

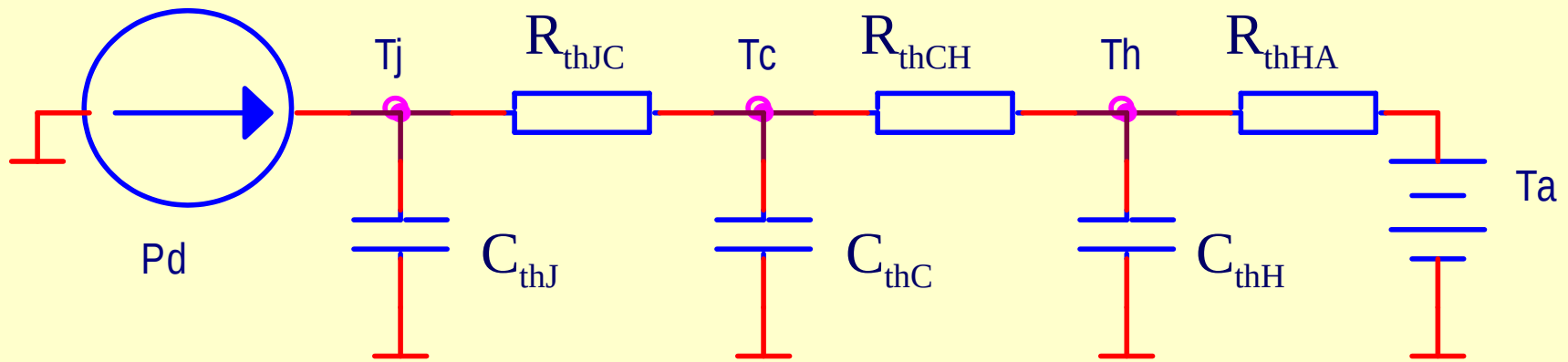
Српска
Државна
Академија
Уметности
и
Српски
Културни
Савет

Зоран Мијановић
2003-11-23

Транзистори снаге

- Стављају се у режиме великих струја и напона и то близу граница дозвољеног, ради економичности
- Мора се испоштовати област безбједног рада (SOA = Safe Operating Area)
- Мора се осигурати хлађење транзистора
- Веће струје се постижу паралелним везивањем транзистора, а већи напони – редним везивањем

Термички модел електронске компоненте (транзистора, диоде,...)



J = Junction = спој у полупроводнику који се најинтензивније грије

C = Case = кућиште компоненте

H = Heatsink = хладњак за одвођење топлоте

A = Ambient = окружење уређаја (ваздух)

У аналогiji термичких и електричних процеса постоје везе:

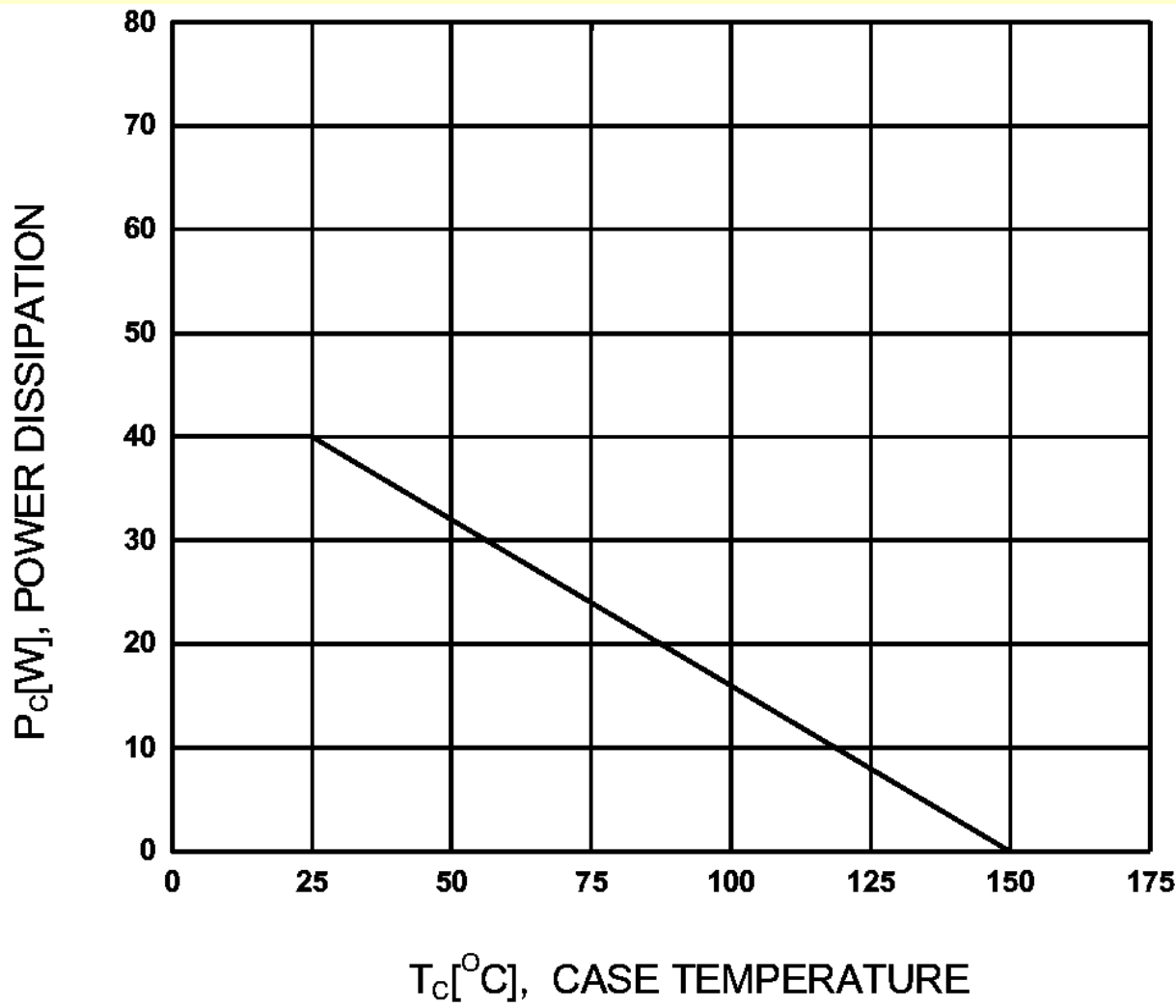
Снага гријања (W) = електрична струја (A)

Температура (K) = електрични напон (V)

Термичка отпорност (K/W) = електрична отпорност (Ω)

Топлотна капацитивност (J/K) = електрична капацитивност (F)

Дозвољена снага дисипације зависно од температуре кућишта

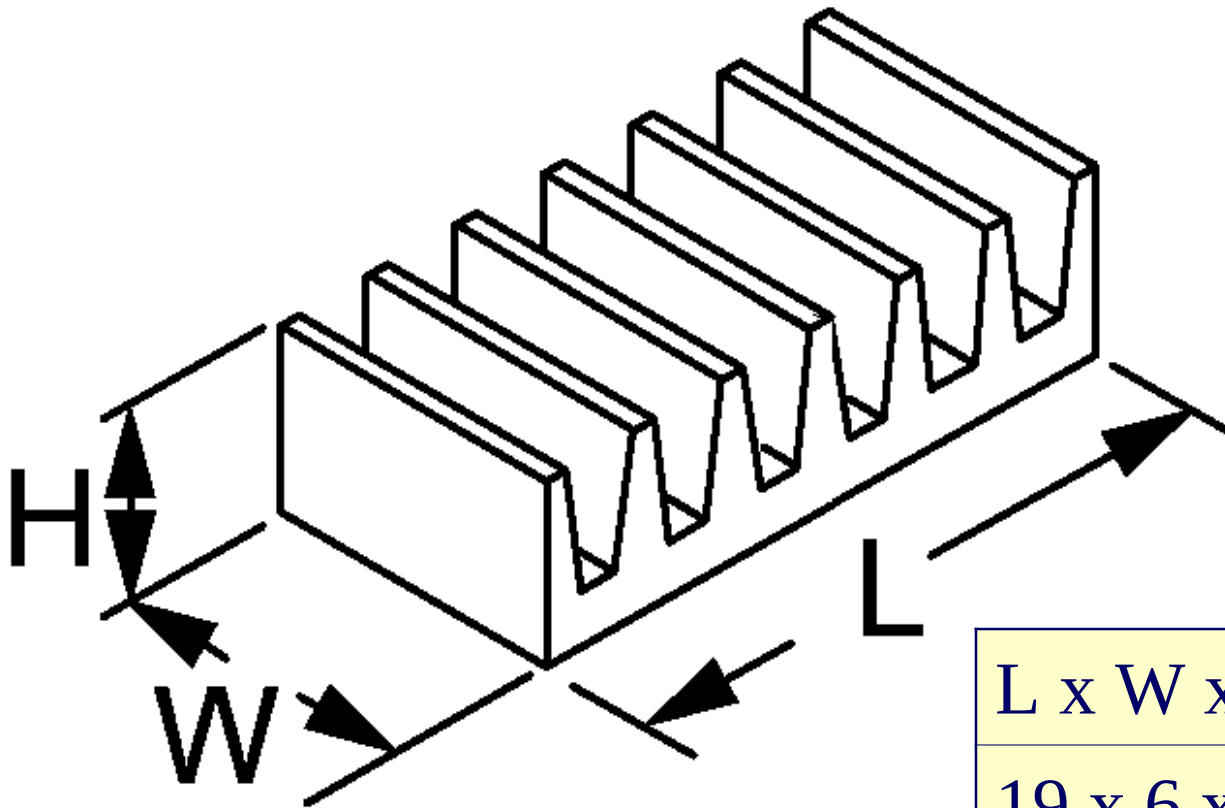


Температуру споја T_J не можемо мјерити, али, с друге стране, температуру кућишта можемо лако мјерити. Зато произвођачи дају управо ову карактеристику, јер омогућава лако налажење и провјеру дозвољене дисипације снаге.

Главни параметри хладњака су димензије и термичка отпорност

Наравно, и цијена!!!

Приликом монтаже елемента на хладњак треба осигурати добар термички спој. Површине морају бити равне. Између се ставља лискун, силиконска маст итд.



L x W x H (mm)	Rth(K/W)
19 x 6 x 5	62
32 x 13 x 5	44
51 x 13 x 5	28

Разни облици хладњака за кућишта транзистора TO220, TO3, TO39,...

Fig. 3

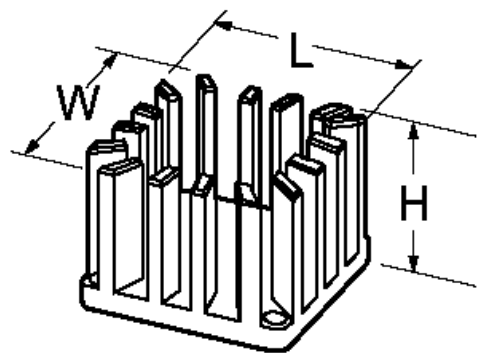


Fig. 4

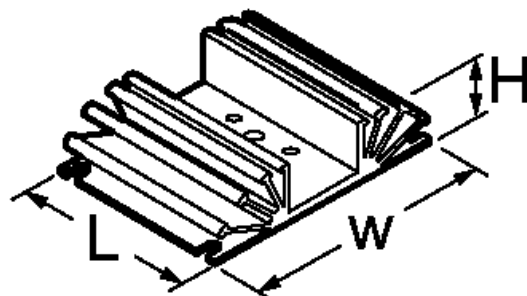


Fig. 5

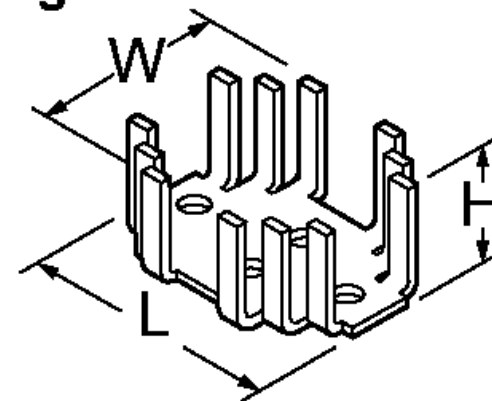


Fig. 9

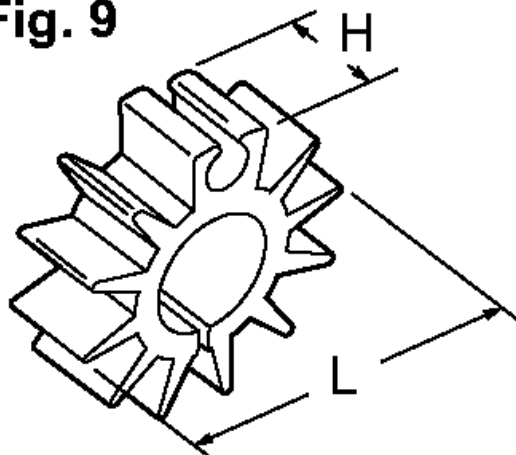


Fig. 10

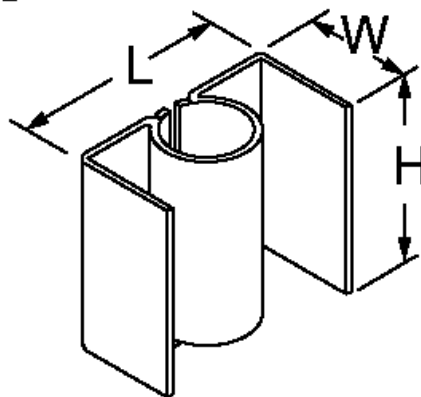
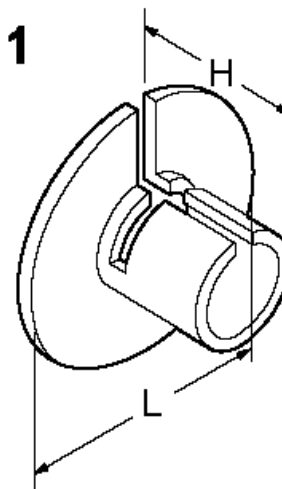
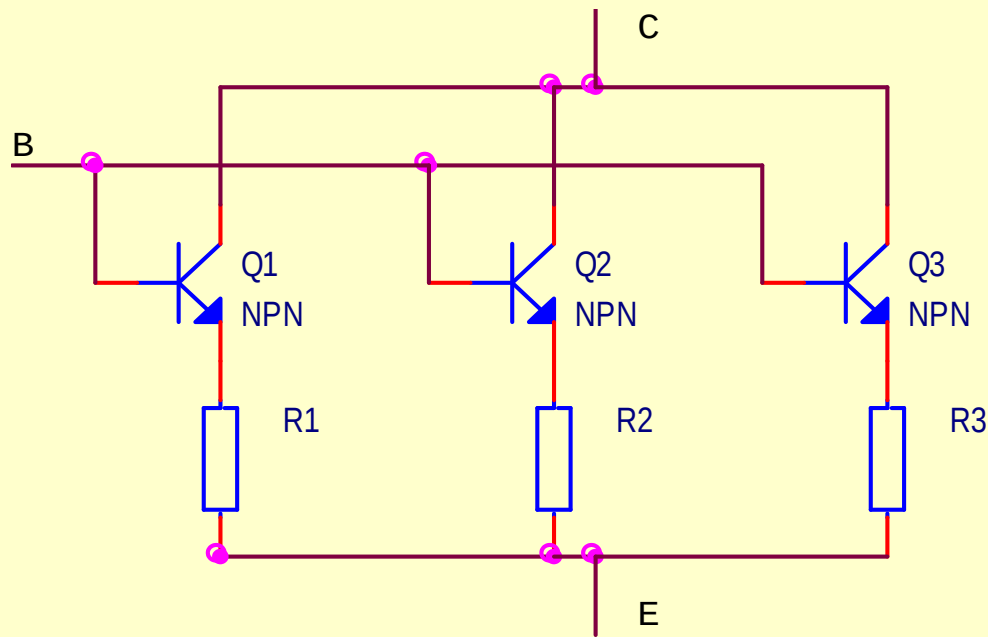


Fig. 11

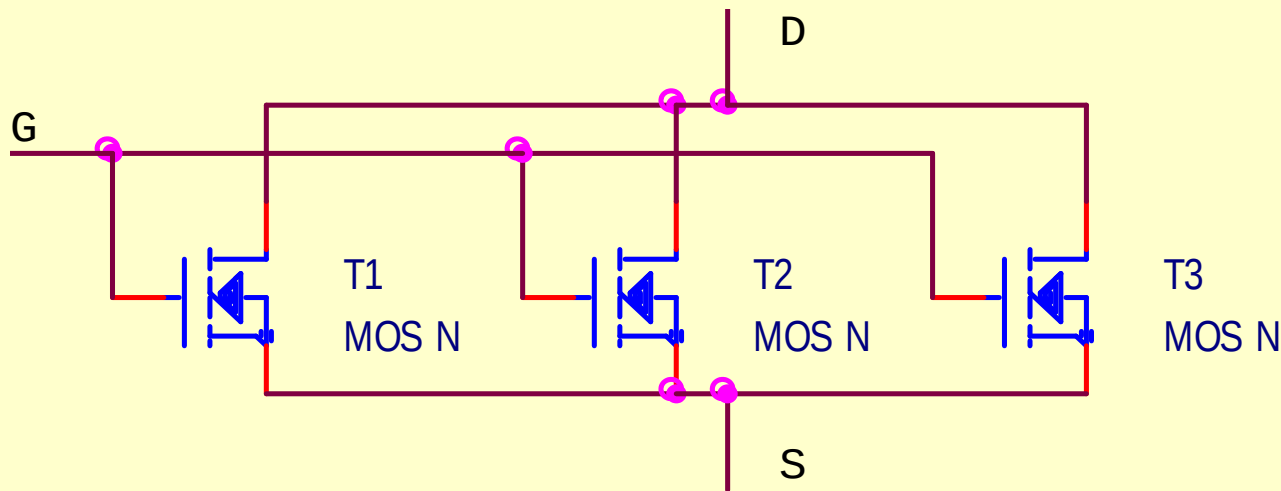


Везивање биполарних транзистора у паралелу није просто



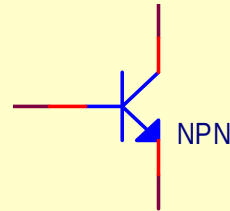
Код биполарних транзистора V_{BE} има негативан температурни коефицијенат ($-2\text{mV}/^\circ\text{C}$) и зато најтоплији транзистор узима највише струје од побудног извора. Зато се постављају емиторски отпорници ради спречавања “крађе струје”.

MOSFET-ови се веома лако везују у паралелу



MOSFET-ови имају позитиван температурни коефицијент отпорности канала, тако да најтоплији транзистор има највећу отпорност R_{DS} па се струја код њега смањује. Хладнији транзистори преузимају на себе струју. Зато нису потребни елементи за уједначавање струја.

Најважније карактеристике транзистора снаге BUT11A



Absolute Maximum Ratings $T_C=25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Value	Units
V_{CB0}	Collector-Base Voltage		
	: BUT11F	850	V
	: BUT11AF	1000	V
V_{CEO}	Collector-Emitter Voltage		
	: BUT11F	400	V
	: BUT11AF	450	V
V_{EBO}	Emitter-Base Voltage	9	V
I_C	Collector Current (DC)	5	A
I_{CP}	*Collector Current (Pulse)	10	A
I_B	Base Current (DC)	2	A
I_{BP}	*Base Current (Pulse)	4	A
P_C	Collector Dissipation ($T_C=25^\circ\text{C}$)	40	W
T_J	Junction Temperature	150	$^\circ\text{C}$
T_{STG}	Storage Temperature	- 65 ~ 150	$^\circ\text{C}$

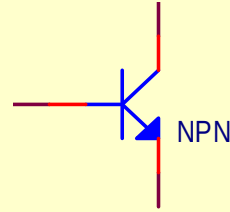
Electrical Characteristics $T_C=25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Test Condition	Min.	Typ.	Max.	Units
$V_{CEO(sus)}$	* Collector-Emitter Sustaining Voltage					
	: BUT11F	$I_C = 100\text{mA}, I_B = 0$	400			V
	: BUT11AF		450			V

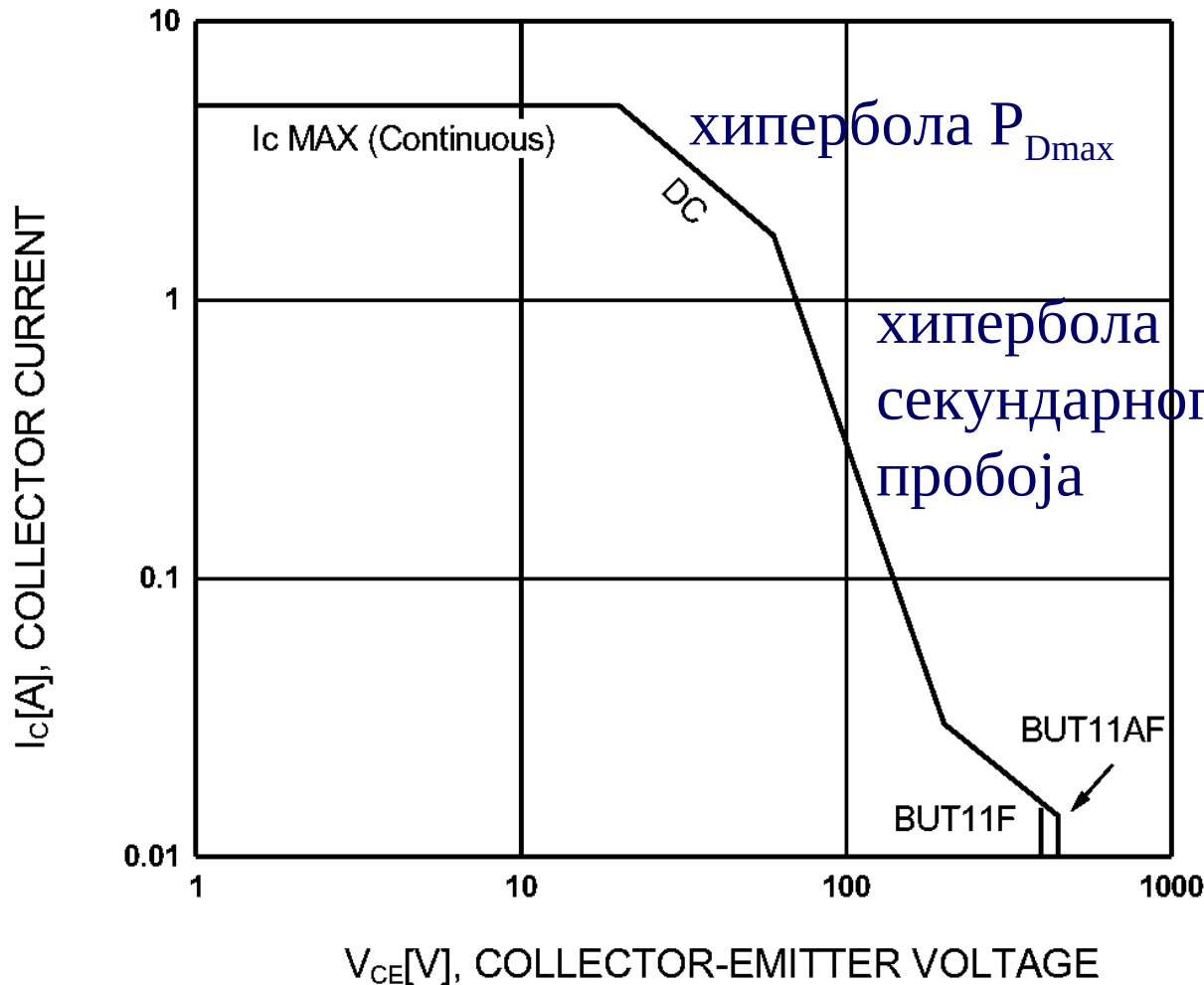
Thermal Characteristics $T_C=25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Typ	Max	Units
$R_{\theta JC}$	Thermal Resistance, Junction to Case		3.125	$^\circ\text{C/W}$

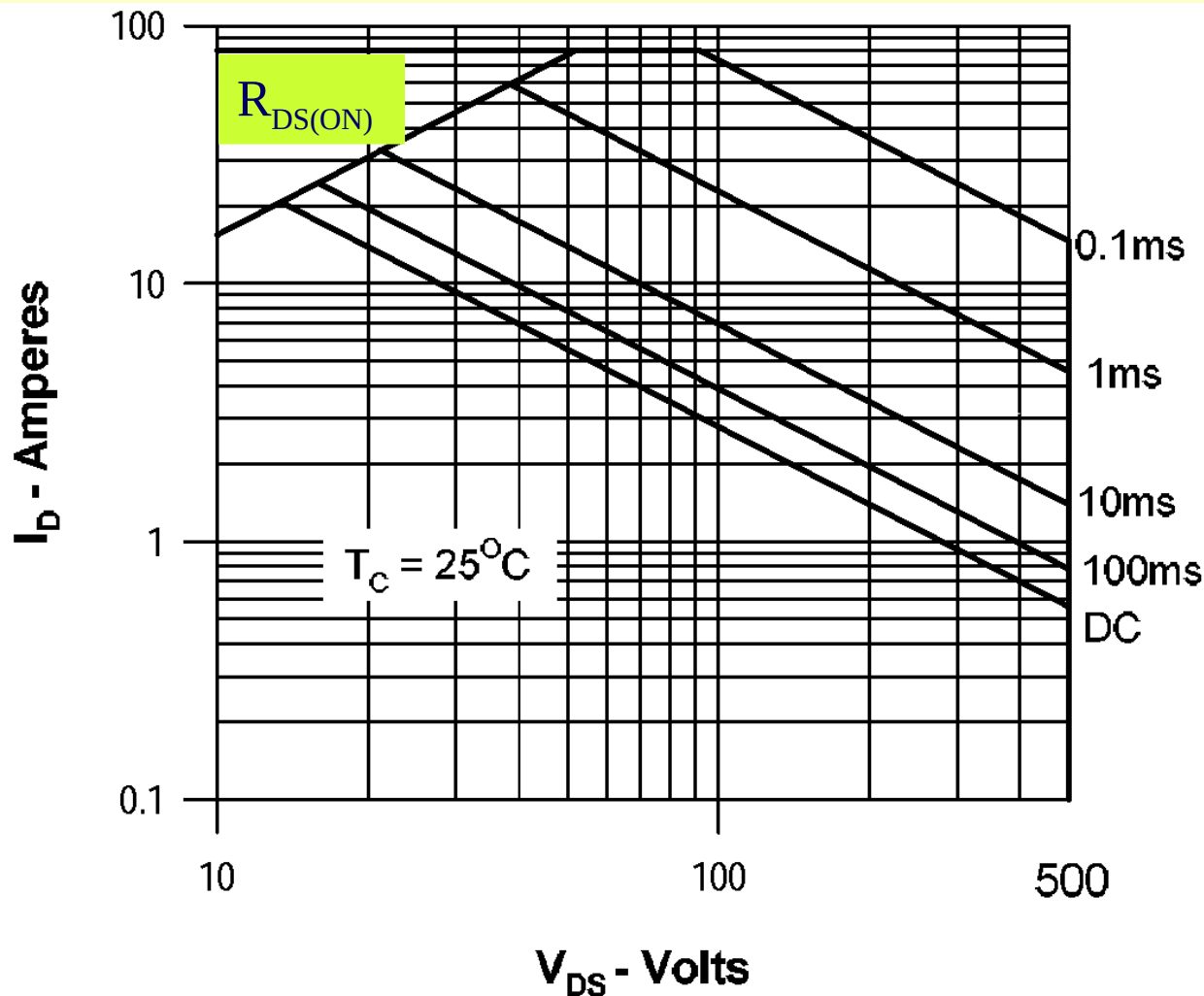
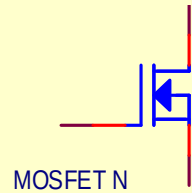
Област безбједног рада за биполарни транзистор снаге



Због опасности од секундарног пробоја, при вишим напонима дозвољена струја колектора се нагло смањује. Погледајте: [SOA wikipedia](https://en.wikipedia.org/wiki/SOA)

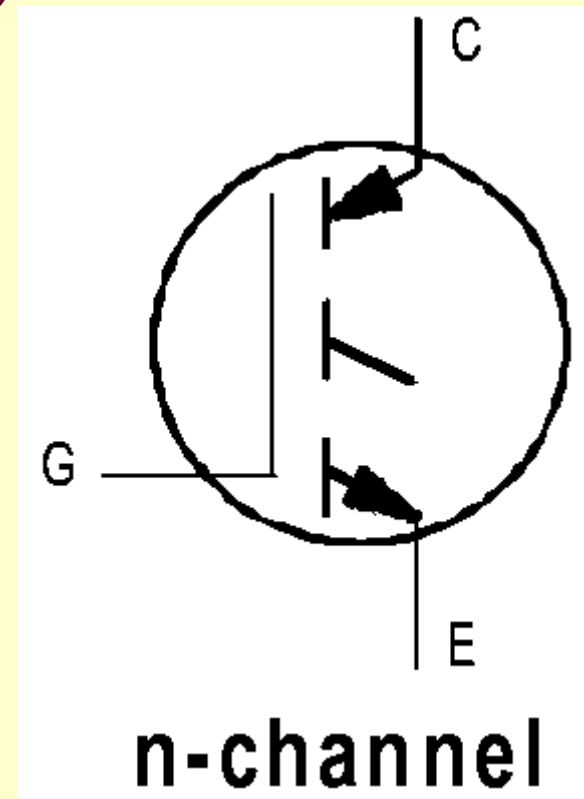
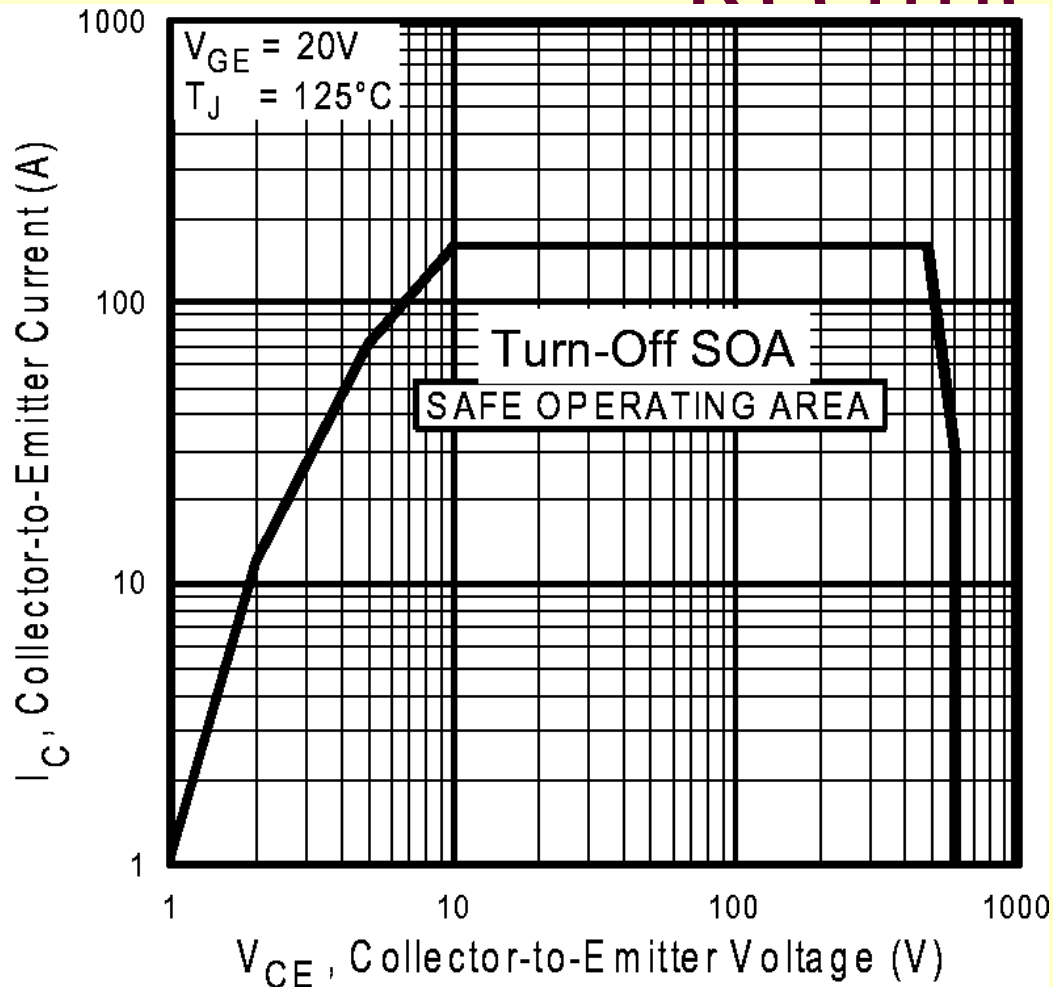


Област безбједног рада за MOSFET (IRFP460)



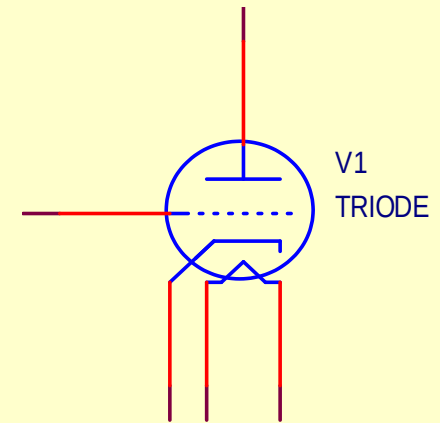
Код MOSFET-ова нема секундарног пробоја, тако да су дозвољене велике струје I_D и при високим напонима V_{DS} . Са лијеве се стране се види ограничење по струји због коначног R_{DS} , а не због термичког оптерећења.

Област безбједног рада за IGBT (IRG4PC40U International Rectifier)



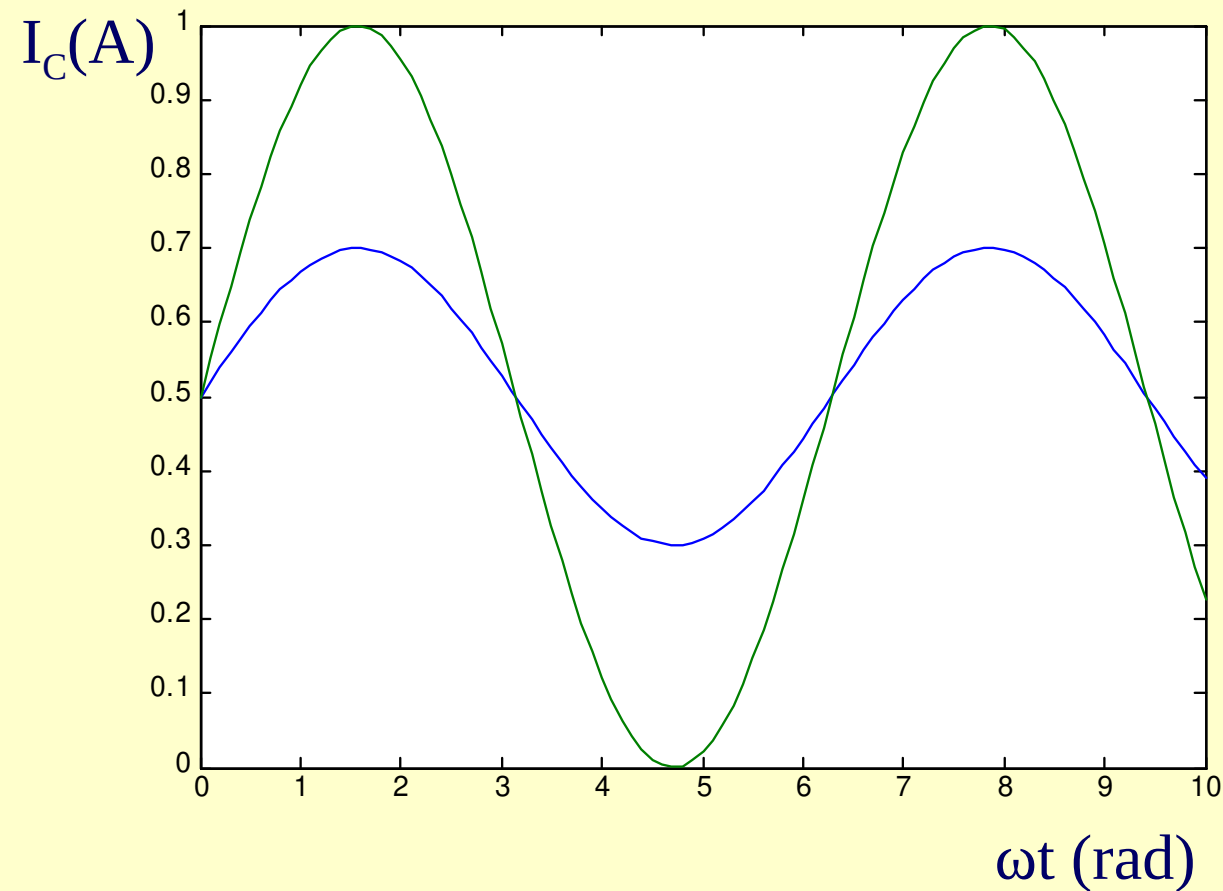
Постоје разне класе појачања, дакле, ни једна није најбоља

- А, А1, А2, чиста А класа, ...
- А/АВ, АВ, АВ1, АВ2
- В, С, D, Е, F, G, H, S



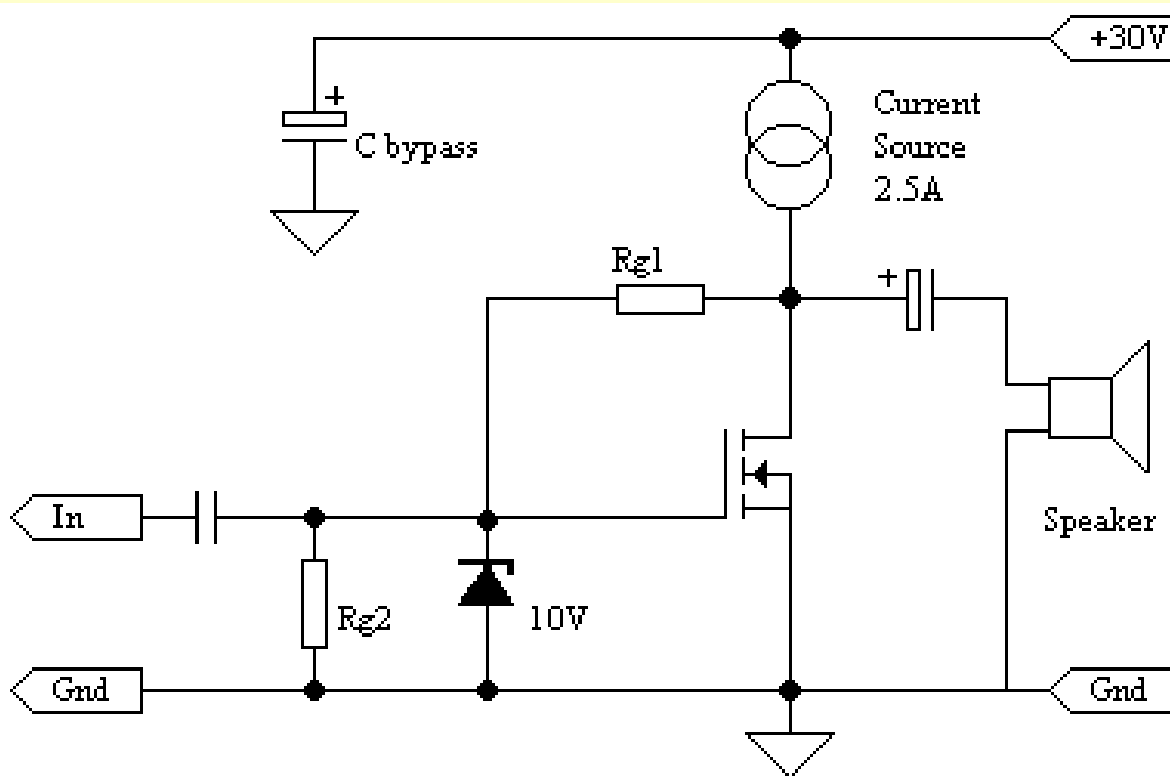
Класу одређује трајање и начин провођења струје у току периоде побудног напона. У класи А транзистор проводи свих 360° . У класи Б транзистор води 180° , а у класи Ц још мање. Класе Ц и Е се користе искључиво у радиотехници. Подкласе са цифрама 1 или 2 постоје код електронских лампи и указују да ли у току периоде сигнала тече струја решетке. У подкласи 1 нема струје решетке ни у једном тренутку, док у подкласи 2 у појединим дјеловима периоде тече струја решетке.

У класи А транзистор проводи 360° у току периоде



У мирном режиму, када нема побудног сигнала, тече значајна струја и стварају се велики губици снаге. Највећа ефикасност је за максималну побуду. У тзв. “чистој А класи” однос максималне према минималној струји је 2:1 па су губици још већи.

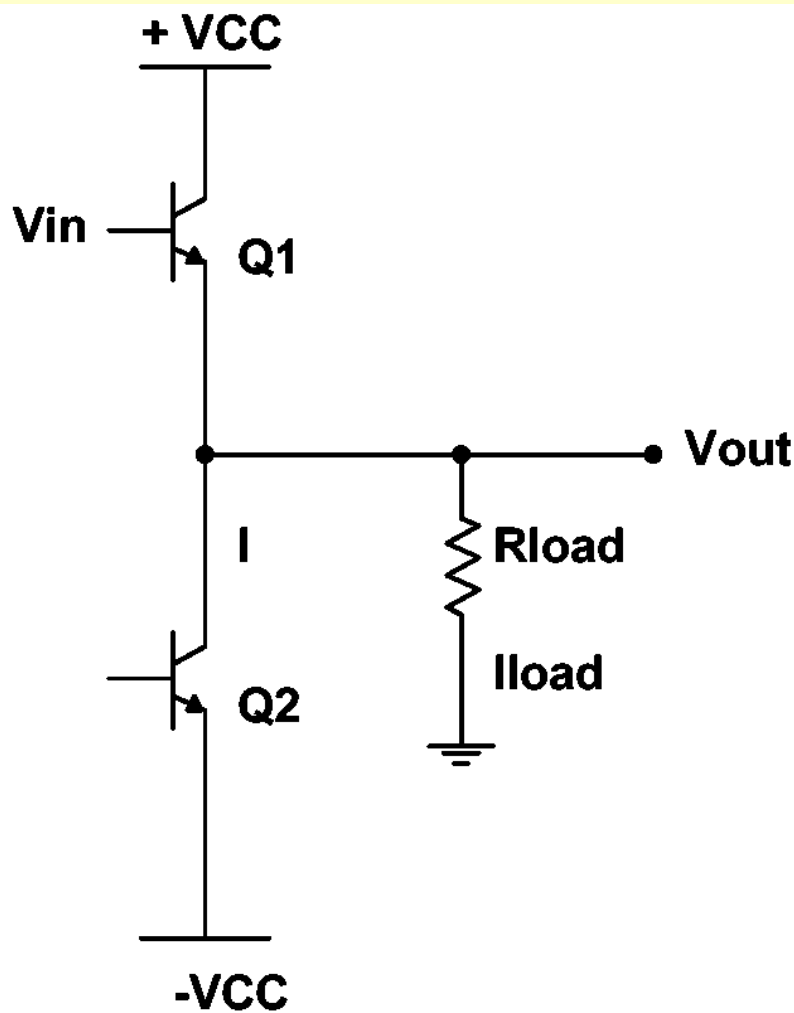
MOSFET појачавач снаге у класи “А”



При максималној побуди, амплитуда сигнала на потрошачу достиже 15V. Ако узмемо да тада кроз потрошач тече 2.5A, добијамо $P_{Kmax} = V_m * I_m / 2 = 18.75W$
 $\eta_{max} = 25\%$

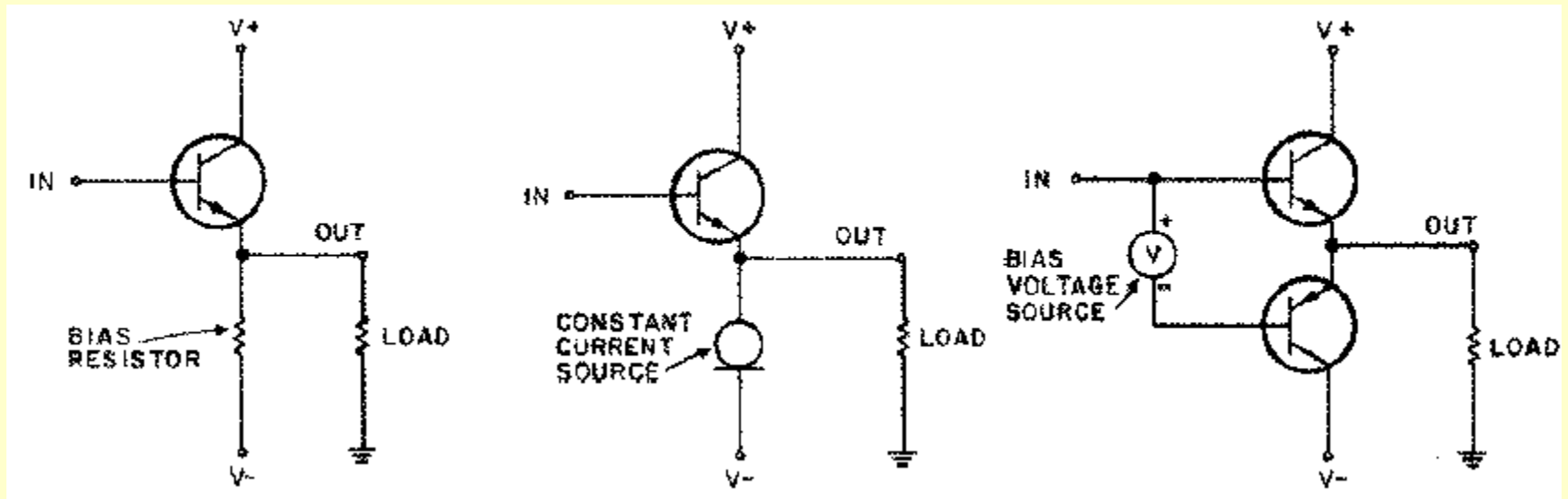
Снага батерије не зависи од сигнала и стално је $30V * 2.5A = 75W$.
У одсуству побуде, пола те снаге иде на гријање транзистора, а друга половина на гријање струјног извора.

Појачавач снаге у класи А са биполарним транзисторима



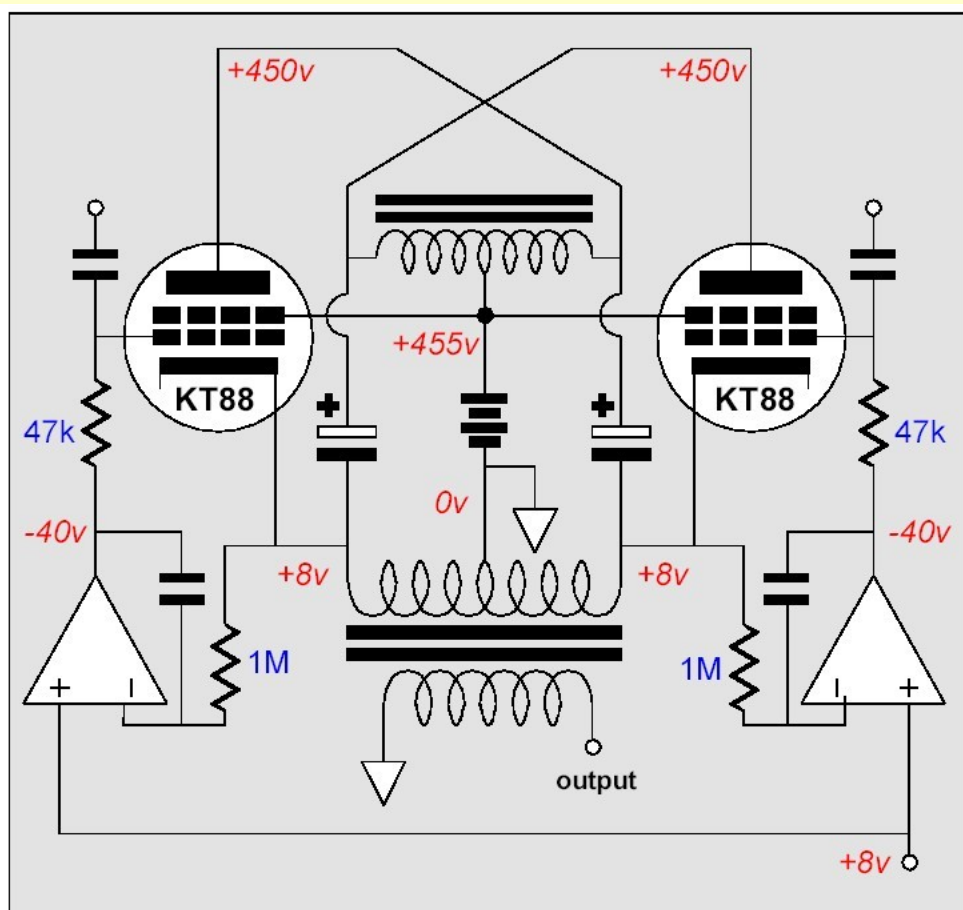
Транзистор Q1 појачава сигнал, а транзистор Q2 има улогу струјног извора (или прецизније – струјног увира). Употребом два извора за напајање могуће је потрошач везати директно без кондензатора за одвајање једносмјерне компоненте. Ефикасност је највише 25% и то при максималној побуди.

Варијанте појачавача у класи А



Са I_m означимо максималну струју потрошача. Прва варијанта је најпростија, али има најмању ефикасност, јер у мировању тече струја већа од I_m . Друго коло је ефикасније, јер у мировању тече струја I_m . Трећа варијанта са напонским праћењем у мировању има 2 пута мању струју од I_m , па је зато најефикаснија. Међутим, и тада је ефикасност највише 50% и то при максималној побуди.

Цијевни појачавач снаге у класи А



Circular, single power supply, ultra-linear KT8 based Class-A amplifier with auto-bias

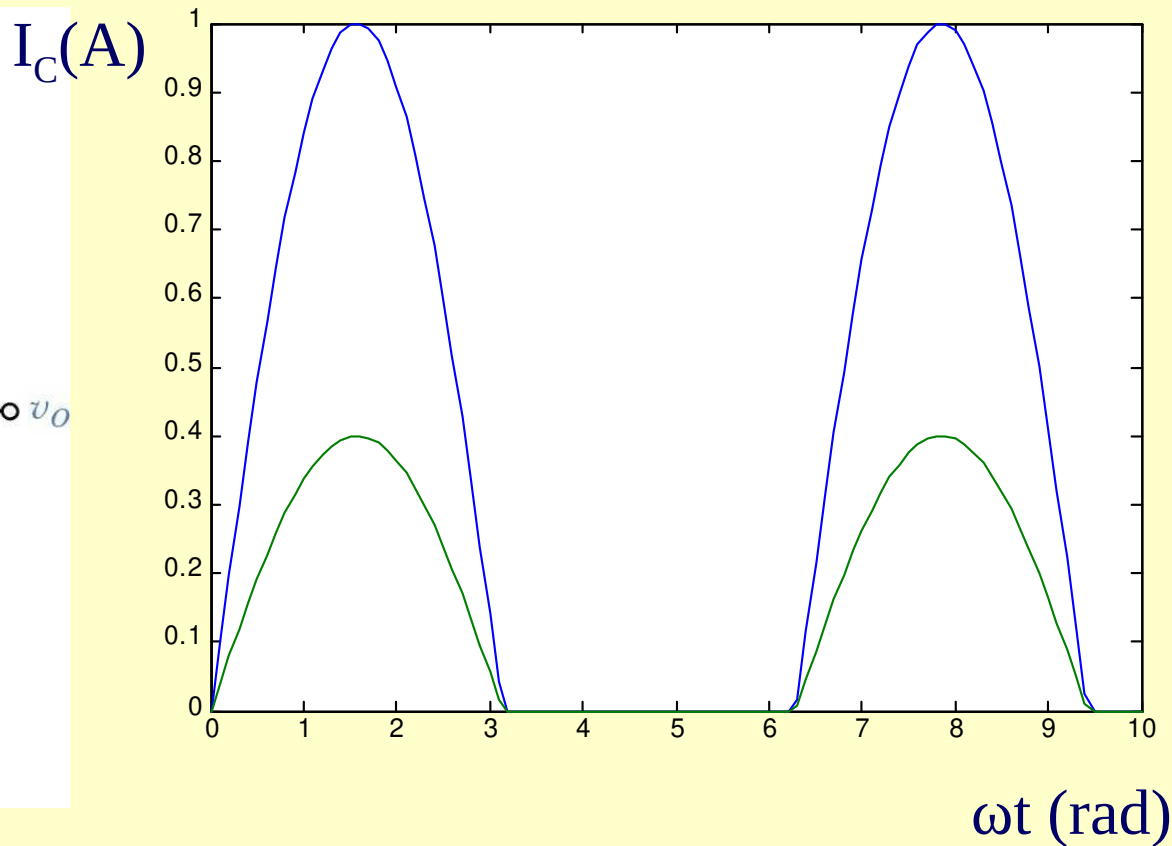
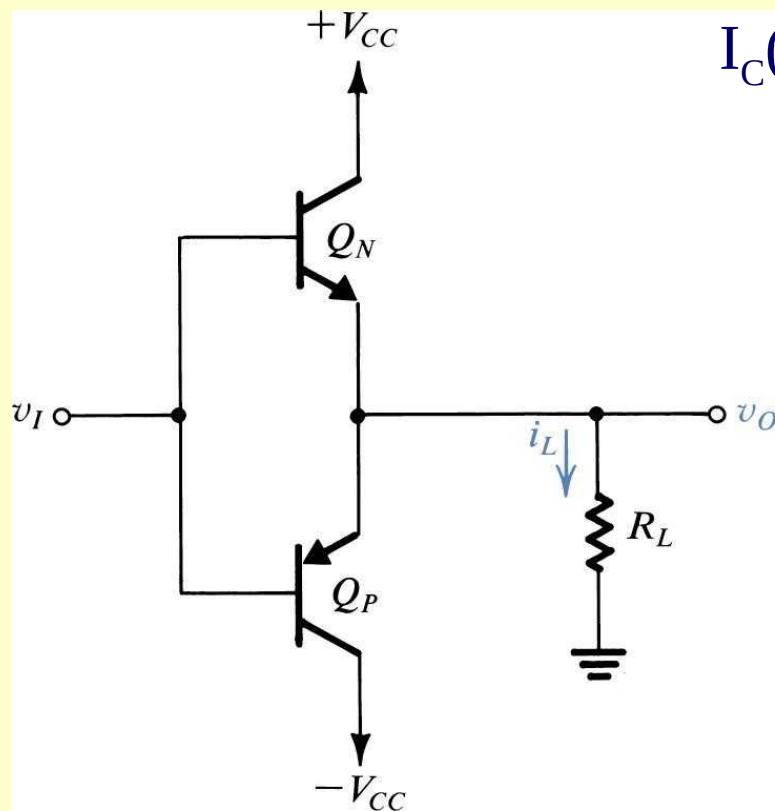
Електронске лампе су на цијени јер дају “топао” звук. Задњих година доживљавају ренесансу. Књиге о лампама се поново штампају, организују дискусионе групе на Интернету итд. Ипак лампе имају озбиљне мане:

- ломљиве су,
- ограничен радни вијек,
- имају проблем микрофоније,
- потребно је гријање катоде,
- раде са високим напонима,
- спрежу се скупим и тешким трансформаторима.

[https://www.kenrockwell.com/
audio/why-tubes-sound-better.htm](https://www.kenrockwell.com/audio/why-tubes-sound-better.htm)

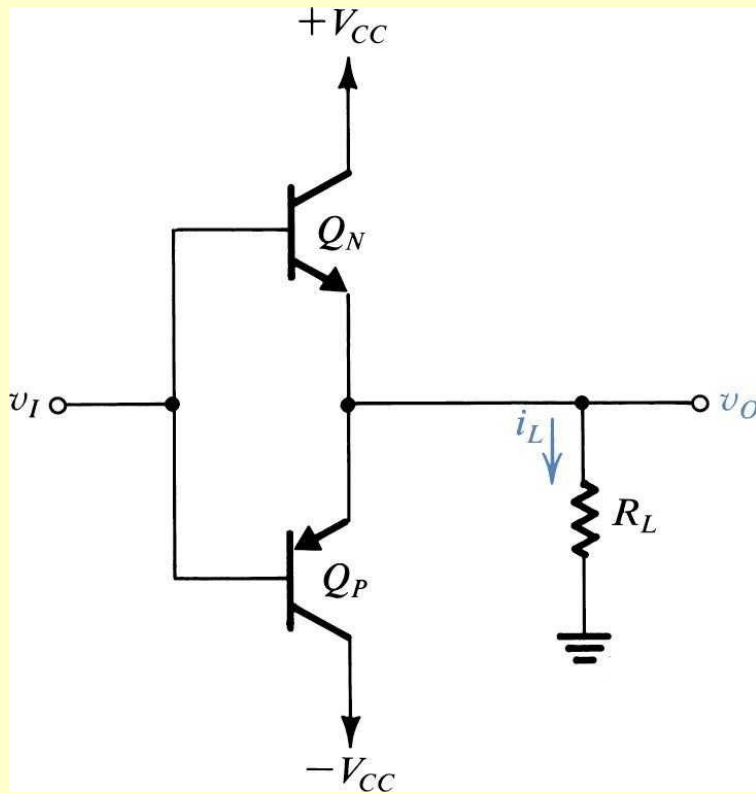


Изразни степен у Б класи



За вријеме позитивне полупериоде проводи Q_N , а за вријеме негативне полупериоде – Q_P . У мировању ни један транзистор не води и нема струје мировања.

Ефикасност у Б класи достиже 78% при максималној побуди



Означимо амплитуду напона на потрошачу са V_m . Тада је:

$$P_K = V_m^2 / 2R_L$$

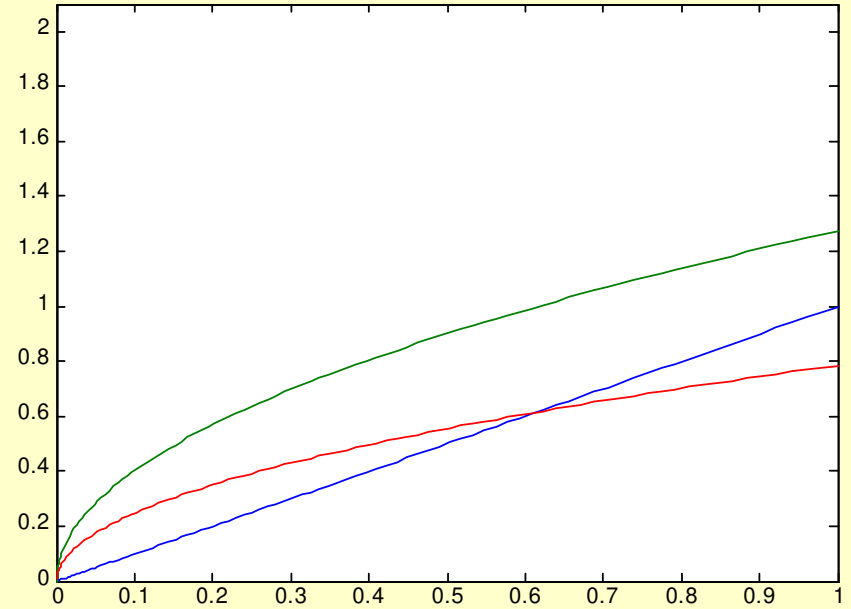
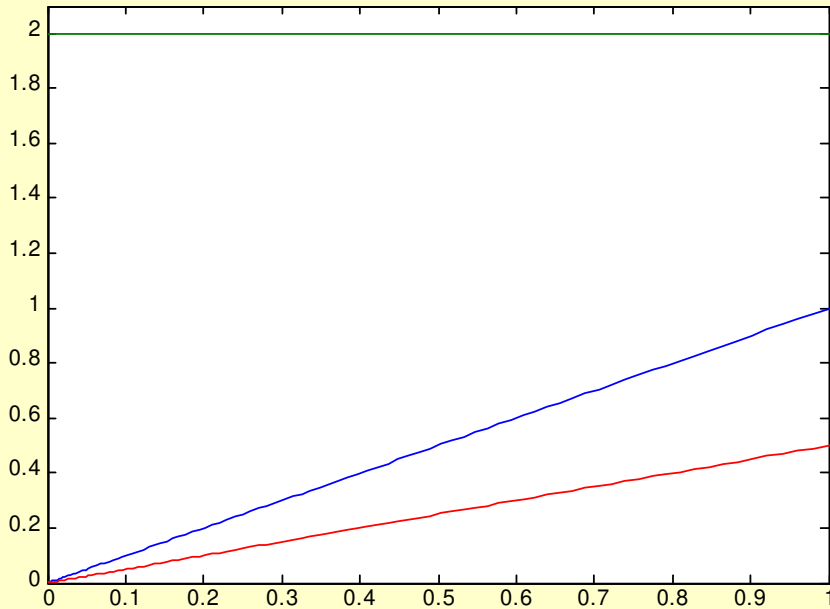
$$P_{CC} = 2 \int_0^{\pi} \frac{1}{2\pi} V_{CC} \frac{V_m}{R_L} \sin(\varphi) d\varphi$$

$$P_{CC} = \frac{2}{\pi} V_{CC} \frac{V_m}{R_L}$$

$$\eta = P_K / P_{CC} = \frac{\pi}{4} \frac{V_m}{V_{CC}}$$

$$\eta_{\max} = \frac{\pi}{4} = 78\% \text{ када је } V_m = V_{CC}$$

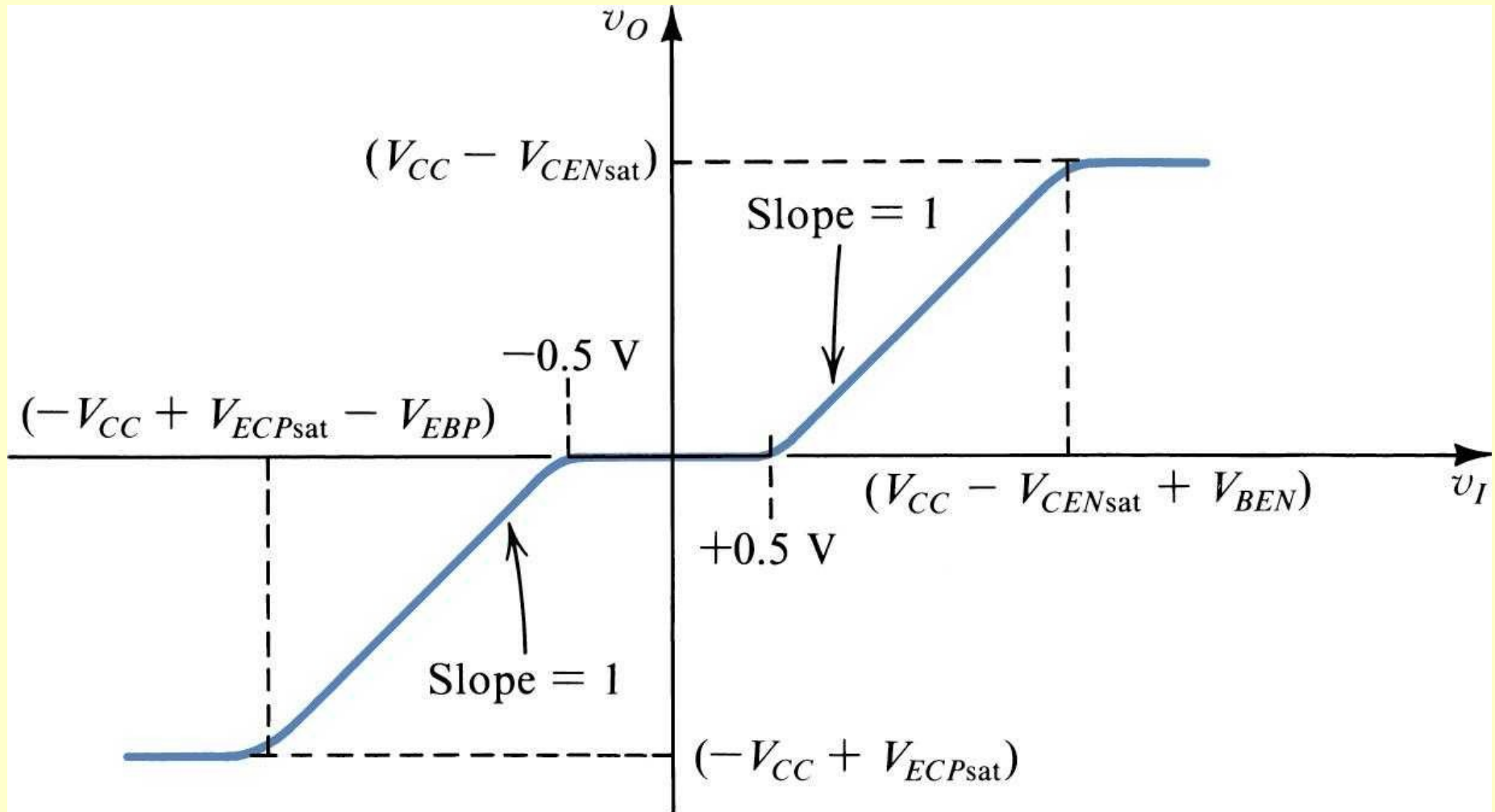
Међутим, важнија је ефикасност при малим побудама



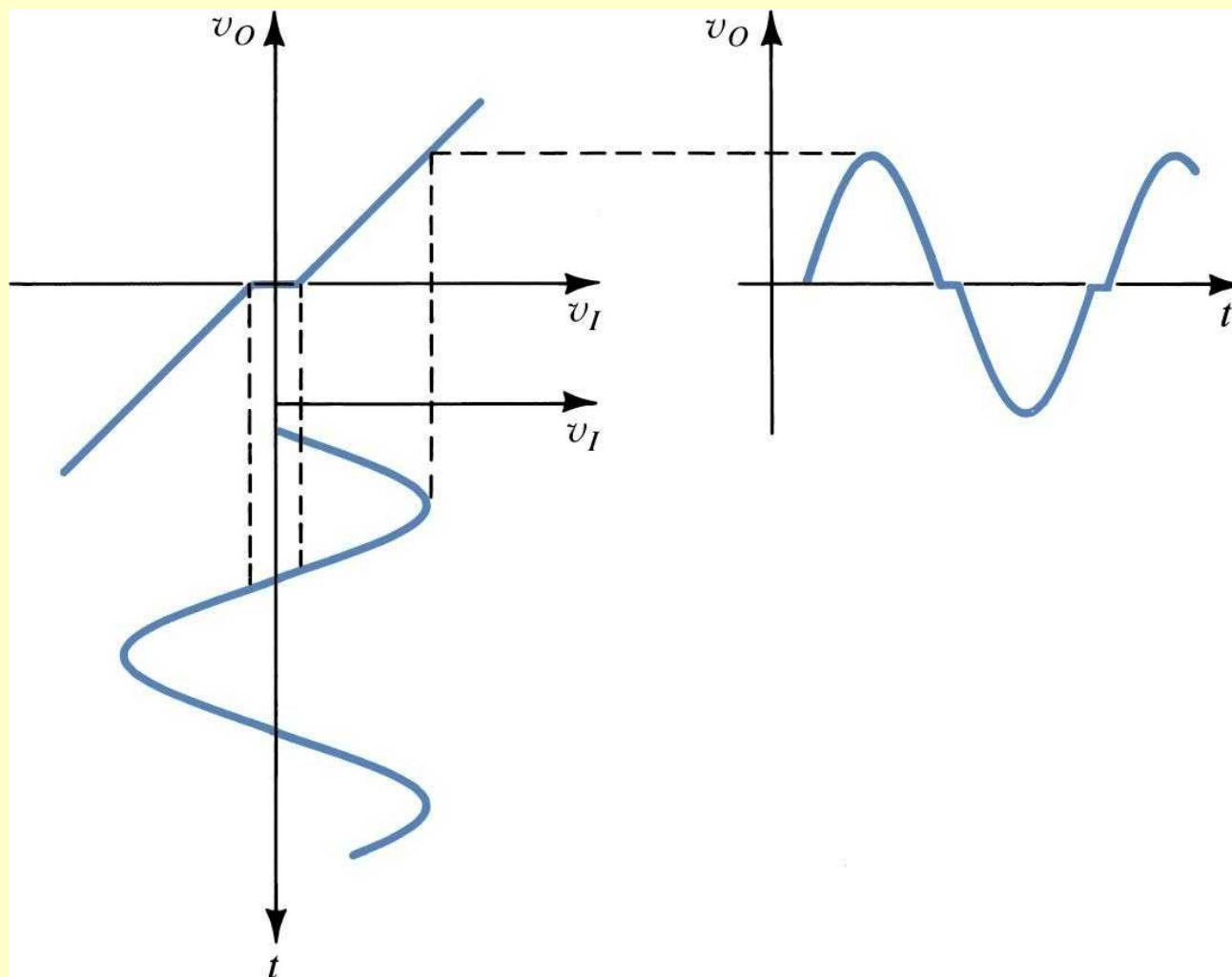
Дати су дијаграми корисне снаге P_K , снаге напајања P_{CC} , и ефикасности η у функцији P_K .

Који дијаграм одговара којој величини и за коју класу?

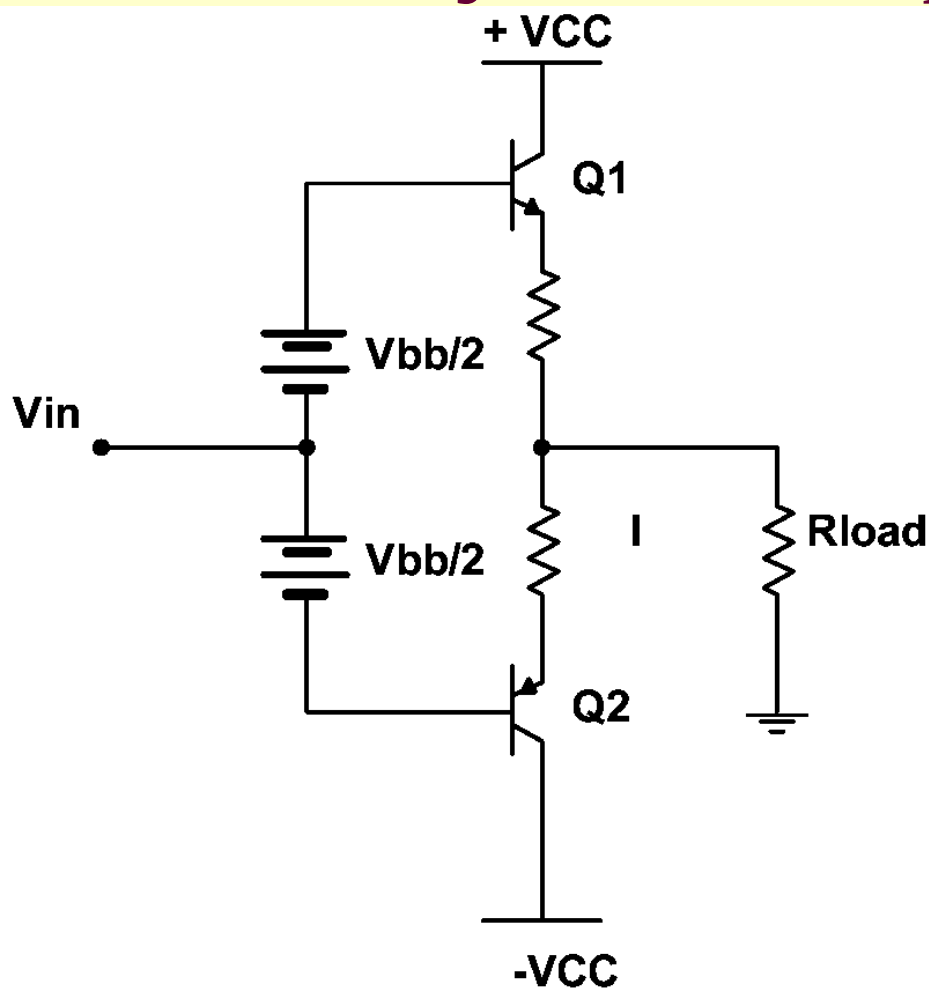
Преносна карактеристика степенa у Б класи



Мртва зона прави “crossover” изобличење сигнала

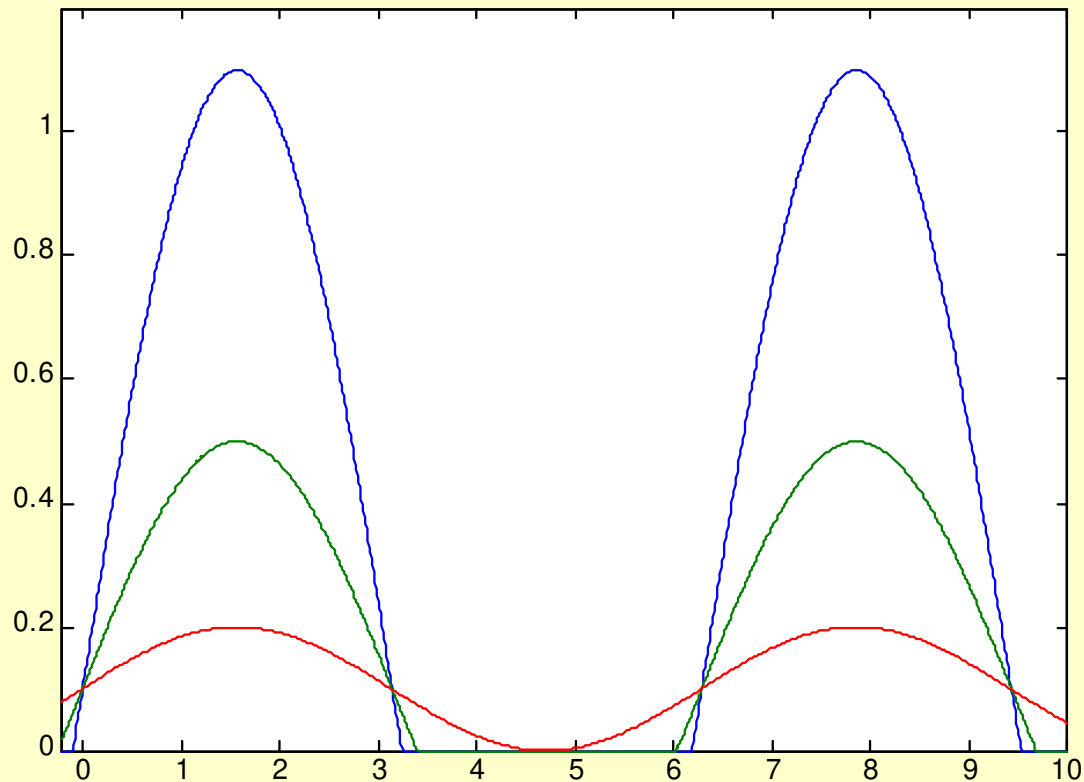


Претполаризација са V_{bb} доводи транзисторе на границу провођења и уклања мртву зону



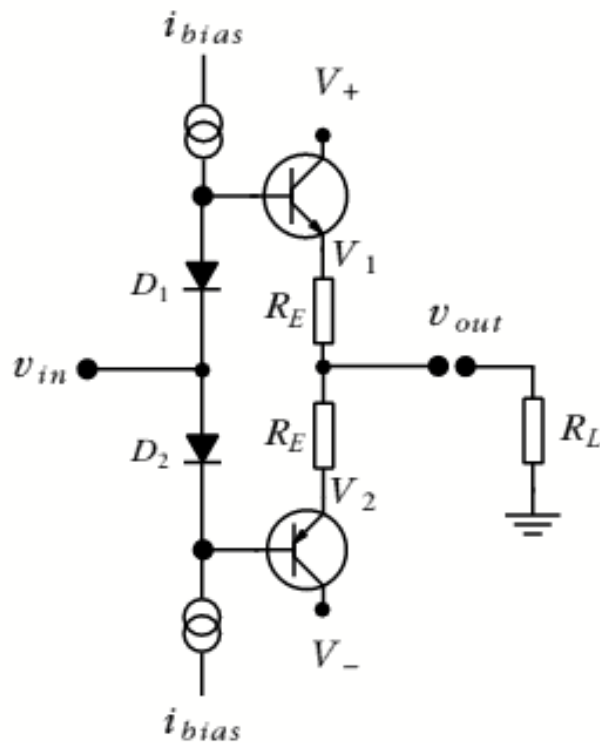
Повећавањем V_{bb} преко прага провођења јавља се струја и у мировању. Тиме се појачавач преводи у тзв. класу АБ. Струја мировања повећава губитке, али значајно смањује изобличења. Највећи број појачавача данас ради у класи АБ.

Струја кроз транзистор када ради у класи АБ

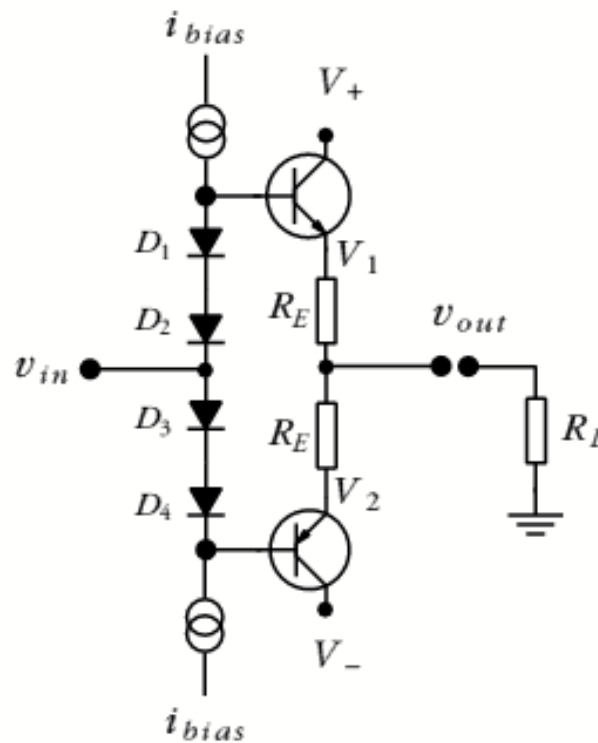


При изузетно малој побуди транзистори проводе свих 360° . Што се побуда више појачава, транзистори све мање проводе и приближавају се углу провођења од 180° као у Б класи.

Претполаризација помоћу диода је боља



2-4a Class B



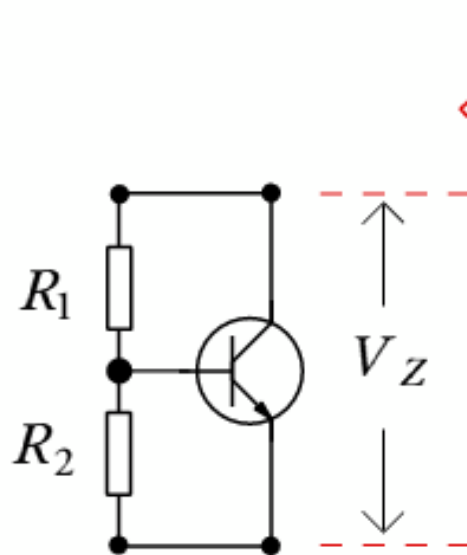
2-4b Class AB

Figure 2-4 — Class B and AB Power stages

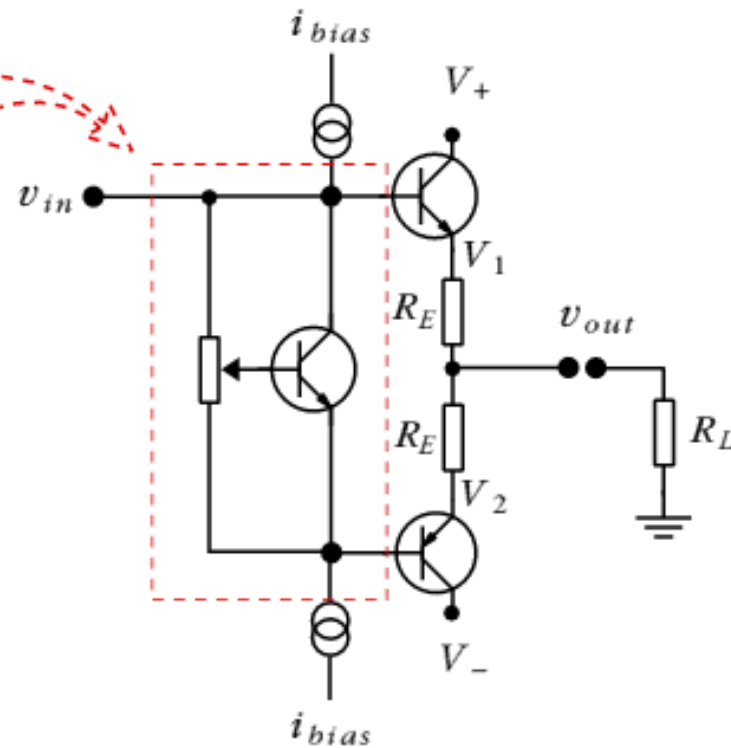
Избором броја диода намјештамо мањи или већи напон претполаризације. Диоде се често монтирају на исти хладњак са излазним транзисторима да би компензовале њихове термичке промјене V_{BE} .

Гумена диода - умноживач V_{BE}

Чему је једнако V_Z ?



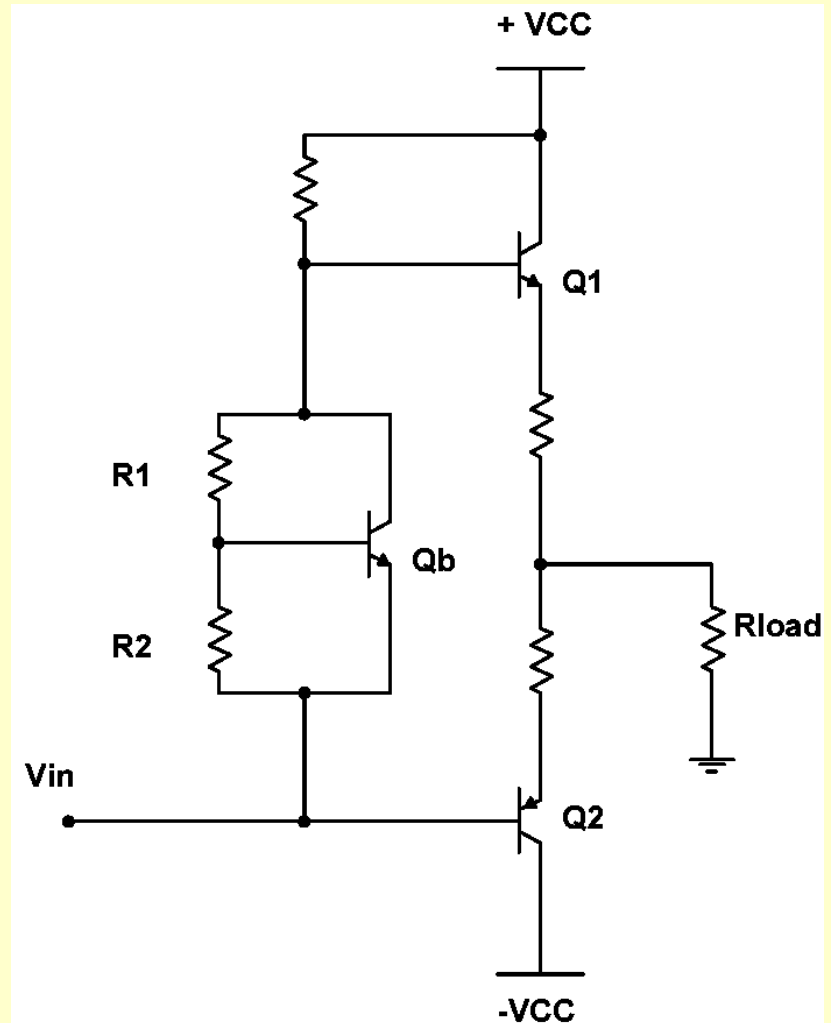
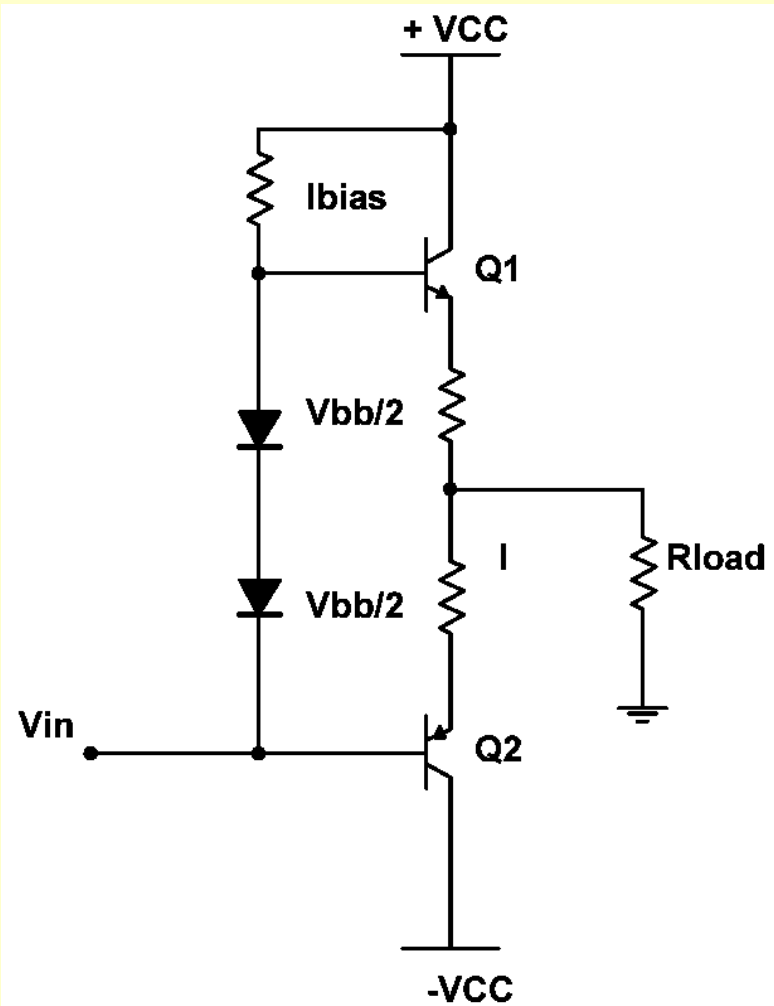
2-5a Rubber diode



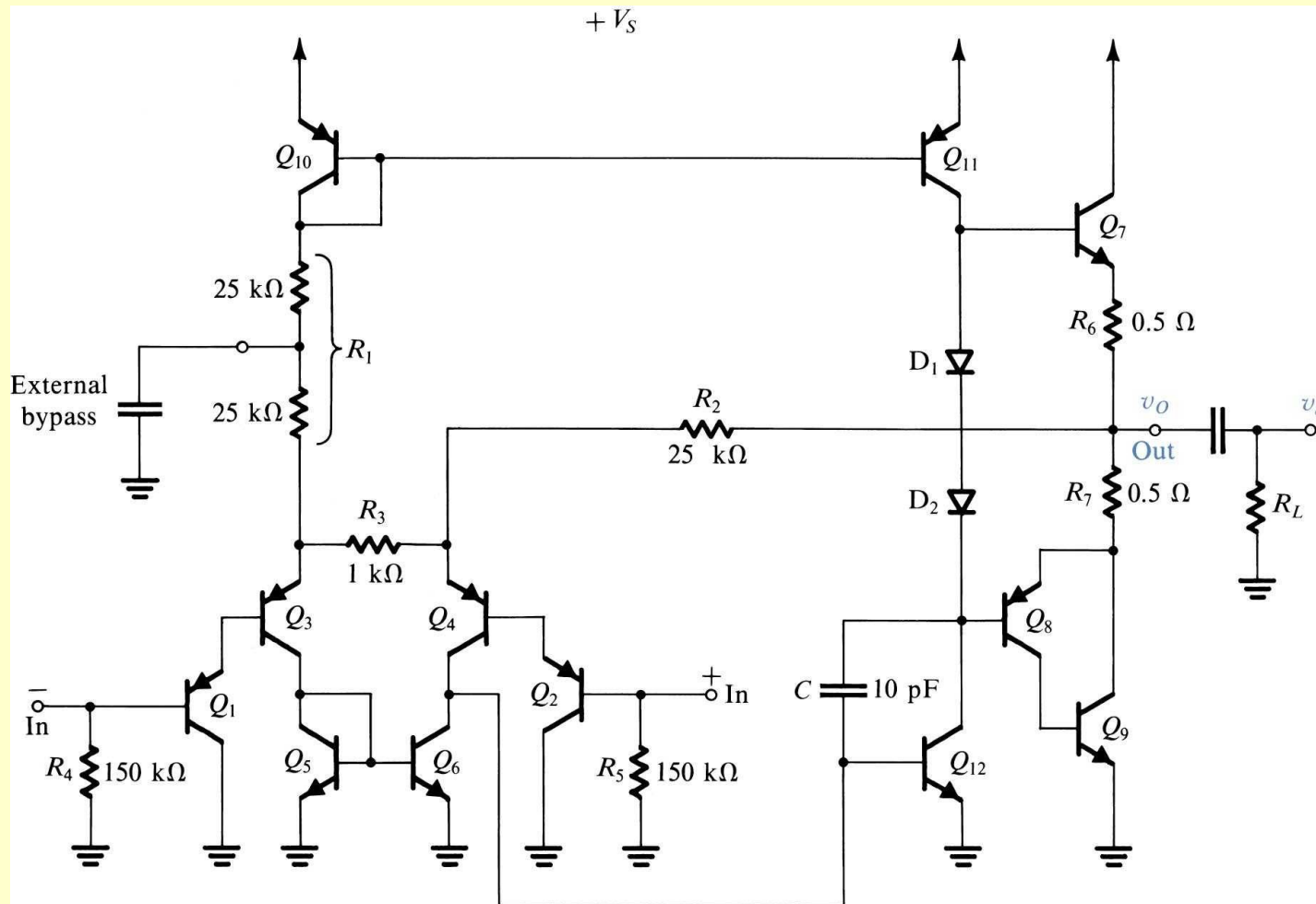
2-5b Rubber diode in use

Figure 2-5 — Rubber diode used to set Quiescent Current

Разне варијанте појачавача у Б класи

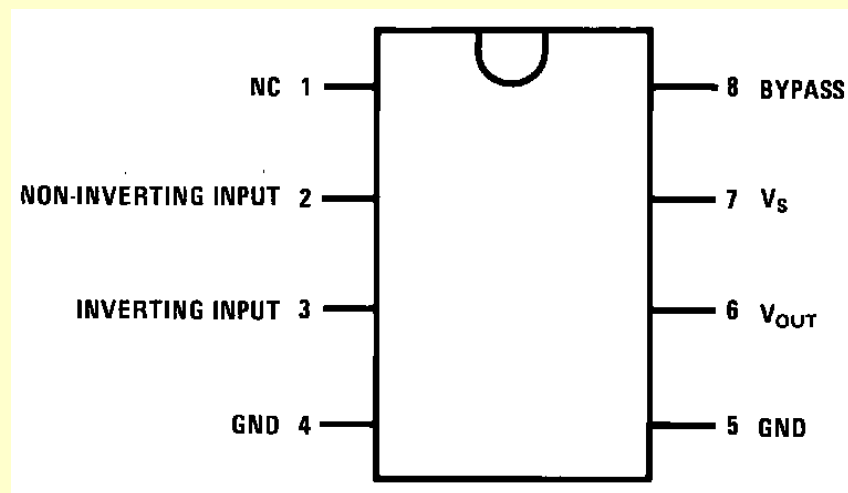
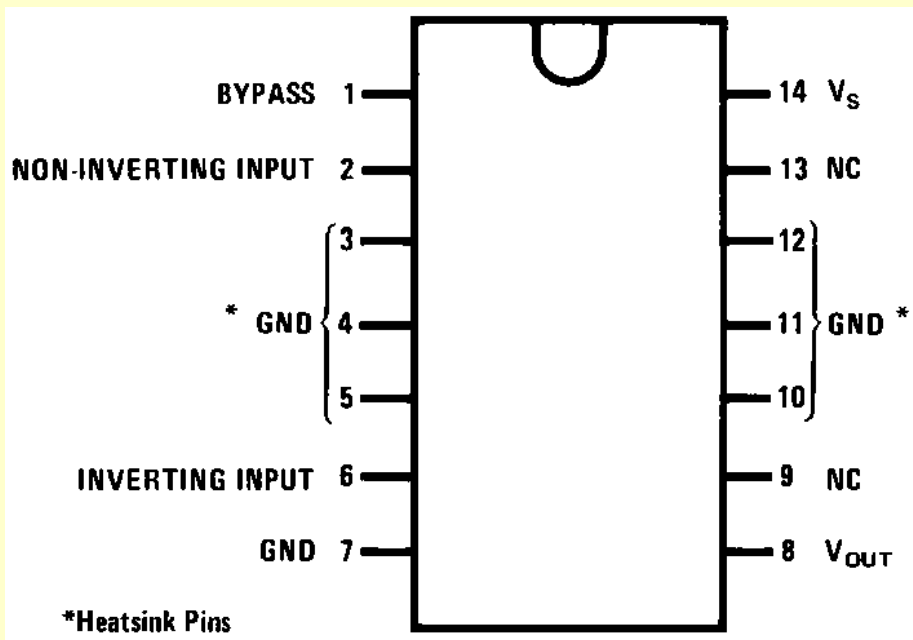


Упрошћена шема интегрисаног појачавача снаге LM380

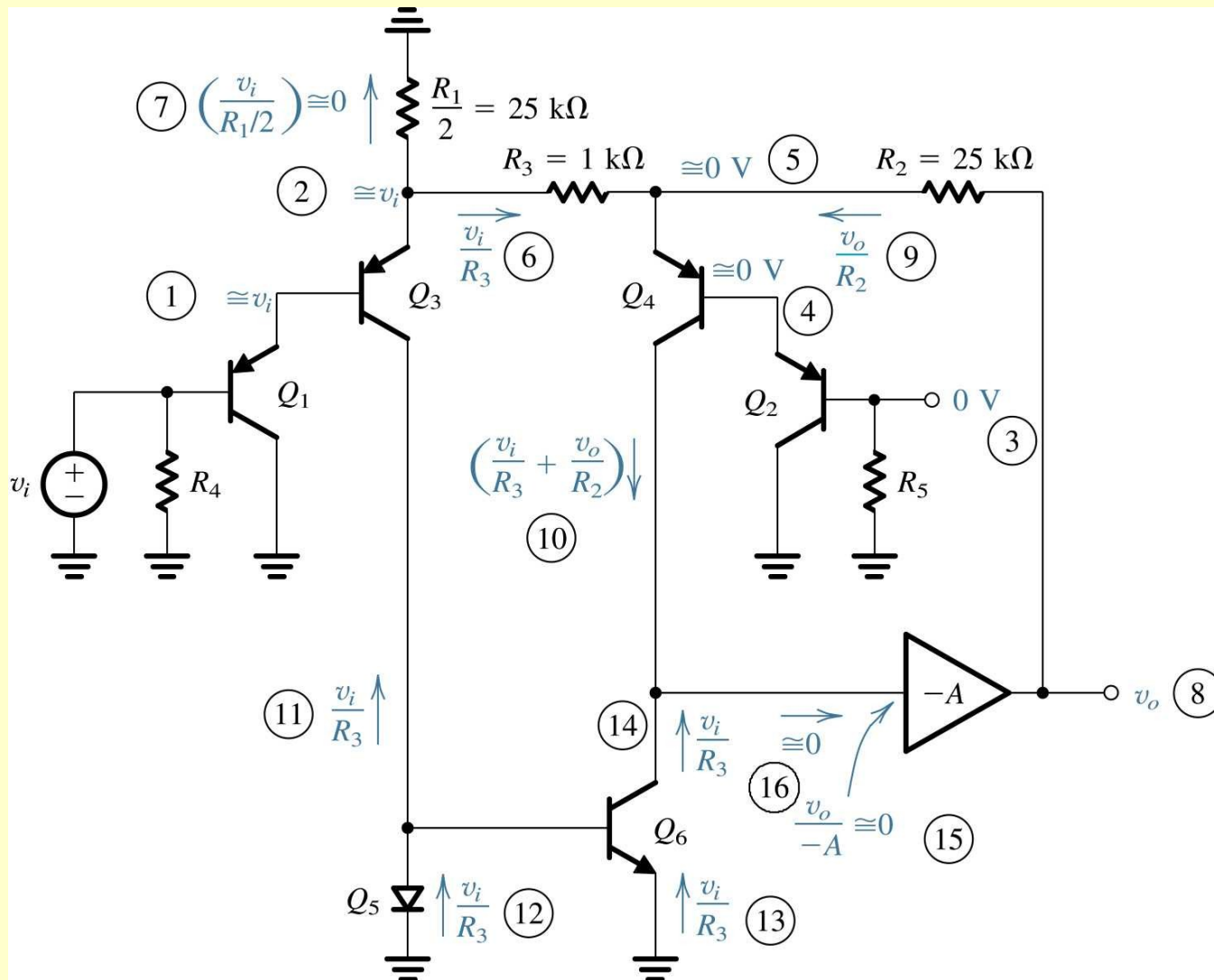


LM380 (National Semiconductor)

Изглед кућишта појачавача LM380



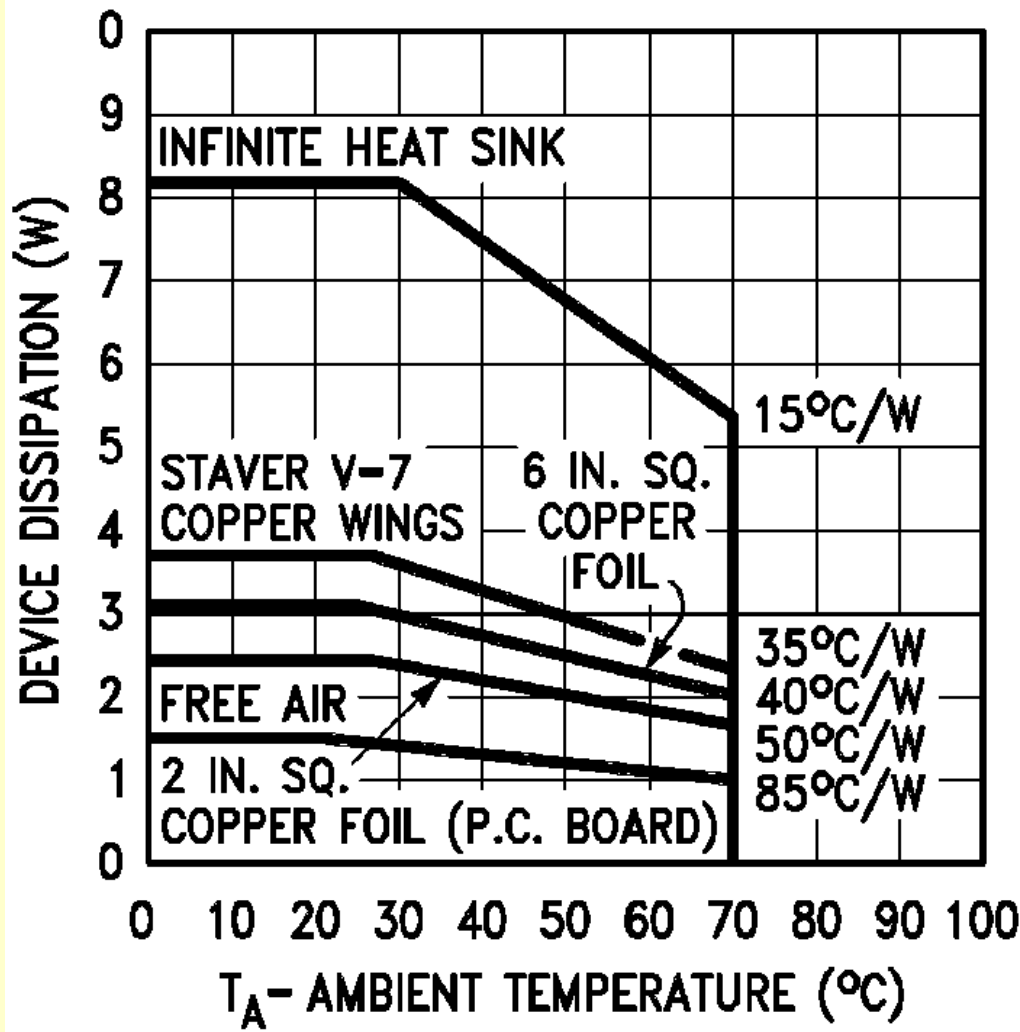
Анализа за мале сигнале



Заокружени бројеви означавају редослијед у току анализе кола.

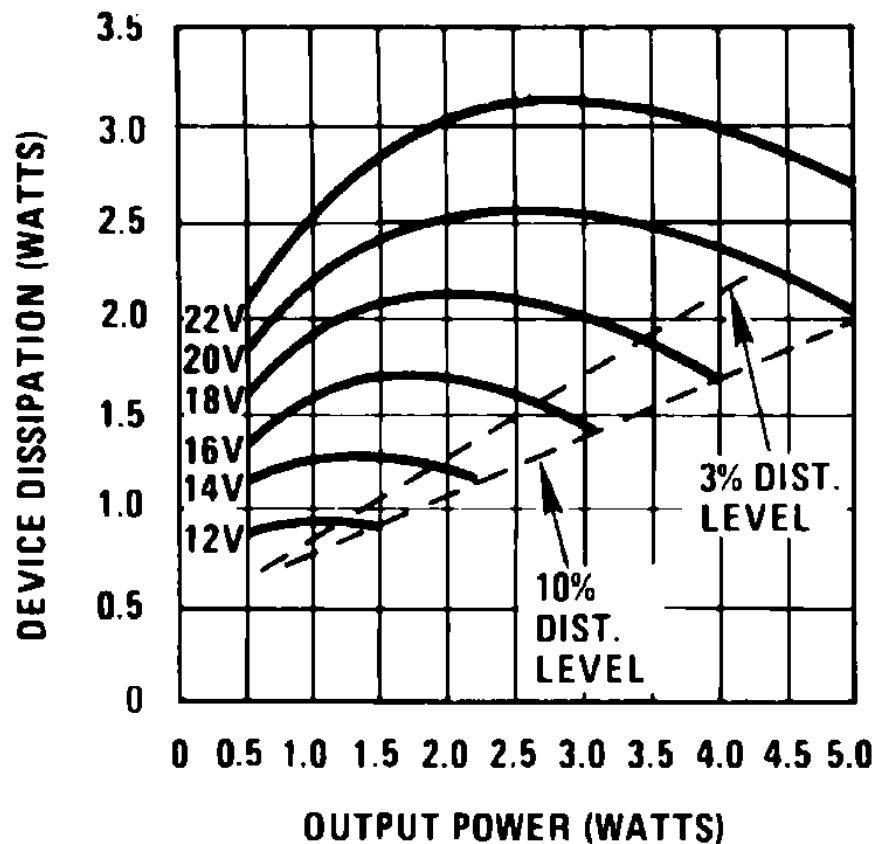
Нађите напонско појачање!

Утицај хладњака на дозвољену снагу дисипације (LM380)

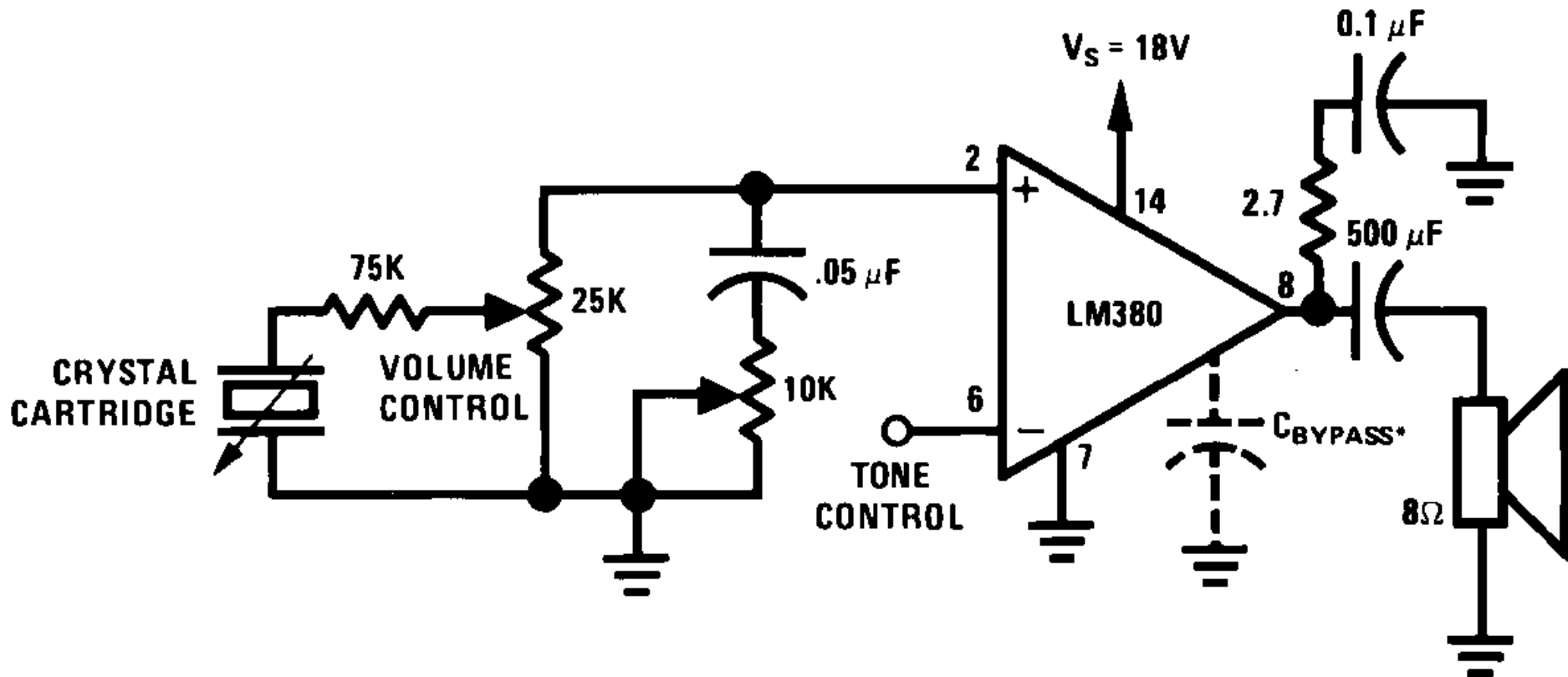


Снага дисипације у зависности од излазне снаге и напона напајања

Device Dissipation vs Output Power — 8Ω Load

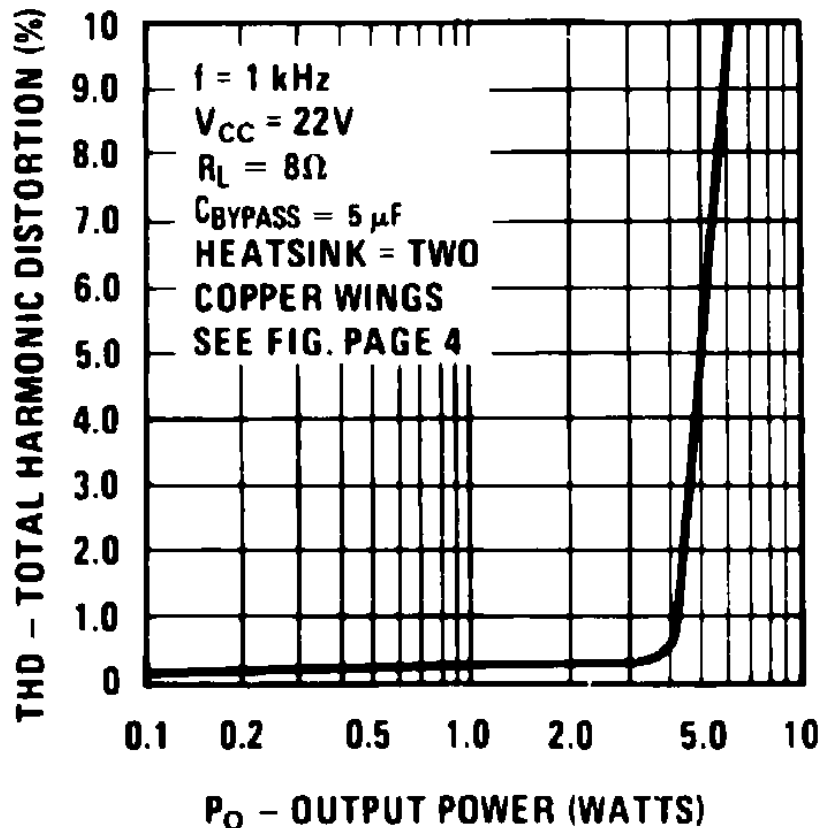


Типична примјена аудио појачавача (LM380)



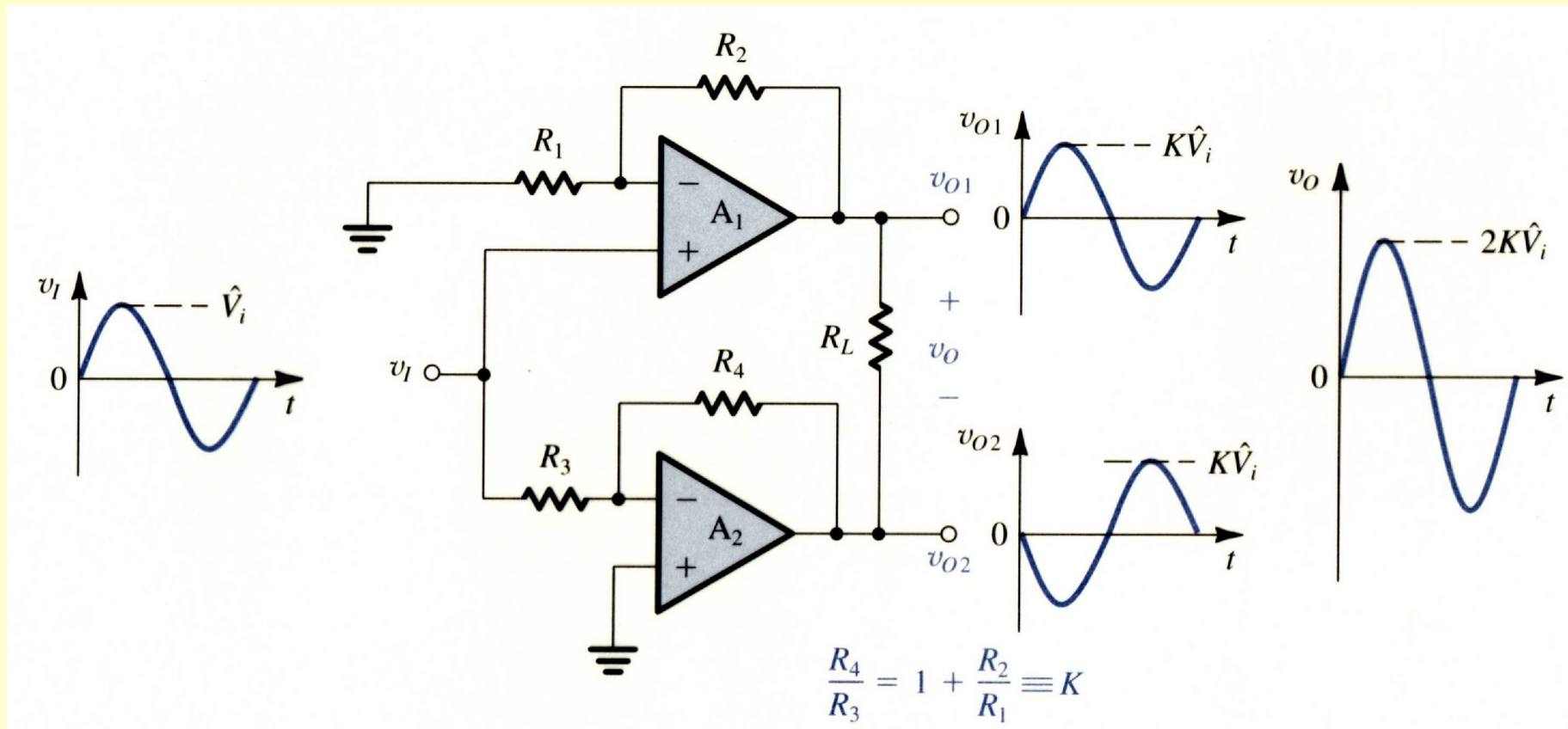
Укупна изобличења “ТНД” у функцији излазне снаге

**Total Harmonic Distortion
vs Output Power**



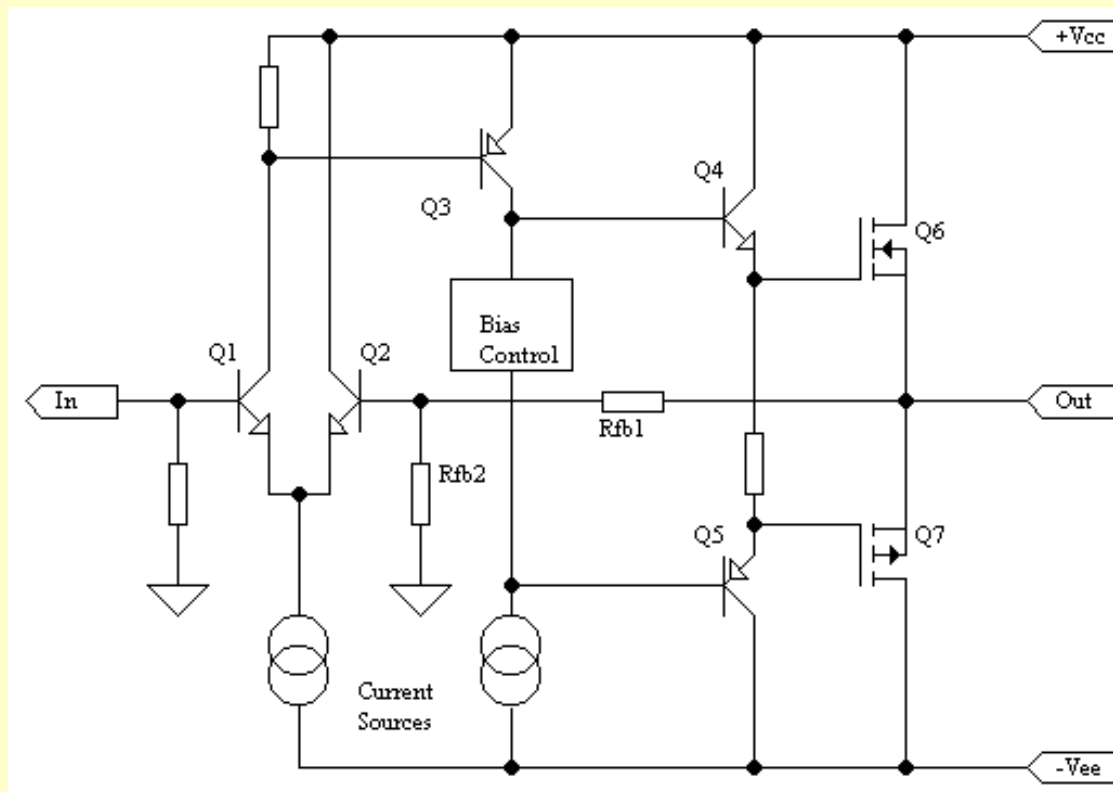
Када се достигне максимална амплитуда на излазу, почињу изобличења одсијецања. Тада ТНД почиње веома брзо да расте, а излазна снага остаје скоро иста. Појачавач не треба да ради у овом режиму.

Појачавач у мост-ном споју



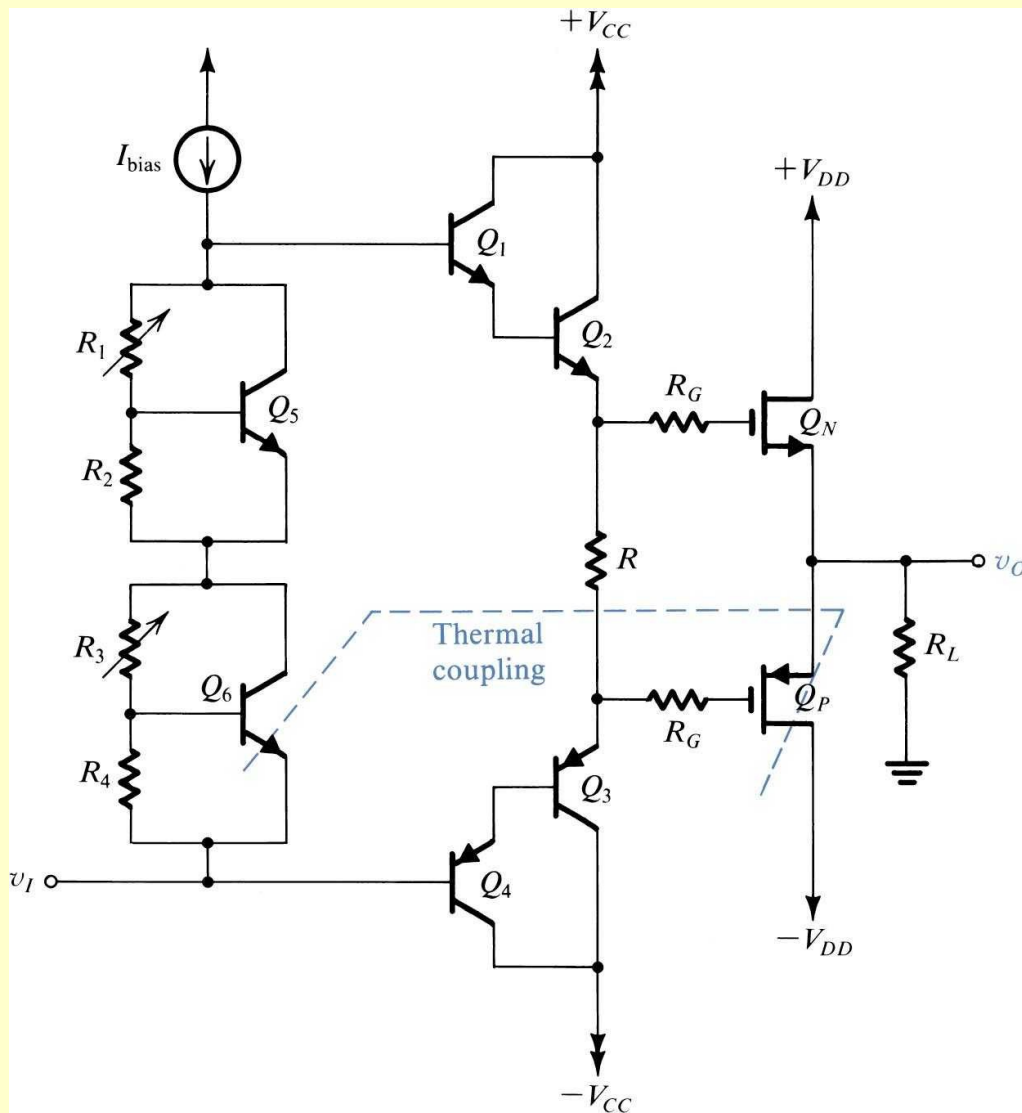
Стављањем потрошача између два појачавача у мостном споју постиже се 2 пута већа амплитуда напона из истог извора напајања.

Појачавач снаге са MOSFETовима



Опсег излазног напона је мањи него код варијанти са биполарним транзисторима због великог V_{GS} . Зато је и η мање. Али зато нема термичког бјежања. Фреквенцијске карактеристике су одличне.

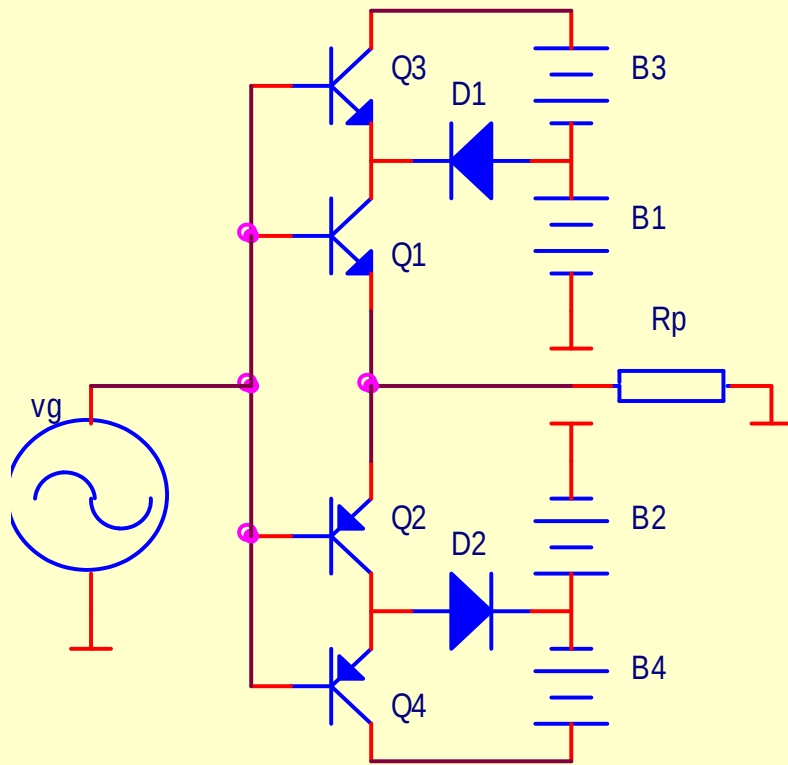
Побољшана варијанта MOSFET појачавача



Отпорник R_3 се подешава за постизање температурне компензације, док се са R_1 подешава мирна струја излазних MOSFET транзистора. Ради добијања пуне амплитуде (опсега) излазног напона, степен за побуду MOSFET-ова се напаја са већим напоном.

$$V_{CC} > V_{DD}$$

Појачавач снаге у класи Г



При малој амплитуди побуде раде само транзистори Q1 и Q2 са струјом само из батерија B1 и B2. При већој амплитуди укључују се и транзистори Q3 и Q4, а струје теку кроз све батерије. На овај начин је добијена висока ефикасност не само за сигнале велике амплитуде, него и за сигнале мале амплитуде, који су присутни већи дио времена.

Појачавач снаге и класи X

Класа X је унапређење класе G. Код ње се напон напајања појачавача мијења и прилагођава тренутној амплитуди побуде. Улазним сигналом се модулише снажни извор напајања. Напон напајања се одржава нешто већим него што је потребно да бисмо имали резерву и да се не би десило да појачавач уђе у режим одсијецања сигнала. Излазни степен ради у AB класи близу максималне амплитуде. С друге стране извор напајања може да се реализује у прекидачкој техници са високом ефикасношћу.

Заштита појачавача снаге

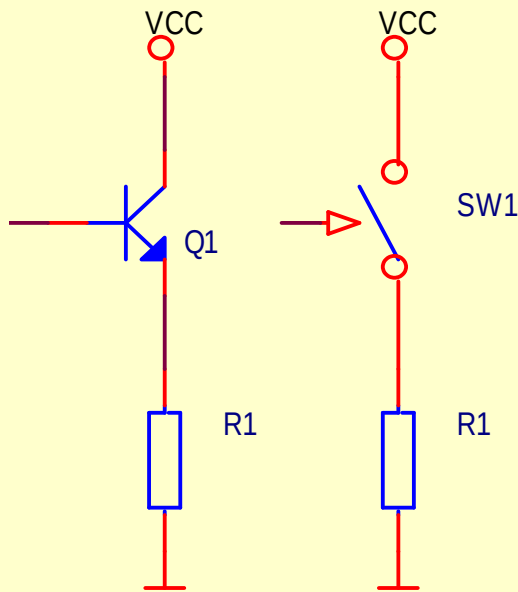
- од кратког споја код потрошача и превелике струје
- од прегријевања
- од превисоког напона напајања
- од превелике дисипације

Увијек се праве заштитна кола. У питању су иста кола која се користе и код стабилисаних извора напајања, па ће о томе бити ријечи у том поглављу.

Појачавач класе Д

- Концепт Д класе је поставио Бександел (Вахандалл) раних 1960-тих година
- Друге класе су линеарне, а класа Д користи технике модулације: ширинско-импулсну или сигма-делта модулацију
- Постижу се високи степени ефикасности ($> 90\%$)
- Од недавно користи се и код појачавача мале снаге (до 1W)
- Данас се користи и у микроталасној техници до неколико GHz

У класи Д транзистор ради као прекидач



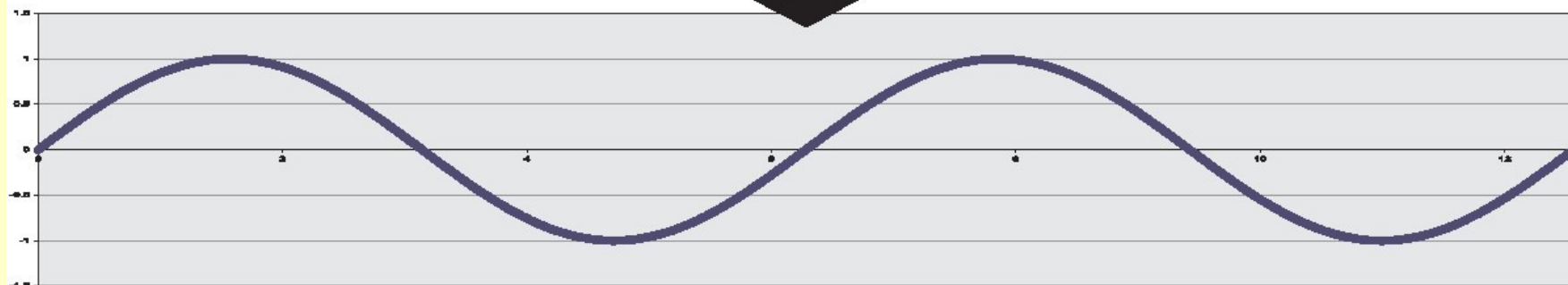
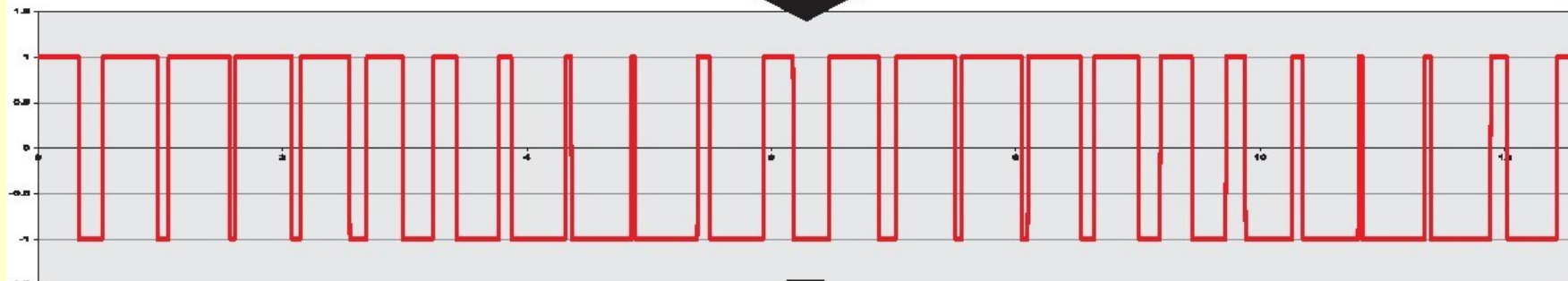
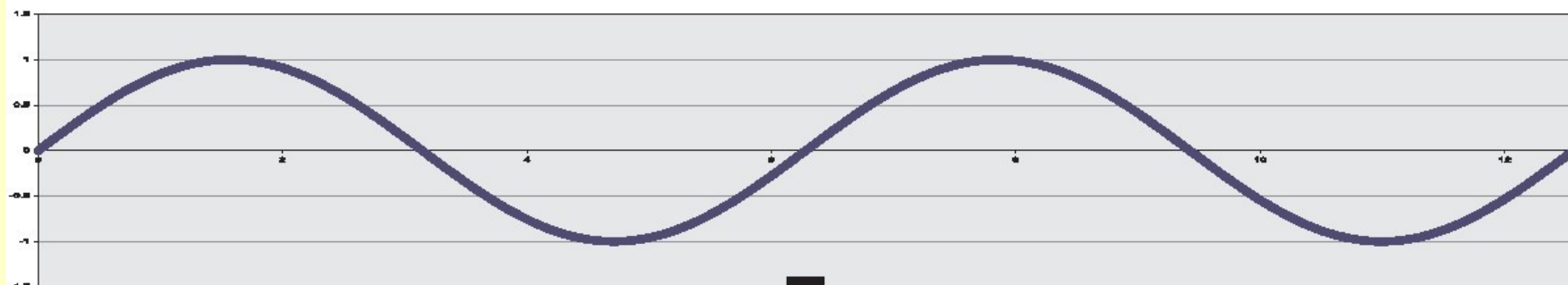
Транзистор, попут прекидача, има два стања: - отворен и - затворен. У првом стању имамо да је струја $I_C=0$, а у другом – напон $V_{CE}=0$.

Пошто је снага губитака на транзистору

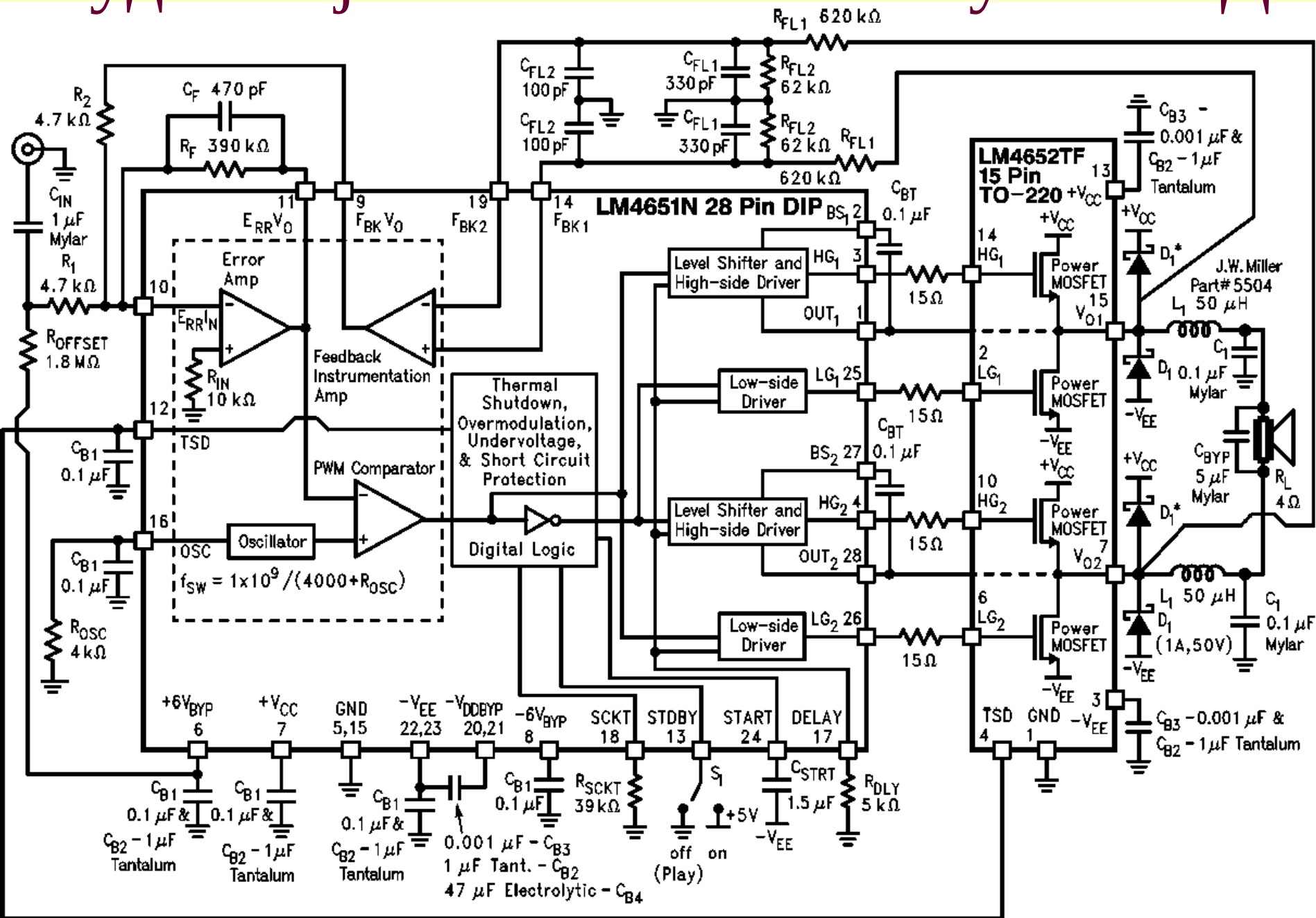
$$P_D = V_{CE} * I_C$$

у оба случаја биће $P_D=0$.

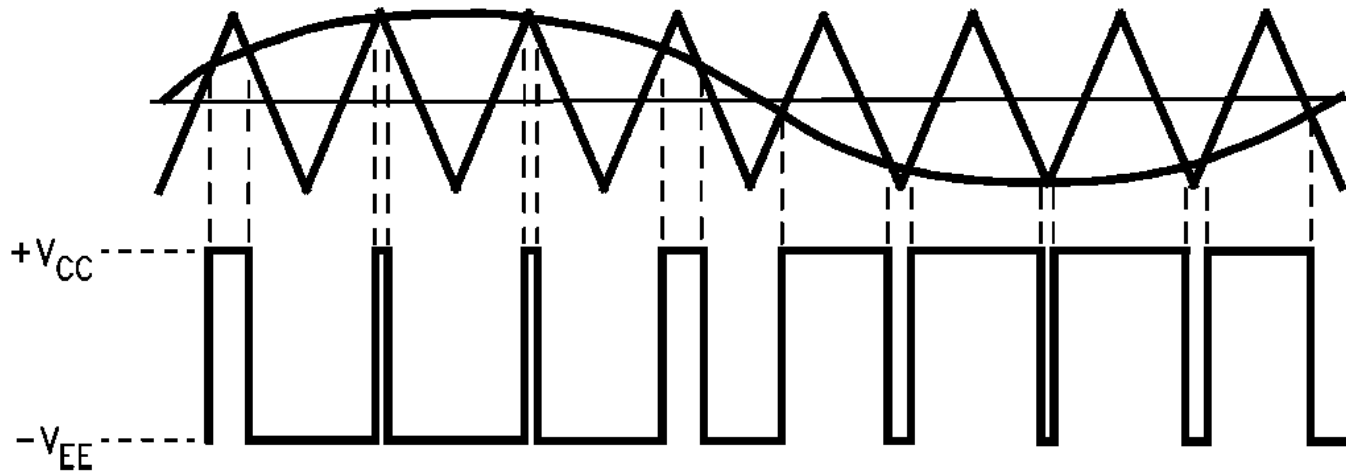
Сигнали на улазу, на излазу и након филтрирања



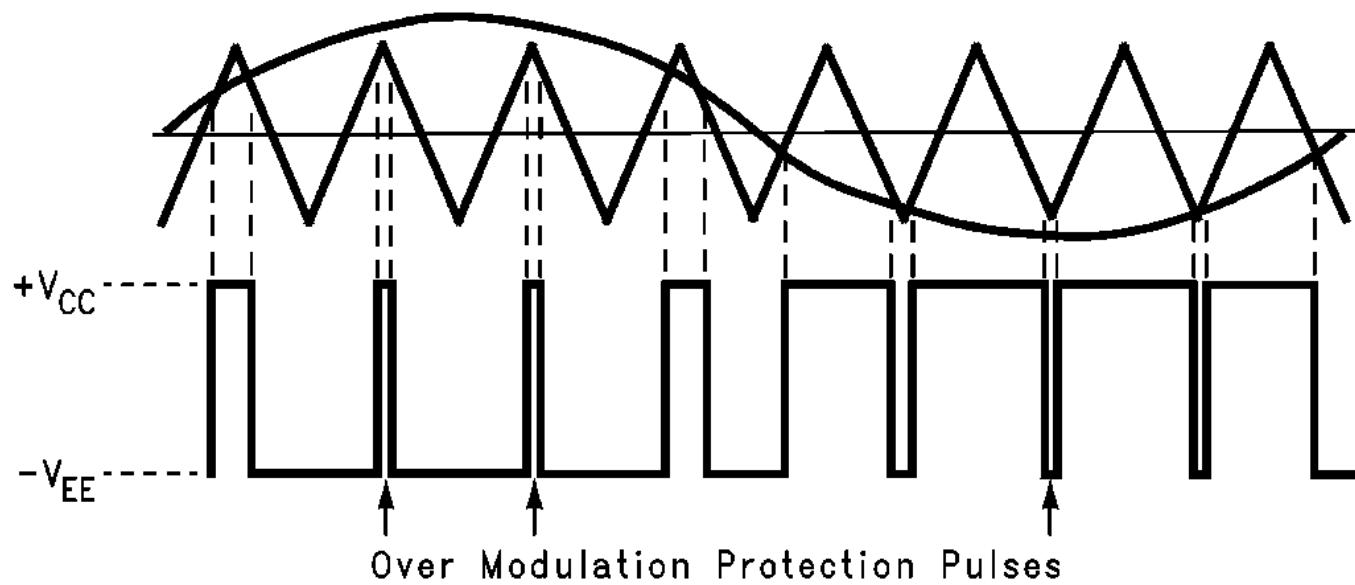
Аудио појачавач снаге 170W у класи Д



Ширинско-импулсна модулација код LM4651



Нормална
модулација

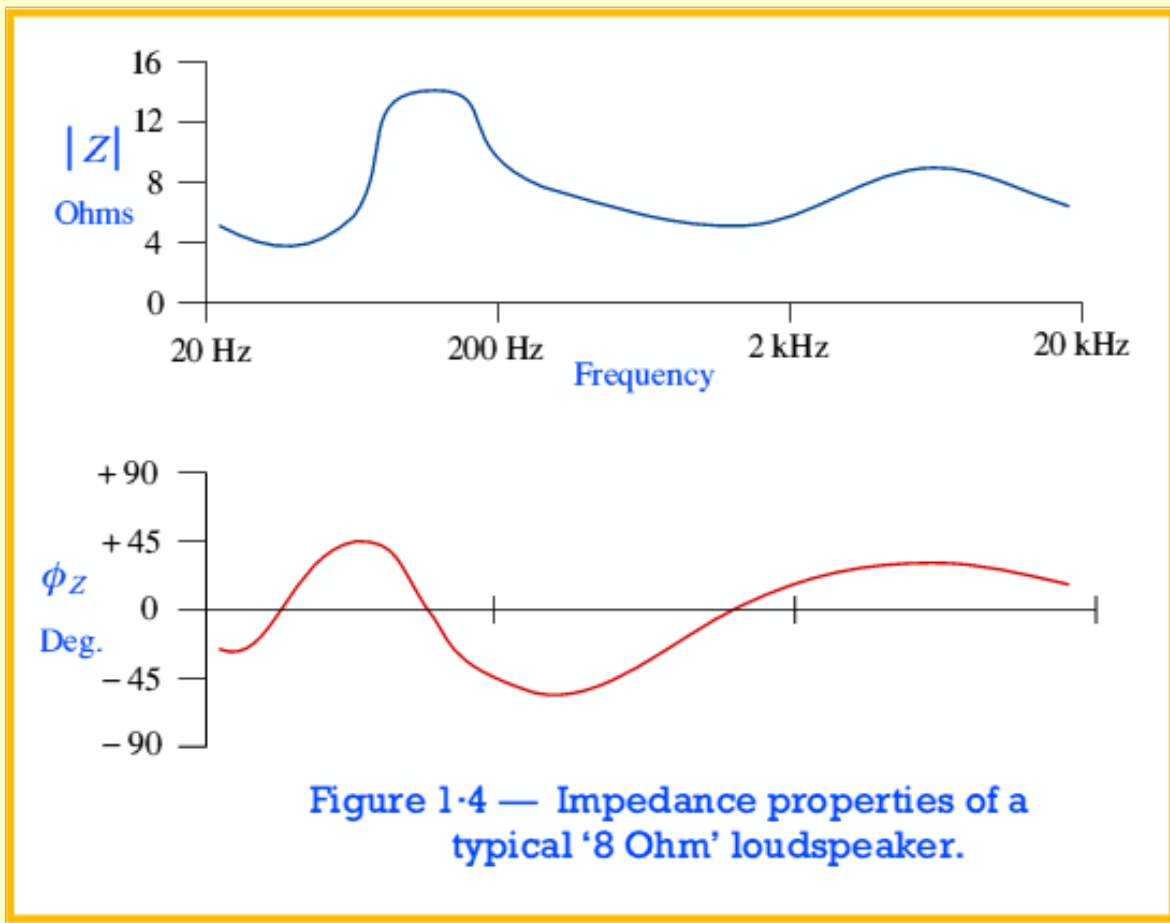


У случају прејаке
модулације, коло
LM4651 само
генерише
заштитне импулсе
неопходне за
исправан рад
бутстреп кола и
побуду горњих
MOSFETова.

Неки од термина који се често чују када се говори о врхунској аудио опреми

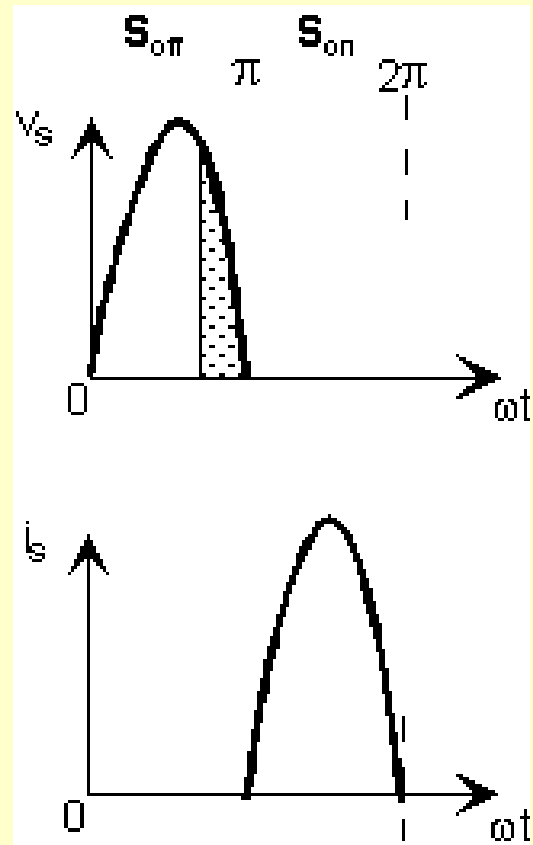
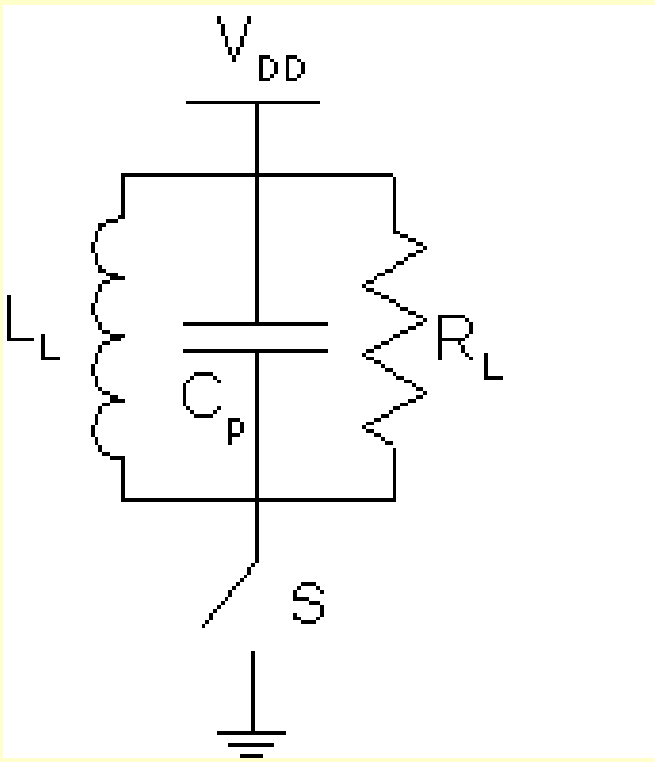
We have heard Triodes, Pentodes, Bipolar, VFET, Mosfet, TFET valves, IGBT, Hybrids, THD distortion, IM distortion, TIM distortion, phase distortion, quantization, feedback, nested feedback, no feedback, feed forward, Stasis, harmonic time alignment, high slew, Class AB, Class A, Pure Class A, Class AA, Class A/AB, Class D, Class H, Constant bias, dynamic bias, optical bias, Real Life Bias, Sustained Plateau Bias, big supplies, smart supplies, regulated supplies, separate supplies, switching supplies, dynamic headroom, high current, balanced inputs and balanced outputs.

Импеданса типичног звучника

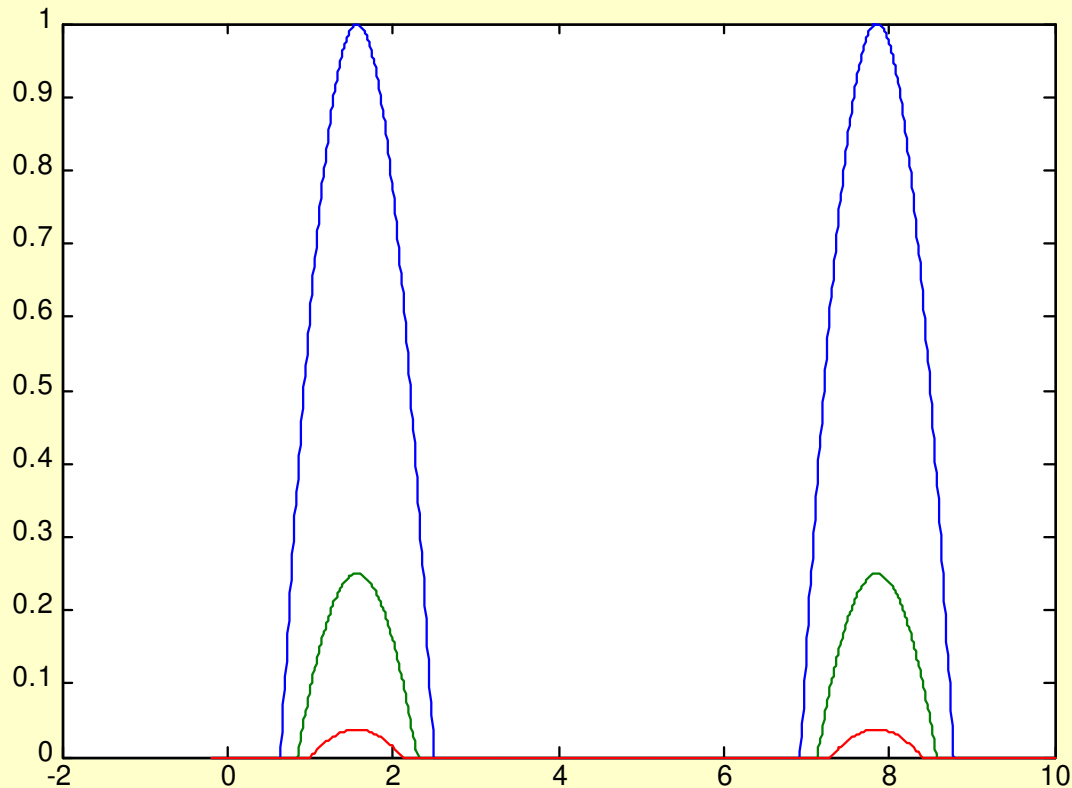


Сав труд око појачавача и малих изобличења постаје узалудан ако на крају стоји неквалитетан звучник. При већим снагама звучник постаје додатно нелинеаран из простог разлога што се не може произвести ваздушни притисак мањи од 0 бара (изобличење одсијецања са доње стране).

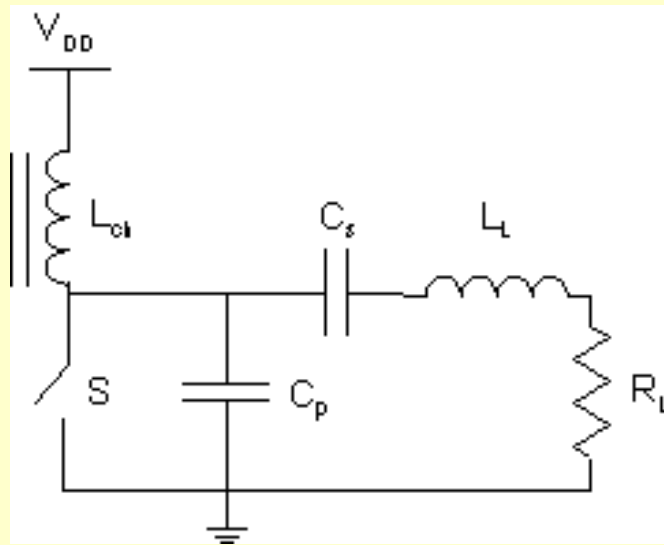
Ц класа



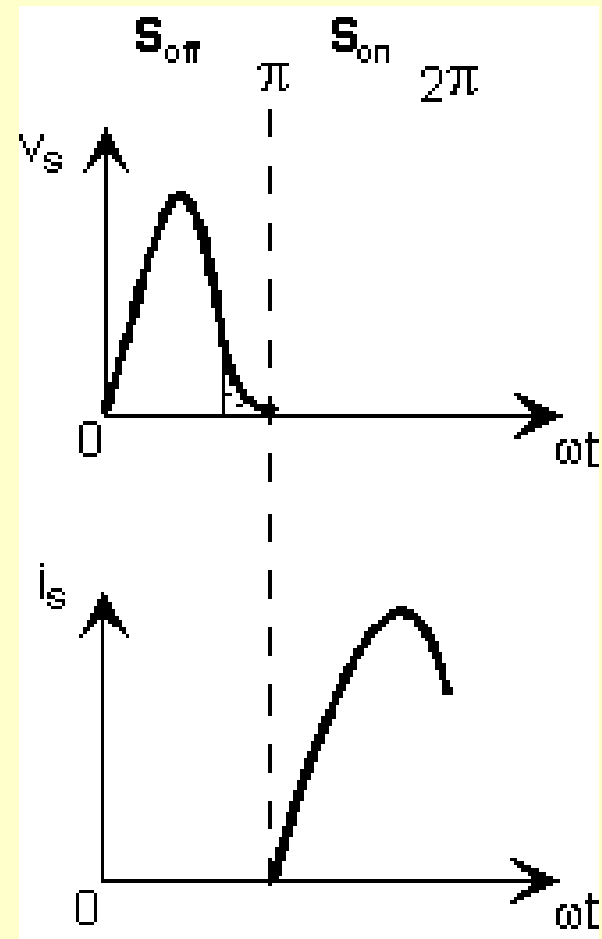
У Ц класи струја тече мање од 180° у периоди



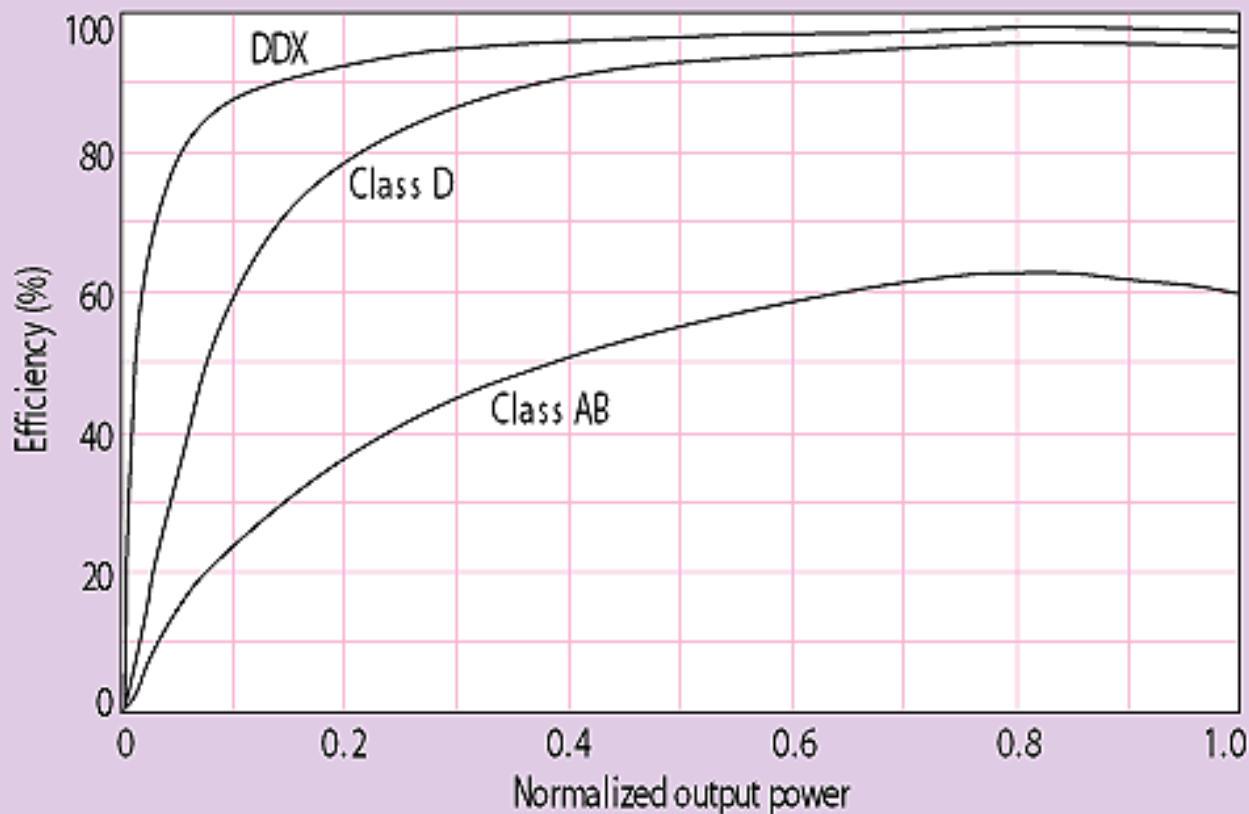
Класа Е даје изузетно високу ефикасност



У тренутку укључења транзистора, и напон и први извод напона на његовим крајевима су једнаки нули.

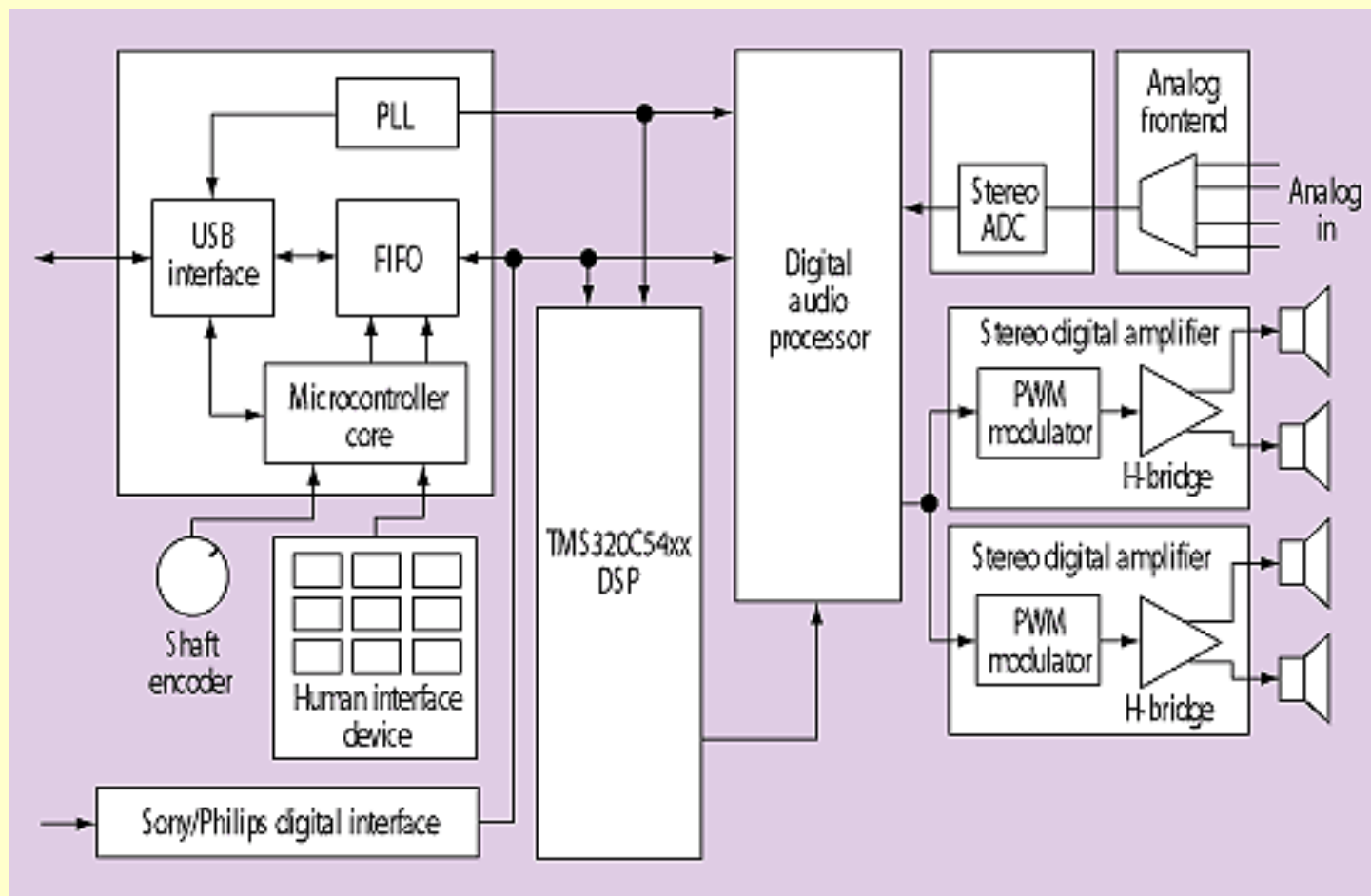


Шта је то DDX класа?



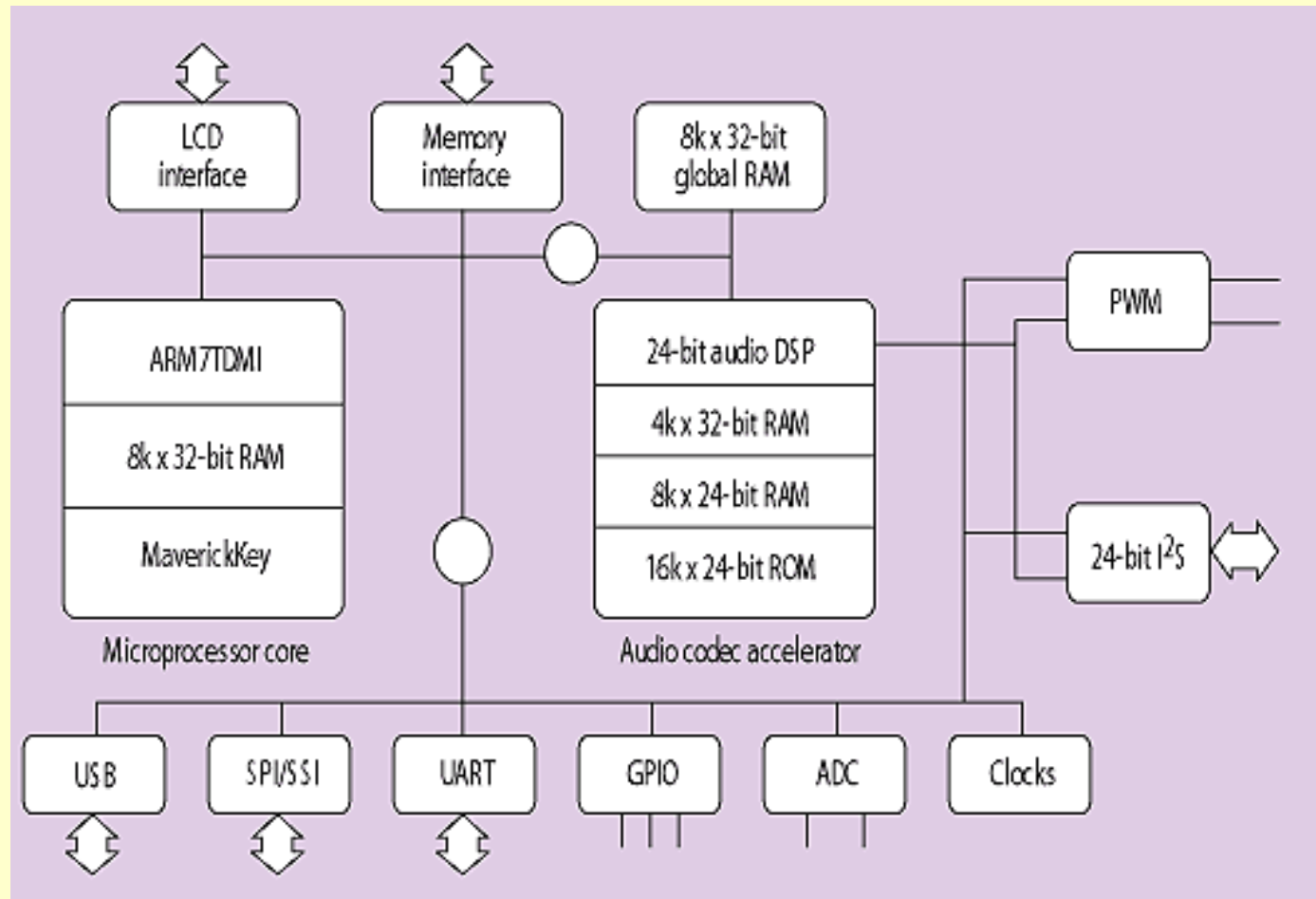
3. Apogee Technology has developed a patented DDX technique to outperform traditional Class D and analog Class AB amplifiers. The DDX amplifier maintains over 85% efficiency even at 10% output power, while other amplifiers fall steeply.

Савремени концепт дигиталне обраде сигнала све до звучника



1. For a fully digital audio-processing solution all the way to the speakers, Texas Instruments has added digital Class D amplifiers to DSP-driven audio processors.

Савремени аудиосистеми имају у себи процесоре због “MP3”



2. Cirrus Logic's EP7409 Internet audio decoder integrates on-chip a TrueDigital amplifier, a RISC/DSP core, and other optimized peripherals, memory, and interfaces. Implemented in 0.25- μ m CMOS, it gives designers a complete digital audio solution.

Литература

- **LM380 2.5W Audio Power Amplifier – National Semiconductor, August 2000**
- [All-Digital Approach Hikes Audio Quality In Consumer Products](#)
- **LM4651 & LM4652 Overture 170W Class D Audio Power Amplifier Solution - © 2003 National Semiconductor Corporation DS101277**
- **LM4663 2 Watt Stereo Class D Audio Power Amplifier with Stereo Headphone Amplifier - © 2002 National Semiconductor Corporation DS101269**
- **Single-Ended Class A (c) - Nelson Pass, Pass Labs**
- **High Efficiency Microwave Power Amplifier: From the Lab to Industry - Dr. William Herbert Sims III NASA, Marshall Space Flight Center**