

1.5.4 UNIPOLARNI TRANZISTORJI – FET (Field Effect Transistor)

Splošno

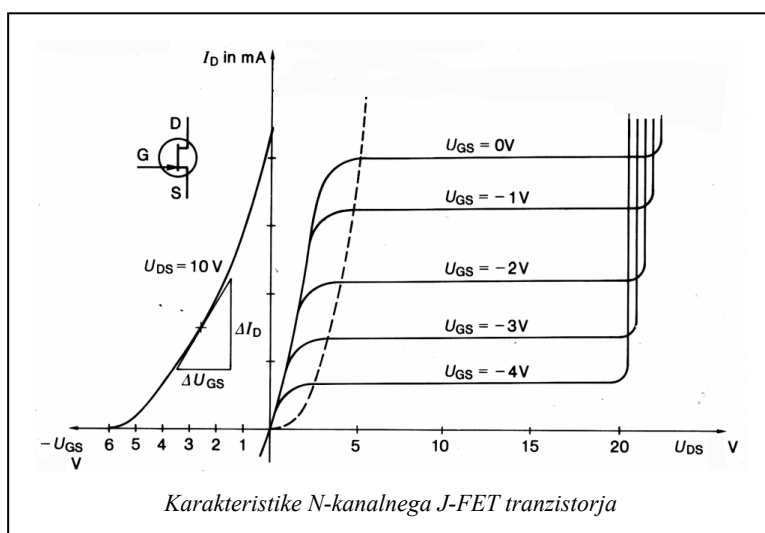
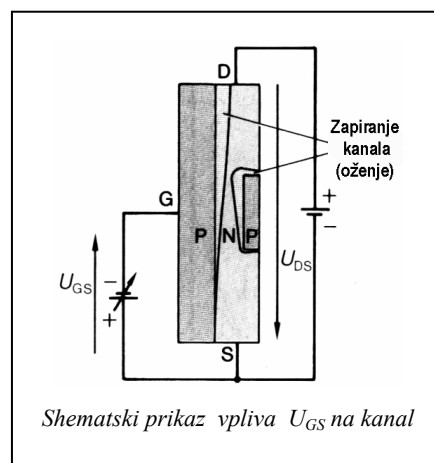
Za FET tranzistorje je značilno, da so za razliko od bipolarnih krmiljeni napetostno preko vpliva električnega polja. Glede na velikost električne napetosti med vrati (**G**ate) in izvorom (**S**ource), zavisi upornost bolj ali manj prevodne poti (kanal) med izvorom in ponorom (**D**rain). Za lažje razumevanje si lahko predstavljamo, da se glede na velikost krmilne napetosti U_{GS} spreminja »širina« prevodnega kanala in posledično tudi upornost. Pri dovolj visoki U_{GS} in ustrezni polariteti pride celo do popolne zožitve kanala (zadrgnjenje) in posledično prehod v neprevodnost kanala. Odvisno od izvedbe kanala, ki je lahko N ali P tip polprevodnika (N-kanalni, P-kanalni), mora biti krmilna napetost U_{GS} takšne polaritete, da je PN spoj (vrata-kanal) orientiran vedno v zaporni smeri. Zaradi tega je za enosmerne razmere vhodna upornost zelo velika, pri izmeničnih razmerah pa je potrebno upoštevati spojno kapacitivnost, ki največkrat ni zanemarljiva. Nekatere izvedbe imajo med vrati in kanalom še tanko plast SiO_2 , ki predstavlja vmesno izolacijo in še višjo vhodno upornost To so MOSFET tranzistorji.

V splošnem lahko primerjamo N-kanalne FET-e z NPN in P-kanalne FET z PNP tranzistorji.

1.5.4.1 Spojni FET (junction FET)

Pri spojnem FET tranzistorju je kanal deloma obkrožen z elektrodo vrat, katere potencial vpliva na tok med priključkoma **D** in **S**. Za N-kanalni J-FET mora biti krmilna napetost U_{GS} negativna, za P-kanalni J-FET pa pozitivna proti potencialu priključka **S**. Kanal je povsem odprt, kadar napetost U_{GS} ni prisotna, z večanjem napetosti pa se kanal sorazmerno zapira in pri napetosti zadrgnjenja popolnoma zapre. Za primer iz spodnje karakteristike je razvidno, da znaša napetost zadrgnjenja $-6V$. Enosmerni vhodni tok I_{GS} je med 10^{-8} do 10^{-12} A, kar pomeni vhodno upornost nekaj $G\Omega$.

Pri P-kanalnem JFET-u predstavljajo tok v kanalu vrzeli. Lastnosti in karakteristike so podobne, le napetosti oz. smeri tokov so nasprotni polaritete.



Parametri FET tranzistorjev

- Napetost zadrgnjenja kanala
- Strmina FET-a:

$$S = \frac{\Delta I_D}{\Delta U_{GS}}$$

- Statična upornost kanala:

$$R_{DS} = \frac{U_{DS}}{I_D}$$

- Dinamična upornost:

$$r_{DS} = \frac{\Delta U_{DS}}{\Delta I_D}$$

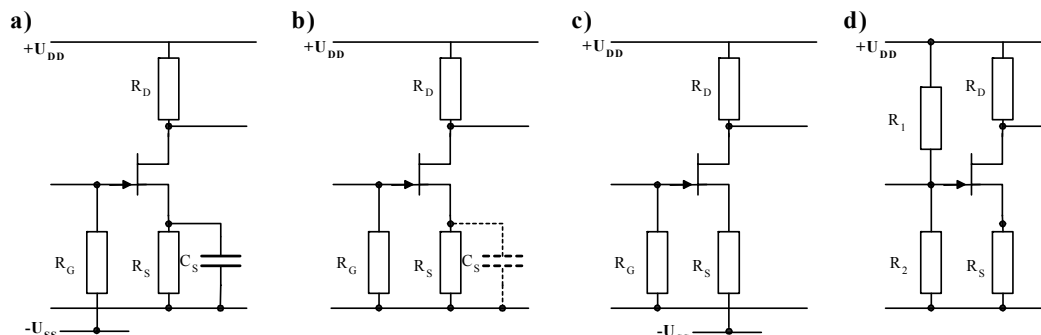
- Maksimalna napetost U_{DSmax}
- Maksimalni tok I_{DSmax}

J-FET tranzistorji so največkrat v funkciji napetostnih ojačevalnikov ali tokovnih generatorjev. Za tokovni generator je dovolj že sam tranzistor ki ima vrata **G** vezana na priključek **S**. V tem primeru je popolnoma odprt in omogoča največji tok (glej karakteristiko pri $U_{GS}=0V$).

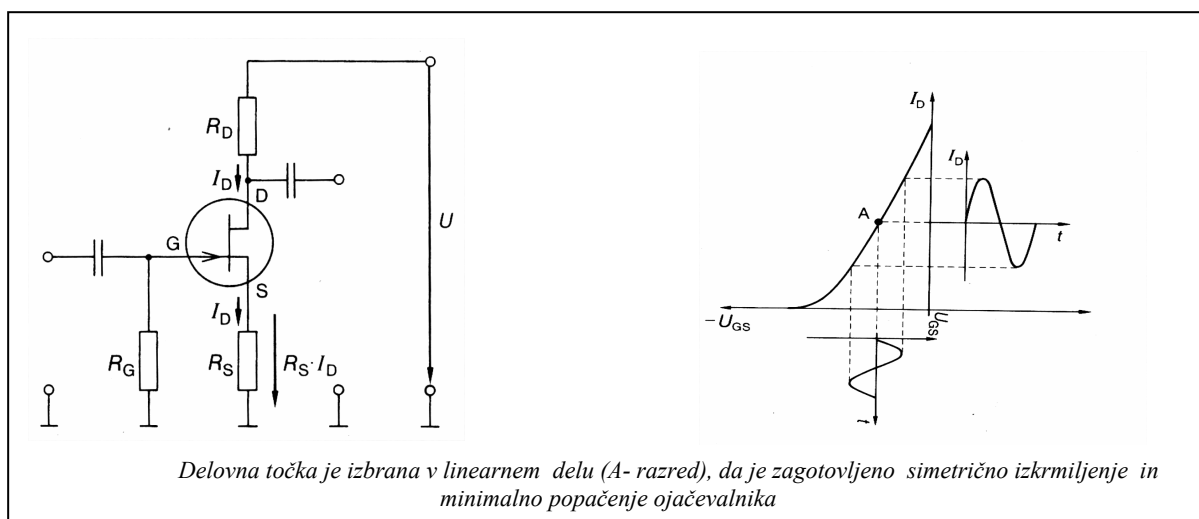
Nastavitev delovne točke

Pri vezjih z J-FET tranzistorji se potrebna prednapetost za nastavitev delovne točke največkrat ustvarja kot padec napetosti na upor R_S . S tem se v bistvu spremeni potencial izvora S , medtem ko potencial vrat preko upora R_G ostane na potencialu mase. S tem se vhodna upornost seveda zniža, vendar je lahko upor R_G visokooohmski (npr. $1M\Omega$), saj prenaša le potencial mase na vrata G . Na sliki spodaj so še drugi možni načini, ki se manj uporabljajo.

Nastavitev delovne točke

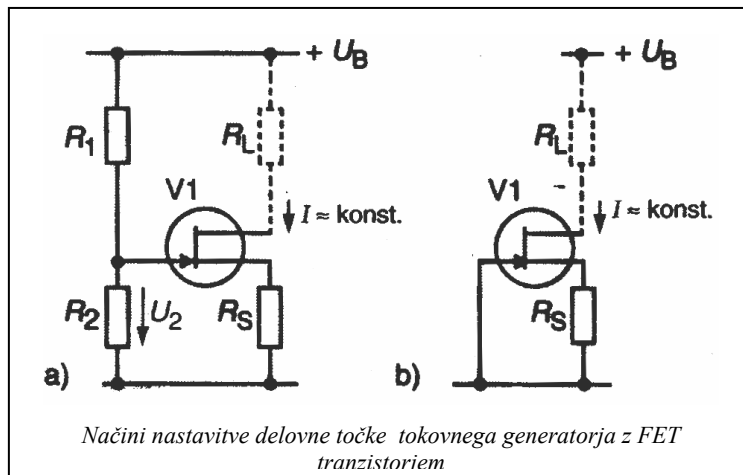


Primer ojačevalnika z J-FET tranzistorjem



Primer tokovnega generatorja z J-FET tranzistorjem

Tokovni generator vzdržuje tok konstanten ne glede na spremembo upornosti bremena oz. ne glede na napetost na bremenu. Napetost na bremenu lahko varira od 0V do tiste napetosti katera zagotavlja še zadovoljivo velikost U_{DS} , da je delovna točka v področju zasičenja (tok se skoraj nič ne spreminja pri spreminjajoči se napetosti U_{DS}). Velikost toka je odvisna od upora R_S kateri ustvarja ravno tolikšen padec napetosti, da vzdržuje željeni tok



1.5.4.2 MOS-FET tranzistorji

MOS-FET tranzistorji predstavljajo pomembno vlogo na področju močnostne elektronike zaradi poenostavljenega krmiljenja in možnosti enostavne vzporedne povezave več komponent. Zaradi nizke notranje upornosti kanala $R_{DS\ on}$ in relativno visoke delovne napetosti U_{DS} jih največkrat srečujemo v močnostnih izvedbah in uporabljamo kot napetostno spremenljiv upor ali še pogosteje kot elektronsko stikalo. V praksi se pojavljata dve različici MOS-FET tranzistorjev in vsaka je lahko v N oz. P-kanalni izvedbi.

Za **MOS-FET z induciranim kanalom** (samozaporni MOSFET, obogateni tip (enhanced mode) velja, da je kanal popolnoma zaprt, če ni prisotne napetosti U_{GS} , z višanjem U_{GS} pa se kanal sorazmerno napetosti odpira.

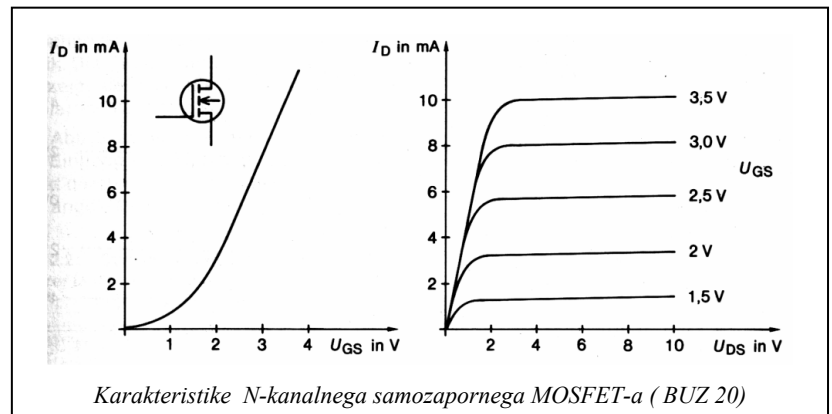
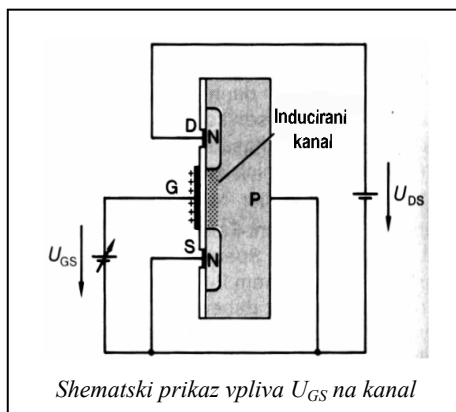
Druga različica je **MOS-FET z vgrajenim kanalom** (samoprevodni MOS-FET, osiromašeni tip-depletion mode) za katerega pa velja, da je kanal že deloma prevoden tudi, če ni prisotne U_{GS} . Glede na polariteto in velikost U_{GS} , se kanal sorazmerno tej napetosti zapira ali odpira in so zato primerni za neposredno krmiljenje s čistimi izmeničnimi signali.

MOS-FET z induciranim kanalom

Plast aluminija predstavlja vrata MOSFET tranzistorja, katera so s plastjo Si oksida izolirana od kanala. Potencial vrat preko električnega polja vpliva na širino kanala in s tem na prevodnost poti med priključkoma D-S. Osnova (substrat) je največkrat že interno povezan z izvorom - S (Source).

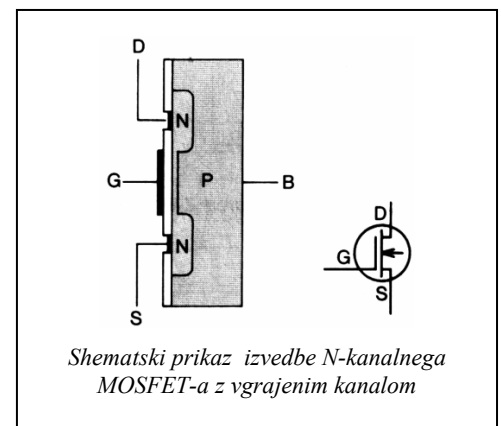
Za analizo delovanja se bomo omejili le na N-kanalno izvedbo, saj je pri P-kanalni razmišljanje podobno, le predznaki se spremenijo.

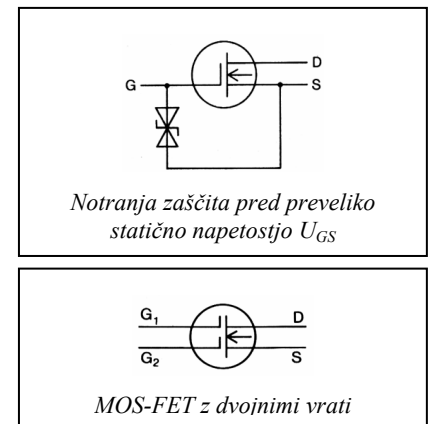
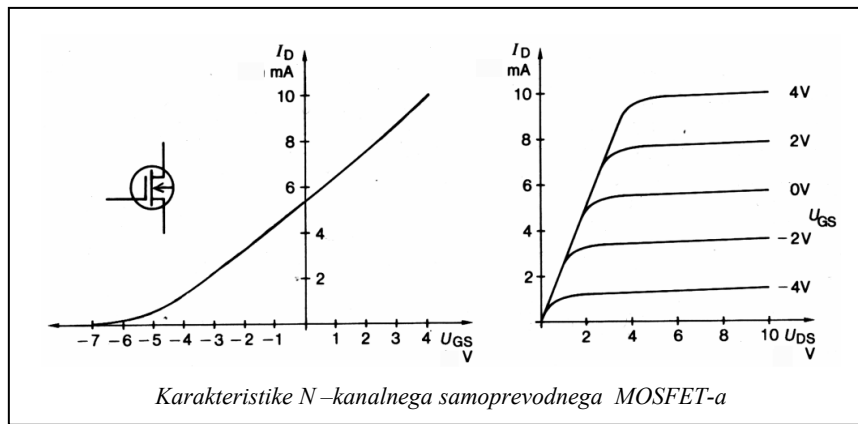
Pri napetosti $U_{GS} = 0V$ je kanal normalno zaprt in odtod tudi naziv samozaporni. Tudi v primeru negativne napetosti U_{GS} , ostane kanal zaprt. Prevajati začne šele ko je napetost U_{GS} dovolj velika (od 0,5 do 3V), kar je razvidno iz karakteristike.



MOS-FET z vgrajenim kanalom

Nasprotno od MOS-FET-a z induciranim kanalom, ta izvedba izrazito prevaja že brez prisotne napetosti U_{GS} in odtod tudi ime samovodljiv. Kanal je normalno že vgrajen, vendar je osiromašen (osiromašeni tip-depletion mode) in ga je mogoče širiti (bogatiti) ali ožiti (siromašiti) preko potenciala vrat, ki je v tem primeru lahko negativen ali pozitiven. Zaradi tega samovodljiv MOS-FET običajno ne potrebuje nobene dodatne prednapetosti za nastavitev delovne točke. Potrebno vezje lahko v tem primeru odpade.





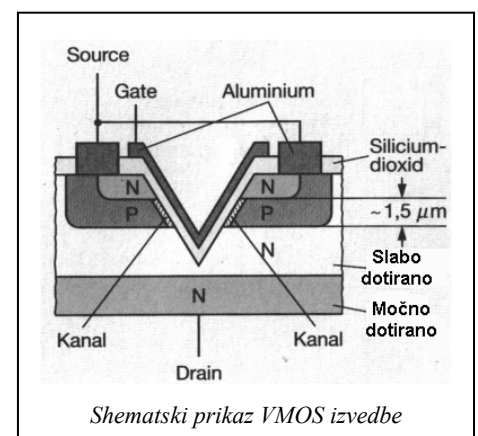
Ostale značilnosti MOSFET-ov

Tanka izolacijska plast SiO na vratih MOS-FETov je izjemno občutljiva na prenapetost in zato je potrebna pri delu posebna pazljivost. Večina MOS-FETov ima med G in S v ta namen vgrajeno Z-diodo, ki omejuje prenapetosti, vendar le če energija ni prevelika. Zaradi zelo velike vhodne upornosti ($10T\Omega$ –do $10^3 T\Omega$), je občutljivost na statično elektriko izjemna. V ta namen pogostokrat ob vgradnji priključke kratko vezemo s kratkostičnim obročkom (vodljiva guma, staniol folija,..), katerega šele po končani montaži odstranimo. Za MOS-FET tranzistorje je značilno tudi, da imajo večinoma že vgrajeno antiparalelno diodo med D in S kar je potrebno upoštevati pri preverjanju ali pri načrtovanju vezja. Kapacitivnost C_{GS} pri statičnem krmiljenju in pri malih močeh večinoma ne dela težav, pri dinamičnem krmiljenju, močnostnih izvedbah (nekaj 1000pF) in na VF področju pa postane problematična. Za VF področje obstaja v ta namen izvedba MOS-FETA z dvojnimi vrati. V bistvu so vrata razdeljena na dva dela G_1 in G_2 . Ena vrata imajo večjo C_{GS} in so namenjena za nastavitev delovne točke in druga za krmiljenje z VF signalom. Pogostokrat so v uporabi tudi v mešalnih stopnjah in modulatorjih, kjer je oboje vrat uporabljenih za krmiljenje z izmeničnim signalom.

Močnostne izvedbe MOS-FETov odlikujejo sledeče značilnosti:

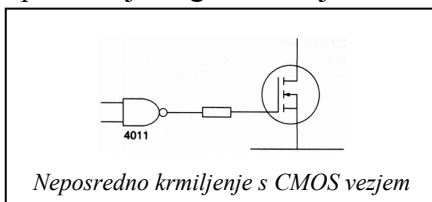
- Velike dopustne moči
- Mehanska stabilnost
- Visoka preklopna hitrost
- Odpornost Velika termična obremenljivost
- na staranje
- Mali volumen

Zahvaljujoč možnosti notranjega neposrednega vzporednega povezovanja omogoča MOS-FET krmiljenje moči več 100kW pri napetostih $U_{DS} > 1kV$. Za močnostne MOS-FETE je značilna VMOS izvedba, ki omogoča preko istih vrat krmiljenje dveh tokovnih poti in posledično višjo tokovno zmogljivost.

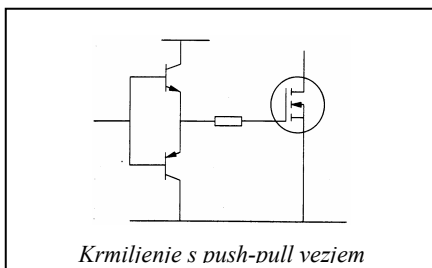


1.5.4.3 Načini krmiljenja močnih MOS-FETov

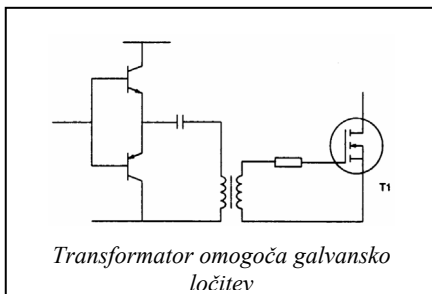
Ne glede na visoko vhodno upornost je potrebno pri uporabi **močnih** MOS-FET tranzistorjev v stikalnem režimu ali pri VF signalih, **upoštevati sorazmerno veliko kapacitivnost vrat C_{GS}** . Pogostokrat je potrebna tudi predhodna galvanska ločitev (npr. vertikalna povezava pri mostičnem vezju), ki mora zagotoviti potrebno napetost impulza vseh razmerjih impulz-pavza. V teh primerih je potrebno zagotoviti galvansko ločeno napajanje krmilnega tokokroga, ki omogoča ustrezno moč, ki zagotavlja primerno hiter čas vklopa oz. izklopa MOSFET-a. Krmilno vezje mora zagotoviti dovolj hitro »napolnjenje« in tudi dovolj hitro praznjenje naboja kapacitivnosti C_{GS} , glede na krmilni impulz. V nekaterih primerih lahko te naloge dovolj uspešno opravlja kar transformator, preko katerega se prenaša tudi potrebna moč za krmiljenje. Slabost je, da je velikost potrebnega impulza U_{GS} odvisna od razmerja impulz-pavza, kar v skrajnih slučajih lahko pomeni tudi premalo napetost U_{GS} , da bi se MOS-FET popolnoma odprl in posledično višjo upornost kanala, ter povečanje izgub. Nekaj načinov krmiljenja predstavljajo sledeče slike:



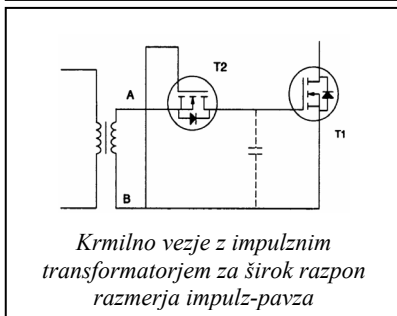
Neposredno krmiljenje s CMOS vezjem



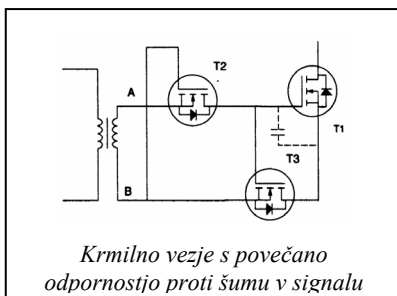
Krmiljenje s push-pull vezjem



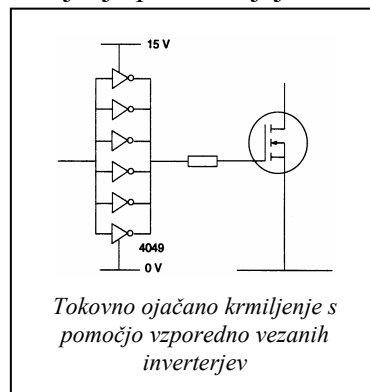
Transformator omogoča galvansko ločitev



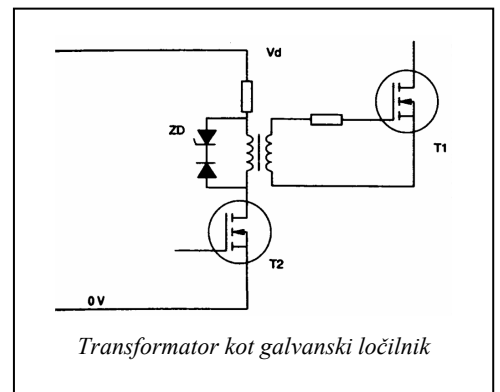
Krmilno vezje z impulznim transformatorjem za širok razpon razmerja impulz-pavza



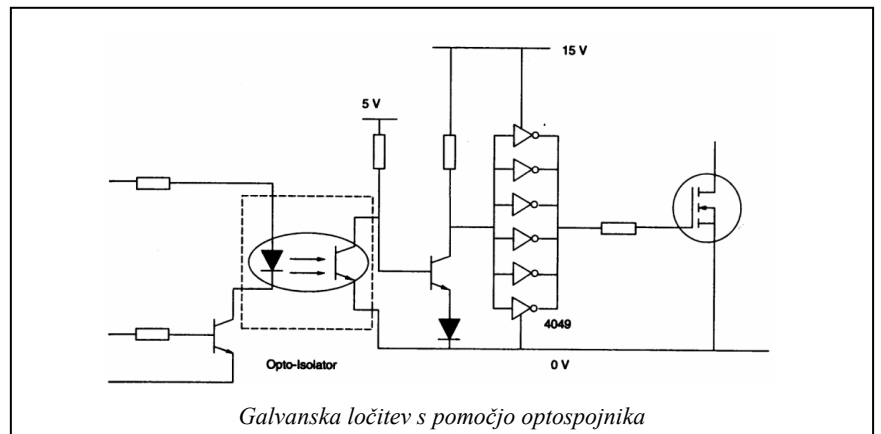
Krmilno vezje s povečano odpornostjo proti šumu v signalu



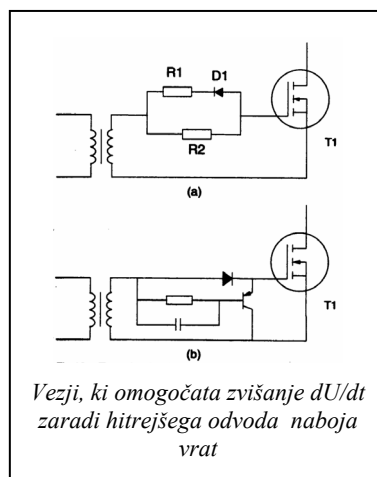
Tokovno ojačano krmiljenje s pomočjo vzporedno vezanih inverterjev



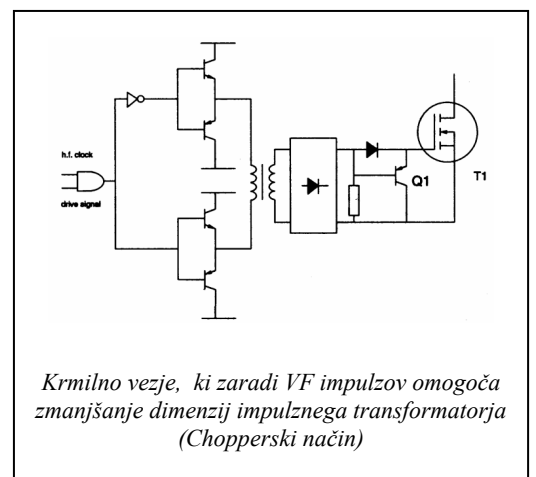
Transformator kot galvanski ločilnik



Galvanska ločitev s pomočjo optospojnika



Vezji, ki omogočata zvišanje dU/dt zaradi hitrejšega odvoda naboja vrat

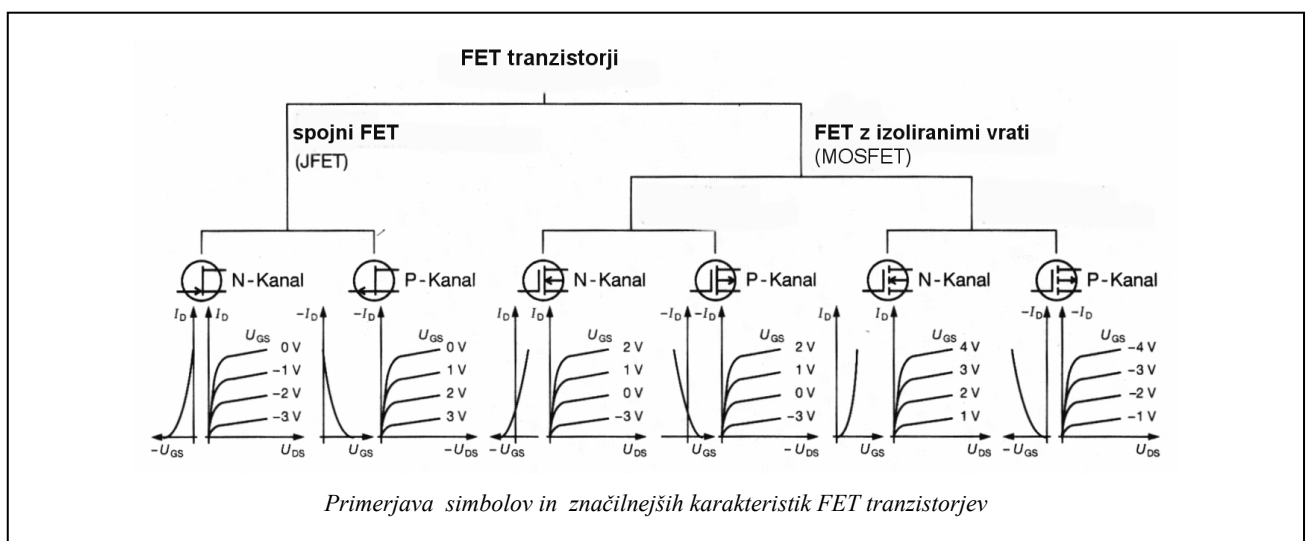


Krmilno vezje, ki zaradi VF impulzov omogoča zmanjšanje dimenzij impulznega transformatorja (Chopperski način)

1.5.4.4 Primerjava FET-ov z bipolarnim tranzistorjem in pregled značilnejših karakteristik

V primerjavi z bipolarnim tranzistorjem imajo FET-i več prednosti. Slabost pa predstavlja relativno velika kapacitivnost C_{GS} in relativno visoka upornost kanala $R_{DS\ on}$ predvsem pri močnostnih izvedbah. Rezultati splošne primerjave so razvidni iz sledeče tabele:

Lastnost	BIPOLARNI TRANZISTOR	FET
Vhodna upornost	nizka	visoka
Način krmiljenja	tokovno, močnostno	napetostno, brez moči *
Vklopni čas	50...500ns	10...600ns
Izklopni čas	500...2000ns	10...600ns
Frekvenčna omejitev	100MHz	1GHz
Upornost tokovne poti	0.3Ω	0.03...2Ω
Občutljivost na preobremenitev	slaba	dobra
Toplotna stabilizacija	potrebna	Ni potrebna
Možnost vzporednih povezav	Pod posebnimi pogoji -da	Ni pogojev, neomejeno število



1.5.4.5 IGBT – (Insulated Gate Turn off Transistor)

Dobre lastnosti MOS-FETA in bipolarnega tranzistorja so združene v IGBT tranzistorju. V bistvu je IGBT sestavljen podobno kot darlington tranzistor. Kot prvi tranzistor je MOS-FET, kateri krmili bazni tok bipolarnega tranzistorja na izhodu. Iz notranje sheme IGBT tranzistorja je razvidno, da je sestavljen iz enega MOS-FETA, enega NPN in enega PNP tranzistorja. PNP tranzistor je končni element, ki prevaja glavni tok. Priključki so označeni kot kolektor -C, emiter-E in vrata-G. Priključek za kolektor je v bistvu emiter PNP tranzistorja.

Delovanje je podobno kot pri tiristorju in si ga lahko pojasnimo v dveh delih. Pri dovolj visoki napetosti vrat postane vodljiv MOS-FET in povzroči delno prevajanje PNP tranzistorja. Ob povečanju krmilne napetosti se tok še poveča in padec napetosti na upor R_s odpre NPN tranzistor, kateri povzroči preko povečanega baznega toka (poz. pov. vezava) hitro zasičenje PNP tranzistorja.

IGBT je zaradi tega posebno primeren za delovanje v stikalnem režimu in omogoča krmiljenje velikih moči ob napetosti zasičenja od 1...4V, odvisno od delovnega toka.

V primerjavi z MOS-FETom, je potrebna krmilna napetost za IGBT nekoliko višja ($\pm 20V$), vendar je tokovna zmogljivost precej večja (glej karakteristiko).

