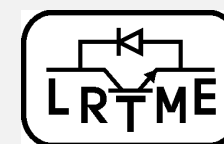




# Močnostna stopnja BLAC pogona - razsmernik

izr. prof. dr. Peter Zajec  
[peter.zajec@fe.uni-lj.si](mailto:peter.zajec@fe.uni-lj.si)



LABORATORIJ ZA REGULACIJSKO TEHNIKO IN  
MOČNOSTNO ELEKTRONIKO

## Sposobni boste:

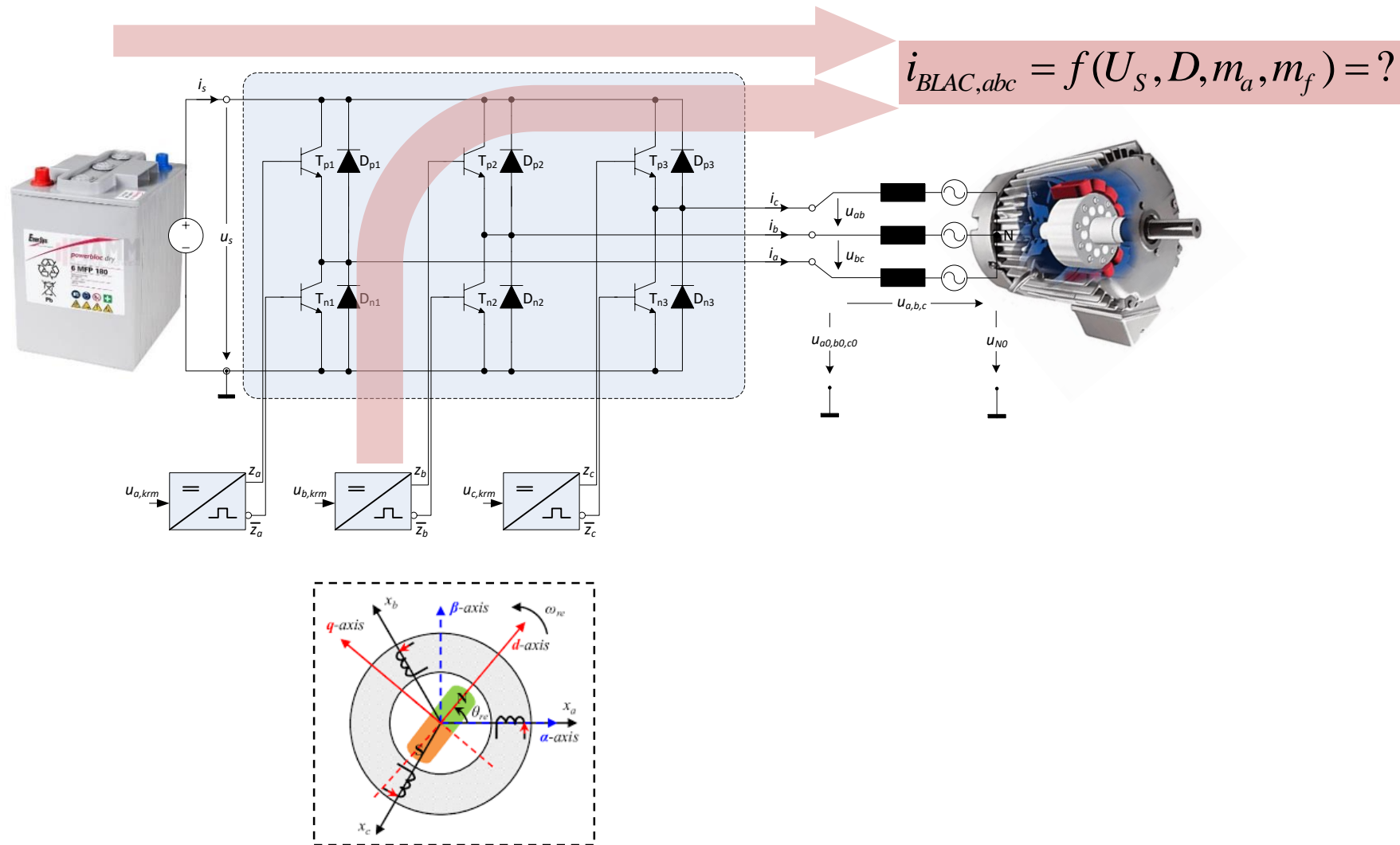
- ✓ Pojasniti odvisnost izhodnih veličin trifaznega razsmernika (v stacionarnem stanju obratovanja) od vhodne napajalne napetosti in velikosti krmilnega signala posredovanega iz regulatorja toka. **Pomembno za razumevanje odziva kompletne regulacijske proge.**
- ✓ Razlikovati med trdim in mehkim preklopom MOSFET-a, razumeti osnovne mehanizme prenapetosti in poenostavljenega izračuna izgub tranzistorske veje. **Pomembno za merilno ovrednotenje meritev/izdelka.**
- ✓ Pojasniti vplive razsmernika na vhodni/filtrski sklop in na razmere na priključnih sponkah BLAC-a. **Pomembno za dimenzioniranje EMC ukrepov.**

# Močnostna stopnja BLAC pogona - razsmernik

- ✓ Kakšna je povezava med vhodno in izhodno napetostjo (tokom)?
- ✓ Kakšna je povezava med krmilnim (logičnim) signalom in izhodno  $U(I)$ ?
- ✓ Ali obstaja analitični pristop za opis iskanih relacij?

- ✓ Preklopni manevri stikal (mehki&trdi preklop)
- ✓ Izgube
- ✓ Prenapetosti (VF oscilacije)

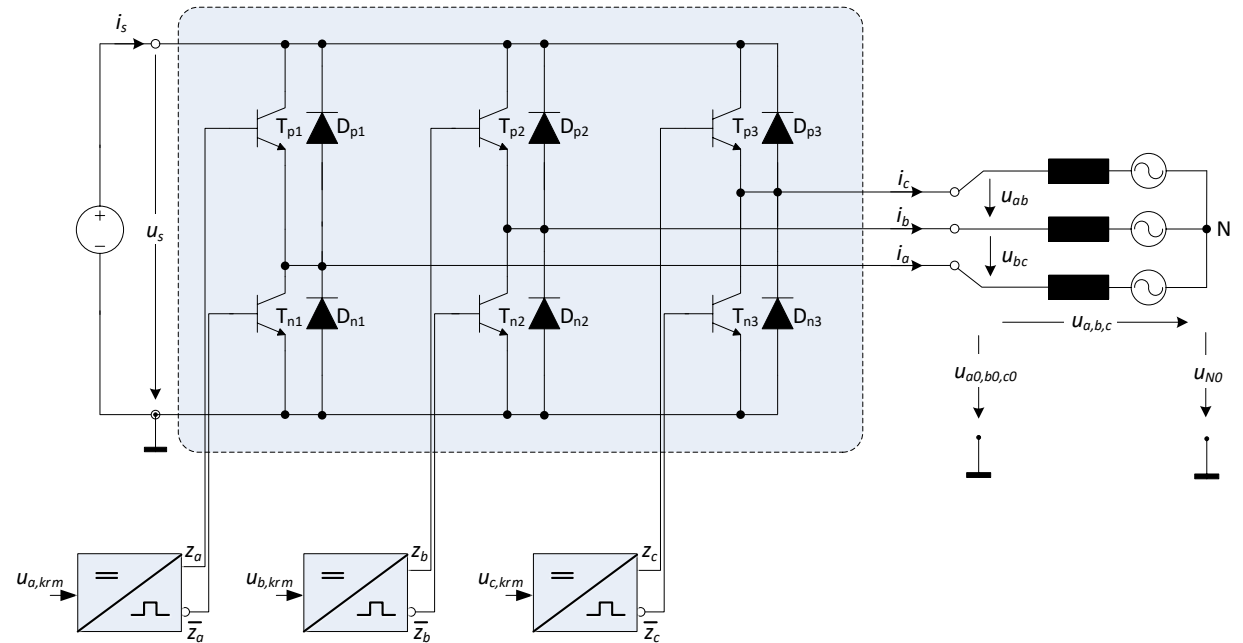
- ✓ Vpliv proženja na potek vhodnega toka (spekter)
- ✓ Vpliv proženja na motor



## Trifazni razsmernik – polni mostič

### Privzamemo:

- ✓ Vse komponente posedujejo le njim inherentne lastnosti (idealne komponente)
- ✓ Preklopi močnostnih stikal so trenutni (zanemarimo končno velike preklopne čase, mrtvi čas znaša 0 s)
- ✓ BLAC je moduliran kot simetrično trifazno vezje (v vezavi zvezda)
- ✓ Gibalna inducirana napetost BLAC je sinusne oblike



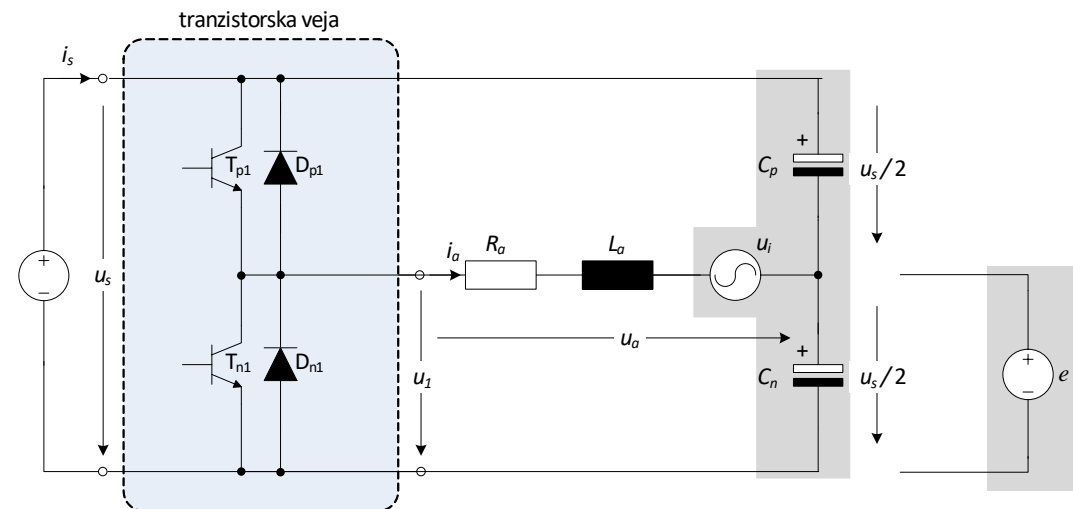
## Enofazni razsmernik v polmostični topologiji

### Dejstvo:

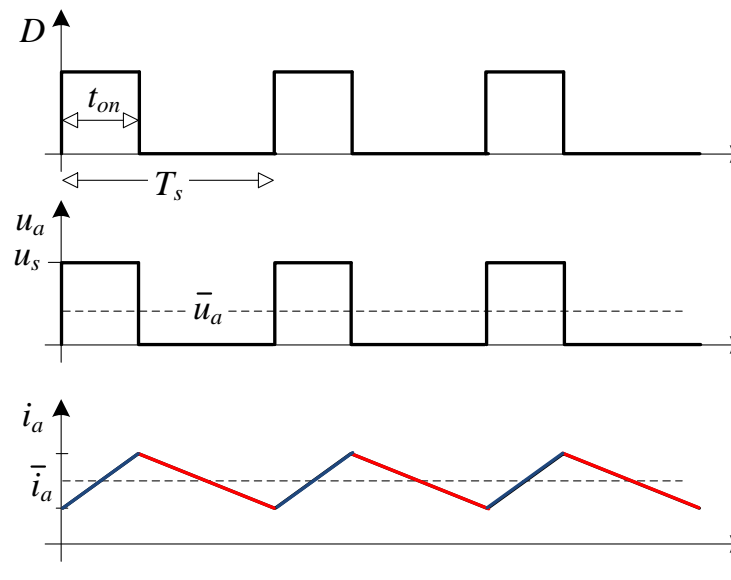
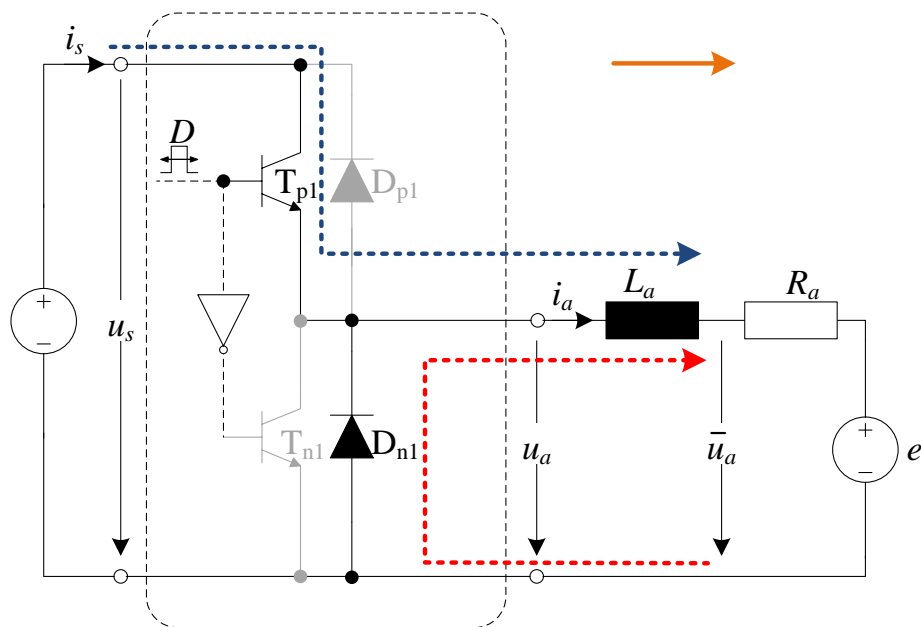
- ✓ Potencial zvezdišča je potencialno prost – vendar pogojen s toki sosednjih faz stroja

### Za nadaljnjo analizo privzamemo:

- ✓ Potencial zvezdišča znaša  $U_s/2$
- ✓ ... združimo obe napetosti v  $e$ , le-ta naj bo konstantna
- ✓ ... model enosmerne motorja – EM



## EM – obratovanje v motorskem režimu (pozitiven tok)



$$\Delta i_a (+) = \frac{u_s - (e - \bar{i}_a R_a)}{L_a} t_{on} = \frac{u_s - \bar{u}_a}{L_a} t_{on}$$

$$\Delta i_a (-) = \frac{e - \bar{i}_a R_a}{L_a} t_{off} = \frac{\bar{u}_a}{L_a} t_{off}$$

$$\bar{u}_a = \bar{i}_a R_a + e$$

### Privzamemo:

- ✓ Tranzistorja prožimo komplementarno
- ✓ Krmilni signal == vklopno razmerje  $D = t_{on}/T_s$  (duty cycle) vodilnega (zgornjega) tranzistorja
- ✓ Tok skozi navitje stroja narašča/upada enakomerno (predpostavimo torej, da je  $L_a/R_a \gg T_s$ !)

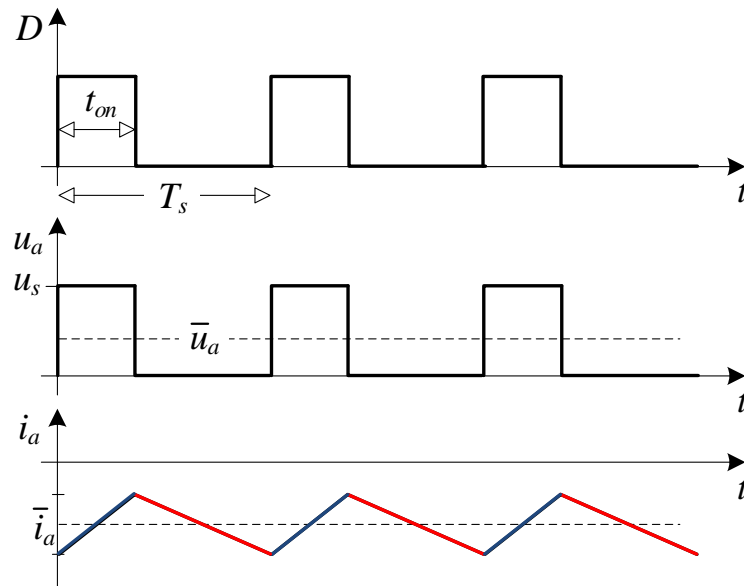
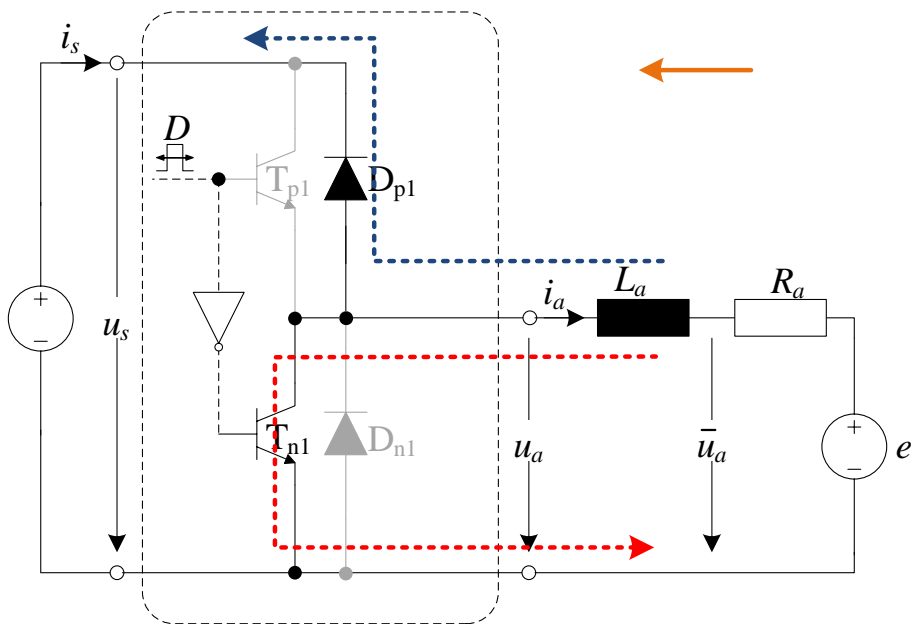
### Dejstvo:

- ✓ V kvazi-stacionarnem stanju (KSS) velja:
  - a) Porast in upad toka sta enaka
  - b) Srednja vrednost padca napetosti na (idealni) dušilki je 0 V

$$\bar{u}_a = u_s \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = u_s \frac{t_{on}}{T_s} = u_s D$$

$$\bar{i}_a = \frac{\bar{u}_a - e}{R_a} = \frac{U_s \cdot D - e}{R_a}$$

## EM – obratovanje v generatorskem režimu (negativen tok)



### Privzamemo:

- ✓ Tranzistorja prožimo komplementarno
- ✓ Krmilni signal == vklopno razmerje  $D = t_{on}/T_s$  (duty cycle) vodilnega (zgornjega) tranzistorja
- ✓ Tok skozi navitje stroja narašča/upada enakomerno (predpostavimo torej, da je  $L_a/R_a \gg T_s$ !)

### Dejstvo:

- ✓ V kvazi-stacionarnem stanju (KSS) velja:
  - a) Porast in upad toka sta enaka
  - b) Srednja vrednost padca napetosti na (idealni) dušilki je 0 V



$$\Delta i_a(+)=\frac{u_s-(e-\bar{i}_a R_a)}{L_a} t_{on}=\frac{u_s-\bar{u}_a}{L_a} t_{on}$$

$$\Delta i_a(-)=\frac{e-\bar{i}_a R_a}{L_a} t_{off}=\frac{\bar{u}_a}{L_a} t_{off}$$

$$\bar{u}_a=\bar{i}_a R_a+e$$

$$\bar{u}_a=u_s \frac{t_{on}}{t_{on}+t_{off}}=u_s \frac{t_{on}}{T_s}=u_s D$$

$$\bar{i}_a=\frac{\bar{u}_a-e}{R_a}=\frac{U_s \cdot D-e}{R_a}$$

## Povzetek obratovalnih režimov:

Če izključimo možnost mrtvega časa:

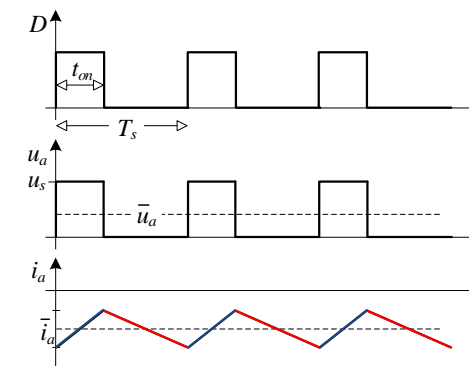
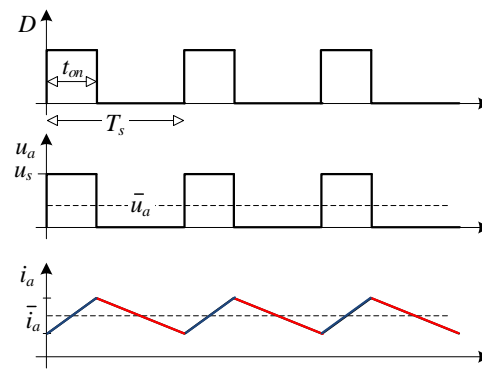
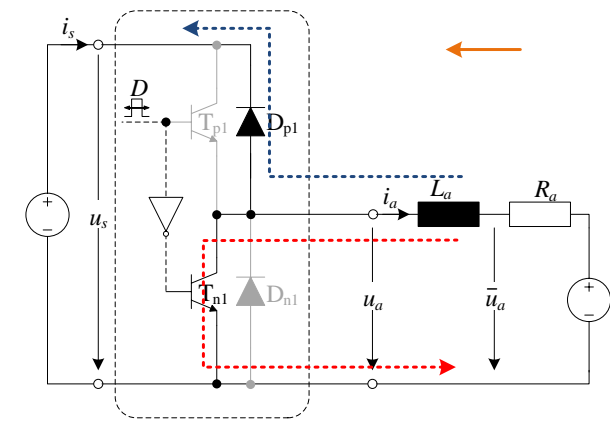
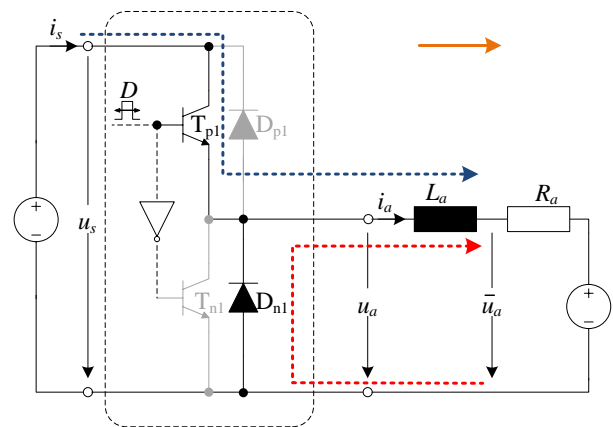
✓ Trenutna vrednost napetosti tranzistorske veje ( $u_a$ ) je neodvisna od smeri izhodnega toka in po obliki sovпада s stanjem prožilnega signala.

✓ Trenutna povprečna vrednost izhodne napetosti

$$\bar{u}_a = u_s D$$

✓ Trenutna povprečna vrednost izhodnega toka

$$\bar{i}_a = \frac{\bar{u}_a - e}{R_a} = \frac{U_s \cdot D - e}{R_a}$$



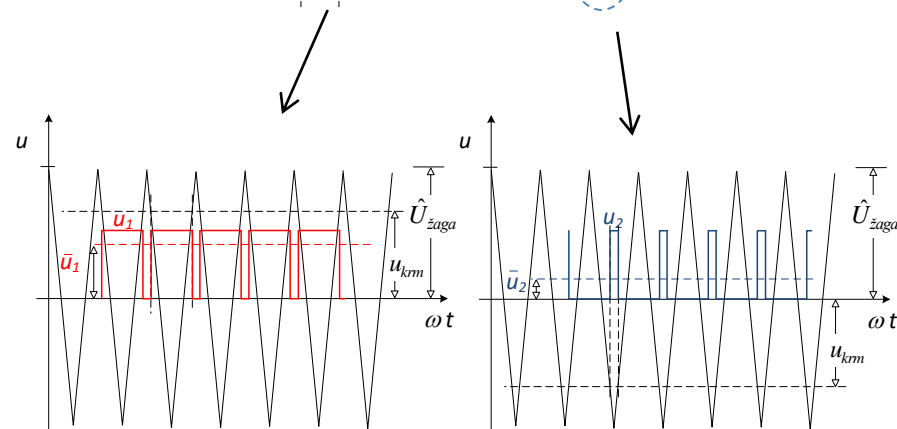
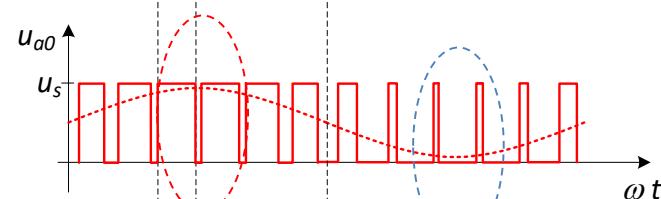
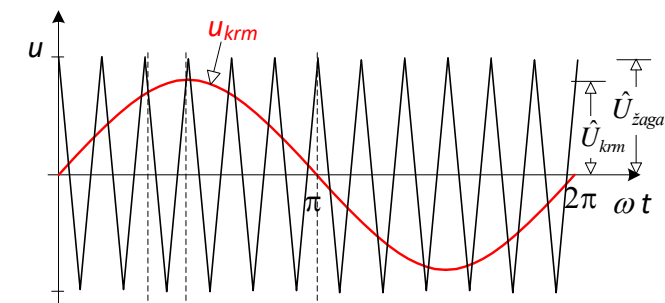
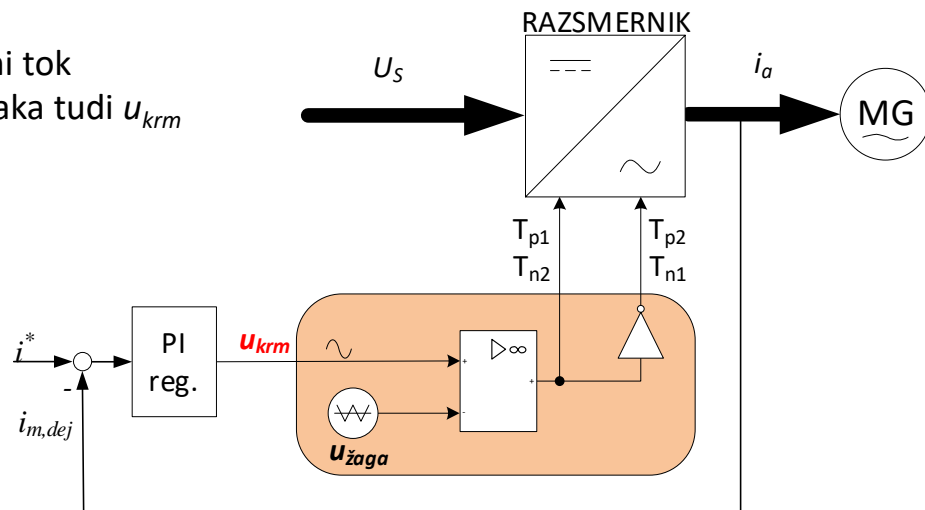
## Pomni!

- ✓ Režim obratovanja stroja je pogojen z razliko med na sponke stroja vsiljeno napetostjo in inducirano gibalno napetostjo
- ✓ Informacija o velikosti inducirane gibalne napetosti je neznan (merilno nedostopna)!
  - ✓ Posledično stroja ne moremo nadzorovati / voditi le preko krmiljenja vsiljene napetosti
  - ✓ Neobhodna je regulacija toka! (ki zajema meritev toka, njegovo primerjavo z želeno vrednostjo toka in naknadno korekcijo preko  $D$ )

## Regulacija izhodnega toka razsmernika – SPWM (sinusni PWM)

### Domneva:

- ✓ Če je referenčni/želeni tok sinusne oblike, bo enaka tudi  $u_{krm}$



$$\bar{u}_{a0}(t) = D(t) \cdot u_s$$

$$\bar{u}_{a0}(t) = \frac{u_s}{2} + \frac{u_s}{2} m_a \sin \omega_{krm} t$$

$$D(t) = \frac{1 + m_a \sin \omega_{krm} t}{2}$$

### Privzamemo:

- ✓ Če  $f_1 \ll f_s$ , lahko trdimo, da je krmilna napetost v majhnem časovnem izseku konstantna

### Vpeljemo:

- ✓ Amplitudni modulacijski faktor

$$m_a = \frac{\hat{U}_{krm}}{\hat{U}_{žaga}}$$

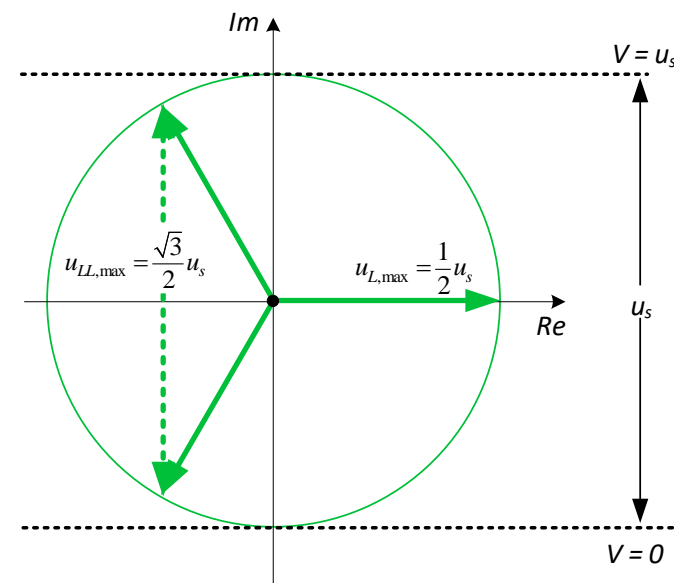
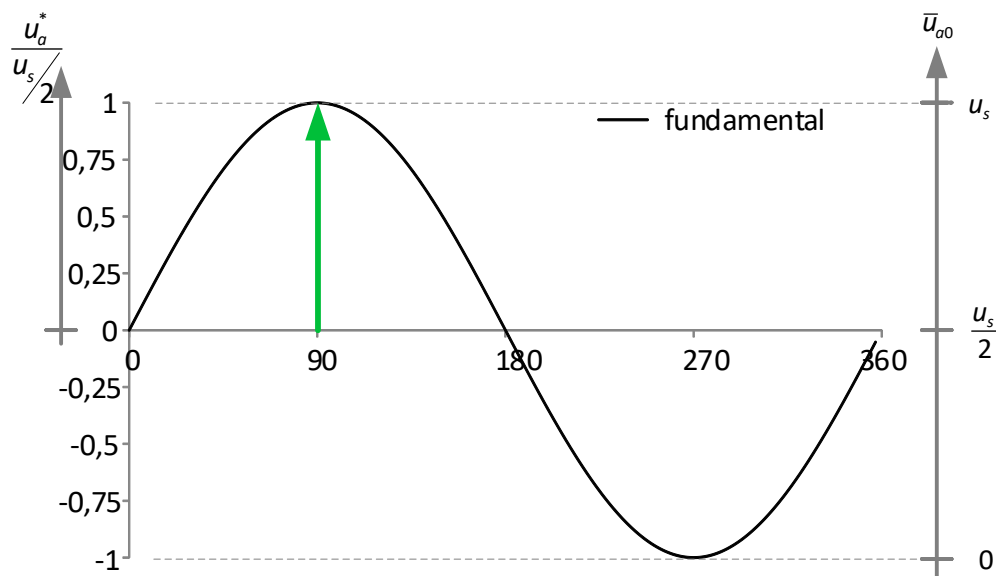
- ✓ Frekvenčni modulacijski faktor

$$m_f = \frac{f_s}{f_{krm}}$$

## Sinusna PWM modulacija – Intuitivni prehod od ene tranzistorske veje do trifaznega razsmernika

$$\begin{aligned} \bar{u}_{a0}(t) &= \frac{u_s}{2} + \frac{u_s}{2} m_a \cdot \sin(\omega_{krm} t) \\ \bar{u}_{b0}(t) &= \frac{u_s}{2} + \frac{u_s}{2} m_a \cdot \sin\left(\omega_{krm} t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \bar{u}_{c0}(t) &= \frac{u_s}{2} + \frac{u_s}{2} m_a \cdot \sin\left(\omega_{krm} t + \frac{4\pi}{3}\right) \end{aligned} \xrightarrow{m_{\max}=1} u_{N0} = \frac{1}{3}(u_{a0} + u_{b0} + u_{c0}) = \frac{1}{2} u_s$$

$$\begin{aligned} \bar{u}_a &= \frac{u_s}{2} m_a \cdot \sin(\omega_{krm} t) \\ \bar{u}_b &= \frac{u_s}{2} m_a \cdot \sin\left(\omega_{krm} t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \bar{u}_c &= \frac{u_s}{2} m_a \cdot \sin\left(\omega_{krm} t + \frac{4\pi}{3}\right) \end{aligned}$$

**Pomni**

- ✓ Oblika krmilne napetosti ( $u_{krm}$ ) in njeni parametri (amplituda, frekvenca) določajo obliko in parametre faze napetosti
- ✓ Temenska vrednost faze napetosti ne presega  $U_s/2$



## Sinusna PWM modulacija – Intuitivni prehod od ene tranzistorske veje do trifaznega razsmernika

$$\begin{aligned}\bar{u}_{a0} &= \frac{u_s}{2} + \frac{u_s}{2} \left[ m_a \cdot \sin(\omega_{krm} t) + k \sin(3\omega_{krm} t) \right] \\ \bar{u}_{b0} &= \frac{u_s}{2} + \frac{u_s}{2} \left[ m_a \cdot \sin\left(\omega_{krm} t + \frac{2\pi}{3}\right) + k \sin(3\omega_{krm} t) \right] \\ \bar{u}_{c0} &= \frac{u_s}{2} + \frac{u_s}{2} \left[ m_a \cdot \sin\left(\omega_{krm} t + \frac{4\pi}{3}\right) + k \sin(3\omega_{krm} t) \right]\end{aligned}$$

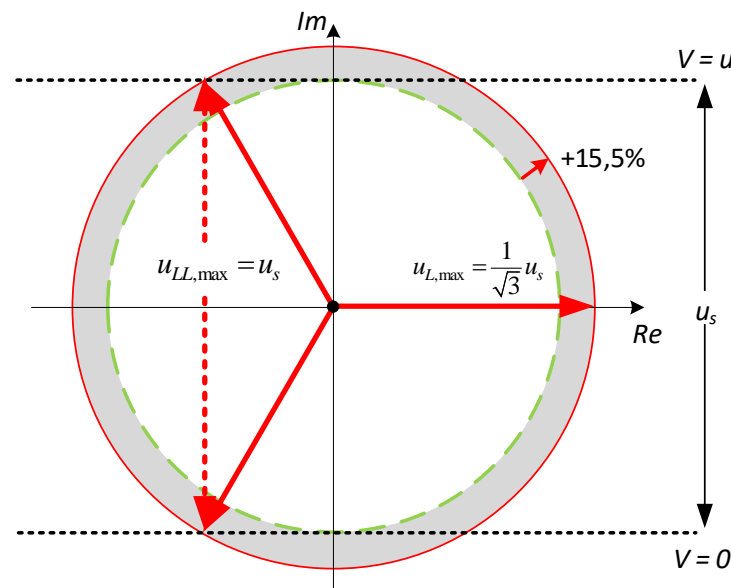
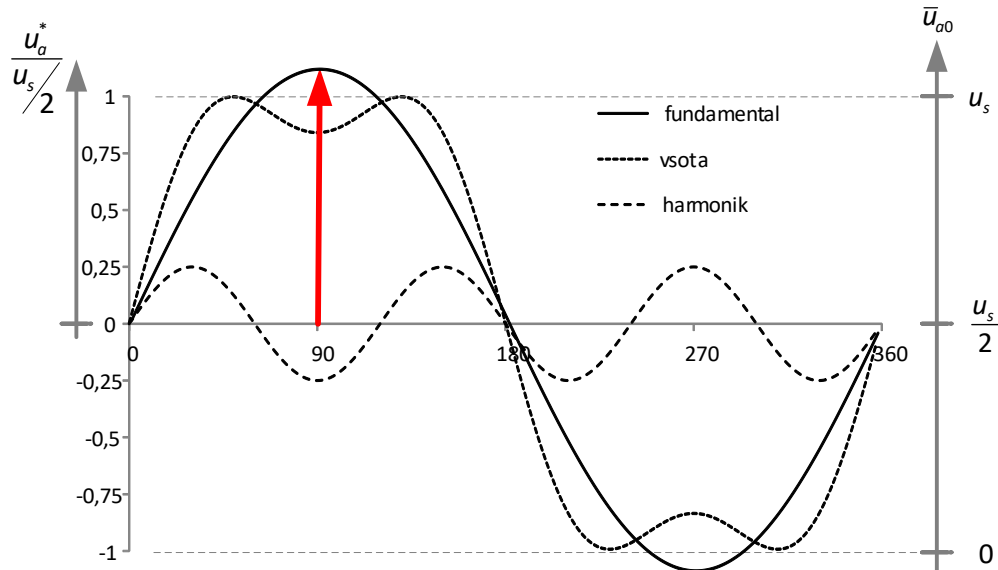


$$\bar{u}_{N0} = \frac{u_s}{2} (1 + k \sin 3\omega_{krm} t)$$

$$m_{\max} = \frac{2}{\sqrt{3}}$$



$$\begin{aligned}\bar{u}_a &= \frac{u_s}{2} m_a \cdot \sin(\omega_{krm} t) \\ \bar{u}_b &= \frac{u_s}{2} m_a \cdot \sin\left(\omega_{krm} t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \bar{u}_c &= \frac{u_s}{2} m_a \cdot \sin\left(\omega_{krm} t + \frac{4\pi}{3}\right)\end{aligned}$$



### Pomni

✓ Temensko vrednost fазne napetosti povečamo za 15,5% (medfazna omejena na  $U_s$ )! Učinkovitejša izraba napajalne napetosti!

- ✓ Kakšna je povezava med vhodno in izhodno napetostjo (tokom)?
- ✓ Kakšna je povezava med krmilnim (logičnim) signalom in izhodno  $U(I)$ ?
- ✓ Ali obstaja analitični pristop za opis iskanih relacij?

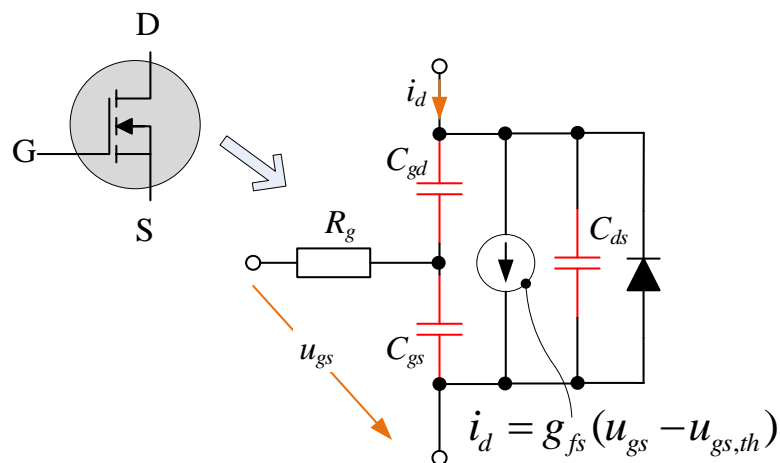
- ✓ Preklopni manevri stikal (mehki&trdi preklop)
- ✓ Izgube
- ✓ Prenapetosti (VF oscilacije)

- ✓ Vpliv proženja na potek vhodnega toka (spekter)
- ✓ Vpliv proženja na motor

## Realne komponente - MOSFET

## Dejstva:

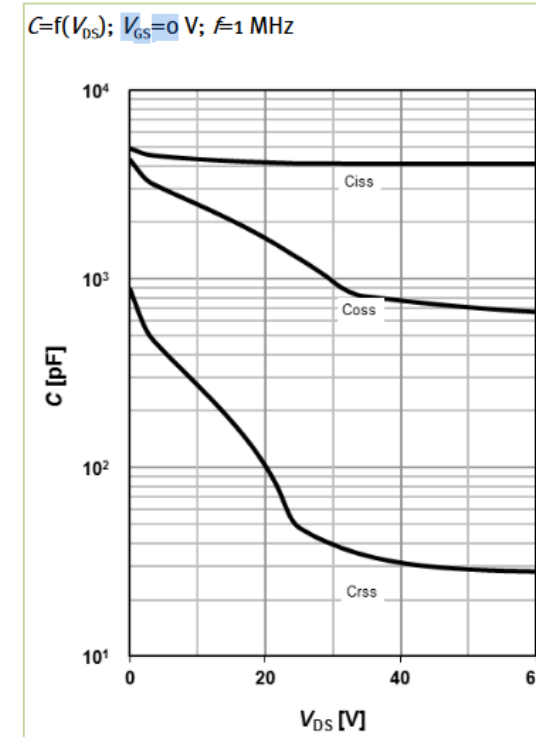
- ✓ Napetostno krmiljen element ( $g_{FS}$ )
- ✓ Vsebuje strukturno pogojeno lastno (body) diodo in notranjo upornost vrat ( $R_g$ )
- ✓ Med-elektrodne kapacitivnosti, ki so napetostno pogojene, narekujejo preklopne čase



$$C_{iss} = C_{GS} + C_{GD} \quad \text{- vhodna kapacitivnost}$$

$$C_{rss} = C_{GD} \quad \text{- reverzna kapacitivnost}$$

$$C_{oss} = C_{GD} + C_{DS} \quad \text{- izhodna kapacitivnost}$$

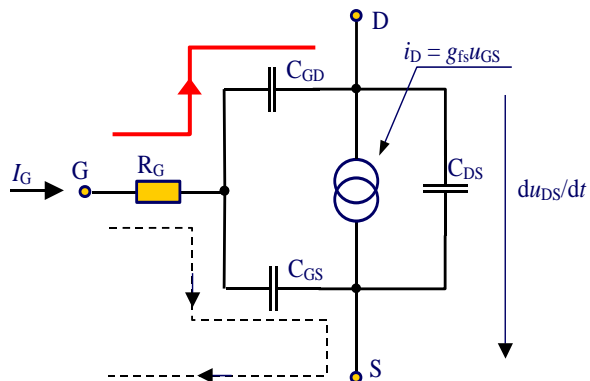


- ✓ V kataloškem listu podani preklopni časi so izmerjeni s standardnim vezjem (Double Pulse Test)

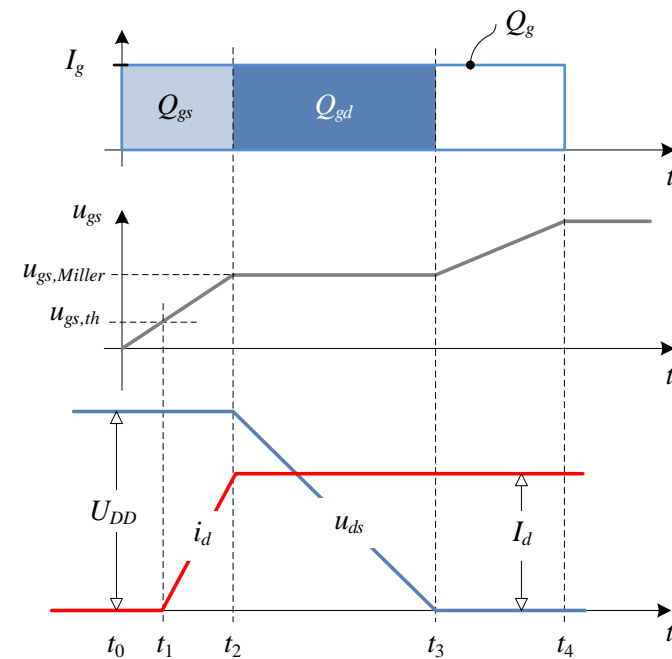
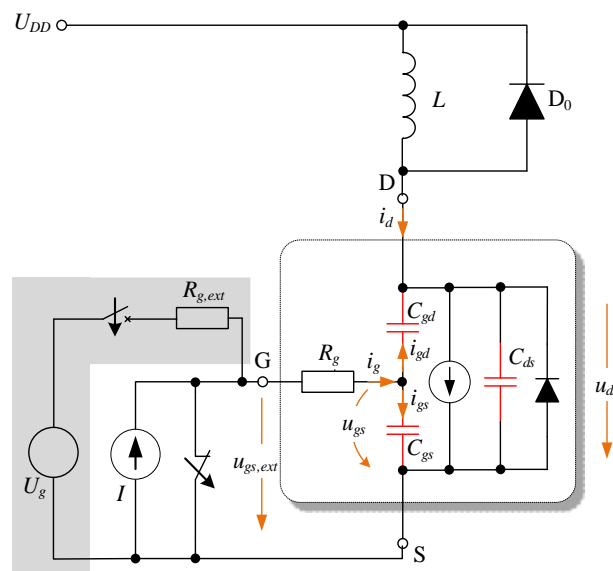
## Realne komponente - MOSFET

## Vklon (LS) MOSFET-a:

- ✓ Do  $t_0$  prevaja *body* dioda HS MOSFET-a
- ✓ Ob  $t_0$  apliciramo  $I_G$  LS MOSFET-u
- ✓ Ob  $t_1$ , ko dosežemo pragovno napetost, prične skozi kanal MOSFET-a teči tok (velja premo sorazmernost z  $g_{FS}$ )
  - ✓ Poteka komutacija (prehod) toka iz diode na MOSFET
  - ✓ Medtem oba prevajata (MOSFET delno)
  - ✓ Napetost na MOSFET-u je praktično enaka  $U_s$
- ✓ Ob  $t_2$  se proces komutacije toka zaključi
  - ✓ Od tega trenutka dalje prične napetost  $U_{ds}$  upadati, a to je možno le, če se posledično zmanjša tudi napetost preko  $C_{gd}$
  - ✓ Slednje izvedljivo le preko  $I_G$



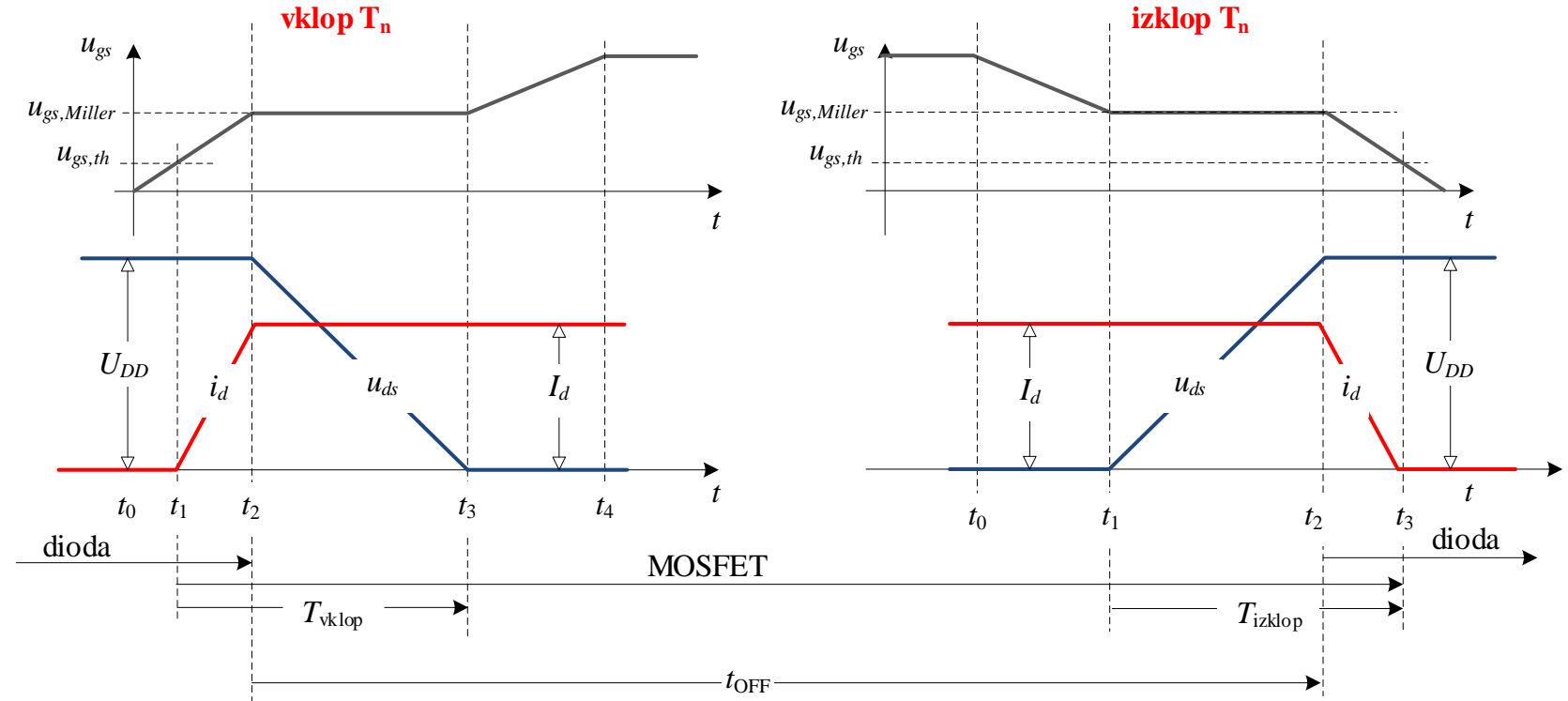
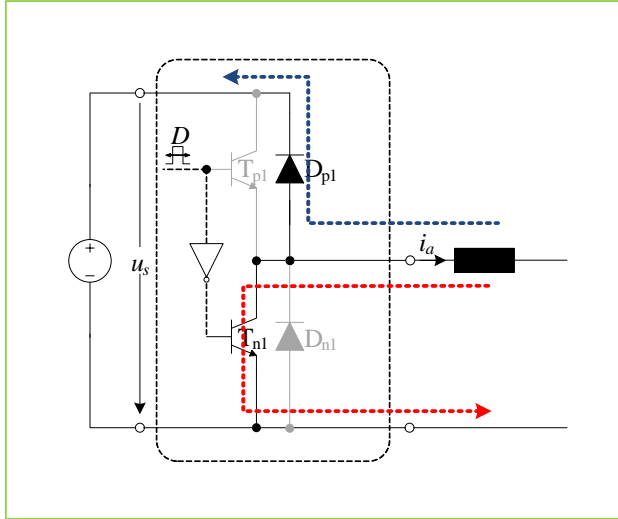
- ✓ Ob  $t_3$ , ko  $u_{ds}$  upade na 0 V, se proces vklopa MOSFET-a konča



## Pomni

- ✓ Večji tok  $I_d$  → daljši interval  $t_1$ - $t_2$
- ✓ Višja napetost  $U_{DD}$  → daljši interval  $t_2$ - $t_3$
- ✓ Preklopni časi v kataloškem listu:
  - ✓ Meje podajanja: 10% in 90% ustaljene vrednosti  $u_{ds}$

## Realne komponente – MOSFET (izgube – trdi preklop)



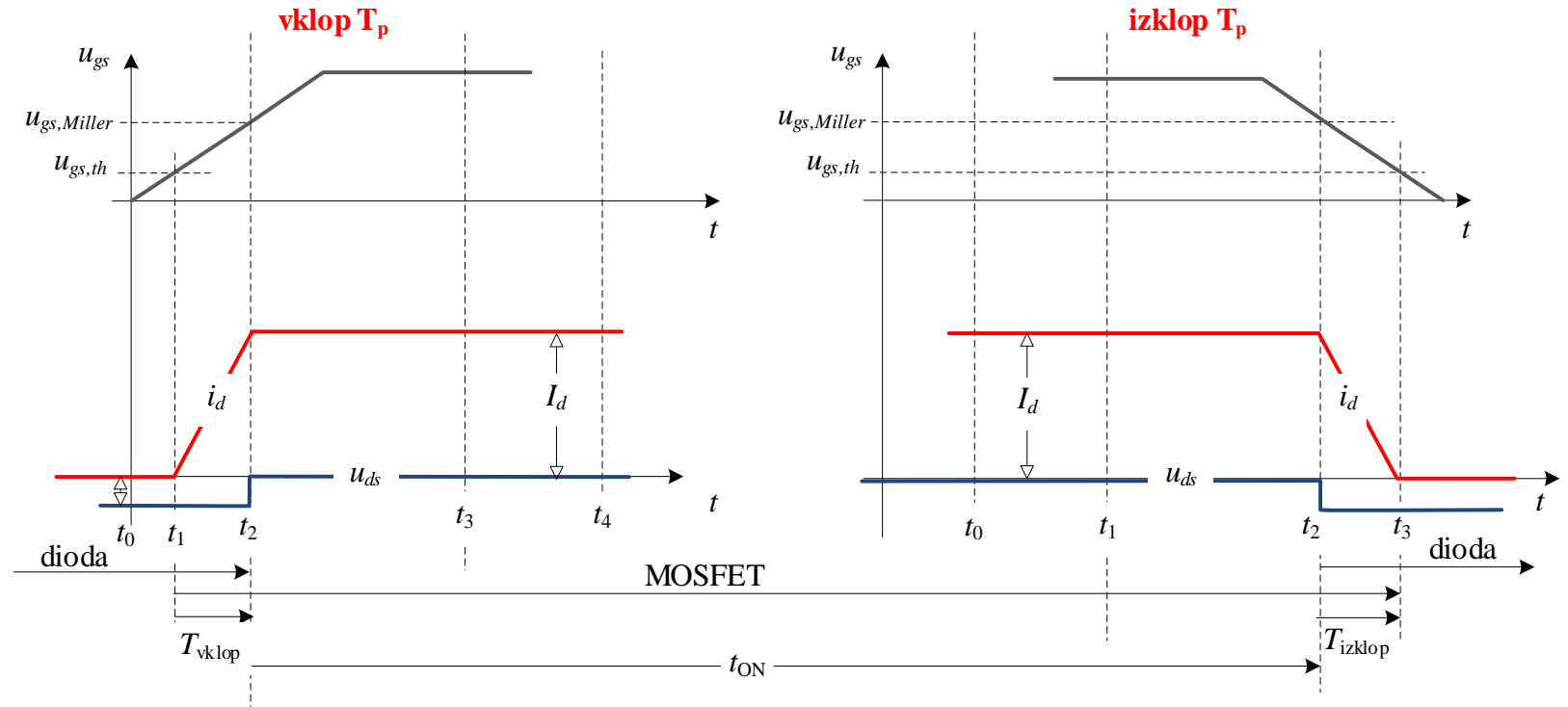
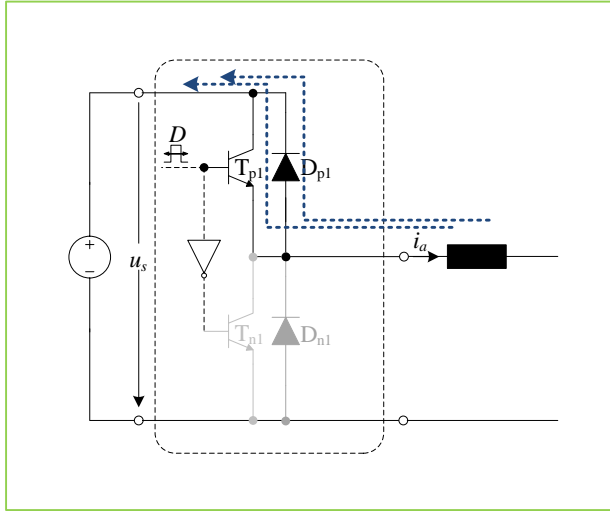
Preklopne izgube MOSFET-a (brez vpliva  $C_{oss}$ )

$$P_{sw,M} = \frac{I_d U_{DD}}{2} (T_{vklop} + T_{izklop}) f_s$$

Prevodne izgube MOSFET-a

$$P_{cond,M} = I_d^2 r_{ds,on} \frac{t_{off}}{T_s} = I_d^2 r_{ds,on} (1-D)$$

# Realne komponente – MOSFET (izgube – mehki preklop)



Prevodne izgube MOSFET-a

$$P_{cond,M} = I_d^2 r_{ds,on} \frac{t_{on}}{T_s} = I_d^2 r_{ds,on} D$$

Prevodne izgube diode:  
(v intervalu  $t_{DT}$  - mrtvi čas)

$$P_{cond,D} = U_{TO} I_d \frac{2t_{DT}}{T_s} + I_{d,ef}^2 r_d \sqrt{\frac{2t_{DT}}{T_s}}$$

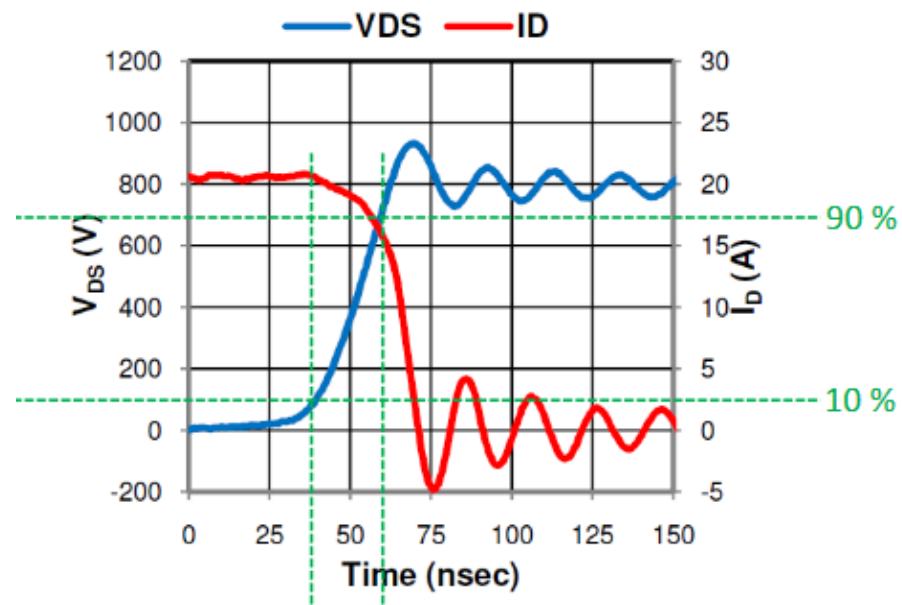
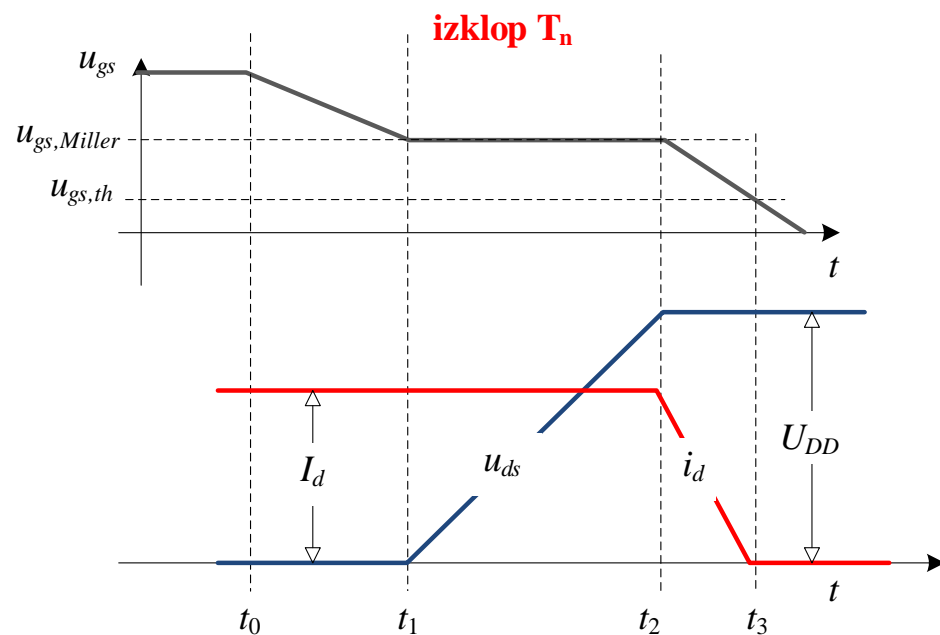
Preklopne izgube MOSFET-a in diode

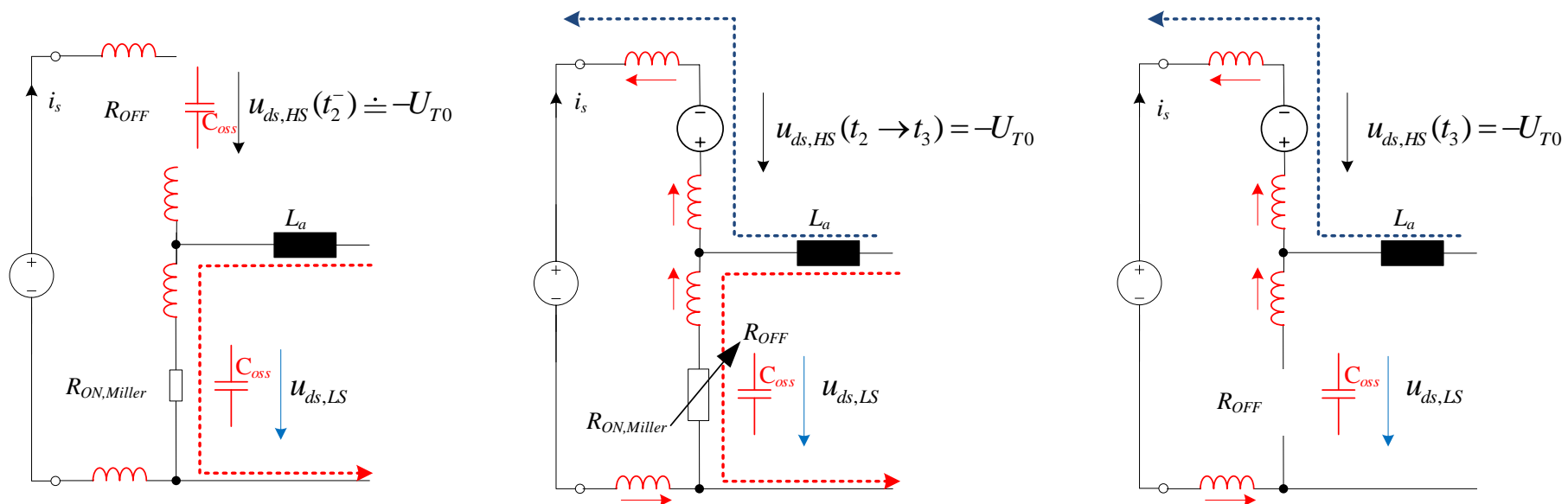
$$P_{sw,M} \approx 0W$$

$$P_{sw,D} \approx 0W$$

ob pogoju  $U_s \gg U_{TO}$

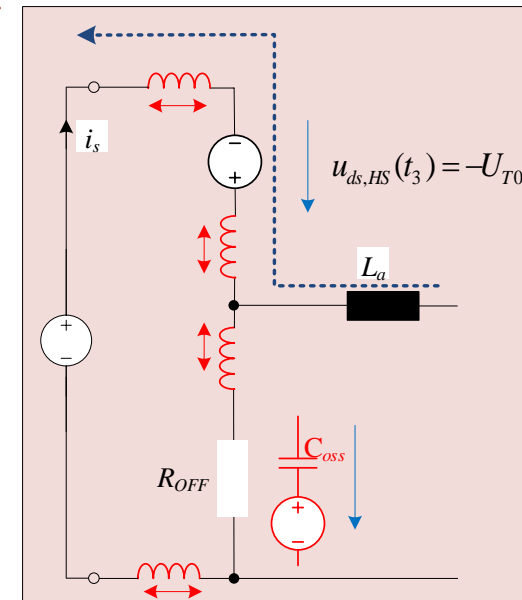
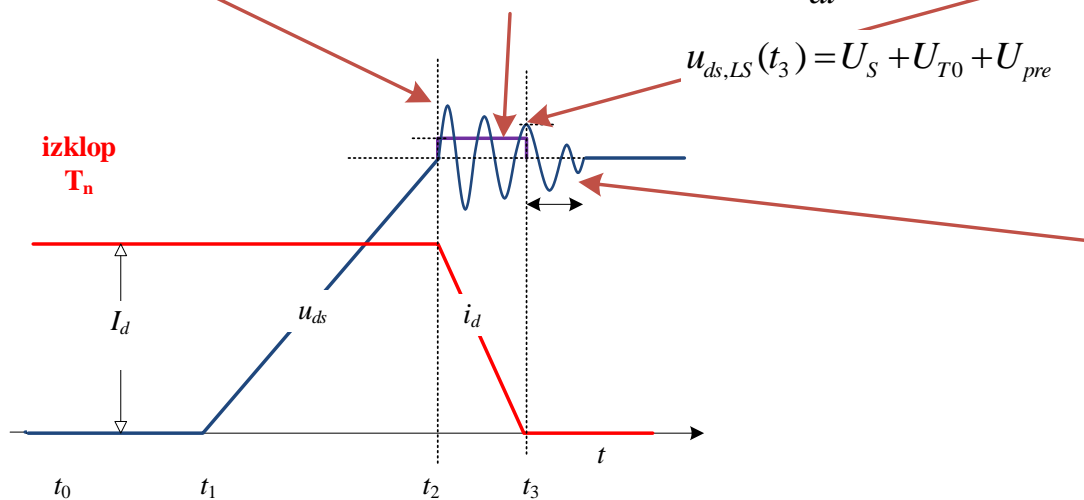
## Realne komponente – MOSFET (trdi preklop - realneje)





$$u_{ds,LS}(t_2^-) = U_s + U_{T0}$$

$$u_{ds,LS}(t_2 \rightarrow t_3) = U_s + U_{T0} + \sum L \frac{di}{dt}$$



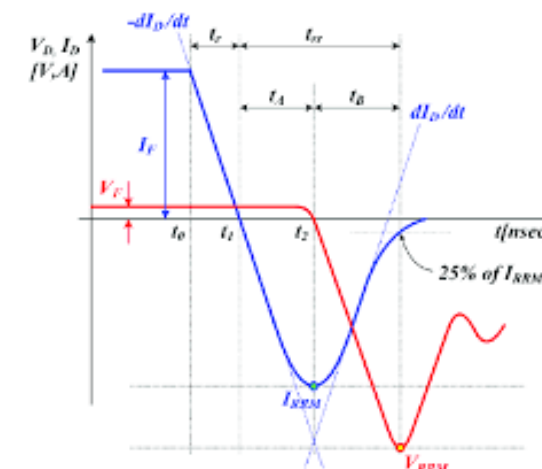
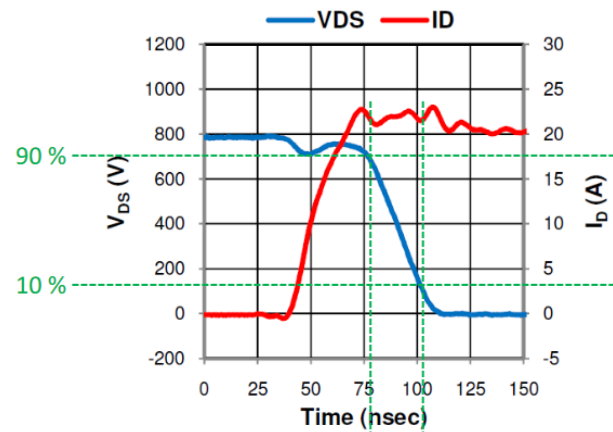
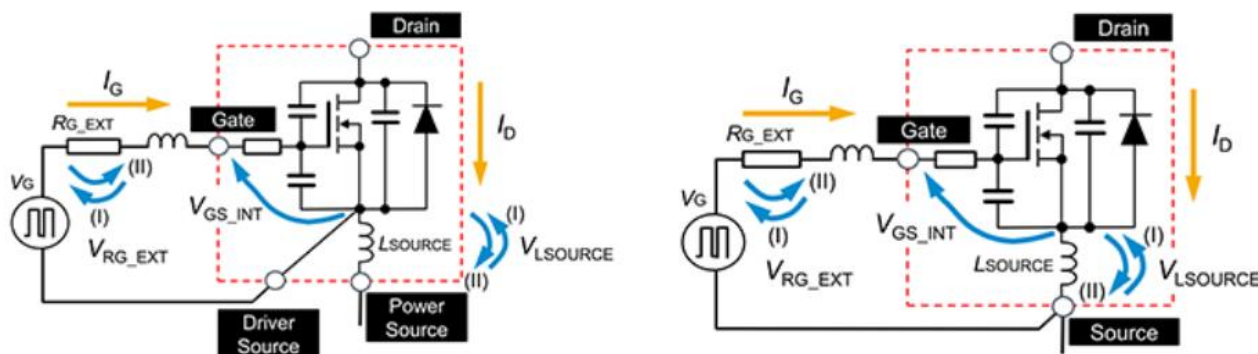
$$u_{ds,LS}(t_3^+) = U_s + U_{T0} + U_{pre}$$



## Realne komponente – MOSFET (preklop - realneje)

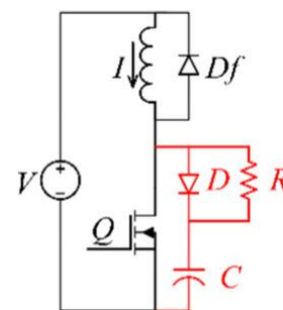
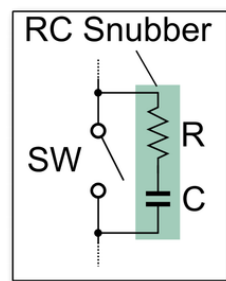
### Dodatni dejavniki:

- ✓ Sprostitevni naboj (*reverse recovery*) diode
- ✓ VF oscilacije prisotne tudi v tokokrogu vrat (*Gate*)
  - ✓ Kvarno vplivajo tudi na oscilacije  $u_{ds}$
  - ✓ Parazitna induktivnost veča možnost spontanega vklopa



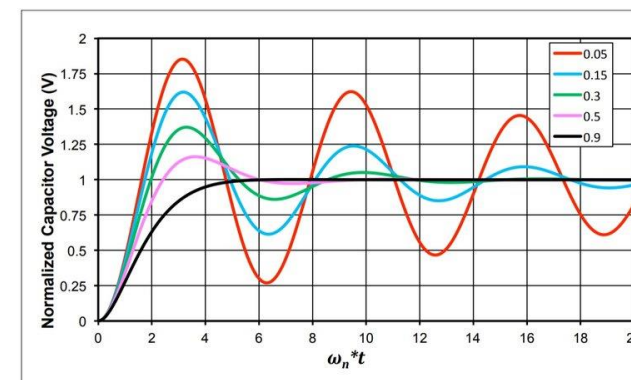
### Ukrepi/rešitve

- ✓ RC snubber (povečuje dušenje RLC vezja)
- ✓ RCD clamp (omejuje prenapetost)
- ✓ Ferrite beads
- ✓ Izbira primerne ohišja,
- ✓ ...



$$Q = \frac{\sqrt{L/C}}{R}$$

kakovost RLC tokokroga

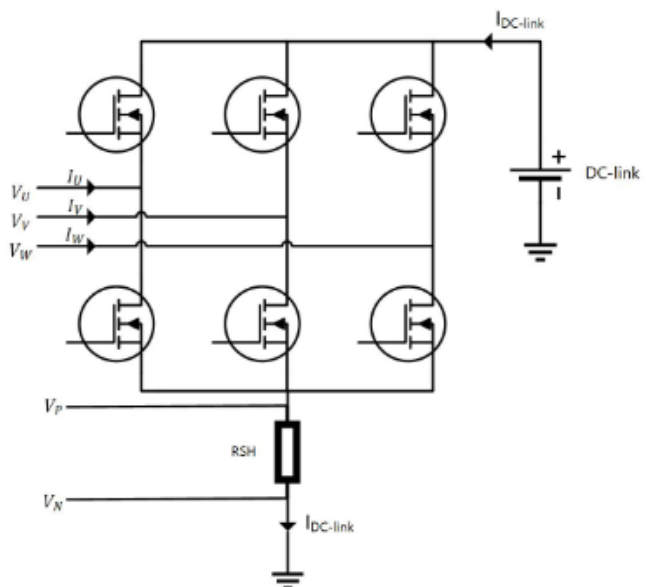


- ✓ Kakšna je povezava med vhodno in izhodno napetostjo (tokom)?
- ✓ Kakšna je povezava med krmilnim (logičnim) signalom in izhodno  $U$  ( $I$ )?
- ✓ Ali obstaja analitični pristop za opis iskanih relacij?

- ✓ Preklopni manevri stikal (mehki&trdi preklop)
- ✓ Izgube
- ✓ Prenapetosti (VF oscilacije)

- ✓ Vpliv proženja na potek vhodnega toka (spekter)
- ✓ Vpliv proženja na motor

## Povratni vpliv na enosmerni vir (oziroma vhodno sito)



**Tok skozi merilni upor in posledično skozi napajalni tokokrog je:**

- ✓ pulzirajoče oblike (spremenljive širine in magnitude)
- ✓ frekvenca pulziranja **ni enaka** stikalni frekvenci stikal (koliko preklpov se izvrši v  $T_s$ ?)

**Spekter toka zato med drugim vsebuje:**

- ✓ enosmerno komponento
- ✓ 6.-ti harmonik fazni tokov
- ✓ stikalno frekvenco in njene višje-harmonske komponente
- ✓ ... in še vpliv končne strmine  $du/dt$ , vpliv VF iznihavanj... in še ...



Za razumevanje SVM priporočam:

<https://www.switchcraft.org/learning/2017/3/15/space-vector-pwm-intro>

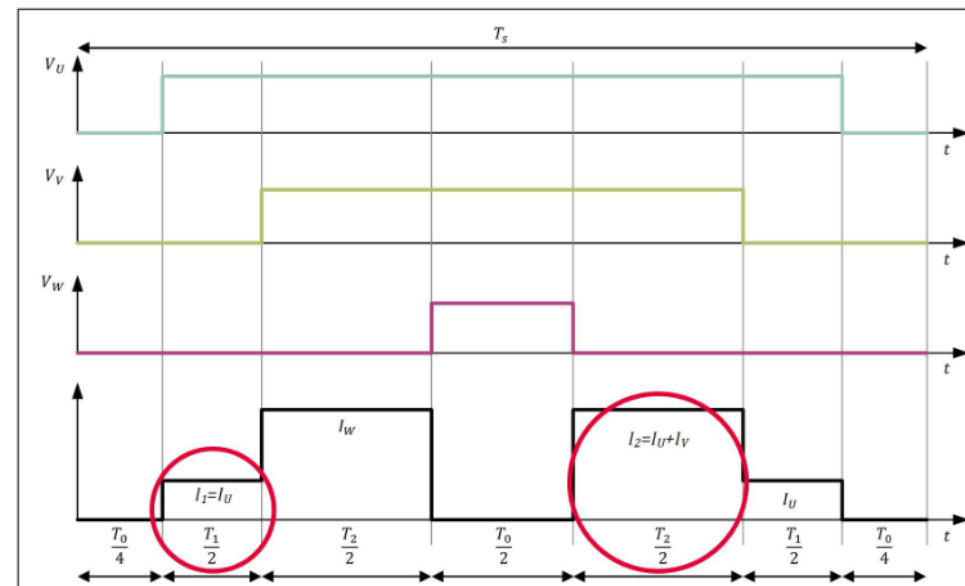


Figure 14 Phase Current Measurement within one PWM cycle in the SVM sector A.

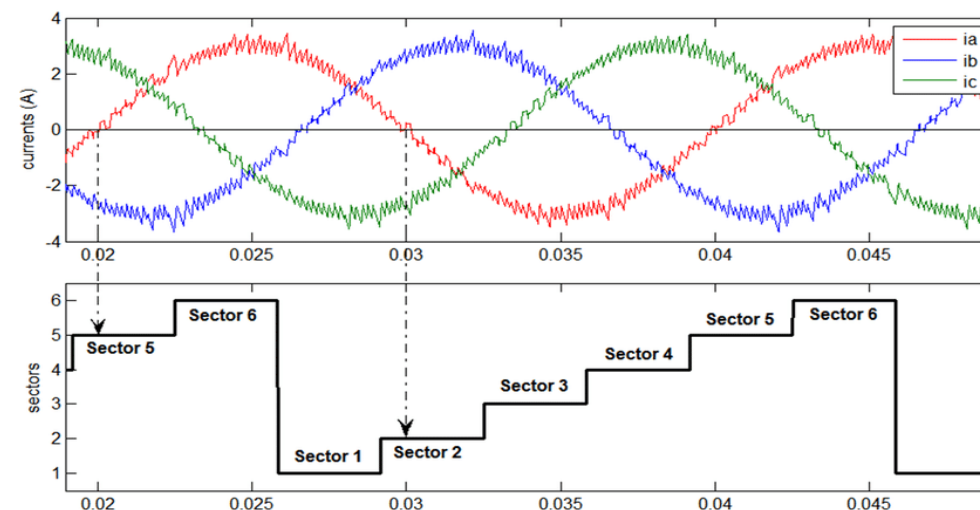


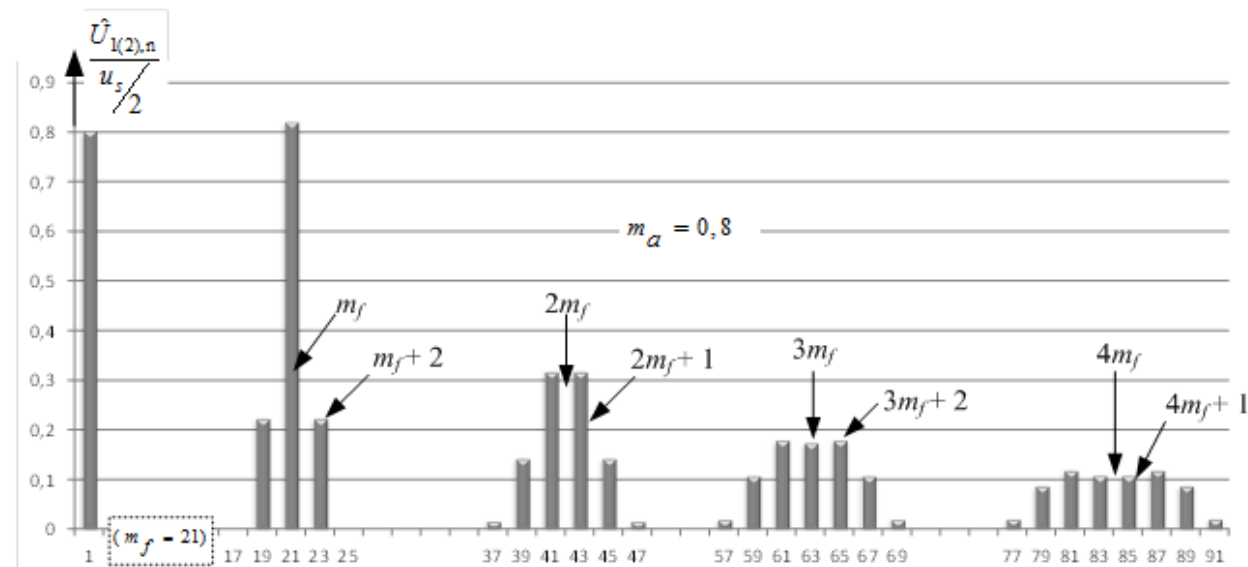
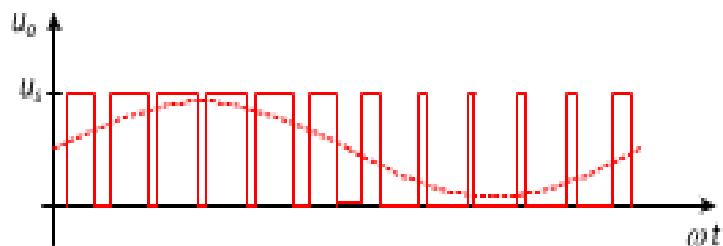
Table 2 Calculation for phase current IA and IB

Sector	A,0	B,1	C,2	D,3	E,4	F,5
$I_1$	$I_U$	$I_V$	$I_V$	$I_W W$	$I_V W$	$I_U$
$I_2$	$I_U + I_V$	$I_U + I_V$	$I_V + I_W$	$I_V + I_W$	$I_U + I_W$	$I_U + I_W$

## Povratni vpliv na motor - I

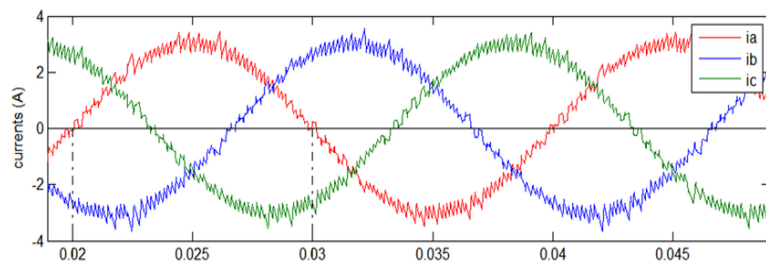
### Napetost na sponkah stroja je:

- ✓ pulzirajoče oblike (spremenljive širine in magnitude)
- ✓ dominantna frekvenca pulziranja je enaka stikalni frekvenci stikal
- ✓ delež višje harmonskih komponent stikalne frekvence je pogojen tudi z vrsto modulacije oz. regulacije toka (SPWM, SVM, DTC,...)



### Spekter statorskega toka:

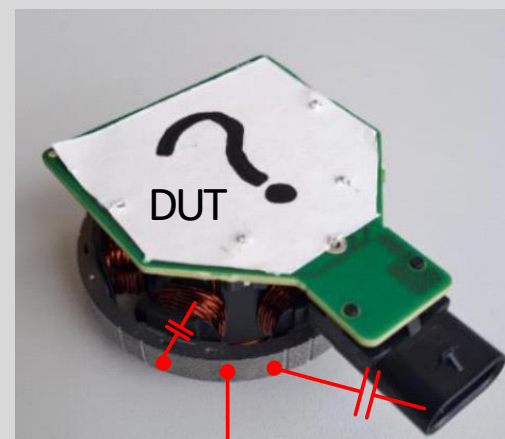
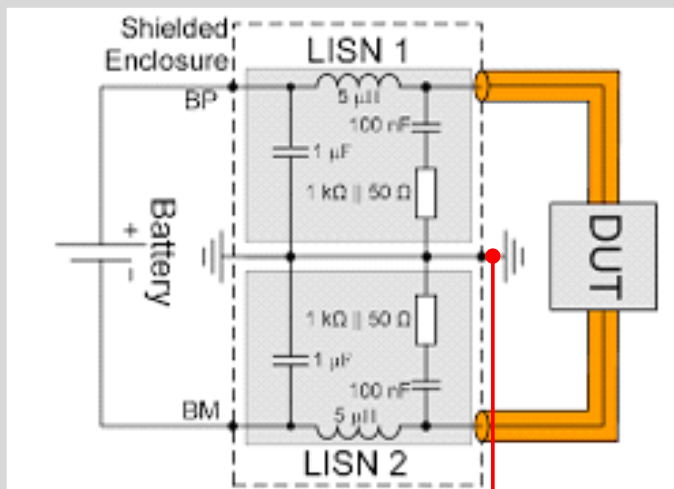
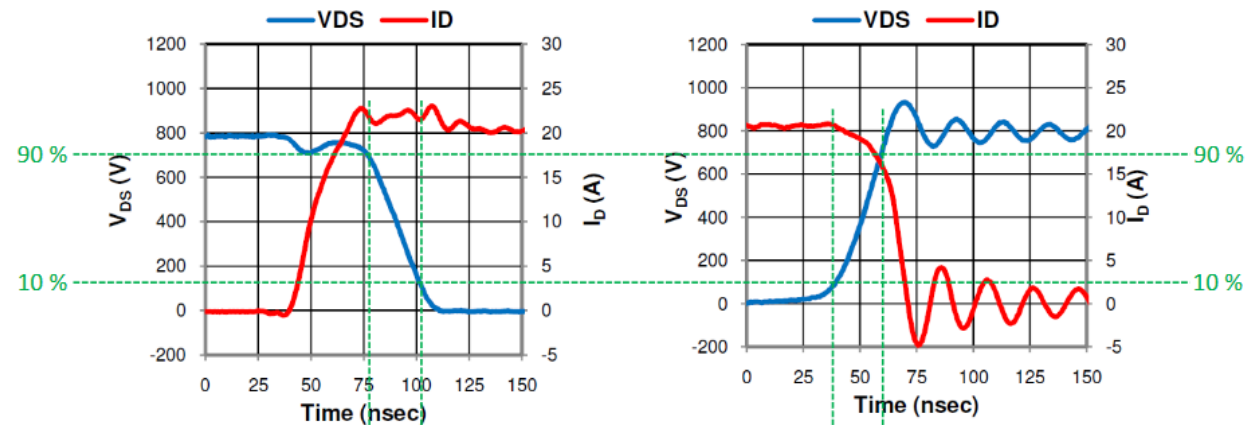
- ✓ RL značaj statorskega tokokroga zagotavlja občutno manjše amplitude višje harmonskih komponent toka



## Povratni vpliv na motor - II

### Potek napetosti na izhodnem terminalu - navitju:

- ✓ pulzirajoče oblike
- ✓ ... s superponirano VF komponento



$$i_c = C \frac{du}{dt}$$



**Naj bo zven vašega pretvornika čim manj zaznaven!**

