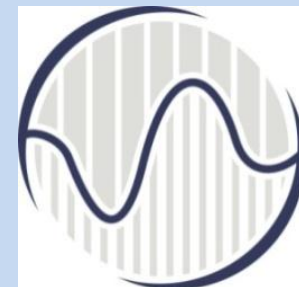


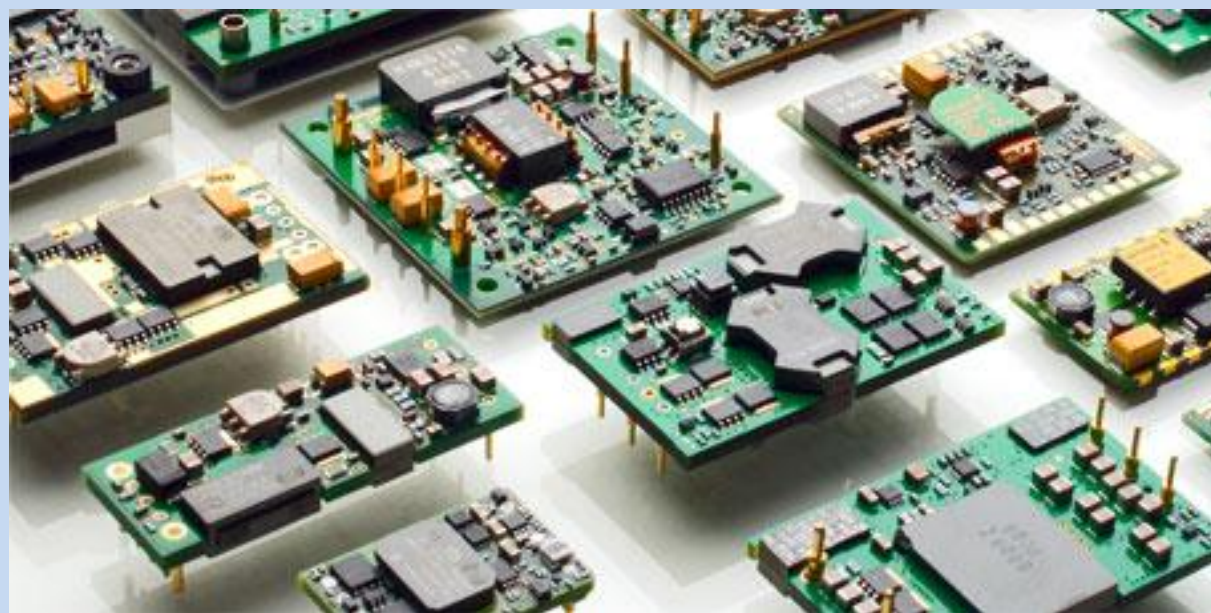
VISOKA ŠKOLA ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA STRUKOVNIH STUDIJA-VIŠER,  
BEOGRAD

STUDIJSKI PROGRAMI: MASTER ELEKTROTEHNIČKO INŽENJERSTVO

PREDMET: PROJEKTOVANJE ELEKTROENERGETSKIH PRETVARAČA



# OSNOVNE TOPOLOGIJE DC-DC PRETVARAČA I OSNOVE DIMENZIONISANJA



Predmetni profesor: Dr Željko Despotović, dipl.el.inž

# UVOD

## **PREDAVANJE RAZMATRA :**

- Predstave o osnovnim topologijama DC-DC pretvarača (koje se primenjuju u industrijskim izvorima napajanja)
- Dimenzionisanje poluprovodničkih komponenti u pripadajućoj topologiji
- DC-DC pretvarače bez galvanske izolacije (galvanska izolacija između ulaza i izlaza-opterećenja)
- DC-DC pretvarače sa galvanskom izolacijom (galvanska izolacija između ulaza i izlaza-opterećenja)

# DC-DC pretvarači bez galvanske izolacije

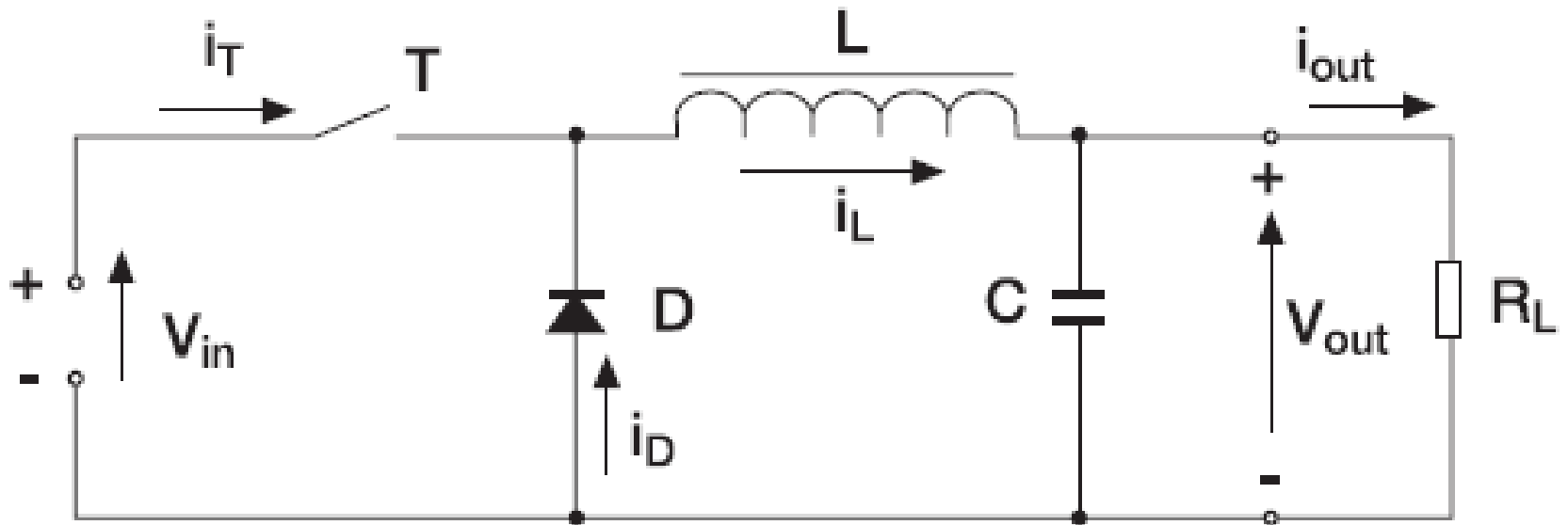
U osnovi se radi o “čoperskim” kolima

“čopovanje”= “sečenje”

- SPUŠTAČI NAPONA (Step down “Buck” regulatori)
- PODIZAČI NAPONA (Step up “Boost” regulatori)
- SPUŠTAČI/PODIZAČI NAPONA (Step up / Step down “Buck - Boost” regulatori)

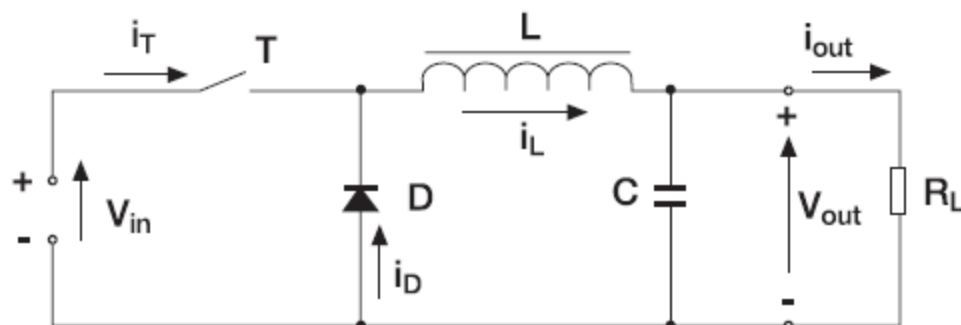
# SPUŠTAČ NAPONA

- “Buck” converter: Step down voltage regulator



TOPOLOGIJA SPUŠTAČA NAPONA

# SPUŠTAČ NAPONA (TOPOLOGIJA I KARAKTERISTIČNI TALASNI OBLICI)



Učestanost prekidanja  
prekidača  $f = 1/T$

Koeficijent režima rada  
("DUTY-CYCLE")  $\delta = t_{on}/T$

## IZLAZNI NAPON

$$V_{out} = V_{in} \cdot \delta$$

Dimenzionisanje energet.  
Prekidača (tranzistora)  
BJT, IGBT, MOSFET

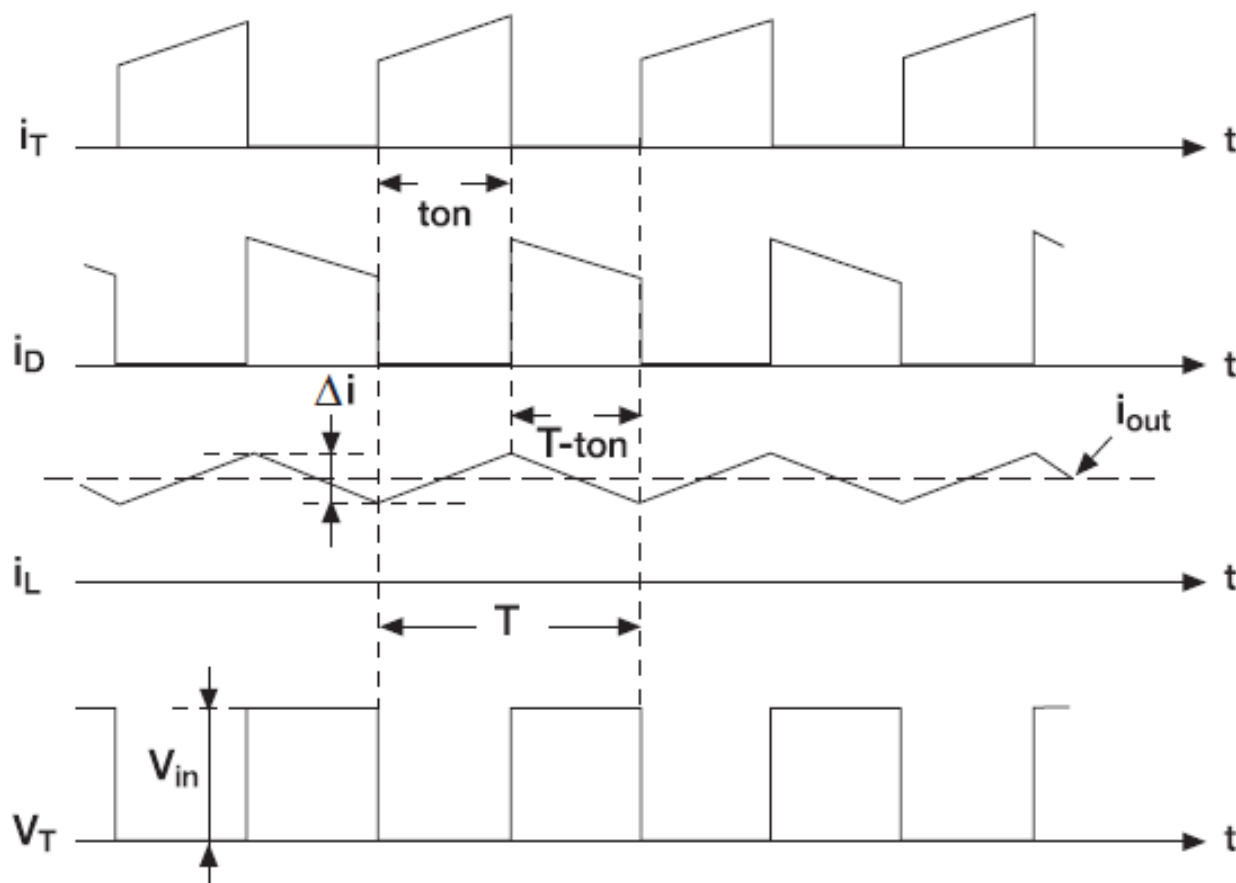
$$V_{cev} \text{ ili } V_{DSS} > V_{in \max}$$

$$I_{cmax} \text{ ili } I_{D \max} > I_{out} + \frac{\Delta I}{2}$$

Dimenzionisanje diode

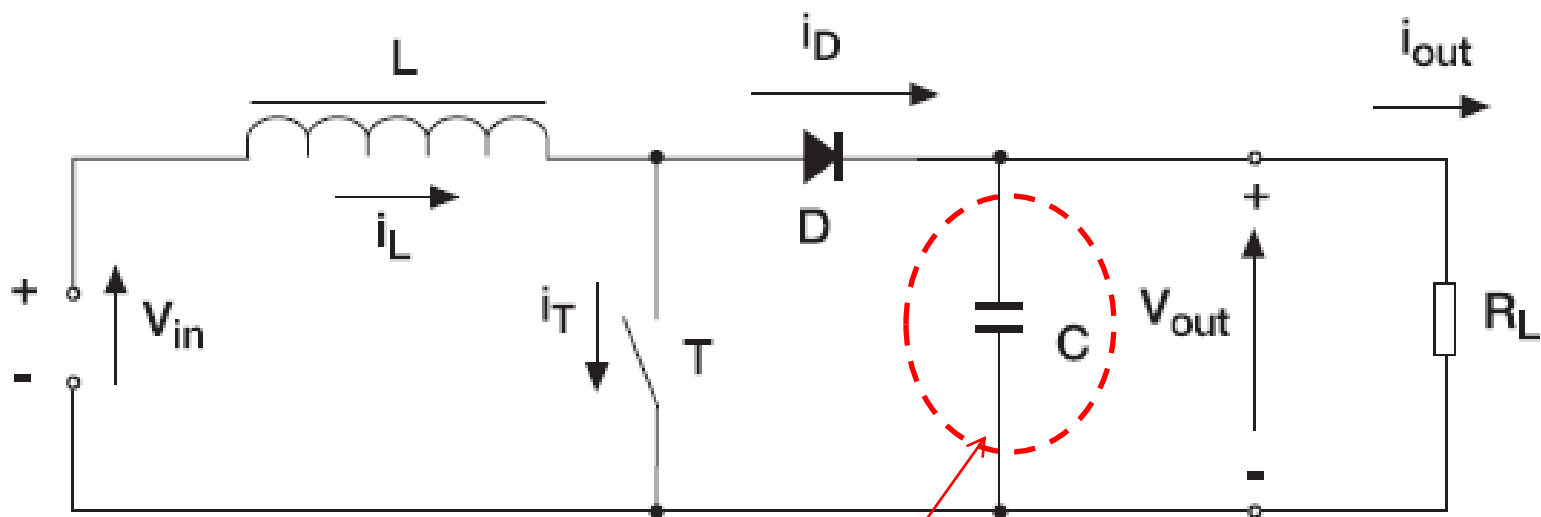
$$V_{RRM} \geq V_{in \max}$$

$$I_{F(AV)} \geq I_{out} (1-\delta)$$



# PODIZAČ NAPONA

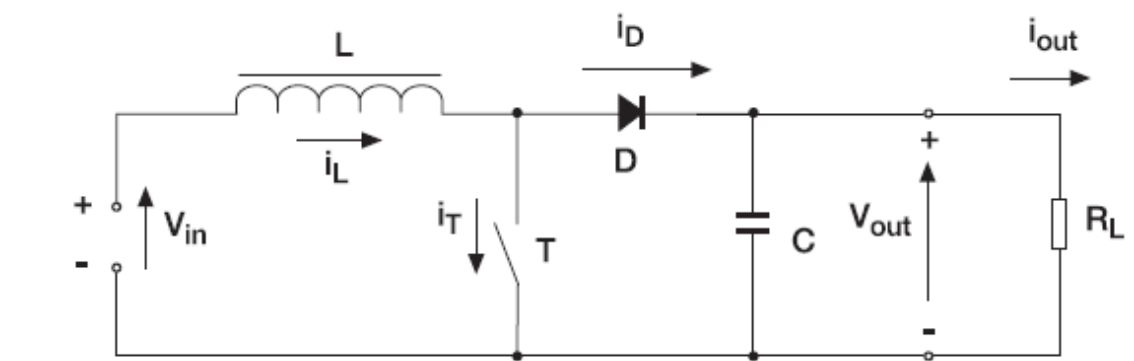
- “Boost” converter: Step up voltage regulator



IZLAZNI KONDENZATOR JE ZNAČAJNIJE  
NAPONSKI “STRESIRAN” U ODNOSU NA topologiju SPUŠTAČA NAPONA  
obzirom da  $V_{out}$  može biti  $\gg$  od  $V_{in}$  !!!

TOPOLOGIJA PODIZAČA NAPONA

PODIZAČ NAPONA (TOPOLOGIJA I KARAKTERISTIČNI TALASNI OBLICI)

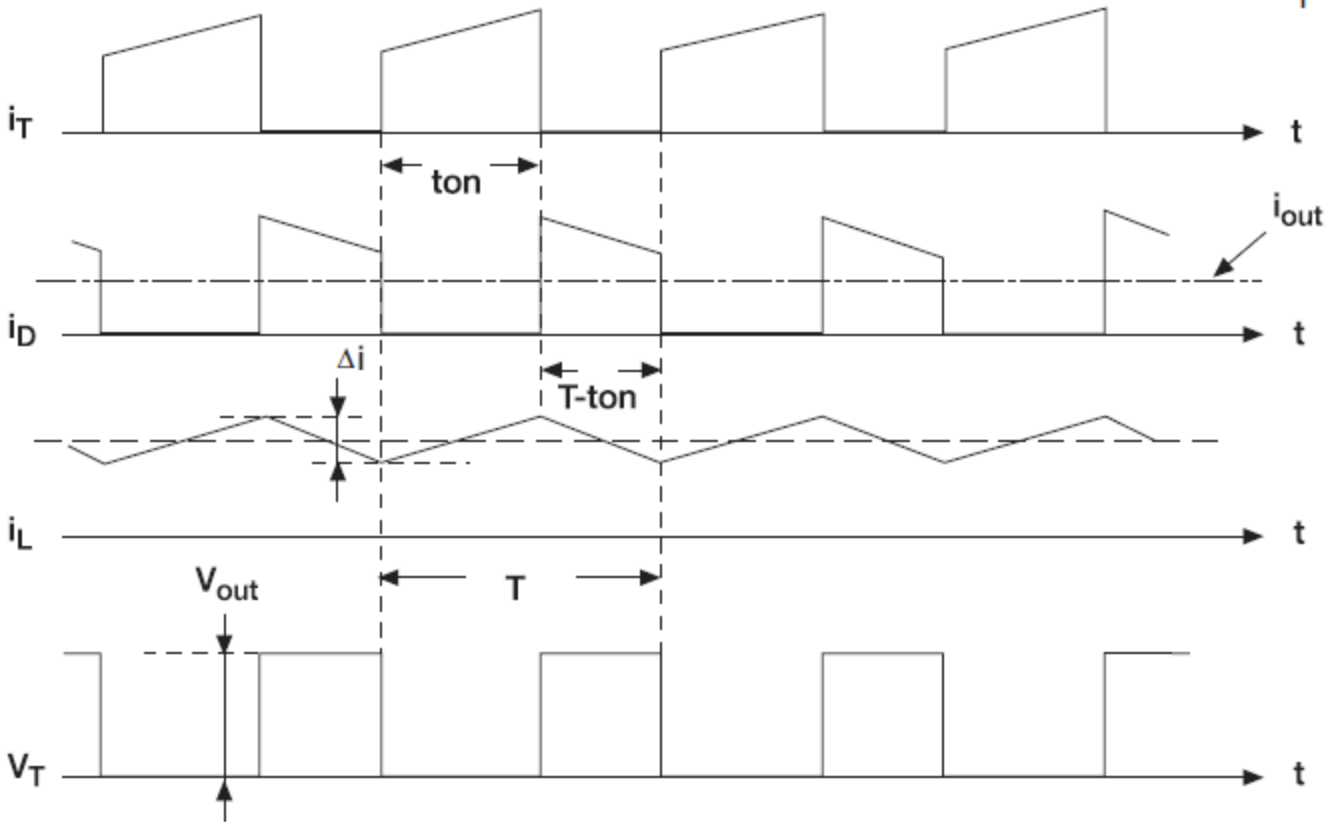


$f = 1/T$

$\delta = \frac{t_{on}}{T}$

**IZLAZNI NAPON:**

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{1-\delta}$$



Dimenzionisanje energet. Prekidača (tranzistora) BJT, IGBT, MOSFET

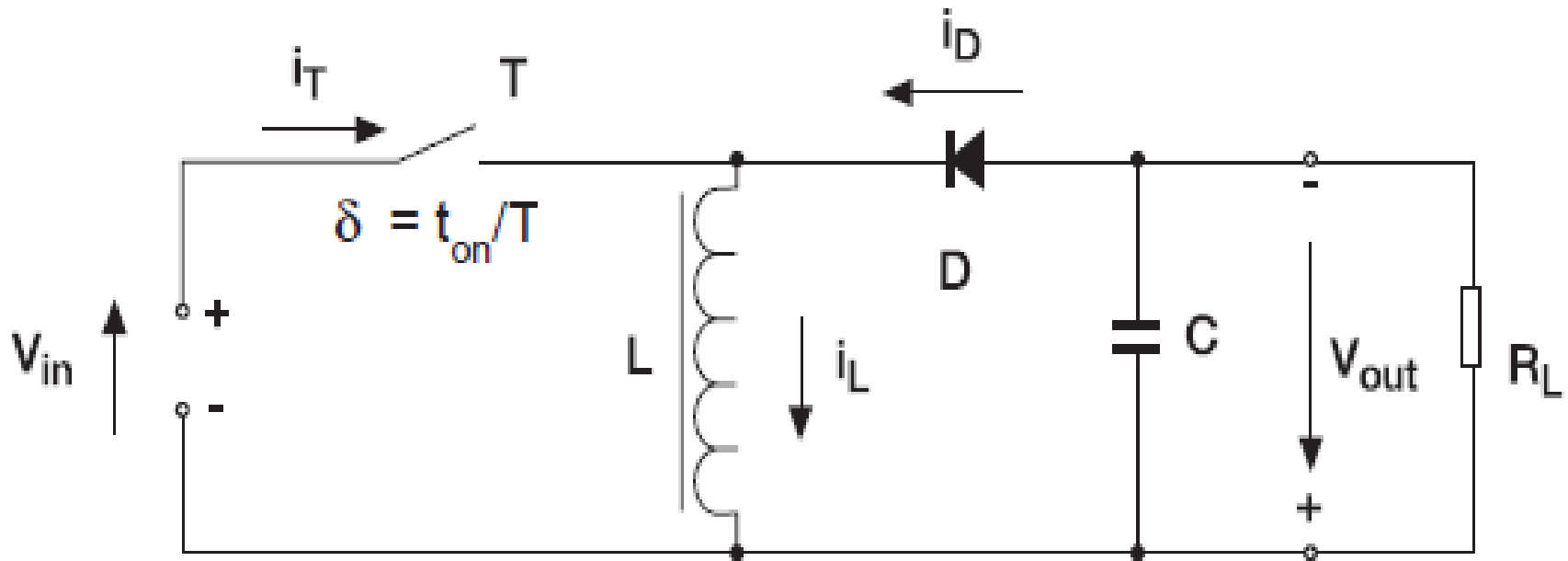
$$V_{cev} \text{ ili } V_{DSS} > V_{out}$$
$$I_{cmax} \text{ ili } I_{Dmax} > \frac{I_{out}}{1-\delta} + \frac{\Delta I}{2}$$

Dimenzionisanje diode

$$V_{RRM} > V_{out}$$
$$I_{F(av)} > I_{out}$$

# SPUŠAČ/PODIZAČ NAPONA

- “Buck-Boost converter: Step up/Step down voltage

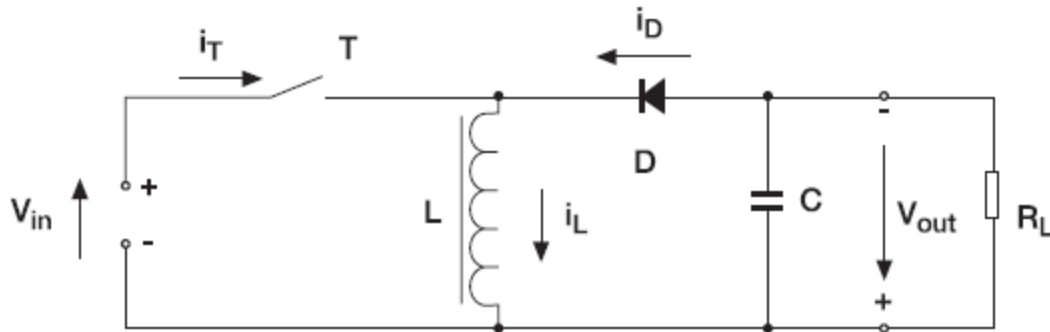


## TOPOLOGIJA SPUŠTAČA/PODIZAČA NAPONA

U REŽIMU  $\delta < 0.5$  radi kao SPUŠTAČ NAPONA

U REŽIMU  $\delta > 0.5$  radi kao PODIZAČ NAPONA

## SPUŠTAČ/ PODIZAČ NAPONA (TOPOLOGIJA I KARAKTERISTIČNI TALASNI OBLICI)



### IZLAZNI NAPON

$$V_{out} = - \frac{V_{in} \cdot \delta}{1 - \delta}$$

Dimenzionisanje energet.  
Prekidača (tranzistora) BJT,  
IGBT, MOSFET

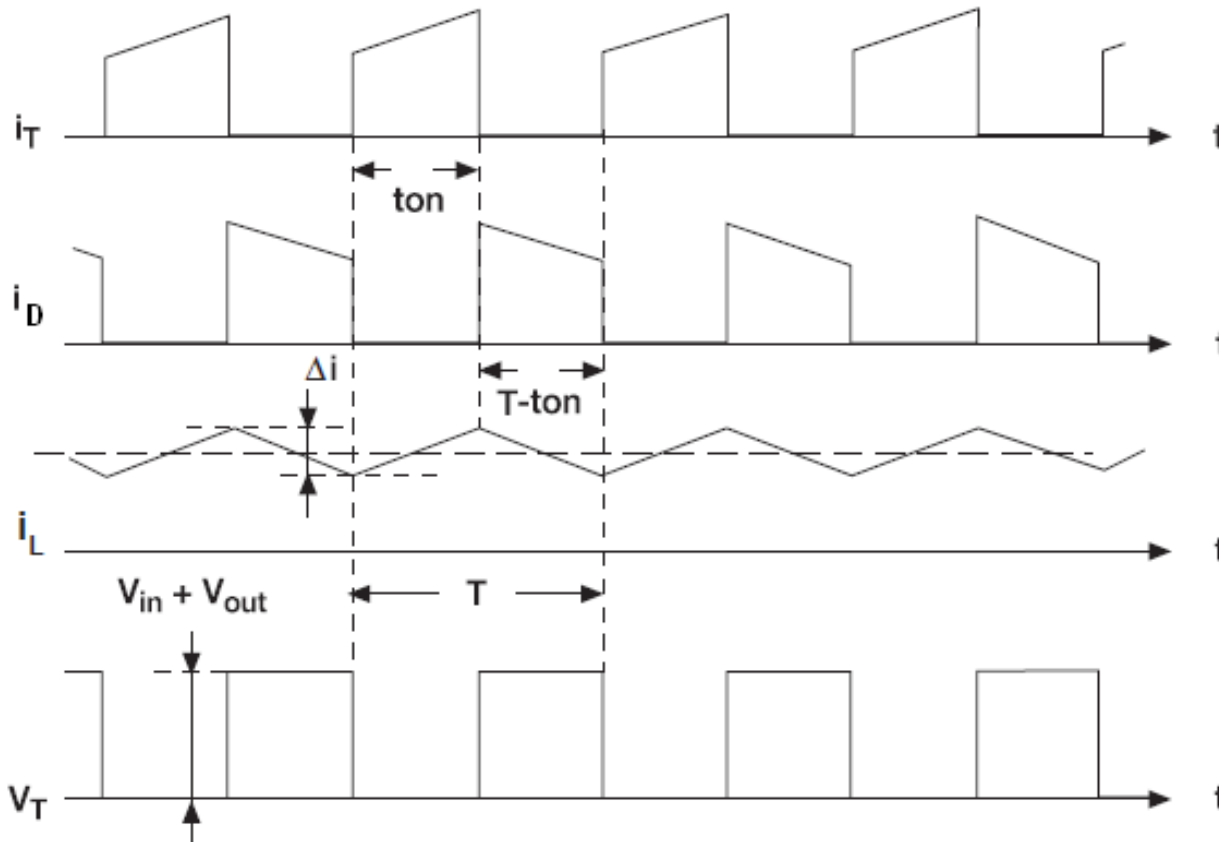
$$V_{ceVmax} \text{ ili } V_{DSS} > V_{inmax} + V_{out}$$

$$I_{cmax} \text{ ili } I_{Dmax} > \frac{I_{out}}{1 - \delta} + \frac{\Delta I}{2}$$

### Dimenzionisanje diode

$$V_{RRM} > V_{inmax} + V_{out}$$

$$I_{F(av)} > I_{out}$$



# REZIME- neizolovani DC/DC pretvarači

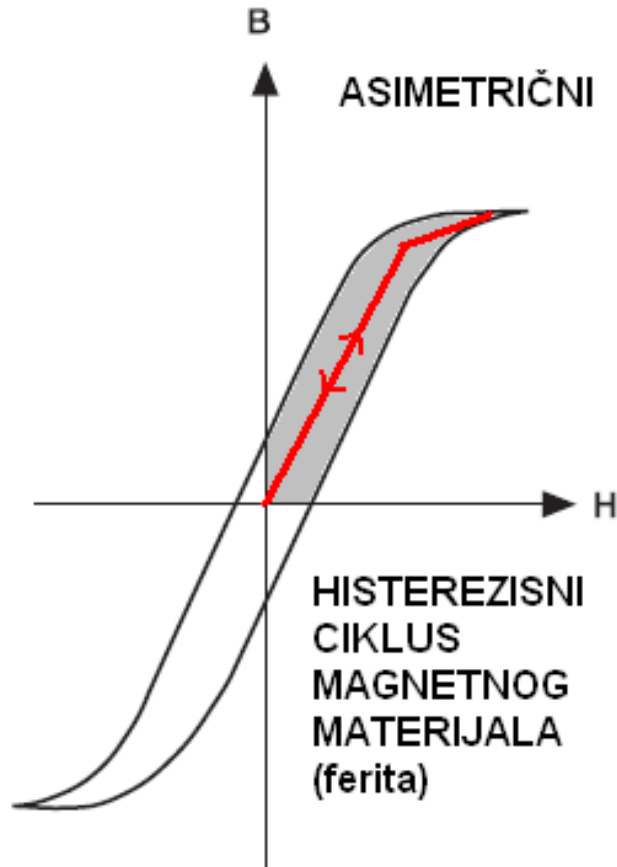
| DC-DC<br>karakt.                      | SPUŠTAČ<br>STEP DOWN         | PODIZAČ<br>STEP UP           | SPUŠTAČ / PODIZAČ<br>STEP UP/DOWN     |
|---------------------------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------------------------|
| $V_{out}$                             | $V_{in} \cdot \delta$        | $V_{in}/1-\delta$            | $[-V_{in} \cdot \delta] / [1-\delta]$ |
| RMS<br>struja kroz $C_{out}$          | niska                        | visoka                       | visoka                                |
| Struja iz ulaznog<br>izvora napajanja | diskontinualna<br>(prekidna) | kontinualna<br>(neprekidna)  | diskontinualna<br>(prekidna)          |
| Pobudno kolo<br>prekidača T           | plivajuće<br>("floating")    | ref. ka masi<br>("grounded") | plivajuće<br>("floating")             |

UPOREDNI PREGLED neizolovanih DC-DC pretvarača

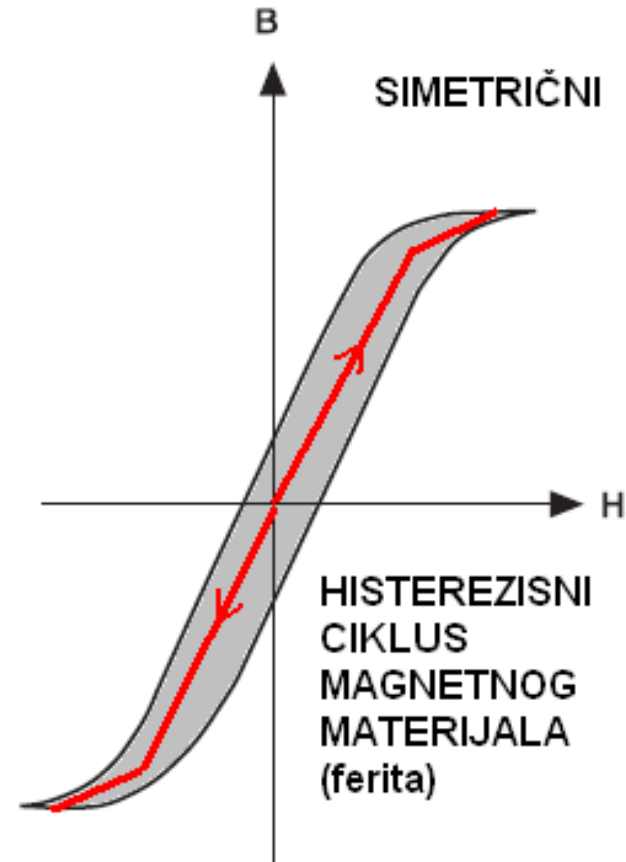
# DC-DC pretvarači sa galvanskom izolacijom

- Kod ovih pretvarača se koriste visokofrekventni transformatori (spuštači ili podizači) sa magnetnim medijumom koga sačinjavaju feritna jezgra
- Ovi transformatori su ustvari “galvanski izolatori” između primarne i sekundarne strane
- Ovi izolovani pretvarači se dele, prema položaju radne tačke na B-H krivoj feritnog jezgra, na
  - asimetrične (radna tačka u jednom kvadrantu)
  - simetrične (radna tačka u oba kvadranta B-H krive)

# RADNI KVADRANTI U MAGNETNOM MATERIJALU ZA ASIMETRIČNE I SIMETRIČNE DC-DC PRETVARAČE



RAD u JEDNOM  
KVADRANTU B-H krive



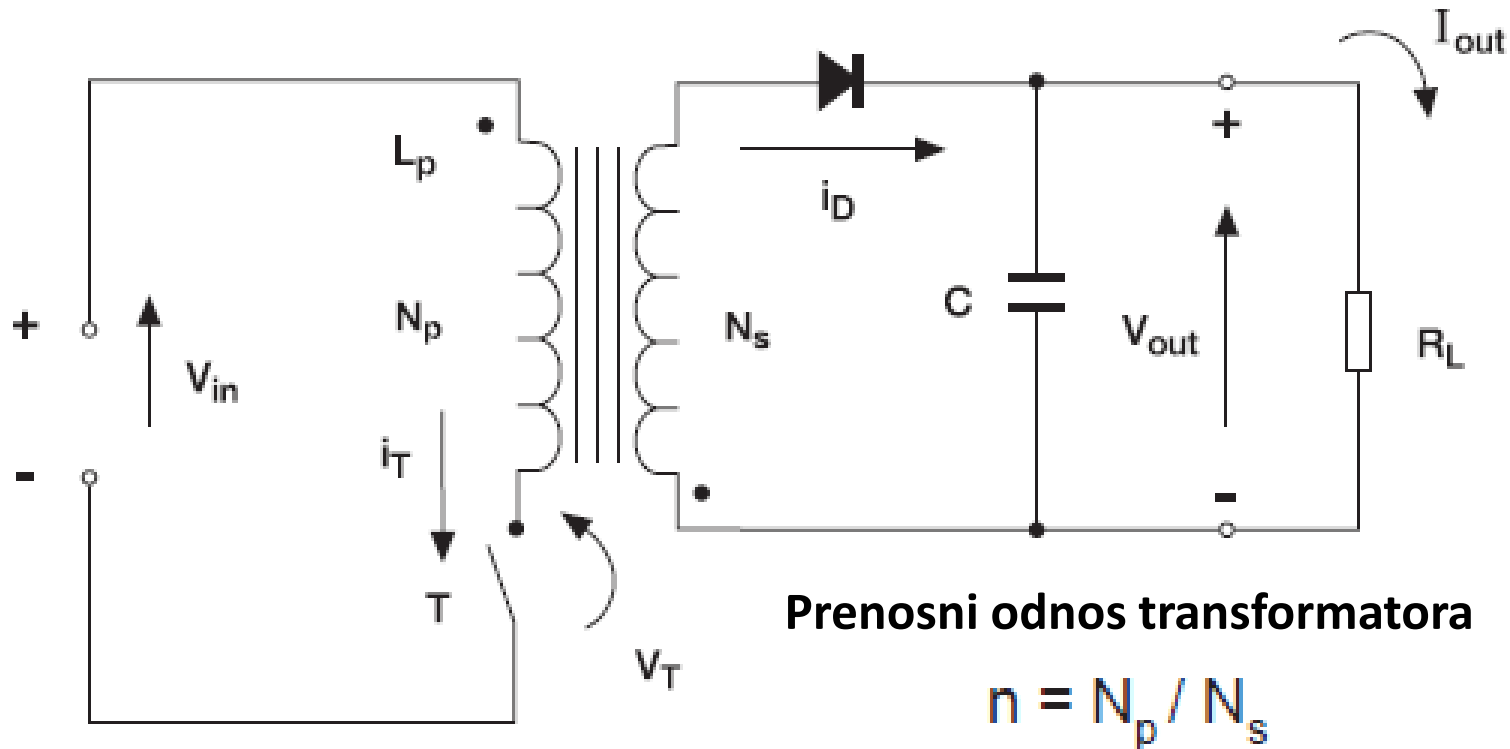
RAD u DVA KVADRANTA  
(simetrična) B-H krive

# ASIMETRIČNI DC-DC pretvarači sa galvanskom izolacijom

- **“Off-line flyback”** regulatori (koji mogu imati jedan ili dva energetska prekidača i koji mogu raiti u prekidnom ili neprekidnom režimu
- **“Off line forward”** regulatori

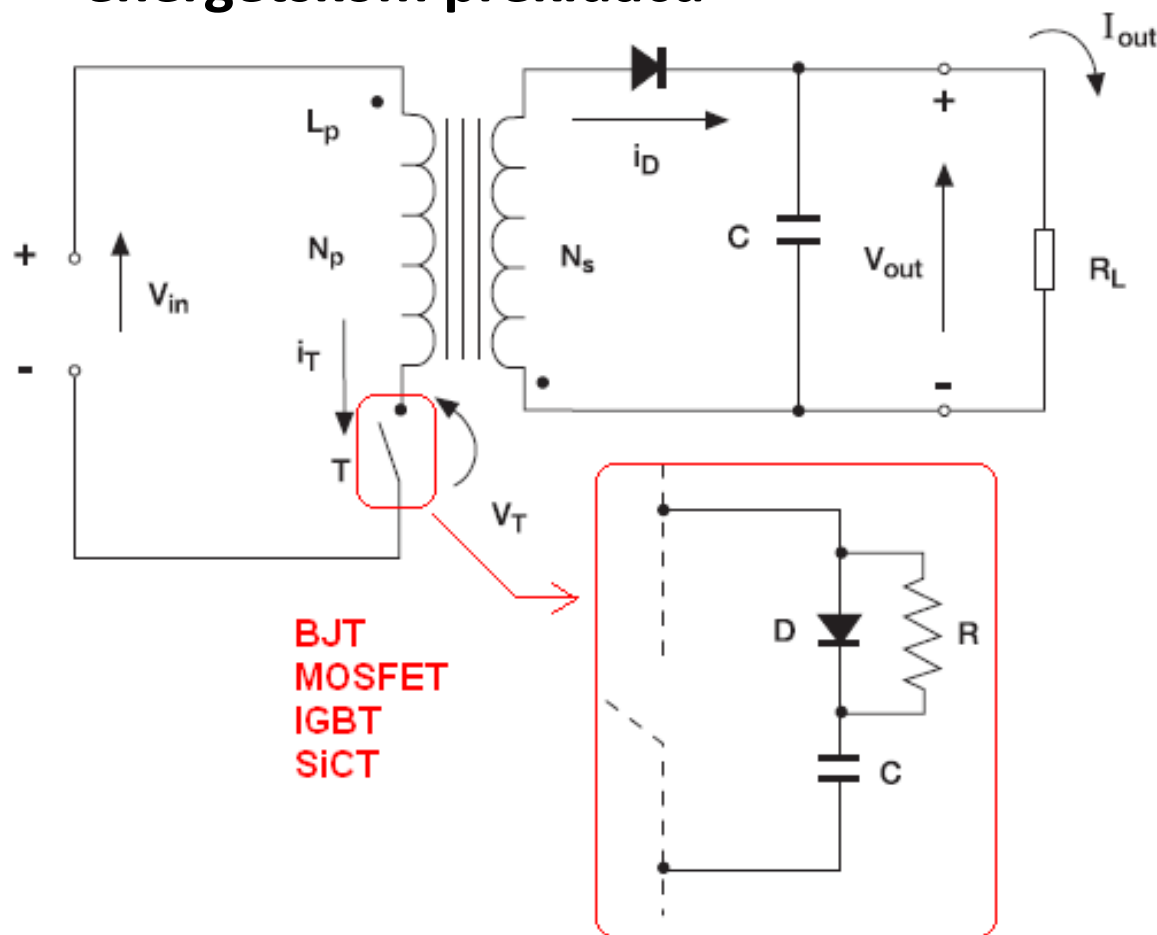
**“Off-line flyback” regulatori**

## “Off-line flyback “ regulator sa galvanskom izolacijom i jednim energetskim prekidačem -TOPOLOGIJA

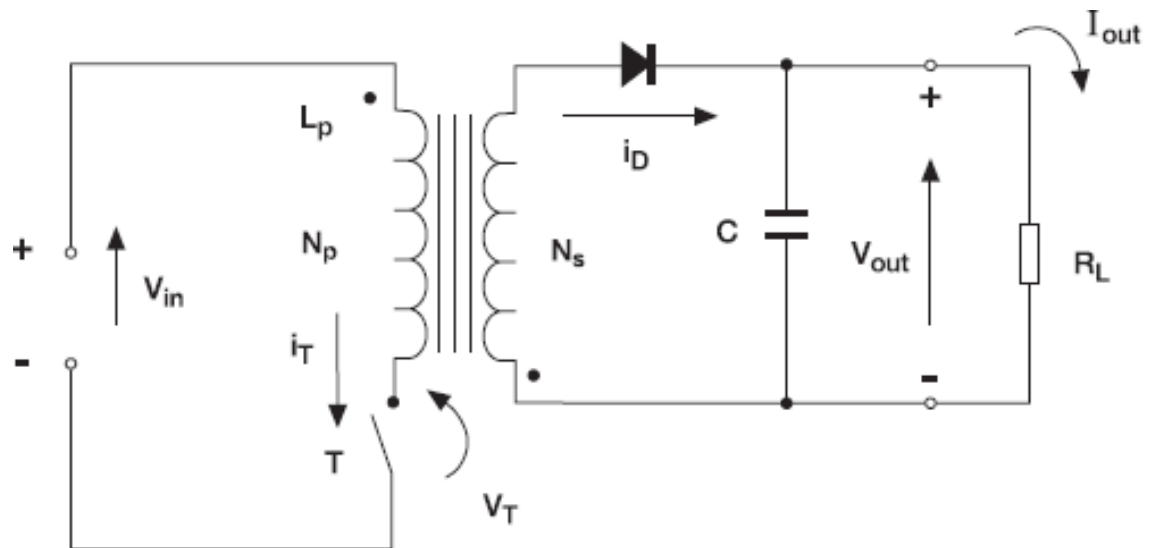


Energija se “nagomilava” u primarnoj induktivnosti  $L_p$  u intervalu kada je prekidač  $T$  uključen (ON), a prebacuje se u sekundarno kolo , odnosno na izlaz (opterećenje) kada je prekidač  $T$  isključen (OFF). Zbog toga se i zovu OFF-LINE

# RCD kolo za ublažavanje naponskog stresa na energetskom prekidaču

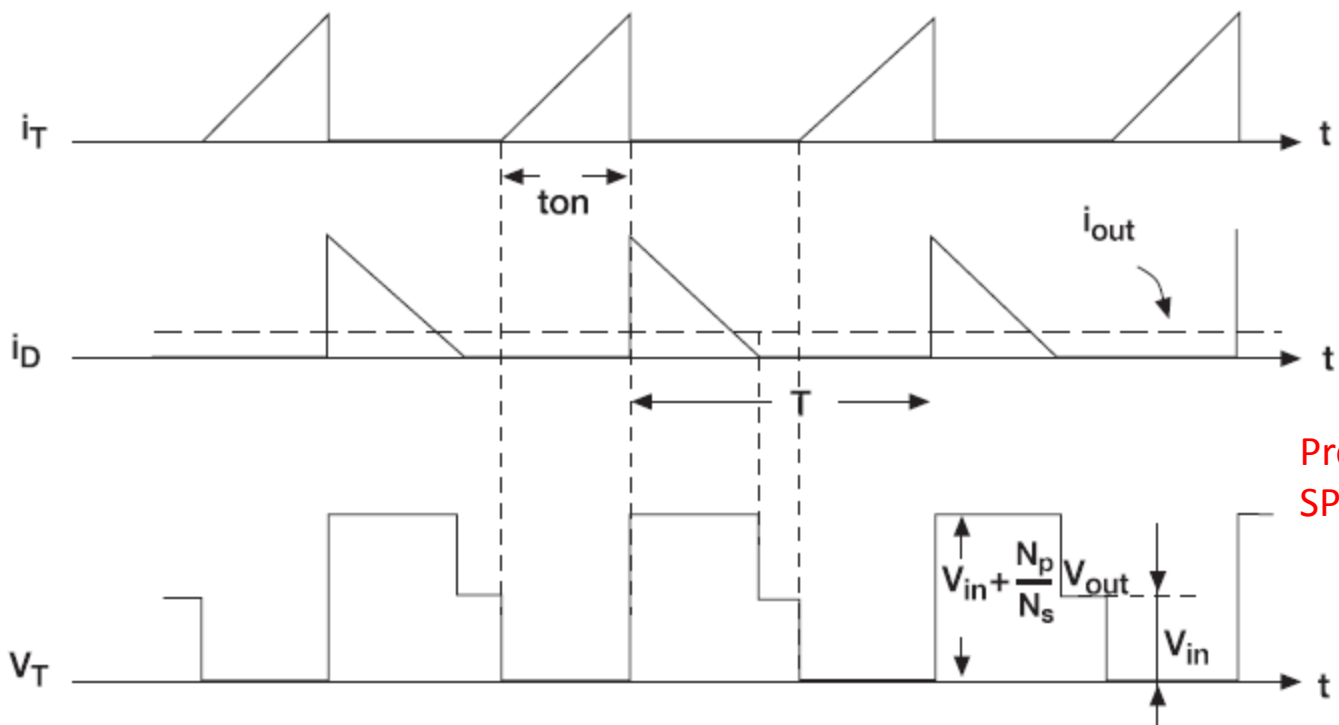


**“Off-line flyback”** regulatori se uglavnom koriste za izlazne snage od 30W do 300W. Nema potrebe za izlaznim LC filtrom (potreban je samo C) tako da je ovaj pretvarač relativno jeftin. Potrebno je RCD kolo da bi ublažilo naponski stres na energetskom prekidaču T.

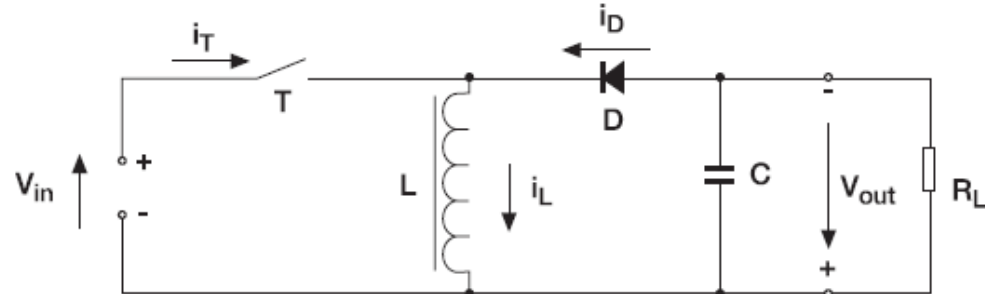


IZLAZNI NAPON

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{n} \cdot \frac{\delta}{1-\delta}$$

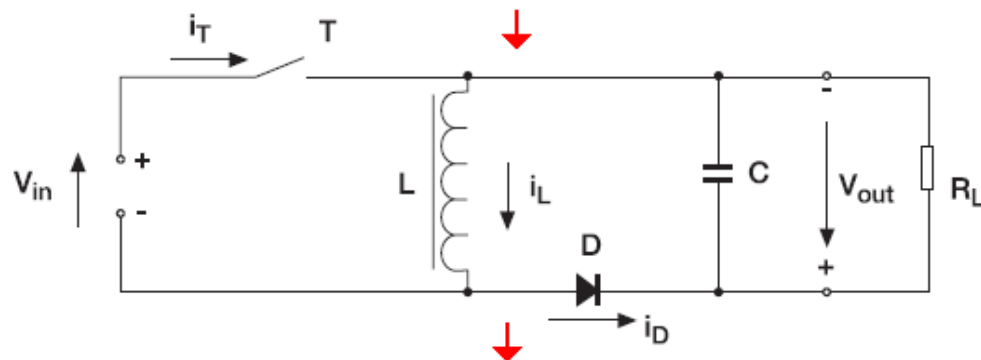


Pretvarač je vrlo sličan  
SPUŠTAČU/PODIZAČU !!

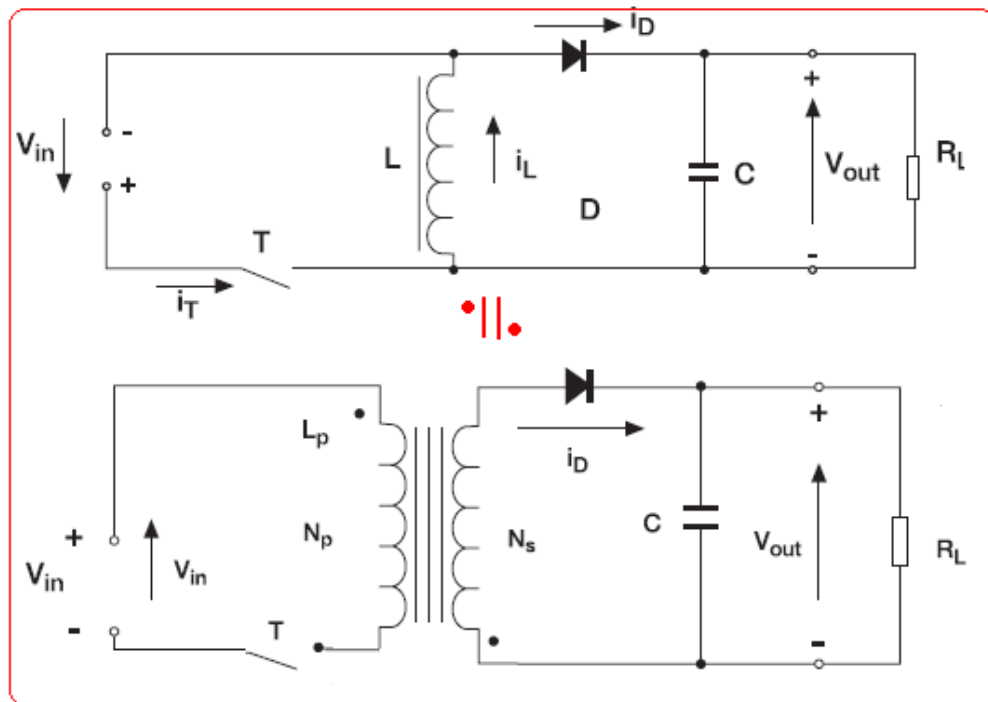


## TOPOLOGIJA SPUŠTAČ/PODIZAČ

(diodu D prebacujemo u suprotnu granu)-ekvivalentno



“Rotiramo” topologiju  
Opet je sve ekvivalentno  
prethodnom



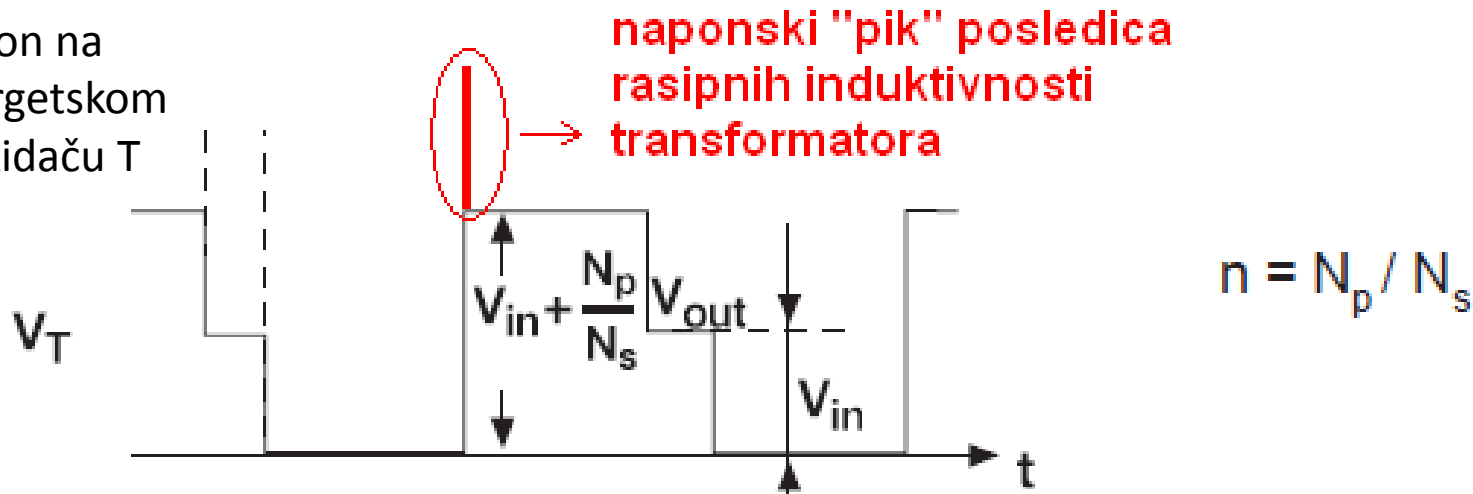
## TOPOLOGIJA SPUŠTAČ/PODIZAČ

## TOPOLOGIJA “OFF LINE FLYBACK”

# DIMENZIONISANJE PREKIDAČA I DIODE

“Off-line flyback” u diskontinualnom režimu rada

Napon na  
energetskom  
prekidaču T



$$V_{CEV} \text{ ili } V_{DSS} \geq V_{inmax} + nV_{out} + \text{pik napona}$$

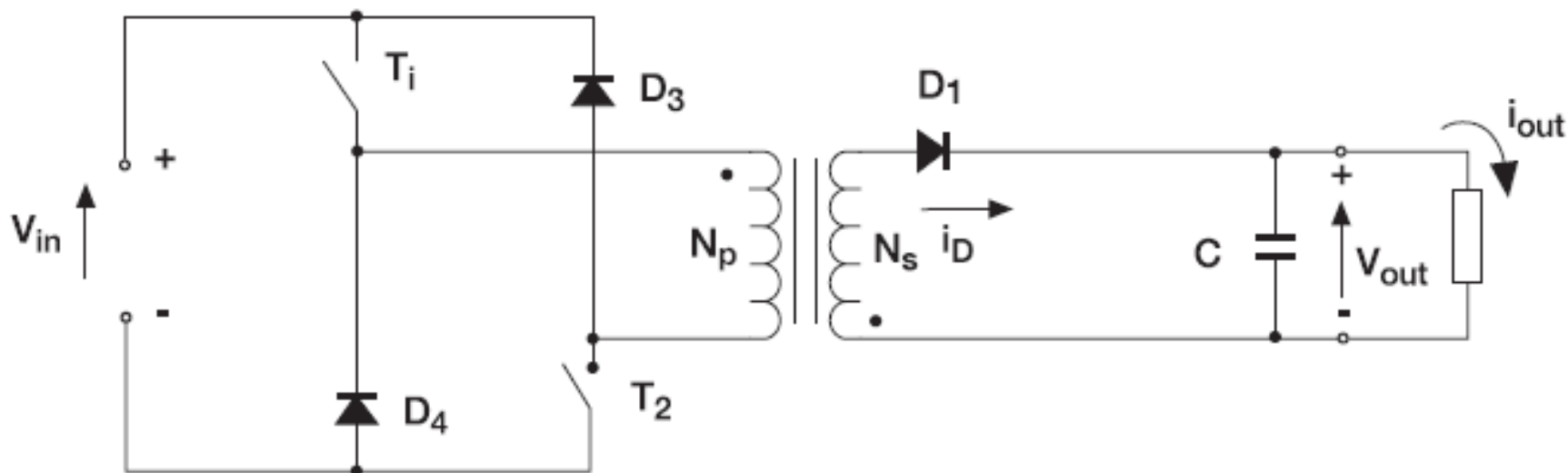
**DIODA NA SEKUNDARU:**

$$V_{RRM} \geq V_{out} + \frac{V_{inmax}}{n}$$

Problem je dakle “pik” napona na prekidaču  
Upravo snaber RCD ublažava ovaj stres  
Međutim snaber se izuzetno “greje” i disipira  
značajnu snagu!!!!

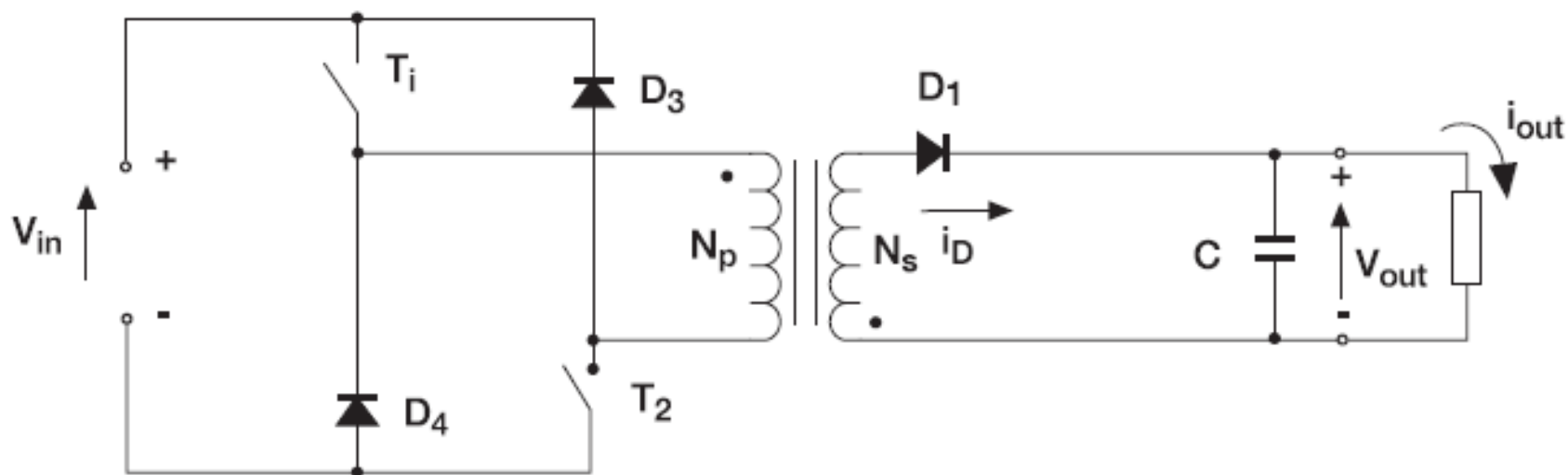
**KAKO UBLAŽITI OVAJ STRES?**

## IZOLOVANI OFF-LINE FLYBACK SA DVA PREKIDAČA (T1,T2) I DVE POVRATNE DIODE (D3,D4)



Dve demagnetizacione diode ( $D_1$  i  $D_2$ ) obezbeđuju “nedisipativni” snaber za sistematsko ograničenje napona na prekidačima. Ovo omogućava rad na većim učestanostima i obezbeđuje bolju efikasnost u odnosu na topologiju sa jednim prekidačem.

Problem kod ove topologije je pobuda “gornjeg” prekidača  $T_1$ . Topologija je asimetrična što je još jedna ozbiljna mana.



## DIMENSIONISANJE PREKIDAČA T1, T2

$$V_{ceV} \text{ ili } V_{DSS} > V_{in \max}$$

## DIMENSIONISANJE DIODA D3, D4

$$V_{RRM} \geq V_{inmax}$$

## MAKSIMALNE I EFEKTIVNE VREDNOSTI STRUJA ENERGETSKOG PREKIDAČA I DIODE NA SEKUNDARU-diskontinualni režim

PREKIDAČ:

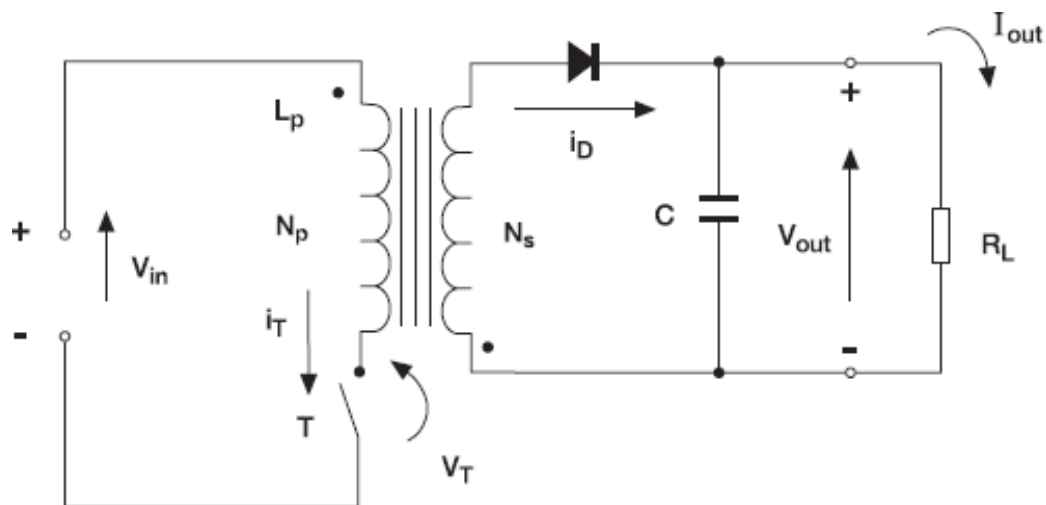
$$I_{Cpeak} \geq \frac{2P_{out}}{\eta V_{inmin} \delta_{max}}$$

$$I_{Drms} \geq \frac{2P_{out}}{\eta V_{inmin} \sqrt{(3\delta_{max})}}$$

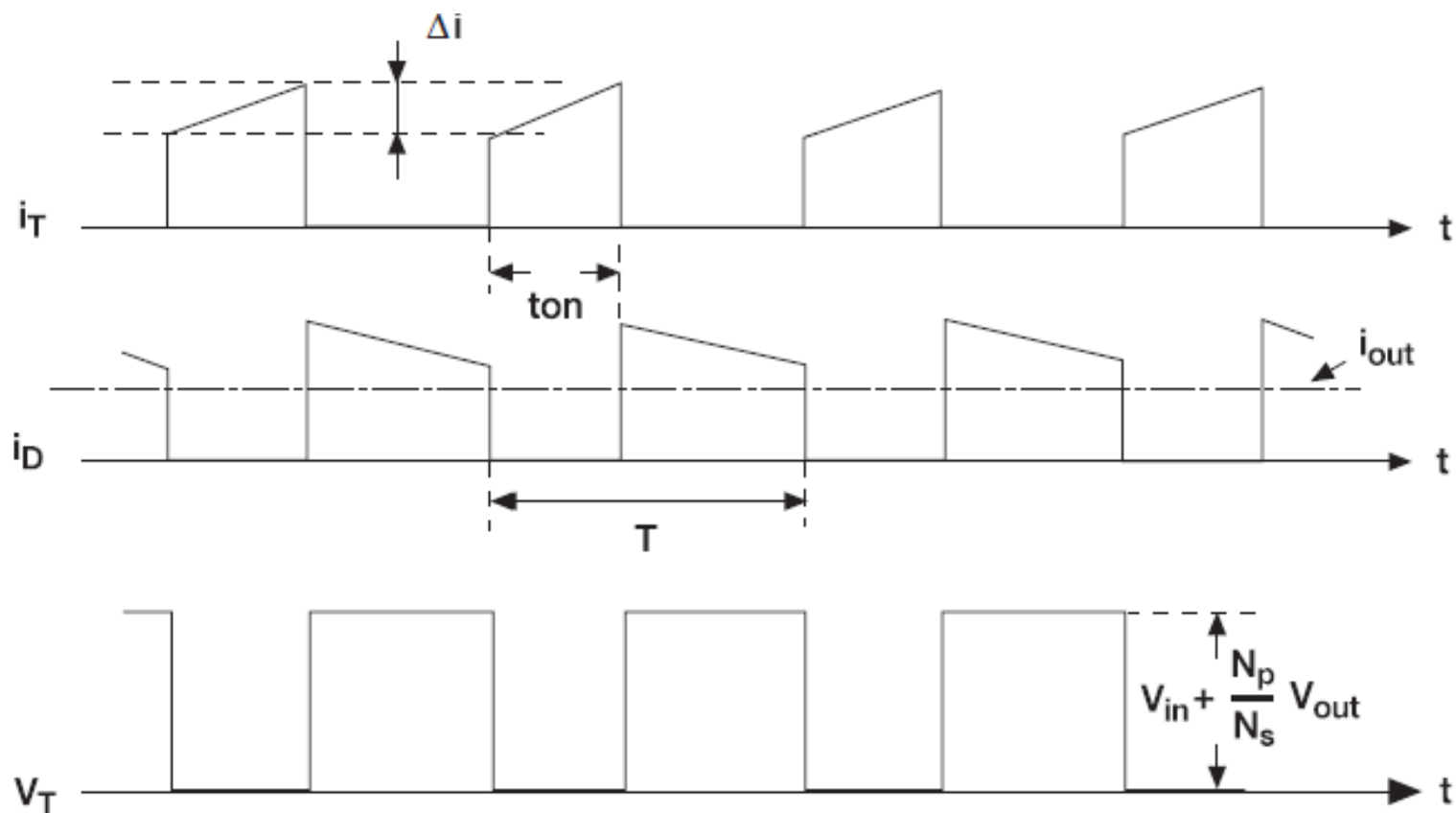
DIODA:

$$I_{Fpeak} \geq \frac{2P_{out}}{V_{out} (1 - \delta_{max})}$$

$$I_{F(AV)} \geq \frac{P_{out}}{V_{out}}$$



**NEPREKIDNI (KONTINUALNI)  
REŽIM RADA**



# MAKSIMALNE I EFEKTIVNE VREDNOSTI STRUJA ENERGETSKOG PREKIDAČA I DIODE NA SEKUNDARU- kontinualni režim

PREKIDAČ:

$$I_{Cpeak} \geq \frac{2P_{outmax}}{\eta \delta_{max} V_{inmin} (1+A)}$$

$$I_{Drms} \geq \frac{2P_{out}}{\eta V_{inmin}} \sqrt{\frac{(1+A+A^2)}{3\delta_{max}}}$$

DIODA:

$$I_{Fpeak} \geq \frac{2P_{out}}{V_{out} (1 - \delta_{max})(1+A)}$$

$$I_F(AV) \geq \frac{P_{out}}{V_{out}}$$

$$A \geq \frac{I_{peak} - \Delta I}{I_{peak}}$$

# DISKONTINUALNI REŽIM

- PREDNOSTI

- Nulti “turn-on” gubici na energetskom prekidaču
- Dobar tranzijentni *line/load* odziv
- Jednostavna stabilizacija kola povratn sprege ( jedan pol u prenosnoj funkciji)
- Vreme oporavka diode nije kritično (struja pada u nulu pre pojave inverznog napona na diodi)

- MANE

- Velike vršne vrednosti struje prekidača i diode
- Relativno velika “talasnost” izlaznog napona
- $C_{out} (disc.) \gg 2 \times C_{out} (cont.)$

# KONTINUALNI REŽIM

- PREDNOSTI

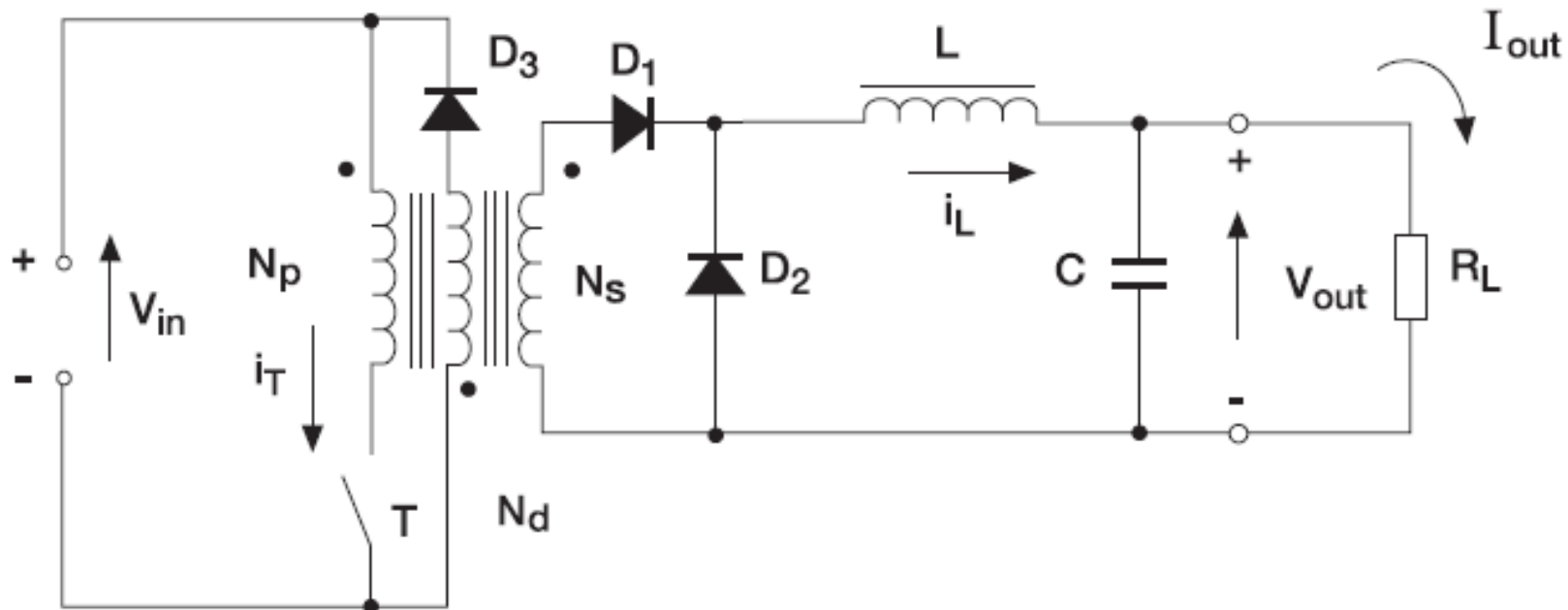
- Vršna vrednost struje diode i prekidača su polovina vrednosti koje se imaju u diskontinualnom režimu
- Mala “talasnost” izlaznog napona
  - $C_{out} (cont.) \gg 0.5 C_{out} (disc.)$

- MANE

- Relativno veliki gubici na diodi u toku vremena oporavka
- Problemi kod stabilizacije kola povratne sprege

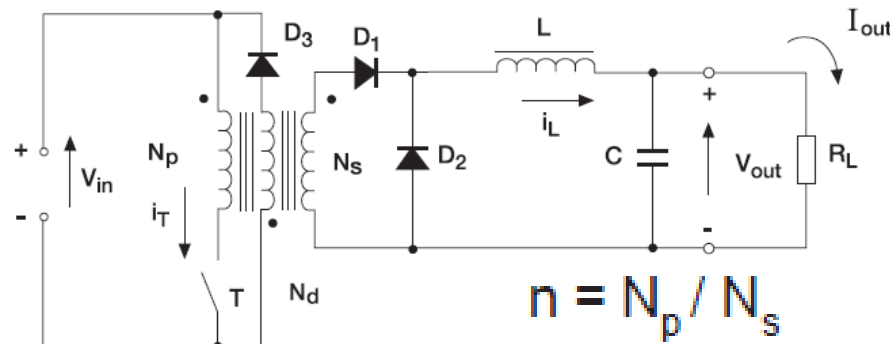
**“Off line forward” regulatori**

## IZOLOVANI OFF-line FORWARD SA JEDNIM PREKIDAČEM



FORWARD pretvarač prebacuje direktno energiju iz ulaznog izvora na opterećenje u intervalu “on-time” tj. kada je energetska prekidač  $T$  uključen. U intervalu kada je prekidač  $T$  isključen (“off-time”), nagomilana energija se kroz izlaznu induktivnost  $L$  i diodu  $D_2$  zatvara kroz opterećenje, slično kao kod čopera. I ova topologija se može realizovati sa jednim ili dva energetska prekidača. Izlazna snaga je do 300W ukoliko se koristi jedan prekidač, a oko 1kW ukoliko se koriste dva prekidača.

# IZOLOVANI OFF-line FORWARD SA JEDNIM PREKIDAČEM (topologija i talasni oblici)

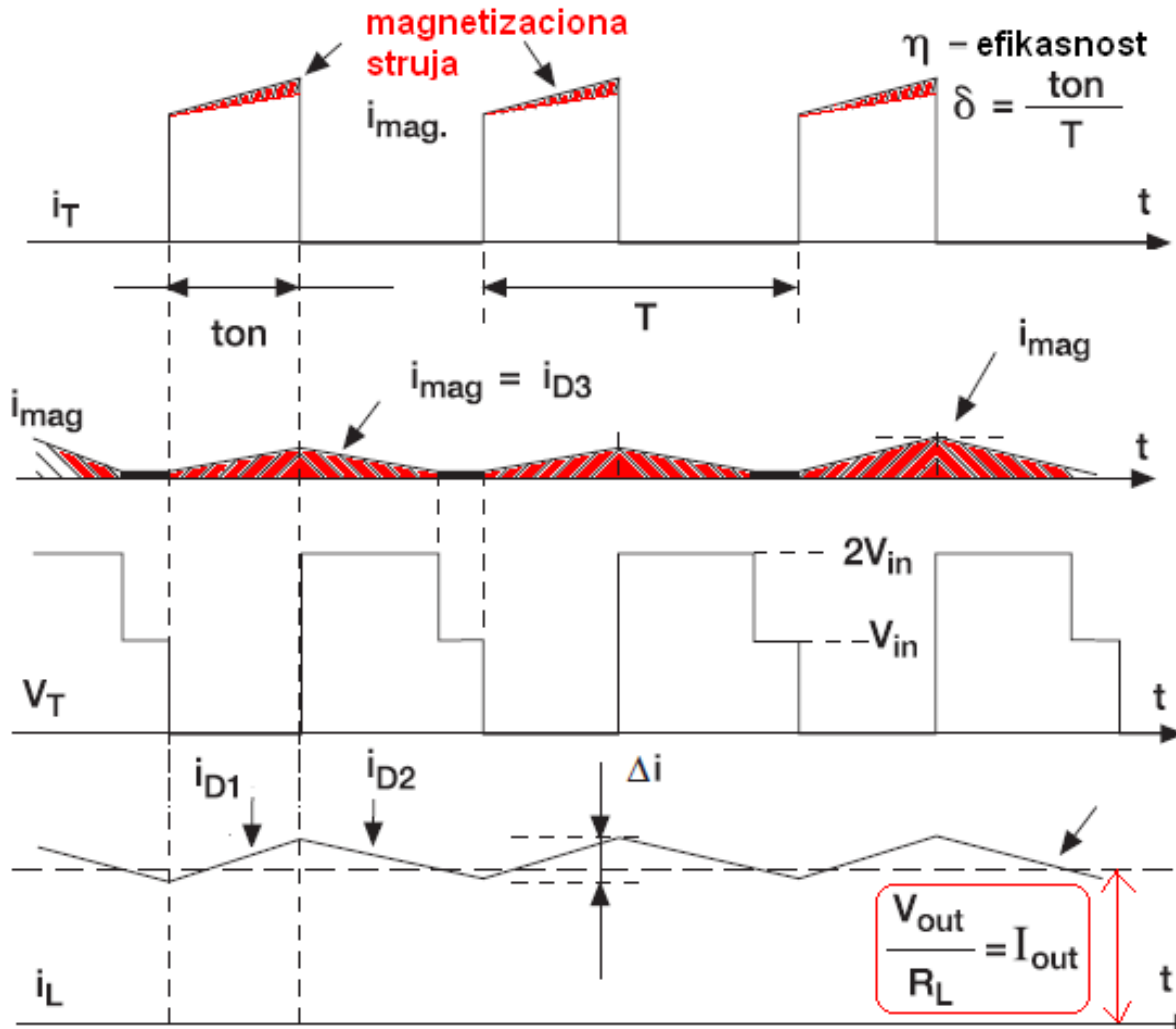


Izlazni napon

$$V_{out} = \delta \cdot \frac{V_{in}}{n}$$

Nd- demagnetizacioni  
namotaj

Obično je  $N_p = N_d$



Tokom demagnetizacije prekidač T “trpi” dvostruki napon  $V_{in}$  (teoretski), ali zbog rasipanja on može biti i dodatno uvećan za oko 80%

## DIMENZIONISANJE PREKIDAČA

$$V_{CEV} \text{ ili } V_{DSS} \geq V_{inmax} \left[ 1 + \frac{N_p}{N_d} \right] + \text{pik napona usled rasipnih ind.}$$

$$I_{cpeak} \geq \frac{1.2 \cdot P_{out}}{\eta V_{inmin} \cdot \delta_{max}}$$

$$I_{Drms} \geq \frac{1.2 \cdot P_{out}}{\eta V_{inmin} \cdot \sqrt{\delta_{max}}}$$

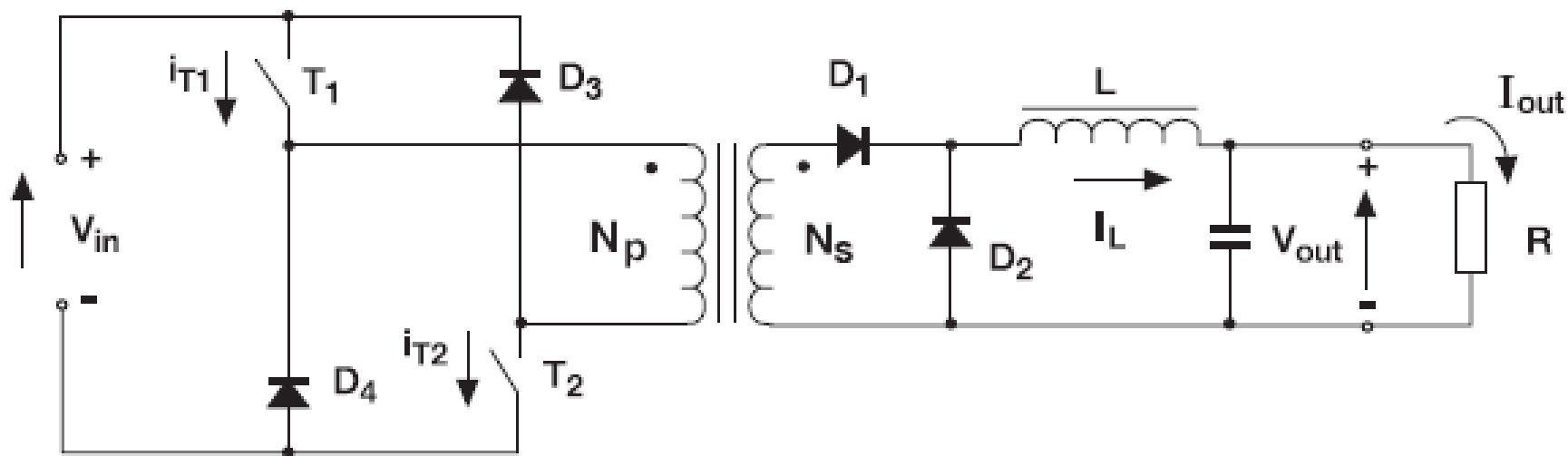
## DIMENZIONISANJE DIODA

$$D1: \left[ \begin{array}{l} V_{RRM} \geq V_{inmax} \cdot \frac{N_s}{N_d} + \text{pik napona} \\ \text{usled rasipnih ind.} \\ I_{F(av)} \geq I_{out} \cdot \delta_{max} \end{array} \right.$$

$$D2: \left[ \begin{array}{l} V_{RRM} \geq \frac{V_{inmax} \cdot (V_{out} + V_F)}{V_{inmin} \cdot \delta_{max}} \\ I_{F(av)} \geq I_{out} \end{array} \right.$$

$$D3: \left[ \begin{array}{l} V_{RRM} \geq \left[ 1 + \frac{N_d}{N_p} \right] V_{inmax} \\ I_{F(av)} \geq \frac{I_{magnpeak}}{2} \cdot \delta_{max} \end{array} \right.$$

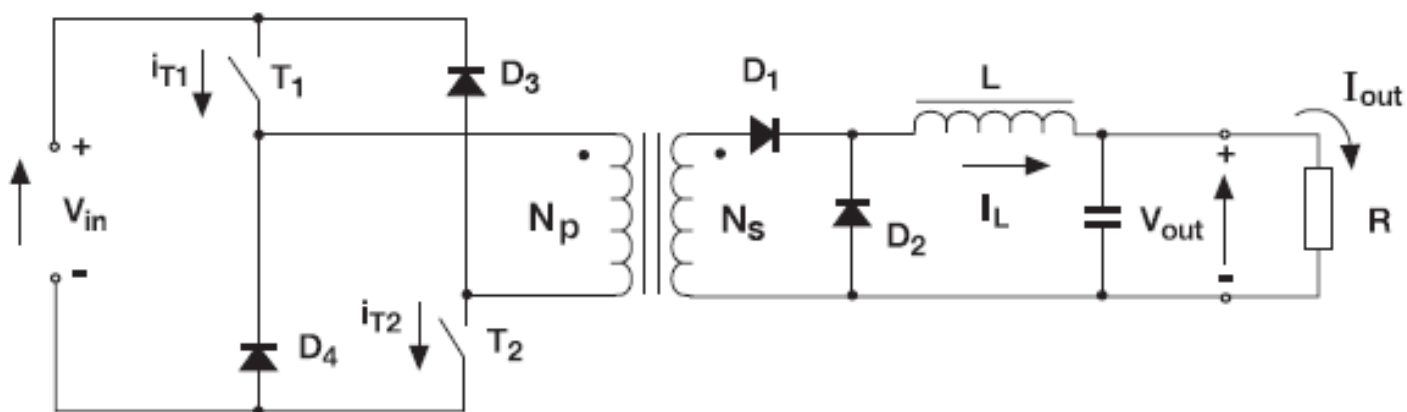
## IZOLOVANI OFF-line FORWARD SA DVA PREKIDAČA



U ovom slučaju nema potrebe za demagnetizacionim namotajem, ali moraju se dodati dve povratne diode  $D_3$  i  $D_4$

Mana: zahtevno drajversko kolo “gornjeg” prekidača  $T_1$

# IZOLOVANI OFF-line FORWARD SA DVA PREKIDAČA (topologija i talasni oblici)

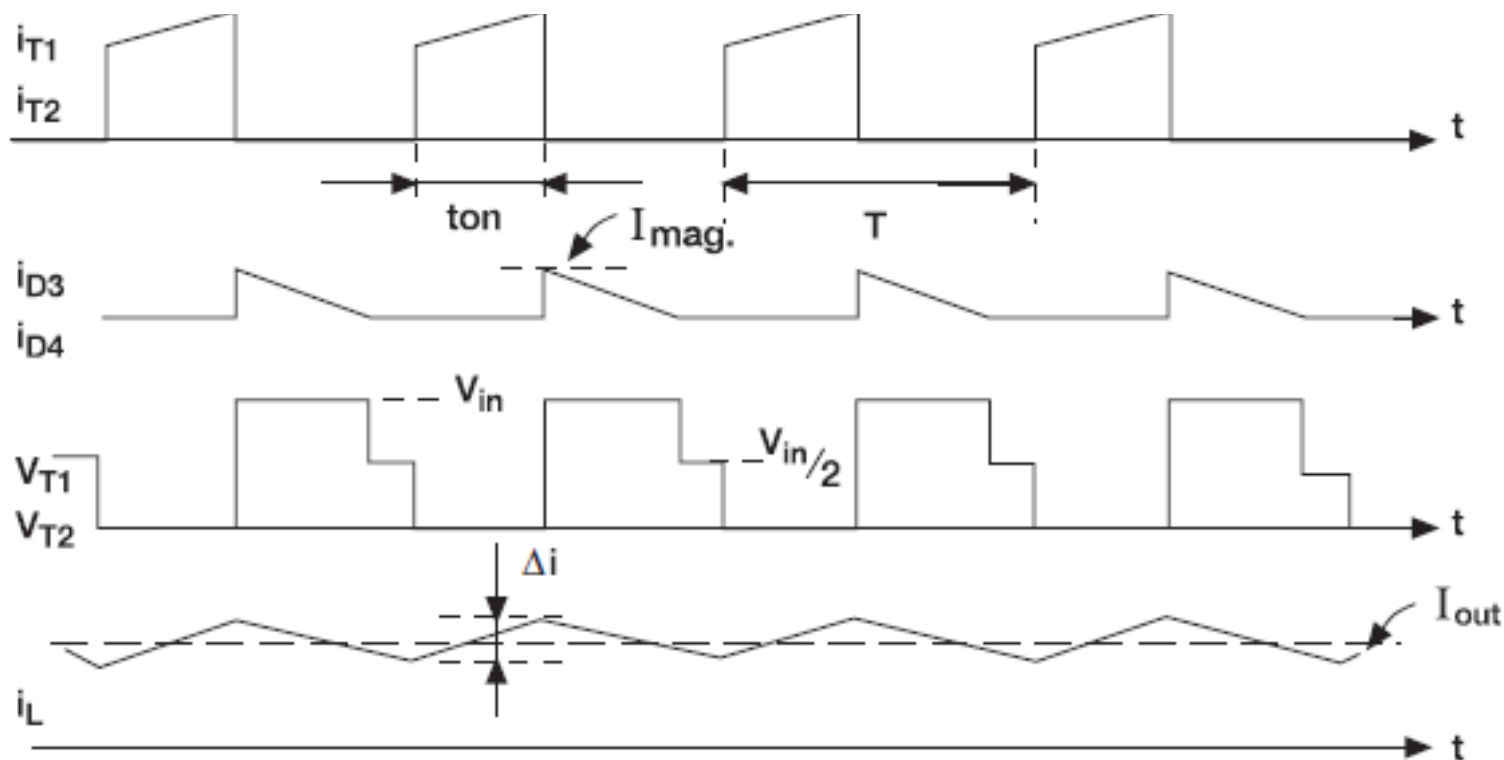


$$\delta = \frac{t_{on}}{T}$$

$\eta$  = efikasnost

$$f = \frac{1}{T}$$

$L_p$  = induktivnost primara



# DIMENZIONISANJE PREKIDAČA I DIODA

## prekidač

$$V_{CEV} \text{ ili } V_{DSS} \geq V_{inmax}$$

$$I_{Drms} \geq \frac{1.2 \cdot P_{out}}{\eta V_{inmin} \cdot \sqrt{\delta_{max}}}$$

## diode

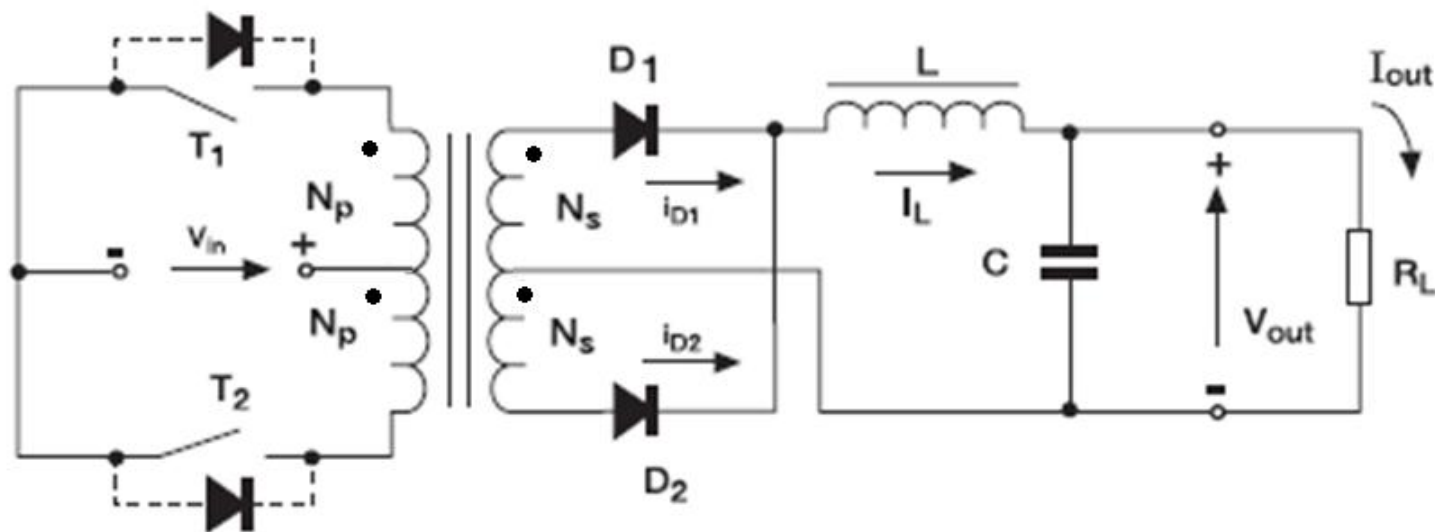
$$\text{FORWARD D1:} \left[ \begin{array}{l} V_{RRM} \geq \frac{V_{inmax} (V_{out} + V_F)}{V_{inmin} \cdot \delta_{max}} \\ I_{F(av)} \geq I_{out} \cdot \delta_{max} \end{array} \right.$$

$$\text{FREEWHEELING D2:} \left[ \begin{array}{l} V_{RRM} \geq V_{inmax} (V_{out} + V_F) \\ I_{F(av)} \geq I_{out} \end{array} \right.$$

# **SIMETRIČNI DC-DC pretvarači sa galvanskom izolacijom**

- U topologijama se koristi više prekidačkih elemenata
- Bolje je iskorišćeno magnetno kolo u odnosu na asimetrične pretvarače
- Malih su dimenzija i shodno tome i male težine
- Najčešće korišćene strukture su:
  - PUSH/PULL
  - HALF BRIDGE (polumost sa kondenzatorima)
  - FULL BRIDGE (puni most)

# PUSH-PULL pretvarač



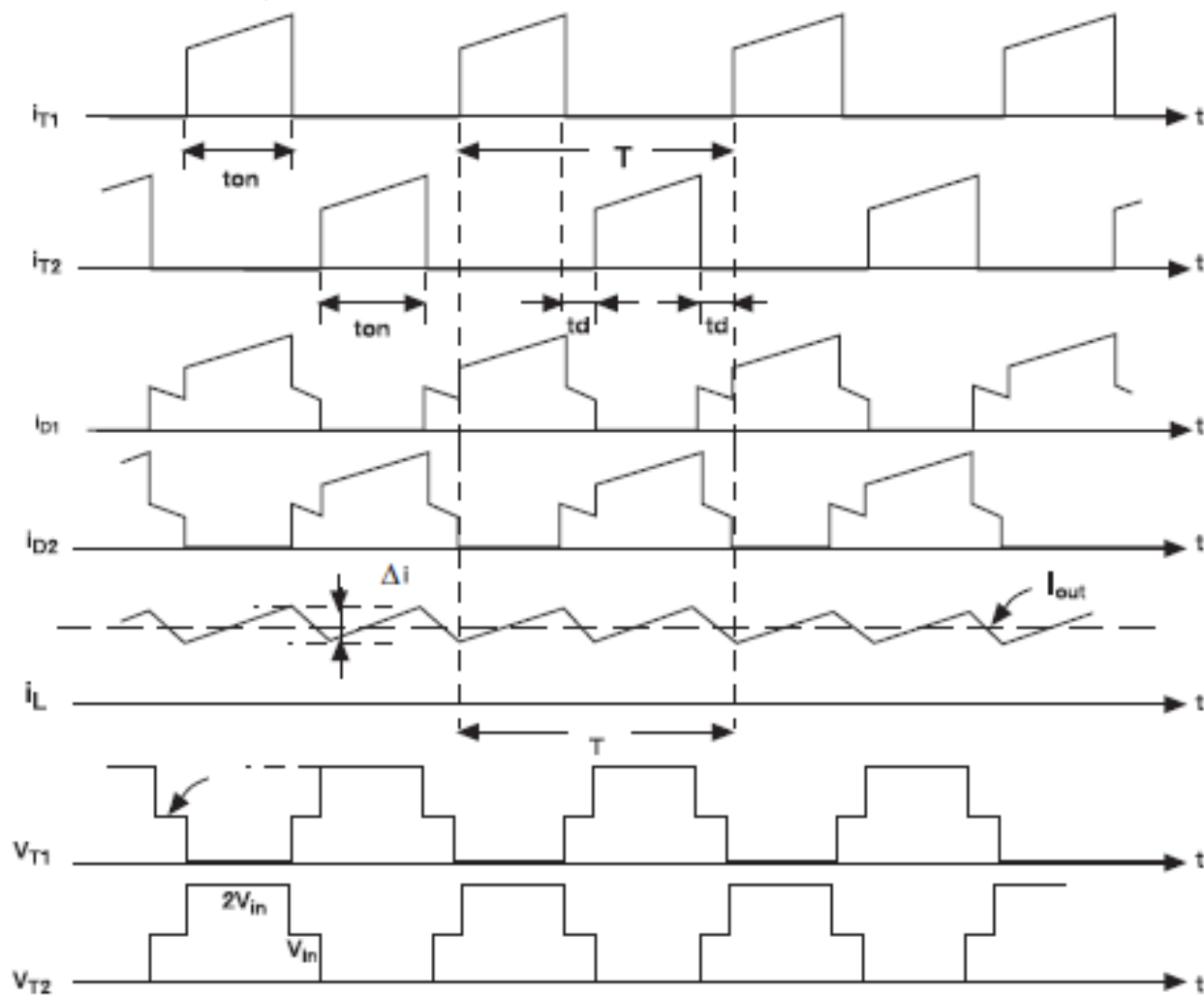
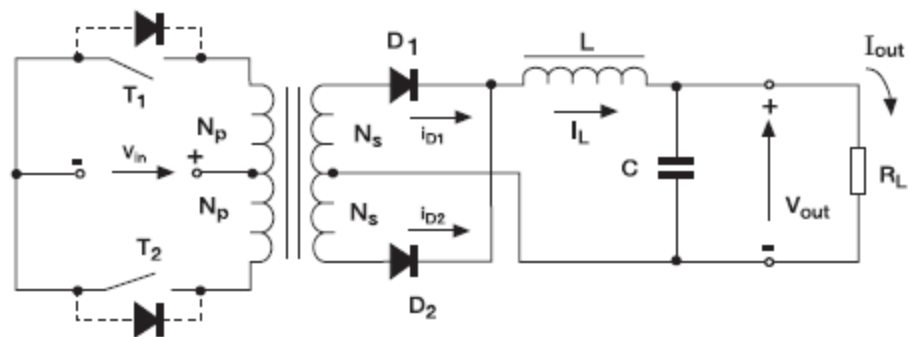
- Prekidači T1 i T2 se naizmenično uključuju sa prekidačkom učestanošću  $f$ .
- Sekundarno kolo radi sa dvostrukom prekidačkom učestanošću.
- Obavezno je u pobudno kolo prekidača implementirati tzv. *mrtvo vreme* (deadtime)  $t_d$
- jednostavno pobudno koloprekidača (referisani su prema masi)

**IZLAZNI NAPON:**  $V_{out} = 2 \frac{\delta V_{in}}{n}$

$$\delta = \frac{t_{on}}{T}$$

## PUSH-PULL pretvarač

Topologija i  
karakteristični talasni  
oblici



# DIMENZIONISANJE PREKIDAČA I DIODA

## prekidači

$$I_{Cpeak} \geq \frac{P_{out}}{\eta V_{inmin}} \quad V_{CEV} \text{ ili } V_{DSS} \geq 2 V_{inmax} + \text{pik napona usled rasipnih ind.}$$

vršna struja

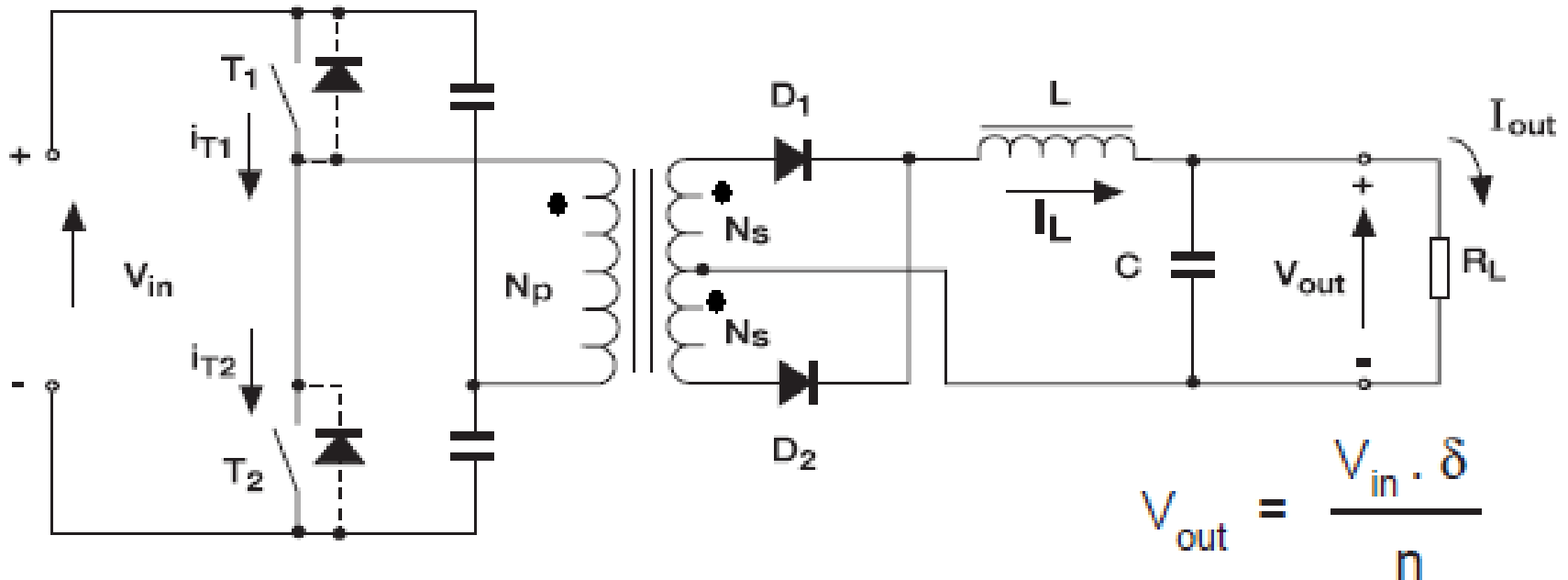
napon

## diode

$$V_{RRM} \geq \frac{(V_{out} + V_F) V_{inmax}}{\delta_{max} \cdot V_{inmin}} + \text{pik napona usled rasipnih ind.}$$

$$I_{F(av)} \geq \frac{I_{outmax}}{2}$$

# HALF BRIDGE (polumosni pretvarač)

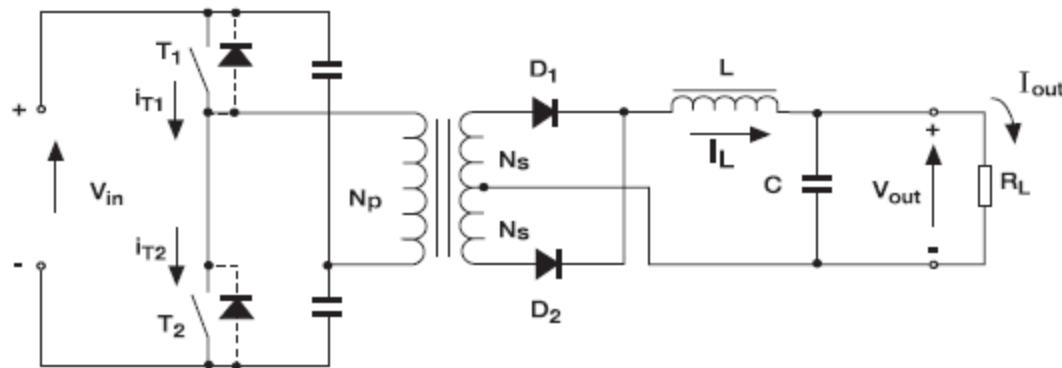


- Ova topologija se koristi za izlazne snage do 500W. Kao i u slučaju *push-pull* pretvarača, prekidači  $T_1$  i  $T_2$  se naizmenično uključuju tokom  $t_{on}$ .
- Kondenzatori vezani na red a onda u paraleli sa ulaznim izvorom obezbeđuju da svaki od prekidača “trpi” napon  $V_{in}$ .
- Pobuda “gornjeg” prekidača je zahtevna (mana)

# HALF BRIDGE

(polumosni  
pretvarač)

TOPOLOGIJA I  
KARAKTERISTIČNI  
TALASNI OBLICI



IZLAZNI NAPON

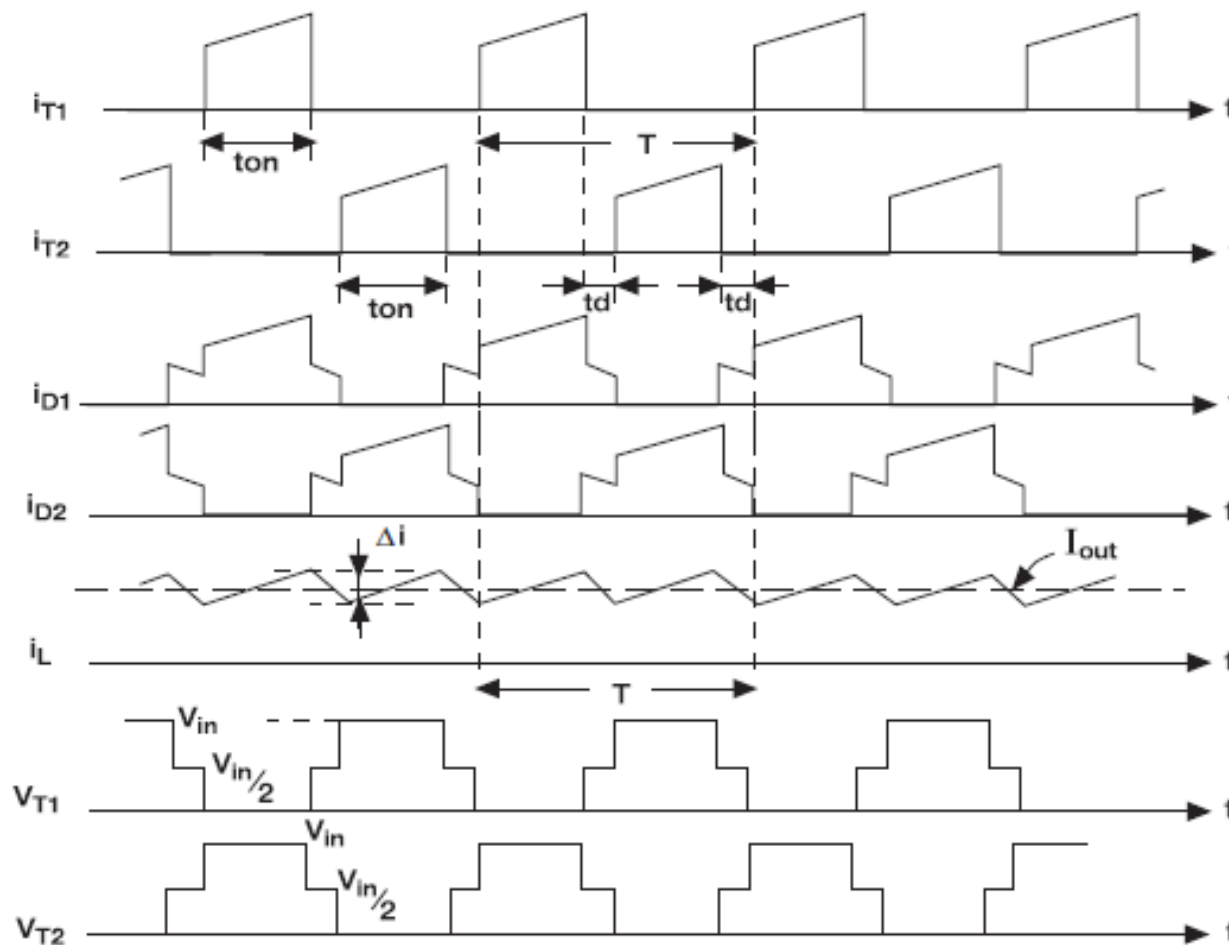
$$V_{out} = \frac{V_{in} \cdot \delta}{n}$$

DUTY CYCLE

$$\delta = \frac{t_{on}}{T}$$

Efikasnost (%)

$$\eta$$



## DIMENZIONISANJE PREKIDAČA I DIODA

### prekidači

$$I_{Cpeak} \text{ ili } I_{Dpeak} \geq \frac{2P_{out}}{\eta V_{inmin}}$$

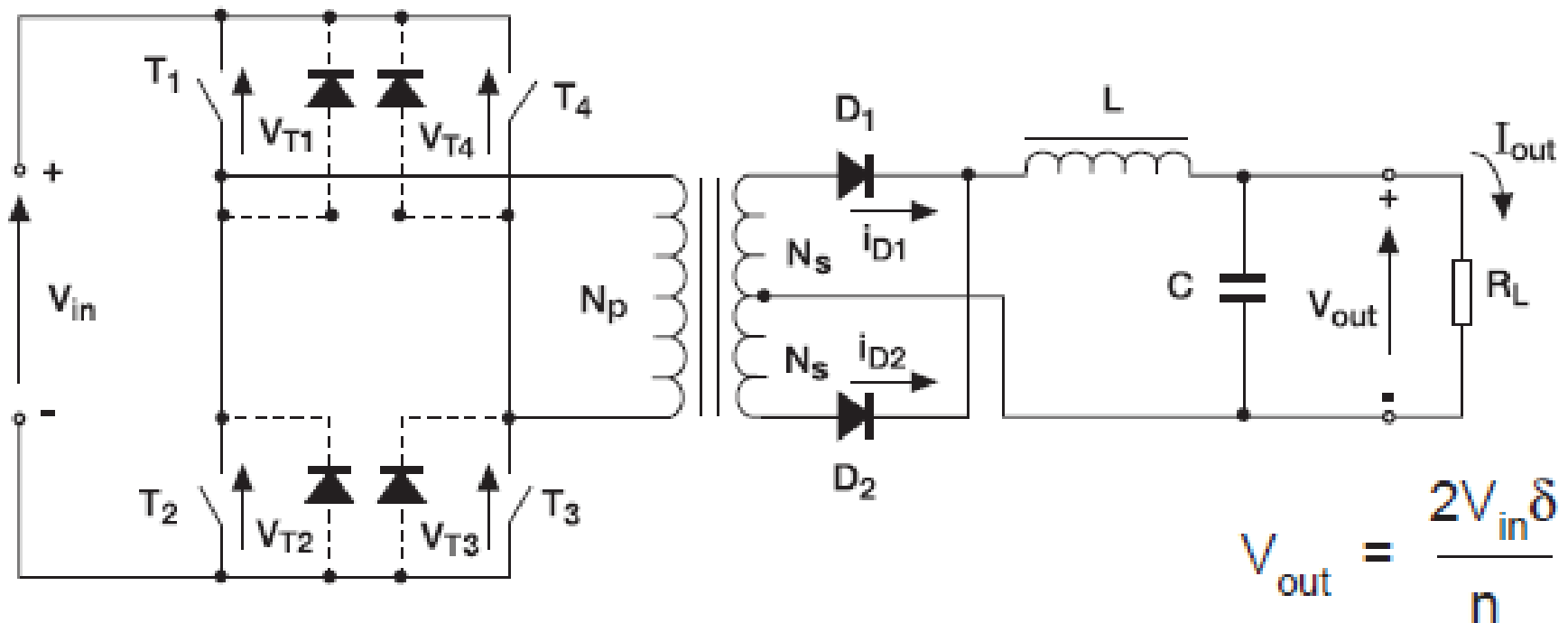
$$V_{CEV} \text{ ili } V_{DSS} \geq V_{inmax}$$

### diode

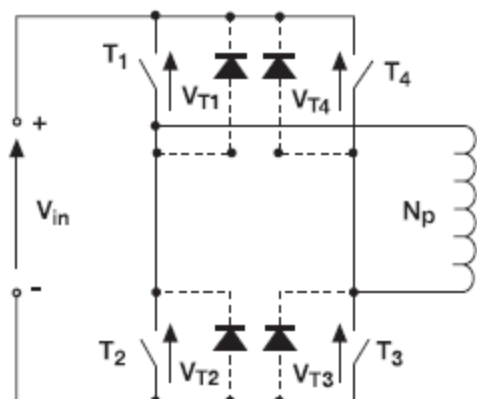
$$V_{RRM} \geq \frac{(V_{out} + V_F) \cdot V_{inmax}}{\delta_{max} \cdot V_{inmin}} + \text{pik usled rasip.ind.}$$

$$I_{F(av)} \geq \frac{I_{outmax}}{2}$$

# FULL BRIDGE (puni most)

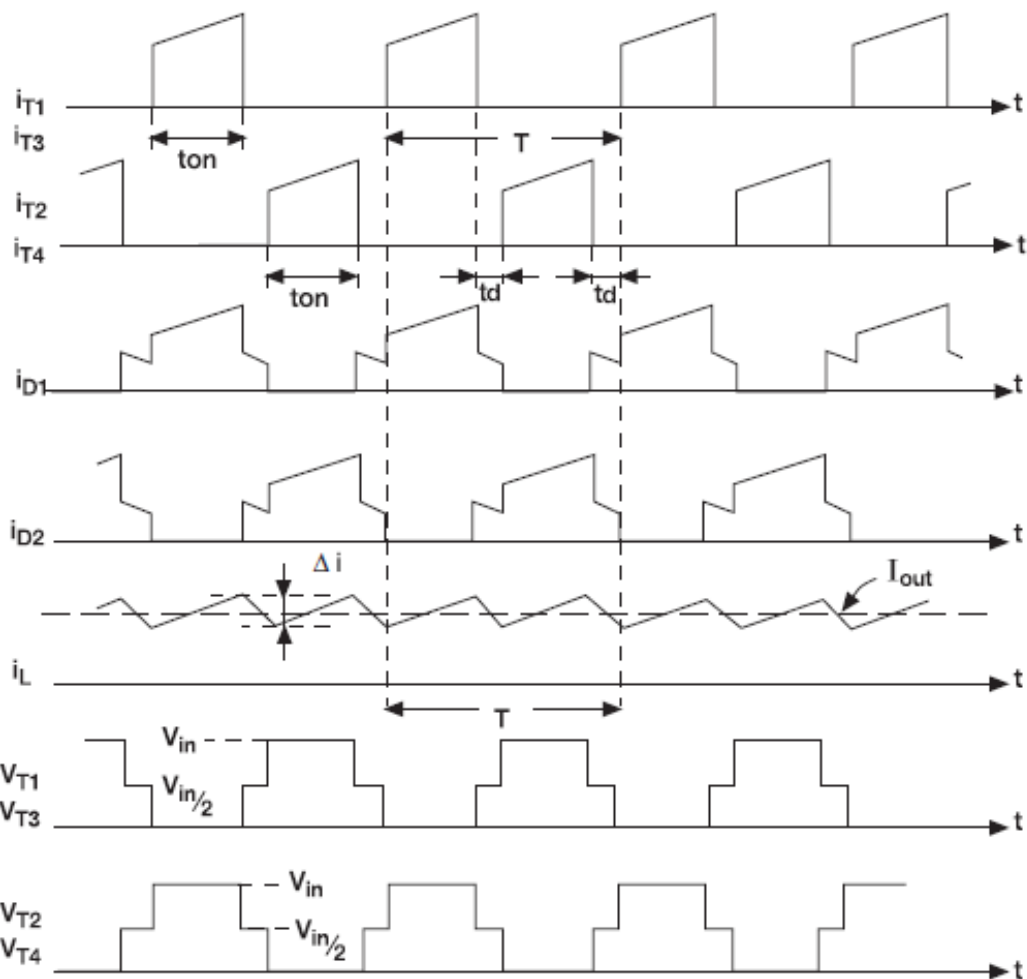
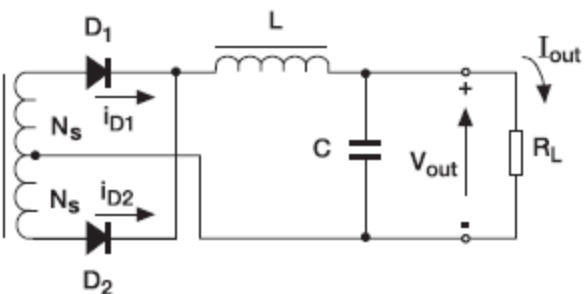


- Ova topologija se koristi za snage od 500W do 2kW
- Nekada se vrši paralelovanje transformatora kako bi se povećala izlazna snaga
- $T_1, T_3$  i  $T_2, T_4$  se naizmenično uključuju sa prekidačkom učestanošću  $f$
- **Dobijena izlazna snaga je dvostruko veća u odnosu na HALF-BRIDGE**
- MANE:** zahtevaju se 4 prekidača i 4 diode; pobuda  $T_1$  i  $T_4$ !!!



# FULL BRIDGE (puni most)

topologija  
i talasni oblici



## DIMENZIONISANJE PREKIDAČA I DIODA

### prekidači

$$I_{Cpeak} \text{ ili } I_{Dpeak} \geq \frac{2P_{out}}{\eta V_{inmin}}$$

$$V_{CEV} \text{ ili } V_{DSS} \geq V_{inmax}$$

### diode

$$V_{RRM} \geq \frac{(V_{out} + V_F) \cdot V_{inmax}}{\delta_{max} \cdot V_{inmin}} + \text{pik usled rasip.ind.}$$

$$I_{F(av)} \geq \frac{I_{outmax}}{2}$$

# HVALA NA PAŽNJI!!

## PITANJA??



JANUAR 2018

