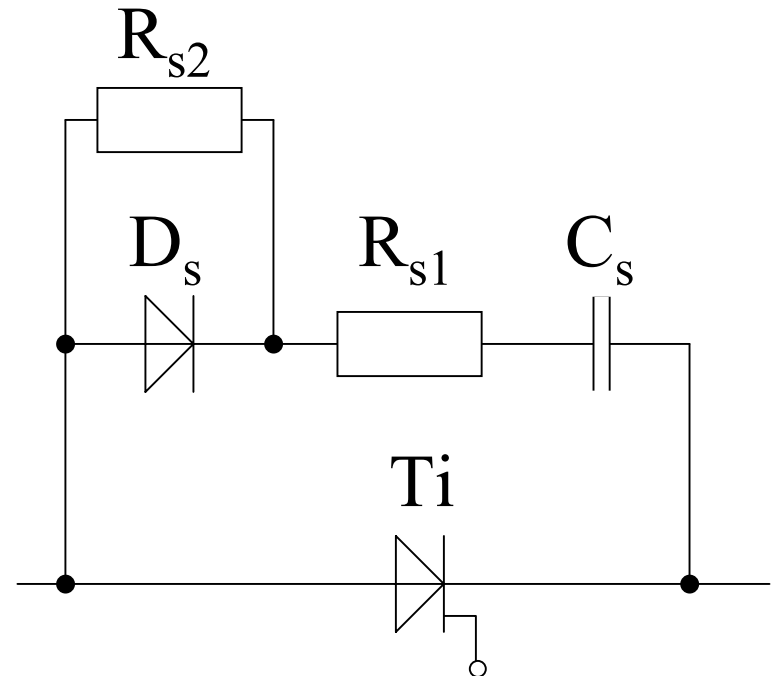


2.6. Tirisztor védelem



di/dt védelem

\Rightarrow soros L_s



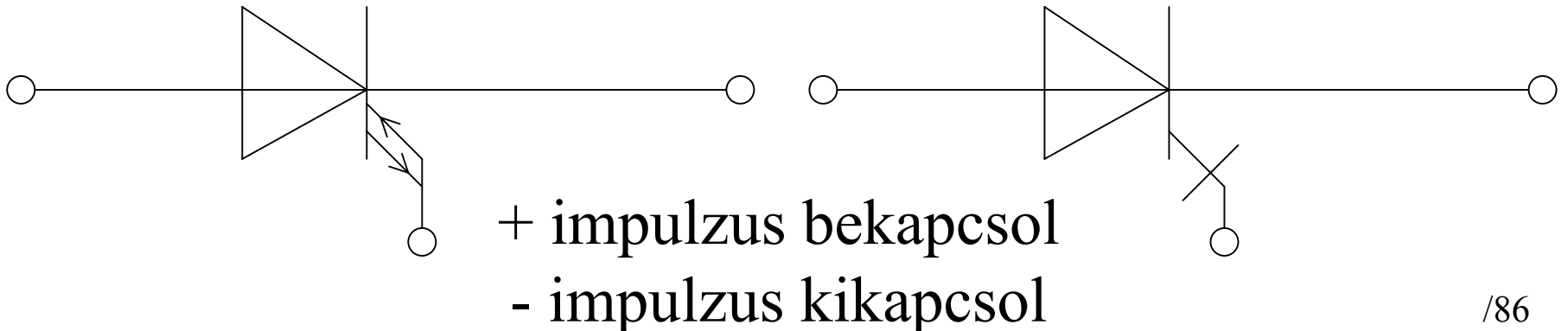
du/dt védelem

\Rightarrow párhuzamos C_s

s = snubber

2.7. Tirisztor típusok

1. Általános tirisztor: N (normal) $t_q = (100...200) \mu s$
 $\sim \{50, 60\}$ Hz hálózat
2. Gyors tirisztor: F (flick) $t_q = (20...60) \mu s$
kényszerkommutációs, középfrekvenciás áramkör, inverter
3. GTO = Gate Turn-Off => kikapcsolható tirisztor



2.7.1. GTO / Tirisztor

Előnye a tirisztorral szemben:

nem kell kényszerkommutáció

=> nincs szükség további alkatrészekre

kisebb elektromágneses (EM) zavarok

gyorsabb kikapcsolás $t_q = (5...10) \mu s$ => nő a hatásfok

Hátránya tirisztorral szemben:

nagyobb feszültségesés vezetéskor

2.7.2. GTO / Tranzisztor

Előnye a tranzisztorral szemben:

nagyobb zárófeszültség

nagyobb csúcsáram

rövid vezérlő impulzus

nagy bekapcsolási erősítés

$$\frac{\text{anódáram}}{\text{vezérlőáram}} = 600$$

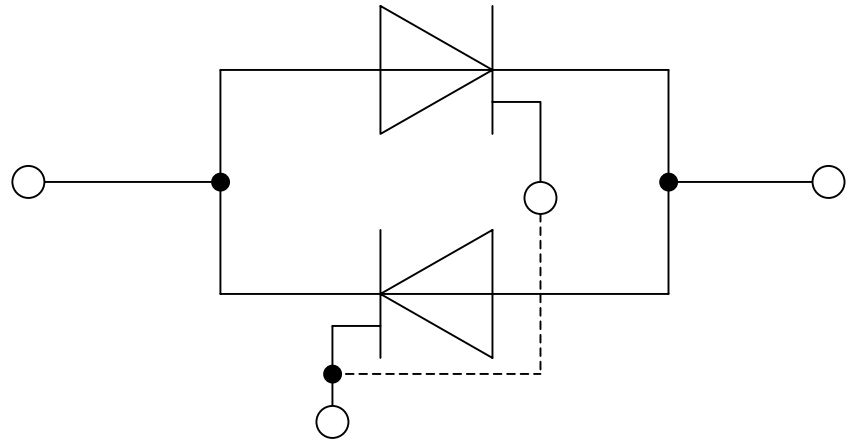
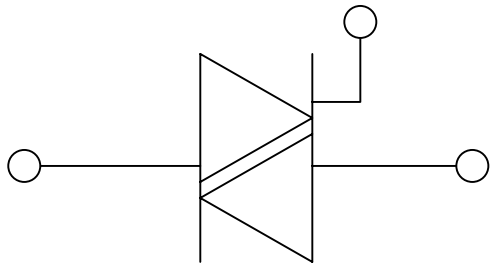
Hátránya tranzisztorral szemben:

kis kikapcsolási erősítés

hajlamos a telítődésre

$$\frac{\text{anódáram}}{\text{vezérlőáram}} = 6$$

2.7.3. Triak - TRIAC - szimisztor



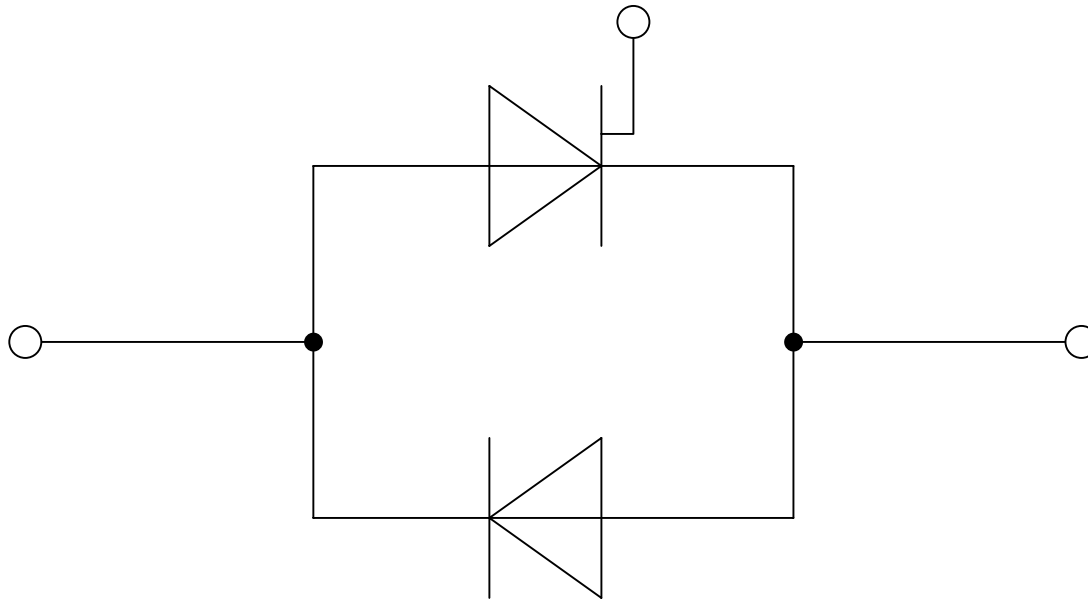
nincs kijelölt A és K két ellenpárhuzamos tirisztor

+ és – impulzussal is bekapcsolható,
polaritás függvényében

2.7.4. RCT

RCT – Reverse Conducting Thyristor

tirisztorral ellenpárhuzamosan kapcsolt dióda

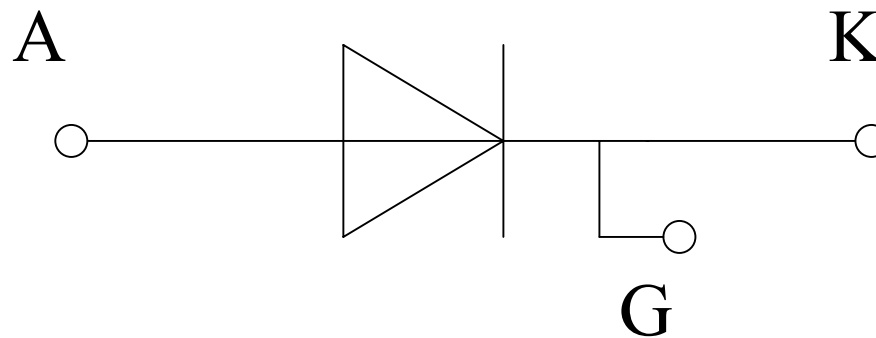


ASCR – Asymmetrical Silicon Controlled Rectifier

2.7.5. SITH – Static Induction Thyristor

MOSFET-hez hasonló

kisebbségi töltéshordozóra alapuló eszköz



+ impulzus bekapcsol

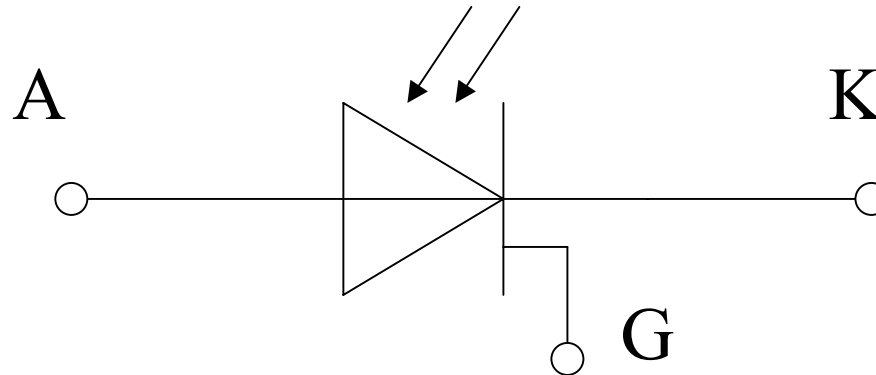
- impulzus kikapcsol

nagyon érzékeny a gyártási technológiára

2.7.6. LTT - LASCR

Light Triggered Thyristor

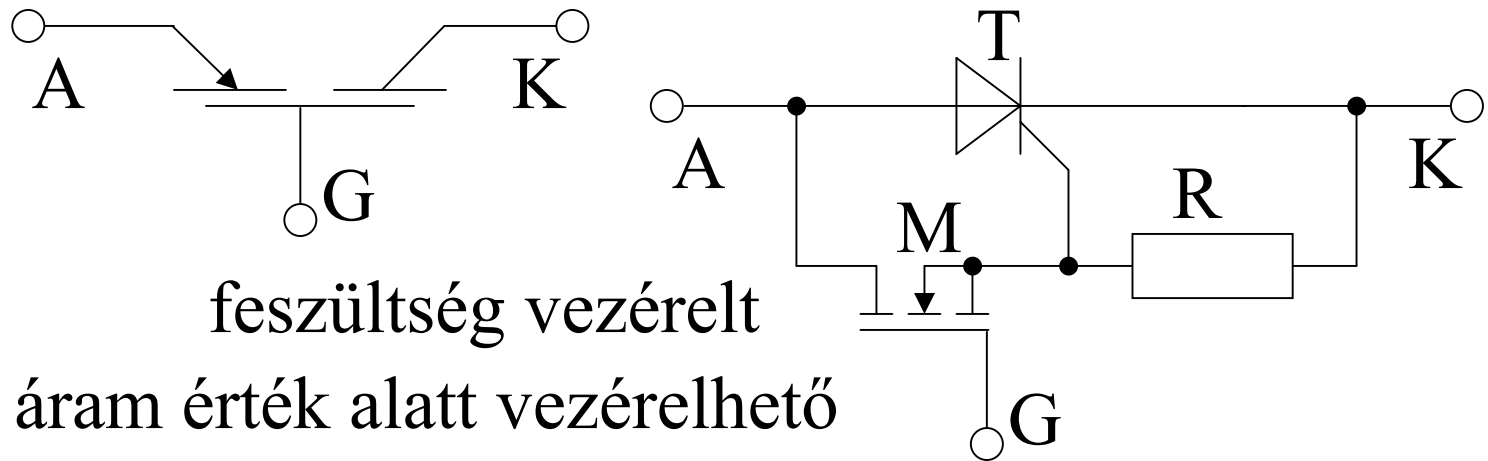
Light Activated Silicon Controlled Rectifier



villamos vagy galvanikus leválasztás

nagy feszültség, nagy áram alkalmazása esetén

2.7.7. MCT – MOSFET Controlled Thyristor



csak adott áram érték alatt vezérelhető

ennél nagyobb áram kikapcsolása esetén tönkremegy

=> hagyományos tirisztor kikapcsolást kell alkalmazni

kis áram esetén rövidebb vezérlőimpulzus is elégséges

nagy áram esetén hosszabb vezérlőimpulzus szükséges

inverteres vagy szaggató alkalmazásnál a teljes

be-/kikapcsolási időtartamra folyamatos vezérlőjel kívánatos

a bizonytalan állapotok kiküszöbölése érdekében

2.8. Tirisztorok gyújtása

galvanikus vagy villamos leválasztásra van szükség

optocsatoló

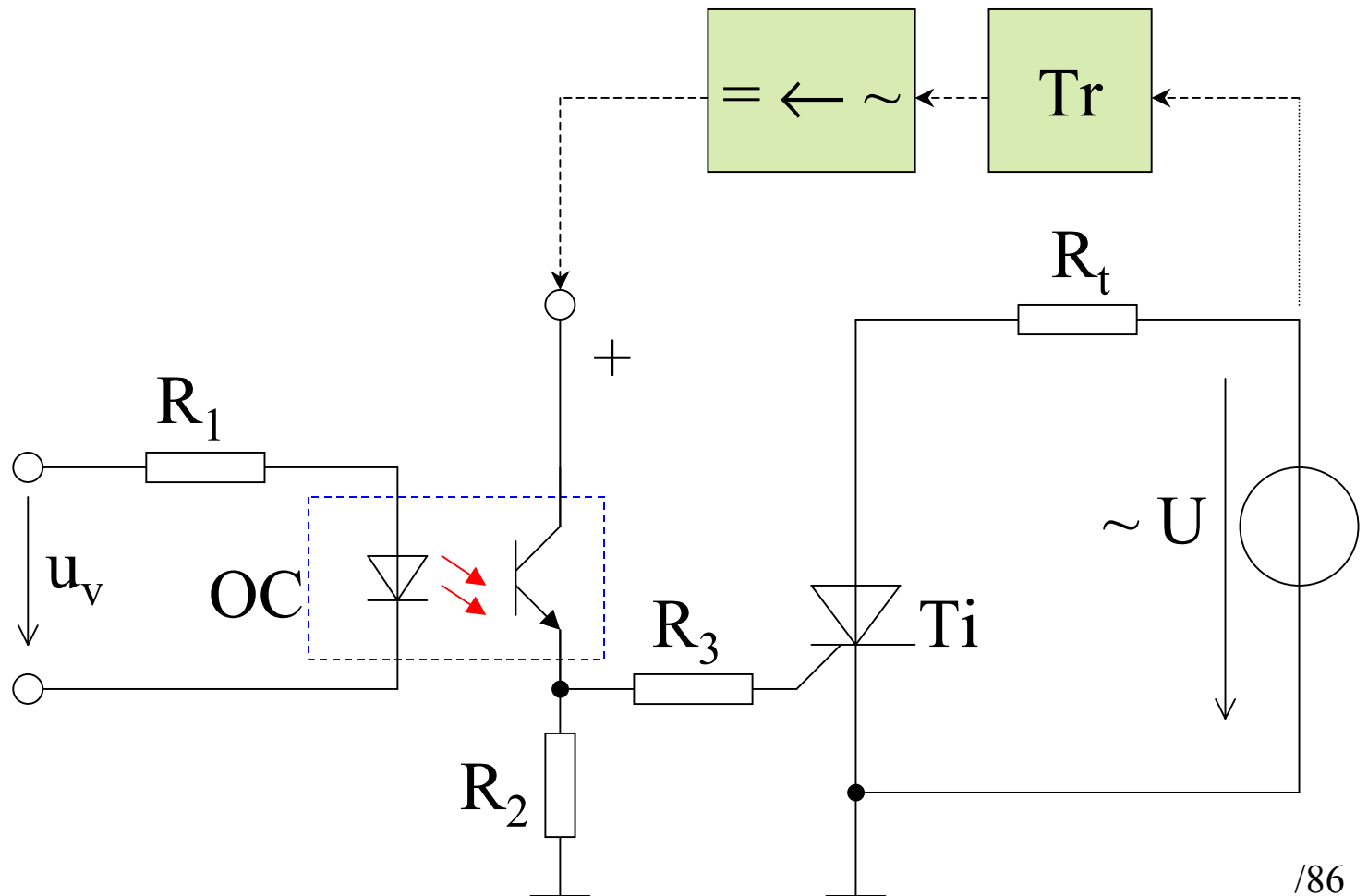
gyújtótranszformátor

Az optocsatoló LTT-vel váltható ki.

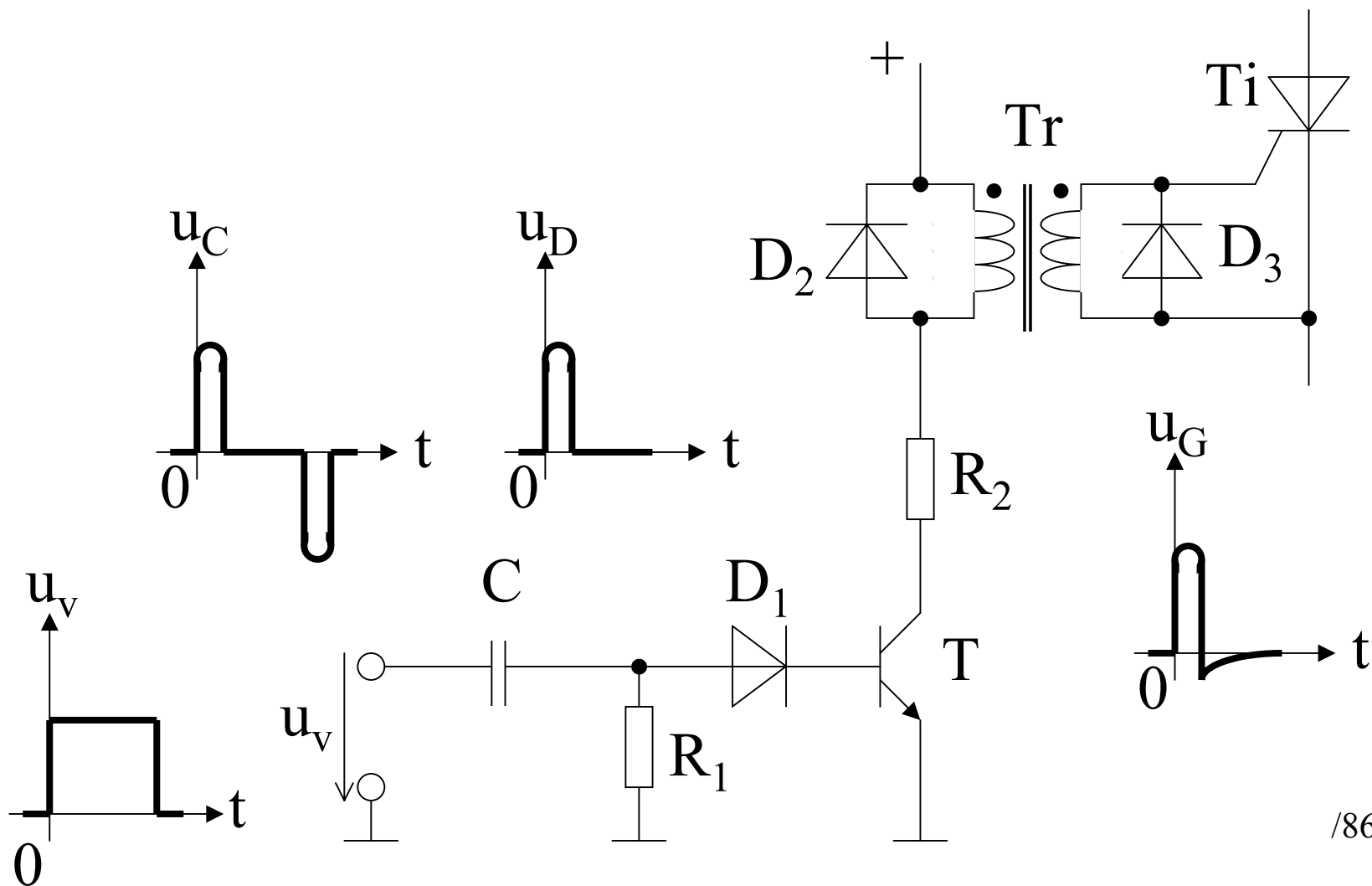
optocsatoló: LED + phototranzisztor

gyújtótranszformátor: speciális porvasmagos kivitel

2.8.1. Optocsatolós tirisztorgyűjtés



2.8.2. Transzformátoros tirisztorgyújtás



2.8.3. Transzformátoros tirisztorgyűjtás erősen induktív fogyasztó esetén

=> az áram lassan nő

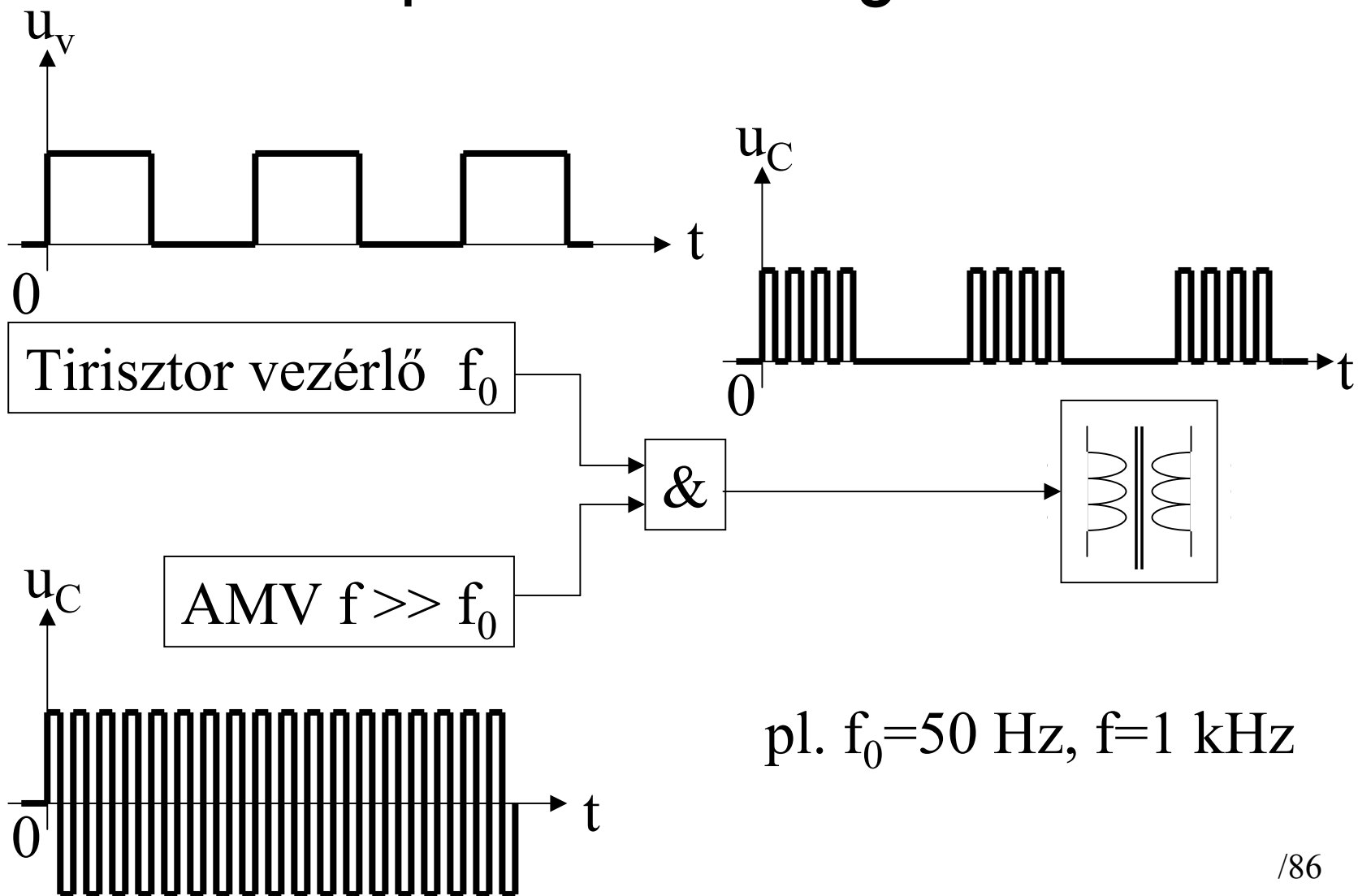
=> hosszú gyűjtőimpulzusra van szükség a tartóáram eléréséhez

=> nőnek a tirisztor veszteségei

A gyűjtőtranszformátor csak váltakozó jelet tud átvinni.

Megoldás: impulzuscsomag

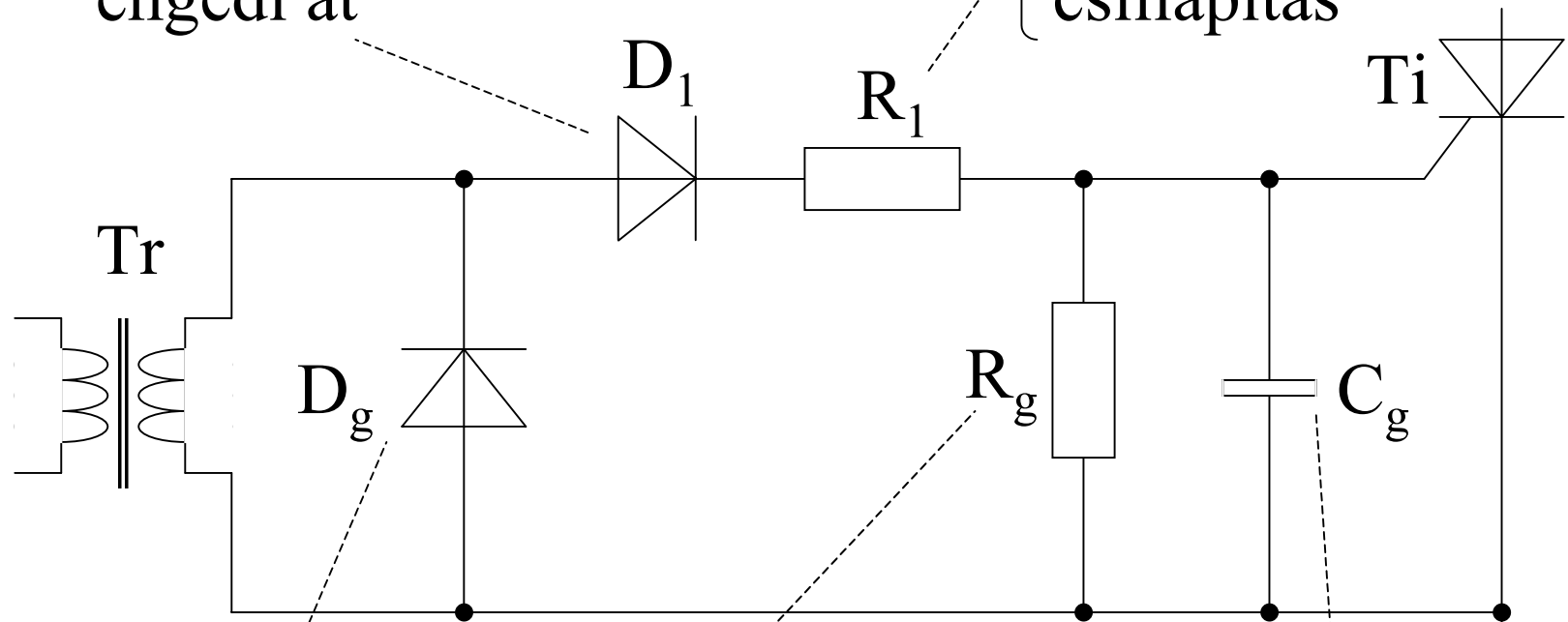
2.8.4. Impulzuscsomag előállítása



2.8.5. Vezérlőkör védelme

csak a „+” impulzust engedi át

áramkorlát csillapítás



kiküszöböli a „-” vezérlést

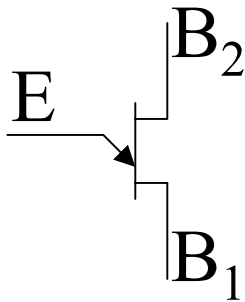
növeli du/dt bírást
csökkenti a t_q -t

növeli du/dt bírást
kiszűri a zavarjeleket
késleltetést hoz be

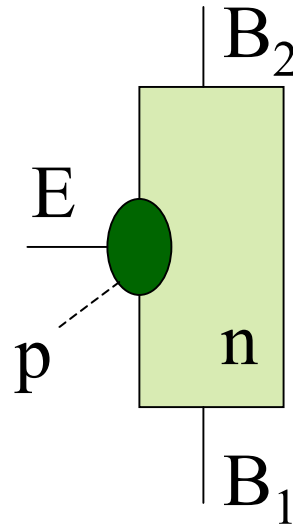
3. UJT – Unijunction Transistor

kétbázisú (egyréteg) tranzisztor
tirisztor gyújtójelének képzésére alkalmazzák

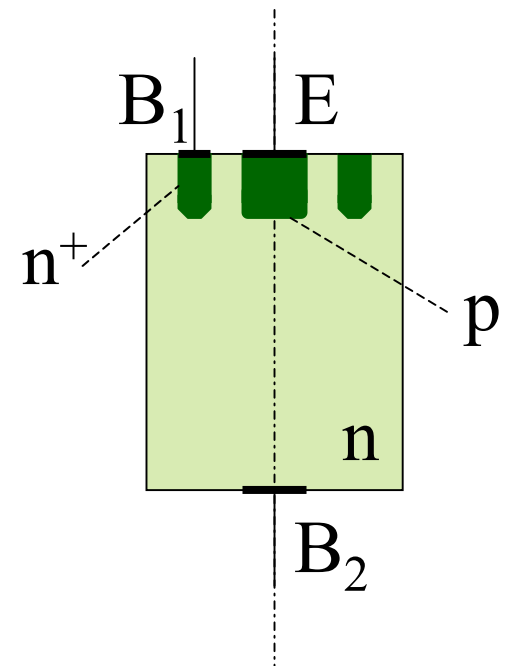
áramköri jelölés:



modell:



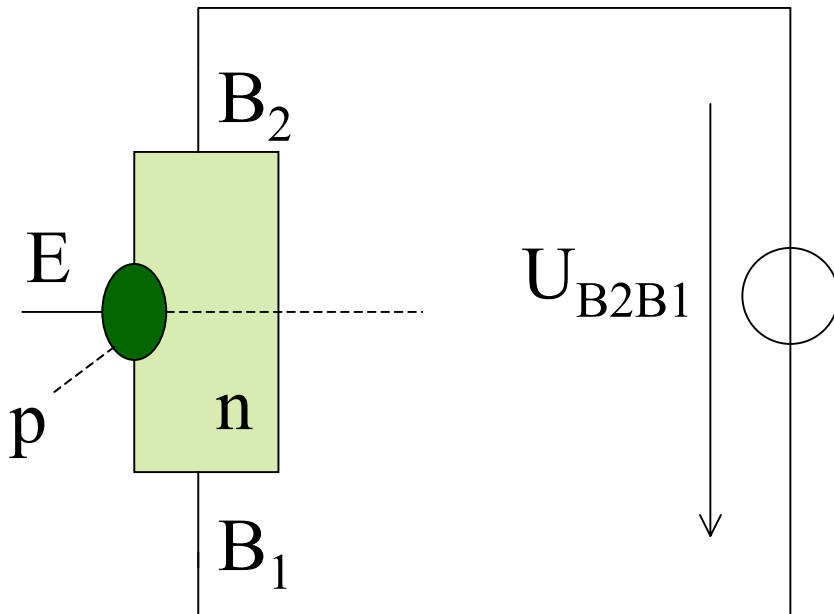
kivitelezés:



3.1. UJT – jellemzői

R_{BB} = interbázis ellenállás

η = intrinsic stand-off ratio, leosztási arány
vagy belső feszültségarány

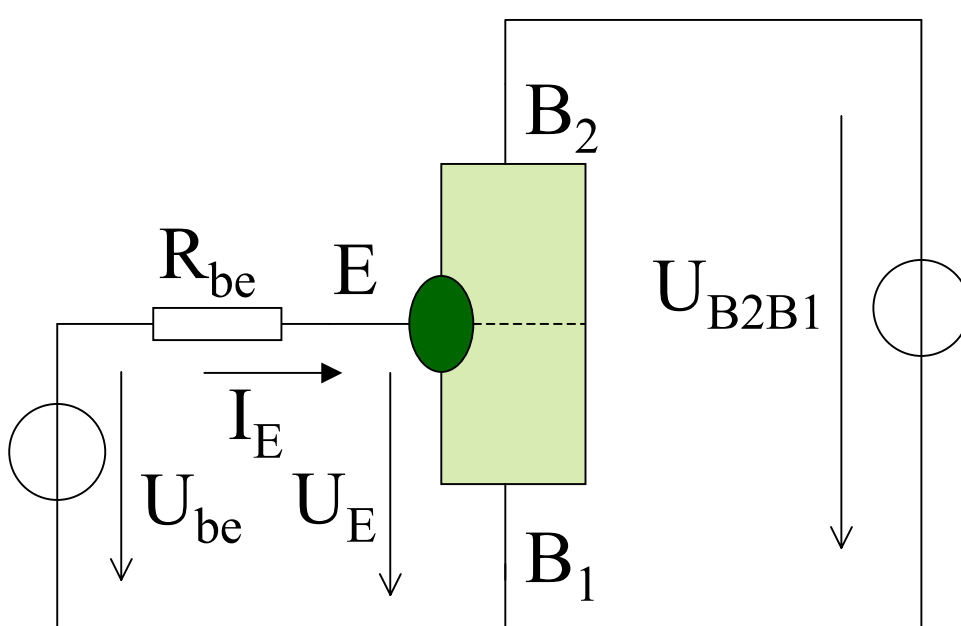


$$U_E = \eta U_{B2B1} + U_D$$

$$\eta = 0,47 \dots 0,82$$

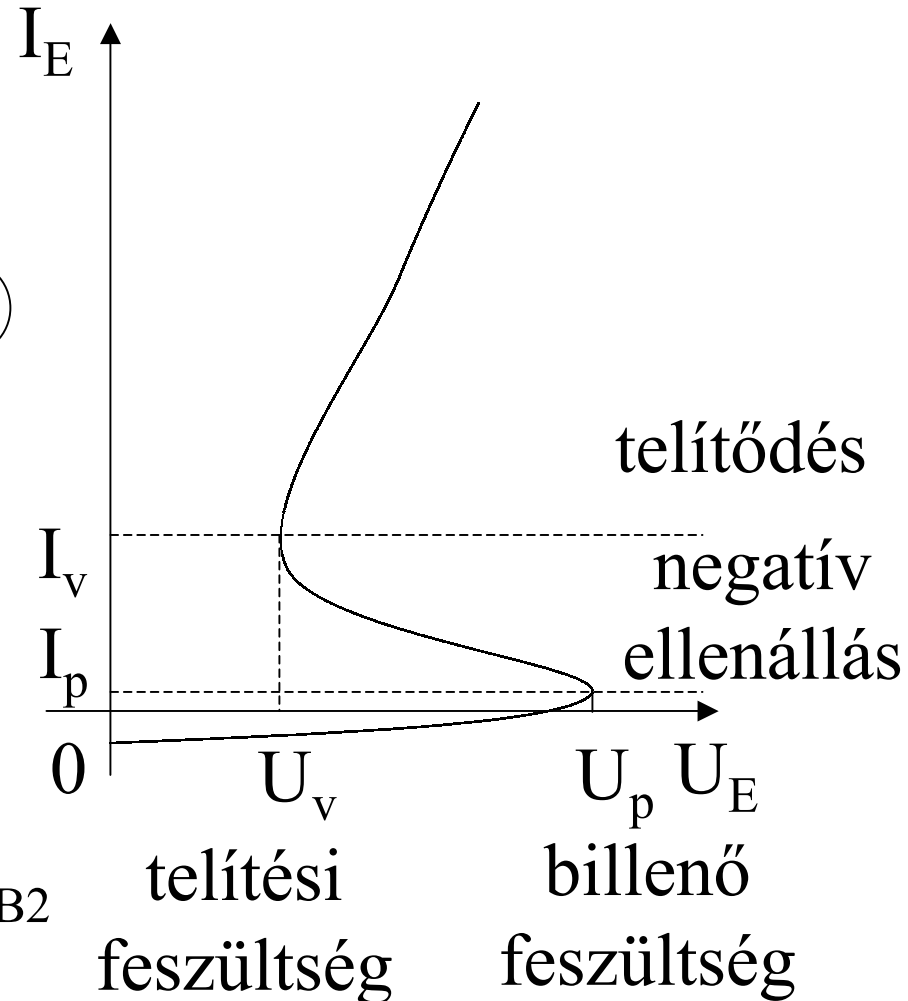
$$U_D = (0,6 \dots 0,7) \text{ V}$$

3.2. UJT – bemeneti karakterisztika

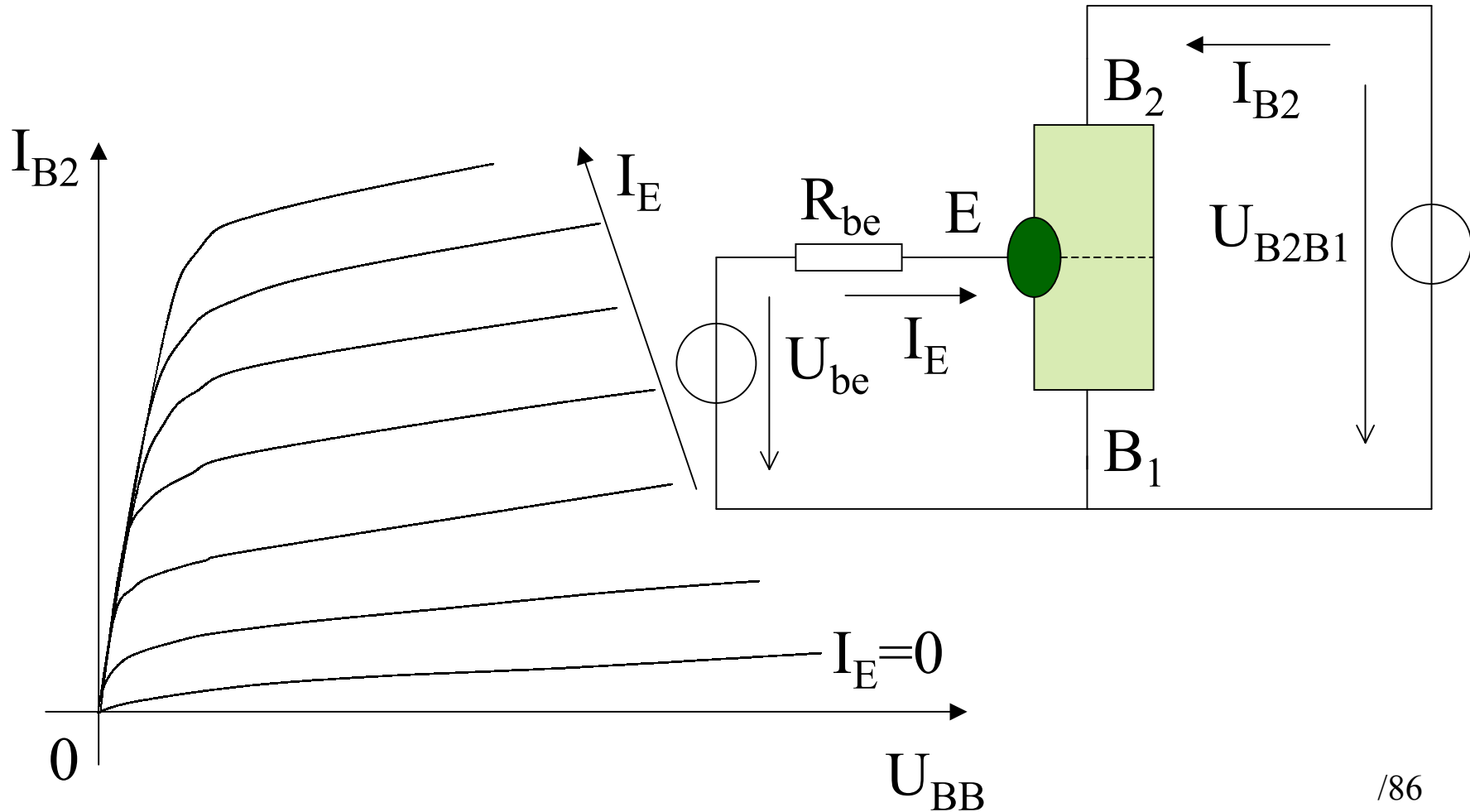


$$U_E = U_D + \eta U_{B2B1}$$

$$R_{EB1} = R_{pn} + R_{B1}, R_{B1} = \eta R_{B1B2}$$



3.3. UJT – kimeneti karakterisztika



3.4. UJT előnyei

stabil U_p billenő feszültség

nagyon kis áram szükséges a billenéshez

negatív ellenállású jelleggörbe

jelleggörbe kevésbé függ a hőmérséklettől és időtől

alacsony előállítási költség

nagy áramimpulzus terhelhetőség

viszonylag nagy működési sebesség

átkapcsolási idő néhány ns

3.5. UJT alkalmazása

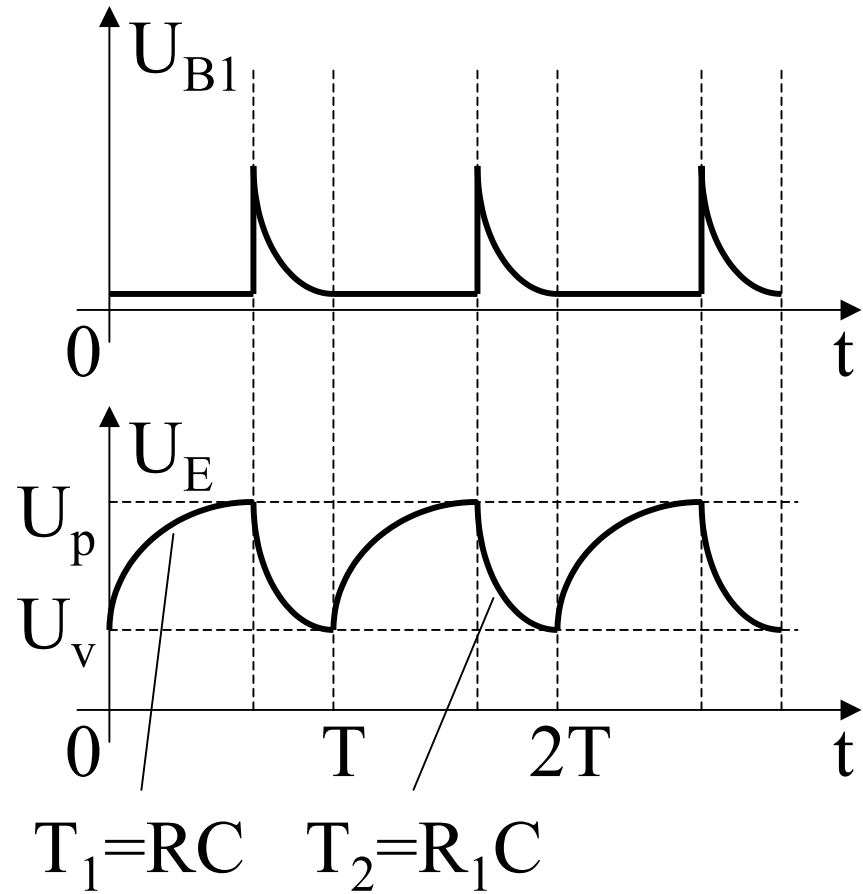
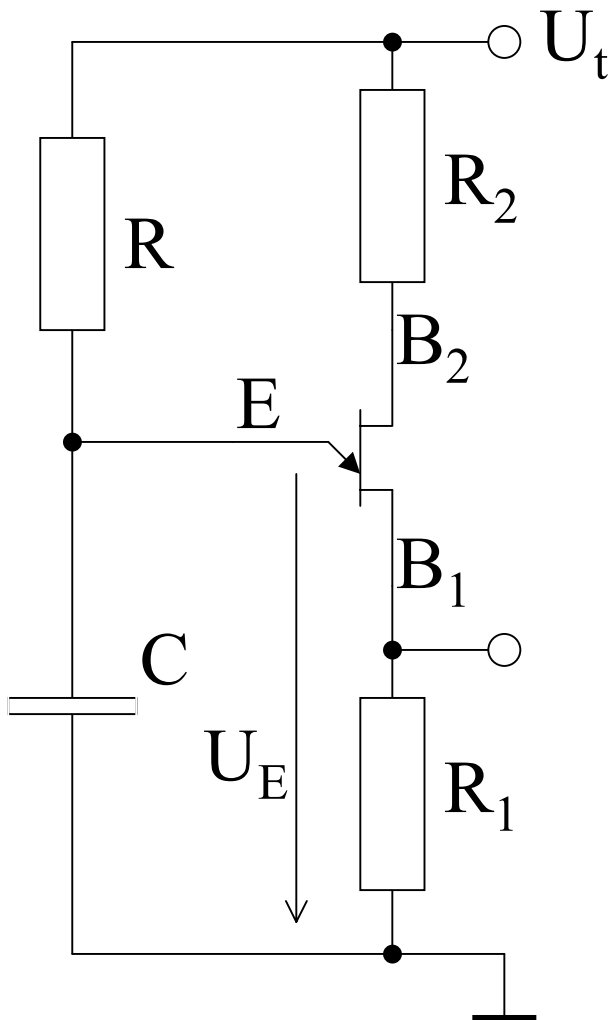
tirisztor gyújtása

oszcillátorok, multivibrátorok

időzítők

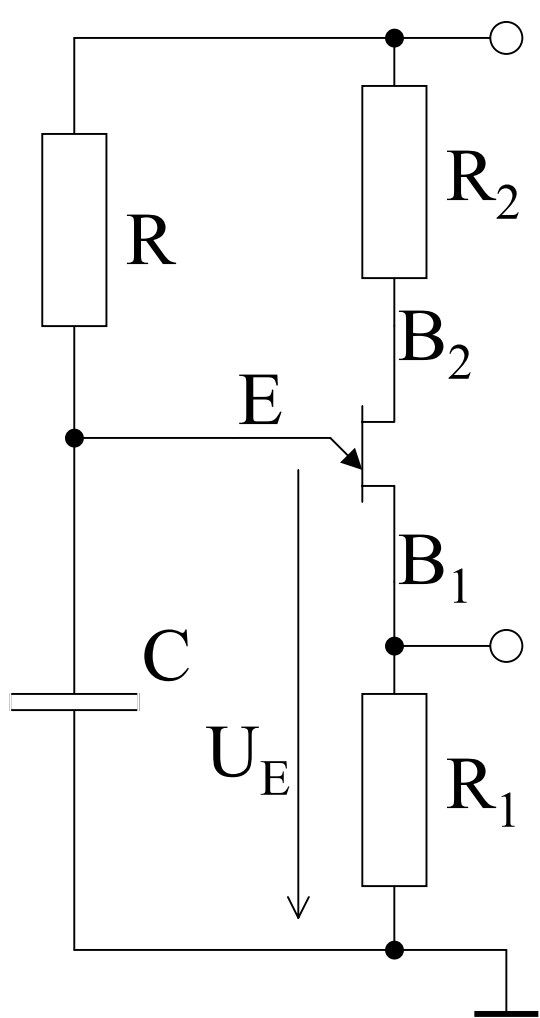
hullámforma generátor

3.6.1. UJT-s oszcillátor



$$T = RC \ln(1 - \eta)^{-1}$$

3.6.3. UJT-s oszcillátor



UJT zár:
$$U_{B1} = U_t \frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_{BB}}$$

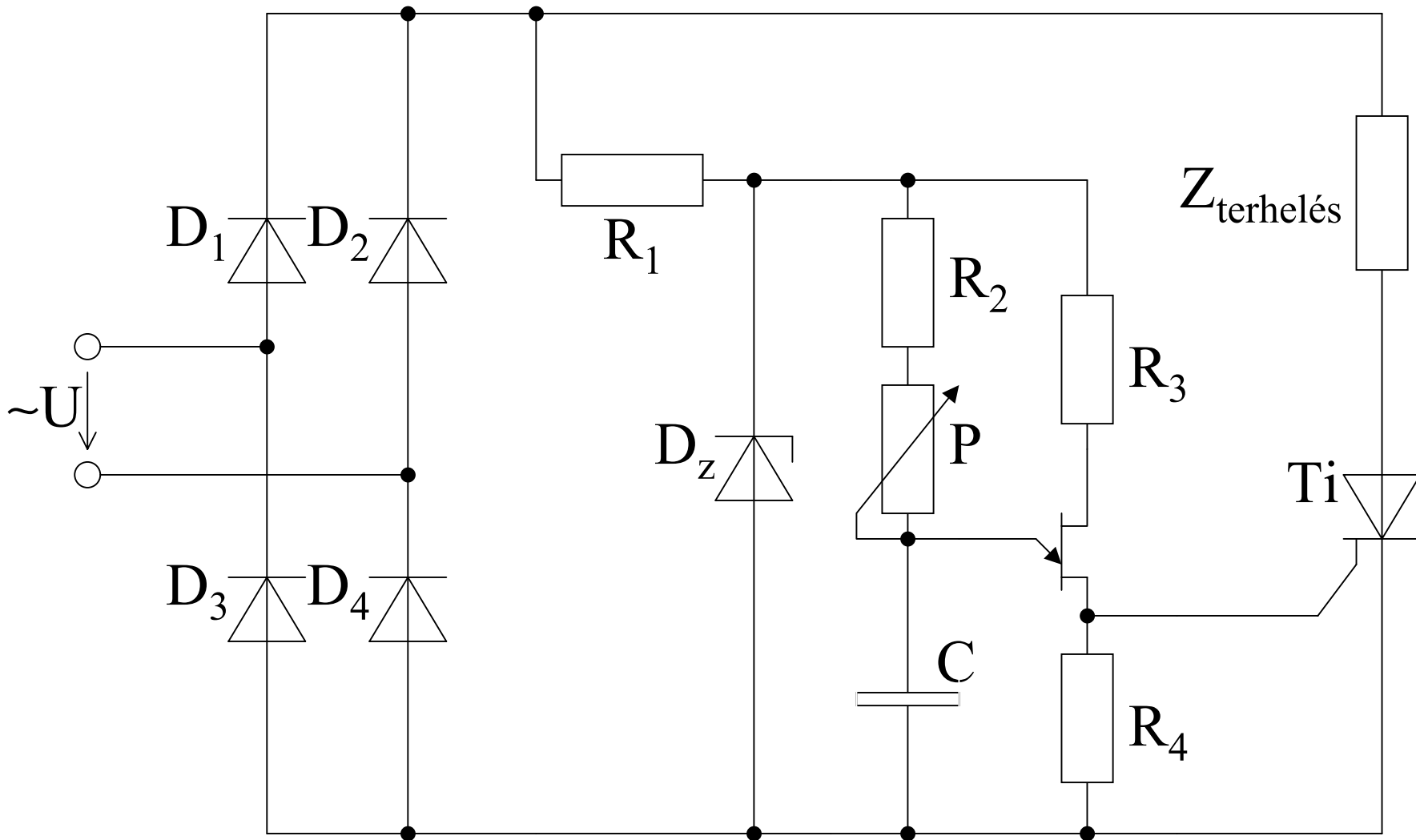
UJT nyit:
$$U_{B1} \cong U_p \frac{R_1}{R_1 + R_{EB1 SAT}}$$

Billenési feszültség:
$$U_p = U_D + U_t \frac{\eta R_{BB} + R_1}{R_1 + R_2 + R_{BB}}$$

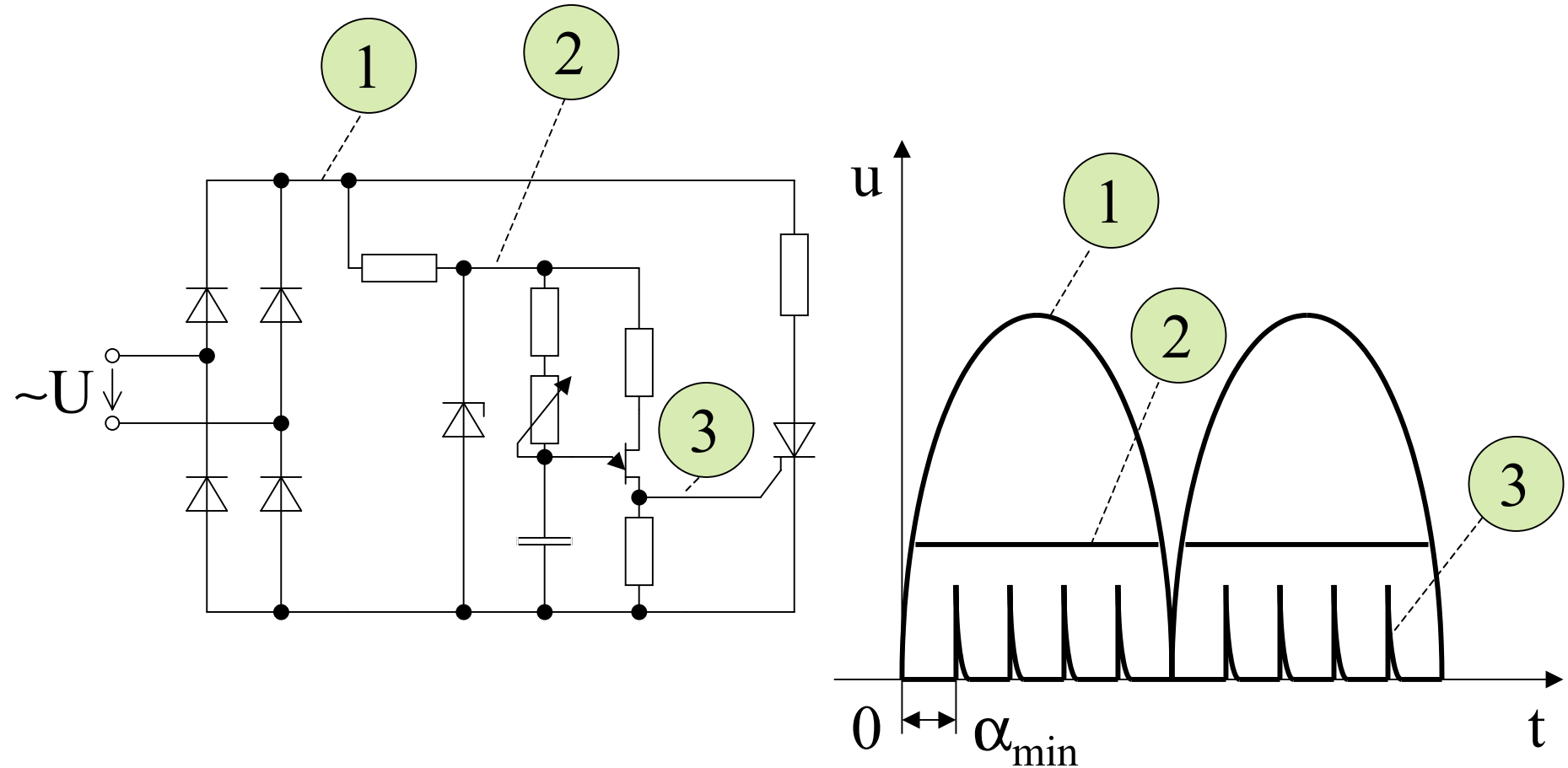
$C \downarrow \downarrow \Rightarrow U_v, I_v$ változik

$C \uparrow \uparrow \Rightarrow EB_1$ átmenet tönkremegy

3.7.1. Hálózati szinkronizációjú oszcillátor



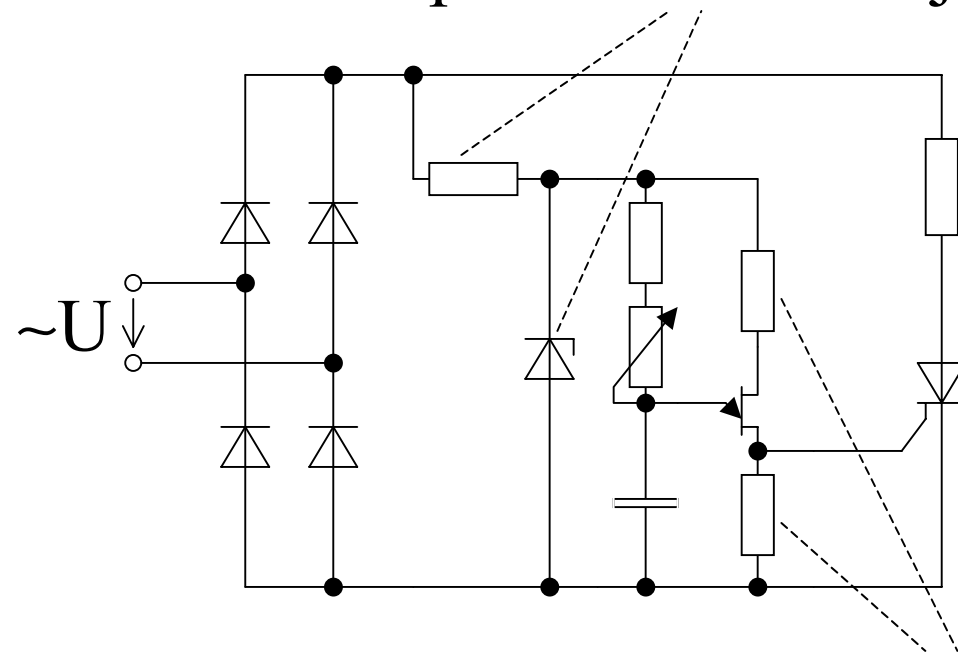
3.7.2. Hálózati szinkronizációjú oszcillátor



Az első impulzus már begyűjt, a többi veszteséget okoz.

3.7.3. Hálózati szinkronizációjú oszcillátor

Az R_1 -et és a D_z -át úgy kell megválasztani, hogy a maximális áram fellépésekor is maradjon meg a Zéner-feszültség.



$$\frac{U\sqrt{2}-U_z}{R_1} \leq I_{z \text{ max}}$$

R_1 teljesítménye nagy lesz.
Külön kell számolni!

Az UJT-ét, R_3 -at és R_4 -et úgy kell megválasztani, hogy a gyújtáshoz szükséges feszültség és áram biztosítva legyen.

4. Teljesítmény tranzisztorok

1. Power BJT - Bipolar Junction Transistor
teljesítmény bipoláris tranzisztor

2. Power MOSFET - Metal Oxide Semiconductor
Field Effect Transistor
teljesítmény ... tervezérlésű tranzisztor

3. SIT : Static Induction Transistor

...

4. IGBT : Insulated Gate Bipolar Transistor
szigetelt bázisú bipoláris tranzisztor

4.a. Teljesítmény tranzisztorok jellemzői

Általában kapcsolóüzemben dolgoznak.

A működés megértéséhez ideális kapcsolónak tekinthetők.

Be- és kikapcsolásuk egyszerűbb a tirisztorokénál.

A feszültségesés a telítési tartományban kisebb,
mint a hagyományos tranzisztoroknál.

4.1.1. Power BJT

– kapcsolási határadatok

$$U_{CEmax}, I_{cmax}, P_{dmax}$$

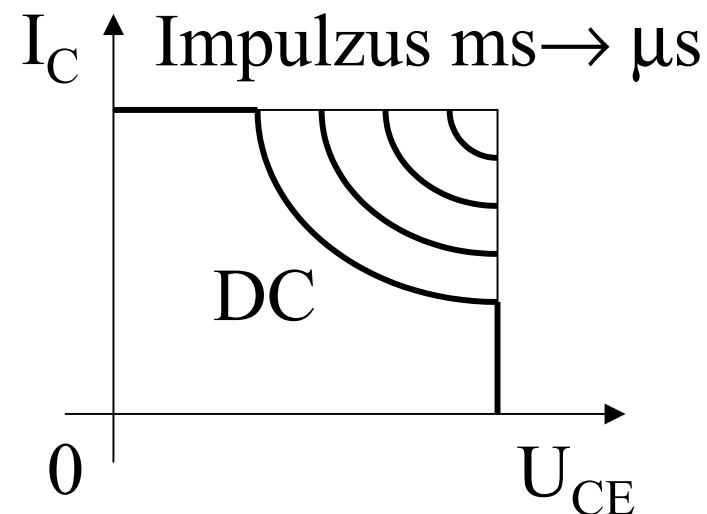
Másodfajú letörések: helyi forrópontok kialakulása nagy áramkoncentráció következtében.

-lehet anyaghiba, de adott U , I , t kombináció is, Tehát energiára lehet visszavezetni.

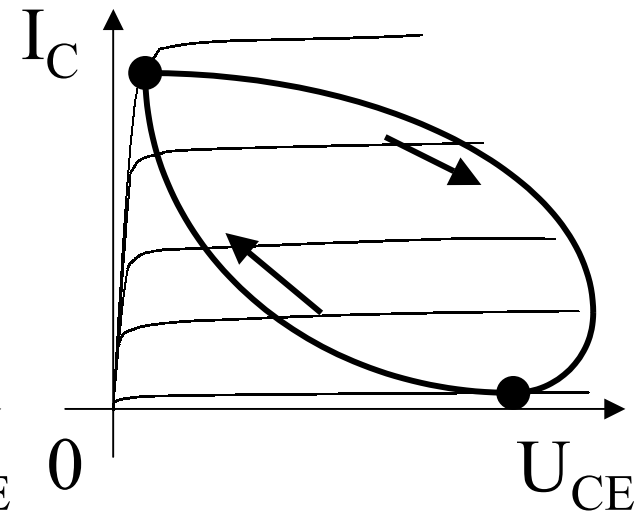
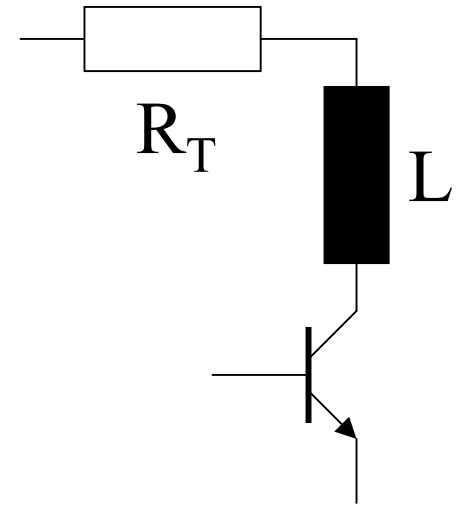
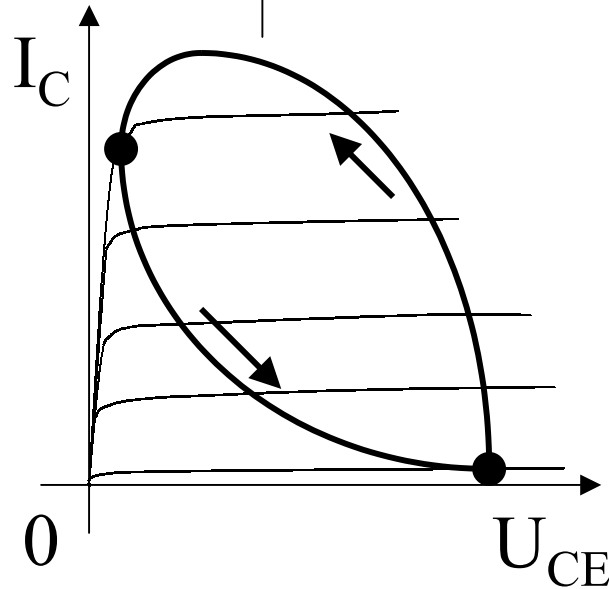
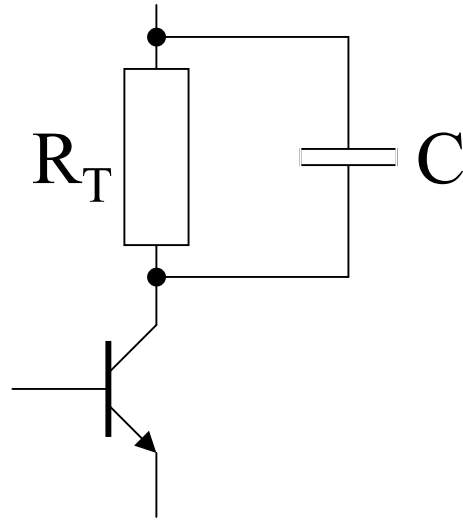
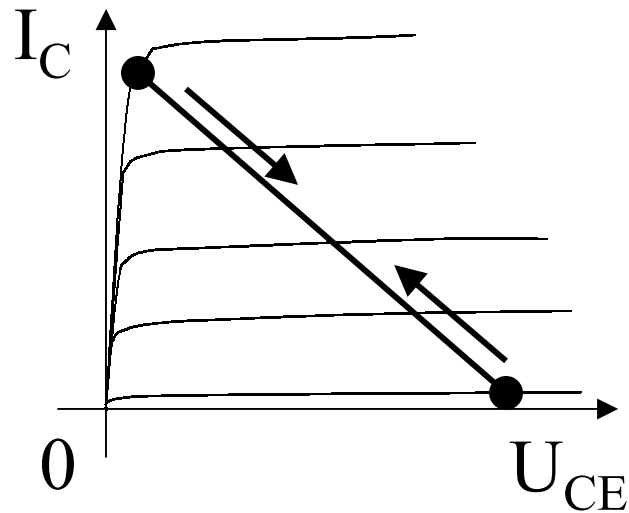
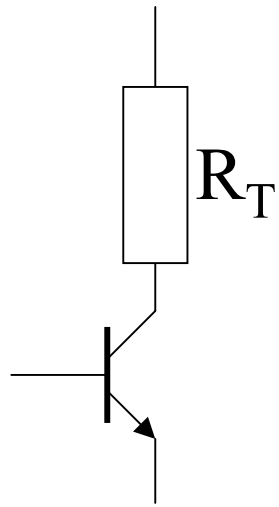
Biztonságos nyitóüzemű tartomány.

Biztonságos záróüzemű tartomány.

SOA : Safe Operating Area



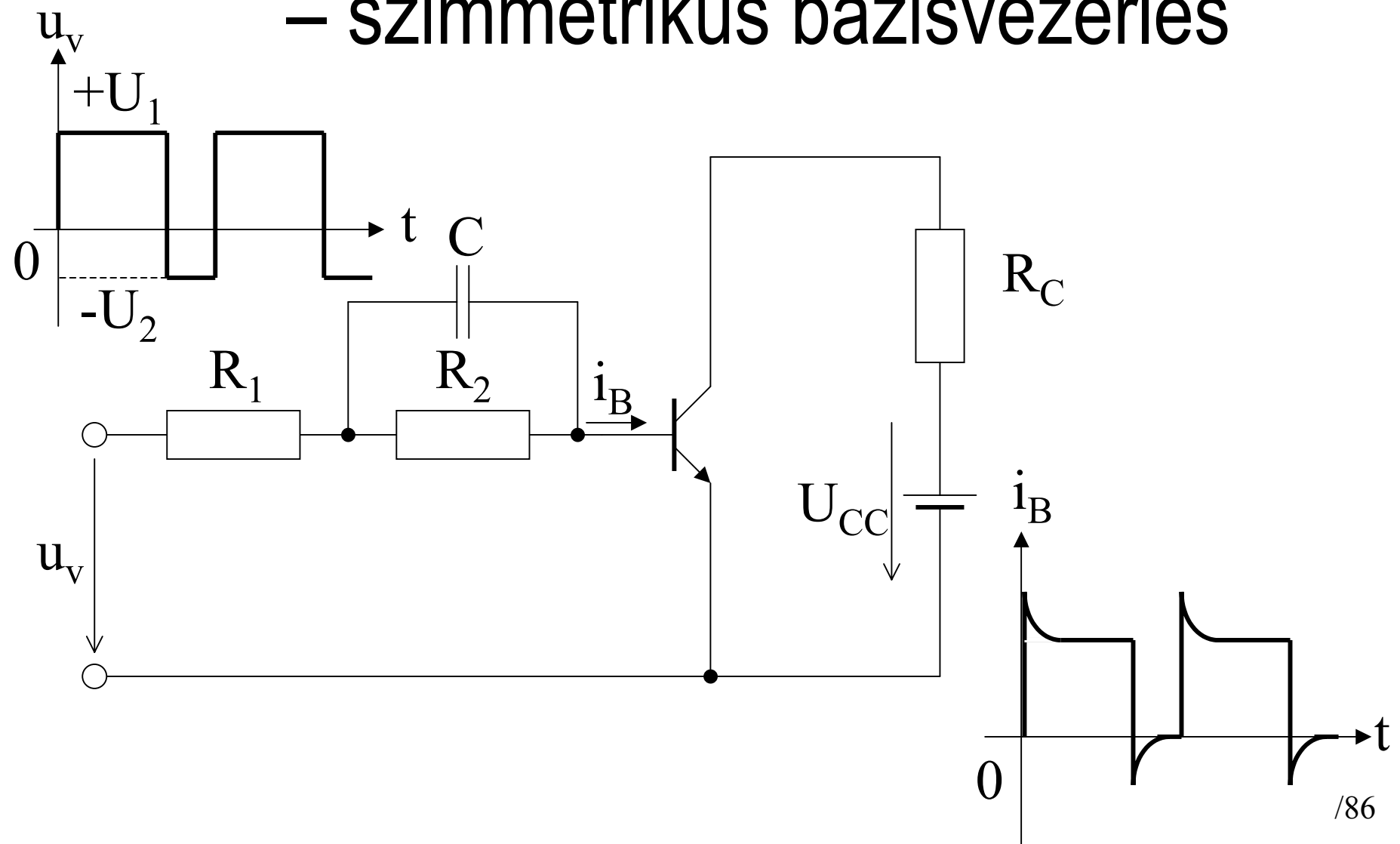
4.1.2. Power BJT – munkapontok



4.1.3. Power BJT – bázisvezérlések

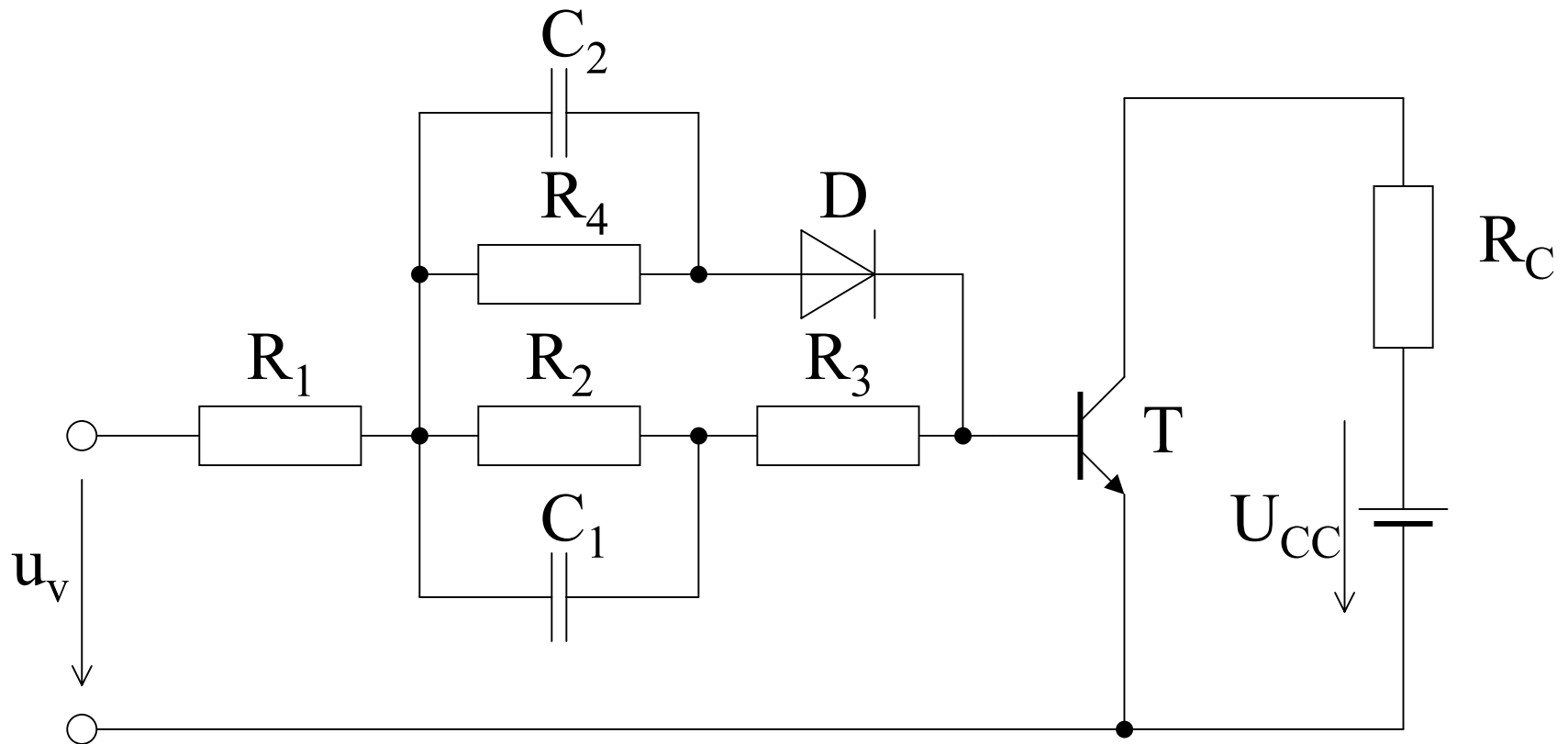
- a) szimmetrikus
- b) aszimmetrikus
- c) arányos (önzáró)
- d) telítés nélküli

4.1.3.a. Power BJT – szimmetrikus bázisvezérlés



4.1.3.b. Power BJT

– aszimmetrikus bázisvezérlés

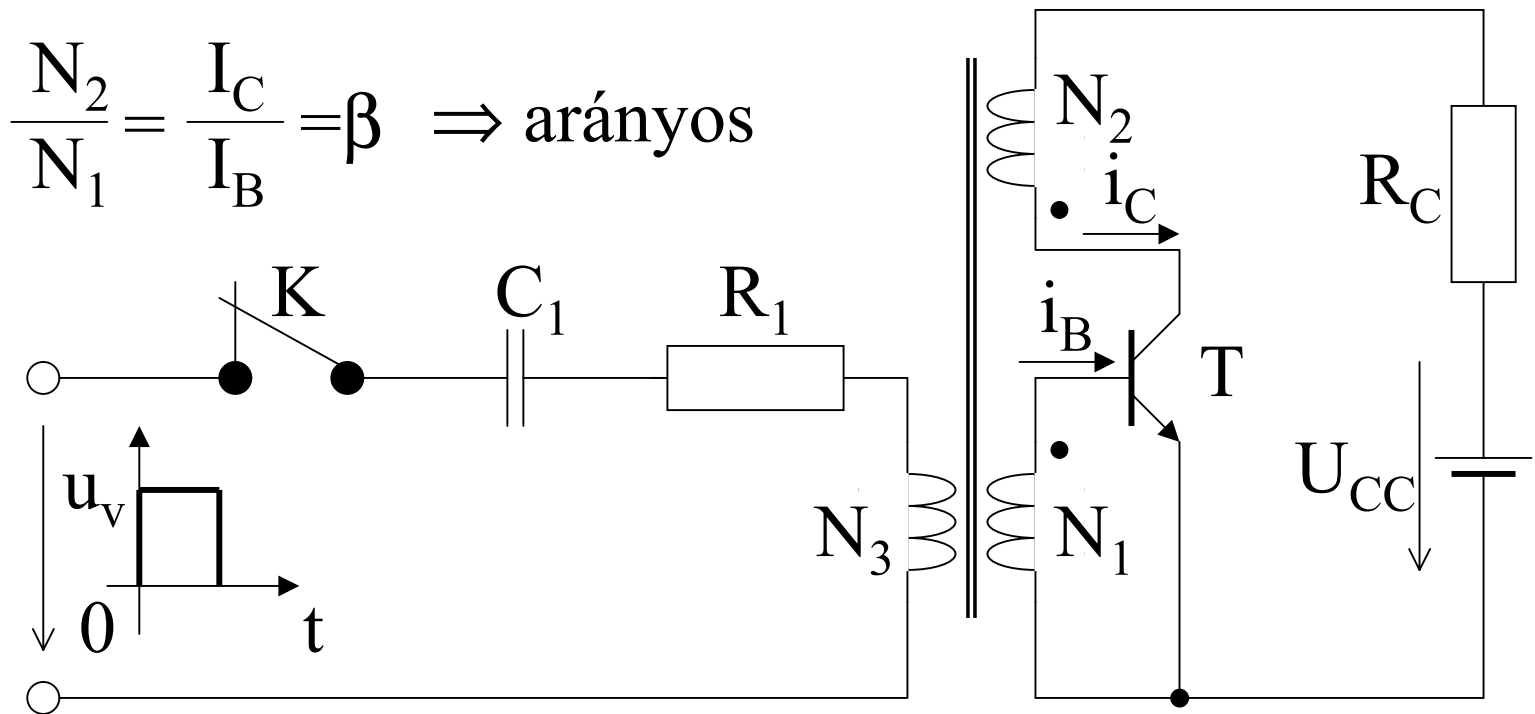


4.1.3.c. Power BJT

– arányos (önzáró) bázisvezérlés

beindulás után K kikapcsolható \Rightarrow önzáró

külön áramkörrel kell kikapcsolni és C_1 -et kisütni



4.1.3.d. Power BJT

– telítés nélküli bázisvezérlés

$$\left. \begin{aligned} U_{CE\text{ SAT}} &= (0,2 \dots 0,3) \text{ V} \\ U_{CE} &= U_{BE} + U_{D1} - U_{D2} = U_{BE} = (0,6 \dots 0,7) \text{ V} \end{aligned} \right\} \Rightarrow U_{CE} > U_{CE\text{ SAT}}$$

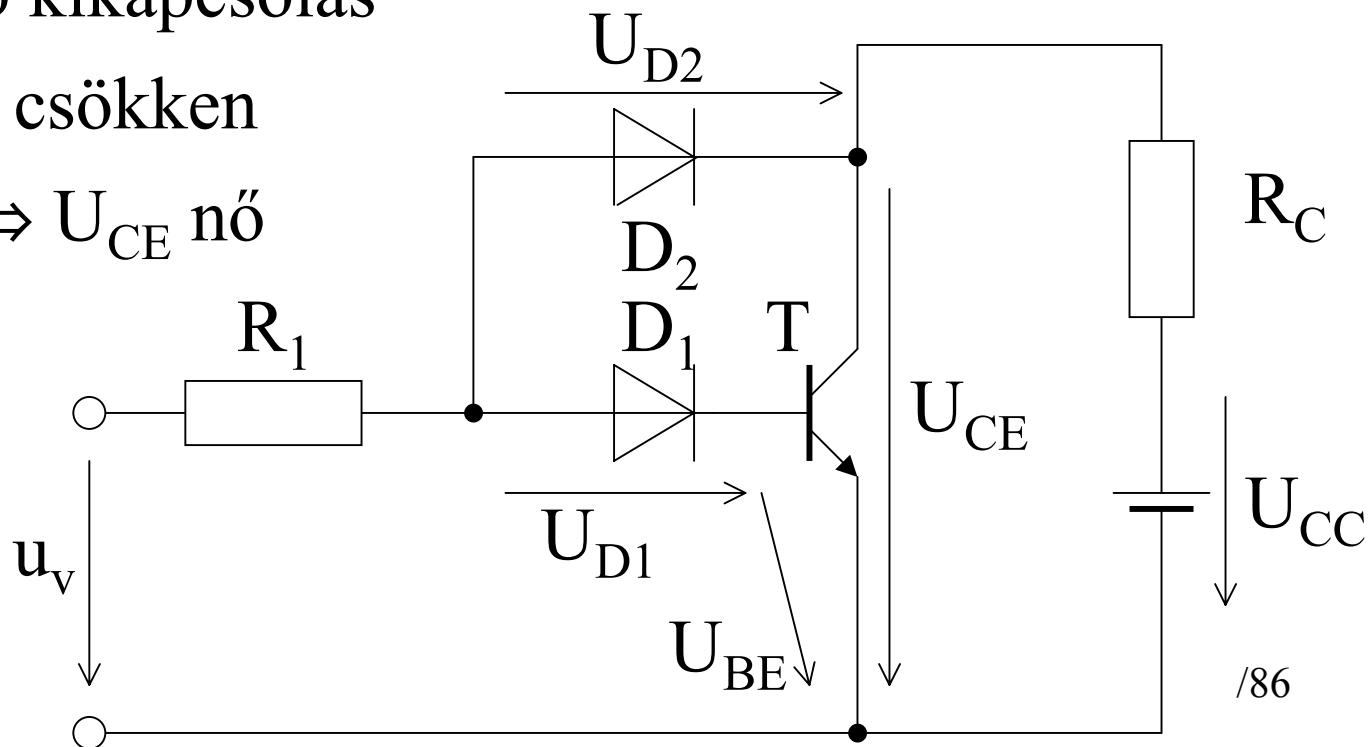
\Rightarrow gyorsabb kikapcsolás

$\Rightarrow P_{\text{sw}}$ csökken

D_1 száma nő $\Rightarrow U_{CE}$ nő

$\Rightarrow P_{\text{on}}$ nő

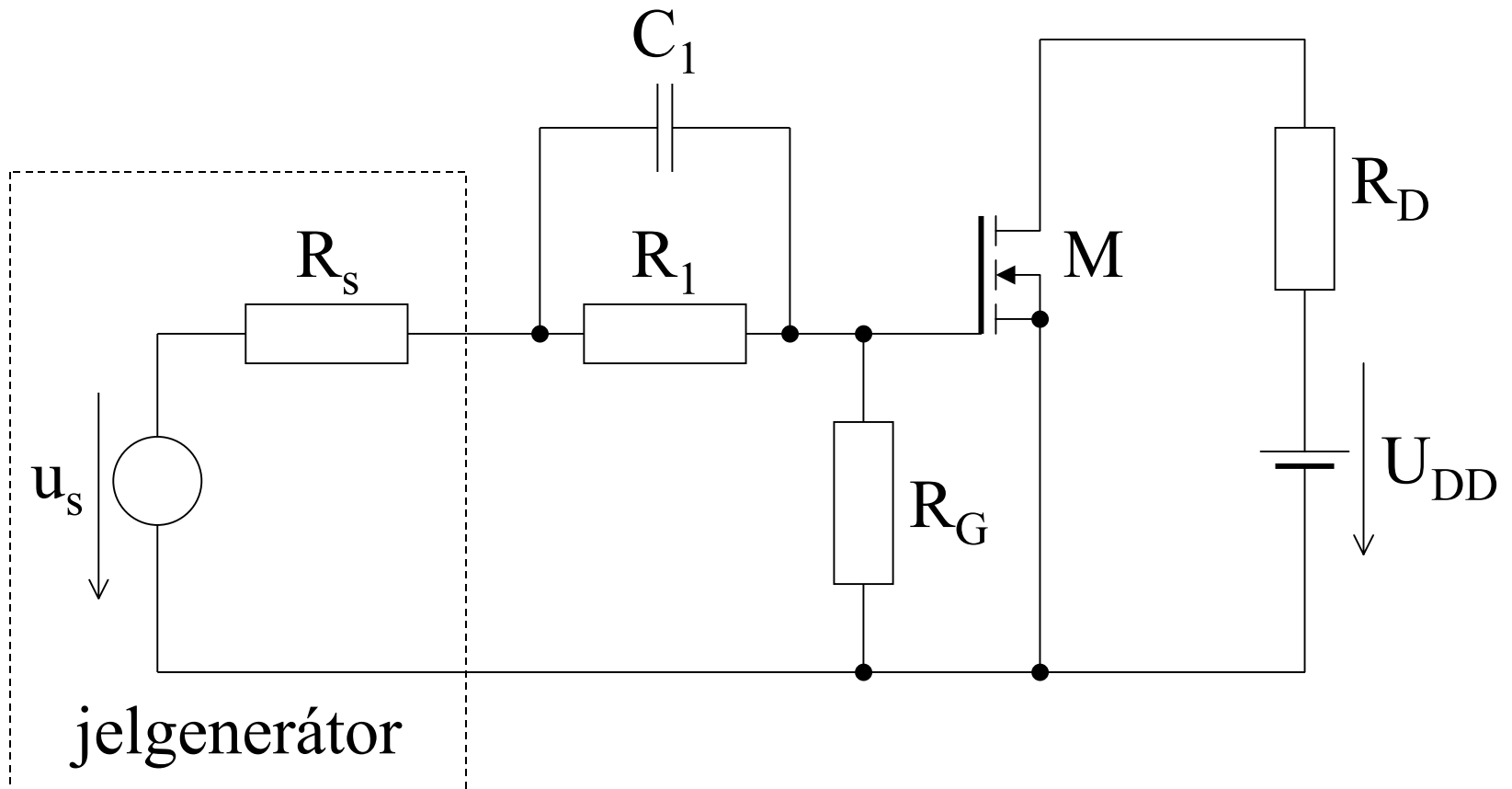
\Rightarrow gondoskodni
kell a többlet
hő elvezetéséről



4.2.1. Power MOSFET - jellemzői

- feszültségvezérelt
- kisebb teljesítmény, de nagyobb frekvencia
- nincs másodfajú letörés
- gond az elektrosztatikus kisülés

4.2.2. Power MOSFET - vezérlés



A bekapcsolási idő - a bemeneti kapacitástól függ.

- RC taggal csökkenthető.

4.2.3. Power MOSFET – Totem Pole vezérlés

Emmitterkövető kapcsolás



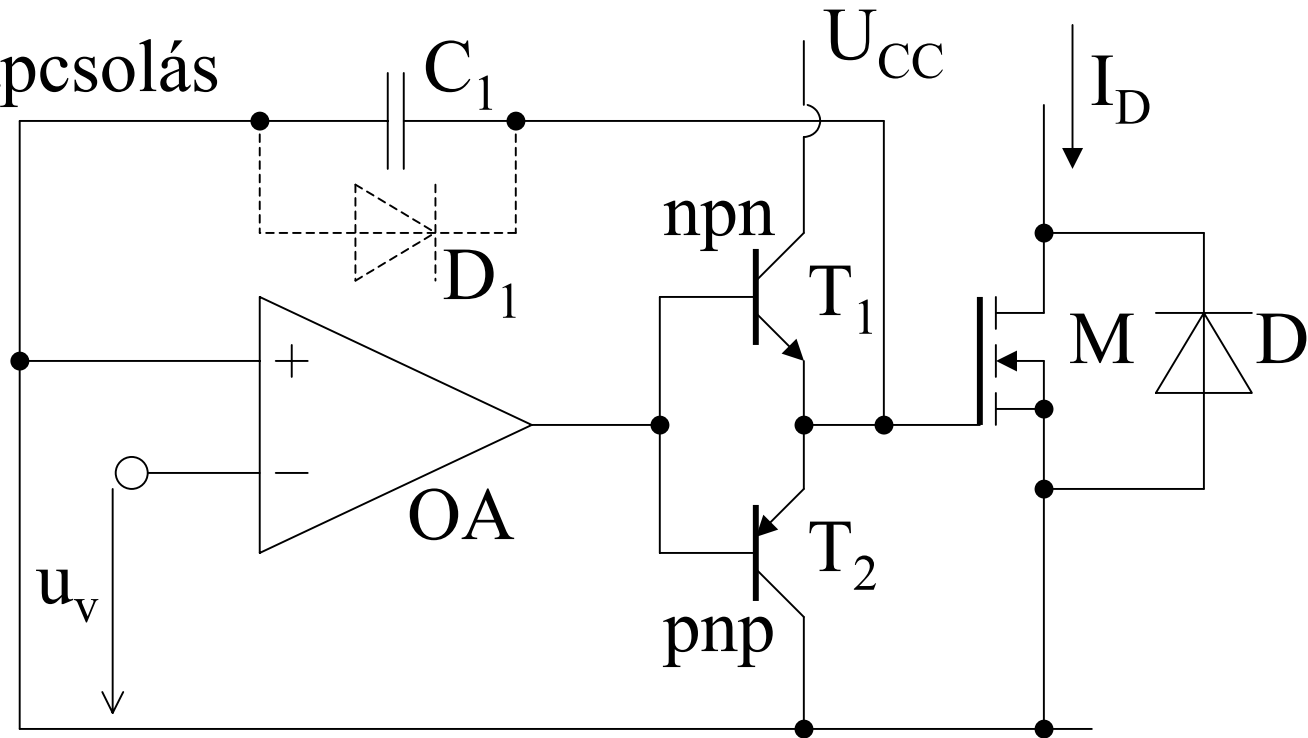
kis kimeneti

impedanciák $T_{1,2}$



csökken a

bekapcsolási idő



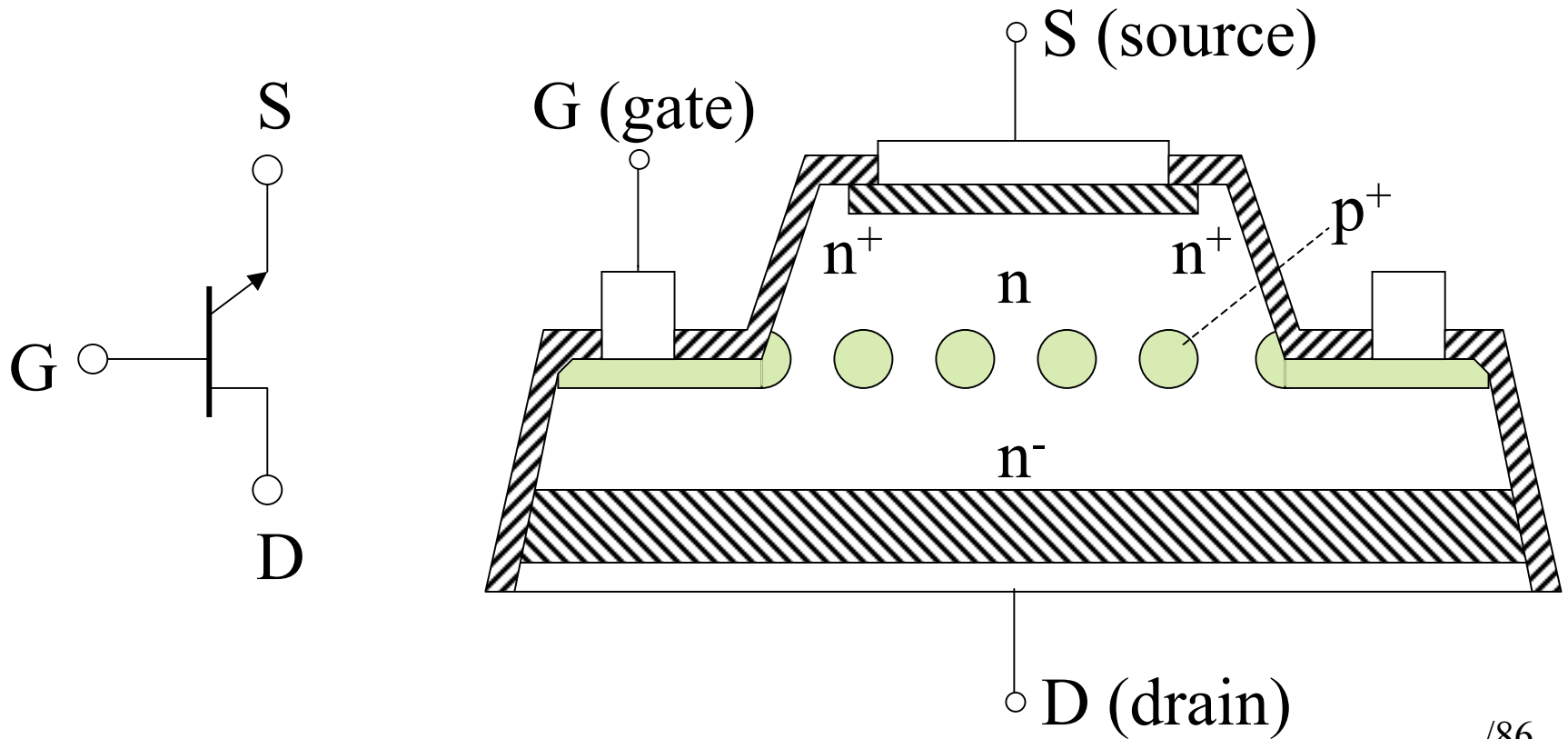
Visszacsatolás C_1 -en keresztül:

beállítja az I_D növekedését és csökkenését

D_1 gyors változást biztosít egyik irányban

4.3.1. SIT – jellemzői, elve, jelölése

- nagy teljesítmény, nagy frekvencia
- a vákuum trióda félvezető változata



4.3.2. SIT

– előnyei, vezérlése, alkalmazása

- rövid csatorna \Rightarrow kis ellenállás \Rightarrow kis feszültségesés
- kis zaj, kis torzítás
- kis hőellenállás
- kis G-S kapacitás
- kis kapcsolási idő

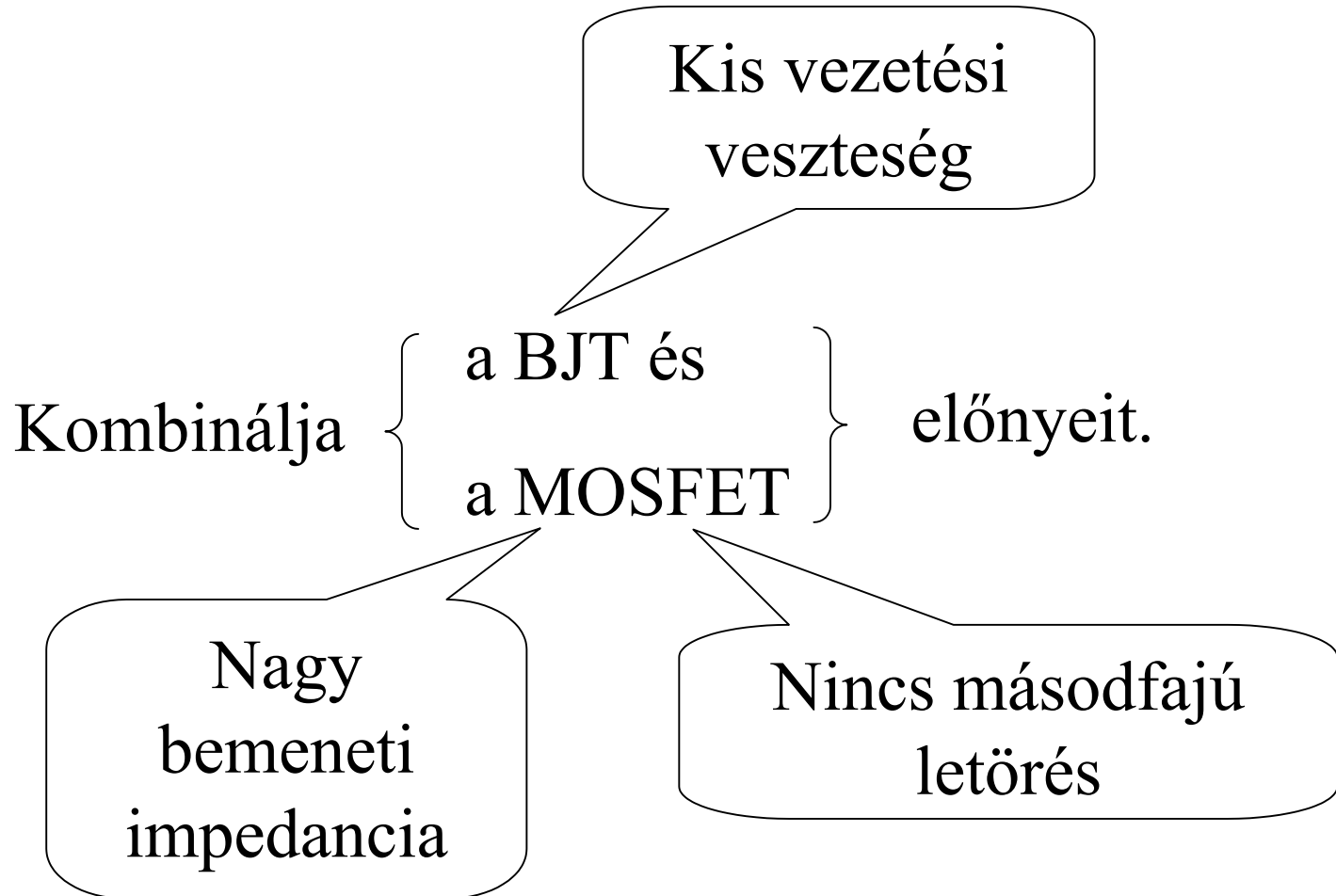
Normál állapotban nyitott,
negatív vezérlő feszültség szükséges a lezárásához.

Nagy teljesítményű és nagyfrekvenciás berendezések:

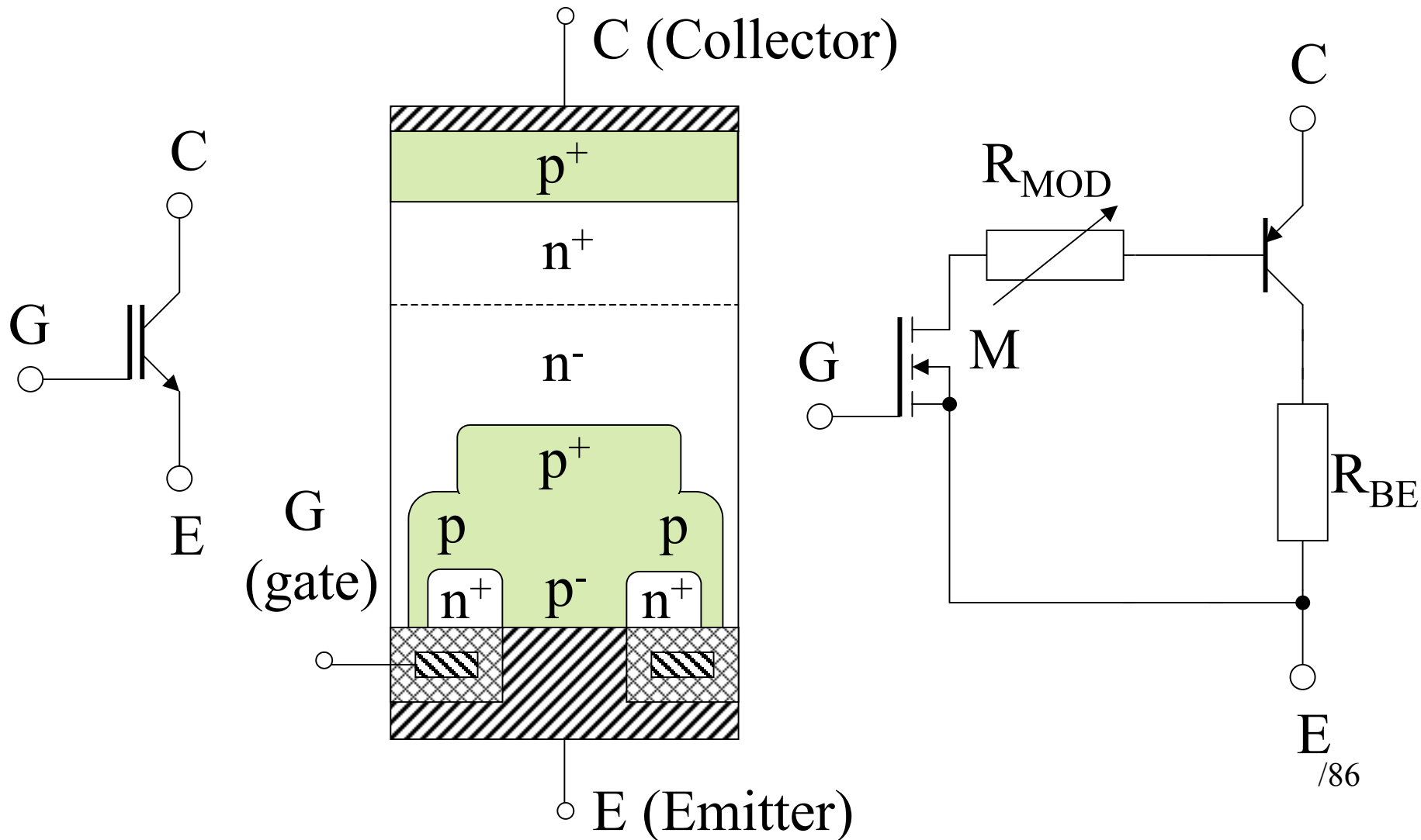
audio-..., VHF/UHF, mikrohullámú erősítő

4.4.1. IGBT – jellemzői

szigetelt bázisú bipoláris tranzisztor



4.4.2. IGBT – jelölés, felépítés, modell



4.4.3. IGBT – alkalmazása

-közepes teljesítmény szint

MOSFET < kapcsolási idő < BJT

AC motorhajtás

tápegységek

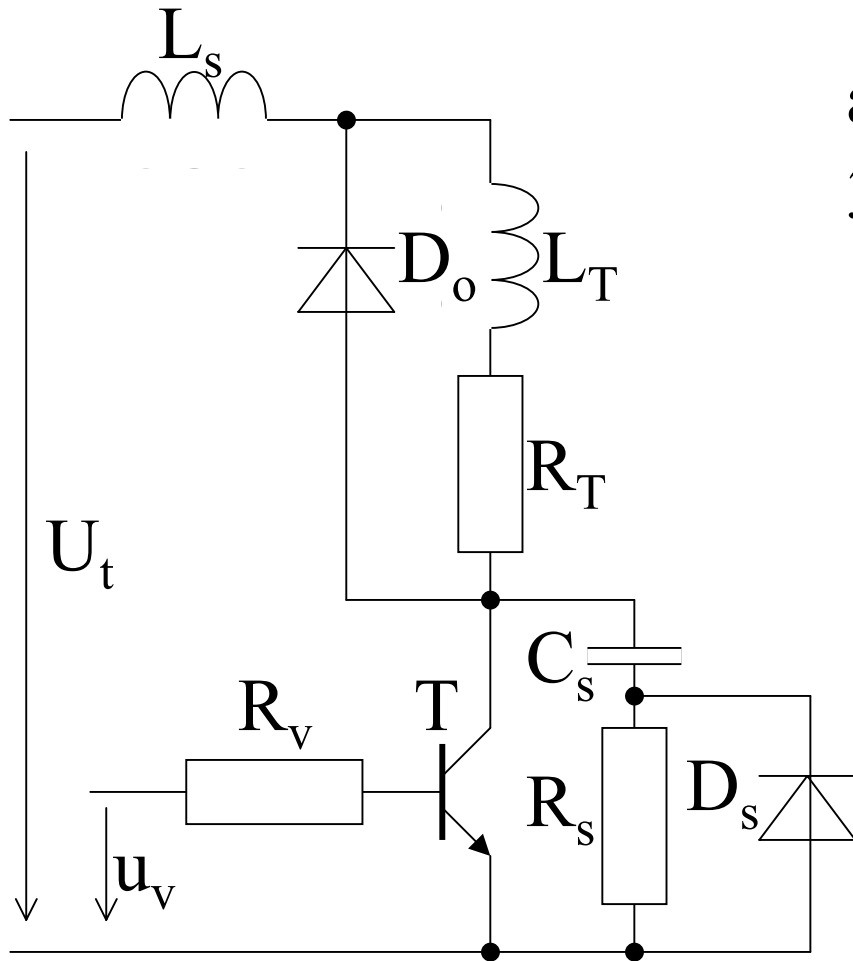
szilárdtest relék

4.5. Tranzisztorok üzeme

Párhuzamos és soros üzem: lásd diódák.

Védelem: $\left\{ \begin{array}{l} du/dt \\ di/dt \end{array} \right\}$ korlátozás.

4.6. Tranzisztorok védelme

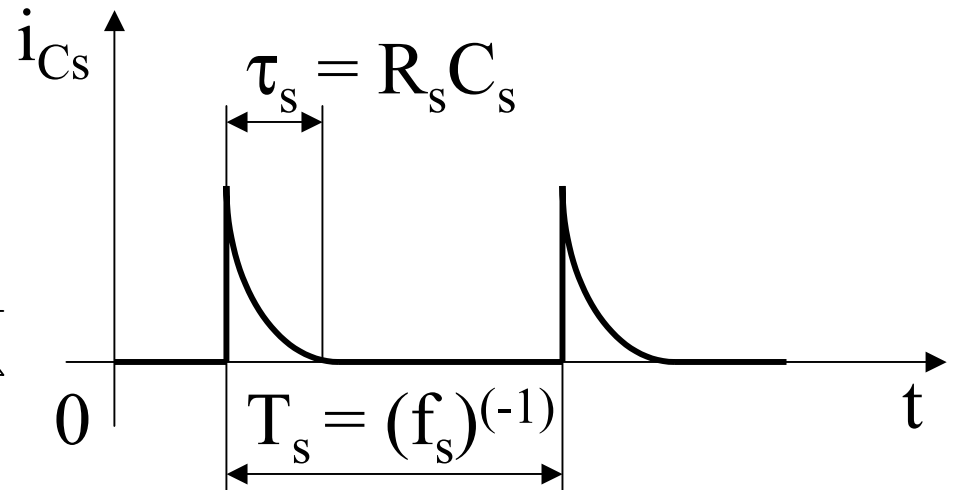


áramkorlát: $di/dt = U_t/L_s$

$$3R_s C_s = (f_s)^{-1}$$

f_s = a kapcsolgatási frekvencia

kondenzátor árama:



$$R_s = 2\sqrt{L_s/C_s} \text{ - csillapítás} \quad /86$$

5.1. Teljesítménymodulok

Egy egységben: { teljesítmény félvezető eszközök
meghajtó áramkörök
leválasztó áramkörök
vezérlők
védelem

Monolitikus modul

egy Si lapkára (chipre)
vannak integrálva

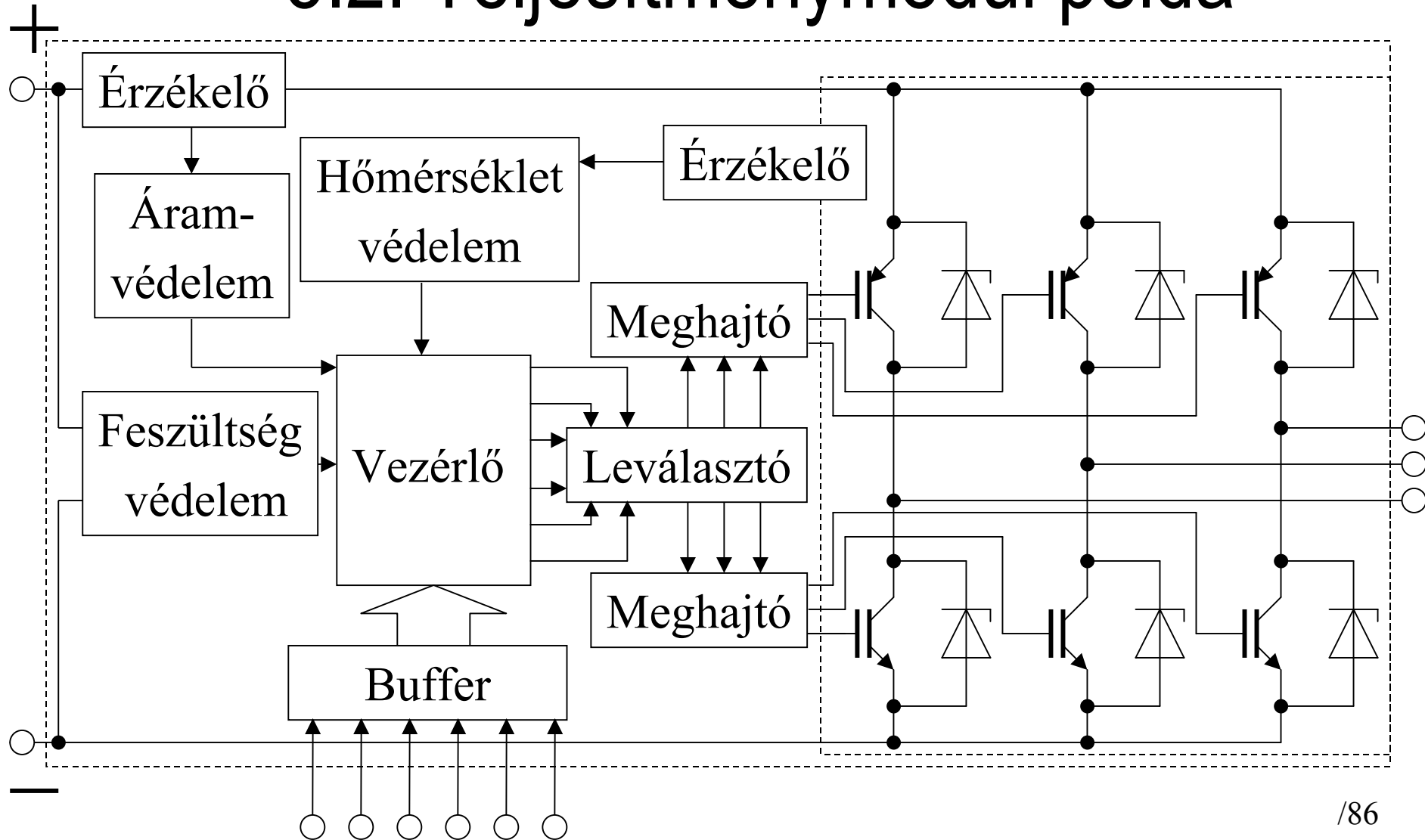
Hibrid modul

külön a teljesítmény félvezetők és
külön a vezérlő elektronika áramkörei
de egy tokban.

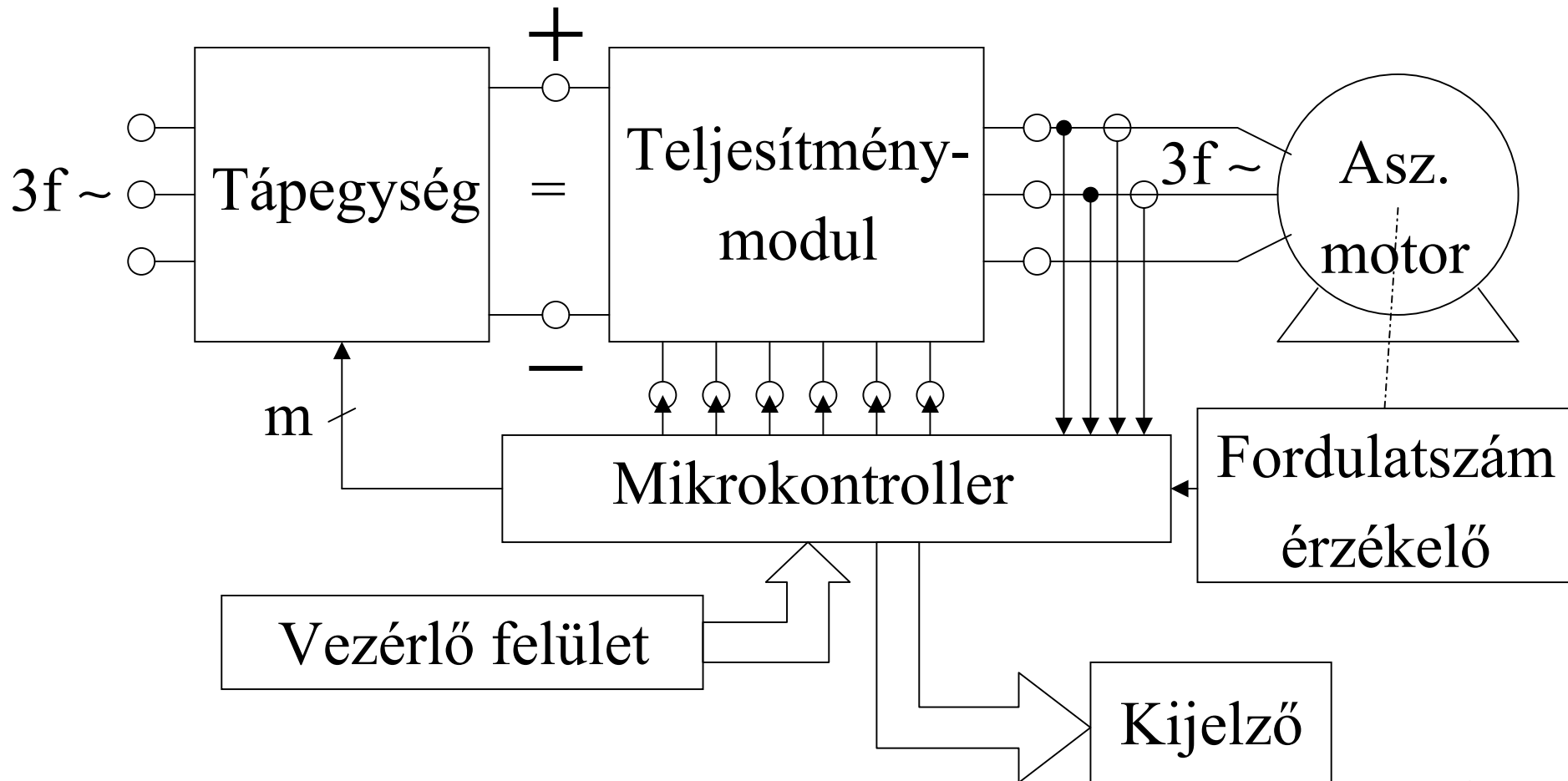
Előny: közvetlen digitális vezérlés.

Gond: hőelvezetés, különösen a monolitikus modulnál.

5.2. Teljesítménymodul példa



5.3. Teljesítménymodul alkalmazás



6.1. Teljesítmény

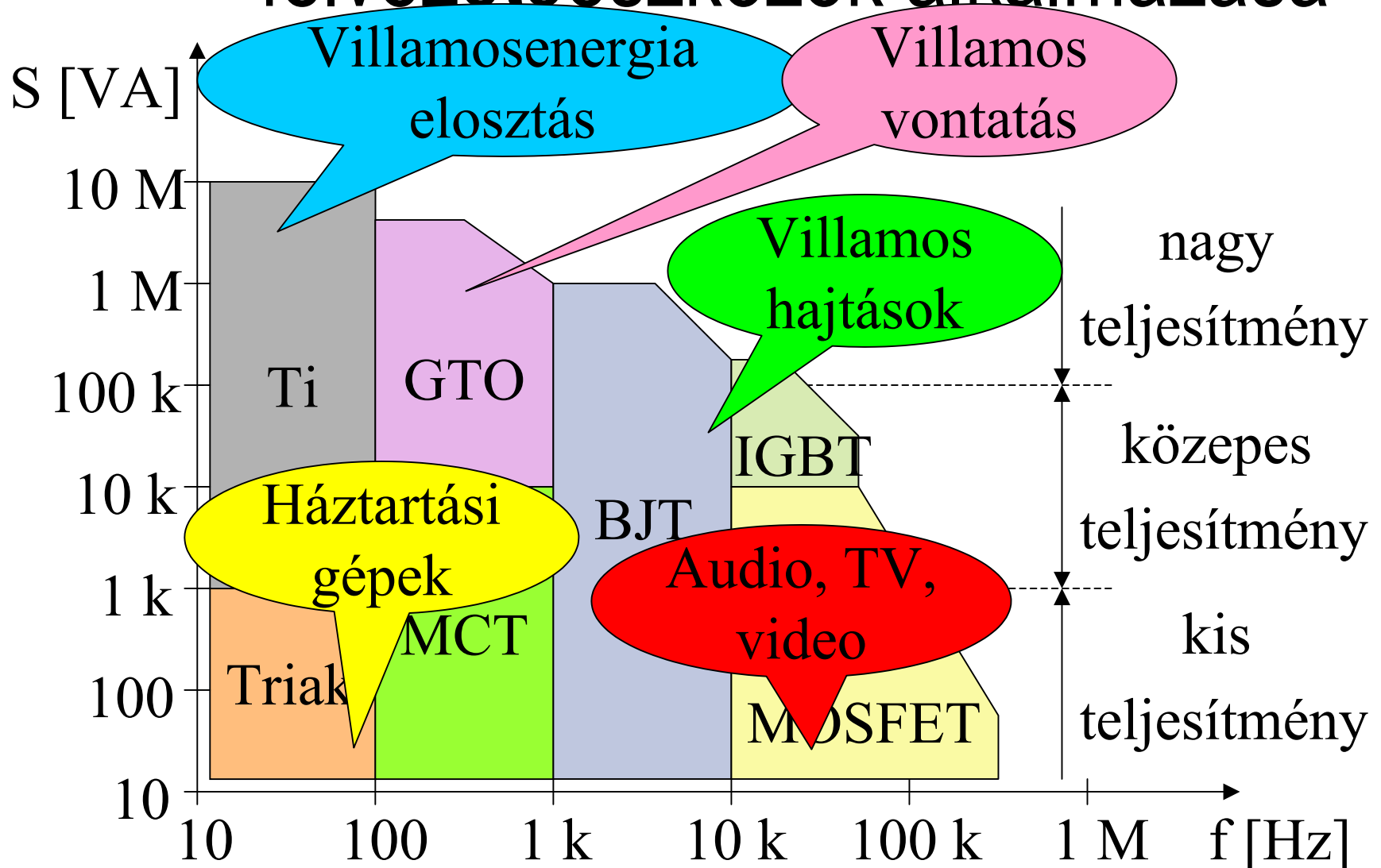
félvezetőeszközök főbb adatai

Eszköz	U_{\max} [V]	I_{\max} [A]	f_{\max} [Hz]	t_{kapcs} [μs]	R_{vez} [m Ω]
Dióda	5 k	5 k	1 k	100	0,16
Gyors dióda	3 k	1 k	10 k	2...5	1
Schottky dióda	40	60	20 k	0,23	10
Tirisztor	8 k	5 k	1 k	200	0,25
Gyors tirisztor	1,2 k	1,5 k	10 k	20	0,47
GTO	4,5 k	4,5 k	10 k	15	2,5
Triak	1,2 k	300	400	200	3,57
RCT	2,5 k	1 k	5 k	40	2,1
SITh	4 k	2,2 k	20 k	6,5	5750
LTT	6 k	2,5 k	1 k	200	0,53
MCT	1,2 k	300	20 k	2,2	18
BJT	1,2 k	800	10 k	30	10
MOSFET	1,0 k	200	200 k	0,6	0,4
SIT	1,2 k	300	100 k	0,55	1200
IGBT	1,8 k	400	50 k	2,3	60

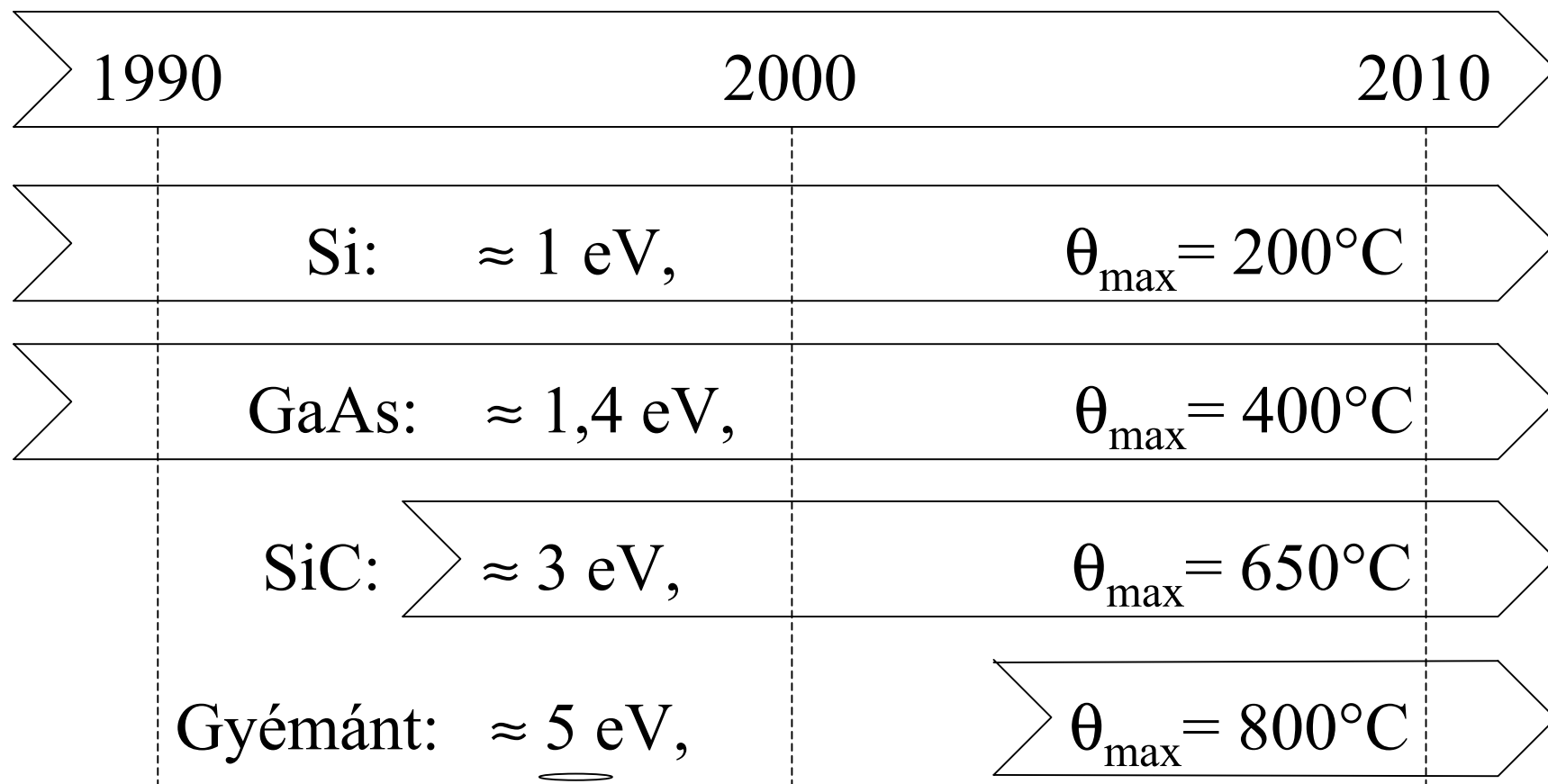
6.2. Teljesítmény félvezető- eszközök minőségi jellemzői

Eszköz	Vezérlés	Túláram bírási	Vezérlési veszteség	Kapcsolási veszteség
Tirisztor	áram	nagy	alacsony	nagy
GTO	áram	közepes	nagy	nagy
SITh	áram	közepes	közepes	alacsony
LTT	fény	nagy	alacsony	nagy
MCT	feszültség	nagy	alacsony	alacsony
BJT	áram	alacsony	alacsony	közepes
MOSFET	feszültség	alacsony	nagy	alacsony
SIT	feszültség	alacsony	alacsony	alacsony
IGBT	feszültség	alacsony	közepes	alacsony

6.2. Teljesítmény félvezetőeszközök alkalmazása



6.3. Félvezető alapanyagok



tiltott elektronsáv szélessége