

VISOKA ŠKOLA ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA STRUKOVNIH
STUDIJA-VIŠER, BEOGRAD

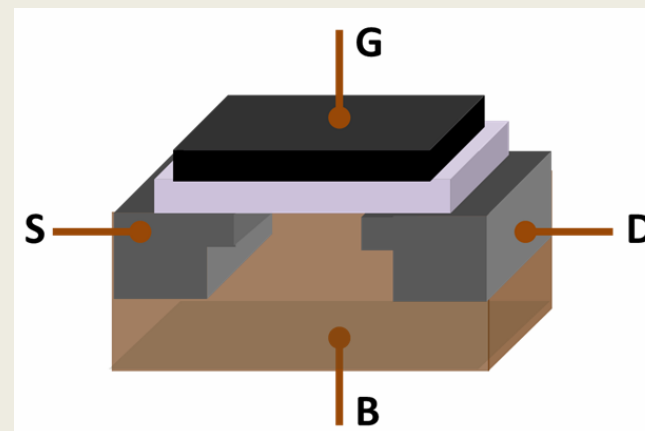
STUDIJSKI PROGRAM: NOVE ENERGETSKE TEHNOLOGIJE

SPECIALISTIČKE STUDIJE

PREDMET: UPRAVLJANJE ELEKTROENERGETSKIM PRETVARAČIMA



MOSFET KAO PREKIDAČ SNAGE

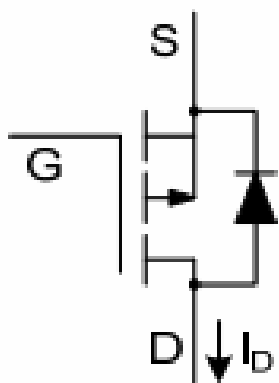


Predmetni profesor: Dr Željko Despotović

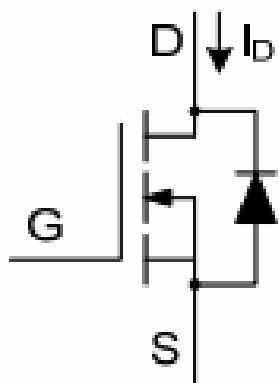
UVOD

- **MOSFET (Metal-Oxide Semiconductor Field Effect Transistors)**
- Velika bazna struja (reda ampera) i potreba da se ona održava na toj vrednosti za sve vreme dok tranzistor vodi, predstavlja veliki nedostatak bipolarnih prekidačkih tranzistora (čak i u odnosu na tiristore).
- On je donekle ublažen kaskadnom vezom dva ili tri tranzistora (Darlington sprega) ali su pogoršane dinamičke karakteristike i smanjena frekventna oblast njihove primene.
- Orijentaciona frekventna granica primene bipolarnih tranzistora iznosi oko 5kHz.
- Kod rezonantnih pretvarača, zbog komutacije tranzistora pri nultoj struji (za naponski) ili nultom naponu (za strujni), ova granica ide na 10kHz i više.

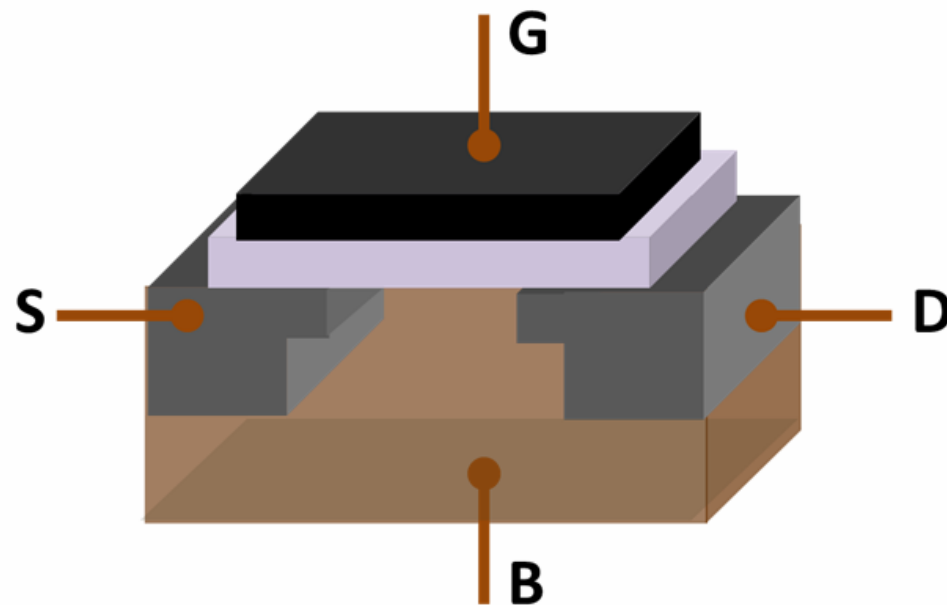
TIPOVI I STRUKTURA MOSFET-a



P-tip



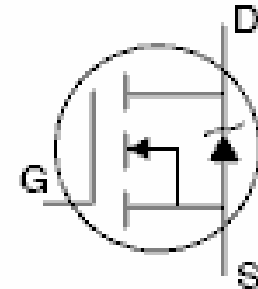
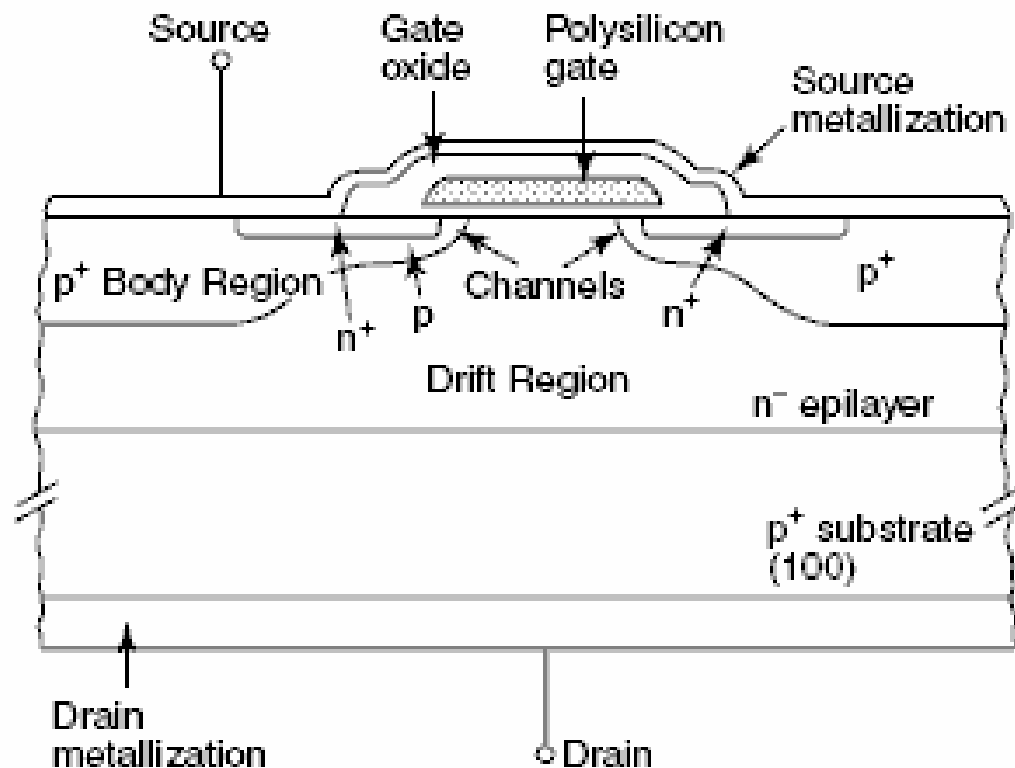
N-tip



**Nisko Naponske (NN)
primene
-do 100V max**

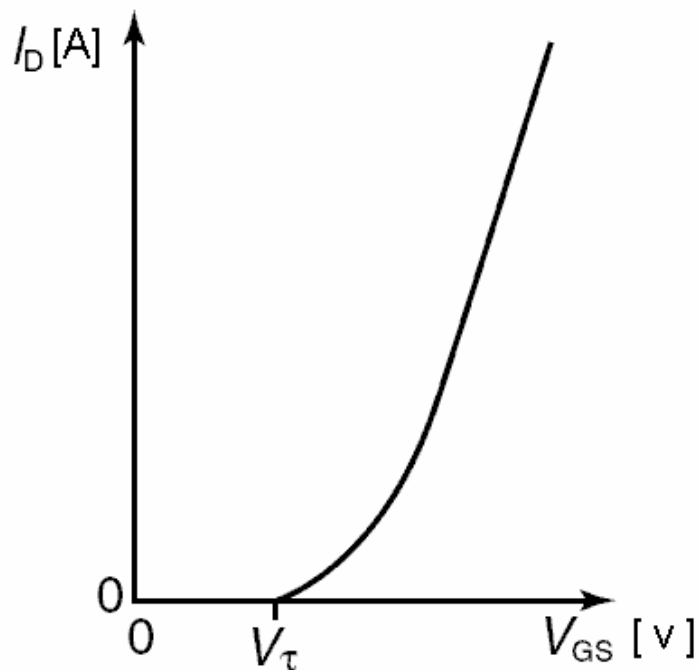
**Visoko Naponske (VN)
Primene
-do 1500V max**

Šematski dijagram N-kanalnog MOSFET-a i njegov simbol

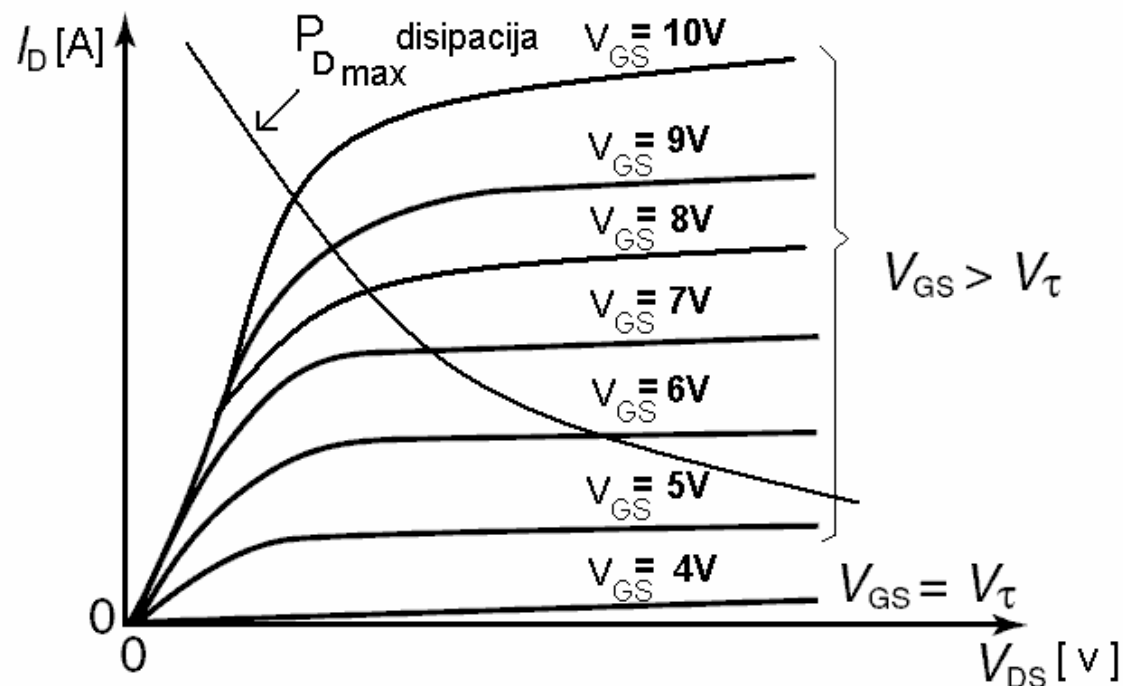


- Pomenuti nedostaci prekidačkog bipolarnog tranzistora su otklonjeni razvojem energetskog MOSFET-a.
- Sa njima je upravljačka struja smanjena praktično na nulu (osim pri komutaciji) i dobijeno naponsko upravljanje.
- Glavne karakteristike MOSFET-a biće prikazane kroz primere karakteristika koje približno odgovaraju tranzistoru napona 1000V, i struje 30A.

KARAKTERISTIKE MOSFET-a



(a)



(b)

Karakteristike MOSFET-a, (a)-ulazne, (b)-izlazne

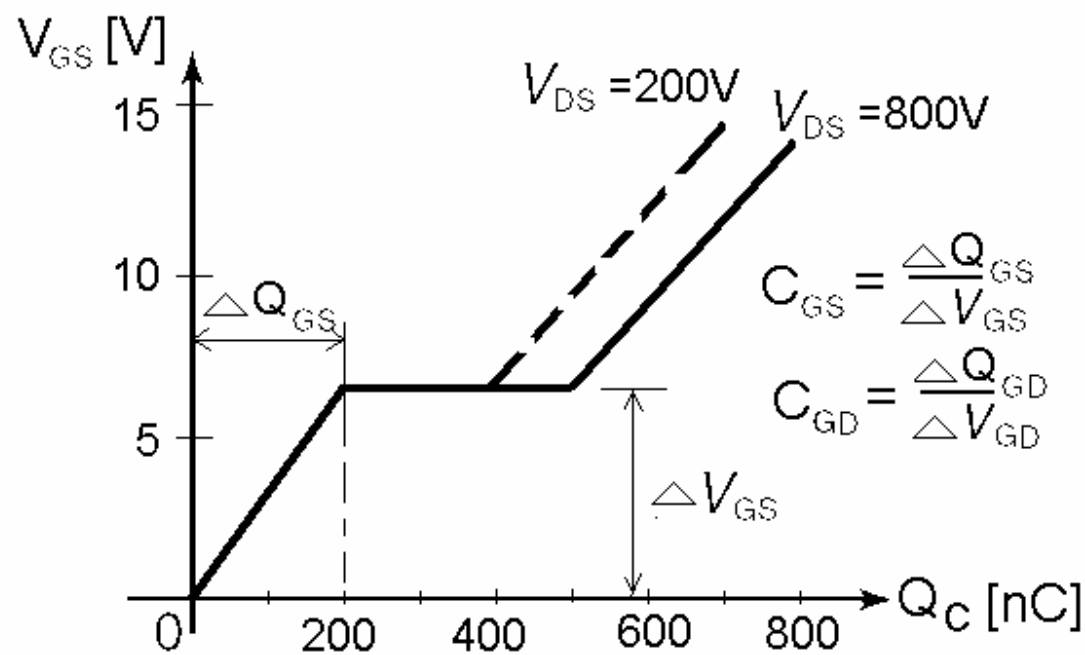
- Ulazne i izlazne karakteristike MOSFET-a imaju oblik prikazan na slikama (a) i (b), respektivno.
- Kao što se vidi, u uključenom stanju pad napona između drejna i sorsa je proporcionalan struji.
- Takođe se vidi da su i padovi napona koji se ovde pojavljuju znatno viši nego kod bipolarnog tranzistora.

POBUDA U KOLU GEJTA-zahtevi

- Prag napona na gejtju, je napon pri kome počinje otvaranje tranzistora i iznosi 3V...4V.
- Ispod ovog napona ne postoji struja između drejna i sorsa.
- Pri isključenju je potrebno napon gejta dovesti na nivo ispod napona praga.
- U praksi se za isključenje obično koristi nulti napon. Sa povišenjem temperature, prag napona se smanjuje.
- Maksimalni napon na gejtju iznosi oko 20V.
- Iznad ovog napona može doći do oštećenja tranzistora.
- Radi zaštite ulaznog kola tranzistora (gejta), između gejta i sorsa se obično stavlja Zener dioda napona oko 15V. Pri tom naponu tranzistor je praktično potpuno otvoren, a ne može doći do njegovog oštećenja.
- Za uključenje MOSFETa je dovoljno koristiti upravljački napon =10...12V.

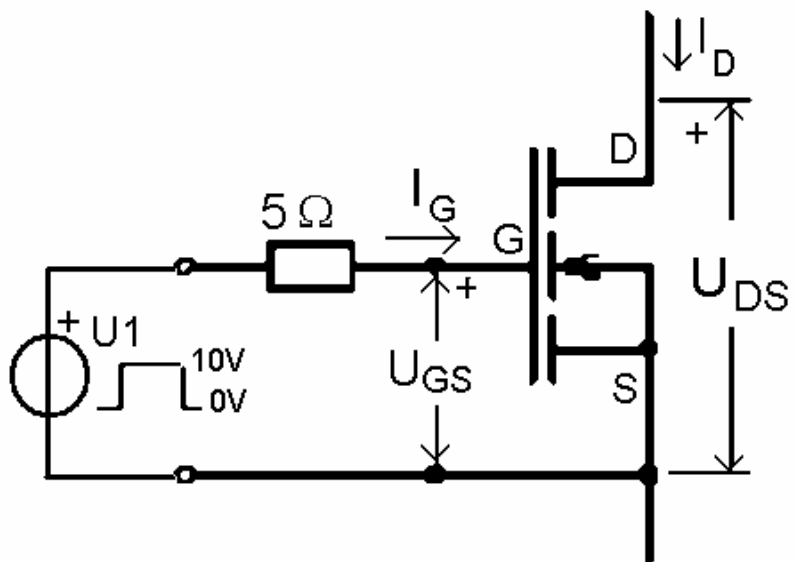
- Pri dovođenju upravljačkog naponskog impulsa na gejt, na prednjoj i zadnjoj ivici impulsa se pojavljuje struja zbog postojanja parazitnih kapacitivnosti, ulazne gejt-sors C_{GS} i kapacitivnosti između gejta i drejna $-C_{GD}$. Ove kapacitivnosti su nelinearne i zavise od napona između drejna i sorsa $-U_{DS}$.
- Kapacitet C_{GS} iznosi od 10...30nF, a C_{GD} je oko desputa manji. Kapacitet C_{GD} , stvara veće poteškoće jer podnosi znatno veći napon.
- Naročito može da bude neugodan prestanak vođenja kontra-diode i brzo uspostavljanje direktnog napona koji preko ove kapacitivnosti može da izazove kratkotrajno uključenje MOSFET-a.
- Zbog toga je potrebno da pogonsko kolo ima malu izlaznu impedansu, a ponekad se koristi i negativni napon na gejtu.

- Dinamičke karakteristike su znatno poboljšane tako da se ovde prekidačka vremena mere desetinama i stotinama nanosekundi.
- Sa ovakvim brzinama, frekventno područje njihove primene ide i preko 100kHz.



Zavisnost naelektrisanja gejta pri komutaciji, od napona gejta

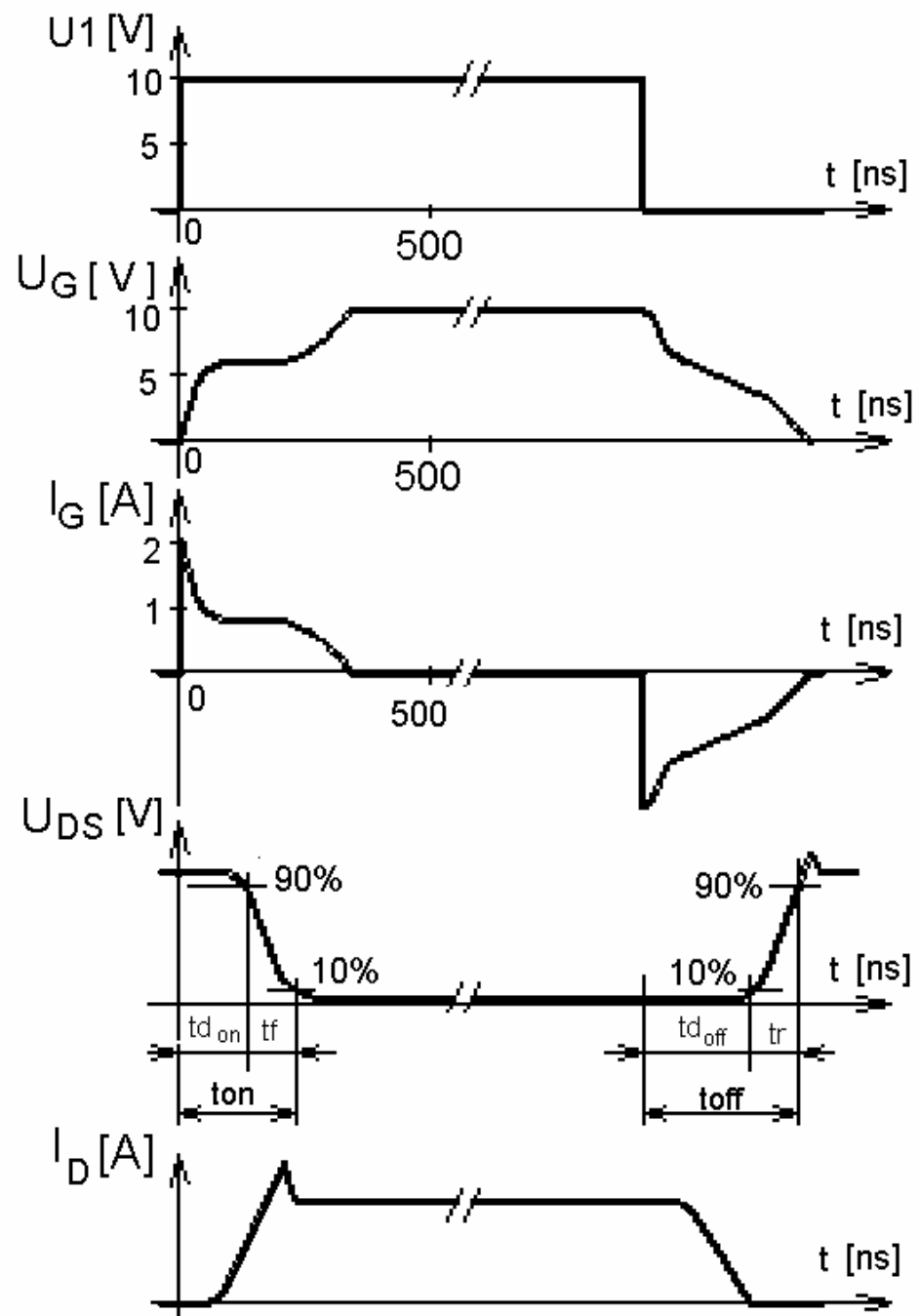
- Zbog ovako kratkih vremena komutacije, mora se voditi računa i o parazitnim induktivnostima.
- Pri njegovom unutrašnjem povezivanju proizvođači takođe vode računa tako da se njegove unutrašnje induktivnosti svode na oko 10nH.
- Ublažavanje njihovog uticaja se donekle postiže dodavanjem otpornika u kolo gejta, čime se malo smanjuje brzina komutacije.



(a)

(a) Osnovno prekidačko kolo sa MOSFET-ima i

(b) Karakteristični talasni oblici pri uključenju i isključenju



(b)

-U prvim trenucima posle uspostavljanja ulaznog napona (desetine ns), puni se ulazni kapacitet C_{GS} struja gejta opada eksponencijalno.

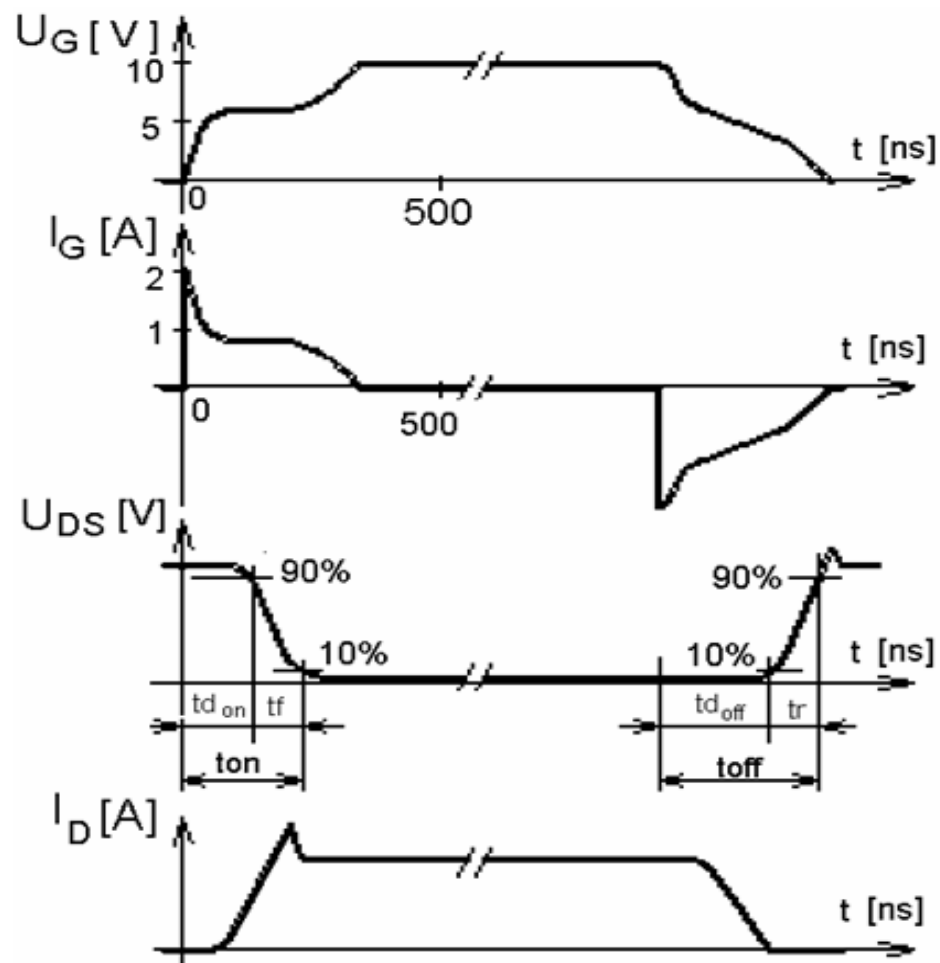
-U isto vreme napon gejta eksponencijalno raste. Kada ovaj napon dođe na oko 5V, MOSFET počinje da provodi i tada mu opada napon U_{DS}

Preko parazitnog kapaciteta C_{GD} sada sva ulazna struja odlazi prema drejnu, pa za to vreme napon na gejtu ostaje konstantan.

- Trajanje ovog intervala zavisi od napona kojim se napaja kolo drejna. Pri višim naponima ovaj interval je duži.

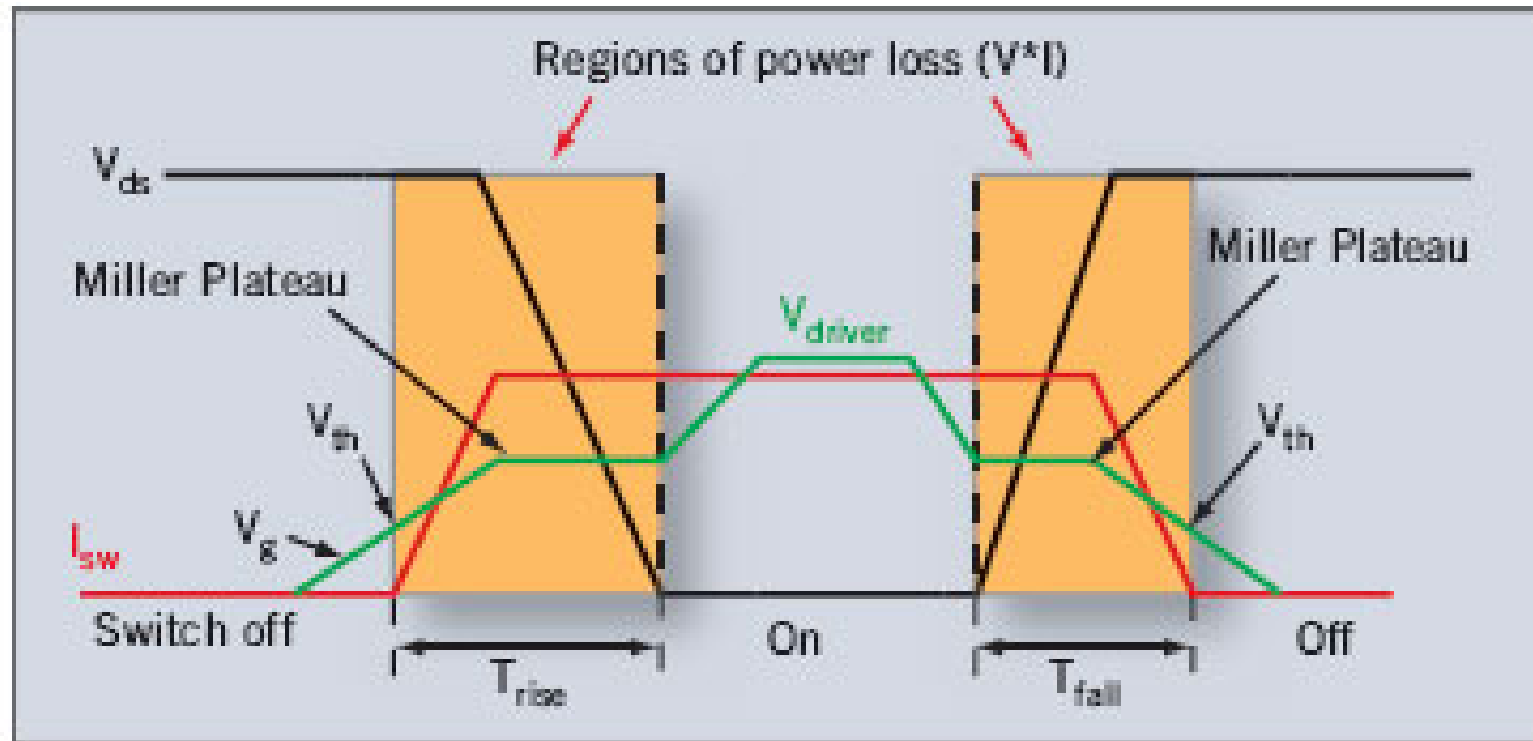
-Kad je tranzistor došao u stanje provođenja, prestaje i uticaj parazitnog kapaciteta C_{GD} pa napon U_{GS} nastavlja da raste a ulazna struja da pada do nule.

Kod isključenja situacija je slična stin što sada porast napona U_{GS} , preko parazitnog kapaciteta C_{GD} dodaje struju gejtu i usporava isključenje.



Na slici su prikazani talasni oblici napona i struja pri uključenju i isključenju, i definisana karakteristična vremena. Vreme kašnjenja isključenja $t_{d(OFF)}$ je obično najduže i može da iznosi i preko 100ns. Sledeće po trajanju je vreme kašnjenja uključenja $t_{d(ON)}$ dok su ostala dva vremena kraća i iznose nekoliko desetina ns. Kratka prekidačka vremena, su uslovia primenu još bržih dioda, zaoštrila problem parazitnih induktivnosti (dužine veza), zbog komutacionih prenapona, parazitnih oscilacija, i slično.

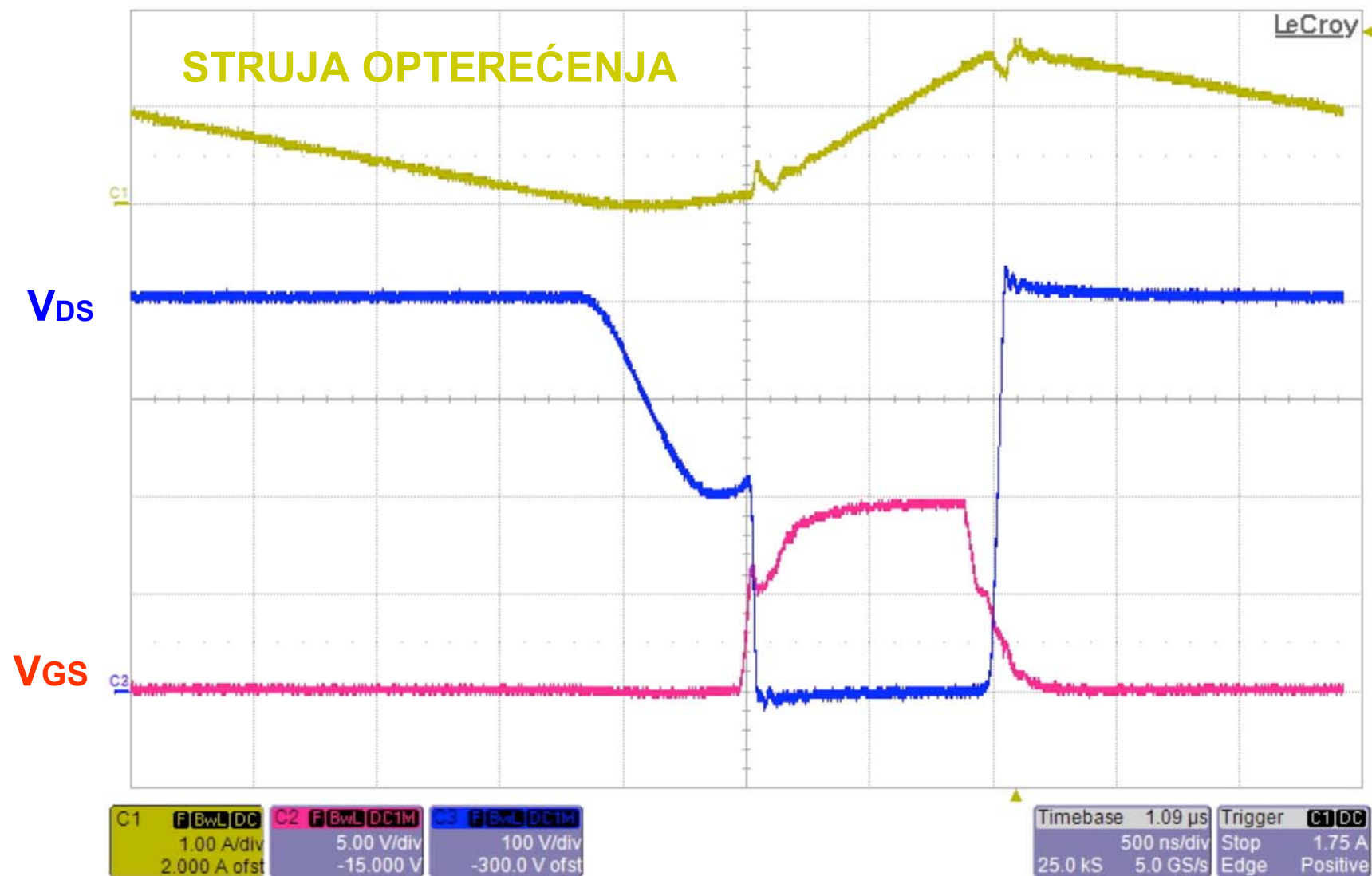
TALASNI OBLICI STRUJA I NAPONA U JEDNOJ PERIODI PREKIDANJA



DIJAGRAMI PRI UKLJUČENJU, VOĐENJU I ISKLJUČENJU MOSFET-a

- U oba slučaja postoji tzv. Milerov plato gde vrednost praga V_{th} ostaje konstanta
- Najveći gubici su u ovoj oblasti
- KAKO IZGLEDAJU REALNI TALASNI OBLICI?

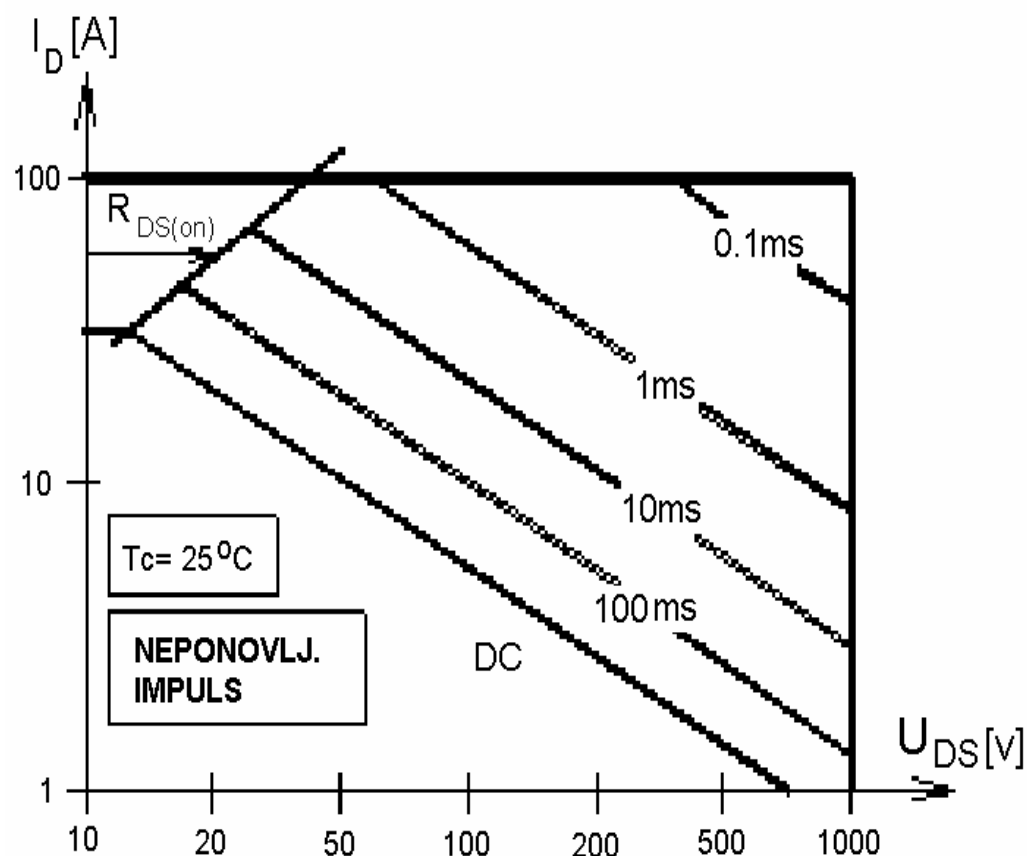
TALASNI OBLICI ZA MOSFET U JENOM ČOPERSKOM KOLU



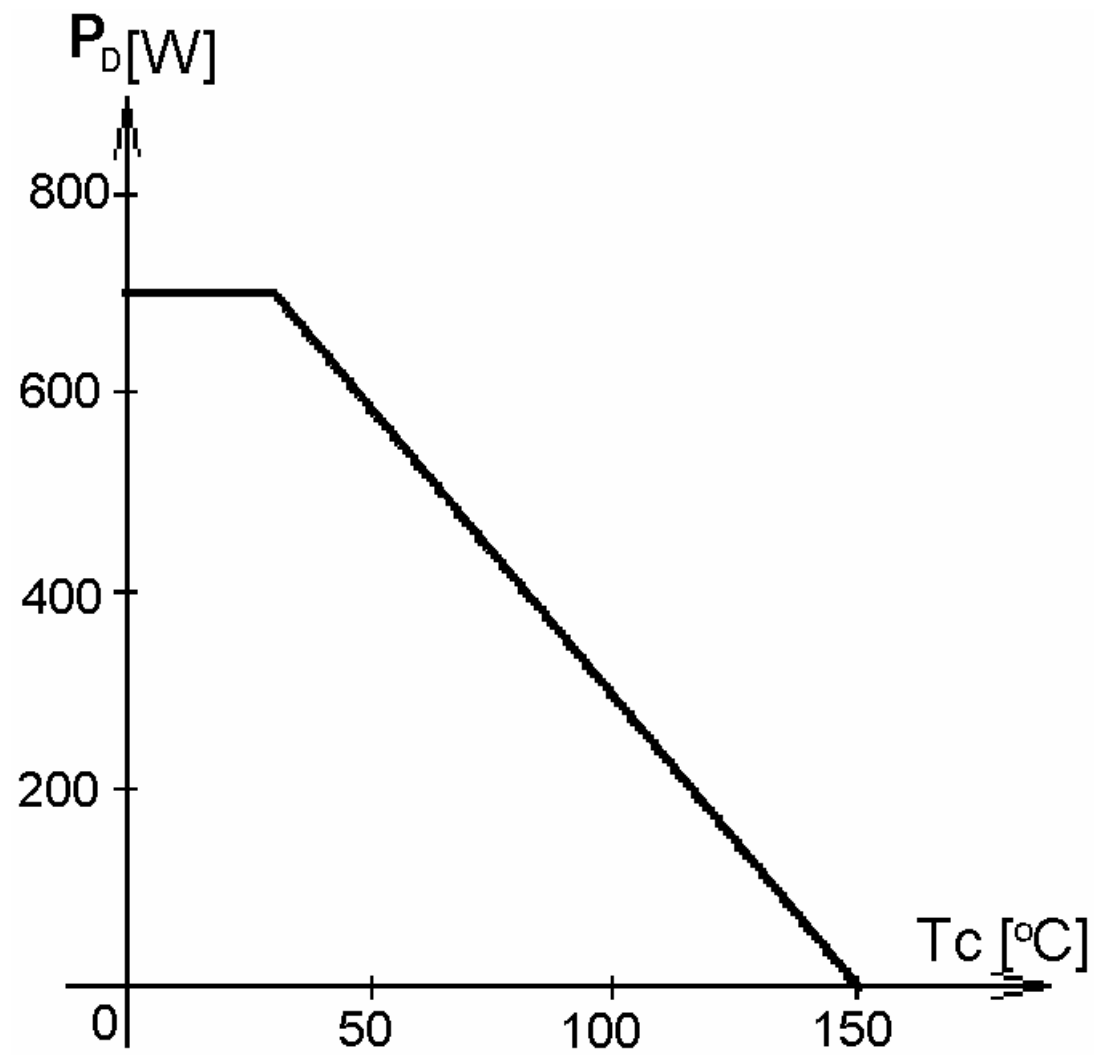
PROŠIRENJE RBSOA OBLASTI

- Prednost ovih tranzistora, u odnosu na bipolarne, je i u proširenju oblasti sigurnog rada u oblasti blokiranja (RBSOA).
- Kod energetskog MOSFET-a ne postoji sniženje napona, koje smo imali kod bipolarnog tranzistora, zbog inverzne bazne struje, pa se ovde ne govori posebno o RBSOA.

- Primer dijagrama koji prikazuje oblast bezbednog rada (FBSOA)
- Zbog velikog pada napona između drejna i sorsa ovde se i $R_{DS(on)}$ pojavljuje kao donja granica napona.
- Kao što se vidi, ovde ne postoji granica zbog sekundarnog proboja.
- Pri kontinualnoj struji (DC) ta granica odgovara snazi disipacije.
- Povišenjem temperature i maksimalno dozvoljena snaga disipacije opada (sledeći slajd).
- Takođe sa povišenjem temperature i probojni napon se povećava.

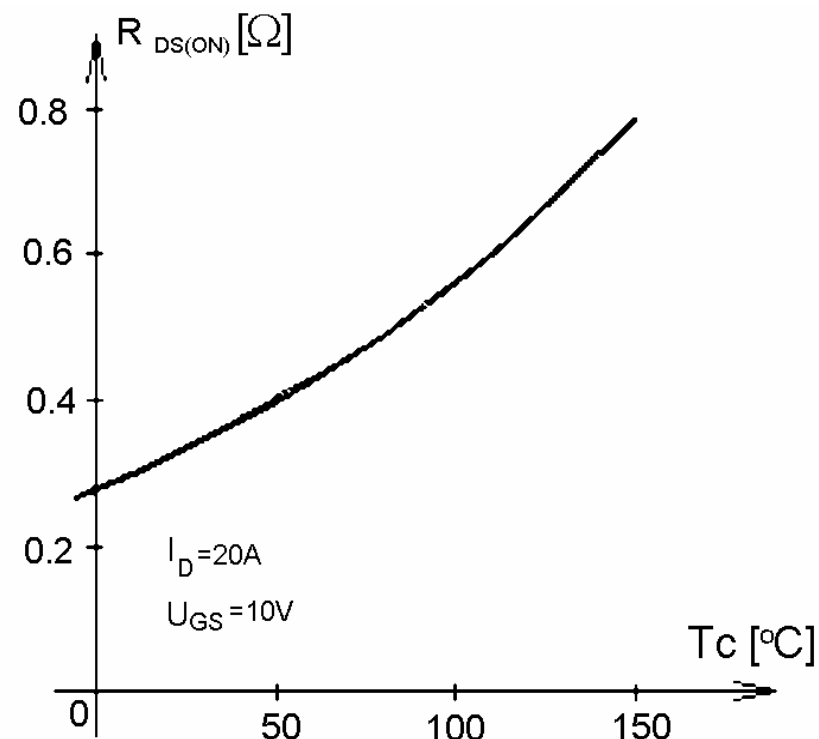


Oblast bezbednog rada jednog tipičnog energetskog MOSFET-a



Dijagram maksimalno dozvoljene snage disipacije

- Sledeća prednost MOSFET-a, je pozitivan temperaturni koeficijent napona , što omogućava paralelan rad dva i više tranzistora, bez opasnosti od termičke nestabilnosti.
- Porast otpora je takav da se pri porastu temperature od 100°C otpor približno udvostručava
- Bitna karakteristika je zavisnost otpora DS u uključenom stanju



Zavisnost otpora drejn-sors MOSFET-a od temperature

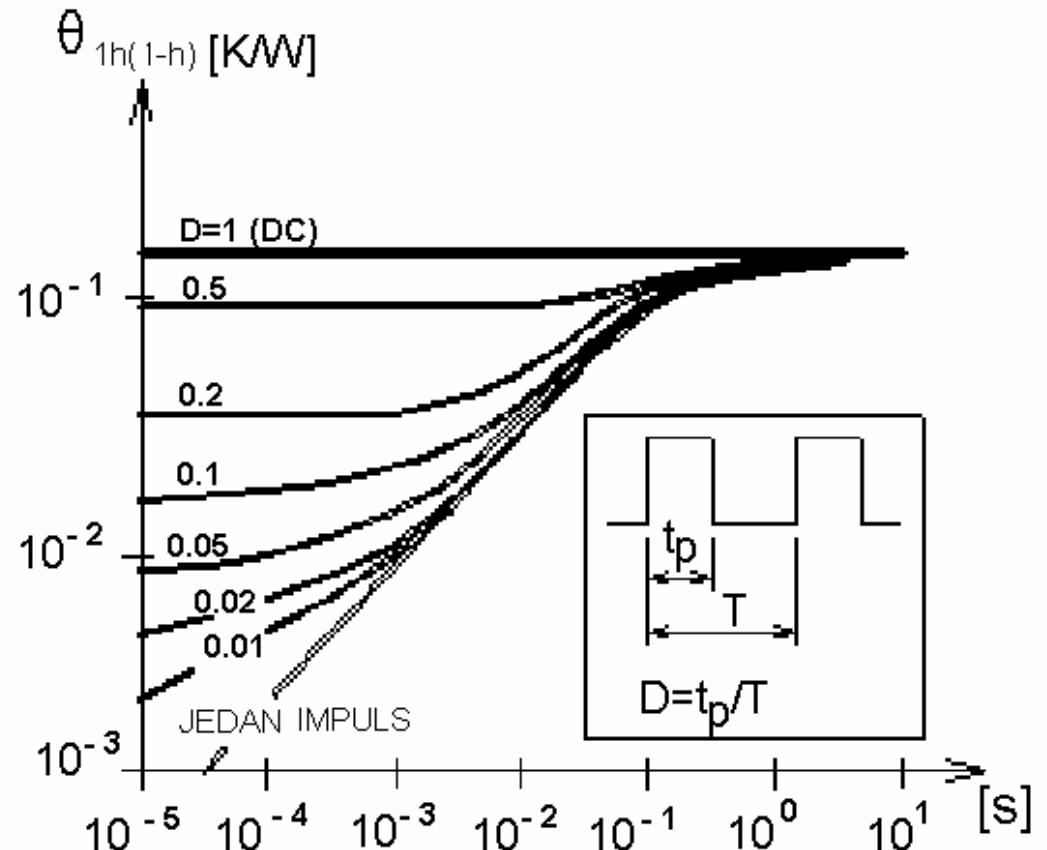
NEDOSTACI MOSFET-a

Nedostaci energetskog MOSFET-a u odnosu na bipolarne tranzistore bi bili:

- *Još uvek male snage prekidanja.*
- *U razvoju ovih tranzistora, do sada se stiglo do napona oko 1000V pri strujama oko 50A, dok se pri naponima ispod 100V postižu struje od više stotina ampera.*
- *Osetljivost na statički elektricitet što zahteva pažljivo rukovanje i dodatne mere zaštite.*
- *Veći statički gubici pri velikim strujama, zbog većeg pada napona između drejna i sorsa , koji je proporcionalan struji.*

MOSFET-ZAGREVANJE, GUBICI SNAGE

- Kod MOSFET-a se umesto napona saturacije definiše otpor između drejna i sorsa u uključenom stanju tranzistora.
- Zbog ovoga je zagrevanje proporcionalno sa kvadratom efektivne vrednosti struje, a ne sa srednjom vrednošću, kako je to bio slučaj kod bipolarnog tranzistora.
- Ovo se uzima u obzir preko termičke impedanse koja ovde zavisi i od faktora ispune, tako da se ima familija krivih



Dijagram termičke impedanse MOSFET modula

TRENDOVI RAZVOJA MOSFET PREKIDAČA

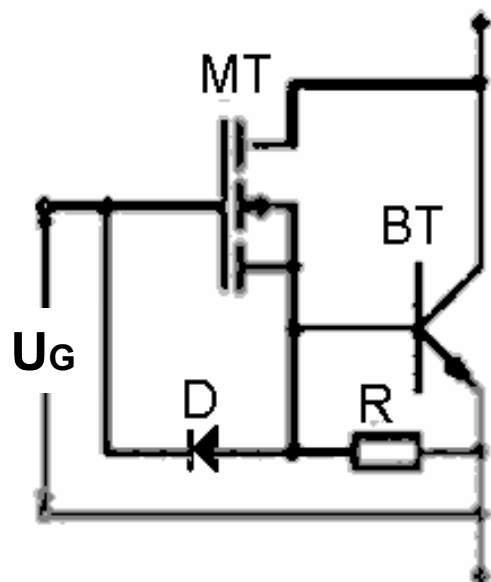
- Za razliku od bipolarnog prekidačkog tranzistora, čiji je razvoj praktično završen, energetski MOSFET je prekidački element budućnosti.
- Velike prekidačke mogućnosti bipolarnih tranzistora i dobre dinamičke i ulazne karakteristike MOSFET-a, moguće je odgovarajućim vezama kombinovati.
- Jedna takva kombinacija se proizvodi kao poseban prekidački element pod nazivom IGBT

SPOJEVI MOSFET i BJT

- Postoji u praksi nekoliko kombinacija spojeva MOSFET (MT) i bipolarnog (BT) tranzistora.
- Četiri takva spoja, koja se koriste u praktičnim aplikacijama su:
 - *kaskadni spoj*
 - *kaskodni spoj*
 - *kaskadno kaskodni*
 - *paralelni spoj*

DETALJNIJE O SVAKOM OD OVIH SPOJEVA U NASTAVKU!!!!

KASKADNI SPOJ



Upravljački napon se dovodi na gejt ulaznog tranzistora (MT) koji mora biti naponske klase kao i izlazni bipolarni tranzistor (BT).

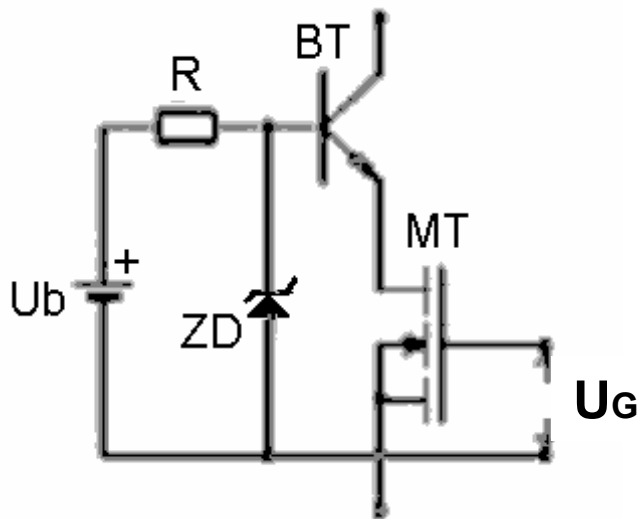
Otpornik u baznom kolu BT povećava imunitet BT prema smetnjama.

Ovakva veza daje kratka vremena pri uključenju.

Za poboljšanje dinamičkih karakteristika pri isključenju dodaje se dioda u kolo baza-gejt.

Kroz nju se zatvara negativna struja I_{B2} pri negativnom ulaznom naponu U_G .

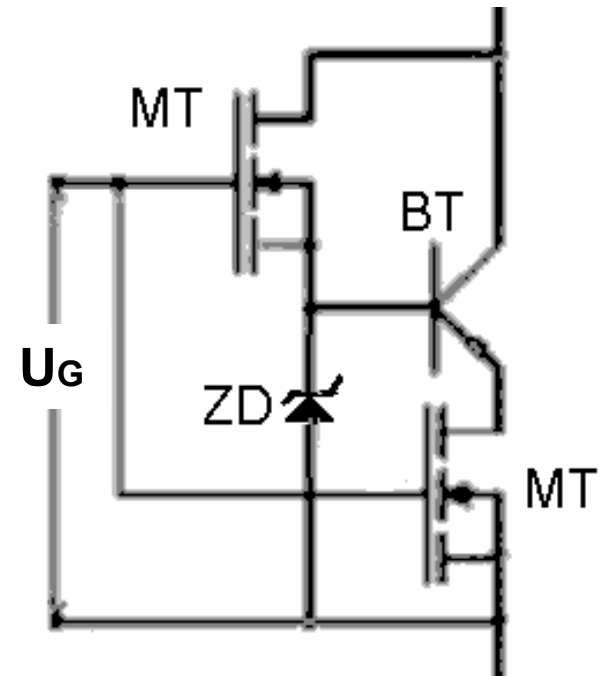
KASKODNI SPOJ



- Tranzistori su vezani na red što znači da moraju biti iste strujne klase.
- Napon MOSFETa može biti znatno niži.
- Napon baze BT je konstantan a upravljanje se vrši naponom gejta MT.
- Pri uključenju MT istovremeno se pojavljuje i struja baze BT i ima se provođenje glavne struje.
- Pri isključenju MT Napon emitera se podiže i struja nastavlja da se zatvara kroz spoj kolektor-baza.
- Zbog ovoga se nagomilano naelektrisanje baze brzo odvodi i vreme t_s znatno skraćuje.
- Na ovaj način se postiže idealan oblik struje baze BT pri isključenju a samim tim i kratka prekidačka vremena.
- Nedostatak ove veze je povećan pad napona zbog redne veze dva tranzistora.

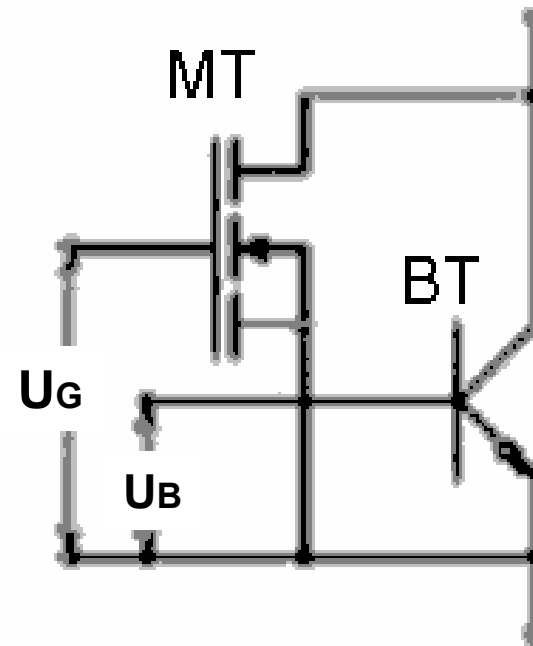
KASKADNO-KASKODNA VEZA

- Kombinacija dve prethodne veze, tzv. *kaskadno-kaskodna* veza.
- Sa ovom vezom se postiže idealan oblik bazne struje BT, i pri uključenju i pri isključenju
- Tako se postižu najbolje dinamičke karakteristike.
- Međutim i dalje ostaje visok pad napona na rednoj vezi dva tranzistora.



PARALELNA VEZA

- Pri uključenju prvo se uključuje MT a odmah zatim BT.
- U uključenom stanju struju provodi BT i ima se mali pad napona.
- Pri isključenju prvo se prekida bazna struja za BT i struju preuzima MT a zatim se njime isključuje struja.
- Na ovaj način je postignuto da se komutacija odvija veoma brzo jer se vrši sa MT, a u provodnom stanju mali pad napona jer struju vodi BT.
- Nedostatak ove veze je složenije upravljanje jer dva upravljačka signala (U_B i U_G), moraju biti precizno vremenski usklađena.
- Ovo je naročito problem pri kvarovima, jer ova vremena zahtevaju da budu unapred isplanirana.



MOSFET POBUDNA (DRAJVERSKA KOLA)

NAMEĆE SE NIZ OTVORENIH PITANJA!!!

1. ZAHTEVI U POGLEDU STRUJE, NAPONA I UČESTANOSTI

2. TIPOVI POBUDNIH KOLA

2.1. NEIZOLOVANA (bez glvanske izolacije od samog MOSFET prekidača)

- UNIPOLARNA POBUDNA KOLA (koriste jednostruko napajanje 0- V_c
- BIPOLARNA POBUDNA KOLA (koriste negativno i pozitivno napajanje, odnosno izvor tipa $-V_c \dots GND \dots +V_c$

2.2. IZOLOVANA (sa glvanskom izolacijom samog MOSFET prekidača)

- GALVANSKA OPTIČKA IZOLACIJA POMOĆU OPTOKAPLERA
- GALVANSKA IZOLACIJA POMOĆU IMPULSNOG TRANSFORMATORA (sa i bez pomoćnog izvora napajanja)

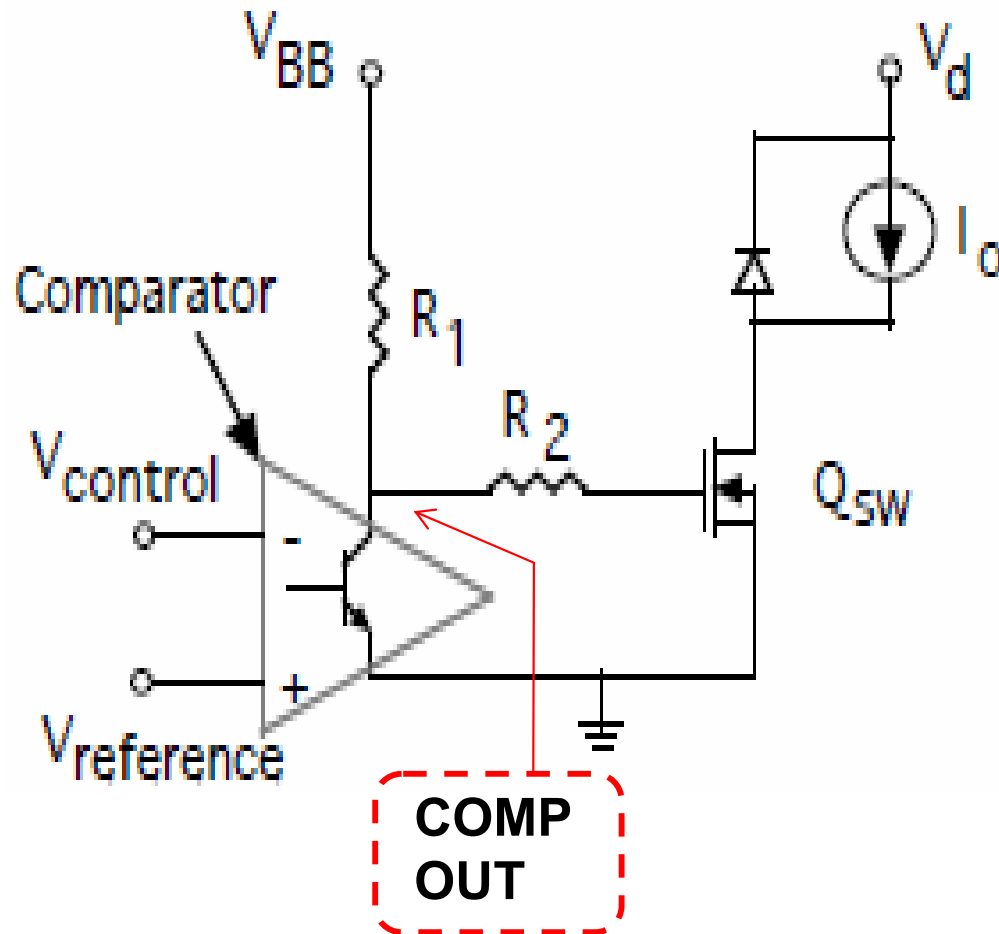
3. MINIMIZIRANJE RASIPNIH INDUKTIVNOSTI

ZAHTEVI ZA POBUDNIM KOLOM MOSFET-a U POGLEDU STRUJE, NAPONA I UČESTANOSTI

- Prag napona na gejtju V_{th} (napon pri kome počinje otvaranje tranzistora) je 3V...5V.
- Ispod ovog napona ne postoji struja između drejna i sorsa.
- Prilikom isključenja je potrebno napon gejtja dovesti na vrednost ispod napona praga V_{th} .
- U praksi se za isključenje obično koristi nulti napon, ređe negativni.
- Sa povišenjem temperature, prag napona na gejtju V_{th} se smanjuje.
- Maksimalni napon na gejtju iznosi oko 20Vdc, tipični 15Vdc.
- Iznad ovog napona može doći do oštećenja tranzistora.
- Radi zaštite ulaznog kola tranzistora (gejtja), između gejtja i sorsa se obično stavlja Zener dioda napona oko 15V.
- Pri naponu 15V tranzistor je praktično potpuno otvoren, a ne može doći do njegovog oštećenja.
- Za uključenje MOSFETa je dovoljno koristiti upravljački napon =10...12V.
- Strujni zahtevi su niski; potrebno je proračunati koliko naelektrisanje (par stotina nC, 400-800nC) treba ubrizgati u kratkom intervalu u ulaznu kapacitivnost C_{GS}

UNIPOLARNA MOSFET POBUDNA (DRAJVERSKA KOLA)

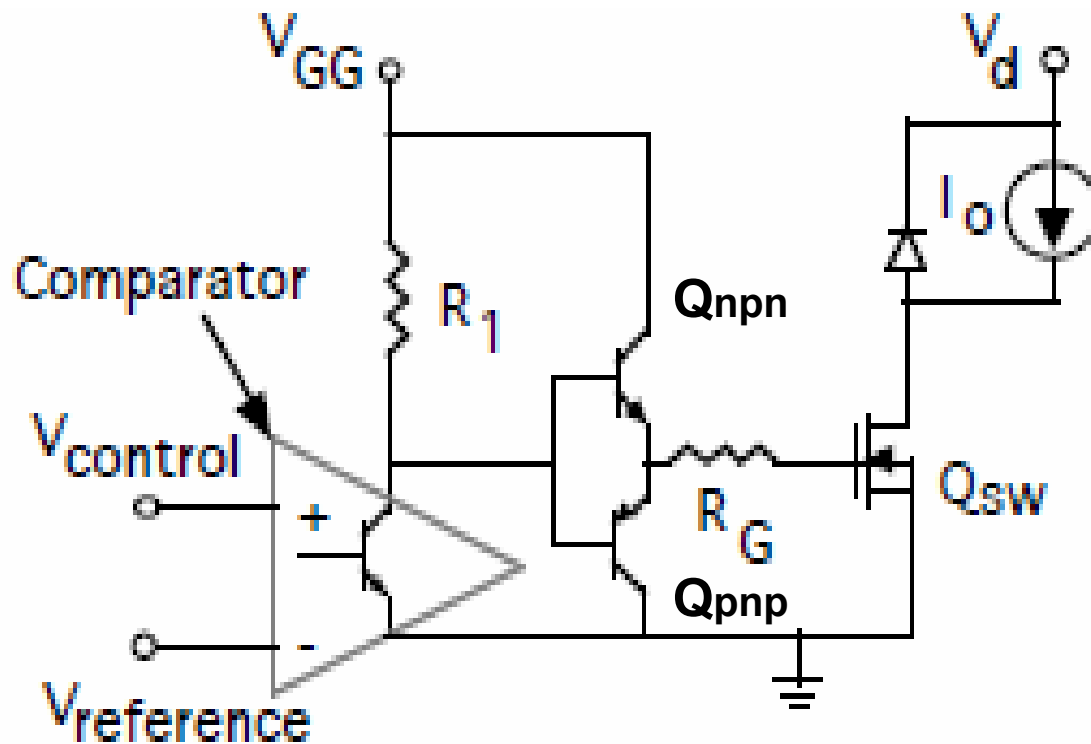
DIREKTNA POBUDA IZ KOMPARATORSKOG KOLA



- $V_{\text{control}} > V_{\text{reference}}$
comparator out : HIGH
 $Q_{\text{sw}} \rightarrow \text{ON}$
- $V_{\text{control}} < V_{\text{reference}}$
comparator out : LOW
 $Q_{\text{sw}} \rightarrow \text{OFF}$

UNIPOLARNA MOSFET POBUDNA (DRAJVERSKA KOLA)

POBUDA PREKO POJAČAVAČKOG KOLA KOMPLEMENTARNIH TRANZISTORA tzv.
Emitter Follower



- $V_{control} > V_{reference}$
comparator out : HIGH

$Q_{nnp} \rightarrow$ ON

$Q_{sw} \rightarrow$ ON

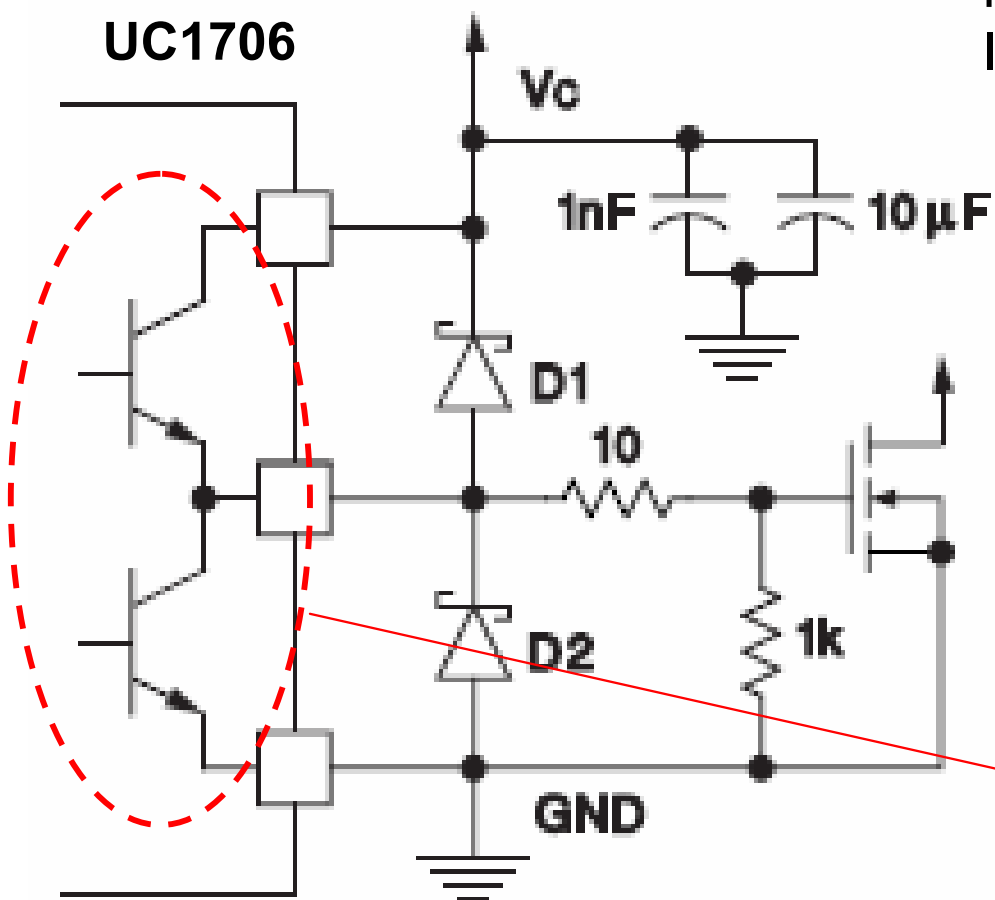
- $V_{control} < V_{reference}$
comparator out : LOW

$Q_{pnp} \rightarrow$ ON

$Q_{sw} \rightarrow$ OFF

UNIPOLARNA MOSFET POBUDNA (DRAJVERSKA KOLA)

POBUDA PREKO *TOTEM-POLE*
IZLAZA SA BJT



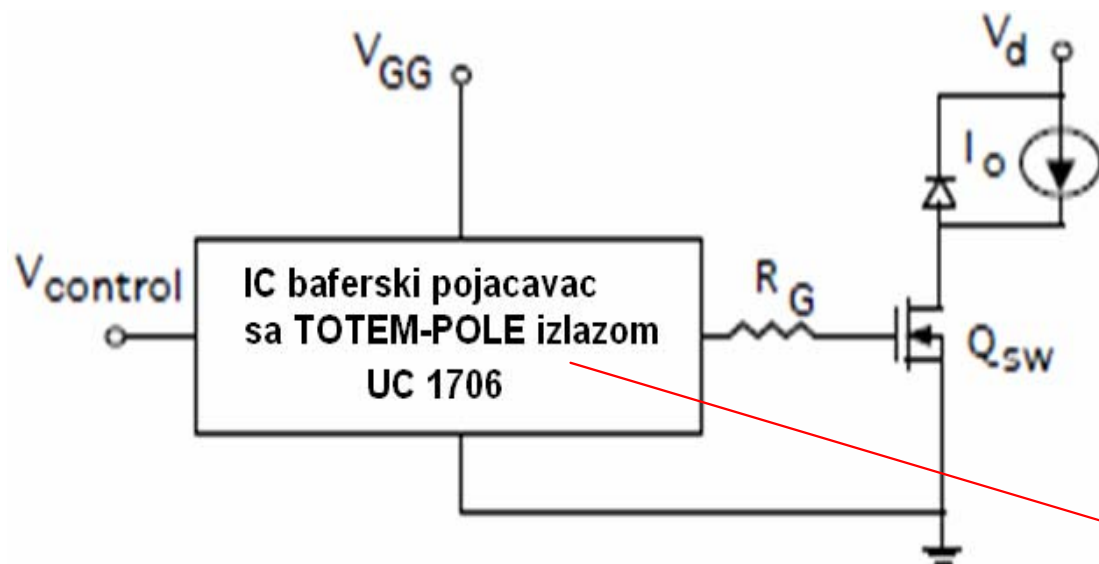
TOTEM-POLE IZLAZ:

Dva BJT postavljeni kao
totemi (jedan iznad drugog)

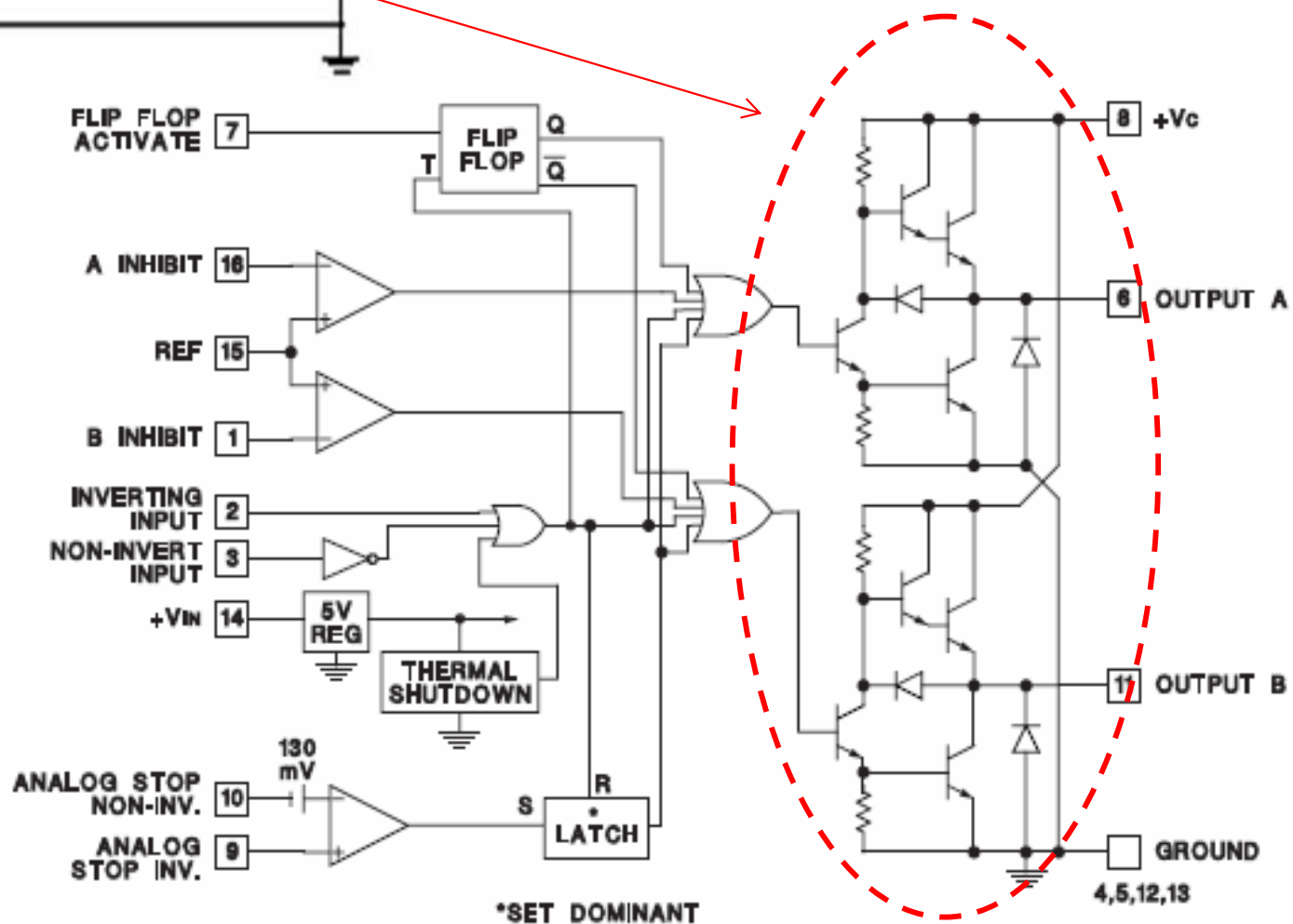
D1, D2 su Šotki diode

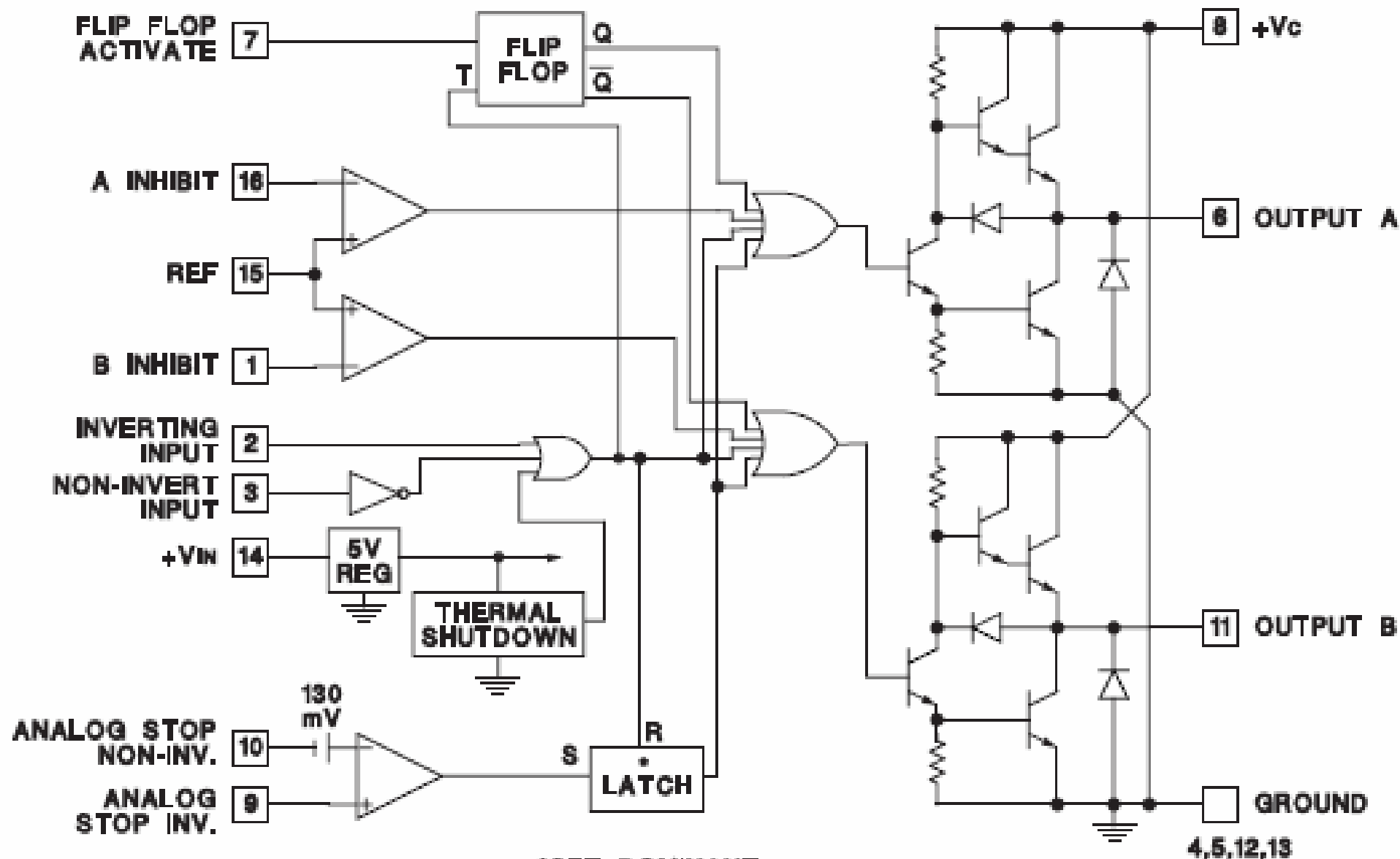
Na primer UC3611





UC1706
Unitrode





tablica istinitosti

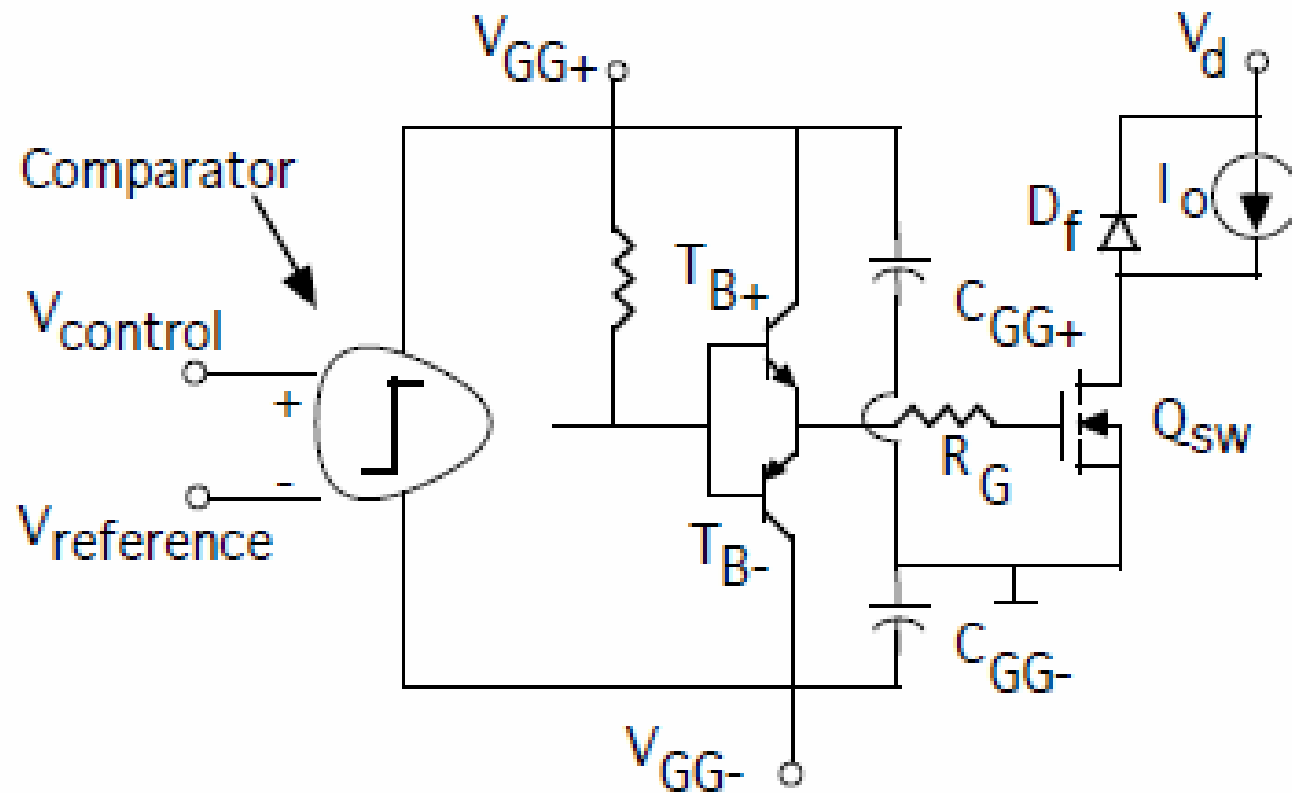
INV	N.I	OUT
H	H	L
L	H	H
H	L	L
L	L	L

*SET DOMINANT

$$\text{OUT} = \overline{\text{INV}}$$

$$\overline{\text{OUT}} = \text{INV}$$

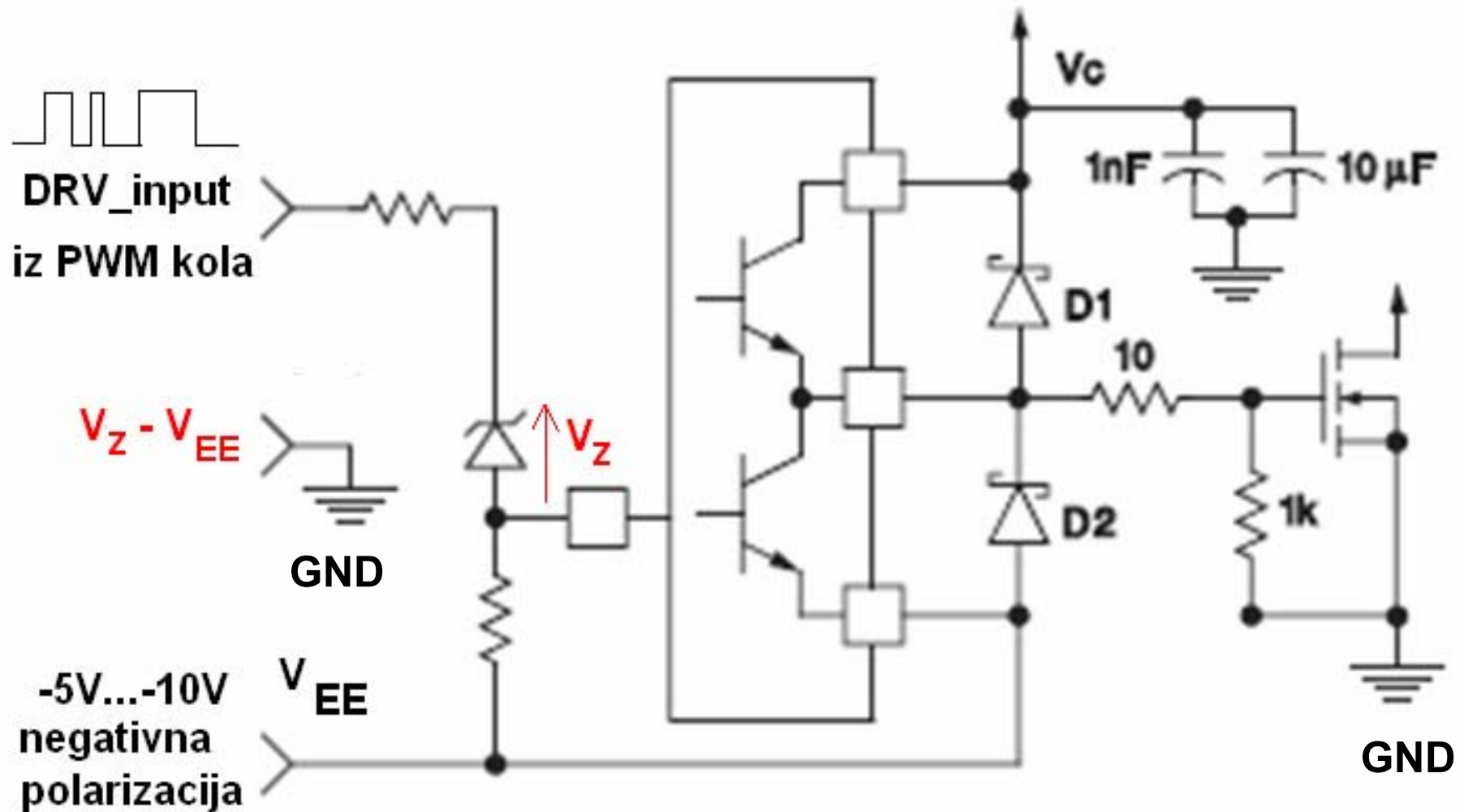
BIPOLARNA MOSFET POBUDNA (DRAJVERSKA KOLA)



BIPOLARNO POBUDNO KOLO SA POVEĆANJEM STRUJNOG KAPACITETA
(preko EMITTER-FOLLOWER kola)

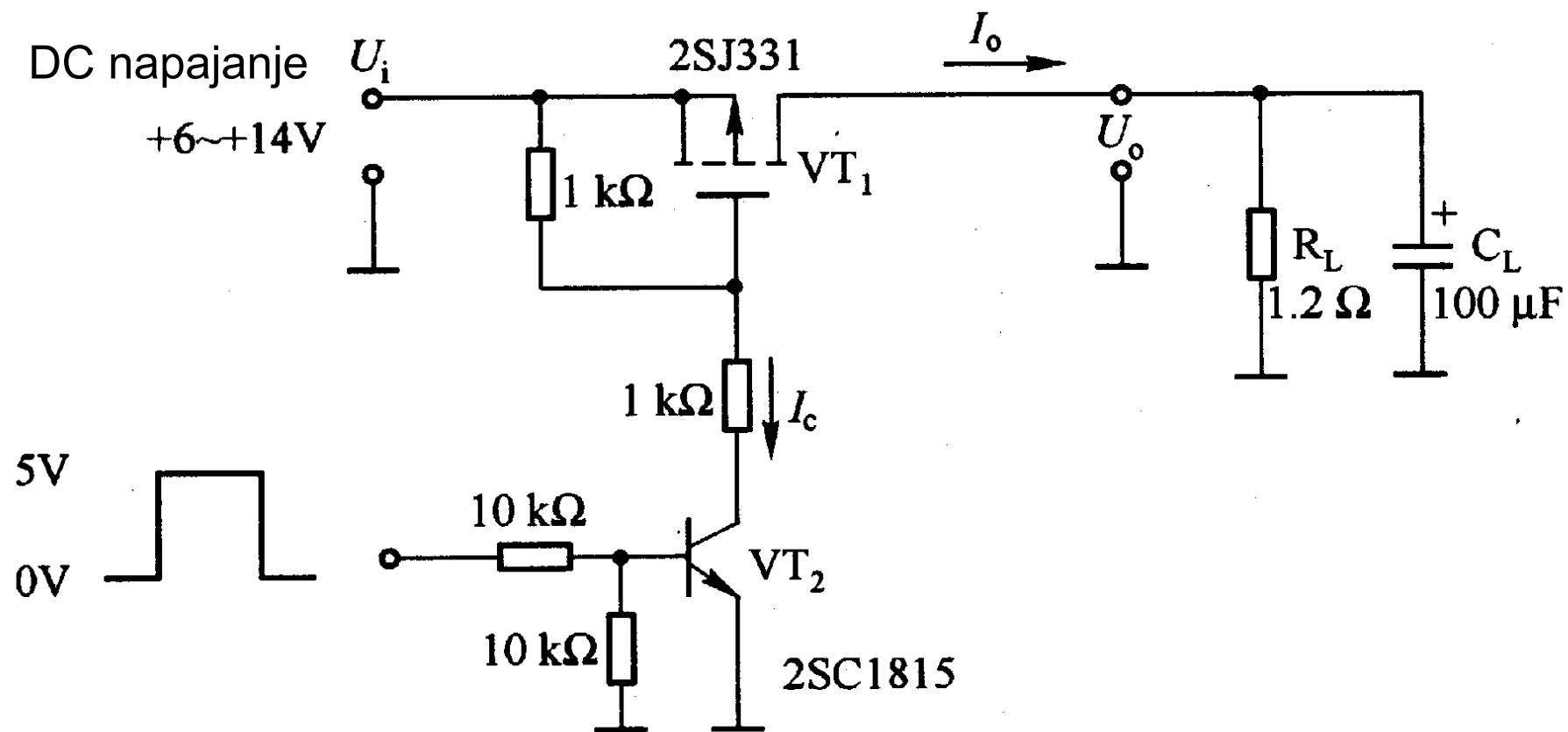
BIPOLARNA MOSFET POBUDNA (DRAJVERSKA KOLA)

Drajversko kolo sa TOTEM-POLE izlazom koje koristi napon negativne polarizacije V_{EE} i “pomeranje nivoa” PWM signala u odnosu na masu GND



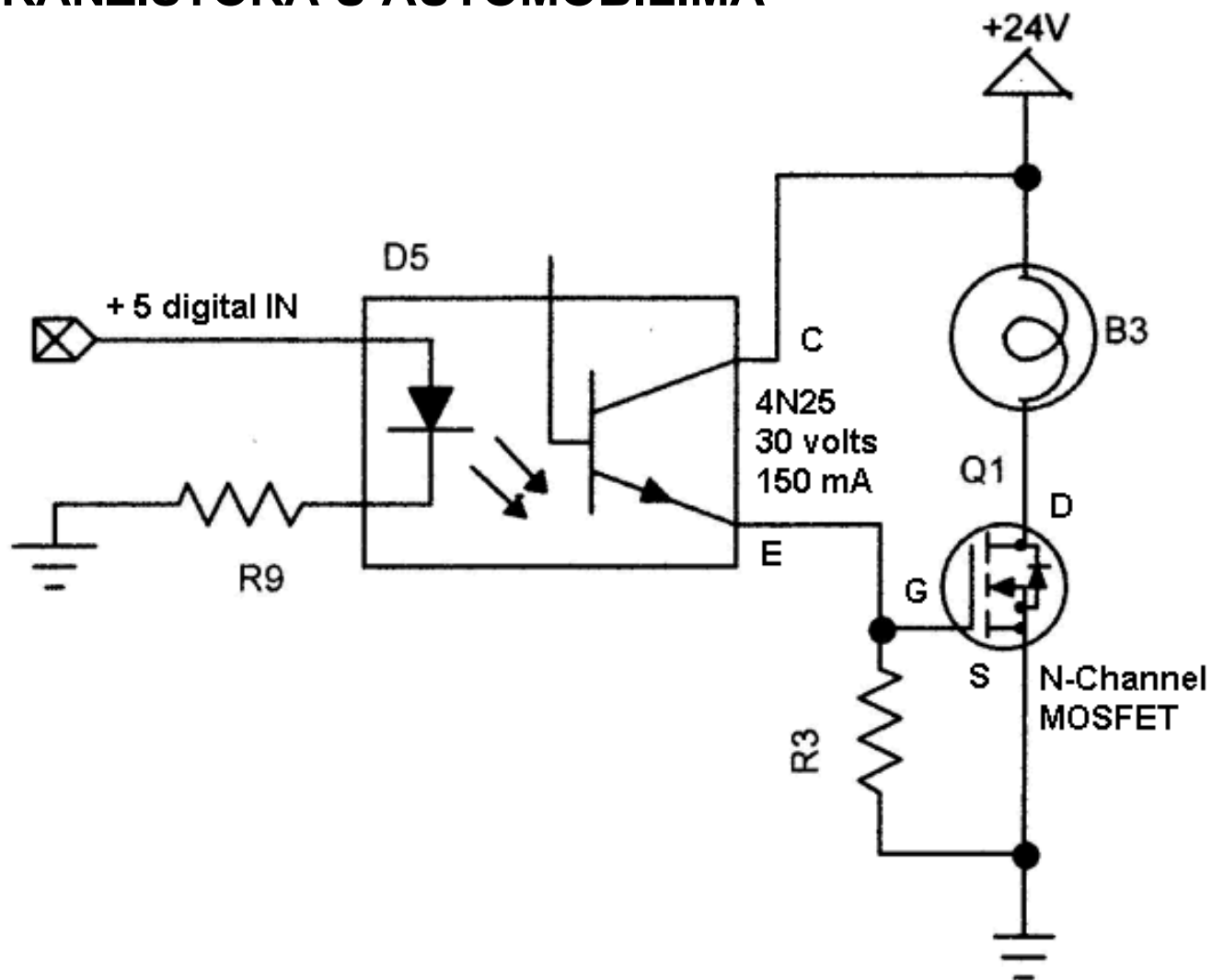
MAX izlaz TOTEM-POLE
do 1A

TIPIČNO KOLO ZA POBUDU P-MOS PREKIDAČA

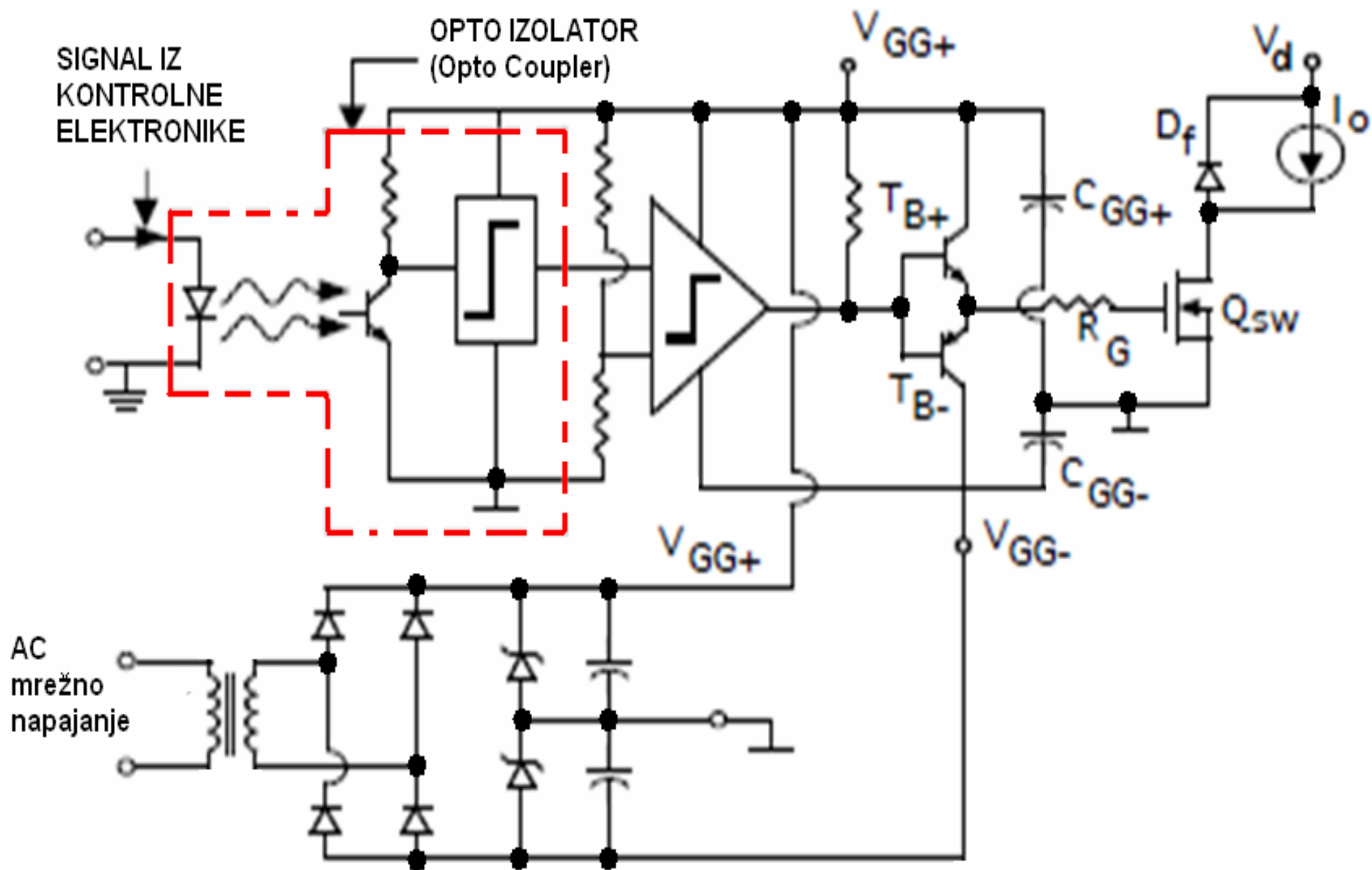


P-MOS se obično koristi za niske napone (do 100V max)

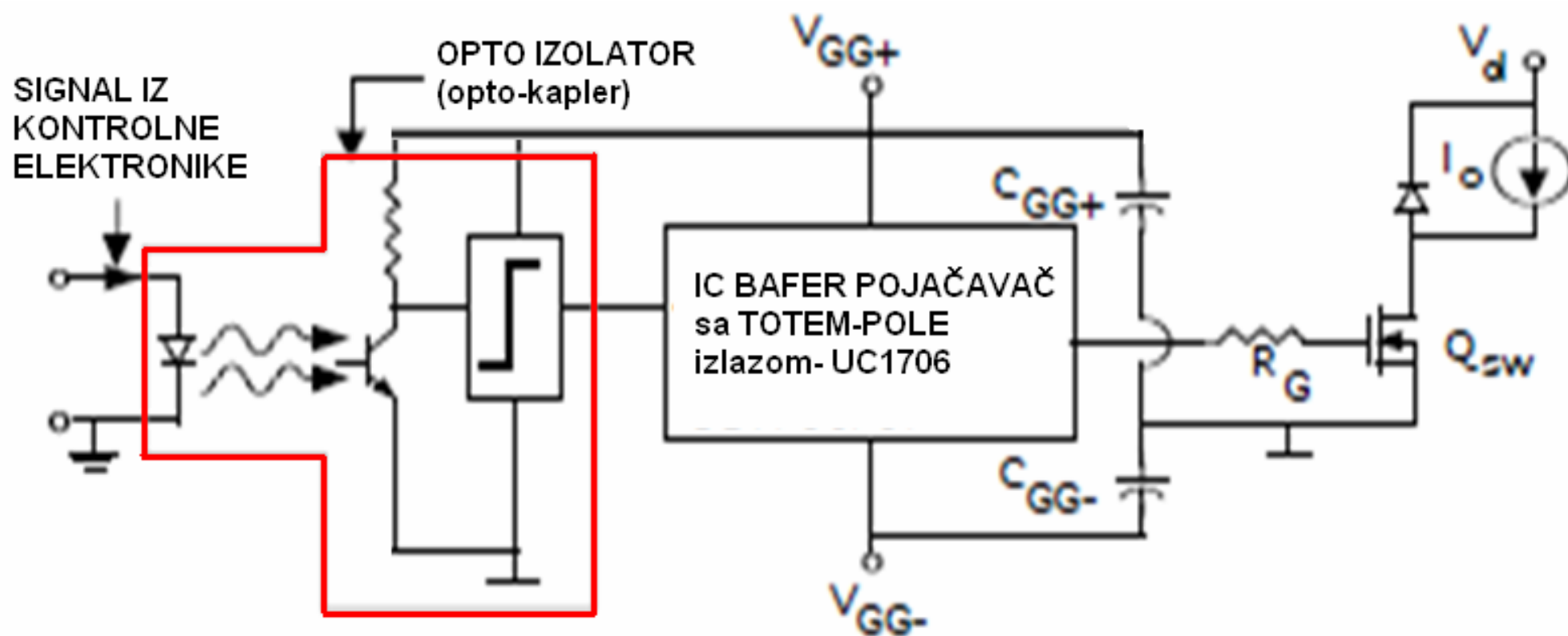
TIPIČNA APLIKACIJA N-MOS TRANZISTORA U AUTOMOBILIMA



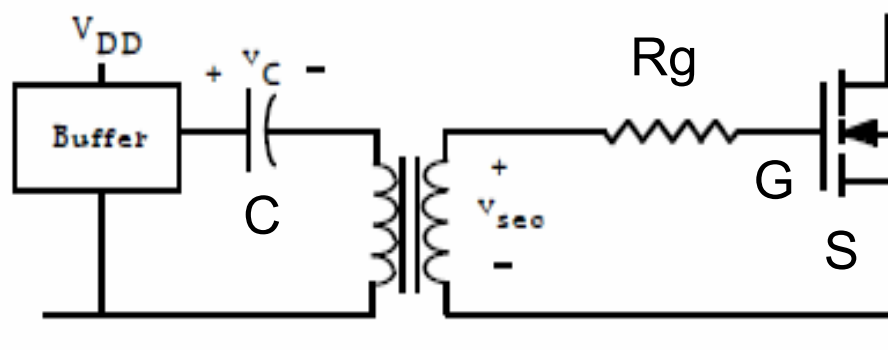
OPTO-IZOLOVANO POBUDNO KOLO ZA MOSFET



OPTO-IZOLOVANO DRAJVERSKO KOLO ZA MOSFET



IZOLACIONO POBUDNO KOLO (sa impulsnim transformatorom) BEZ POMOĆNOG DC NAPAJANJA

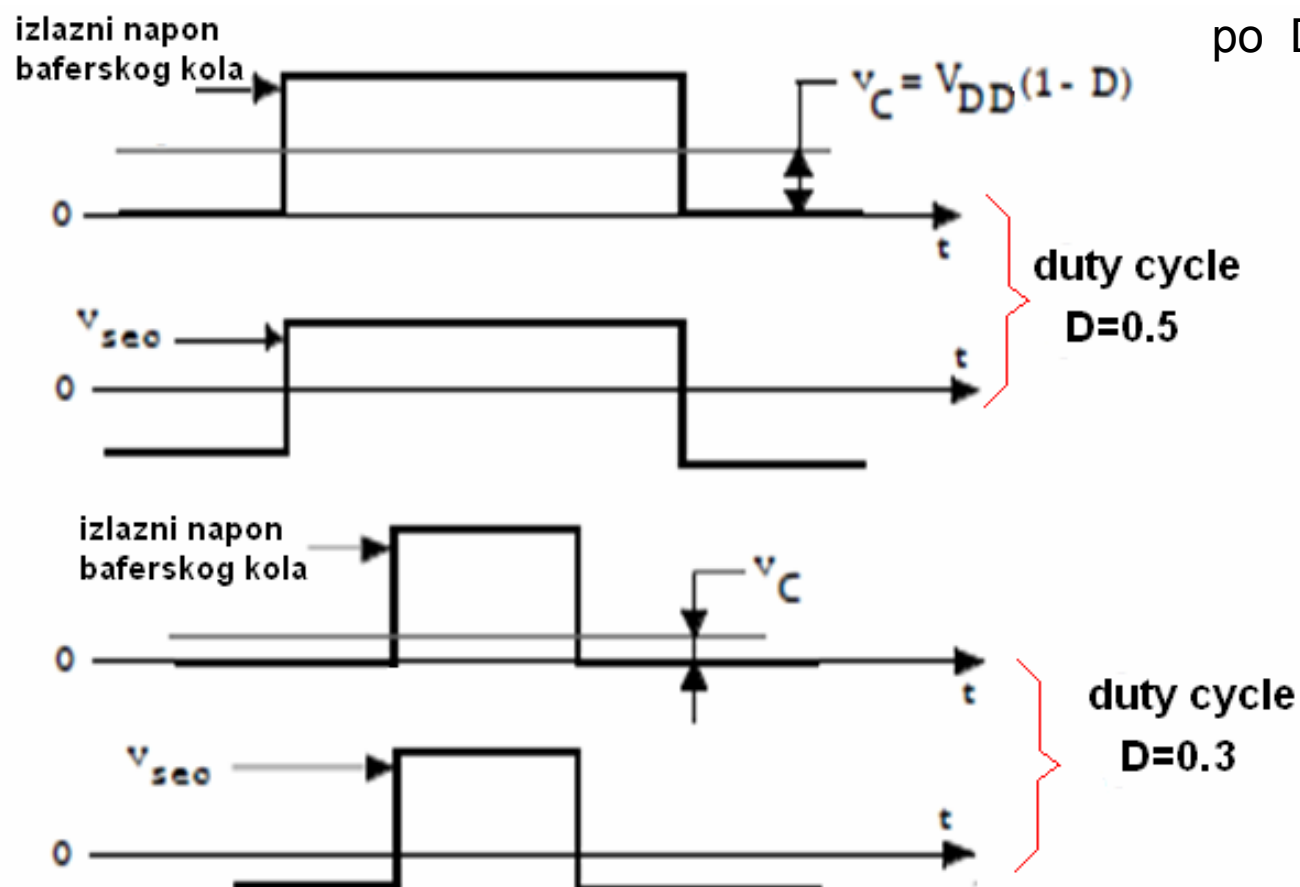


Kondenzator C potiskuje jednosmernu komponentu u signalu izlaznog napona baferskog kola (kondenz. je prekid za DC signale)

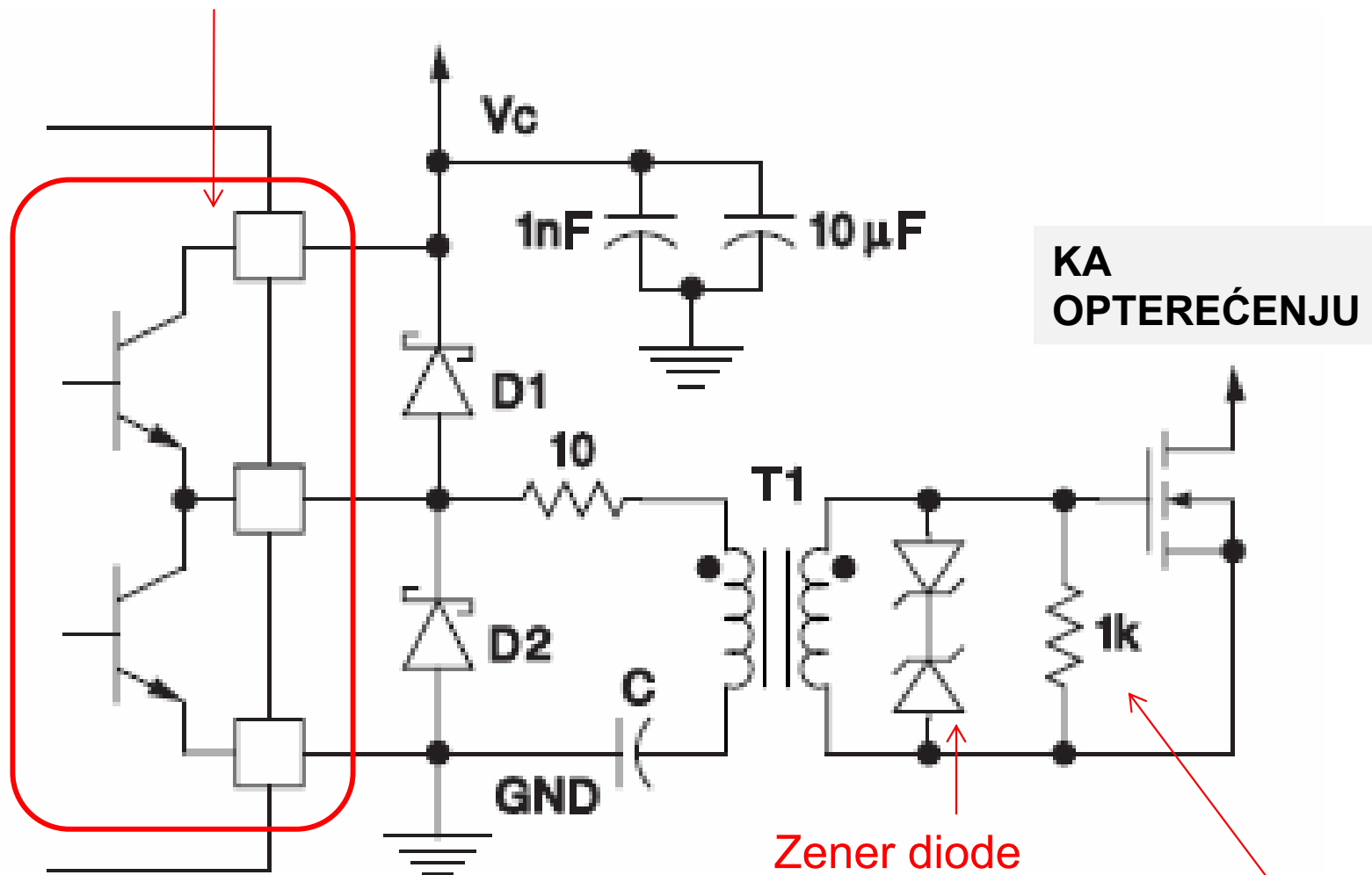
Ovo pobudno kolo ima jednu ozbiljnu manu a to je ograničenje po DUTY-CYCLE

$$D \leq 0.5 \text{ (50\%)}$$

Za veće vrednosti D, odnosno $D > 0.5$ pozitivna poluperioda napona v_{sec} će imati manje vrednosti što nam ne odgovara za pouzdanu pobudu MOSFET gejta!!!!



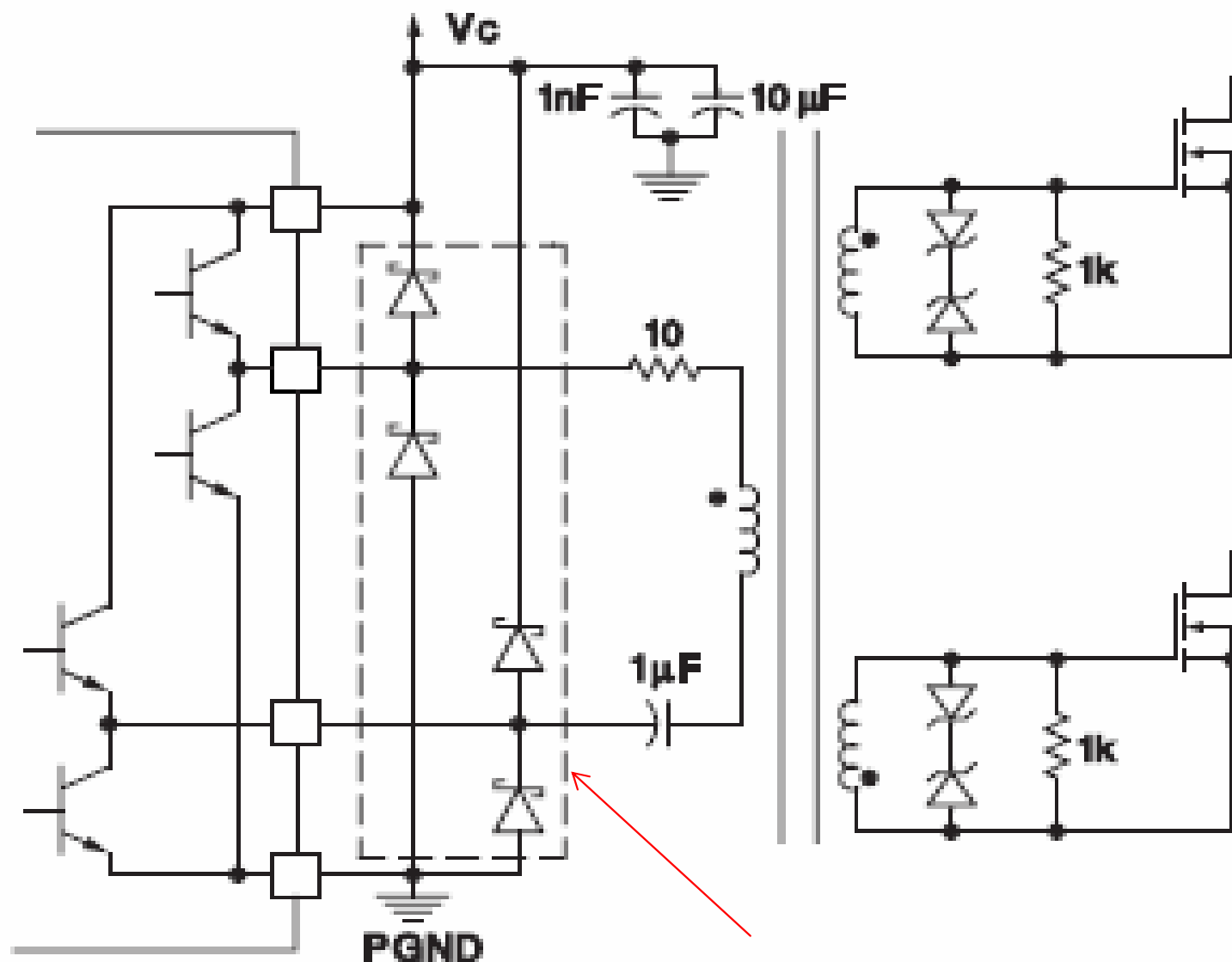
IZOLACIONO POBUDNO KOLO (sa impulsnim transformatorom)
BEZ POMOĆNOG DC NAPAJANJA
SA TOTEM-POLE IZLAZNIM STEPENOM



Zener diode
(back to back)?

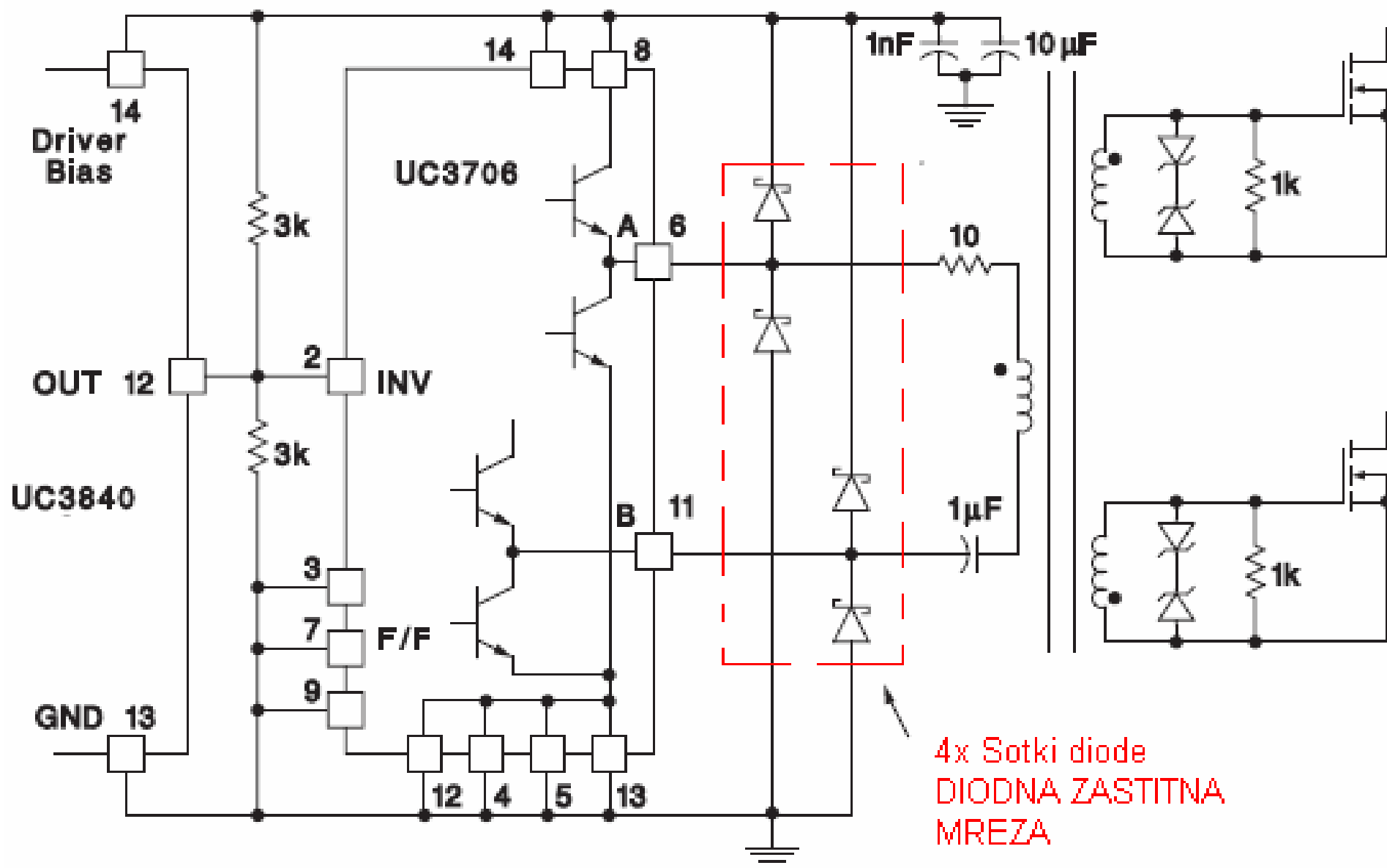
A otpor 1k?

IZOLACIONO PUSH-PULL POBUDNO KOLO (sa impulsnim transformatorom)
BEZ POMOĆNOG DC NAPAJANJA
SA **TOTEM-POLE** IZLAZNIM STEPENOM

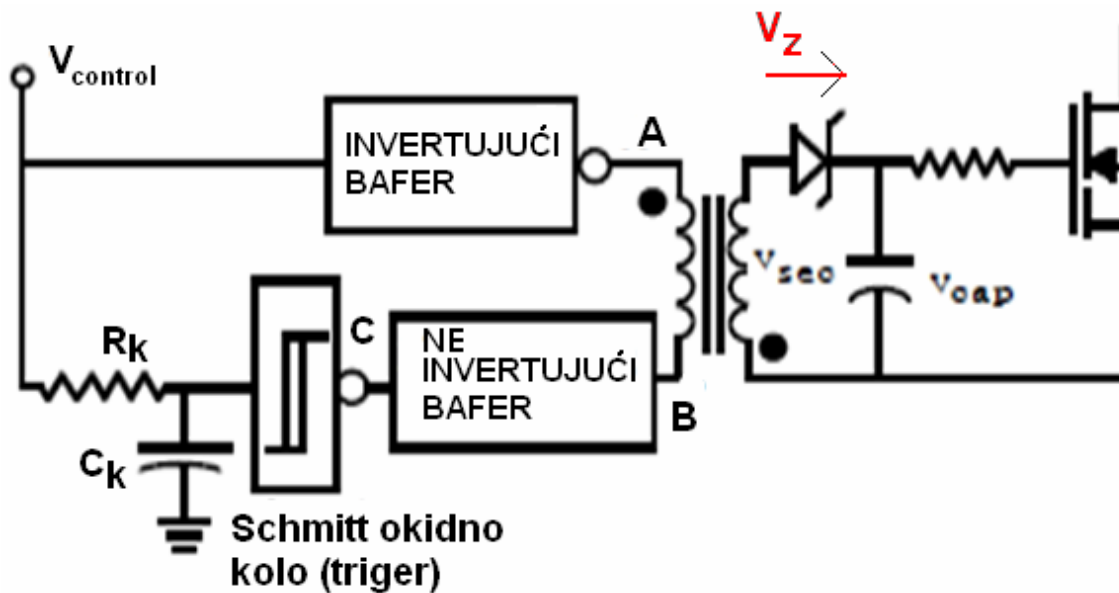


Zaštitna diodna mreža (4x Šotki diode)

JEDNOSTAVAN KONVERTOR SINGLE PWM U PUSH-PULL POBUDU



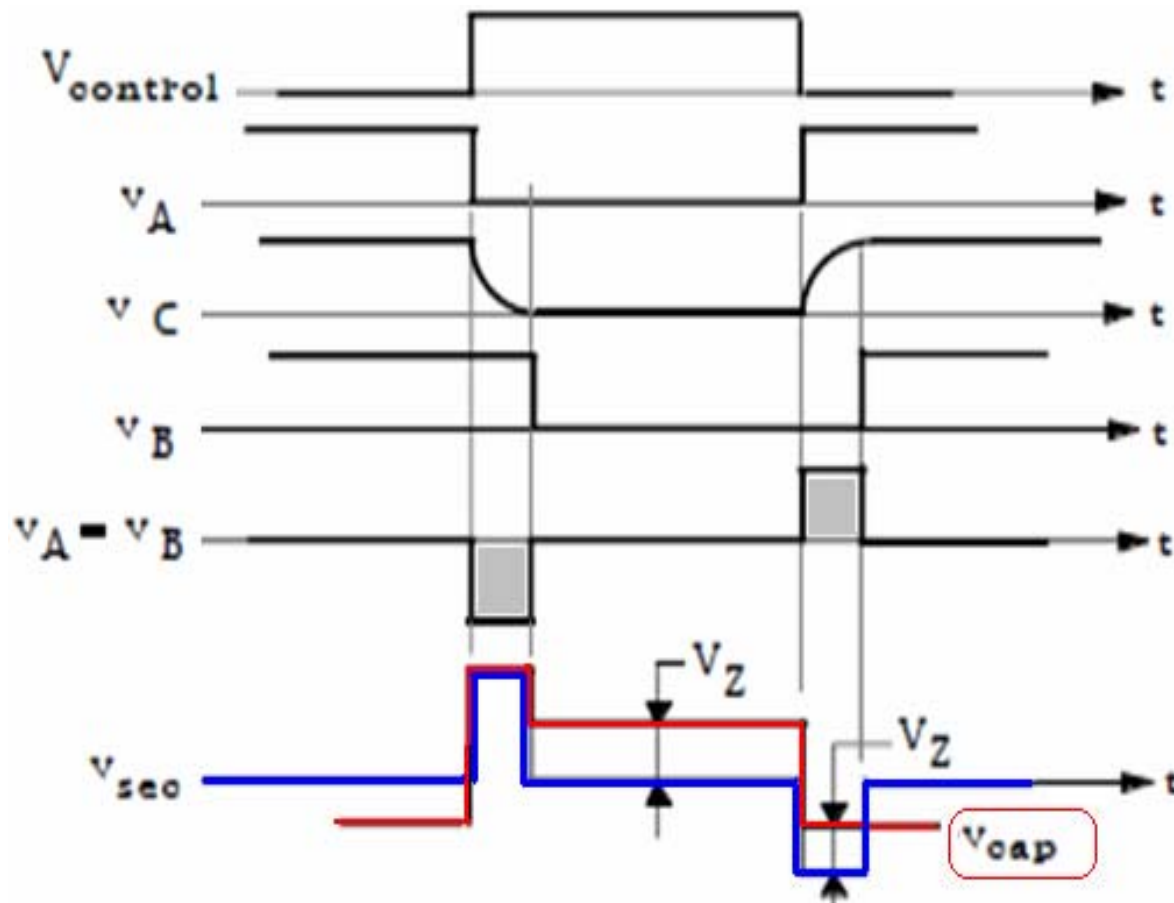
UC3706 konvertuje jednostruki izlazni PWM (signal OUT pin 12 od UC3842) u VISOKO STRUJNI PUSH-PULL izlaz za pobudu dva MOSFET-a.

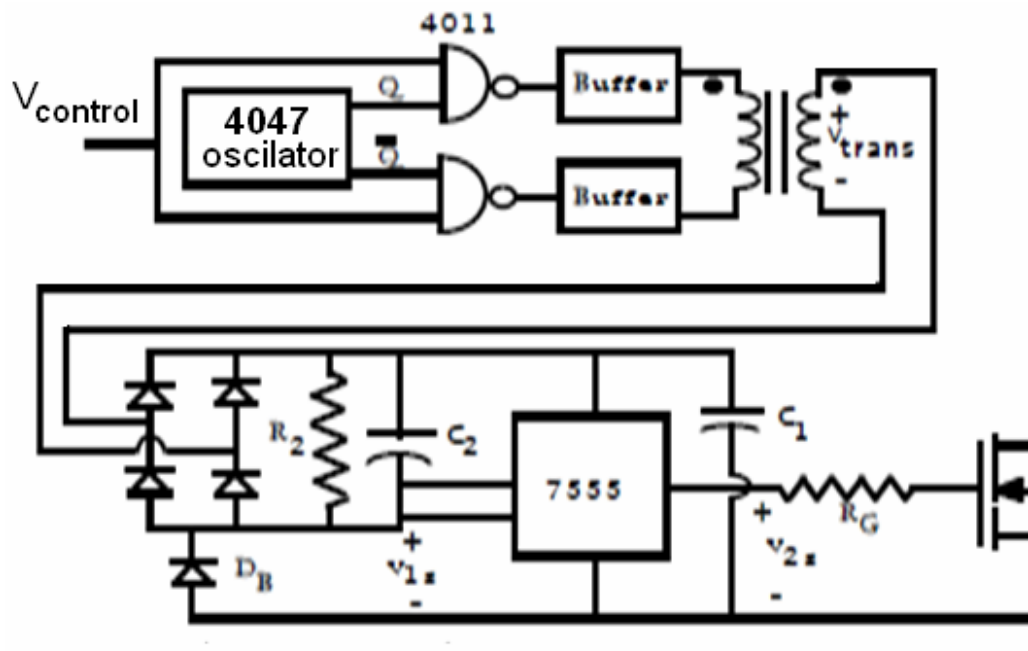


Dodavanjem Zener diode u kolo GEJTA značajno se može postići brzina uključanja, ali se kod isključenja može javiti problem!!!

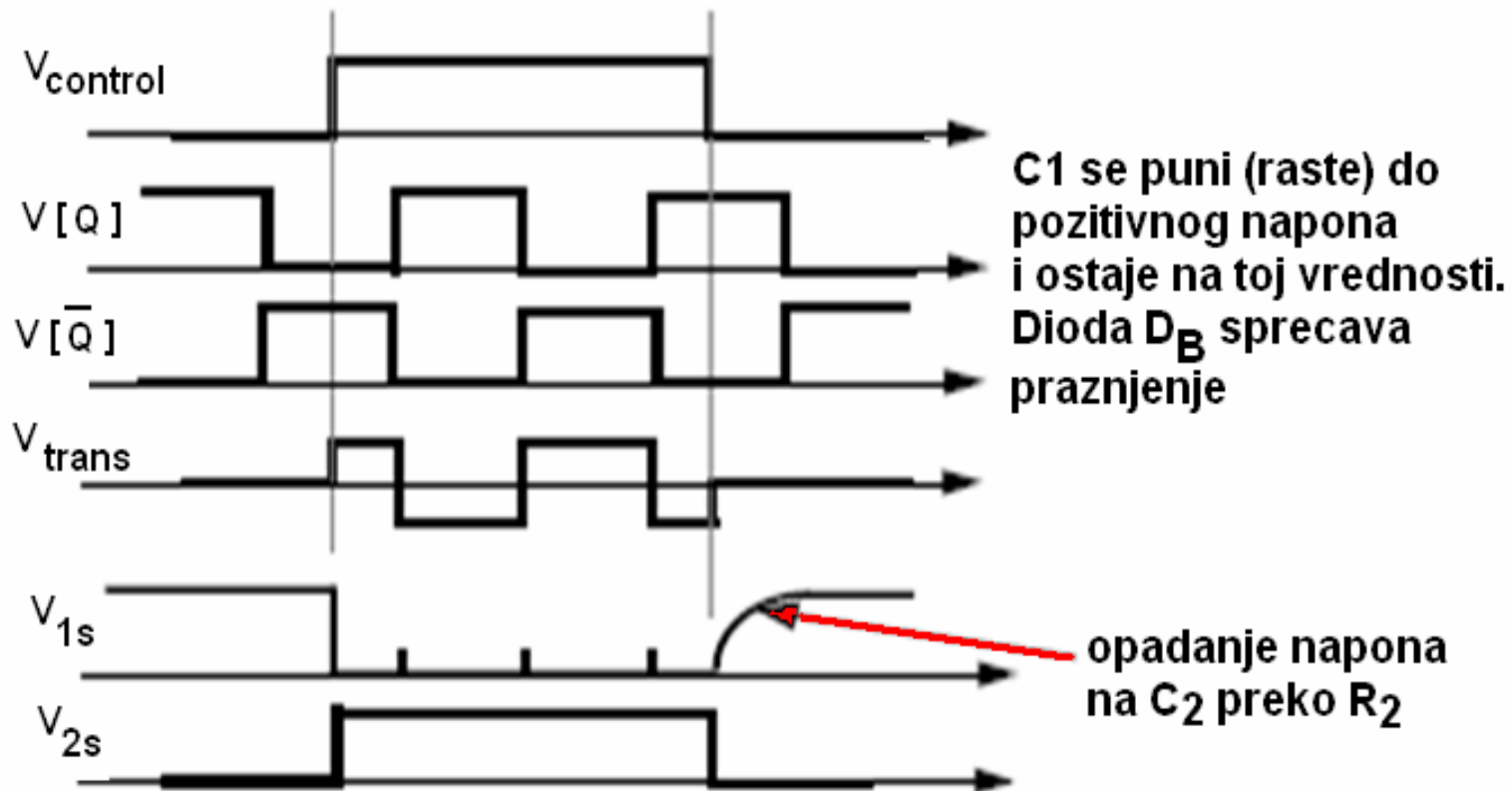
Napon Zener diode V_Z mora biti manji od negativnog napona sekundara impulsnog transformatora.

U suprotnom neće se moći ostvariti na gejt MOSFET-a napon koji će ga pouzdano isključiti!!!!

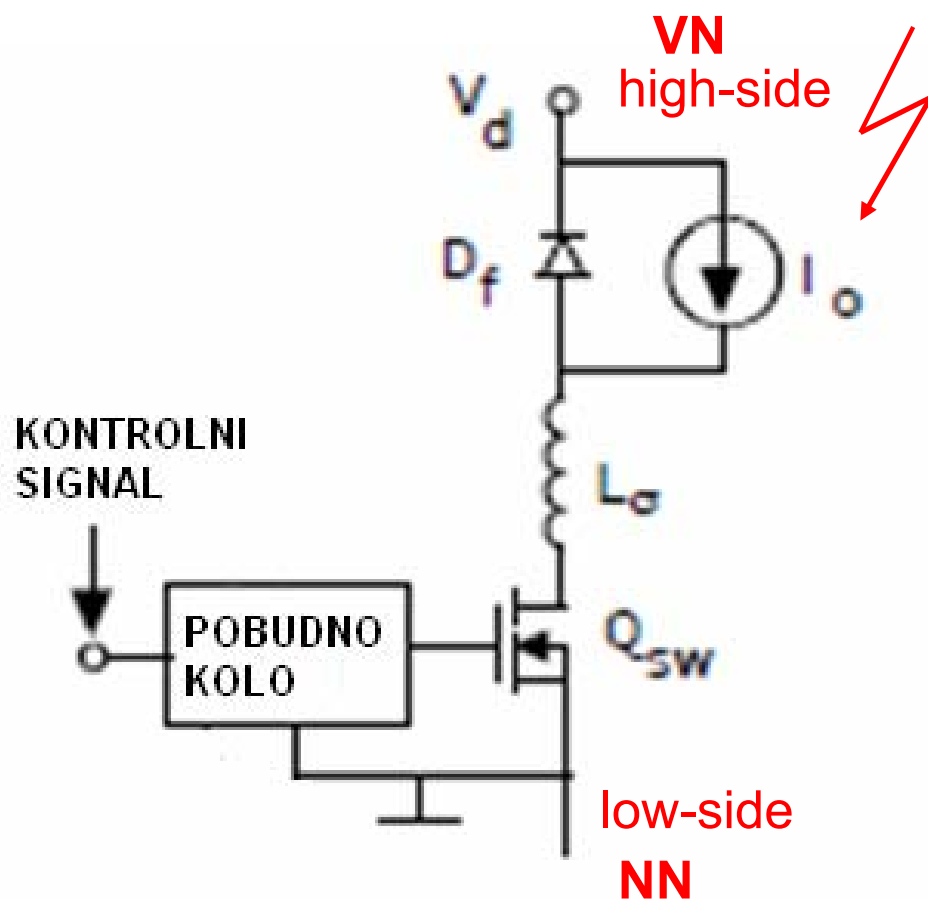




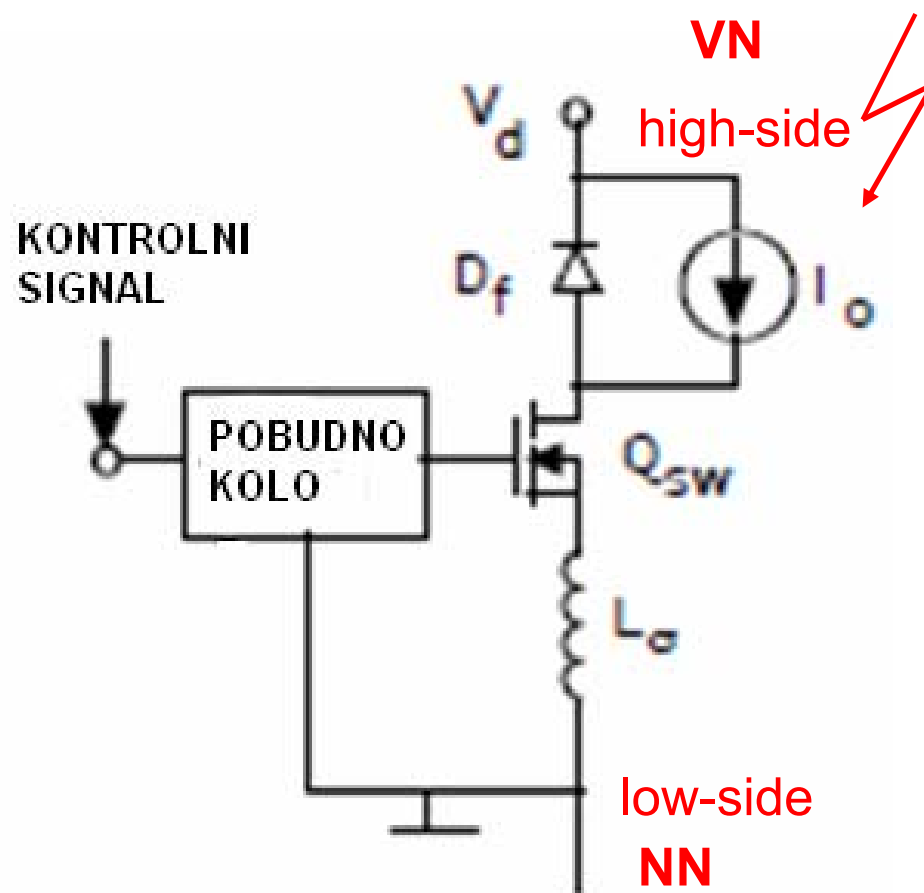
**POBUDA MOSFET
PREKIDAČA SA IMPULSNIM
TRANSFORMATOROM
I POMOĆNIM IZVOROM
NAPAJANJA (sa kolom 7555)**



UTICAJ RASIPNIH INDUKTIVNOSTI NA POBUDU MOSFET PREKIDAČA



Rasipna induktivnost vezana na red sa priključkom MOSFET-a Q_{sw} (drejn) na VN, prouzrokuje značajan prenapon pri njegovom isključenju !!!!

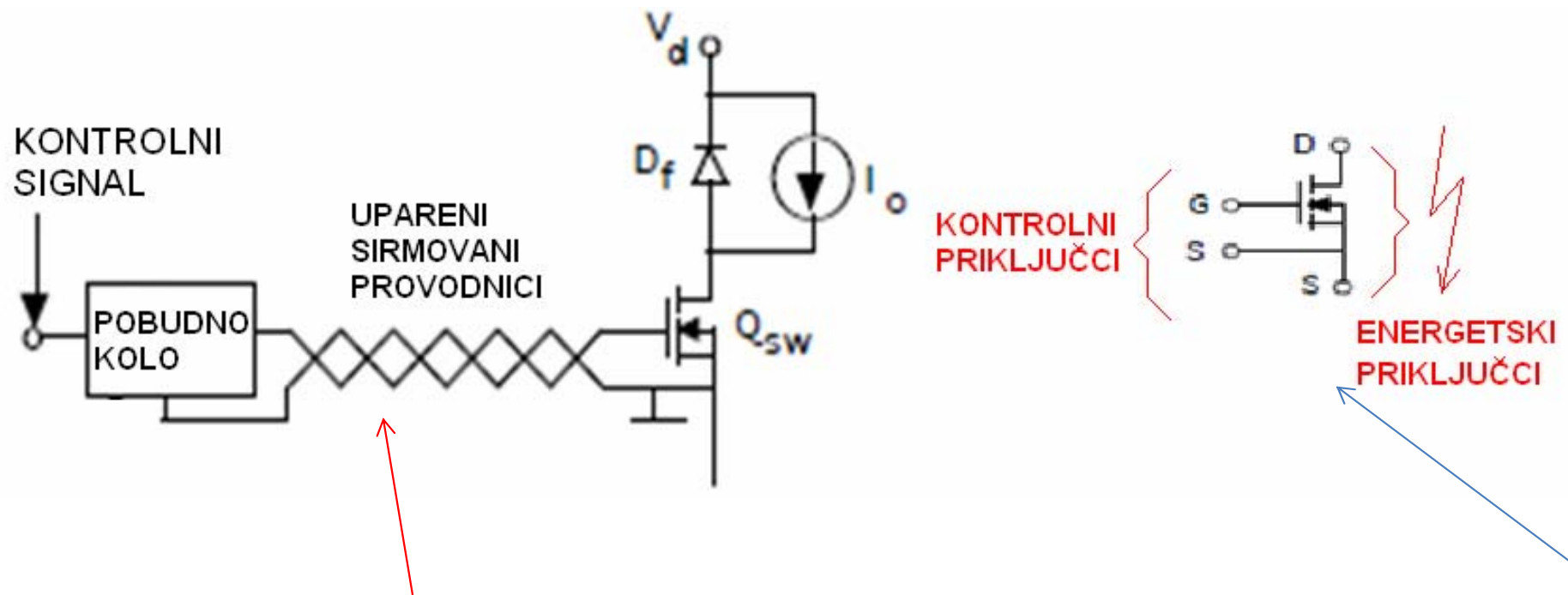


Rasipna induktivnost vezana na red sa NN priključkom MOSFET-a Q_{sw} (sors) može prouzrokovati oscilacije kako pri njegovom uključenju tako i pri njegovom isključenju

**1cm neširmovanog kabla
ima serijsku induktivnost $L_\sigma \approx 5\text{nH}$!!!!**

L_σ se mora svesti na MINIMUM!!!

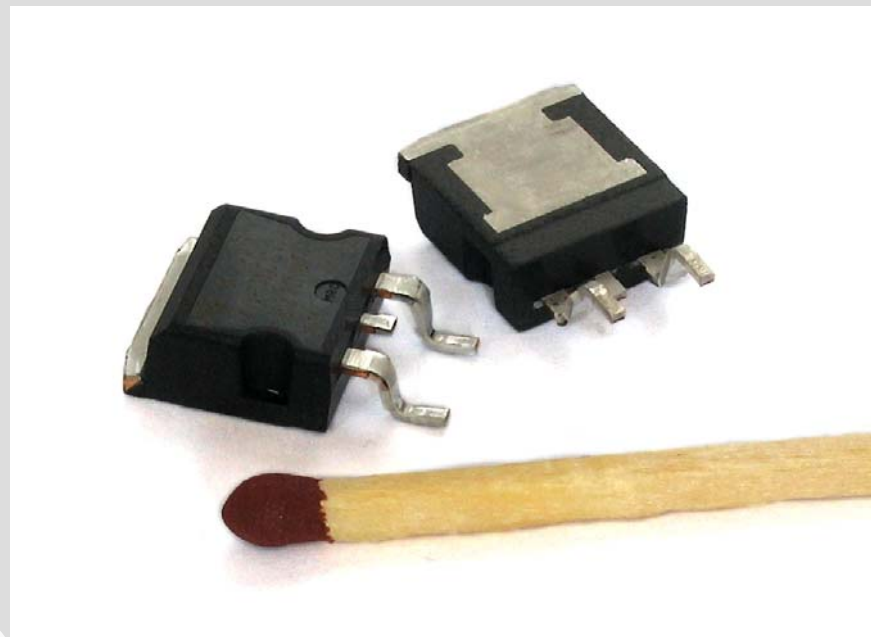
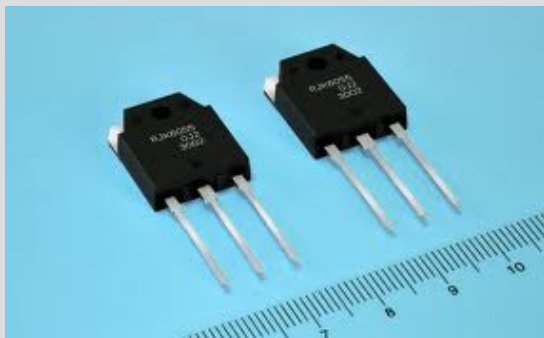
MINIMIZIRANJE RASIPNIH INDUKTIVNOSTI



Moramo koristiti širmovane i upredene (uparene) provodnike za priključenje pobudnog kola sa kontrolnim priključcima energetskog prekidača (MOSFET), ako mora da postoji značajno odstojanje (nekoloko cm ili više) između njih !!!

Neki snažni u suštini trolejni prekidači se izvode sa četiri priključka (dva su ulazna-kontrolna i dva izlazna-energetska) u cilju minimiziranja rasipnih induktivnosti !!!

HVALA NA PAŽNJI!!!



PITANJA

NOVEMBAR 2013