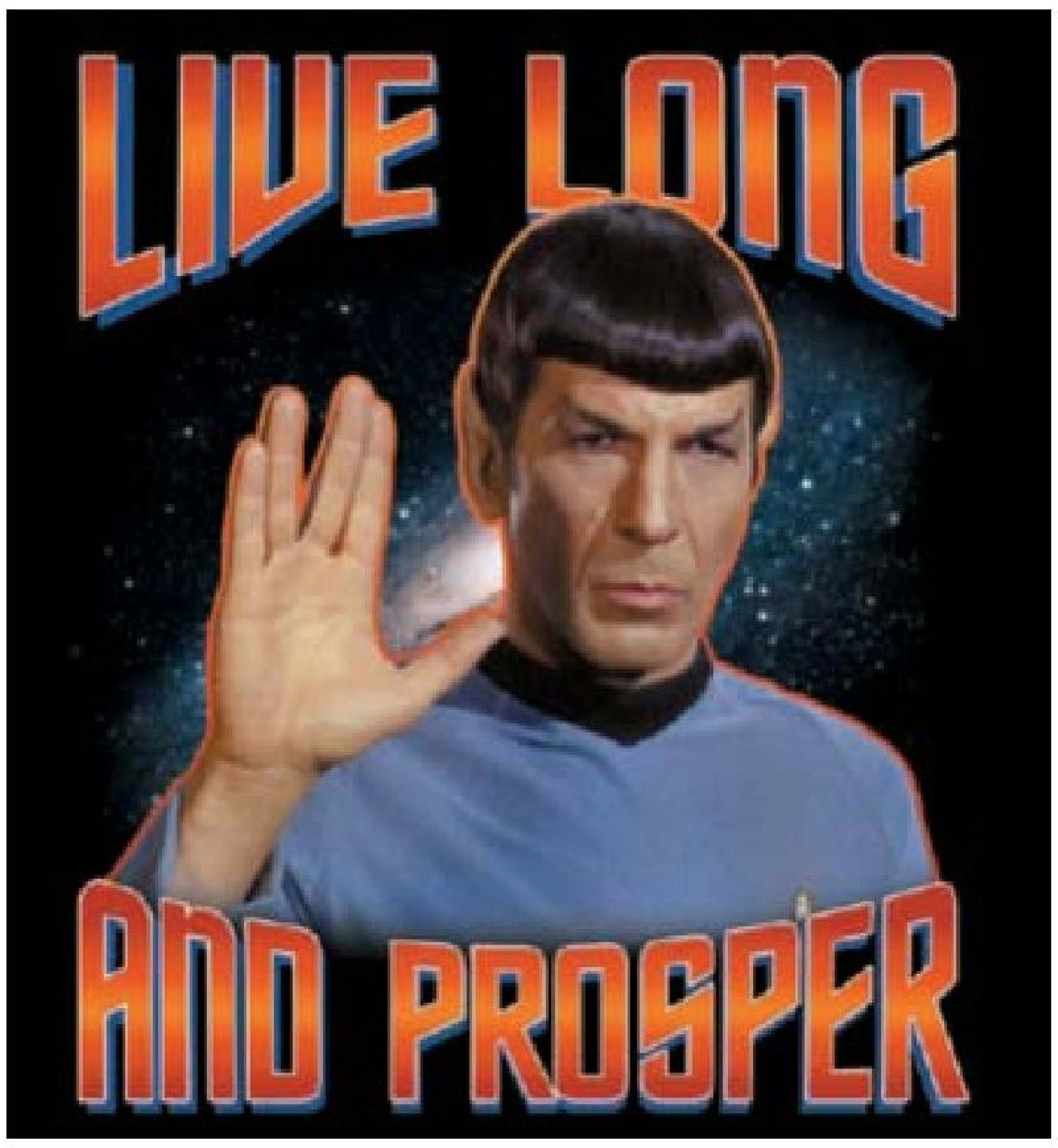
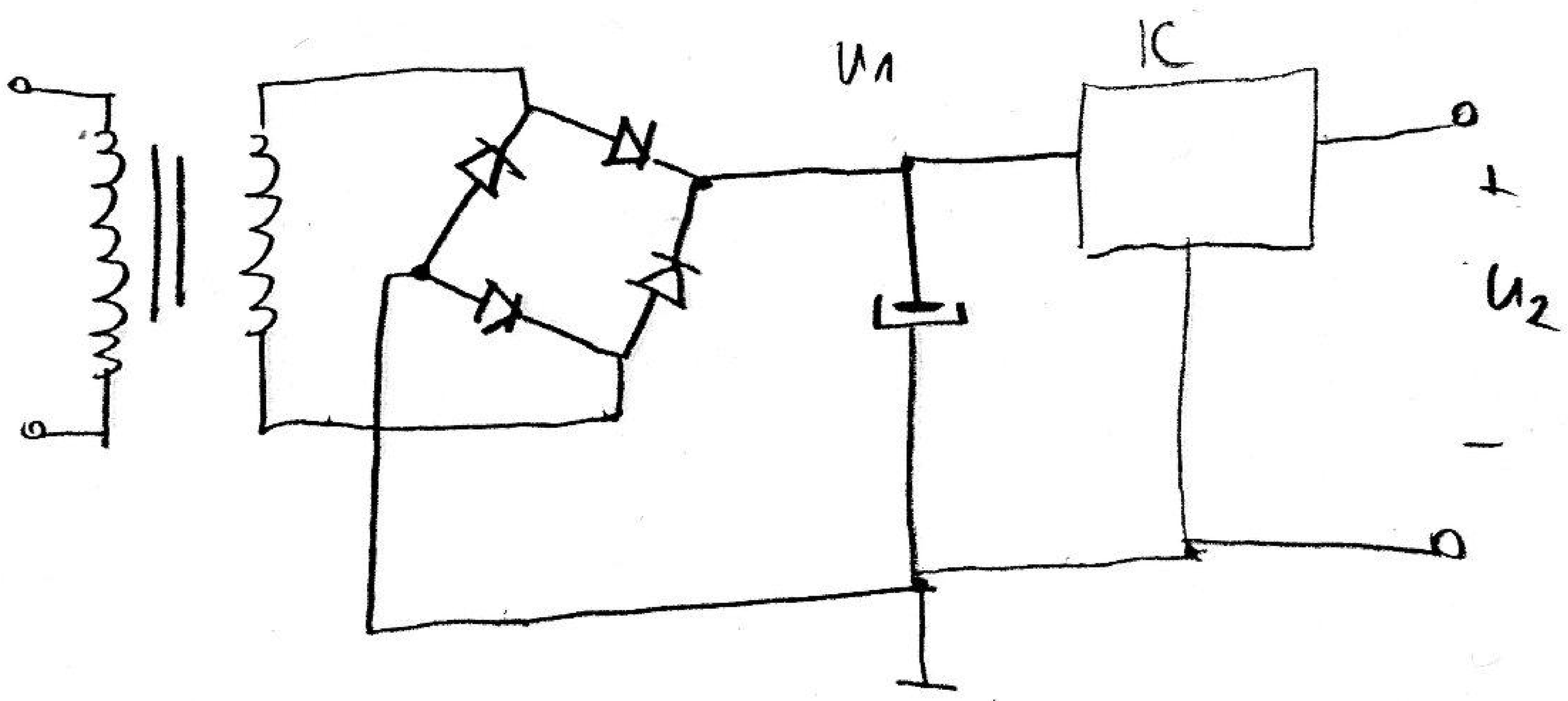


IZVORI NAPAJANJA

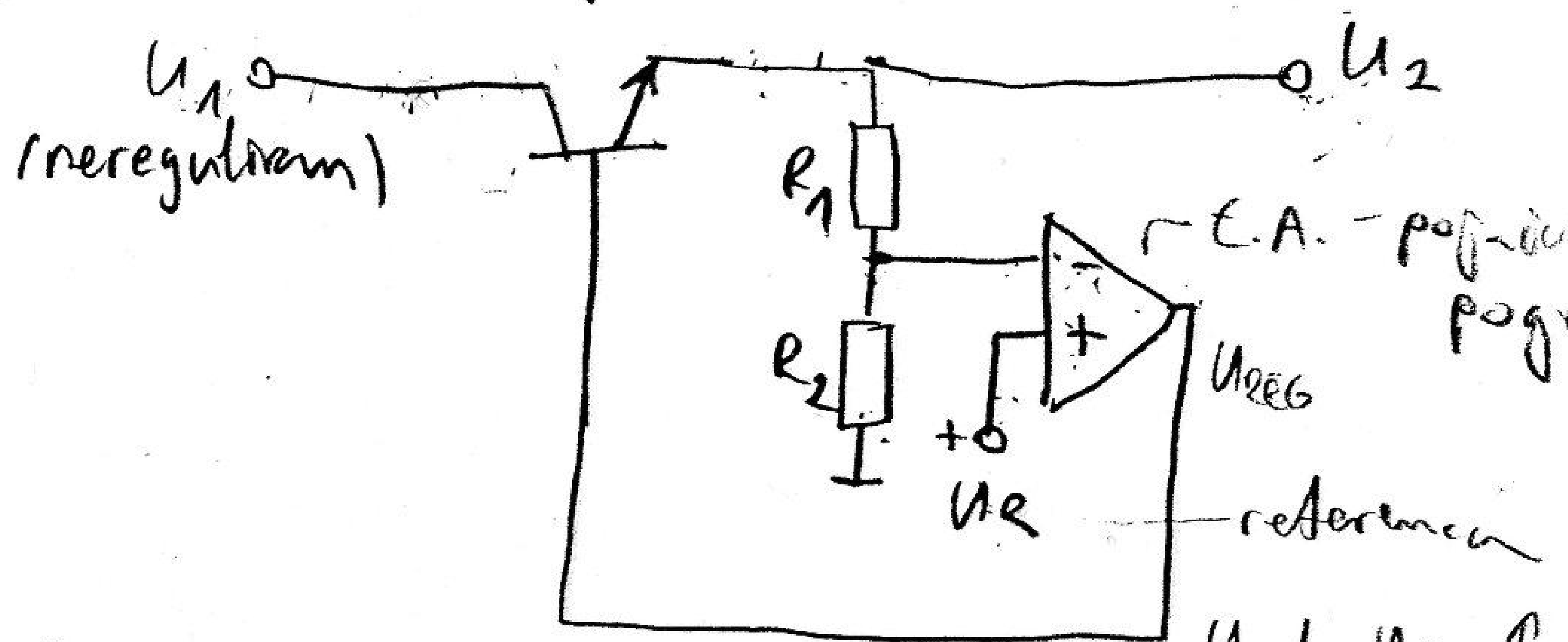
RJEŠENJA ZADATAKA

KEU

- KLASIČNI (LINEARNI) SERIJSKI ~~R~~ STABILIZATOR (LINEAR REGULATOR)

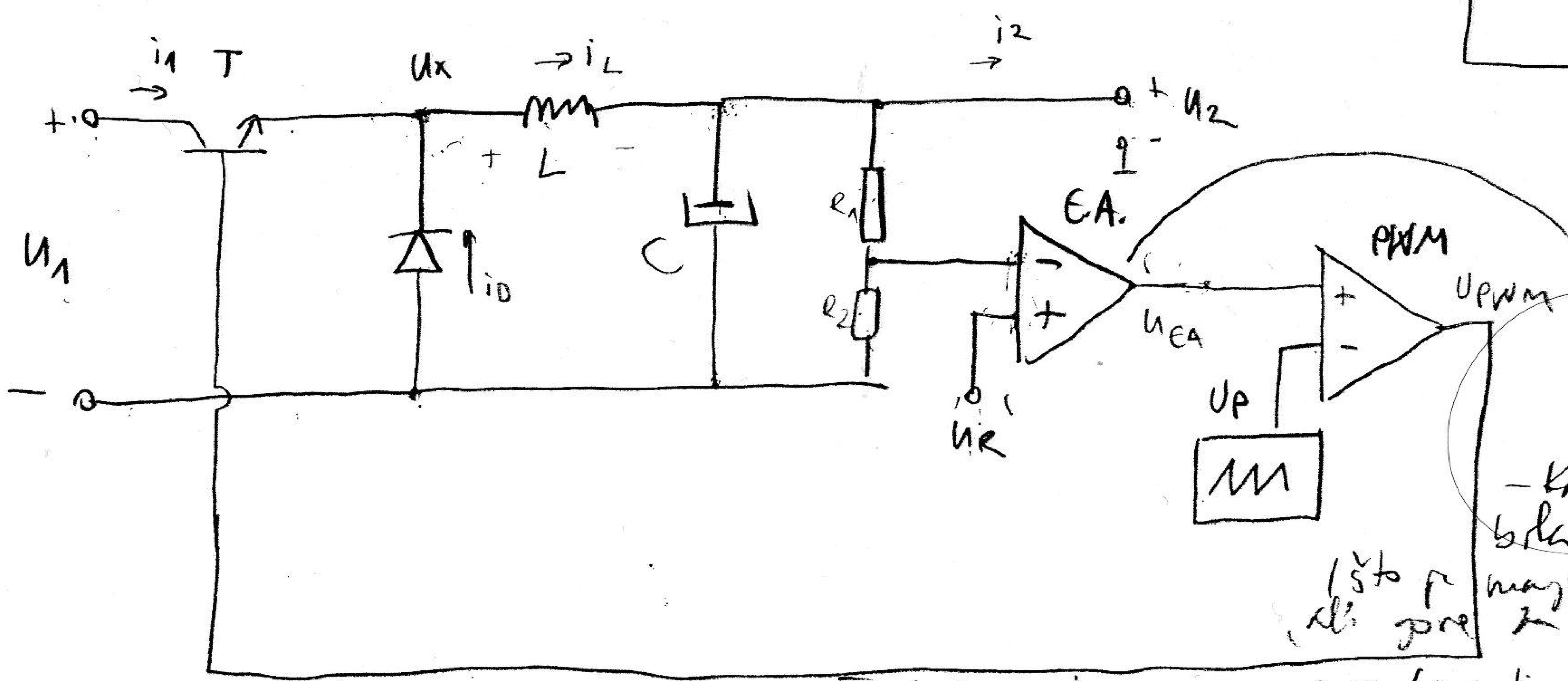


IC:



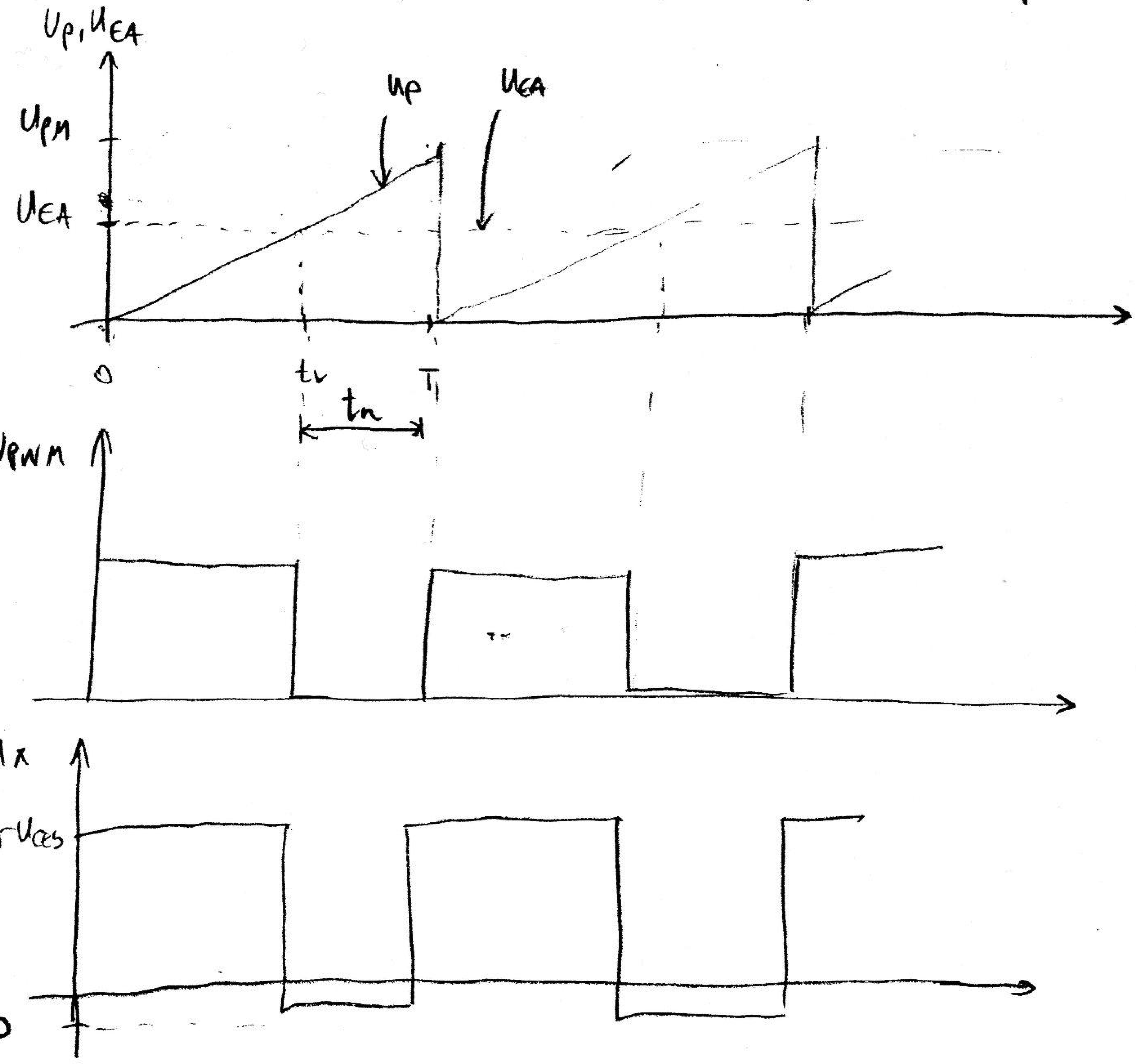
$U_2 \downarrow$, $U_{REG} \uparrow$, $\varphi_B \uparrow$, $U_{CE} \downarrow$, $U_2 \uparrow$

- STABILIZATOR S PREKIDANJEM STRUJE U PROP. SPOJU



VRLO VAŽNO:
- KADA BI VALOVITOST ΔU_C bila $= \emptyset$, ovo ne bi radilo (što je manja val. to bolje za trošilo, ali gore za PWM regulator → veći zahtjevi)

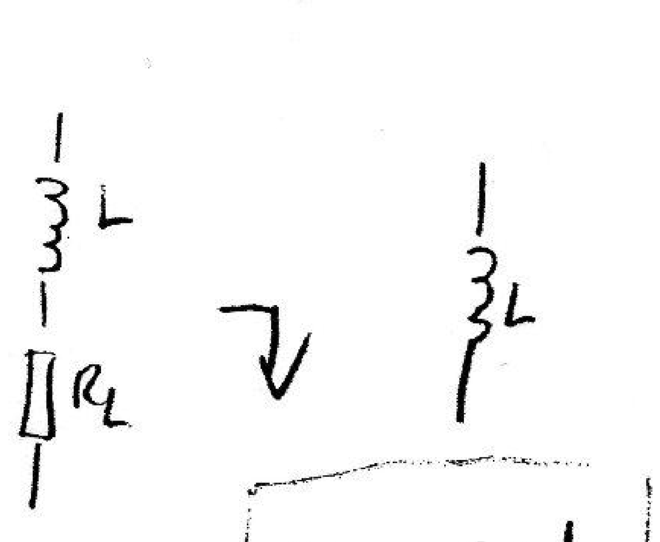
- ovo je edukacijska shema, jer bi T trebao biti zapravo PNP (jer bi φ_B trebao biti $> U_1$ da bi T išao u zasić. U_1 je najviši napon u sklopu)



$U_{EA} = A \cdot (U_R - U_2)$

(A) $\uparrow$ valovitost se gleda V_{PP} zbog lakoće mat. nandže

(B)

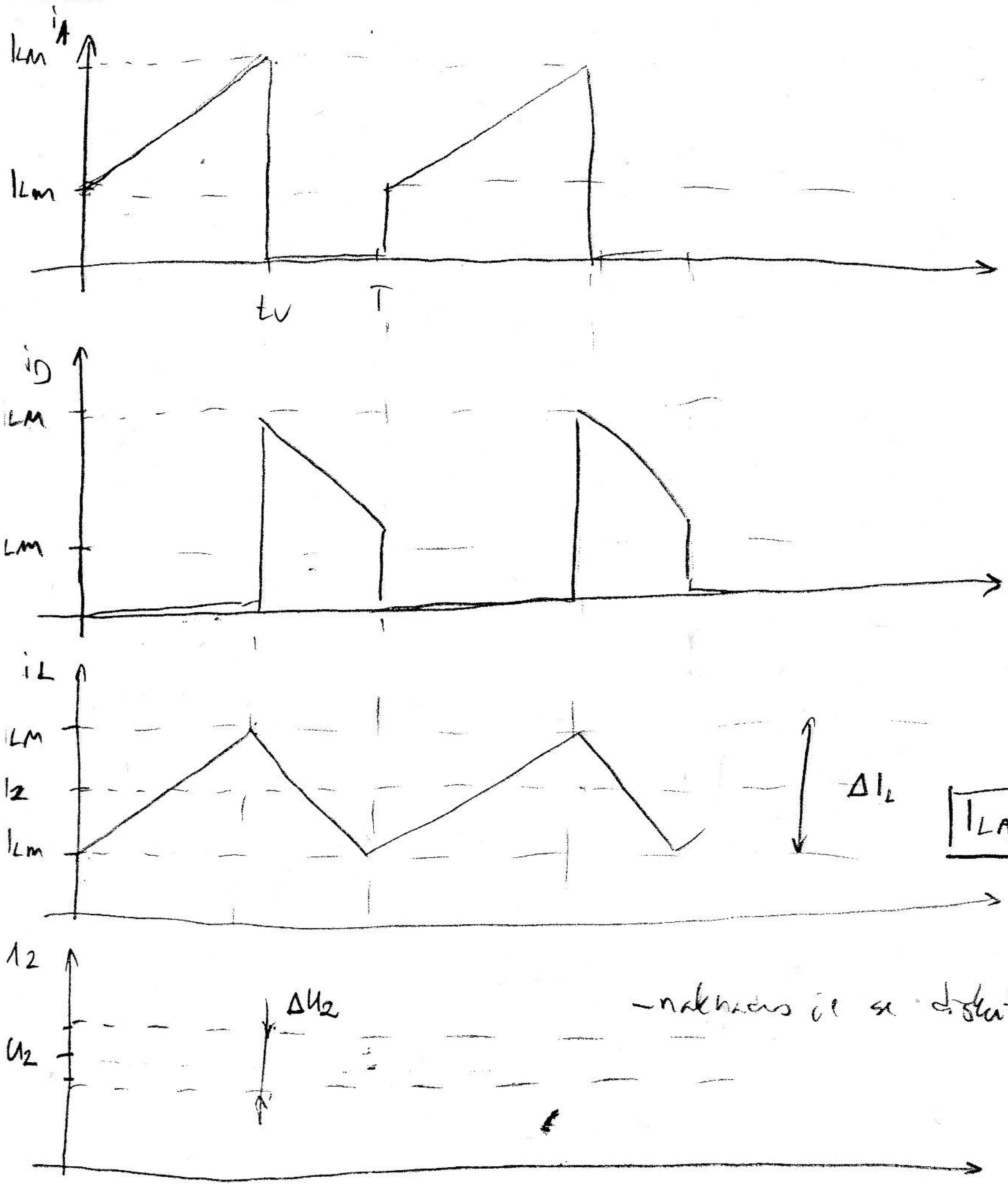


- zbog jednostavnosti

$$\boxed{\begin{aligned} R_L &< \omega L \\ R_L &\ll \frac{U_2}{I_2} \end{aligned}}$$

- ne mij. na izl. otpor stab.

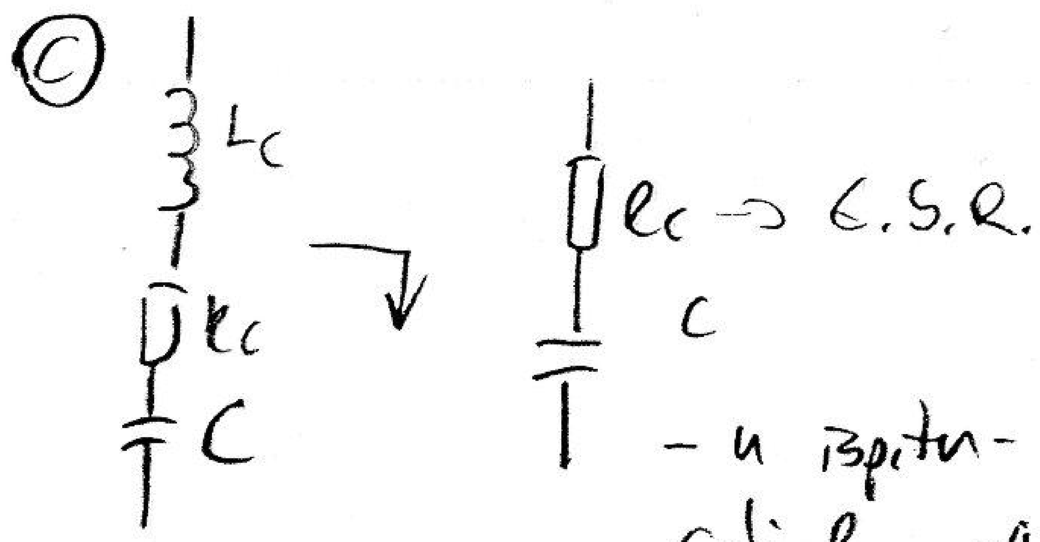
098 353 051



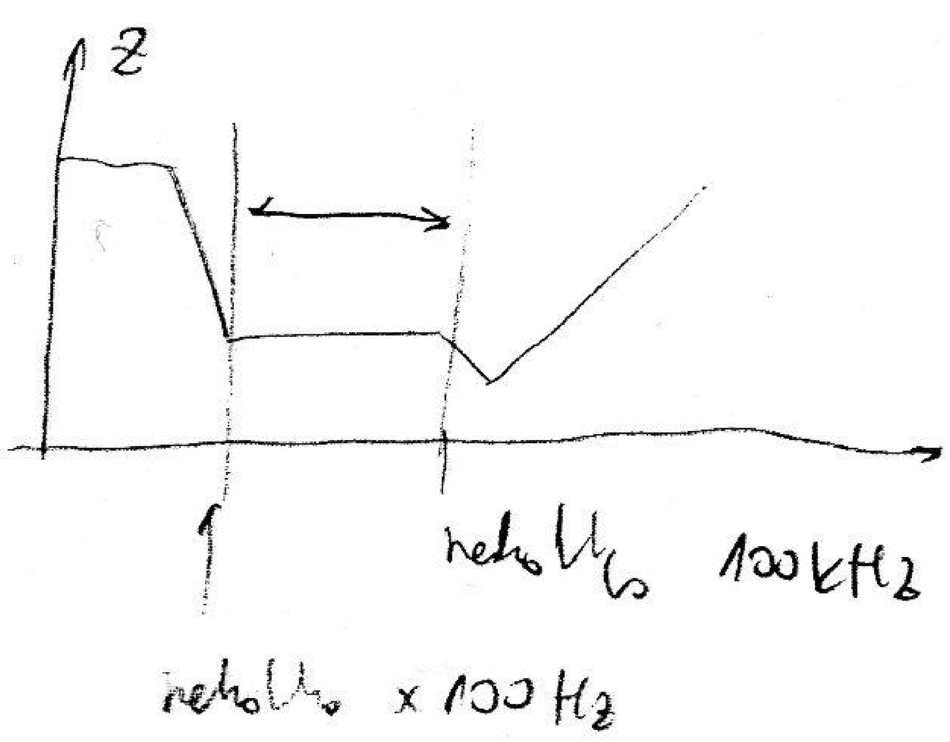
$$\boxed{I_{LAV} = I_{2AV} = I_2}$$ - vrijedi samo za prop. spoj!

- naknadno će se diskutirati

ⓒ



- u ispitu zanemariti R_C osim ako se drugačije ne kaže!



- parametri: $U_1 = 20V +10\%/-15\%$ - nestab. ulaz (tol. se ne odnosi na valn. nego na mogućnost srednje vrijednosti U_1)

$U_2 = 12V$ - toliko se želi dobiti

$f = 20kHz \Rightarrow T = 50\mu s$ → na toj se frekv. radi (PWM, ne FM!)

$I_2 = 100mA +10\%/-90\%$ → definira kojim se otporom smije opteretiti 12V-ni izlaz!

$$\frac{\Delta U_2}{U_2} = 0{,}005 \quad (\underset{\Delta U_2}{\underset{\downarrow}{Vpp!}}) \Rightarrow \Delta U_2 = 60mV$$

$R_C \cdot C = 100\mu s$; $20\mu F \le C \le 1000\mu F$

$$R_C = \begin{cases} 5\Omega & C \le 20\mu F \\ \frac{100 \cdot 10^{-6}}{C} & 20\mu F \le C \le 1000\mu F \\ 0{,}1\Omega & C \ge 1000\mu F \end{cases} \rightarrow$$

SW-1a SW3 **ODREĐIVANJE t_v, t_n, δ**

(A) T vodi, D ne vodi (otvoren U_{PWM})

$$\boxed{U_1 - U_{CES} - U_2 = L\frac{\Delta I_L}{t_v}} \quad (1)$$

↳ vrijedi za $0 \le t \le t_v$

(B) T ne vodi, D vodi

$$-U_D - U_2 = L\frac{-\Delta I_L}{t_n}$$

$$\boxed{U_D + U_2 = L\frac{\Delta I_L}{t_n}} \quad (2)$$

↳ $t_v \le t \le T$

naponska ravnoteža

$\boxed{t_v + t_n = T}$

↳ pretp. da se radi u KONTINUIRANOM režimu rada bez obzira na varijabilne parametre sustava (U_1, I_2)

$$\Rightarrow t_v, t_n = ? \quad \frac{t_n}{t_v} = \frac{T-t_v}{t_v} = \frac{T}{t_v} - 1 = \frac{U_1 - U_{CES} - U_2}{U_D + U_2} \Rightarrow \boxed{t_v} = \frac{T}{\frac{U_1 - U_{CES} - U_2 + U_2 + U_D}{U_2 + U_D}} = \boxed{T \cdot \frac{U_2 + U_D}{U_1 - U_{CES} + U_D}}$$

– t_v nije fiksan i ovisi o U_1, ~~I_2~~

$U_1\downarrow, t_v\uparrow$; $U_1\uparrow, t_v\downarrow$

$t_{vmax} = t_v(U_{1min}) = 36{,}494\,\mu s$

$t_{vmin} = t_v(U_{1max}) = 28{,}348\,\mu s$

– iz $t_n = T - t_v \Rightarrow$ $t_{nmin} = 13{,}506\,\mu s$

$t_{nmax} = 21{,}652\,\mu s$

– kod PWM-a je najvažniji parametar duty cycle (radni omjer) δ:

$$(3) \quad \boxed{\delta := \frac{t_v}{T}} = \boxed{\frac{U_2 + U_D}{U_1 - U_{CES} + U_D}} \Rightarrow \boxed{\begin{aligned}\delta_{max} &= \delta(U_{1min}) = 0{,}730 \\ \delta_{min} &= \delta(U_{1max}) = 0{,}567\end{aligned}}$$

→ logično objašnjenje: ako je $U_1\downarrow$, to znači da se manje E predaje L-u i C-u što znači i pad napona U_2; povećanjem δ se povećava priliv E u sustav i $U_2\uparrow$

– ovdje ispada da δ ne ovisi o I_2; pretpostavka je da U_{CES} ne ovisi o I_2 (tj. I_E i I_C tranzistora T), a to nije istina jer se napon modulacije U_{CE} ovisno o I_B i I_C koristi kod lin. regulatora; sl. vrijedi i za U_D (ovisnost o I_L); međutim, može se polaziti da taj utjecaj nije značajan

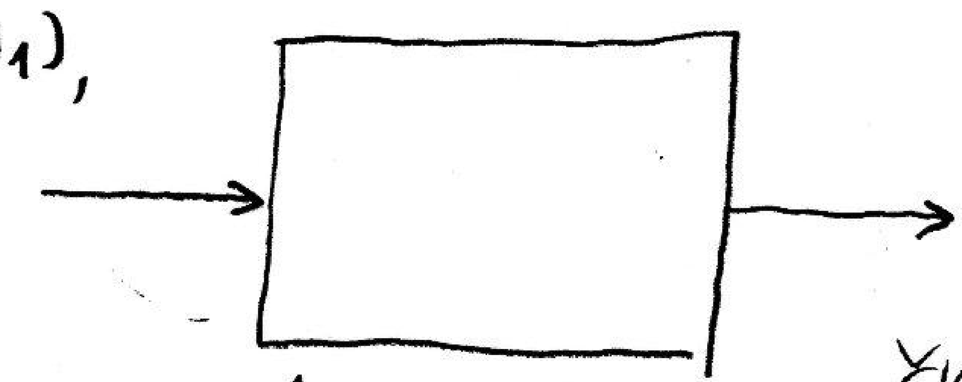
ODREĐIVANJE INDUKTIVITETA ZAVOJNICE

~~-[illegible]~~ -parametri nekog stabilizatora

IZLAZNI PAR.

U_1, tol +/- (U_1), valovitost U_1

ULAZNI PAR.



U_2, max. dozv. valovitost U_2

I_2, tol +/- (I_2) (tj. dozv. raspon opterećenja)

→ na temelju ul., izl. i PAR. STAB. treba projektirati sklop da ∀ moguće vrijednosti ul/izl veličina radi [illegible]

f = konst (zadano)
L = konst
C = konst

čvrsti parametri stabilizatora + dodatni uvjeti (npr. želimo isklj. rad u kont. režimu)

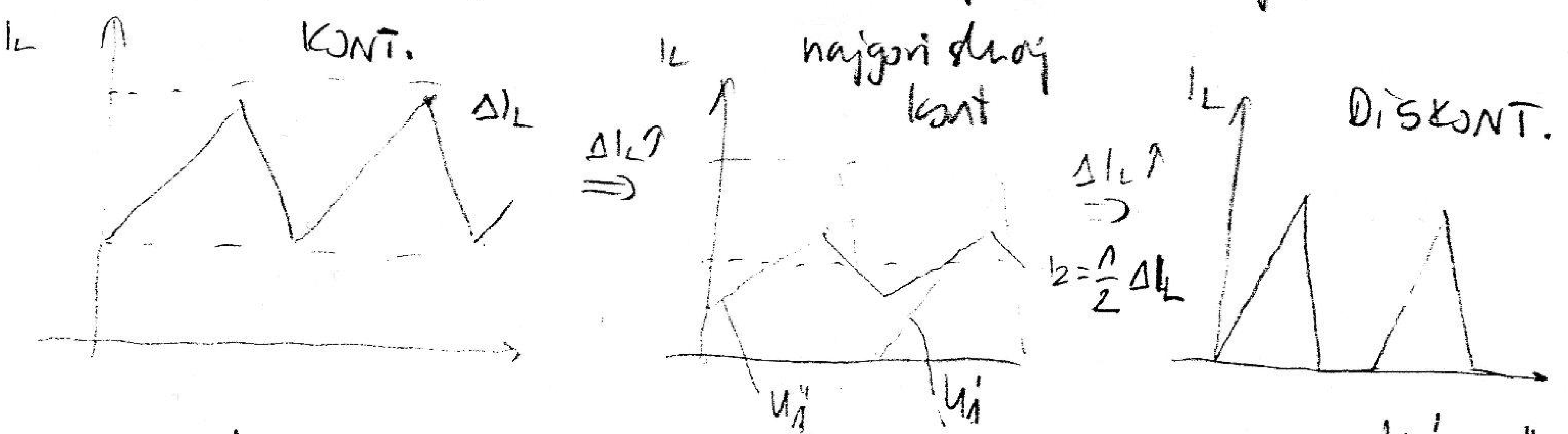
PAR. STAB.

- krenimo od (2): pretp. da je – $U_0, U_2, L = konst$ (inherentno)
  - promj. parametri koje treba regulirati su U_1, I_2
  - promj. parametri sklopa su $\boxed{t_r \text{ i } \Delta I_L}$

(2) $L \Delta I_L = (U_0 + U_2) t_r = (U_0 + U_2)(T - t_v) = T (U_0 + U_2)(1 - \delta)$

$$\Rightarrow \boxed{\Delta I_L = \underbrace{\frac{U_0 + U_2}{fL}}_{\text{konst. član}} \underbrace{(1 - \delta)}_{\text{varijabilni član}}} \quad (4)$$

- cilj je zadržati konst U_2 neovisno o svojstvima U_1, njegovoj val. i opterećenju:
  iz (3) $\Rightarrow U_1 \downarrow \Rightarrow \delta \uparrow \Rightarrow (4) \Rightarrow \Delta I_L \downarrow$
  - kako $\delta \neq f(I_2) \Rightarrow \Delta I_L \neq f(I_2)$
  - ~~drugim riječima, L služi~~
- najnepovoljniji slučaj pri kojem je stabilizator na granici kont. i diskont. načina rada (jer se želi osigurati kont. ∀ uvjete)
  - što je najnepovoljniji slučaj sa stajališta varijabilnih parametara?



ΔI_{Lmax} → a to će biti za δ_{min} → $\boxed{\underline{U_{1max}}}$

$U_1' > U_1''$ uz isti I_2 ↓ nepovoljnije $\Delta I_L' > \Delta I_L''$ ↳ nepovoljnije

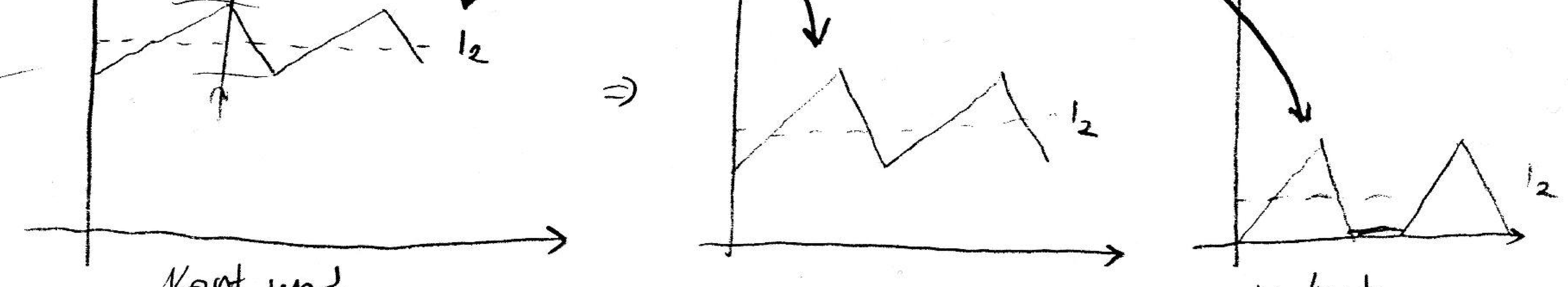
$$\boxed{\Delta I_{LMAX} = \Delta I_L (U_{1max}, L_{min})}$$

- tražimo najmanji dozvoljeni L!

~~[illegible]~~

- koliko je ΔI_{LMAX}?

$t_r \neq f(I_2)$!!! (jer $\delta \neq f(I_2)$ tj. $\Delta I_L \neq f(I_2)$)



Kont mod → jaje veću struju I_2

diskont mod → struja se može jako smanjiti

~~[illegible]~~

mogućnost struje je određena direktno s $\boxed{L \text{ i } t_r}$ (iz (2)) (tj. δ)

- u principu je ista i za I_{2max} i za I_{2min}, a ti moramo pretpostaviti da je I_{2min} da bi ta vrijednost i za uvjete bila zadovoljena!

to je kritično!

$\Delta I_{LMAX} = 2 I_{Lmin} = 2 \cdot 0.1 \cdot I_2 = 20mA$ (ako bi rekli da je ΔI_{LMAX} veća od 20mA, to ne bi bilo zadovoljeno za slučaj malih opterećenja (mali I_2))

- iz (2):

$$L = (U_D + U_2)\frac{t_R}{\Delta I_L} \Rightarrow \boxed{L_{min}} = (U_D + U_2)\frac{t_{R\,max}}{\Delta I_{LMAX}} = \boxed{13{,}75\,mH}$$

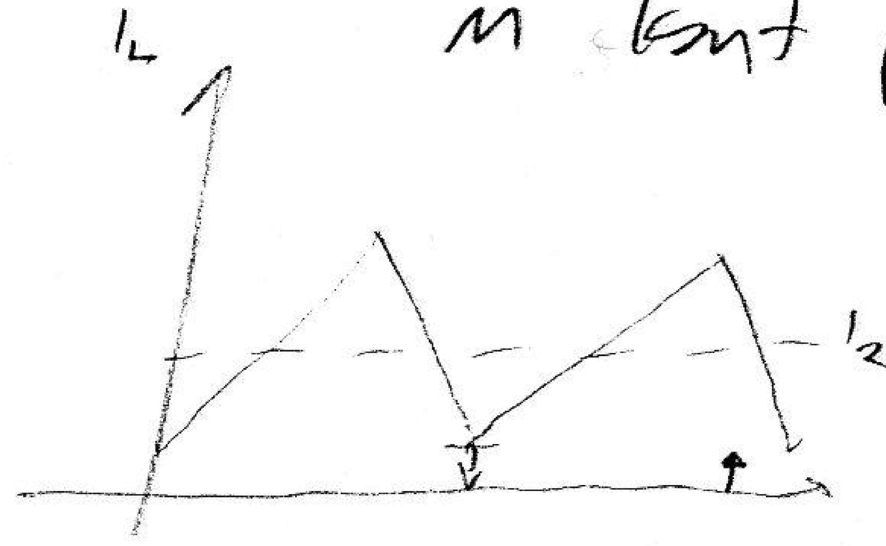
- determiniramo E-3 nizom: 1,0, 2,0, 5,0

$$\Rightarrow \boxed{L_{min} = 20\,mH}$$

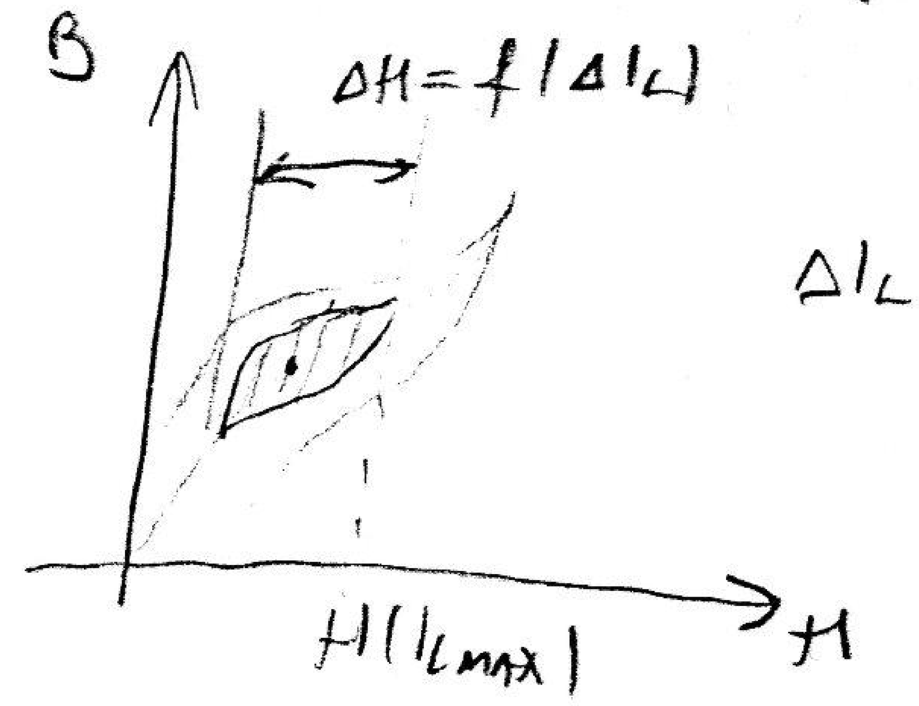
$$\Rightarrow \boxed{\Delta I_{LMAX}} = (U_D + U_2)\frac{t_{R\,max}}{L} = \boxed{13{,}75\,mA}$$

→ pomiče se dalje od granice diskont/kont u kont područje

$$\boxed{I_{LM}} = \underbrace{I_{2M}}_{110\% I_2} + \frac{\Delta I_{LMAX}}{2} = \boxed{116{,}88\,mA}$$



- zanimljivo je uočiti sljedeće:

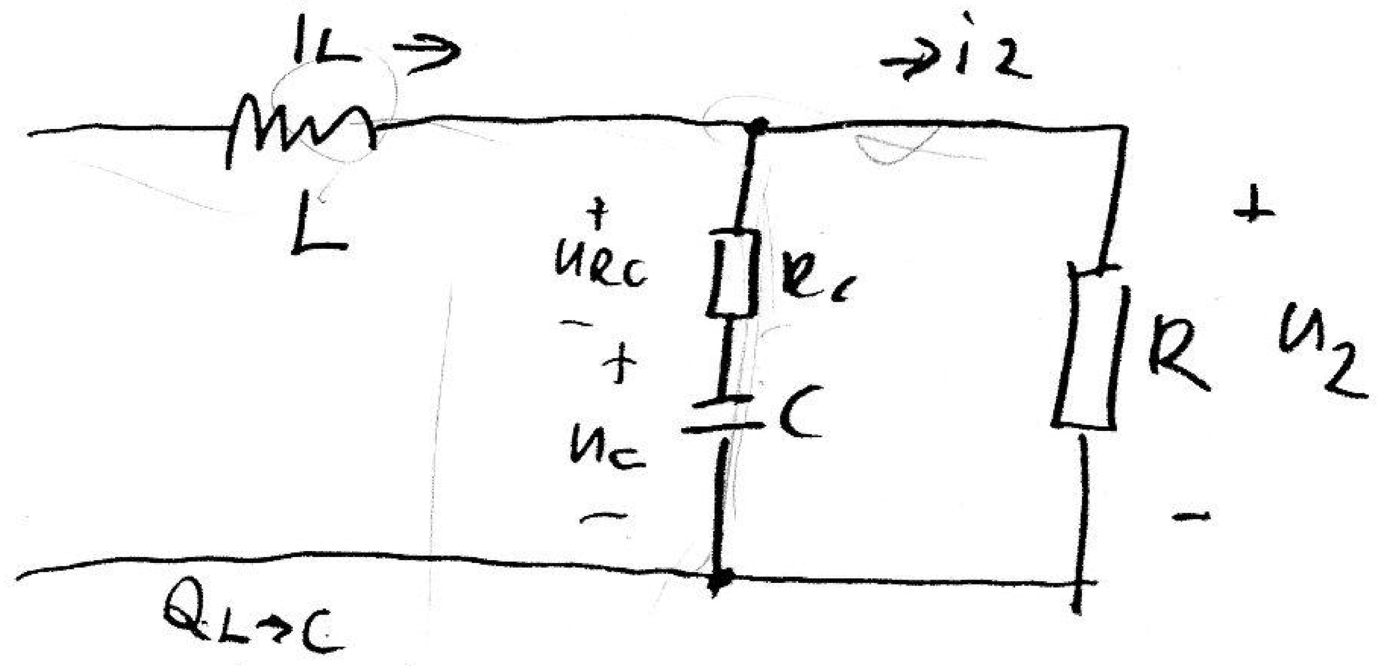


$\Delta I_L \uparrow \to P_{gFe} \uparrow$ → zato je povoljnije raditi s većim L ($\Delta I_L \downarrow$)

↓ gubici → zagrijavanje → ...

$\eta \downarrow$

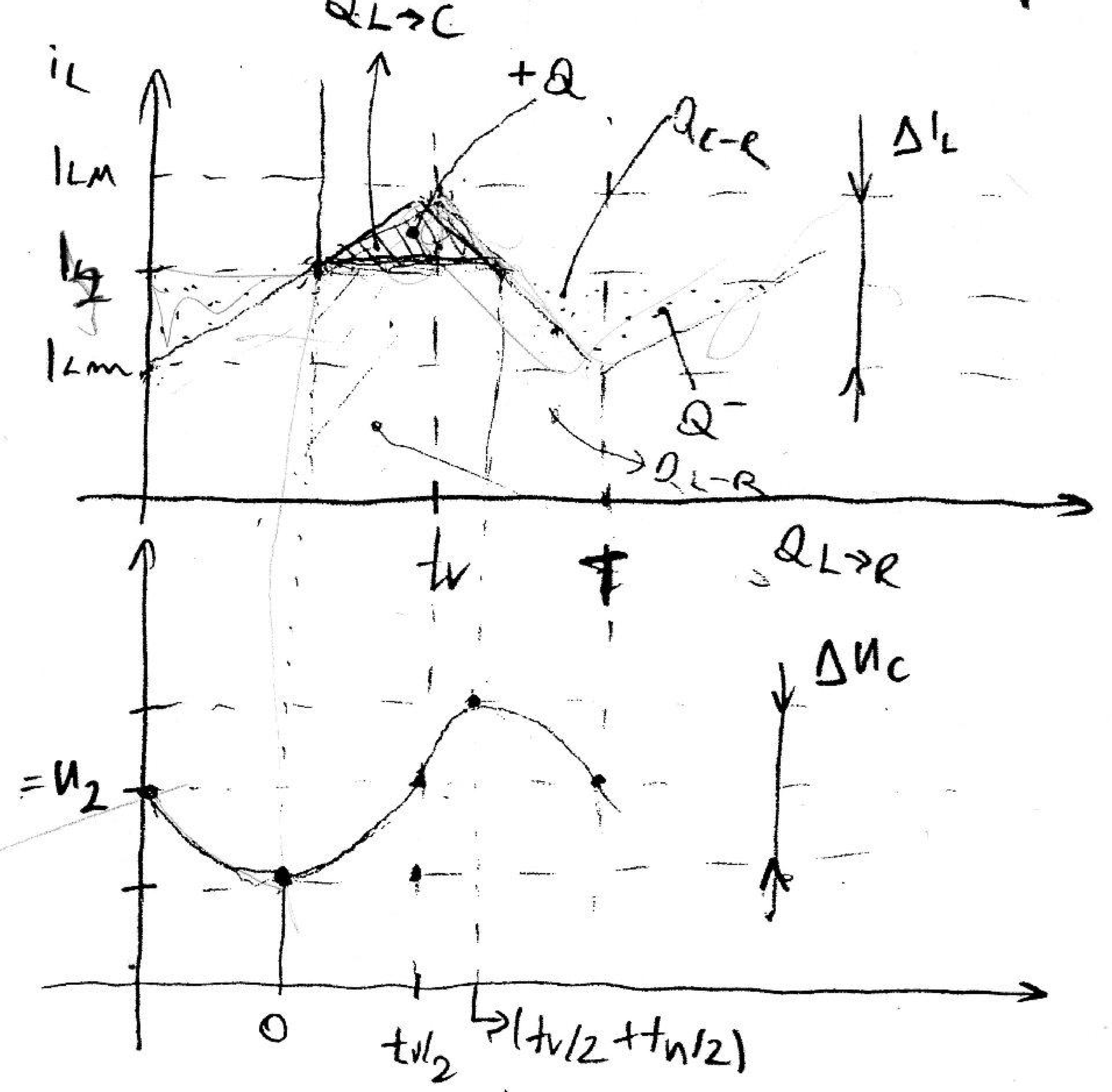
ODREĐIVANJE KAPACITETA KONDENZATORA



- pretpostavka: izmj. komp. struje zavojnice gotovo u potpunosti teče kroz kond. (to je upravo i razlog zašto se radi na visokim frekv.)
- uvjet:

$$\frac{1}{2\pi f C} << \frac{U_2}{I_2} = R$$

$$\left(\frac{1}{2\pi f} < RC = \tau \right)$$



$u_C = \frac{1}{C}\int i_{LAC}\,dt$ - parabole (ne sinus) jer je to integral pravca

- ekstremi napona u točkama gdje struja mijenja predznak

→ NEMA DC pada napona na R_C-u

$$\Delta u_C = \frac{Q}{C} = \frac{Q^+}{C} = \frac{Q^-}{C}$$

površine Δ

$$\boxed{Q^+} = \int_{t_v/2}^{(t_v/2+t_n/2)} i_{LAC}\,dt = \underbrace{\frac{1}{2}\frac{\Delta I_L}{2}\frac{t_v}{2}}_{} + \underbrace{\frac{1}{2}\frac{\Delta I_L}{2}\frac{t_n}{2}}_{} = \frac{1}{8}\Delta I_L (t_v+t_n) = \boxed{\frac{1}{8}\Delta I_L T}$$

i_{LAC} ↓ treba izbaciti DC od I_L jer se sve vrti oko nje

↓ bilo bi 2π za aprox sinusa

$$\Rightarrow \boxed{C = \frac{1}{8}\frac{\Delta I_L T}{\Delta u_C}}$$

→ kad je najgori slučaj za C?

→ C ne utječe na I_L i njene veze za kont/diskont režim rada (sve se to rješava isključivo sa L)

→ C služi da popede valovitost struje i mora raditi (peglati dobro) i za najveće valovitosti

→ NAJGORI slučaj je za MAX valovitost I_L (jer bi tad na izlazu bila max valovitost)

→ št je veći C, to bolje pegla, pa se njega traži C_{min}

za U_{1max} iz ↓ (3;4), već smo izračunali

$$C_{min} \geq \frac{1}{8}\frac{\Delta I_{Lmax} T}{\Delta u_C} = 1{,}43\,\mu F$$

Δu_C ↳ zadano

→ E-6 niz:

$$\boxed{C = 2{,}2\,\mu F}$$

(zbog tol. nije dovoljan $1{,}5\,\mu F$!)

– u tom slučaju je:

OK

ALI ↑ $\boxed{\Delta u_C} \leq \frac{1}{8}\frac{\Delta I_{Lmax} T}{C} = \boxed{39{,}1\,mV} < 60\,mV$ (izvens daje od najgoreg sluč.)

– OVAJ dio računa je napravljen uz zanemarenje R_C !!!

– za $C < 20\,\mu F$, $R_C = 5\,\Omega$ ⇒ $\boxed{\Delta U_{RC} = \Delta I_{Lmax} \cdot R_C = 68{,}75\,mV}$ (13,75 mA; 5 Ω)

↓ ne teče izvj. komp. kroz trošilo nego cijela kroz C zbog pretp. $2\pi f > \frac{1}{\tau = RC}$ ↓ trošila i u prema tom uvjetu se bira radna frekv. stabilizatora

$$\Rightarrow \boxed{\Delta U_{RC} > \Delta U_C} !!!$$

– ŠTO TO SAD ZNAČI!?

- fazni pomak napona na C i R_C je 90° pa se ukupni napon računa pitagorino pravilo:

$$\boxed{\Delta U_2} \doteq \sqrt{\Delta U_C^2 + \Delta U_{ec}^2} = \boxed{79{,}1\,mV} > 60\,mV$$ - određen prvenstveno s U_{ec}!

- osim toga i pretpostavljeno je da je $\frac{1}{2\pi f C} = 3{,}62 << \frac{U_2}{I_{2max}} = 109\,\Omega$
(kako bi valovitost struje tj. išla kroz C a ne kroz R!)

što rezultira uvjetom za korištenje pri većim snagama (većim I_{2nom}) (vidi drugi put)

- ZATO: za kond. se u praksi odabire prema spojenom ESR-u, a ne prema kapacitetu!!
(pokazuje se da valovitost izl. napona određuje ESR (zato su bolje kond. keramički!) iskustvom)

$$\boxed{\Delta U_2 \approx \Delta U_{ec}} = \Delta I_{Lmax} \cdot R_C \Rightarrow$$

$$\Rightarrow R_C \leq \frac{\Delta U_2}{\Delta I_{Lmax}} = 4{,}36\,\Omega < 5\,\Omega$$

$$\Rightarrow C = \frac{R_C \cdot C}{R_C} = \frac{100 \cdot 10^{-6}}{4{,}36} = 22{,}9\,\mu F$$, iz E-6

$$\Rightarrow \boxed{C = 33\,\mu F}$$ ✓

a za njega je $R_C = 3{,}03\,\Omega$

tj. $\Delta U_C = 2{,}60\,mV$
$\Delta U_{ec} = 41{,}66\,mV$ $\Big\}$ $\boxed{\Delta U_2 \doteq 41{,}74\,mV \doteq \Delta U_{ec}}$

$< 60\,mV$, OK
(daleko od najgoreg slučaja)

- rasprava:
za $\Delta U_C >> \Delta U_{ec}$ (zanemariv ESR)

$$\Rightarrow \frac{1}{8}\frac{\Delta I_L T}{C} >> \Delta I_L \cdot R_C$$

$R_C \cdot C << \frac{T}{8}$; $T_{min} \approx 50\,\mu s$ ($f >$ 20kHz radi...)

$$\Rightarrow R_C \cdot C << 6\,\mu s$$

$R_C \cdot C \approx 50\,\mu s$ za elektrolitske kondenzator

- znači, u praksi se NIKAD ne smije zanemariti utjecaj ESR-a !!!

- ovo je kraj zadanog djela
- sad ide rasprava

ODREĐIVANJE STUPNJA KORISNOG DJELOVANJA

- zbog jednostavnosti, zanemaruju se dinamički gubici uzrokovani uklapanjem tranzistora i dioda (iako su ti efekti značajni već pri nekoliko desetaka kHz, osim i kod brzih MOS-ova i schottky dioda)

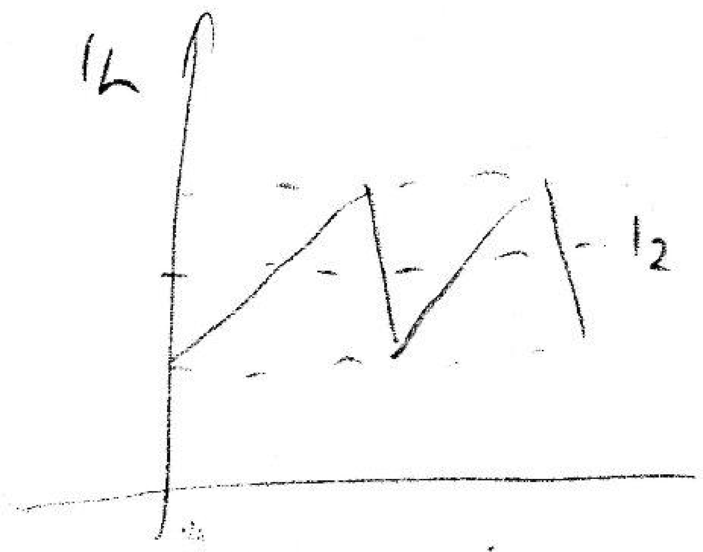
$$\eta = \frac{E_{korisno}}{E_{ukupno}} = \frac{P_{korisno}}{P_{ukupno}}$$

SW-1a str. 8 — dobiveno na trošilu — SW-8

$$\eta = \frac{U_2 \cdot I_2}{U_2 \cdot I_2 + \delta I_L U_{CES} + (1-\delta) I_L U_D + P_d}$$

$U_2 \cdot I_2$ – na trošilu potrošeno; $\delta I_L U_{CES}$ – disipirano na T; $(1-\delta) I_L U_D$ – dis. na D; P_d – T+D, zanemaruje se u zadacima

- samo za prop. spoj vrijedi $\boxed{I_L = I_2}$



$$\Rightarrow \eta \quad \boxed{\eta = \frac{U_2}{U_2 + \delta U_{CES} + (1-\delta) U_D}}$$

$\eta \neq f(I_2)$ jer se zanemaruje utjecaj I_2 na U_{CES} i U_D (dobra aprox)

- jer je $U_D > U_{CES} \Rightarrow \boxed{\delta \downarrow \Rightarrow \eta \downarrow}$

što je razumljivo jer tada raste udio disipacije na diodi na kojoj je veći napon nego na U_{CES}!

$$\eta_{min} = \eta(\delta_{min}) = \eta(U_{1max}) \Rightarrow \boxed{\eta_{min} = 96,2\%}$$

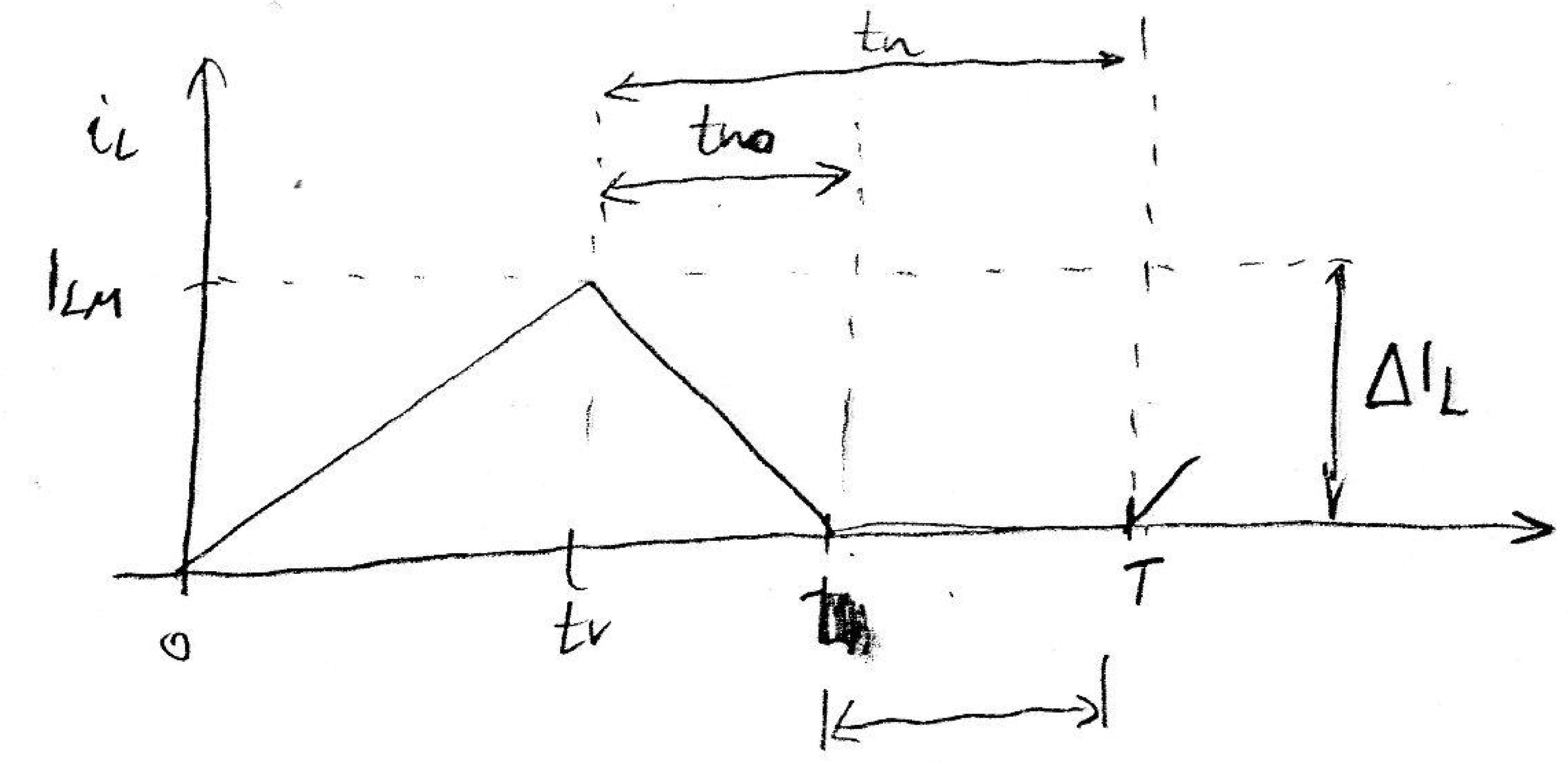
u stvarnosti manje zbog P_{dm} gubitaka

DISKONTINUIRANI NAČIN RADA

- ako se opteretna struja (I_2) pretjerano smanji ($I_2 < \frac{\Delta I_L}{2}$), tj. $R \uparrow$ preko granice, ispada se iz kont. načina rada jer nt konst ΔI_L, ako je $\Delta I_L > 2 I_2$, $I_2 = \frac{U_2}{R}$, neće više niti pojam struje biti kontinuiran
- tu se odmah nadovezuje problem prekida opteretne struje kod svih ~~DC-DC~~ ~~konvertora~~ stab. s prekidanjem struje (jer se zavojnica nema gdje prazniti) (~~naša~~ sve kad bi se R odspojilo, onda bi cijela energija E iz L-a otišla na C $\Rightarrow \frac{C U_C^2}{2} = \frac{L I_L^2}{2} \Rightarrow$ pitanje da li bi kond. izdržao prenapon U_C a da ne pregori)
- valovitost struje ne ovisi o I_2, već o $\Delta I_L = \frac{(U_D + U_2) t_n}{L}$ o $t_n \Rightarrow$

$\Rightarrow \Delta I_{Lmax}$ je za t_{nmax}, a t_{nmax} je za U_{1max}

- max. valovitost za U_{1max}



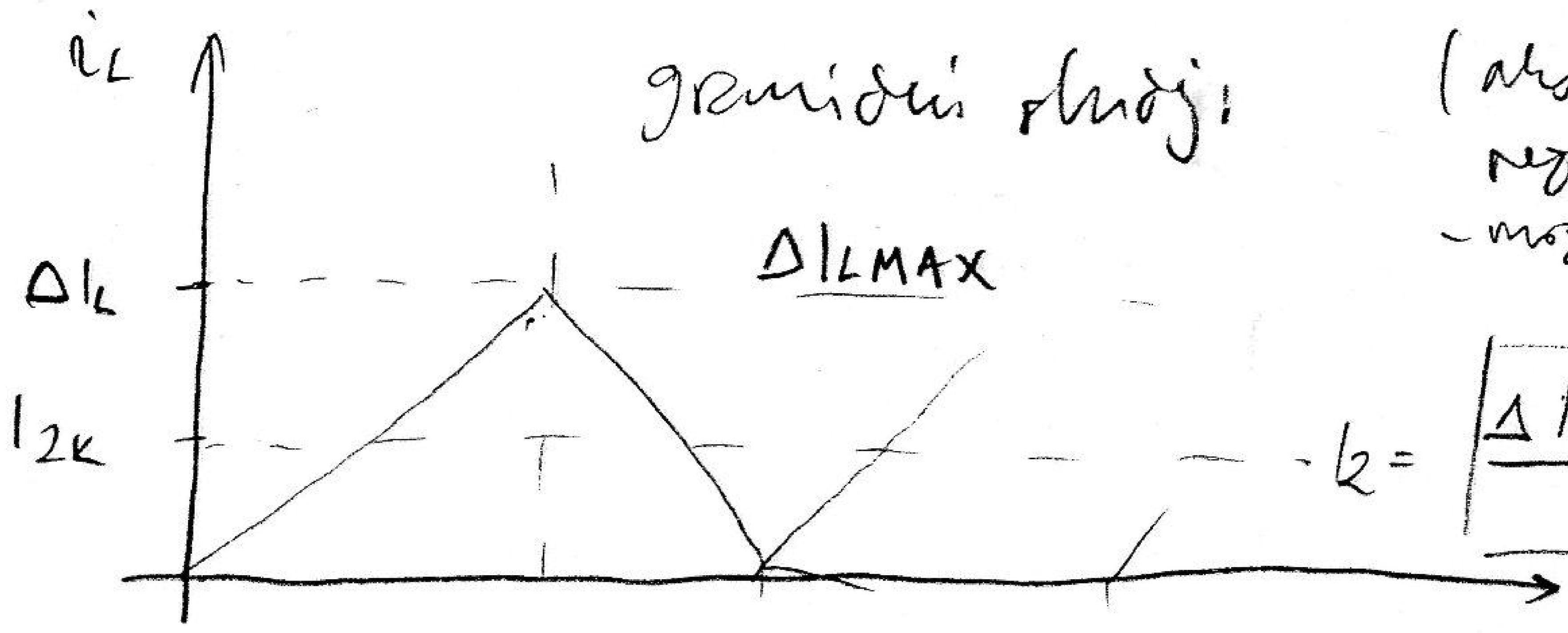
↓ za to mjerne struje na L osigurana kont!

$\Delta I_L = f(U_1)$

- iz $\boxed{U_1 - U_{CES} - U_2 = L \frac{\Delta I_L}{t_v}}$

- uz konst. t_v nagib pravca ovisi samo o U_1!
- kako U_1 ↑, t_v ↓ i ΔI_L ↑

granični slučaj:



(ako je valovitost manja, jače smo u kont. režimu, to je OK), zato je ovo nepovoljnije
- može se računati u kont režimu i za $I_2 < I_{2k}$, ali samo ako je $U_1 < U_{1max}$ isto ne odgovara uvjete

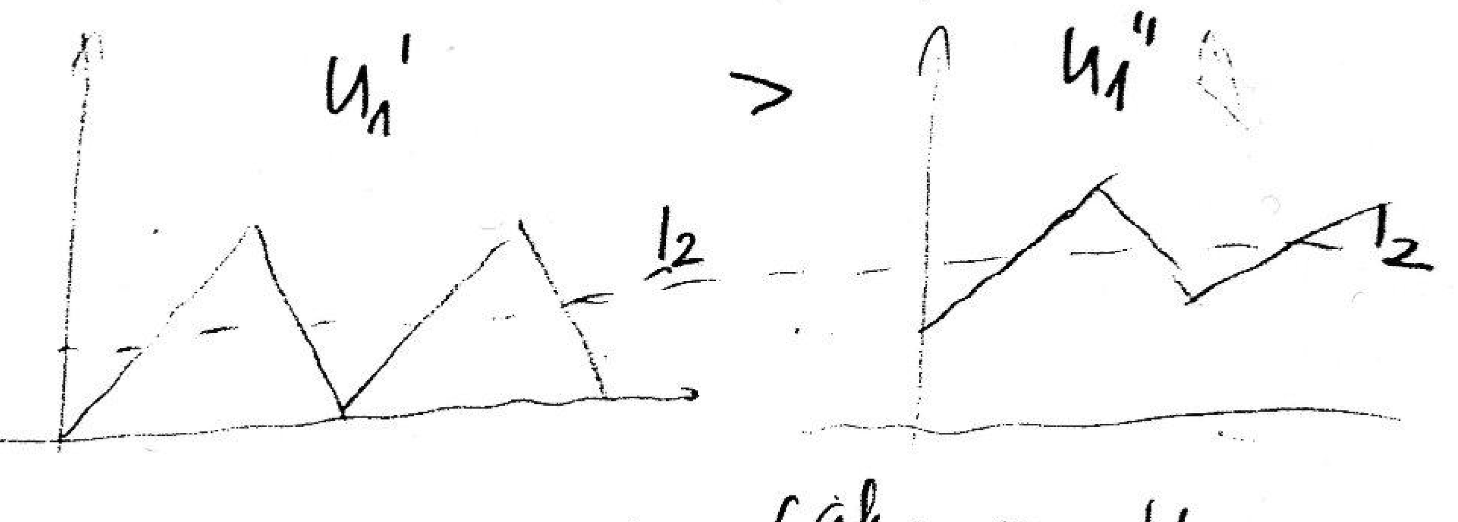
$I_2 = \boxed{\frac{\Delta I_{LMAX}}{2} = I_{2K}}$ → granična struja opt. pri prijelazu iz jednog režima rada u drugi

$$\boxed{I_{2K}} = \frac{1}{2} \cdot \Delta I_{Lmax} \overset{(4)}{=} \frac{1}{2}\frac{U_D+U_2}{fL}(1-\delta) \overset{(3)}{=} \frac{1}{2} \frac{U_D+U_2}{fL}\left(1-\frac{U_2+U_D}{U_1-U_{CES}+U_D}\right)$$

↓ kritična struja

$$= \boxed{\frac{1}{2} \frac{U_2+U_D}{fL}\,\frac{U_1-U_2-U_{CES}}{U_1-U_{CES}+U_D}\Bigg|_{U_1=U_{1max}}} \quad (9)$$

↓ jer je tada najveća valovitost struje



$$\boxed{\Rightarrow I_{2K} = 6{,}87\,mA = \frac{13{,}75\,mA}{2}}$$

- za $U_1 < U_{1max}$ i $I_2 > I_{2K}$ imamo još prostor u kont. načinu rada

(ako se U_1 smanji, manja je i valovitost struje zavojnice) pa smo još više u kontinuiranom modu)

- međutim, ako se odabere takav R da bude $I_2 < I_{2K}$! ⇒ diskont. mod (ako U_1 ostane $U_1 = U_{1max}$!)

(EVO IDE SLIKA!)

(A) T vodi

$\boxed{I_{LM} = \Delta I_{LMAX}}$ 13,75 mA

$\boxed{U_1 - U_2 - U_{CES} = L\frac{I_{LM}}{t_v}}$ (5)

mjere ovih 1160 mA, ovo je bilo fektično, I_{LM} je ovdje jednak ΔI_{Lmax} za diskont mod

naponska ravnoteža

(B) T ne vodi

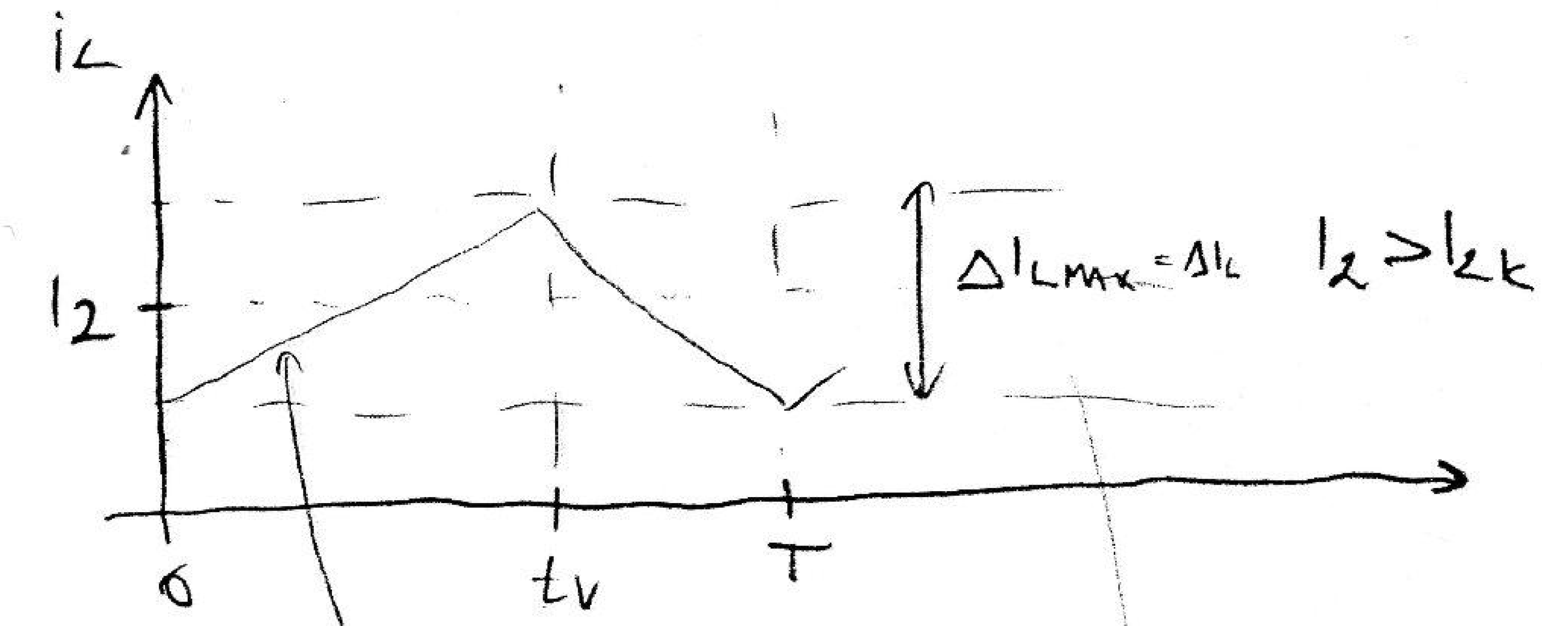
$\boxed{U_2+U_D = L\frac{I_{LM}}{t_{no}}}$ (6)

$t_v = \frac{L I_{LM}}{U_1-U_2-U_{CES}} =$

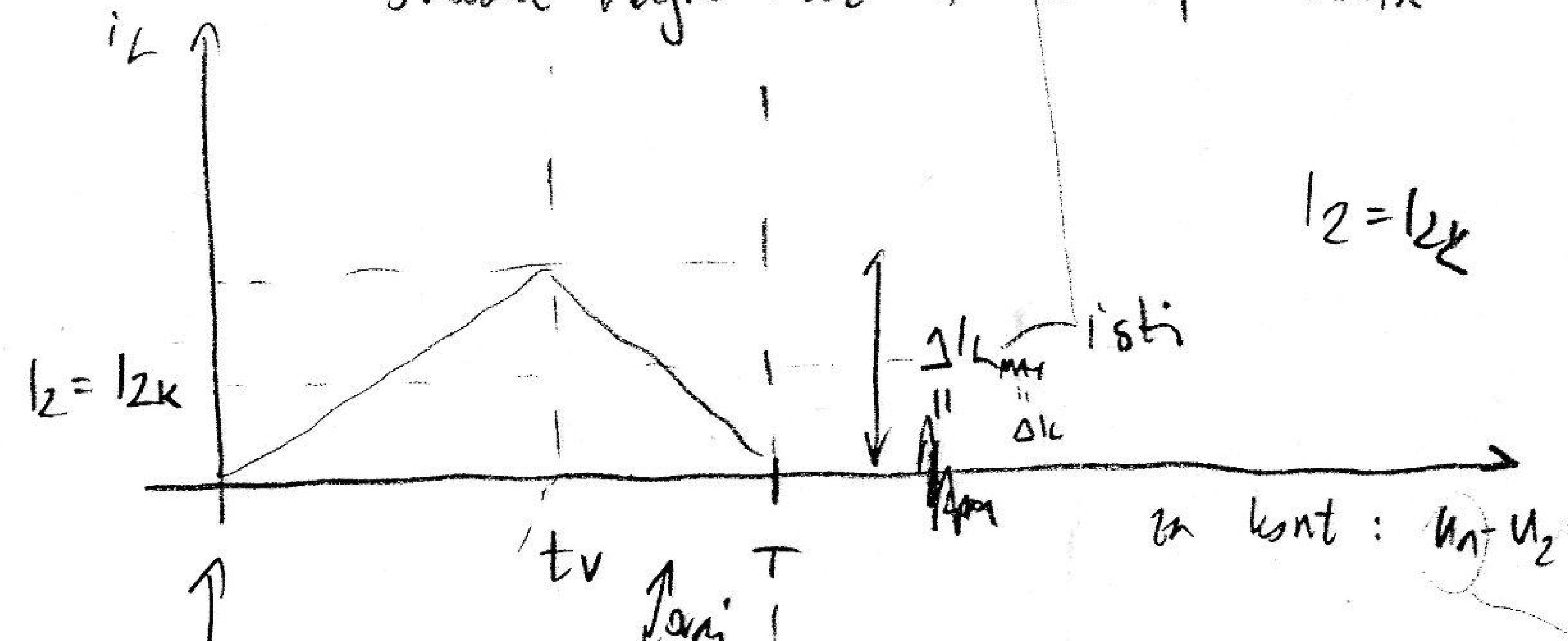
$$\Rightarrow \boxed{\delta = \frac{I_{LM} f L}{U_1-U_2-U_{CES}}} \quad (7)$$

↳ međutim, ovdje δ ovisi i o I_2 → to ćemo posebno dokazati! (za razliku od (3))

– prijelaz kont–diskont mod ($U_1 = U_{1max}$ (mnij nepovoljnije) i $I_2 \downarrow$)



stalan nagib (uz $U_1 = U_{1max}$ $\Rightarrow \Delta I_{LMAX}$)



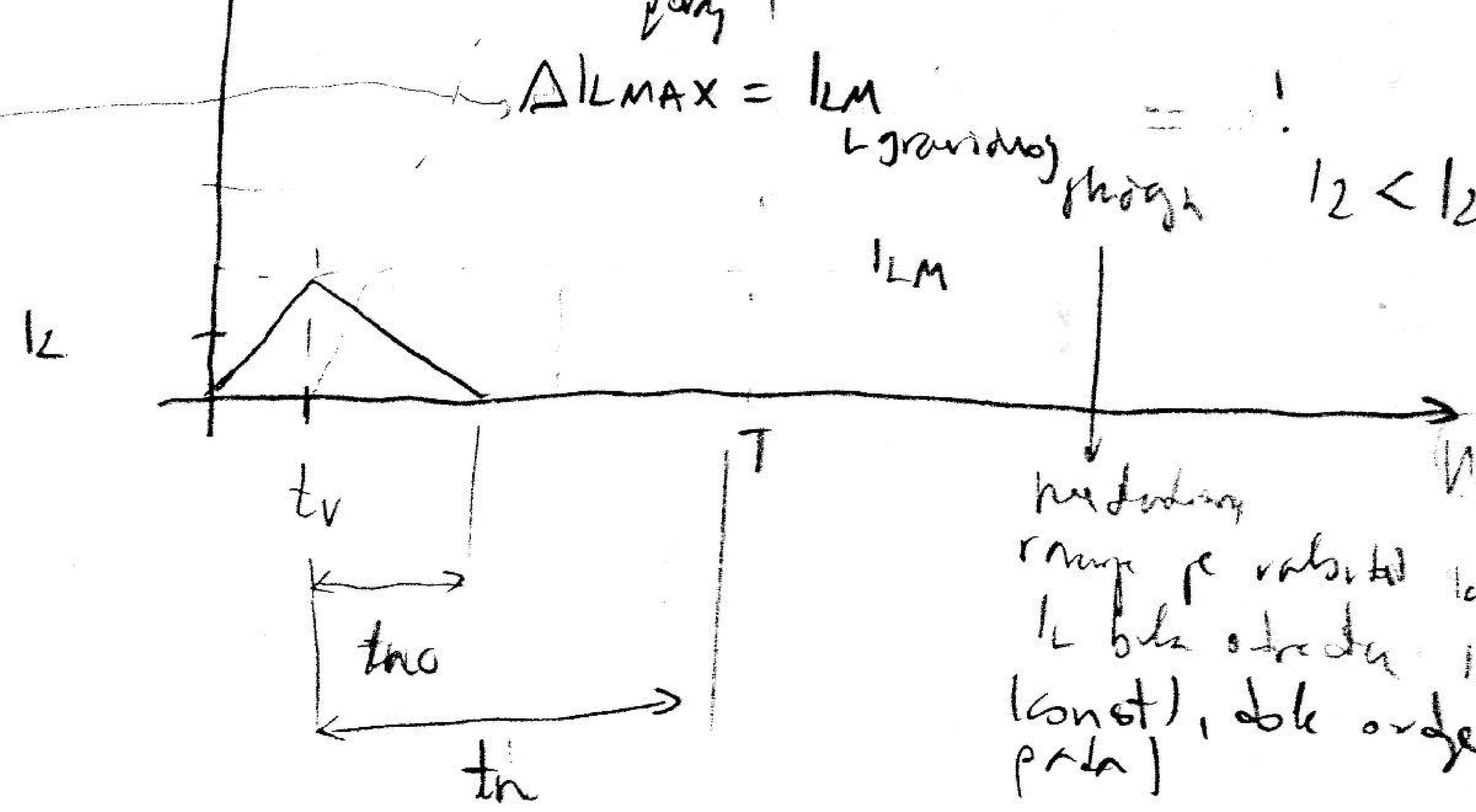
$\delta \overset{(3)}{=} konst = \delta(U_1)$, a U_1 je konst i $U_1 = U_{1max} = konst$ $\Rightarrow \Delta I_L$ $\Delta I_{LMAX} = konst$

t_v je isti

za kont: $U_1 - U_2 - U_{CES} = L \dfrac{\Delta I_L}{t_v}$

konst

$\Delta I_{LMAX} = I_{LM}$ (granični) — graničnog slučaja



$U_1 - U_2 - U_{CES} = L \dfrac{I_{LM}}{t_v}$ — ovo je vangelblo (i I_{LM}, i t_v)

nadodaj: razmak je vaiabatd konst; I_L bila određena isključivo s U_1 i bila je konst (kako je U_1 konst), dok ovdje ovisi i o U_1 i o I_2 (10), i pada kako I_2 pada)

– u čemu je ovdje problem kod računa?

→ kod konti:
a) $U_1 - U_2 - U_{CES} = L \dfrac{\Delta I_L}{t_v}$
b) $U_2 + U_D = L \dfrac{\Delta I_L}{t_n}$
c) $t_v + t_n = T$

3 jed. s tri nep. i sve se da riješiti

→ kod diskont:
a') $U_1 - U_2 - U_{CES} = L \dfrac{\Delta I_L}{t_v}$
b') $U_2 + U_D = L \dfrac{\Delta I_L}{t_{no}}$
c') $t_v + t_{no} \neq T$ i ne znaš koliko je!!!

2 jed s tri nep.

ne da se riješiti!

– kako doskočiti?
– u diskont. rus. se UVIJEK mora postaviti još jedna dodatna jednadžba (3-ća) ENERGETSKE RAVNOTEŽE: E disipirana u T : D u ΔT

d')
$$\boxed{\underbrace{U_1 \cdot \frac{I_{LM}}{2} t_v}_{\text{energija napumpana u } \Delta T} = U_{CES} \frac{I_{LM}}{2} t_v + U_D \frac{I_{LM}}{2} t_{no} + \underbrace{U_2 I_2 T}_{\text{korisna } E \text{ u } \Delta T}} \quad (8)$$

– napomena: I_{LM} (diskont) $\neq \Delta I_{LMAX}$ (kont) jer je ΔI_{LMAX} izveden iz a, b, c, a kod diskont ispada a', b', d' jednadžbe

(5), (6) => (8) =>
(t.d. restanu tr i tno)
(smart substitution)

$$u_1 \cdot \frac{I_{LM}}{2}\left[\frac{L I_{LM}}{u_1-u_2-u_{CES}}\right] = u_{CES}\frac{I_{LM}}{2}\left[\frac{L I_{LM}}{u_1-u_2-u_{CES}}\right] + u_D \frac{I_{LM}}{2}\left[\frac{L I_{LM}}{u_2+u_D}\right] + u_2 I_2 T$$

$$\frac{(u_1-u_{CES}) I_{LM}^2 L}{u_1-u_2-u_{CES}} = \frac{u_D I_{LM}^2 L}{u_2+u_D} + 2 u_2 I_2 T$$

$$L I_{LM}^2 \frac{\overbrace{u_1u_2 - u_2u_{CES} + \cancel{u_1u_D} - \cancel{u_Du_{CES}} - \cancel{u_1u_D} + u_2u_D + \cancel{u_{CES}u_D}}^{\to\, u_2(u_1-u_{CES}+u_D)}}{(u_1-u_2-u_{CES})(u_2+u_D)} = 2u_2 I_2 T$$

$$\boxed{I_{LM} = \sqrt{2\,\frac{u_1-u_2-u_{CES}}{u_1-u_{CES}+u_D}\,\frac{(u_2+u_D)\,I_2}{fL}}} \quad (10)$$

- ovo je totalno drugi izraz od (4)

- može se pokazati da vrijedi

$I_{LM} = 2 I_{2K}$ po (10)

i

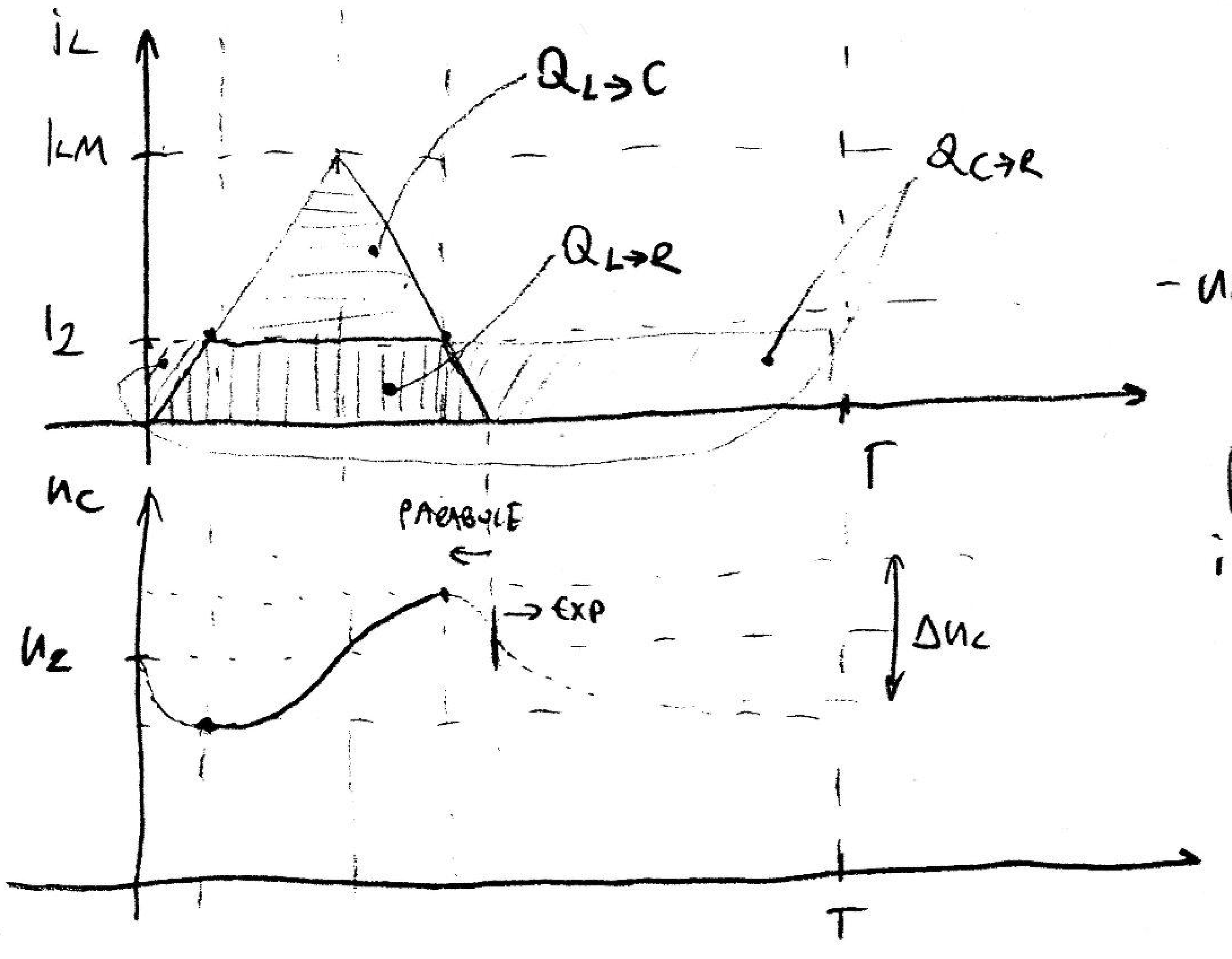
$\Delta I_{LMAX} = 2 I_{2k}$ po (4) (tj. (9))

odnosno ako se u (4) i (10) uvrsti isti I_{2k}

(zadovoljen granični slučaj) (4)

VALOVITOST IZL. NAPONA KOD DISKONT. MODA

- dio perioda struja osigu. kond.



NABOJSKA RAVNOTEŽA

- naboj Q: $Q_{L\to C} = Q_{C\to R}$
(ekvivalentno C ravnoteži)

- ucr: sigurno položaj extrema i točke infleksije, te približan analitički oblik krivulje po dijelovima (parabole za tr i exp. za T-tr-tno) te $A_1 = A_2$

SW-12 - str 12

(SW-12)

Δu_C je određen s $Q_{L\to C}$

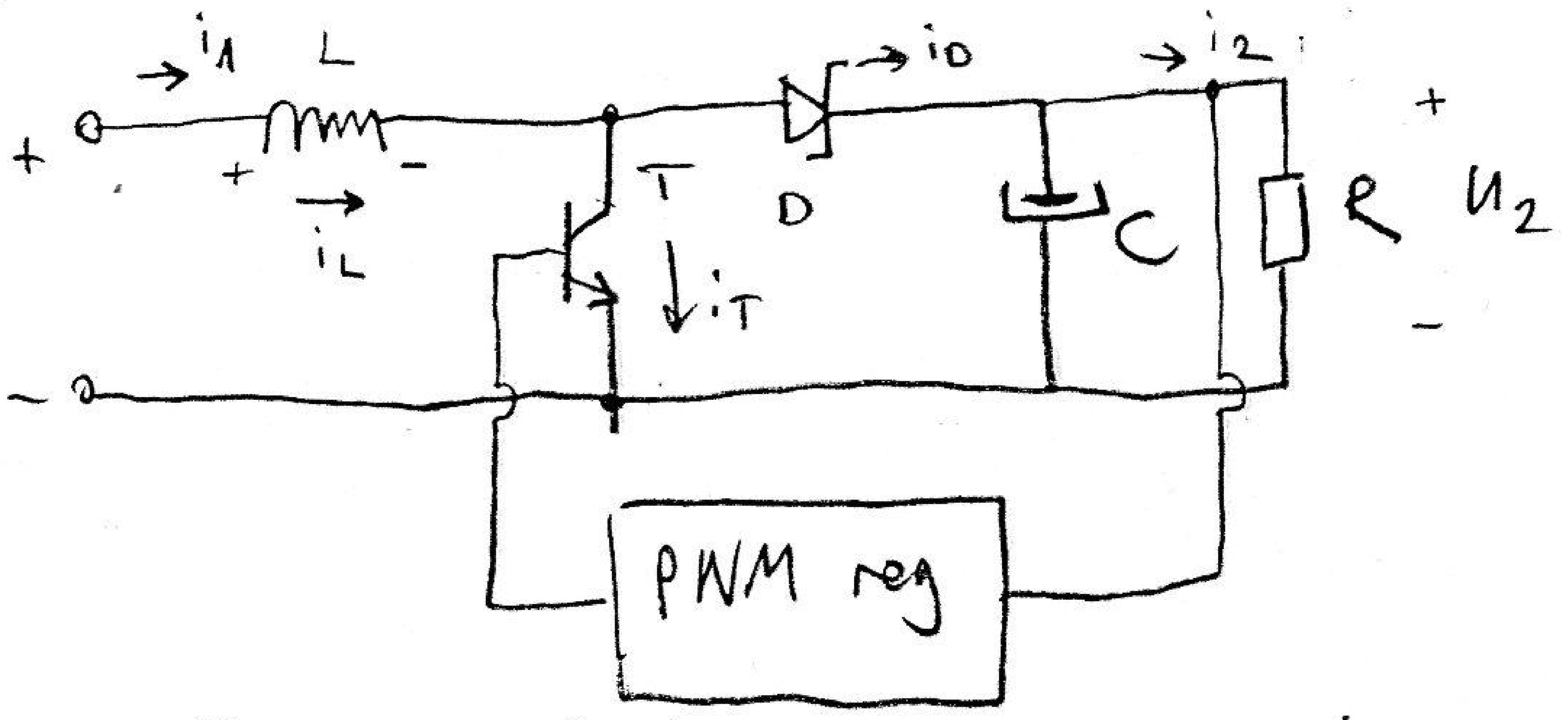
$$\boxed{C = \frac{Q_{L\to C}}{\Delta u_C}}$$

Q_{L-C} se može izračunati za određeni I_Z (jer je sve poznato), ali to ne treba jer je $Q_{L\to C}$ ovdje manji nego u kont režimu (jer je $I_{LM,disk} < \Delta I_{LMAX,kont}$), a osim toga, veći utjecaj od samog C-a na Δu_C ima ESR koji je dovoljno dobro određen u ovakvom zahtjevu s kont (dovoljno vel. C)

PROPUSNI SPOJ - ZAKLJUČAK

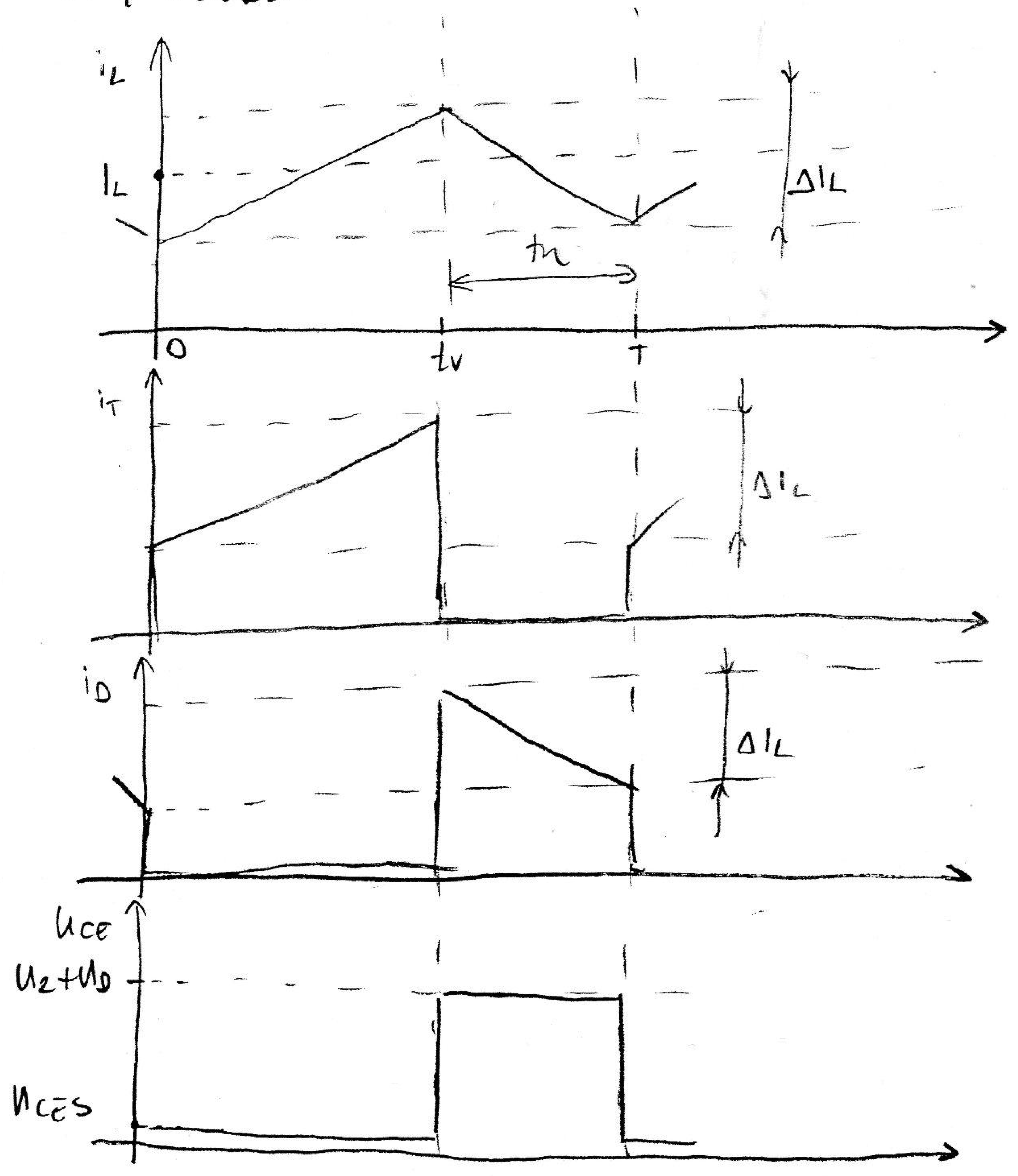
- redovito radi u kont modu
- može raditi i u diskont, uz neznatne ~~nepo~~ nepovoljnosti:
  - istitravanja u T-D-L krugu u trenutku pada $I_L \to 0$ se filtriraju L-C članom pa se ne utječe na stabilnost regulacijske petlje

- ZAPORNI SLOJ BEZ GALV. ODV. (BOOST SW. REG., STEP-UP DC-DC CONV.)



$u_2 > u_1$

- podrazumijeva se kont. mod (osim ako se drugačije ne naglasi) u zadacima (iako u praksi oba zaporna spoja rade u dikont. modu, jer je u supr. njihovom regulacijska petlja nestabilna, osim ako se reg. faktor. jako ograniči, no tada je reg. izl. napona prespora)
- U/I odnosi:



A) vođenje T

$$\boxed{u_1 - u_{CES} = L \frac{\Delta I_L}{t_v}} \quad (1)$$

$u_{CES} = 0{,}3$

- kad bi bio $u_2 = \phi$

$\Rightarrow$ $u_D = 0{,}3V$, što je premalo za vođenje diode pa je desni dio sklopa odspojen

- kad bi bio $u_2 = +15V$

$u_D = \varphi_{D+} - \varphi_{D-} = u_{CES} - u_2 \doteq -15V$

- rev. pol., isto

B - pumpa se energija izvora u L

B) nevođenje T

$$\boxed{u_1 - u_D - u_2 = L \frac{-\Delta I_L}{t_n}} \quad (2)$$

- struja zavojnice mora negdje teći $\rightarrow$ otvara diodu

- naponi:

$5 - 0{,}8 - 15 \doteq \underbrace{-11V}_{u_L}$, logično jer se struja smanjuje

$\Rightarrow$ nastavak

- kod propusnog je bilo

$I_L = I_2$ (tj. $\overline{i_L(t)} = I_2$)

jer se struja L-a cijelo vrijeme zatvarala preko R

- ovdje se struja L-a zatvara preko R samo kod nevođenja

$\Rightarrow$ $\boxed{I_L \neq I_2 \quad !!!!!!!}$ VAŽNO!

DIGRESIJA

1 - C-određuje se iz naknadne analize

- na ispitu - nosni i dizkont mod.

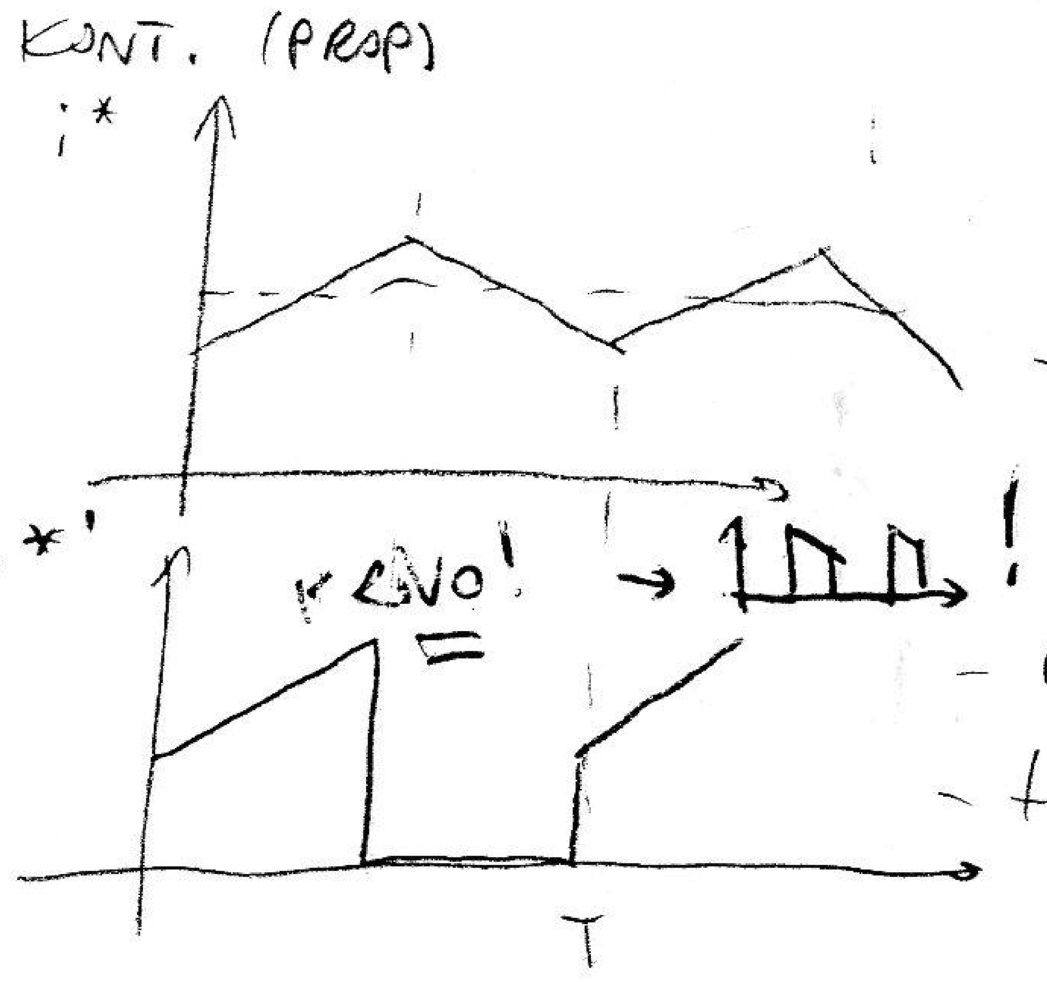
SW-15 str 2

SW-14

- iz (1) i (2)

$$\Rightarrow \frac{t_v}{t_n} = \frac{U_2+U_D-U_1}{U_1-U_{CES}} = \boxed{2,213}$$

- potreban ZNATNO veći C za iste I_2, U_2 i ΔU_2 nego za prop. spoj!
- ZAŠTO ?



- jer se L zadrži puls L)
- (samo u poluprovodi)
- teže je filtrirati ovakav oblik struje

Izraz za $U_2(U_1,\delta)$ za spoj u kont. modu:

kont

$$\boxed{U_2 = \frac{1}{1-\delta}U_1 - U_D - \frac{\delta}{1-\delta}U_{CES}} \quad (3)$$

$$\text{iz: } \frac{T-t_v}{t_v} = \frac{U_1-U_{CES}}{U_2+U_D-U_1} = \frac{1}{\delta}-1 \Rightarrow \frac{1}{\delta} = \frac{U_1-U_{CES}+U_2+U_D-U_1}{U_2+U_D-U_1}$$

$$\delta(U_2+U_D-U_{CES}) = U_2+U_D-U_1 \longrightarrow \boxed{\delta = \frac{U_2+U_D-U_1}{U_2+U_D-U_{CES}}}$$

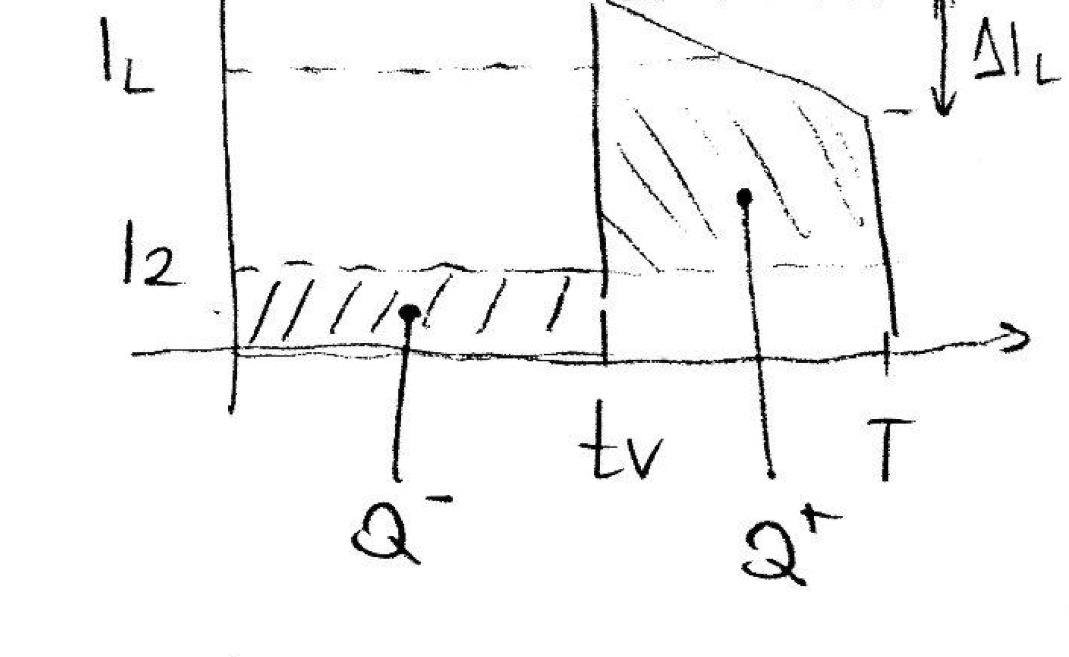
$$U_2(1-\delta) = U_1 - U_D + \delta U_D - \delta U_{CES} = U_1 - U_D(1-\delta) - \delta U_{CES}$$

- Energetska ravnoteža:

$$\boxed{U_1 \cdot I_L T = U_{CES} I_L t_v + U_D I_L (T-t_v) + U_2 I_2 T} \quad (4)$$

(zanemaruju se gubici din. pri uklj/isklj sklopke)

- jednostavno računanje odnosa struja I_L i I_2 (preko nabojske ravnoteže):



$$Q^- = Q^+ \qquad t_v I_2 = (T-t_v)(I_L - I_2)$$

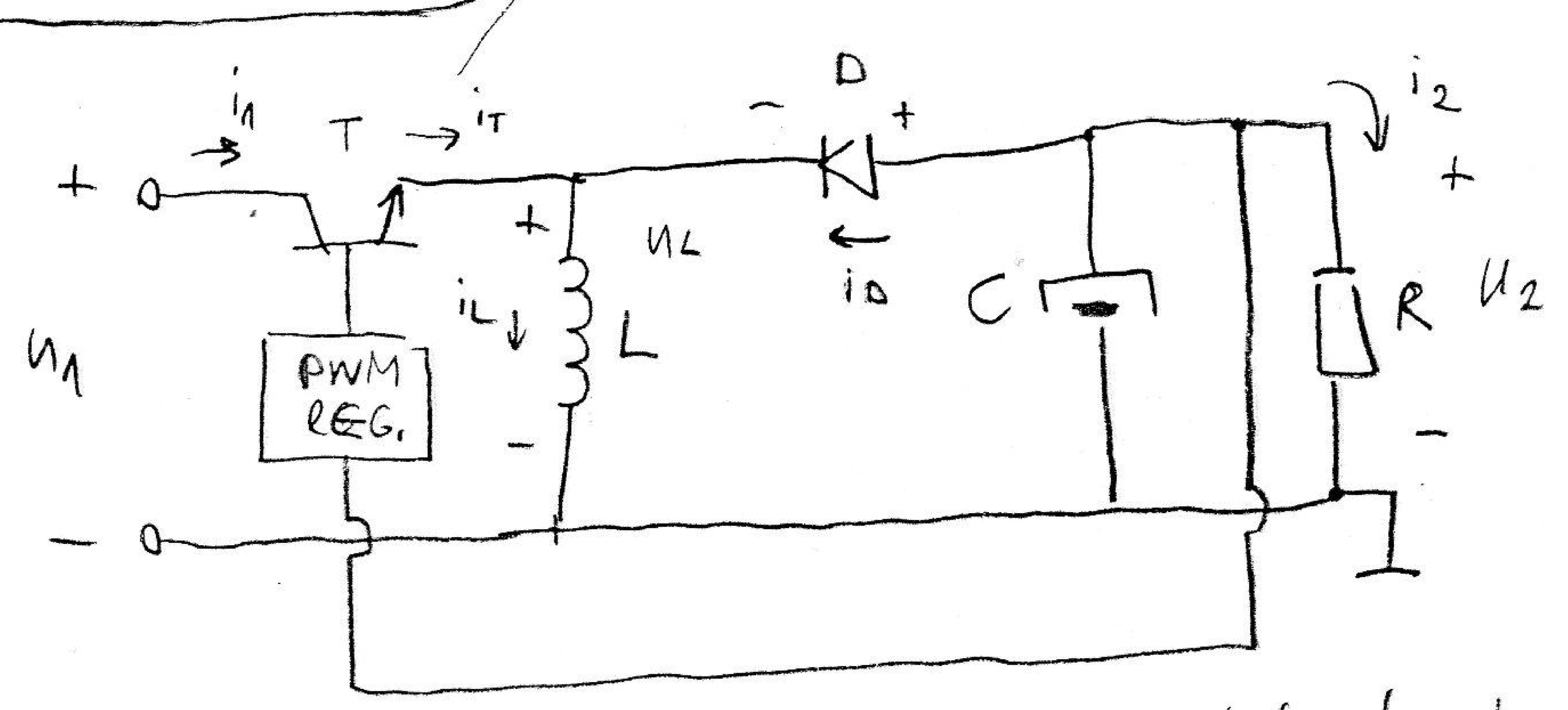
$$\vdots$$

$$\boxed{I_2 = (1-\delta) I_L} \quad (5)$$

ista se stvar dobije kada se (3) uvrsti u (4)!!

SW 1-C SW,1 — treba bi biti PNP kao i kod SW1-A

SW-15

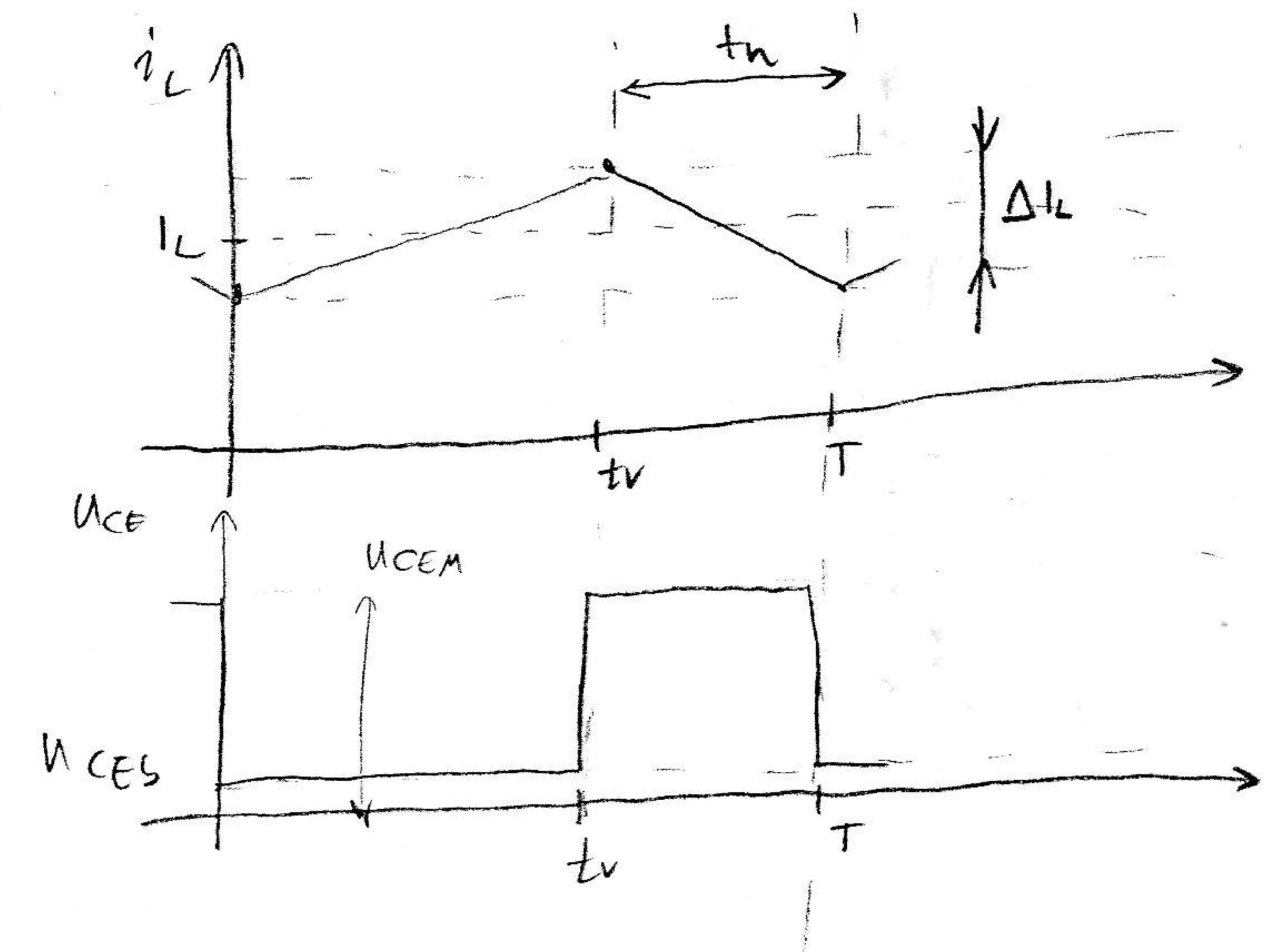


Pamti

$$\boxed{\operatorname{sgn} U_2 = -\operatorname{sgn} U_1}$$

$$\boxed{|U_2| \gtrless |U_1|}$$

(podrazumjevaju se napomene glede kont. moda kao i u SW-16)



a) Ⓐ T vodi

$$\boxed{U_1 - U_{CES} = L\frac{\Delta I_L}{t_v}} \quad (1)$$

- napon na diodi
- npr. $U_2 = 0$ – rev. pol
- $U_2 < 0$ – još više

Ⓑ T zap.

$$\boxed{U_2 - U_D = L\frac{-\Delta I_L}{t_n}} \quad (2)$$

$$\frac{t_v}{t_n} = \frac{-U_2 + U_D}{U_1 - U_{CES}} = \underline{\underline{1{,}094}} \quad (3)$$

b) $\Delta I_L = \frac{U_1 - U_{CES}}{L} t_v = 11{,}7\,mA$

c) $U_{CEM} = \varphi_{CM} - \varphi_{EM} = U_1 - (U_2 - U_D) = U_1 - U_2 + U_D =$

$= 12 - (-12) + 0{,}8 = \boxed{24{,}8\,V}$

(voditi opterećenje tranzistora dvostrukim naponom!)

– Račun za U_2:

$\Rightarrow (3) \Rightarrow \quad \frac{T - t_v}{t_v} = \frac{U_1 - U_{CES}}{(-U_2) + U_D} = \frac{1}{\delta} - 1 \Rightarrow$

$\Rightarrow \quad \frac{1}{\delta} = \frac{U_1 - U_{CES} + (-U_2) + U_D}{(-U_2) + U_D} \Rightarrow \quad \boxed{\delta = \frac{(-U_2) + U_D}{U_1 + (-U_2) + U_D - U_{CES}}} \quad (4)$

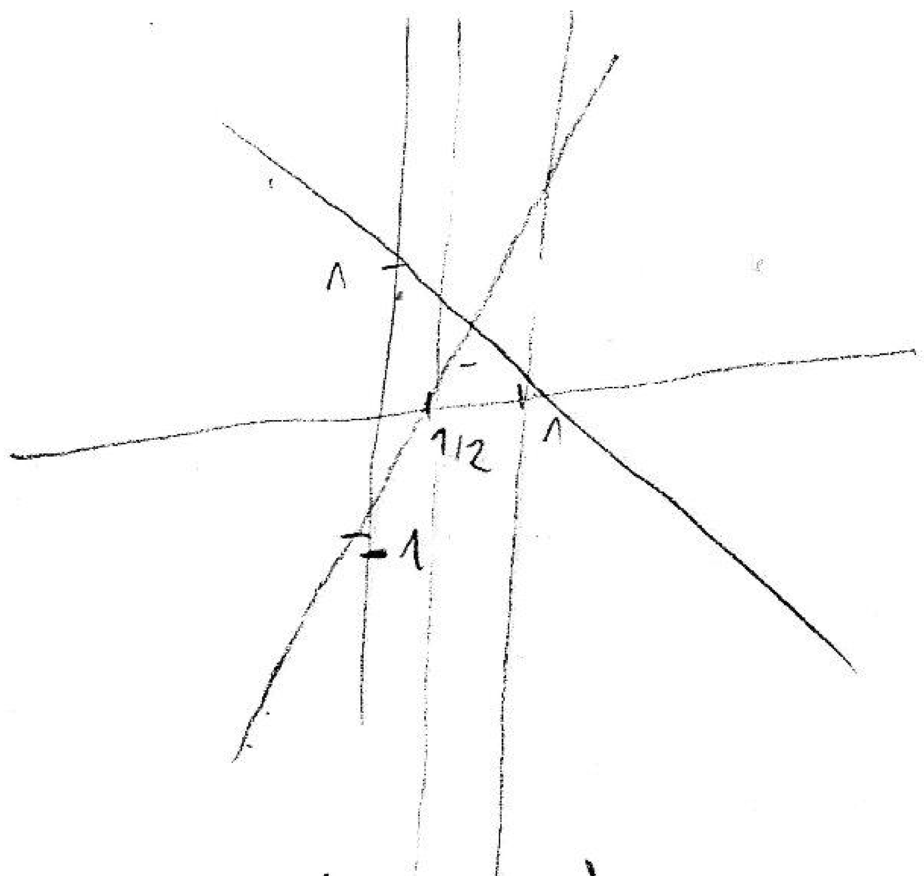
$\Rightarrow (4) \Rightarrow \quad \delta[U_1 + (-U_2) + U_D - U_{CES}] = (-U_2) + U_D$

$(-U_2)(1-\delta) = -U_D + \delta U_1 + \delta U_D - \delta U_{CES} = \delta U_1 - U_D(1-\delta) - \delta U_{CES}$

$$\boxed{-U_2 = \frac{\delta}{1-\delta} U_1 - U_D - \frac{\delta}{1-\delta} U_{CES}}$$

(slično pije) – ovisno o δ, $|U_1|$ i $|U_2|$ su $\lesseqgtr$

$\rightarrow \frac{\delta}{1-\delta} \geq 1 \Rightarrow \frac{\delta}{1-\delta} - 1 \geq 0 \rightarrow \frac{\delta - 1 + \delta}{1-\delta} = \frac{2\delta - 1}{-\delta + 1} \geq 0$



$\delta \in (0{,}5, 1] \rightarrow |U_2| > |U_1|$

$\delta \in [0, 0{,}5) \rightarrow |U_2| < |U_1|$

$\delta = 0{,}5 \Rightarrow |U_2| = |U_1|$

uz zanemarenje utjecaja U_D i U_{CES}!

- niti općenito nije $I_2 = I_L$

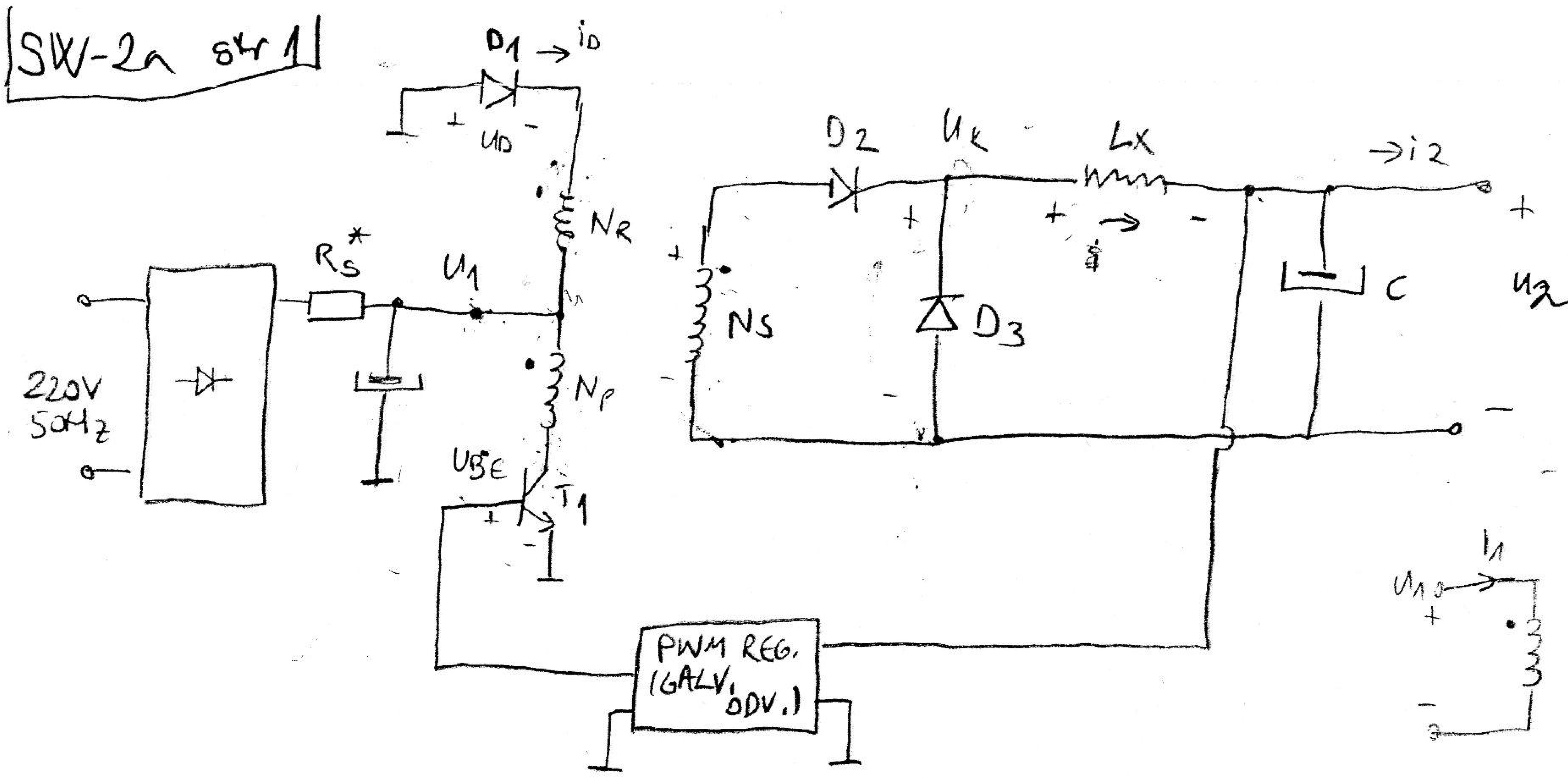
$$\boxed{I_2 \neq I_L} \;!$$

- uvijek koristiti kod zapornih spojeva E ravnotežu

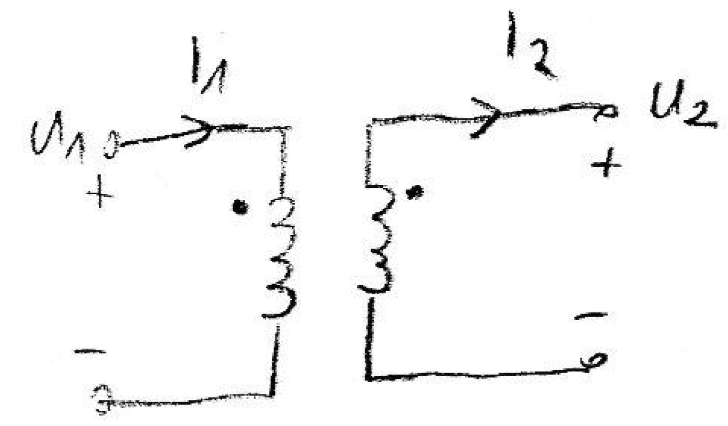
$$\boxed{U_1 I_L t_v = U_{CES} I_L t_v + U_D I_L (T - t_v) + U_2 I_2 T}$$

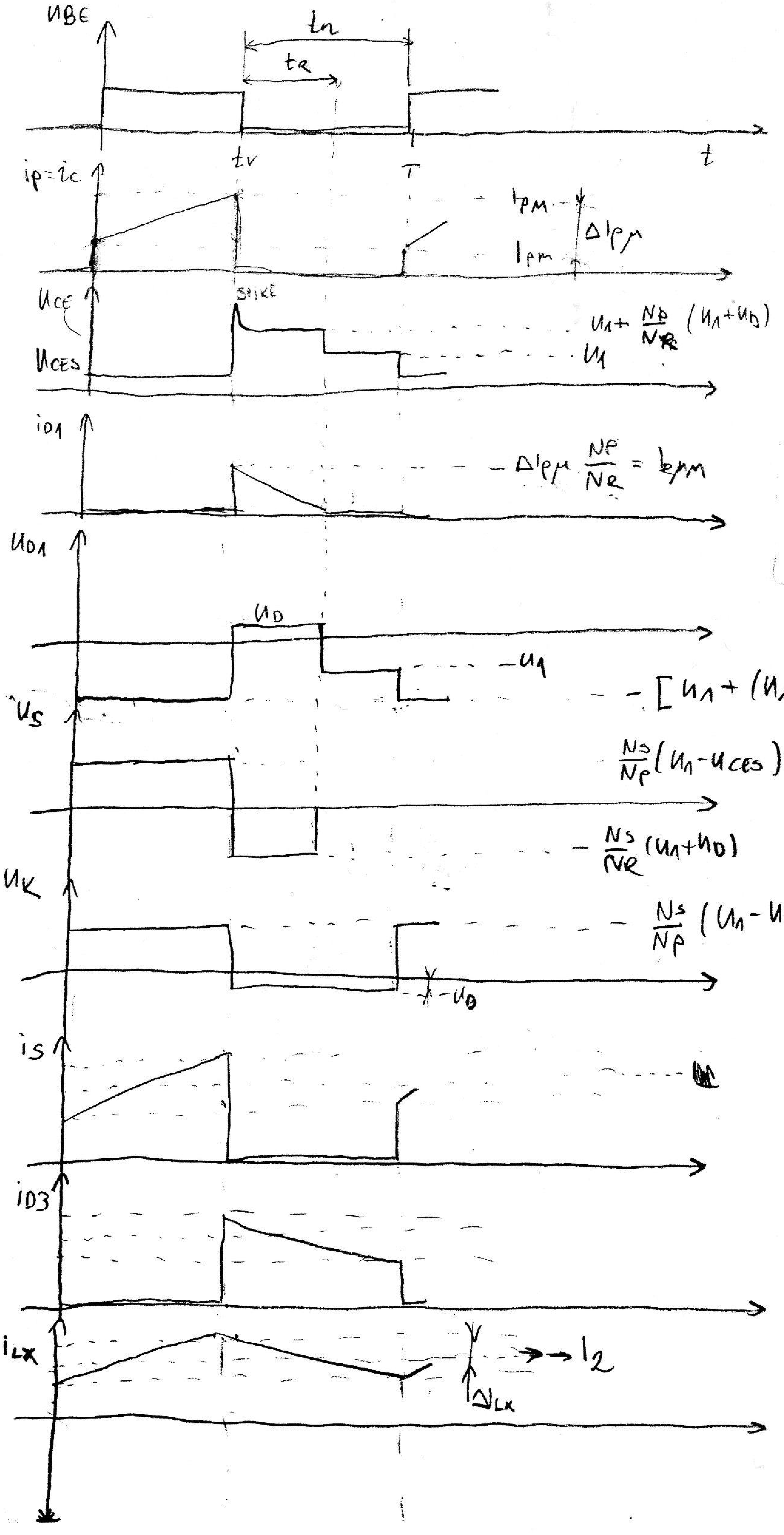
SW-2a str 1

OFF-THE-LINE FORWARD (OFF-LINE) DC-DC CONV



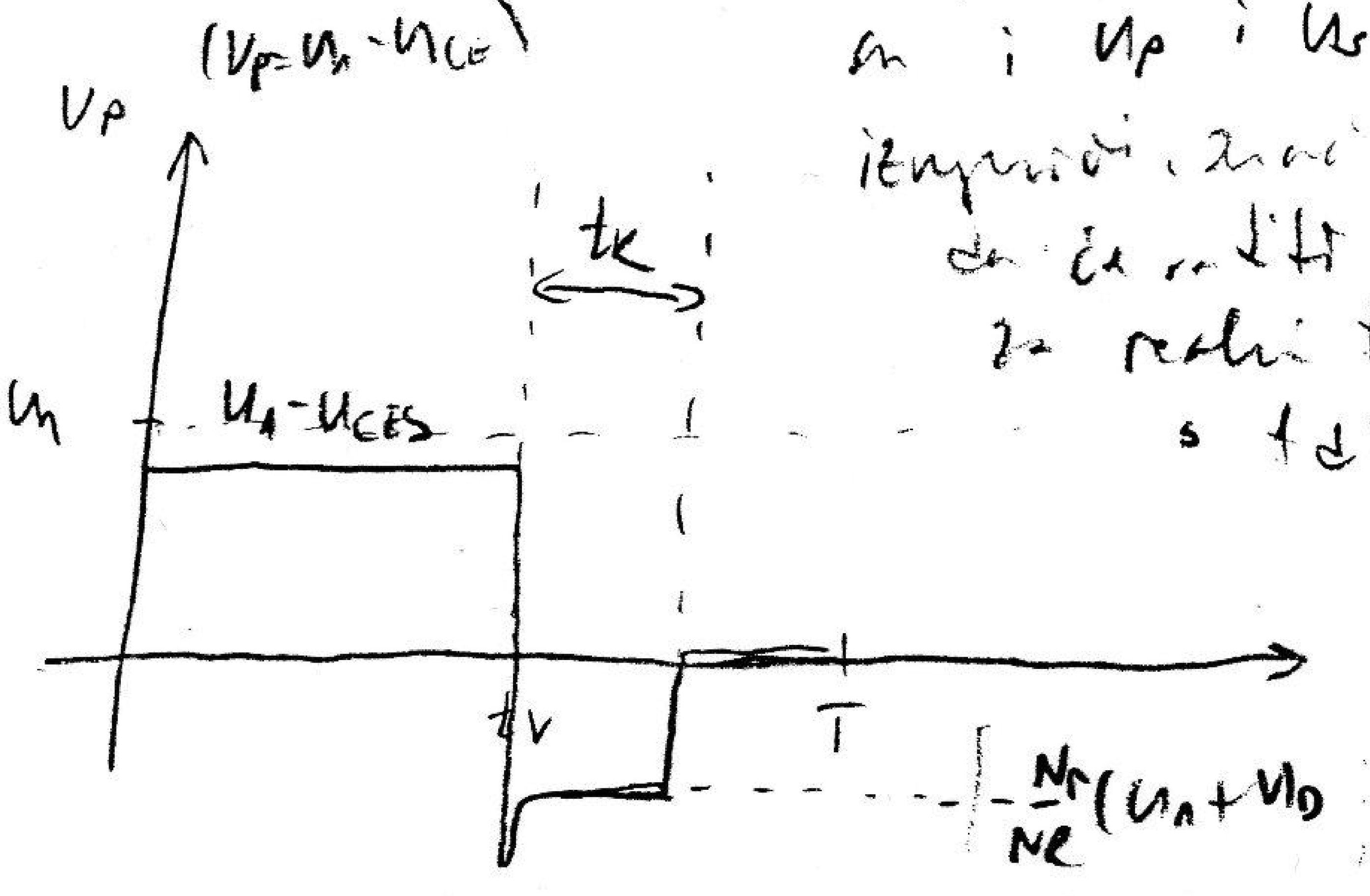
- trafo:





NAPOMENE:

- R_S^* – dodaje se dodatno zbog ograničenja udarne struje pri uklj. (za razliku od ispravljanja sek. napona i napon znatno veći, $\frac{R_S}{R_L} \approx 0$, mreža)
- uzrok u praksi radi u DISKONTINUIRANOM REŽIMU (u kont. bi se nepotrebno velika količina E prenosila iz N_P u N_R namotu)
- izlazni "BUCK" radi u kontinuiranom režimu!!! (i kad je ulazni dio u diskont.



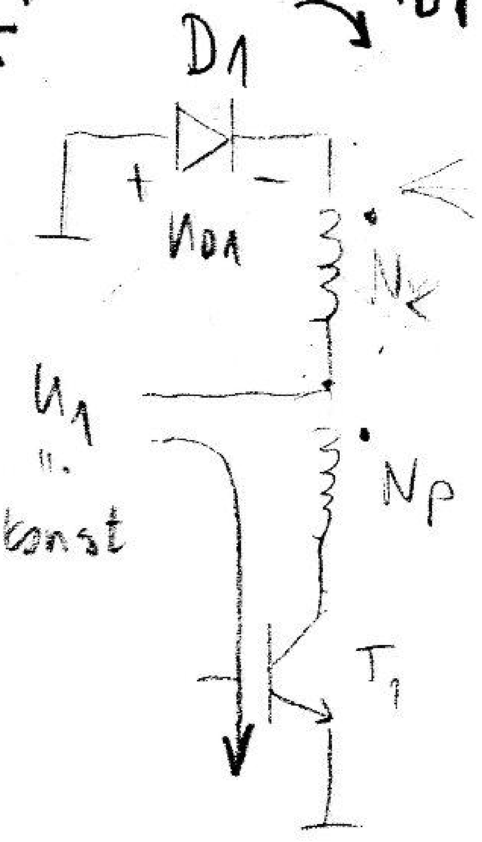
Uvidno je da su i U_P i U_S idealni, znači da će raditi i za realni trafo (s $L_\sigma > 0$)

SW-2a str 2

→ na pocetku odmah razjasniti jednu stvar: kako je $\frac{U_1}{U_2}=\frac{N_1}{N_2}$ a $U_1 = DC$?
→ Idealni transformator ($f_d=\emptyset$), jer se radi na rel. visokoj frekvenciji switcha, ok pretp.

OBJAŠNJENJE RADA
- U_1 - neregulirani ul. napon; U_2 - regulirani izl. napon (DC)

T_1 vodi:



- jer je U_1 = konst (neregulirani) → struja kroz N_p linearno raste

$$U_1 - U_{CES} = L_P \frac{\Delta I_P}{t_V}$$

(vidi graf i_C)
I pretpostavka da $i_C(t=0^+) \neq 0$ jer dio energije u sustavu postoji od prije (preko struje i_{LX}!)

- što je tada s diodom D_1?

$u_{D1} = ?$

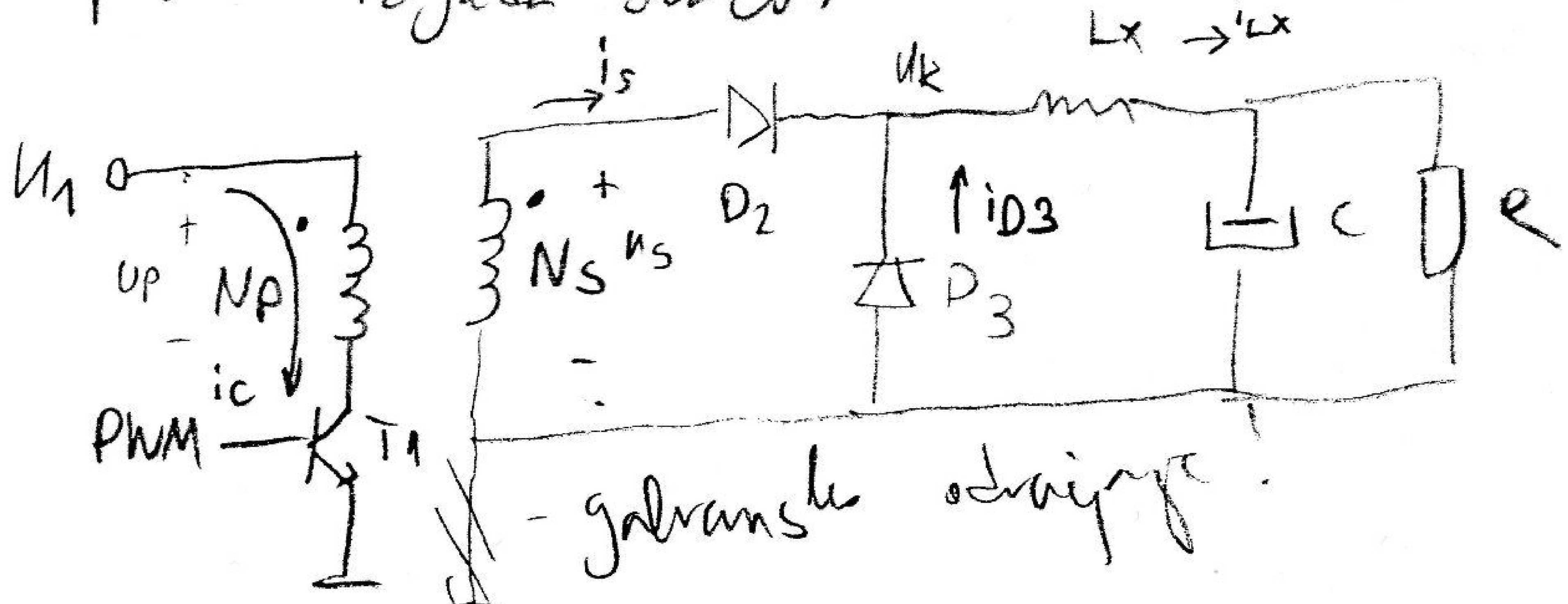
N_R i N_P su magnetski povezani (tako se i proizvode svici!)

$$u_{D1} = \varphi_{D1+} - \varphi_{D1-} =$$
$$= 0 - \left(U_1 + \frac{N_R}{N_P}(U_1 - U_{CES})\right)$$
= napon na primarnom svitku
$$= -\left[U_1 + \frac{N_R}{N_P}(U_1 - U_{CES})\right]$$

⇒ očito je dioda reverzno polarizirana i struja ne teče niti kroz D1 niti kroz N_R ⇒ $i_{D1} = \emptyset$

⇒ zanemarujemo gornji dio sklopa

⇒ sklop sada izgleda ovako:



- što je sa sek. krugom?

$$U_S = \frac{N_S}{N_P}(U_1 - U_{CES}) \quad \text{(jasno)}$$
$$U_S > \emptyset$$

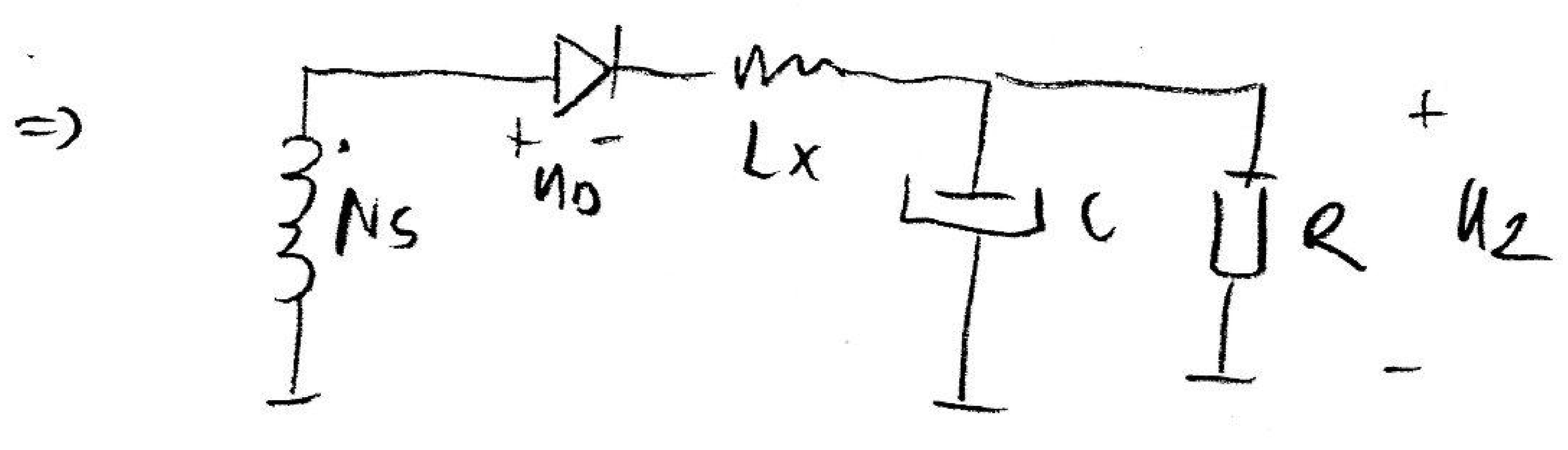
- što je sa D_2?
⇒ ako je $U_S - U_K > U_D$, onda je prop. polarizirana

→ PRETPOSTAVKA je da su N_P i N_S odabrani tako da na N_S uvijek bude dovoljno velik napon da drži D2 prop pol za vrijeme t_V

→ $U_K = U_S - U_D$

- jer U_K nije $< -U_D$, za vrijeme t_V D_3 je CIJELO VRIJEME OFF

⇒



$\boxed{\text{SW-2a str 3}}$

- struja sekundara isto linearno raste u vremenu

$$u_s - u_0 - u_2 = L_x \frac{\Delta i_s}{t_v}$$

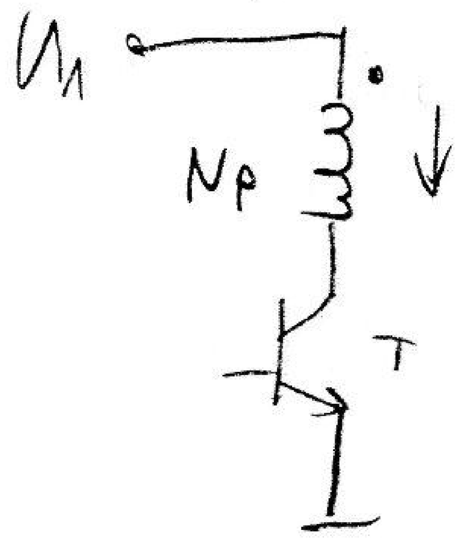
- struja kroz zavojnicu:

$i_{Lx}(t) = i_s(t)$ za vrijeme t_v

- struja primara
  - u trenutku $t=0^+$, $i_L \neq 0$ zato jer kroz sekundar teče struja $I_{Lx} > 0$, a prim. jedn. $\frac{N_2}{N_1} = \frac{I_1}{I_2}$ u primaru poteče struja zbog povr. djelovanja sekundara (koji radi u kontin. režimu) u primar
  - → $I_{pm} = \left(I_2 - \frac{\Delta I_{Lx}}{2}\right)\frac{N_s}{N_p}$ (poč. struja primara zbog p.v. sa sekundara)
  - → nakon toga I_p linearno raste

T_1 prestane voditi

- kada ne bi bilo diode D1, što bi se desilo?
  - poznat je problem prekidanja struje kroz zavojnicu relejem i tranzistorom:



$$\frac{L_p i_p^2(\emptyset)}{2} = \frac{C_{ras} U_{PREN}^2}{2}$$

↳ struja prestaje trenutno teći, a prenapon koji se pojavi je:

nadprosječno vel. L

$$U_{PREN} = \sqrt{\frac{L_p i_p^2(\emptyset)}{C_{ras}}}$$

vel. struje

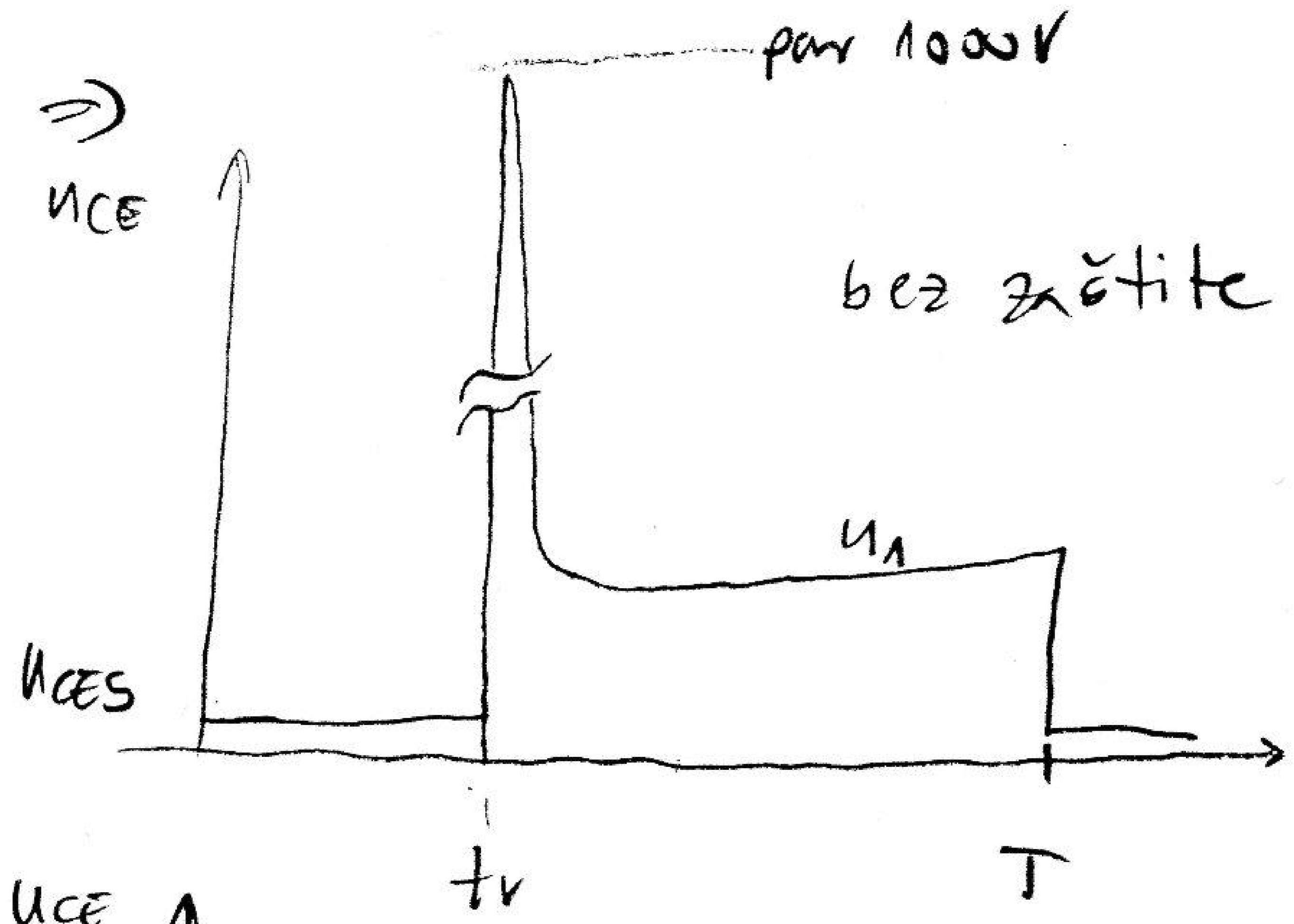
↳ ispodprosj. mali C

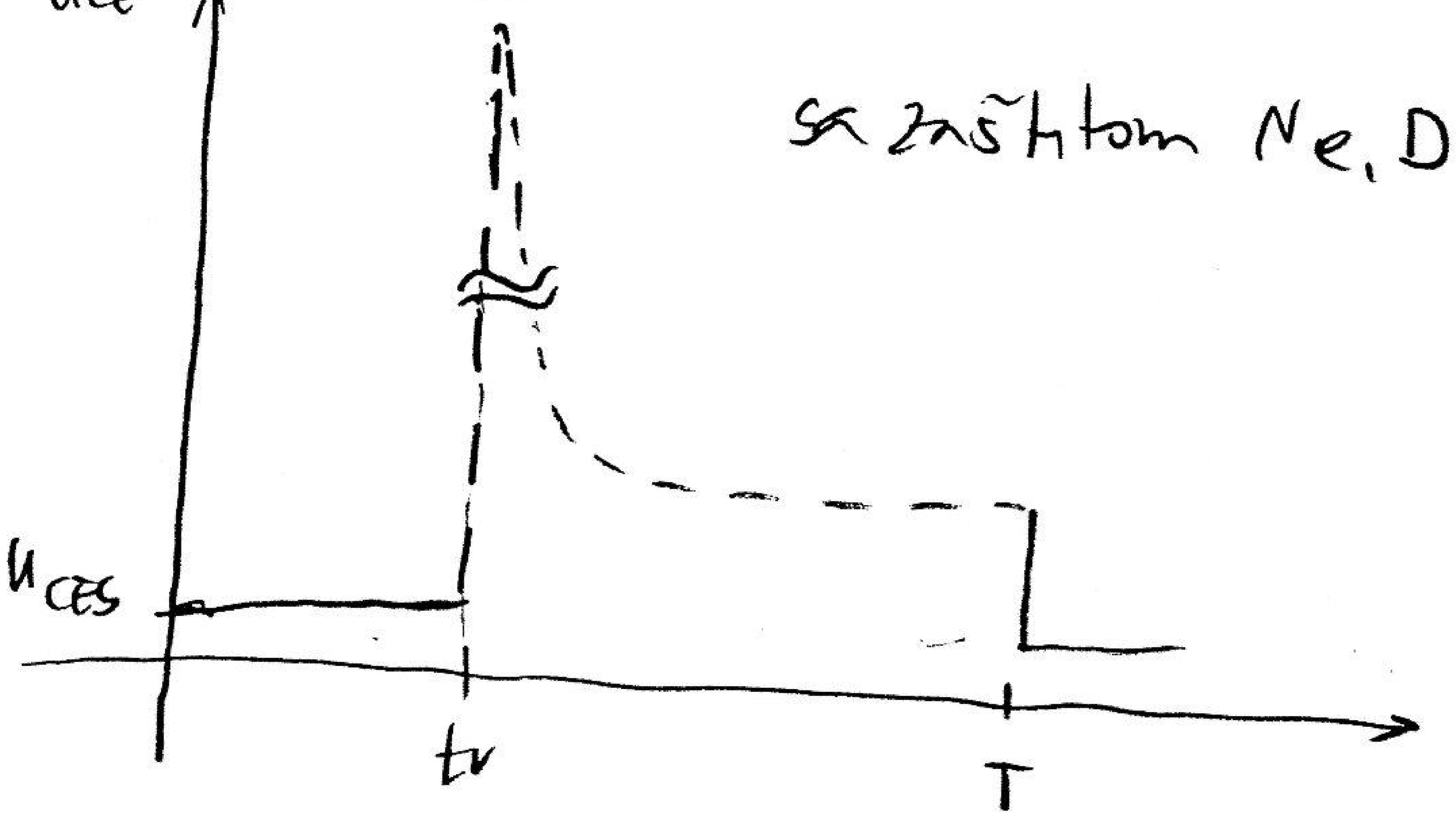
↓ do par 1000V

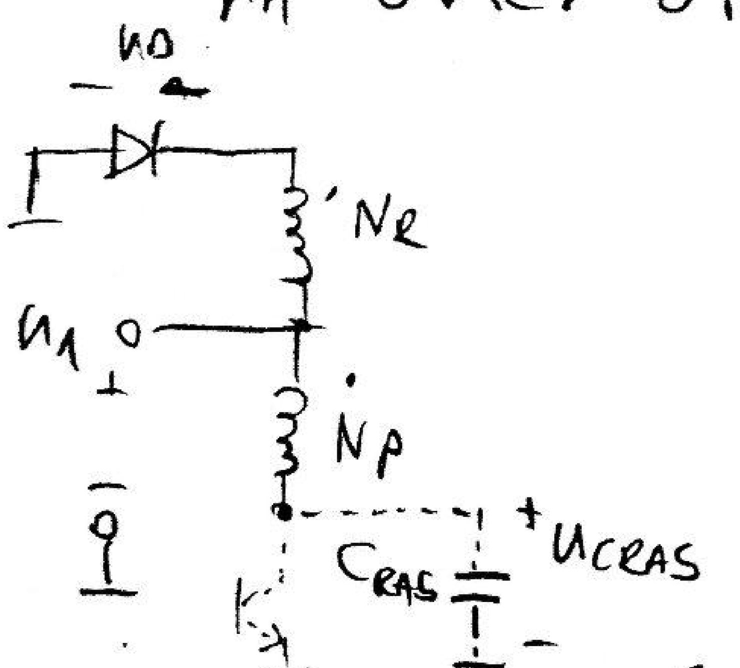
(to je spike, koji se exp. izbija na vrijednost U_1 stac. stanja)

- problem je isprazniti ~~za~~ energiju zavojnice pohranjenu u magn. polju

→ uloga N_R i D_1 je ČISTA ZAŠTITA!







- u rasutu spike naglo (gotovo trenutno) raste

⇒ koliki je onda u_{D1}?

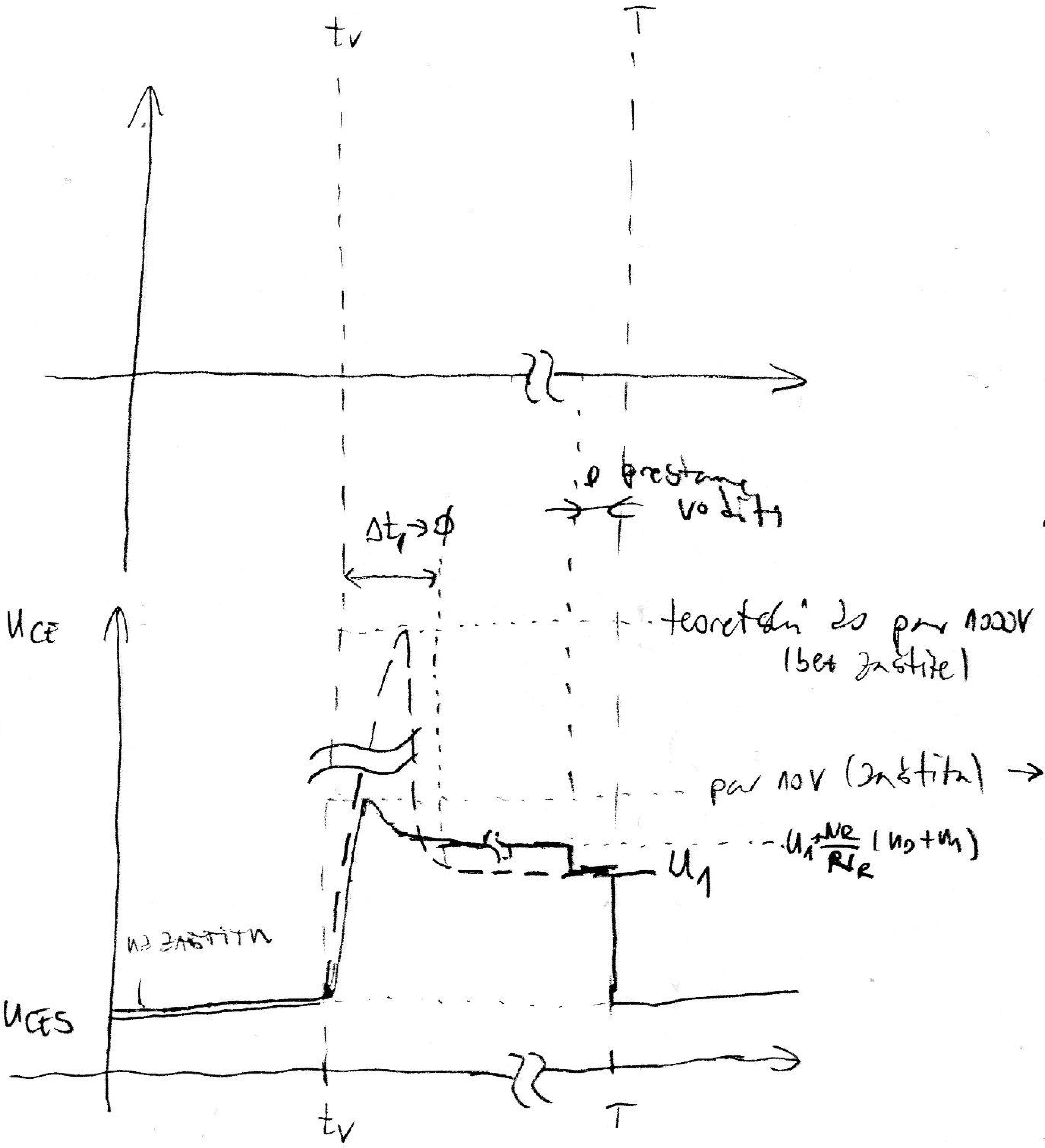
$$\boxed{|u_{D1}|} = \varphi_{D1+} - \varphi_{D1-} =$$

$$= 0 - \left[U_1 + \frac{N_R}{N_p}(U_1 - U_{CRAS}) \right] \simeq$$

$$\approx \left| U_{CRAS} \gg U_1 \right| \approx -\left[u_1 + \frac{N_R}{N_p} U_{RAS} \right] \approx$$

$$\approx \frac{N_R}{N_p} U_{CRAS}$$

SW-2a str 4



Δt_1 – tu bi T pregorio trenutačno

→ tu, tom času U_{CEAS} (de facto U_{CE}) dosiže vrijednost pri kojoj prevladava utjecaj U_1 na rev. pol. diode D_1 prema:

$$U_{D1} = -\left[U_1 + \frac{N_R}{N_P}(U_1 - U_{CE})\right]$$

– 2 ekstrema:

$U_1 >> U_{CES} \to U_{D1} < 0$ D1 NE VODI (zanemarimo t_v)

$U_1 << U_{CES}$ (U_{CEAS}!) (isklj. T!) $\to U_{D1} > 0$ D1 VODI (zanemarimo t_v)

– ne očekuje se ekstremni U_{CEAS}, već dovoljno narasti, proradi zaštita (typ pri par 100V U_{CE}) → treba samo odabrati nešto robusniji T

→ kritični napon U_{CE} (U_{CEAS}) je:

$$U_D = -\left[U_1 + \frac{N_R}{N_P}(U_1 - U_{CE})\right]$$

$$U_D + U_1 = \frac{N_R}{N_P}(U_{CE} - U_1)$$

$$\boxed{U_{CE} = \frac{N_P}{N_R}(U_D + U_1) + U_1}$$

pri tom naponu na C_{RAS} D_1 provede!

↳ iz ovoga se odmah vidi kako se odabiru N_P, N_R

→ $\frac{N_P}{N_S}$ – određen s $\frac{U_1 - ul}{U_2 - izl}$

– što su veći N_P i N_S, manje je rasipanje silnica, bolji prijenos energije ($L_{\sigma_{P,S}}\downarrow$)

→ povoljnije je što manji odnos $\frac{N_P}{N_R}$ jer će se tada pojaviti manji prenaponi na tranzistoru (prije negoli proradi zaštita) ⇒ $N_P\downarrow$ povoljniji, što je u opreci suprotnosti za zahtjevom da ~~N_P~~ N_P i N_S budu što veći! (typ $N_P >> N_S$, jer se spušta U_1 na U_2)

SW-2a str 5

- međutim, prijelazni pojava Δt_1 (trenutak kad prestane voditi T, do trenutka kad provede D1, traje gotovo trenutačno, i onda provede dioda napon U_{CE} više nije definiran s U_{CEsat}, nego povratnom spregom namota N_R i N_S:

$$u_P = \frac{N_P}{N_R} u_R = \frac{N_P}{N_R}[-u_D - u_1]$$

$$\boxed{u_{CE}} = \varphi_C - \varphi_E = \varphi_C = u_1 - u_P = u_1 - \left[-\frac{N_P}{N_R}(u_D + u_1)\right] = \boxed{u_1 + \frac{N_P}{N_R}(u_D + u_1)}$$

- napon na U_{CE} kad D provede

- napon prenapona U_{CE} se spušta na navedenu stacionarnu vrijednost (samo za vrijeme vođenja diode)

- što je sa strujom diode?
  - čim se dioda otvori, kroz nju poteče velika struja određena energijom magnetskog polja zajedničkog polja N_P i N_R (to je zato jer se energija mora negdje isprazniti, a više ne može to na rasipnoj kapacitivnosti jer je zaštita ograničila U_{CE}!)
  - ⇒ zato je u početnom času struja kroz diodu maksimalna: određena energijom spremljenom u magn. polju (energija magnetizacije)
  - vrijedi (za $i_D(t)$):

$$\boxed{u_1 + u_D = L_R \frac{\Delta I_R}{t_R}}, \quad \Delta I_R \text{ - veličina (visina) struje na diodi}$$

$$\boxed{\Delta I_R = \frac{N_P}{N_R} \Delta I_{pm}}$$

↳ struja magnetiziranja primara

DC-pol magnet. ↑ stanje sklopke T

- ovdje je položena t_R je $\frac{N_P}{N_R}$ također što manji (zbog poč. struje kroz D)

ΔI_{pm} NIJE struja i_C u trenutku isklj. T!!!

u času isklj.: i_C $I_C = I_P + \Delta I_{pm}$

↳ 23 str

37 str

$\boxed{\Delta I_{pm} < I_C}$

↓

VIDI POSLIJE PRORAČUN

- koliki je napon U_S dok D_1 vodi?

$$\frac{u_S}{u_R} = \frac{N_S}{N_R} \Rightarrow u_S = \frac{N_S}{N_R} u_R = \frac{N_S}{N_R}(-u_{D1} - u_1) = -\frac{N_S}{N_R}(u_{D1} + u_1)$$

- jer je $u_S < 0$, D_2 je zaporno polarizirana
- međutim, u tom slučaju i_{Lx} treba negdje nastaviti teći pa se automatski otvara dioda D_3:

$$\boxed{u_2 + u_D = L_X \frac{\Delta I_{Lx}}{t_R}} \rightarrow \text{je kad prestane teći } i_D, \text{ svejedno se } D_2 \text{ neće otvoriti (vidi poslije)}$$

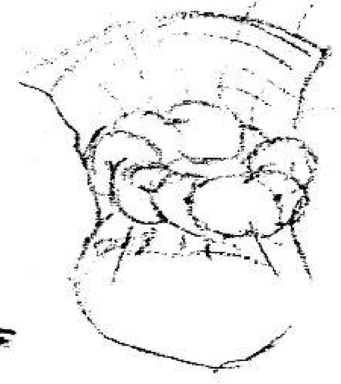
- i_{D_3} - preuzima i_{Lx}

SW-2a-str 6

- nakon što prestane raditi zaštita (Dioda D_1), u sek. krugu se ništa ne mijenja pa je i dalje D_2 nepr. polarizirana (Kj. pravilo je U_S da bi provela, $U_S = \emptyset$)
- u primarnom krugu više uopće ne teče struja $\Rightarrow$ $\boxed{U_{CE} = U_1}$
- napon na D_1: (Np je KS za DC)

$$u_{D1} = \varphi_{D1+} - \varphi_{D1-} = 0 - [U_1 - \underbrace{U_R}_{\emptyset \text{ (DC i za Nr i za Np)}}] = -U_1$$

- $U_S = \emptyset$ jer je sada U_P i $U_R = \emptyset$



↑ OBJAŠNJENJE RADA KONVERTORA

↓ PRORAČUN

a) T vodi

$0 \le t \le t_v$ (1)

$$\boxed{\frac{N_S}{N_P}(U_1 - U_{CES}) - U_D - U_2 = L_X \frac{\Delta I_{LX}}{t_v}}$$

b) T ne vodi

$t_v \le t \le T$

$$-U_D - U_2 = L_X \frac{-\Delta I_{LX}}{t_n}$$

$$\boxed{U_D + U_2 = L_X \frac{\Delta I_{LX}}{T - t_v}} \quad (2)$$

- PRETPOSTAVKA - izlazni "BUCK" radi uvijek u kontinuiranom režimu

(ne samo radi lakšeg proračuna, već i zato jer u stvarnosti se previše energije troši na zaštitnom krugu ako izlazni Buck radi diskont.)

$(1),(2) \Rightarrow$

$$\boxed{\delta = \frac{t_v}{T} = \frac{U_2 + U_D}{\frac{N_S}{N_P}(U_1 - U_{CES})}} \quad (3)$$

$(3) \Rightarrow$

$$\boxed{U_2 = \frac{N_S}{N_P}(U_1 - U_{CES})\frac{t_v}{T} - U_D} \quad (4)$$

(kao da imaš neki PWM trafo u idealnom sklopu (T i D idealni)

$U_2 \doteq \frac{N_S}{N_P} U_1 * \text{DUTY CYCLE}$)

↑ osnovne formule

→ $\boxed{N_P = ?}$ - iz čega proračunati potreban broj primarnih zavoja?

$\frac{N_P}{N_S}$ određuje U_2, ali tu se radi o proizvoljnom aps. broju N_P i N_S, bitan je samo omjer

- broj N_P ima veze sa magnetskim tokom
- jedina jednadžba u kojoj ima neke veze s magnetskim tokom primara je:

struja primara koja ima veze s promjenom (promjenjivih komponenti struje primara) Iem-posljedica Is!

$$\boxed{U_1 - U_{CES}} = L_P \frac{\Delta I_{PM}}{t_v} = N_P \frac{\Delta \Phi_P}{t_v} = \boxed{N_P Q \frac{\Delta B}{t_v}}$$

SW - 2a - str 7

- uz zadane U_1, U_{CES}, Q, promjenjive t_v, N_p, — prikladnom odabira treba odrediti kakav N_p da ΔB nikad ne bude veći od B_{max}! prikladnu kada

dzer

(jer bi išla cc u zasićenje, da ne bi se dobro preneslo E, $\eta \downarrow$)

potreban B_m za održavanje regulacije izl. napona!

$$\Rightarrow \boxed{N_p = \frac{(U_1 - U_{CES})\, t_v}{Q \cdot B_m}} \quad / \text{tj.} \quad B_m = \frac{(U_1 - U_{CES})\, t_v}{Q\, N_p}$$

~~$U_1 \uparrow \Rightarrow t_v \downarrow$ ok~~

~~$U_1 \downarrow \Rightarrow t_v \uparrow$ do 0,4 $\Rightarrow$ rešenje s N_p~~

$\Downarrow$ (5)

$(U_1 - U_{CES})\, t_v = \text{konst}!$

(slijedi iz (4)!)

- objašnjenje: uz promjenjivi U_1 ako se želi imati U_2 regulirano (a tome se inherentno teži zbog $I N N$ regulacije i povr. veze), ako nije dovoljno velik ulančani tok (ϕ) stvoren zbog velikog N_p, to se pokušava kompenzirati većim B_m; ako B_m naraste preko određene granice, FC jezgra ulazi u z.s i $\eta \downarrow$, ali ne i samo to, nego i $U_2 \downarrow$, jer se ne može dobiti dovoljan ϕ (jer bi B_m prema formuli trebao rasti, ali je to fizikalno ograničeno petljom histereze t.d. bi DC-DC conv. prestao ispravno raditi)

automat. regulacija parametra t_v

potreban B_m raste!

$\Rightarrow$ ~~Zato~~: $N_p \downarrow$, $B_m \uparrow$

- ako $N_p \downarrow$ previše, $B_m \uparrow$ do B_{max} i ne može dalje $\Rightarrow$ tražimo N_{pmin}! (cjelobrojni)

$t_{vmax} = 0{,}48 \Rightarrow$ da se osigura pražnjenje N_R ($t_R < T - t_v$)

- za odabrani $Q = 0{,}5\ cm^2$ i konst. $U_{CES} = 0{,}5\ V$, ~~pa~~ i definiran $B_{max} = 0{,}2\ T$, tražimo N_{pmin} za najgori slučaj ($U_{1\,min} \Rightarrow N_{pmin}$):

ne trebamo, jer ćc regulator u p.v., ako im je B_m i N_p premali i podizanjem $t_v \downarrow$ max vrijednost pokušati regulirati U_2 napon; ali t_v ne smije biti veći od 0,4

$$\boxed{N_{pmin}} > \frac{(U_{1min} - U_{CES})\, t_{vMAX}}{Q \cdot B_{MAX}} = \frac{(210 - 0{,}5) \cdot 8 \cdot 10^{-6}}{0{,}5 \cdot 10^{-4} \cdot 0{,}2} = \underline{167{,}6}$$

$\Rightarrow$ ovo je zavisni parametar sustava $f(U_1)$

bezazvisni parametar t_{vmax}

$\boxed{t_{vmax}(U_{1min}) = 0{,}4T = 8\mu s}$

$(U_1 \downarrow, t_v \uparrow)$ (prema (5))

- treba biti cjelobrojan

$\boxed{N_p > 168}$ $\Rightarrow N_p \uparrow$, $B_m \downarrow$, $t_v \downarrow$

- uoči: ako povećamo $f \uparrow$ rada DC-DC conv. (uz $\delta = \text{konst}$) $\Rightarrow$
$\Rightarrow t_{vmax} \downarrow \Rightarrow N_{pmin} \downarrow$

$\boxed{f \uparrow, N_p \downarrow}$ - ako radiš na VF, to ti manje materijala treba za trafoe (razlog rada DC-DC convertera na VF!)

SW-2a - str 8

- $\boxed{N_S = ?}$

- o čemu to ovisi:
- N_P je inherentno ovisan o B_{max}
- odnos $\frac{N_P}{N_S}$ je određen odnosom U_1, U_2 prenošenja:

→ iz (4):

$$U_2 = \frac{N_S}{N_P}(U_1 - U_{CES})\frac{t_v}{T} - U_D$$

- N_P, U_{CES}, U_D - fiksni
- ekstremni slučajevi:

U_{1max} → uz N_S=konst se kompenzira $t_v \downarrow$
→ ($t_{vmin}=0$, nije problematičan uvjet)

U_{1min} → uz N_S=konst — " — " — $t_v \uparrow$
→ t_{vmax}
↳ to je ograničavajući uvjet

→ traži se N_{Smin}

$$N_{Smin} \geq N_P \frac{U_2 + U_D}{U_{1min} - U_{CES}} \cdot \frac{T}{t_{vmax}} = 168 \frac{5+0.8}{210-2.5}\frac{20}{8} = 11.63$$

U_{1min} - nez.; t_{vmax} - ovisan o V_1

$\boxed{N_{Smin} = 12}$ (prvi veći cijeli broj)

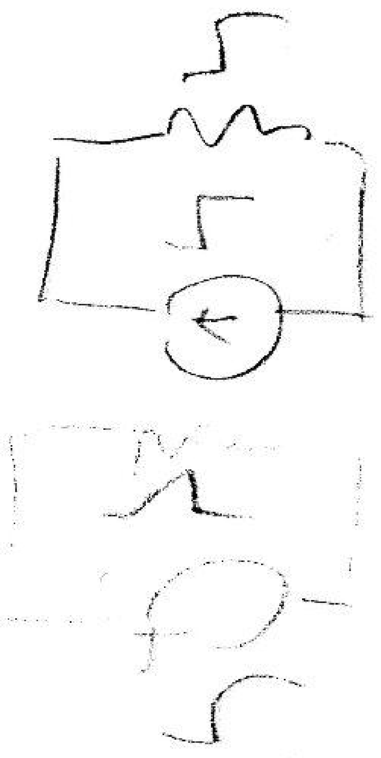
→ novi t_{vmax} će biti nešto manji (bolje) obzirom na izbor N_S, N_P:

$$t_{vmax} = T\frac{N_P}{N_S}\frac{U_2 + U_D}{U_{1min} - U_{CES}} = \boxed{7.752\mu s} < 8\mu s$$

* * *

- ako je na kraju intervala nevođenja i_P, u_P i $u_S = 0$, otkud je onda $i_C(t=0^+) \neq 0$
→ zbog energije spremljene u magn. polju trafoa?
NE!, nema struje kroz trafo ($u_P, u_S = 0$), nema ni energije!
→ odgovor je u prebacivanju vođenja u sek. krugu: u slučaju kad T_1 provede, kroz L_x URGENTNO mora poteći struja koja tjera D_3 i otvori D_2; pojavi se napon na U_S koji tjera D_3 i otvori D_2; struja može samo istim, uz primjenjeni U=konst na L, struja može samo NE-TRENUTNO rasti (prirodan idealni nap. izvor na L); ali ako se primijeni u $t=0^+$ idealni strujni (ne naponski) izvor (tranzijentni L_x), onda će u trenutku $t=0^+$ poteći ugrađena struja koja je narinuta

SW-2a str 9



– u $t=0^+$ vrijednost i_c je preslikana s $I_s (I_{Lx})$:

$$\boxed{I_{pm} N_p = \left(I_2 - \frac{\Delta I_{Lx}}{2}\right) N_s} \quad (6)$$

↳ $i_c(t=0^+)$

PRORAČUN NAZIVNIH U/I vrijednosti EL. KOMPONENTI KONVERTORA

1 – max struja I_c tranzistora T_1

– izlazni BUCK radi uvijek u kont. režimu; uz realne vrijednosti:

$$\frac{\Delta I_{Lx}}{I_2} = \frac{\Delta I_{Lx}}{I_{Lx}} \ll 1$$

$\Rightarrow (6) \Rightarrow \boxed{I_{pm(MAX)}} \approx I_{2max}\frac{N_s}{N_p} = 5\cdot\frac{12}{168} = \boxed{357mA}$ (poč. i_c u $t=0^+$)

– dokle ta $i_c(t)$ raste?

→ ovisi o $\Delta I_{\mu p}$ (struji magnetiziranja primara):

$$\boxed{L_p = A_L \cdot N_p^2} = 2{,}5\cdot10^{-6}\cdot168^2 = \boxed{70{,}56mH}$$

– iz: $U_1 - U_{CES} = L_p \frac{\Delta I_{p\mu}}{t_v} \Rightarrow \Delta I_{p\mu} = \frac{(U_1-U_{CES})t_v}{L_p} = ?$

→ tražimo slučaj $\Delta I_{p\mu}$ je MAX

→ za koji U_1, t_v je to tako?

→ iz (4):

$$\underbrace{U_2}_{konst} = \underbrace{\frac{N_s}{N_p T}}_{konst}(U_1 - U_{CES})t_v - \underbrace{U_D}_{konst} \Rightarrow (U_1-U_{CES})t_v = konst!$$

U_1... nezavisna varijabla

$t_v = t_v(U_1)$, rikta se tako da uvijek bude $(U_1-U_{CES})t_v$ konst (P.V.)

prije smo već rekli.

$$\Rightarrow \Delta I_{p\mu MAX} = \boxed{\Delta I_{p\mu}} = \frac{(U_{1min}-U_{CES})t_{vMAX}}{L_p} = \frac{(210-0{,}5)\cdot7{,}752\cdot10^{-6}}{70{,}56\cdot10^{-3}} = \boxed{23mA}$$

→ $= konst \neq f(U_1, I_2)$

– dobro je uočiti:

$A_L \uparrow \Rightarrow L_p (N_p = konst) \uparrow \Rightarrow \Delta I_{p\mu} \downarrow$ (sustava određeny s U_1, U_2, t_v dozv.)

$\Rightarrow$ manje strujno opterećenje sustava (T)

SW-2a str 10 | max. i_C - struje pile u najgorem dizajn (max opt. T)

$\Rightarrow$ $\boxed{I_{CM}(MAX) =}$ $= I_{pM,max} + \Delta I_{pM} =$ $\boxed{380 mA}$

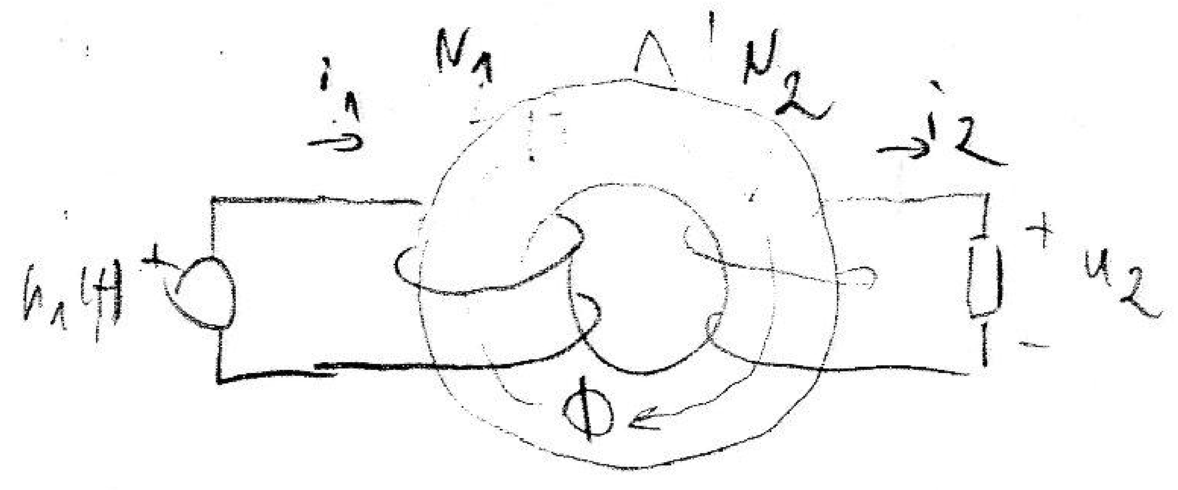
$I_{cm} = i_c(t=0^+) + \Delta I_{pM}$

- malo logično pojašnjenje rezultata
  - na strujno opt. T više utječe struja I2 porastom većom I2 zavojnice Lx) nego porast struje zbog konst. narinutog napona

B) DIODA D_1

- služi za zaštitu; nadnadzbe (relevantne) dobivaju se iz sljedećeg razmatranja

DIGRESIJA:



ϕ = konst - mijet - jer se prema Lenzu sustav opire promjeni (u nekom trenutku) magn polja induciranjem napona koji se suprotstavlja promjeni (t.d. se ϕ ne uspije mijenjati skokovito nego gradualno)

$\rightarrow$ uzrok magn. toka ϕ:

$u_1 \rightarrow$ tj. $i_1 \rightarrow$ tj. H:

$\Rightarrow$ $\boxed{\phi \sim N_1 \cdot i_1}$

$\rightarrow$ međutim, kada ne bi bilo sek. strane, to bi bilo točno!

$\rightarrow$ promjena ϕ $\left(\frac{d\phi}{dt}\right)$ u sekundaru inducira takav napon da se napon struje i_2 koja će htjeti prigušiti djelovanje i_1:

$N_2 i_2$ (LENZOVO pravilo)

$\Rightarrow$ $\boxed{\phi \sim N_1 i_1 - N_2 i_2}$ $\Rightarrow$ $\phi \sim N_1 i_M = N_1 i_1 - N_2 i_2$

i_M - "ekvivalentna" struja magnetiziranja

- kod idealnog trafo je $i_M = \phi$! (nema histereze)
- kod realnog nikad nije tako:

$\boxed{N_1 i_M = N_1 i_1 - N_2 i_2}$

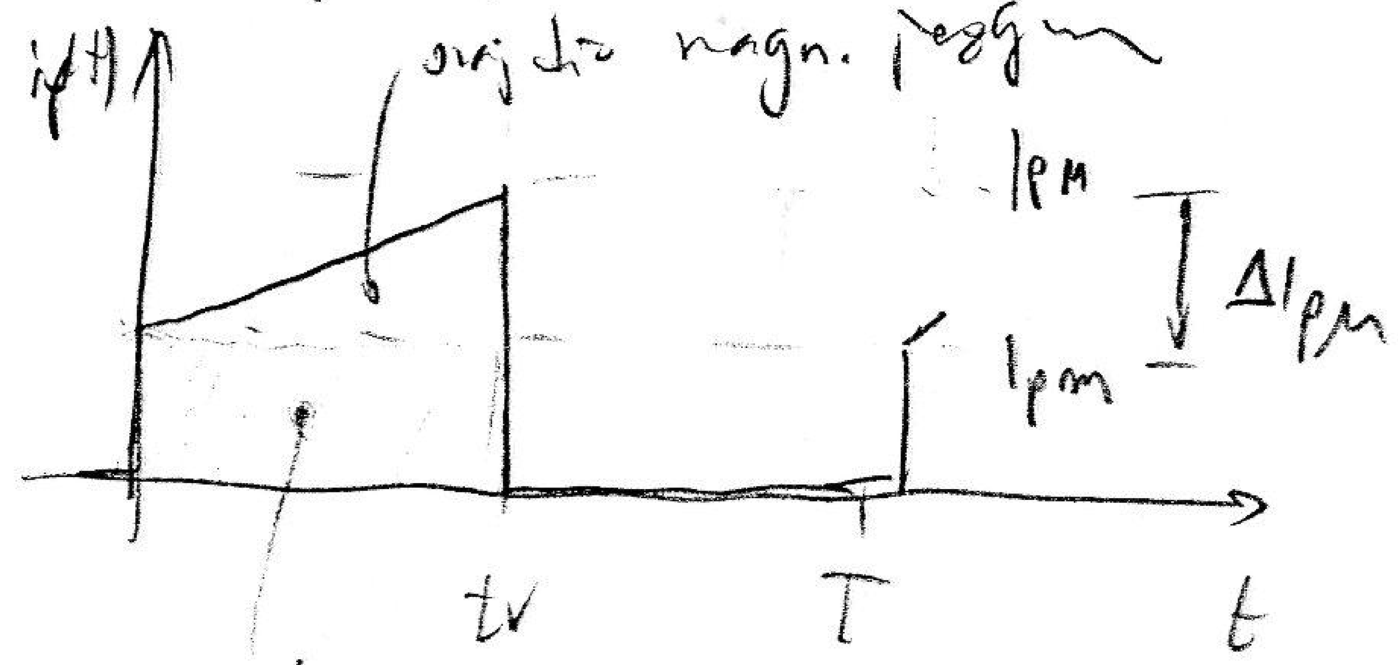
SW-2a str 11

- mi ćemo pretpostaviti da je:

$$\boxed{N_p I_{pm}} = N_s\left(I_s - \frac{\Delta I_{Lx}}{2}\right) = \boxed{N_s I_s}$$

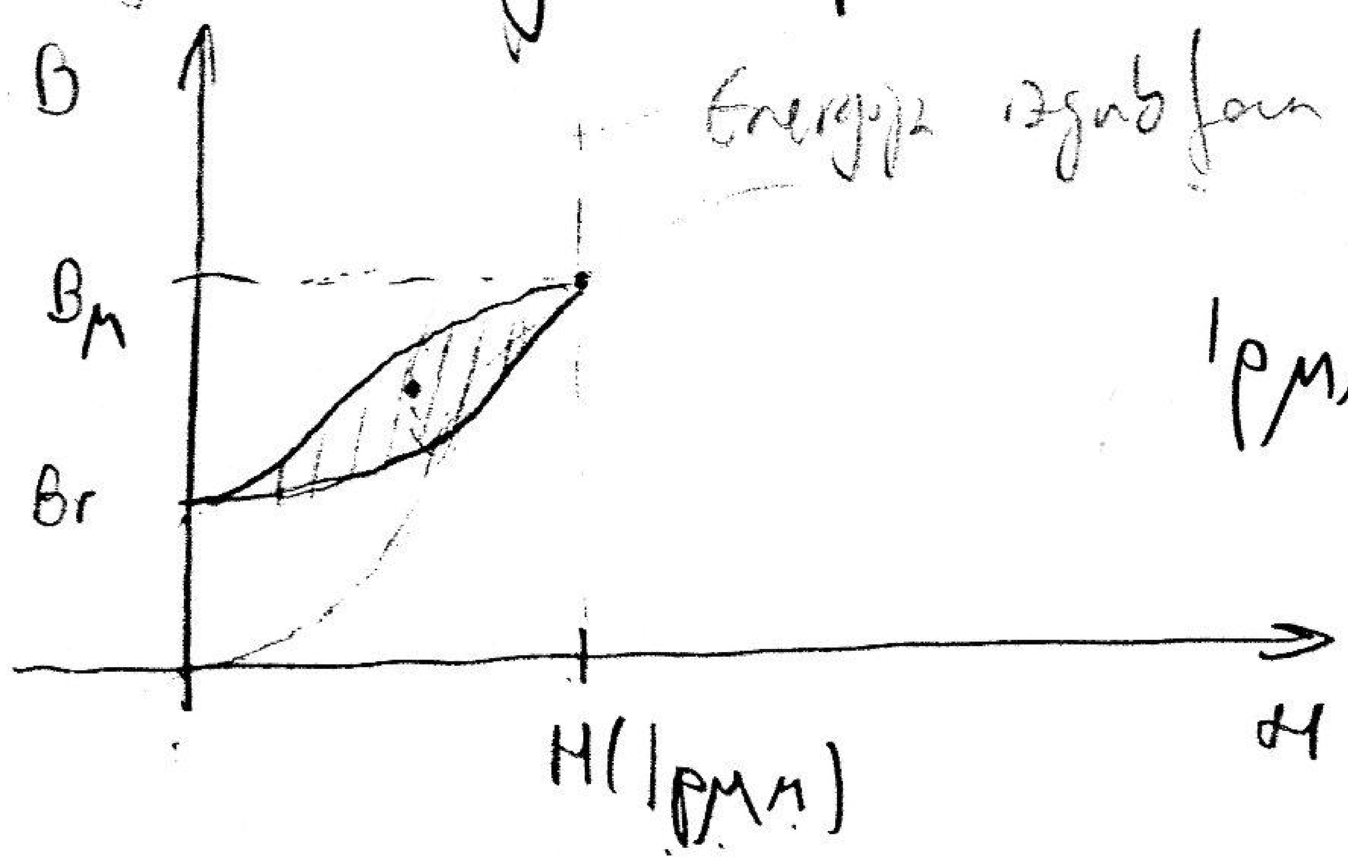
→ to znači da se utjecaj konstantnog dijela struje magn. (u primaru) i struja sek. međusobno poništava tj. da je $\boxed{\Phi(I_{pm}, I_s) = 0}$

- ciklus magnetiziranja jezgre nastaje zbog onog dijela struje $i_p(t)$ koji je nastao zbog primjene napona $U_1 - U_{CES}$ na primar (i struje koja je rasla).



ovaj dio struje $i_p(t)$ ne magnetizira jezgru jer njegov utjecaj poništava $i_s(t)$!

→ tzv. ISTOSMJERNO magnetiziranje (samo u 1. kvadrantu)



$I_{pMM} = \Delta I_{pM}$

- jednadžbe:

(7) $\boxed{U_1 - U_{CES} = L_p \frac{\Delta I_{pM}}{t_v}}$ — vrijednost iščitana iz dijagrama

(8) $\Delta I_{pM} \cdot N_p = I_{RMM} N_R$ → u času $t = 0^+$ u R-namotu poteče struja I_{RMM} zbog posljedice magnetiziranosti jezgre (u tom času prestanu teći I_{pm} i I_s, time nijedan od ta dva međusobno poništavajuća toka ne ostaje aktivan)

(9) $\boxed{U_1 + U_D = L_R \frac{I_{RMM}}{t_R}}$ — demagnetiziranje jezgre

$$L_R = L_p \frac{N_R^2}{N_p^2}$$ (jer imaju isti A_L jezgre)

SKW 2a - str 12

- prema (7), (8), (9):

$$\frac{U_1 - U_{CES}}{U_1 + U_D} = \frac{L_P}{L_R} \frac{\Delta I_{PM}}{I_{RMM}} \frac{t_R}{t_V} \Rightarrow \boxed{t_R} = \frac{N_R}{N_P} \frac{U_1 - U_{CES}}{U_1 + U_D} t_V \approx \frac{N_R}{N_P} t_V \quad (10)$$

$\frac{L_P}{L_R} \rightarrow \frac{N_P^2}{N_R^2}$, $\frac{\Delta I_{PM}}{I_{RMM}} \rightarrow \frac{N_R}{N_P}$

t_R je to veći što je t_V veći i $\frac{N_R}{N_P}$ veći

$T - t_{Vmax} \rightarrow$ najgori slučaj

$\Rightarrow$ t_R ne smije prijeći $T - t_{Vmax}$ vrijednost
(jer bi se prešlo u kont. režim promaratkl)
(ili si pumpalo i_C do nevidenih razmjera
(nestabilnost sustava)

- anyway:
  - ne smije se pretjerati u N_R da ne bi preraslo t_R preko dozvoljenih granica

$N_R \uparrow$ dobro! 3:
- što se samog N_R tiče, povoljno da je što veći zbog!
  - smanjenog naponskog opterećenja T - je rampe procesi značajnija (pri manjem $U_{CE,RDS}$) $U_1 + \frac{N_P}{N_R}(U_1$
  - smanjeno naponsko opterećenje diode D_2 (rev.pol.: $-\frac{N_S}{N_R}(U_1 + U_D)$) $\hookrightarrow N_R \uparrow$, $U_S \downarrow$
  - D_3 - nema veze
- smanjeno strujno opt. diode D_1 ($\Delta I_{PM} \frac{N_P}{N_R}$)

ipak bolje je $N_R \uparrow$:1

$N_R \uparrow$ loše!
- loše - porećanje naponskog naprezanja D_1 ($-[U_1 + (U_1 - U_{CES}) \frac{N_R}{N_P}$)

$\Rightarrow (10) \Rightarrow$

$$N_R \doteq N_P \frac{t_R}{t_V}$$

- uz konst t_V, ako povećamo $\frac{N_R}{N_P}$ mora $t_R \uparrow$ (a t_V = konst) i mora biti da $T - t_V < t_R$
- traži N_{RMAX}
- najgori slučaj: t_{Vmax}, jer je tada uz t_{Vmax} = konst potreban najmanji N_R da se dese problemi
N_R dakle mora svakako biti manje od:

$$N_R < N_P \frac{t_R}{t_{Vmax}}$$

, t_V je max za U_1 min, $\Rightarrow$ (u (10)):

$T - t_{Vmax} \rightarrow$ u graničnom slučaju

$$\boxed{N_{RMAX}} < = N_P \frac{U_{1min} + U_D}{U_{1min} - U_{CES}} \frac{t_R}{t_{Vmax}} = N_P \frac{U_{1min} + U_D}{U_{1min} - U_{CES}} \left(\frac{T}{t_{Vmax}} - 1\right) = 267{,}1 \Rightarrow$$

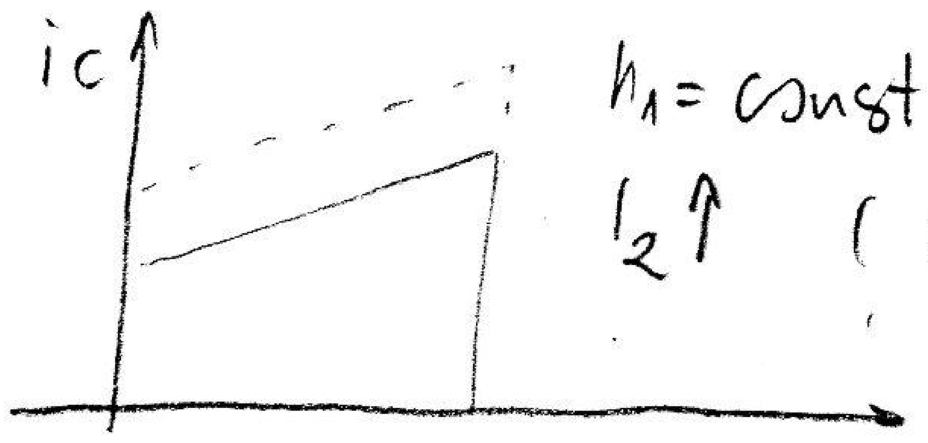
$$\Rightarrow \boxed{267}$$

SW-2a-str 13

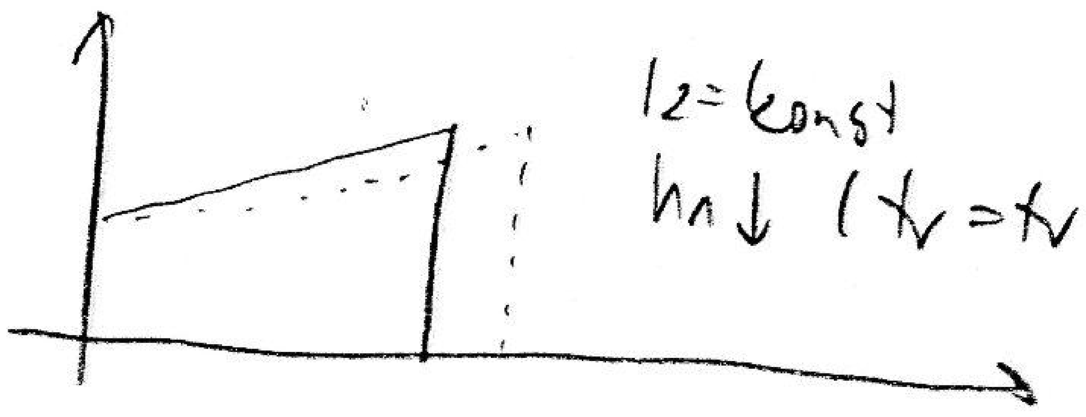
⇒ (prema (6)):

$$\boxed{I_{RMM}} = \Delta I_{pMM}\frac{N_p}{N_R} = 23\cdot 10^{-3}\,\frac{168}{267} = \boxed{14{,}5\,mA} = \boxed{I_{D1MAX}}$$

↓ struja opt. diode D1



$u_1 = const$ ($\Rightarrow t_r = const$)
$I_2\uparrow$ ($I_S = I_{Lx}\uparrow$, $\Rightarrow I_P = I_C\uparrow$)



$I_2 = konst$
$u_1\downarrow$ ($t_r = t_r(u_1)$, $t_r\uparrow$)

!!!

(T) $I_{C1MAX} = \boxed{380\,mA}$

$U_{CEMAX} = U_{1max} + \frac{N_P}{N_R}(U_{1max} + U_D) = 360 + \frac{168}{267}(360 + 0{,}8) = \boxed{582{,}0\,V}$

to je točno! → $\boxed{587}$

– dodatna komponenta zbog skoka: do 100V (zbog L_r i sl.)

(D1) $I_{D1max} = \boxed{14{,}5\,mA}$

$U_{D1Rmax} = U_{1max} + (U_{1max} - U_{CES})\frac{N_R}{N_P} = 360 + 359{,}5\,\frac{267}{168} = \boxed{931{,}4\,V}$

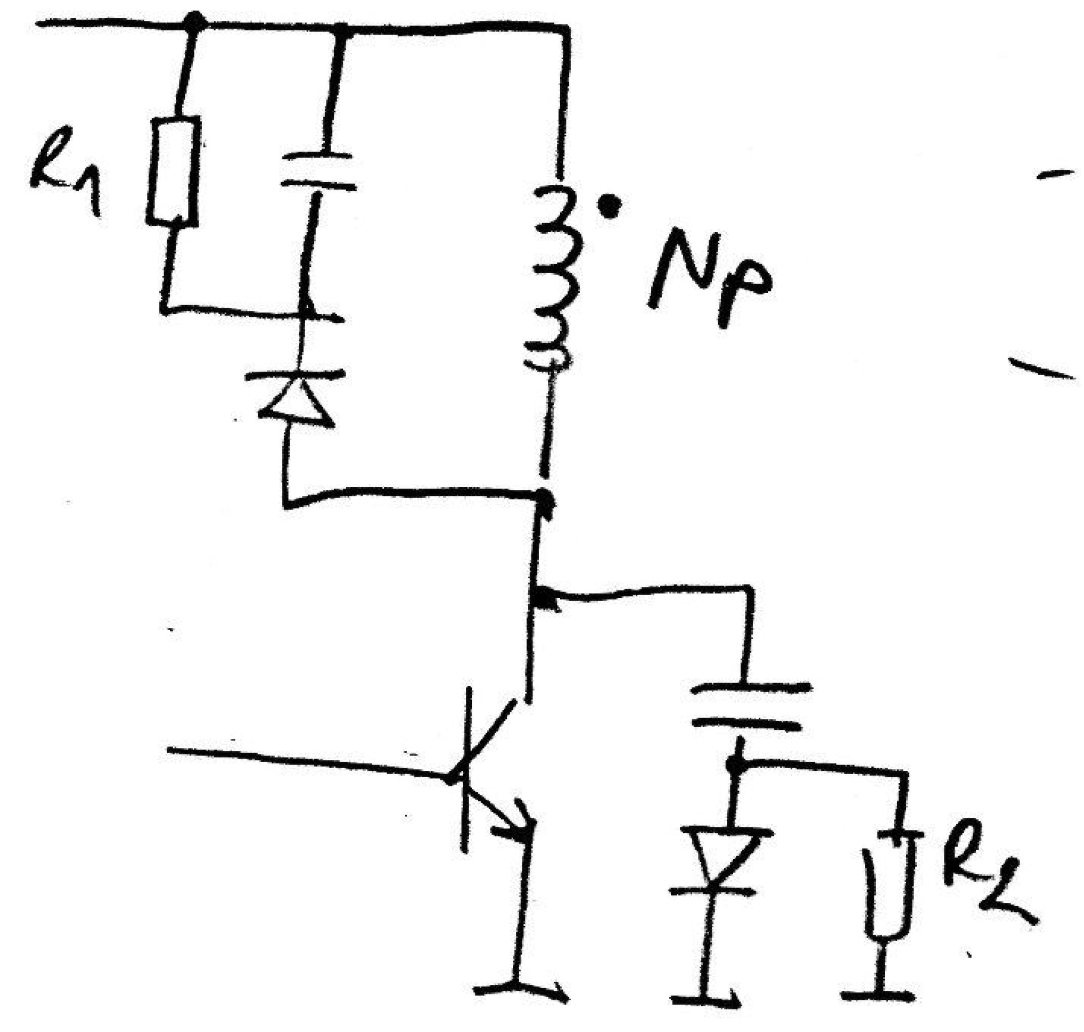
(D2) $I_{D2MAX} = I_{2MAX} + \frac{\Delta I_{Lx}}{2} \approx I_{2MAX} = \boxed{5A}$

$U_{D2RMAX} = (U_K - U_S)_{MAX} = -U_D + \frac{N_S}{N_R}(U_{1max} + U_D) = -0{,}8 + \frac{12}{267}(360 + 0{,}8) = \boxed{15{,}4\,V}$

(D3) $I_{D3MAX} = I_{2MAX} + \frac{\Delta I_{Lx}}{2} \doteq I_{2MAX} = \boxed{5A}$

$U_{D3RMAX} = U_{KMAX} = \frac{N_S}{N_P}(U_{1MAX} - U_{CES}) - U_D = \frac{12}{168}\cdot 359{,}5 - 0{,}8 = \boxed{24{,}9\,V}$

ZAŠTITA – alternativni način (bez N_R) 3)



– RCD umjesto N_R

– R_1, R_2 – disipiraju snagu, $\eta\downarrow$

SW-2a-SN14

PROCJENA UTJECAJA NAČINJENIH ZANEMARENJA NA η
(L_σ, zaštita, P_{Fe}, P_{Cu} i $P_{komutacije}$)

ULAZNA SNAGA: $P_1 = U_1 \cdot \left[\underbrace{I_{pm} + \frac{\Delta I_{pm}}{2}}_{\text{struja koja se vuče iz izvora}} \right] \frac{t_v}{T} \Big|_{U_1 = U_{1min}}$ (izvor)

U_1 — napon izvora U_1

(za što veći ..., izračunati ostale parametre (struje), t_v)

$\boxed{P_1} = 210 \left[0{,}357 + \frac{0{,}023}{2} \right] 0{,}4 = \boxed{30{,}95\ W}$

KORISNA SNAGA:

$\boxed{P_2} = U_2 I_2 = 5 \cdot 5 = \boxed{25 W}$

=> STALO

(A) VRAĆENO NAZAD MREŽI (IZVORU) (preko D_1, R zavojnice sačuvana E)

$\boxed{P_R} = \frac{1}{2} L_R I_{Rpm}^2 \frac{1}{T} = \frac{1}{2} 70{,}56 \cdot 10^{-3} \left(\frac{262}{168}\right)^2 (14{,}5 \cdot 10^{-3})^2 \frac{1}{20 \cdot 10^{-6}} = \boxed{0{,}933 W}$

B-pogon

lo? -> dali baš?

- pretpostavka da nema L_σ, zaštite itd:

$\Rightarrow \boxed{\eta} = \frac{P_2}{\underbrace{P_1 - P_R}_{\text{efektivno uložena snaga}}} = \boxed{83{,}3\%}$

u ovaj rezultat uzeti su: - statička disipacija T i D_{1-3} i NIŠTA VIŠE (vidi dosadašnji proračun)

- utjecaj: L_σ, $P_{KOMUTACIJE}$, $P_{ZAŠTITE}$ - preteško utječu na smanjenje P_R ($\eta \downarrow$)

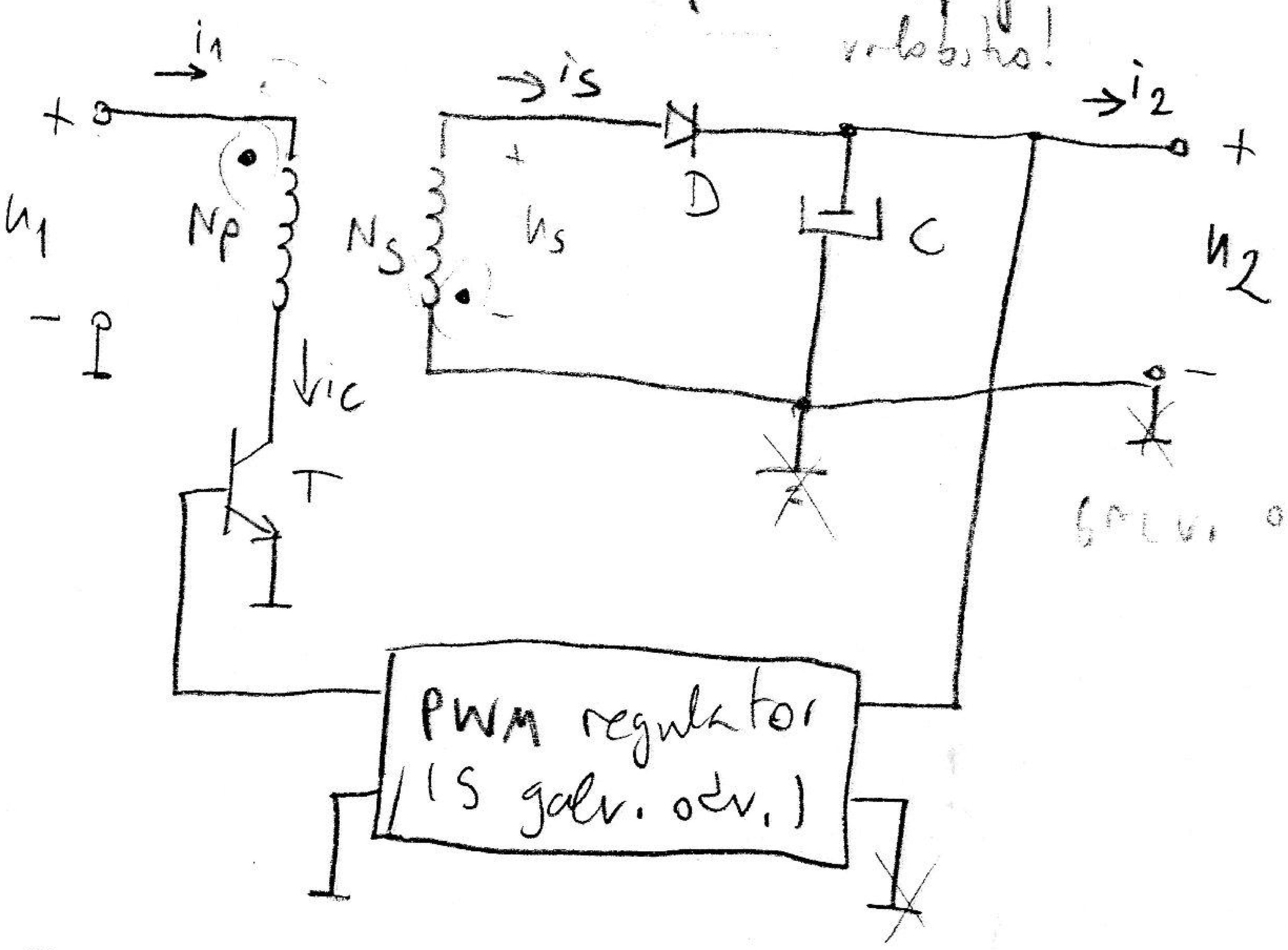
↓ iz iskustva (učestalosti)

- utjecaj: P_{Cu} i P_{Fe} - utječu na povećanje P_1 (jer treba pokriti te gubitke odnosno za njih ...) ($\eta \downarrow$)

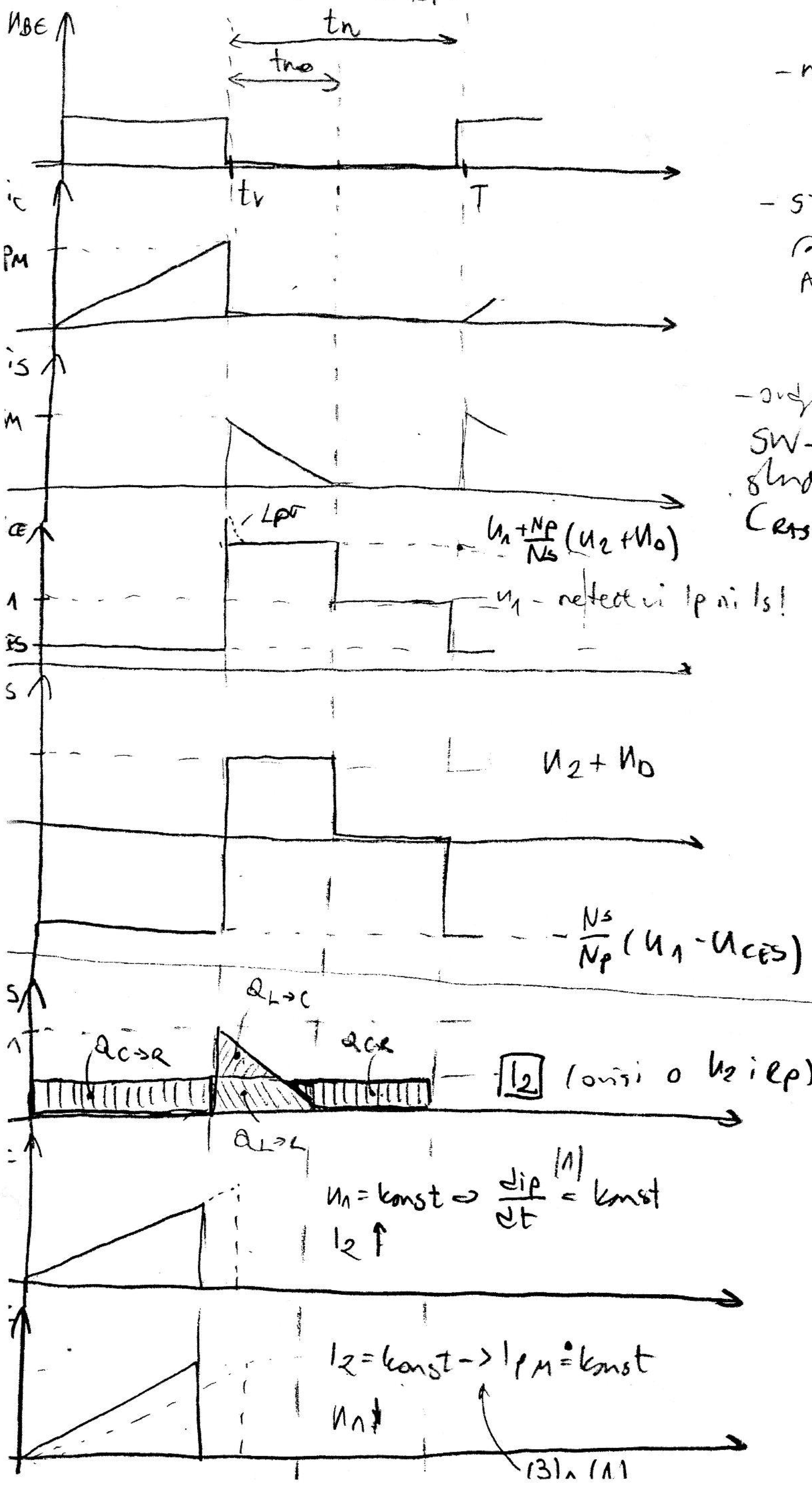
- realno: $\boxed{\eta = 0{,}7}$ (otprilike 10% manji od teoretskog)

DC-DC konvertor u zapornom spoju:

nebitno!



(A) DISKONT. NAČIN RADA



- napon baze T
- struja počinje iz 0 jer završi tok rada u diskont. režimu; u $t=0^+$ $I_s=0$ pa ~~...~~ je i $I_{pm}=0$!
- struja N_s ima napon i ulogu N_p kao kod SW-2a (preuzima struju primara) → u tom slučaju neće biti problema skoka zbog C_{es}, nego samo zbog $L_{p\sigma}$ (rasipni L primara)
- dok teče I_s prenosi se i U_s na U_p (povratna veza); kad prestane teći I_s, zatvori se D, a U_2 ostaje odspojen na C od sekundara

način rada

razmatranje C

$\boxed{\text{SW 2b \quad Str 2}}$

① T vodi

$$U_1 - U_{CES} = L_p \frac{I_{pM}}{t_v} \quad (1)$$

② T ne vodi

$$U_2 + U_D = L_s \frac{I_{sm}}{t_{no}} \quad (2)$$

$$\frac{L_s}{L_p} = \left(\frac{N_s}{N_p}\right)^2$$ (jer je A_L isti za p i s (ista jezgra))

$E_{Lp} = \frac{1}{2} L_p I_{pM}^2$ – energija magn. polja akumulirana u 1 periodu i predana sek.

$E_2 = U_2 I_2 T$ – energija (korisna) u 1 periodi

$\eta = \frac{E_2}{E_1}$ → primljena iz mreže: $E_1 = E_{Lp} + U_{CES} \frac{I_{pM}}{2} t_v$ disipacija na T za vrijeme 1 perioda

$\boxed{U_2} =$ (iz (1), ~~(2)~~, ... η, E_2, E_{Lp}, E_1) $= \boxed{\frac{1}{2} \eta \frac{t_v^2}{T} \frac{U_1(U_1 - U_{CES})}{I_2 L_p}} \quad (3)$

- želimo da konverter radi u diskont. režimu (u kont preveliki gubici) (to znači da je $t_{no} < t_n$)
- koji je najgori slučaj (da sklop posegne u kont. režim)?

  ⇒ $I_2 = I_{2MAX}$ (veći struje)
  $U_1 = U_{1min}$ (najmanja vrijednost ul.)
- sa ovo možemo izračunati je potreban L_p:

Iz (1): $t_v = L_p \frac{I_{pM}}{U_1 - U_{CES}}$; pretp. da smo fiksirali

$I_2 = I_{2MAX} = const$
$U_1 = U_{1min} = const$ } najgori slučaj

⇒ ~~najgori sl~~ najgori slučaj:

$\boxed{L_{pMAX}}$

⇒ $L < L_{pMAX}$

⇒ ako $L_p \uparrow$ ⇒ $t_v \uparrow$ ⇒ može za preveliki t_v izaći iz diskont režima (ne stigne se isprazniti ili malo za vrijeme t_{no}!)

$\boxed{\text{SW 26 Str 3}}$

- iz (3):

$$\boxed{L \le L_{pMAX}} = \frac{1}{2}\eta \frac{t_{vmax}^2 (U_{1min}-U_{CES})\,U_{1min}}{U_2 I_{2max} \cdot T} = \frac{1}{2}\,0{,}7\,\frac{(8\cdot 10^{-6})^2\, 209{,}5\cdot 210}{5\cdot 5\cdot 20\cdot 10^{-6}} = \boxed{1{,}971\,mH}$$

(4)

- indukcija u jezgri određena N_p (vidi razmatranje za preth. zad.):

$$U_1 - U_{CES} = N_p Q \frac{B_M}{t_v}$$

$$B_M = \frac{U_1 - U_{CES}}{N_p Q}\cdot t_v$$

$B_M \to B_{MAX}$ za $U_1 \to U_{1MAX}$, $t_v \to t_{vMAX} \to \boxed{U_1 \to U_{1min},\ I_2 \to I_{2MAX}}$

tako je i za na U_{1MAX} zbog prvog uvjeta za magnet. kompenzaciju povećanja I_2!

$N_p \ge N_{pmin}$!

$\boxed{N_p \to N_{pmin}}$ → tražimo min N_p!

Max B u jezgri!

(5)

$$t_{vx} = \sqrt{\frac{2U_2 I_{2max} L_{pmax} T}{\eta (U_{1max}-U_{CES})\,U_{1max}}} = \sqrt{\frac{2\cdot 5\cdot 5\cdot 1{,}971\cdot 10^{-3}\cdot 20\cdot 10^{-6}}{0{,}7\cdot(360-0{,}5)\,360}} = 4{,}664\,\mu s$$

$t_{vx}(U_{1MAX}, I_{2max})$

$$\Rightarrow N_p \ge \frac{(U_{1max}-U_{CES})\,t_{vx}}{Q\, B_{Mmax}} = 167{,}7 \to \boxed{N_p = 168} \Rightarrow B_M = 0{,}1996\,T$$

- ovdje t_v ovisi o U_1 i o I_2 (za razliku od prop. spoja!)

- potreban faktor induktivnosti jezgre (A_L) i veličina zračnog raspora ← N_p, L_p određeni neovisno; - treba ih povezati!

- iz $L = N_p^2 A_L = 168^2 \cdot 2{,}5\,\mu H/zavoj^2 = 70{,}56\,mH > L_{pMAX}$!

- ako bi htjeli smanjiti L smanjenjem N_p, onda bi imali problem sa zasićenjem jezgre jer bi bio $N_p < N_{pmin}$!

→ zato treba modificirati pretjerano veliki $A_L \to A_L'$ dodavanjem zračnog raspora u Fe-jezgri

- bila bi: A_L: $N_p = \sqrt{\frac{L_{max}}{A_L}} = 28{,}1 \to 29 \Rightarrow B_{MAX} = 1{,}16\,T$!!!

SW-25-str 4

$\oint H\,dl = \sum I \Rightarrow H_{Fe} l_{Fe} + H_0 \delta = N_p I_{pM}$; $H_{Fe} l_{Fe} \ll H_0 \delta$

$$H_0 \approx N_p \frac{I_{pM}}{\delta} = \frac{B_M}{\mu_0} \Rightarrow N_p I_{pM} = B_M \frac{\delta}{\mu_0} \quad (6)$$

$$U_1 - U_{CES} = L_p \frac{I_{pM}}{t_v} = N_p \frac{Q\, B_M}{t_v} \Rightarrow L_p I_{pM} = N_p Q B_M \quad (7)$$

$$\Rightarrow I_{pM} = \frac{N_p Q B_M}{L_p} \Rightarrow u\ (6) \Rightarrow$$

H = JAKOST MAGNETSKOG POLJA

B = MAGNETSKA INDUKCIJA (GUST. MAGN. TOKA)

Φ = MAGN. TOK

$$\Rightarrow N_p^2 \frac{Q\, \cancel{B_M}}{L_p} = \cancel{B_M} \frac{\delta}{\mu_0}$$

$$\Rightarrow L_p = \mu_0 N_p^2 \frac{Q}{\delta} \quad (8)$$

$$\Rightarrow A_L = \frac{L_p}{N_p^2} \Rightarrow \boxed{A_L = \mu_0 \frac{Q}{\delta}} \quad (9)$$

$$\delta = \mu_0 Q \frac{N_p^2}{L_p} = \mu_0 \frac{Q}{A_L} \quad (10)$$

$$A_L = \frac{1{,}771 \cdot 10^{-3}}{160^2} = 69{,}83\ nH/zavoj^{-2}$$

↳ ovo trebamo postići !!!

$$\Rightarrow \boxed{\delta =} 4\pi\, 10^{-7} \frac{0{,}5 \cdot 10^{-4}}{69{,}834 \cdot 10^{-9}} = 0{,}8997\ mm \approx \boxed{0{,}9\ mm}$$

- određivanje N_s

$$(1)\ i\ (2) \rightarrow t_{no} = t_v \frac{N_s}{N_p} \frac{U_1 - U_{CES}}{U_2 + U_D} \quad (11)$$

$t_{no} \leq T - t_v \rightarrow$ uvjet diskont. režima (12)

- najnepovoljniji slučaj:

$$\left.\begin{matrix} U_1 = U_{1min} \\ I_2 = I_{2max} \end{matrix}\right\} \Rightarrow t_v = t_{vMAX}!$$

(iako je t_{no} veći za I_{2max} i U_{1max} (vidi (5)) no tada je $t_v = t_{vx} < t_{vmax}$, pa je sklop ipak duboko u diskont. režimu)

SW 26 str 5

(11), (12) $\Rightarrow$ $$N_s \leq N_p \frac{U_2+U_D}{U_{1max}-U_{CES}}\left(\frac{T}{t_{vmax}}-1\right) = 168\,\frac{5+0{,}8}{210-0{,}5}\left(\frac{20}{8}-1\right) = 6{,}97$$

$\boxed{N_s = 6}$ (traži se N_{smax} jer kako $N_s \uparrow$, prema (10) i $t_{vo} \uparrow$!)

$\downarrow$

povoljno je što veći N_s jer se time manje opterećuje sekundar i manji prenapon na T

Tranzistor

$$I_{cm} = I_{pm} \to (1) \to I_{pm\,max} = \frac{U_{1max}-U_{CES}}{L_p}\,t_{vx} = \frac{360-0{,}5}{1{,}971\cdot 10^{-3}}\cdot 4{,}6664\cdot 10^{-6}$$

$$\Rightarrow \boxed{I_{CMmax} = 850{,}8\ mA}$$

$$\boxed{U_{CEmax}} = U_{1max} + \frac{N_p}{N_s}(U_2+U_D) = 360 + \frac{168}{6}(5+0{,}8) = \boxed{522{,}4V}$$

Dioda

$$I_{DM} = I_{SM}$$

(23.8A)

$$I_{sm}\cdot N_s = I_{pm} N_p \Rightarrow \boxed{I_{DMmax}} = \frac{N_p}{N_s} I_{CMmax} = \boxed{\cancel{17{,}87\,A}}$$

$$\boxed{U_{DRmax}} = U_2 + \frac{N_s}{N_p}(U_{1max}-U_{CES}) = 5 + \frac{6}{168}(360-0{,}5) = \boxed{17{,}8V}$$

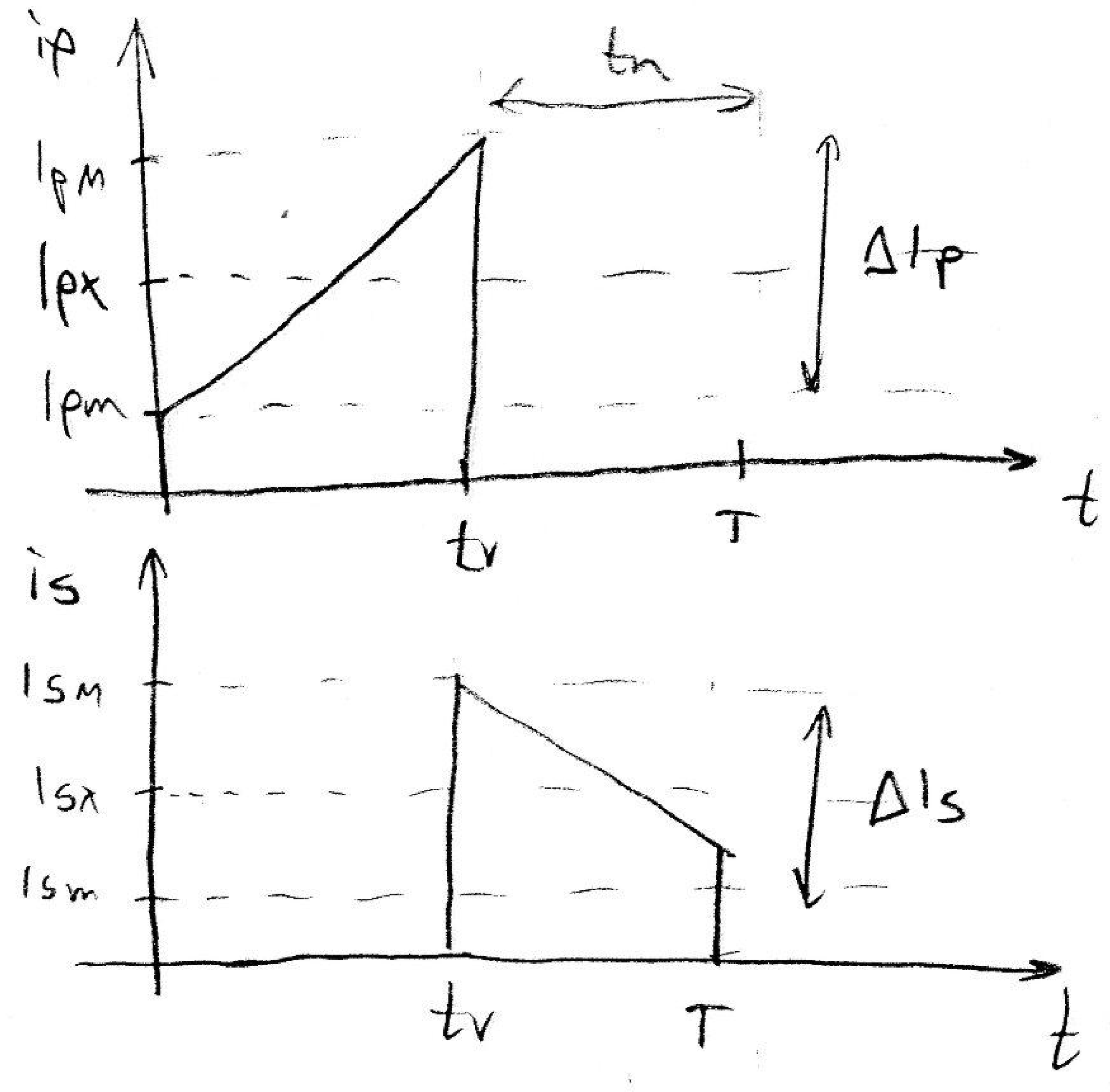
$I_{DMmax} >>$!!!

$\Rightarrow$ naponski šiljak na izlazu zbog šuma i ESR-a C_x! $\Rightarrow$ treba redovito na izlaz dodati još i LC filtar

(B) KONTINUIRANI NAČIN RADA

<OKRENI> $\Rightarrow$

$\boxed{\text{SW 26 str 6}}$



- slučaj prelaza u kont režim kada je $I_2 > I_{2K}$ $\quad I_2 \uparrow$

$$(13) \quad U_1 - U_{CES} = L_p \frac{\Delta I_p}{t_v}$$

$$(14) \quad U_2 + U_D = L_s \frac{\Delta I_s}{t_n} = L_s \frac{\Delta I_s}{T - t_v};$$

$$\frac{L_p}{L_s} = \left(\frac{N_p}{N_s}\right)^2$$

$$(15) \quad I_{sM} = I_{pM} \frac{N_p}{N_s}$$

$$(16) \quad I_{sm} = I_{pm} \frac{N_p}{N_s}$$

$$(17) \quad I_{sM} = I_{sm} + \Delta I_s$$

$$(18) \quad I_{pM} = I_{pm} + \Delta I_p$$

$\Rightarrow$ (iz navedenih formula):

$$\left.\begin{aligned} I_{pM}\frac{N_p}{N_s} &= I_{pm}\frac{N_p}{N_s} + \frac{U_2+U_D}{L_p}\frac{N_p^2}{N_s^2} t_n \\ I_{pM} &= I_{pm} + \frac{U_1 - U_{CES}}{L_p} t_v \end{aligned}\right\} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow (U_1 - U_{CES}) t_v = (U_2 + U_D)\frac{N_p}{N_s}(T - t_v) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \boxed{U_2 = \frac{N_s}{N_p}(U_1 - U_{CES})\frac{t_v}{T - t_v} - U_D} \quad (19)$$

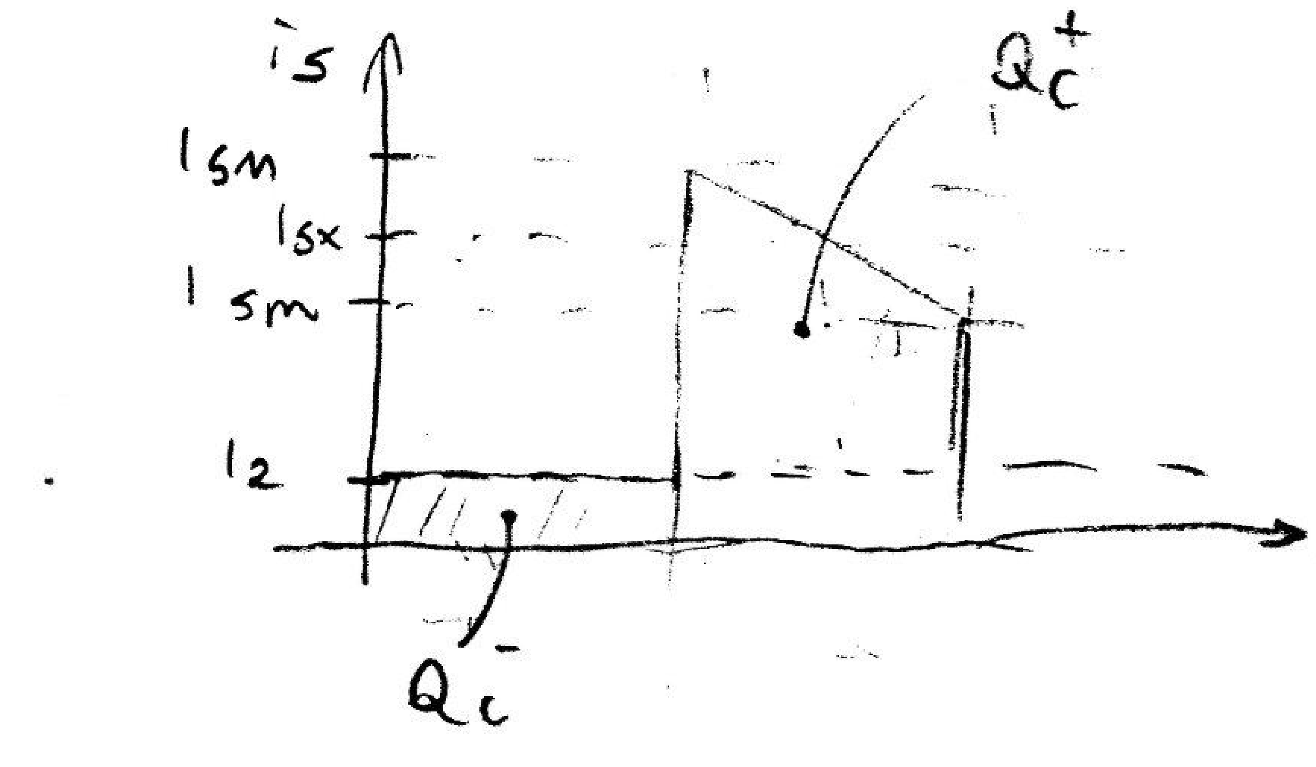
(id. propusnom spoju)

$$\boxed{\delta = \frac{t_v}{T} = \frac{1}{1 + \frac{N_s}{N_p}\frac{U_1 - U_{CES}}{U_2 + U_D}}} \quad (20)$$

t_v, $\delta \neq f(I_2)$!

(iz kont. režim)

- nabojska ravnoteža:



$$I_{sx} = \frac{I_{sM} + I_{sm}}{2}$$

$$Q_c^+ = Q_c^- \Rightarrow (I_{sx} - I_2) t_n = I_2 t_v \Rightarrow$$

$$\Rightarrow I_2 T = I_{sx} t_n \Rightarrow \boxed{I_2 = I_{sx}\frac{t_n}{T}} \quad (21)$$

$\boxed{\text{sw 2b str 7}}$

$$P_2 = U_2 I_2 \Rightarrow \boxed{P_2 = U_2 I_{sx} \frac{T - t_v}{T}} \quad (22)$$

$$\boxed{P_1 = U_1 I_{px} \frac{t_v}{T}} \quad \cancel{(23)} \text{ (dupla)}$$

$$P_2 = \eta P_1 \Rightarrow P_2 = \eta \overbrace{\boxed{U_1 I_{px} \frac{t_v}{T}}}^{P_1 =} \Rightarrow \boxed{I_{px} = \frac{T}{t_v} \frac{U_2 I_2}{\eta U_1}} \quad (23)$$

$$\underset{(13)}{\Delta I_p} = \frac{U_1 - U_{CES}}{L_p} t_v \Rightarrow L_p = \frac{U_1 - U_{CES}}{\Delta I_p} t_v \; ; \; \Delta I_p << 2 I_{px}$$

uvjet rada u konti režimu

iz ovoga se određuje potrebni L_p za rad u kont. rež.

$\Delta I_p \sim \frac{1}{L_p} \Rightarrow$

$\Rightarrow$ tražimo $\underline{L_{pmin}}$ da bi se radilo u kont modu

$$L_p \geq L_{pmin} = \frac{U_1 - U_{CES}}{2 I_{px}} t_v$$

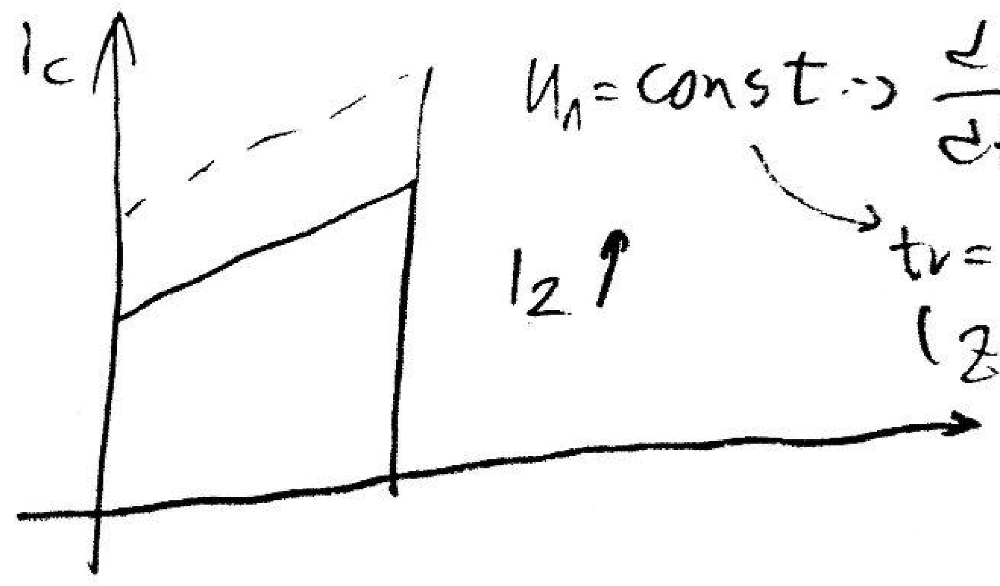
$\Rightarrow \Delta I_p \rightarrow$ uvjet!

$$(13), (23) \Rightarrow \boxed{L_p \geq \frac{1}{2} \eta \frac{(U_1 - U_{CES}) U_1}{U_2 I_2 T} t_v^2}$$

Ista formula za L_p kao i u diskont modu, samo je uvjet za najgori slučaj suprotan: $\rightarrow$ (4) je tamo bilo

$I_2 = I_{2min}$

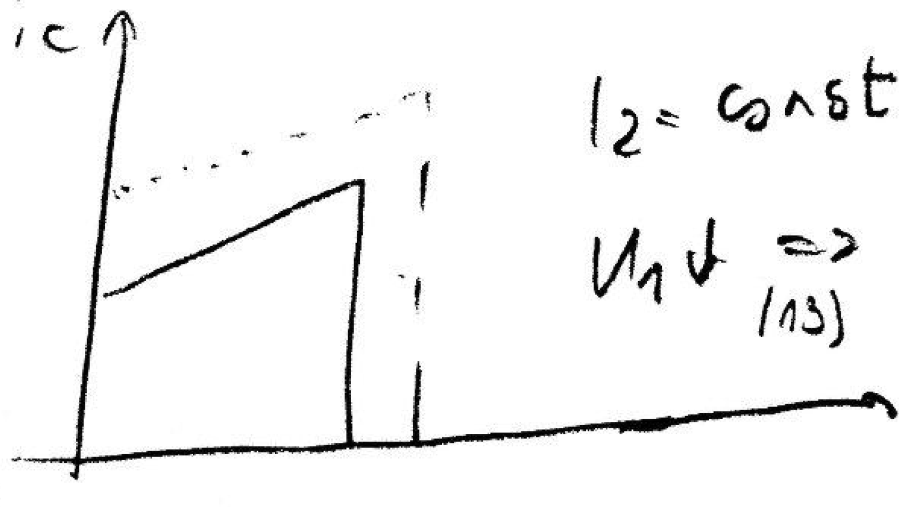
$U_1 = U_{1max} \rightarrow$ najveća valovitost i_p



$U_1 = \text{const} \rightarrow \frac{di_p}{dt} = \text{const}$
$t_v = \text{const}$ $\Big\} \Delta I_p = \text{const}$

$I_2 \uparrow$

(zbog (20), $t_v \neq f(I_2)$!)



$I_2 = \text{const}$

$$U_1 \downarrow \underset{(13)}{\Rightarrow} \frac{di_p}{dt} \downarrow \underset{(20)}{\Rightarrow} t_v \uparrow \rightarrow t_n \downarrow \overset{(21)}{\Rightarrow} I_{sx} \uparrow$$

$$(14) \Rightarrow \frac{di_s}{dt} = \text{konst} \quad t_n \downarrow \Rightarrow \Delta I_s \downarrow$$

$$\Rightarrow \Delta I_s \downarrow \text{ i } I_{sx} \uparrow \Rightarrow I_{pm} \uparrow$$

$\boxed{\text{sw 25 str 8}}$

$$L_p \geq \frac{1}{2}\eta \frac{U_{1max}(U_{1max} - U_{CES})}{U_2 I_{2min} T} t_{vmin}^2 = L_{pmin} \quad (24)$$

$\Rightarrow (23) \Rightarrow$

$$\boxed{t_{vmin} = \frac{T}{1 + \frac{N_s}{N_p} \frac{U_{1max} - U_{CES}}{U_2 + U_D}}} \quad (25)$$

↳ problem → ne znamo $\frac{N_s}{N_p}$

$\Rightarrow (23) \Rightarrow$

$$t_{vmax} = \frac{T}{1 + \frac{N_s}{N_p} \frac{U_{1min} - U_{CES}}{U_2 + U_D}} \leq \delta_{max} \cdot T \Rightarrow$$

$\delta_{max} = 0{,}4$

treba zbog $\left(\frac{N_s}{N_p}\right)$ u (25)

↳ uvjet određivanja $\frac{N_s}{N_p}$

$$\Rightarrow \boxed{\frac{N_s}{N_p} \geq \frac{U_2 + U_D}{U_{1min} - U_{CES}}\left(\frac{1}{\delta_{max}} - 1\right)} \quad (26)$$

$$(26) \Rightarrow \frac{N_s}{N_p} \geq \frac{5 + 0{,}8}{210 - 0{,}5}\left(\frac{1}{0{,}4} - 1\right) = 41{,}527 \cdot 10^{-3} \Rightarrow (25)$$

$$\Rightarrow t_{vmin} = \frac{20 \cdot 10^{-6}}{1 + 41{,}527 \cdot 10^{-3} \frac{360 - 0{,}5}{5 + 0{,}8}} = 5{,}5960\,\mu s \Rightarrow (24)$$

$$\boxed{L_{pmin}} = \frac{1}{2} 0{,}7 \frac{360 \cdot 359{,}5}{5 \cdot 0{,}1 \cdot 5 \cdot 20 \cdot 10^{-6}} (5{,}596 \cdot 10^{-6})^2 =$$

$$= \boxed{28{,}37\,mH}$$ (UVJET RADA U KONT. REŽIMU)

– indukcija u jezgri: → pr nema tx!

$$B_{Mmax} = B_M(I_{pMmax}); \quad I_{pM} = I_{px} + \frac{\Delta I_p}{2}$$

(UVJET DA NE ODE DO ZAS. JEZGRE)

$$I_{px} \stackrel{(23)}{=} \frac{T}{t_v} \frac{U_2 I_2}{\eta U_1}; \quad \Delta I_p \stackrel{(13)}{=} \frac{U_1 - U_{CES}}{L_p} t_v$$

$$\Rightarrow \boxed{I_{pM} = \frac{T}{t_v} \frac{U_2 I_2}{\eta U_1} + \frac{1}{2} \frac{U_1 - U_{CES}}{L_p} t_v} \quad (27)$$

SW 26 str 9

$U_1 \downarrow \Rightarrow I_{px} \uparrow$ $\quad I_{px} + \frac{\Delta I_p}{2} \downarrow\uparrow ?$

$U_1 \downarrow \Rightarrow \Delta I_p \downarrow$

$I_2 \uparrow \Rightarrow I_{pM} \uparrow$; $U_1 \downarrow \overset{?}{\Rightarrow} I_{pM} \uparrow$

(jer $I_{px} \uparrow$)

član I_{px} znatno veći od $\frac{\Delta I_p}{2}$ pri $I_2 = I_{2max}$ i

smanjenjem U_1 smanjuje se. i umnožak

$U_1 t_v$ (25) ($t_v \uparrow$, ali sporije nego $U_1 \downarrow$)

$(210 \cdot 8 = 1680 < 360 \cdot 5{,}596 = 2014{,}6)$

$$I_{pMmax} = \frac{T}{t_{vmax}} \frac{U_2 I_{2max}}{\eta\, U_{1min}} + \frac{1}{2} \frac{(U_{1min} - U_{CES}) t_{vmax}}{L_p} \qquad (28)$$

$$\Rightarrow \boxed{I_{pMmax}} = \frac{20}{8} \frac{5 \cdot 5}{0{,}7 \cdot 200} + \frac{1}{2} 209{,}5 \frac{8 \cdot 10^{-6}}{28{,}37 \cdot 10^{-3}} =$$

$$= 0{,}42517 + 0{,}02954 = \underline{\underline{454{,}7\,mA}}$$

$$(7) \Rightarrow L_p I_{pM} = N_p Q B_M \Rightarrow N_p \geq \frac{L_p I_{pMmax}}{Q \cdot B_{Mmax}} =$$

odreduje max B_M u jezgri

$$= \frac{28{,}37 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}4547}{0{,}5 \cdot 10^{-4} \cdot 0{,}2} =$$

$$= 1290{,}00$$

$\boxed{N_p = 1291} \Rightarrow B_M = 0{,}1998\,T$

$\hookrightarrow$ (26) $N_s \geq N_p \frac{U_2 + U_D}{U_{1min} - U_{CES}} \left(\frac{1}{\delta_{max}} - 1 \right) =$

(uvjet da je $t_{vmax} < \delta_{MAX} \cdot T$)

$$= 1291 \frac{5{,}8}{209{,}5} \left(\frac{1}{0{,}4} - 1 \right) = 53{,}6$$

$\boxed{N_s = 54}$

$$A_L \geq \frac{L_{pmin}}{N_p^2} = \frac{28{,}37 \cdot 10^{-3}}{1291^2} = \underline{\underline{17{,}02\, nH / zavoj^2}} \Rightarrow (10) \Rightarrow$$

MAX. DOZV. ZRAČNI RASPOR

$$\boxed{\delta \leq} 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{0{,}5 \cdot 10^{-4}}{17{,}02 \cdot 10^{-9}} = \underline{\underline{3{,}69\,mm}}$$

(ne treba nam δ, ali ako ga imamo, onda je ovo δ_{max})

SW 26 - str 10

Tranzistor

$I_{CMmax} = I_{PMmax} = \underline{\underline{454{,}7 mA}}$

$U_{CEmax} = U_{1max} + \frac{N_P}{N_S}(U_2 + U_D) = 360 + \frac{1291}{54} \cdot 5{,}8 = \underline{\underline{498{,}7 V}}$

Dioda: $I_{DM} = I_{SM} \Rightarrow I_{DMmax} = I_{PMmax} \cdot \frac{N_P}{N_S} = 0{,}4547 \cdot \frac{1291}{54} =$

$= \underline{\underline{10{,}87 A}}$

$U_{DRmax} = U_2 + \frac{N_S}{N_P}(U_{1max} - U_{CES}) = 5 + \frac{54}{1291} \, 359{,}5 =$

$= \underline{\underline{20{,}04 V}}$

USPOREDBA:

pri: $B_M = 0{,}2 T$

$Q = 0{,}5 cm^2$

$210 V \leq U_1 \leq 360 V$

$U_2 = 5 V$

$0{,}5 A \leq I_2 \leq 5 A$

$\delta \leq 0{,}4$

	N_P	N_S	N_R	L_P [mH]	I_{CMmax} [A]	U_{CEmax} [V]	I_{DMmax} [A]	U_{DRmax} [V]
PROPUSNI SPOJ	168	12	267	70,56	0,380	586,0	5	1514
ZAPORNI SPOJ DISKONT. MOD	168	6	–	1,97	0,851	522,4	17,87	17,8
ZAPORNI SPOJ KONT. MOD	1291	54	–	28,37	0,455	498,7	10,87	20,1

⇒ NASTAVAK NA SLJEDEĆOJ STR.

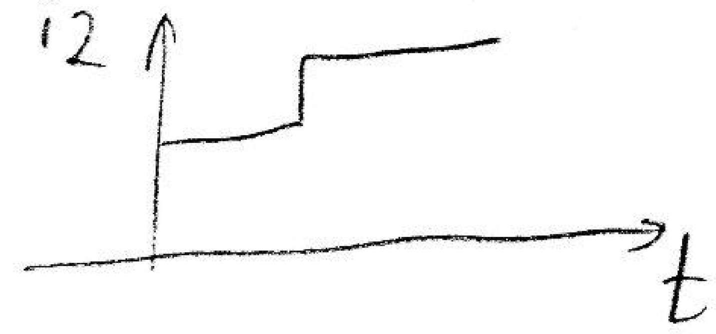
SW 25 str 11

dodatne diode

	D_1	D_3
...	14,5 mA 931,4 V	5 A 24,5 V
...	–	–
...	–	–

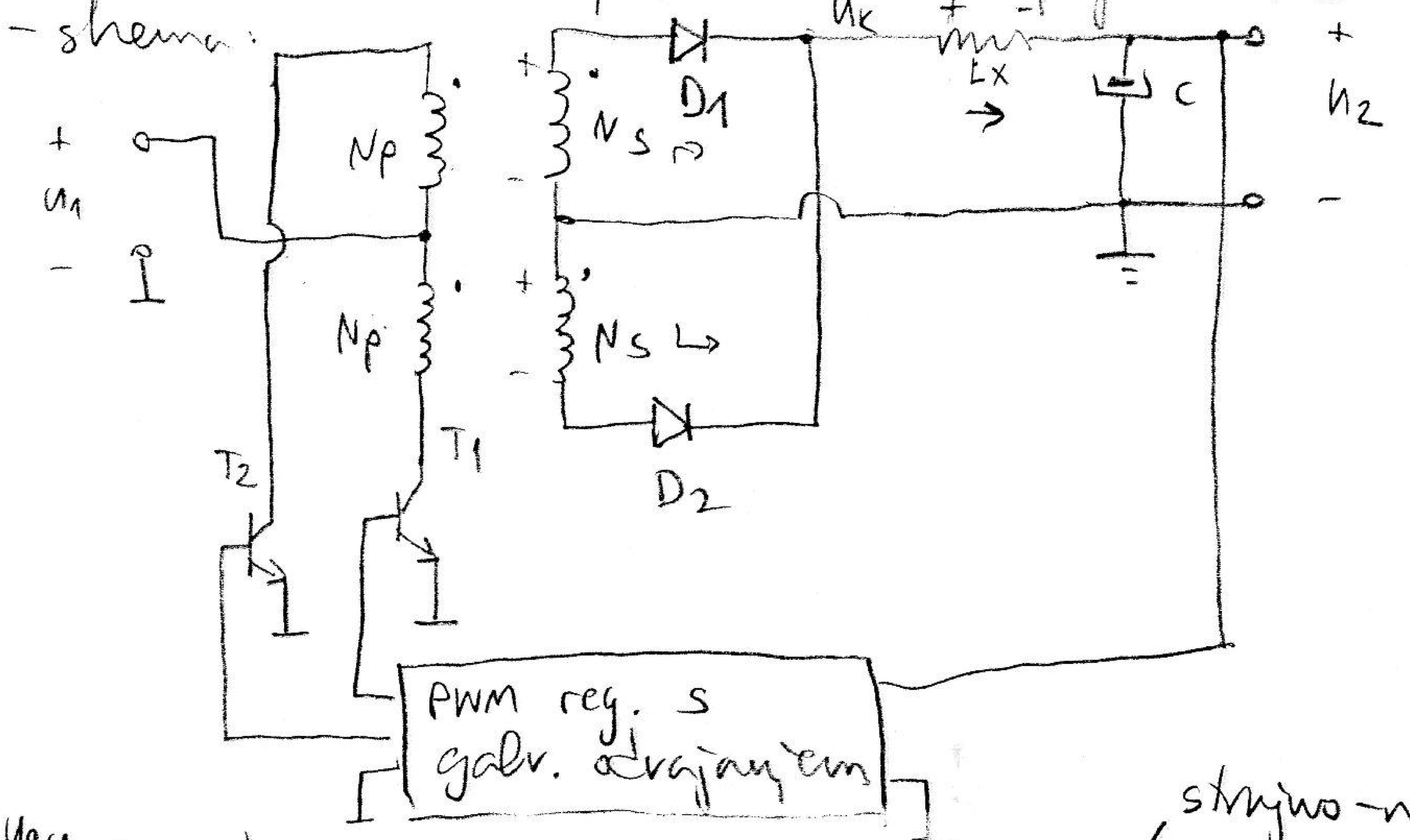
- kont. režim zapornog spoja znatno bolji od diskont. glede strujnog opterećenja sklopki (bolje koristi pozgr.), no vrlo se rijetko koristi zbog nestabilnosti regulacijske petlje
⇒ za ostvarenje stabilnosti neophodno bi bilo smanjiti f_g PWM regulatora ⇒ prespor odaziv na promjene opterećenja ⇒ propadi izlaznog napona

za



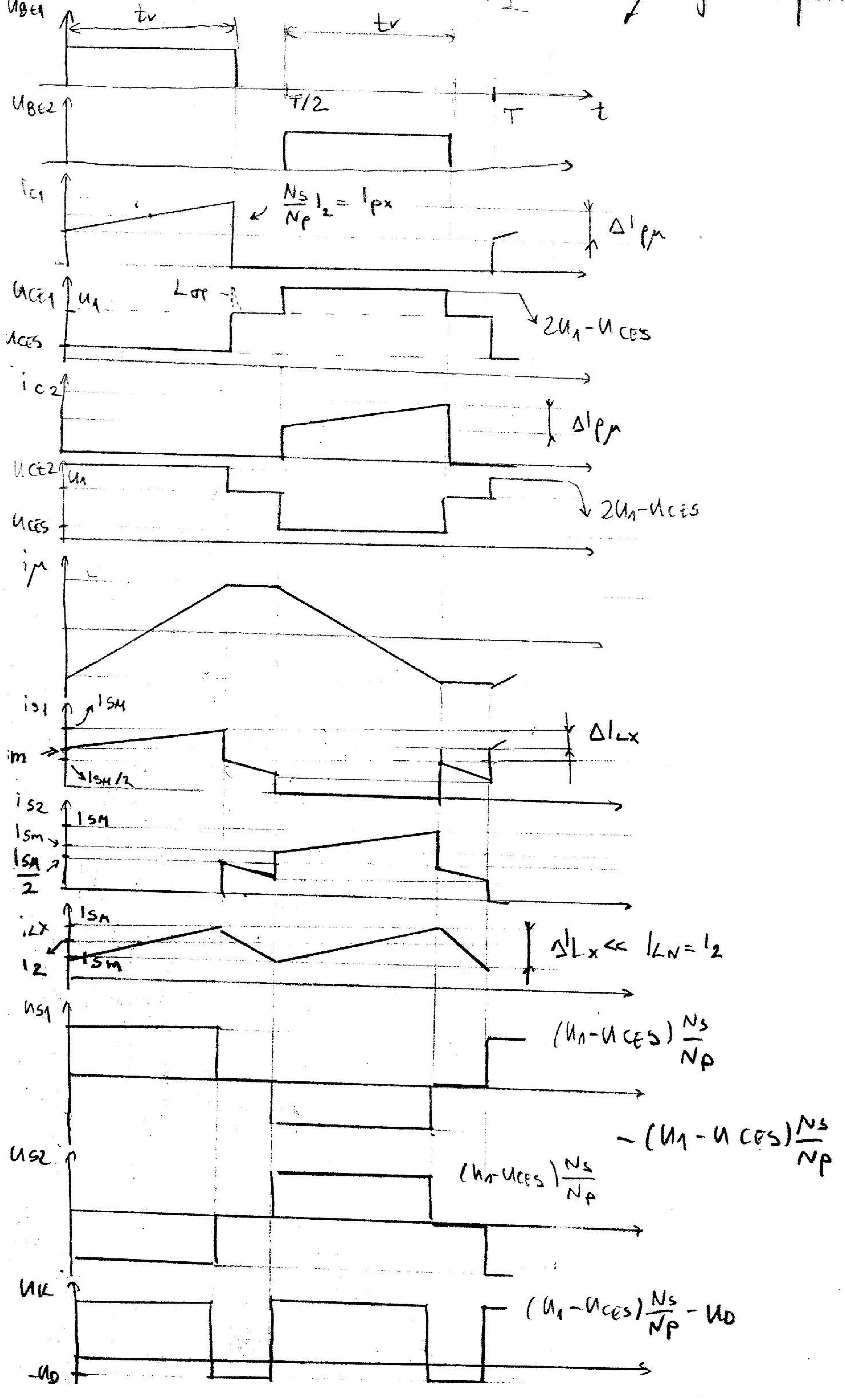
$\boxed{\text{SW 2-c 1}}$

- parametri kao i prije, osim što je $Q = 0{,}25\ cm^2$ (dovoljna 2x manja jezgra)
- DC-DC konvertor u protutaktnom spoju
- shema:



- podrazumijeva se kont. način rada (pl. dio)

strujno-naponski vrem. odnosi



SW 2c-2

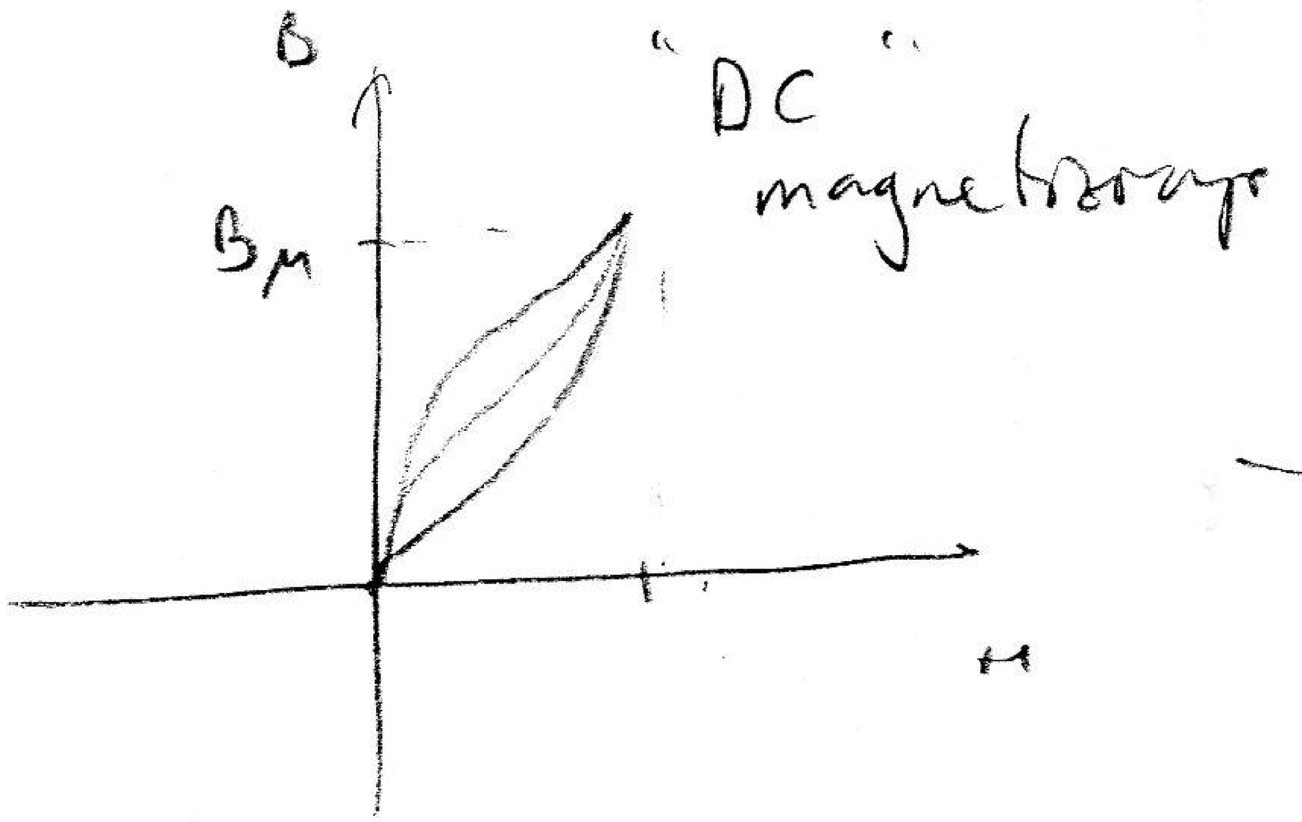
- 2 (anti)paralelna prop. spoja

=> izmjenično magnetiziranje jezgre

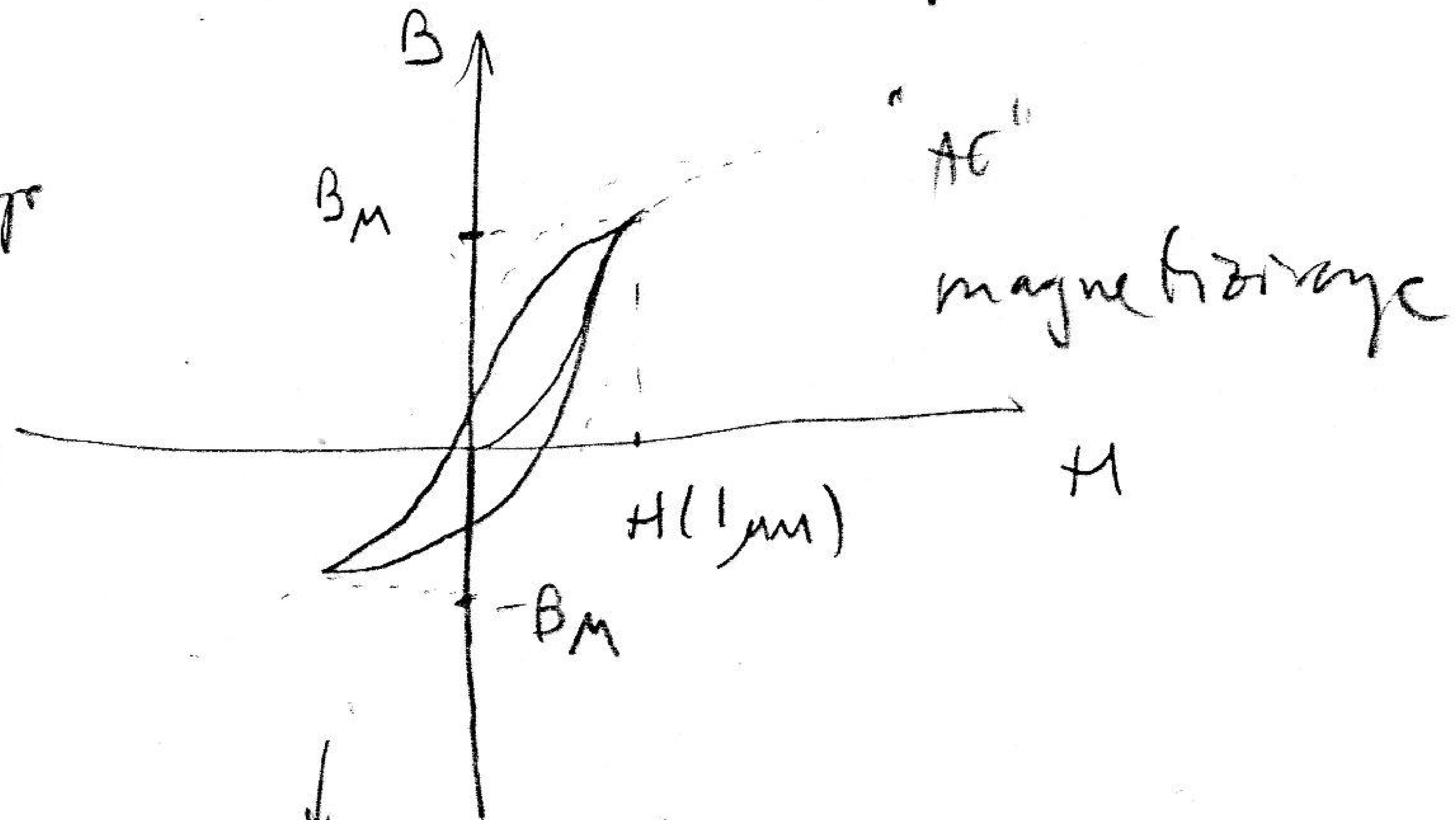
↓ to znači: - dok T_1 vodi jezgra se magnetizira u jednom smjeru (i_{c1}) (+H)

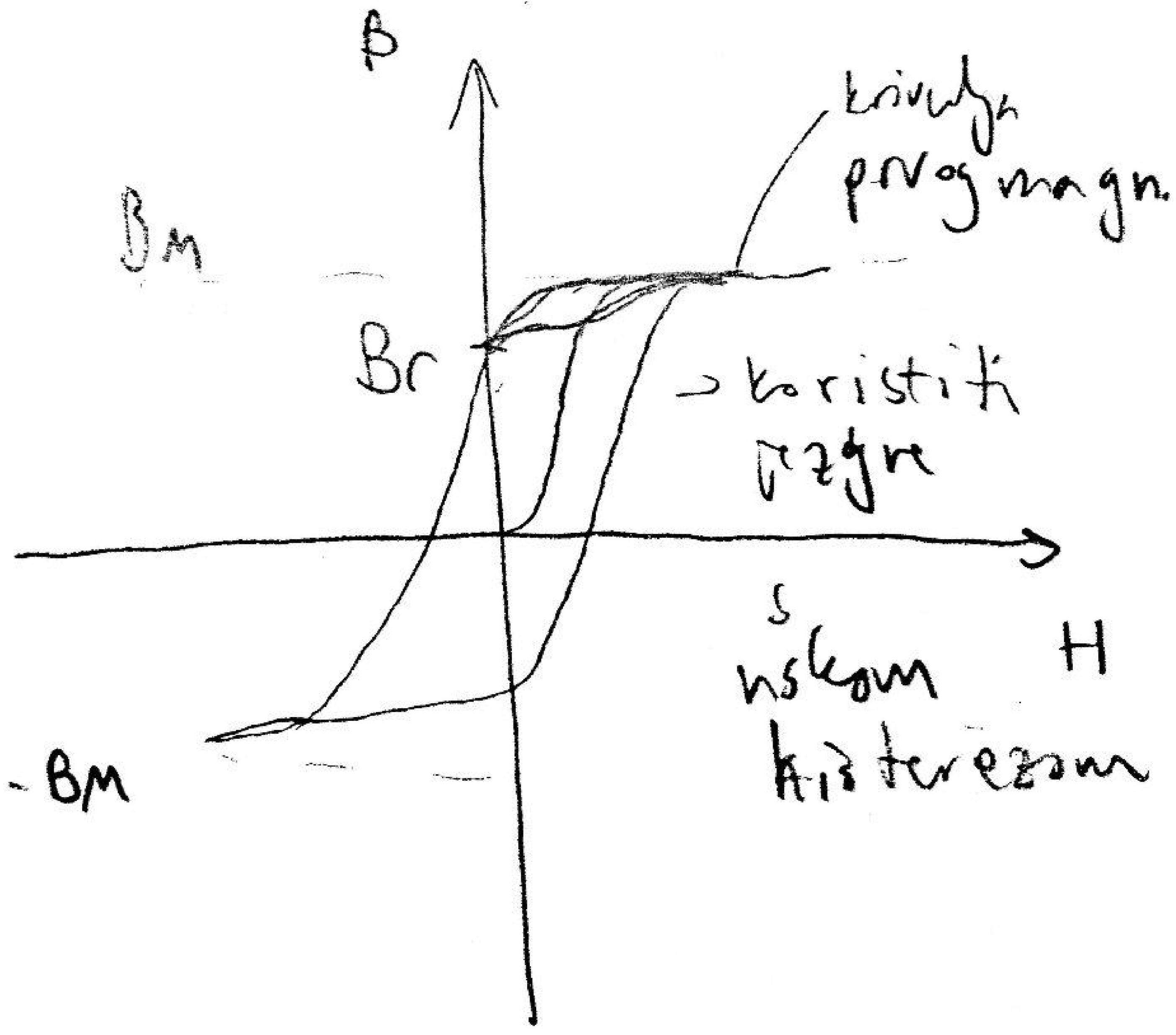
- dok T_2 vodi, i_{c2} teče u suprotnom smjeru od i_{c1}, što znači magnetiziranje u suprotnom smjeru (-H)

propusni spoj (SW 2a)



protutaktni prop. spoj





↓ iz tog razloga formula

$$U_1 - U_{CES} = L_p \frac{\Delta I_p}{t_v} = N_p Q \frac{B_M}{t_v}$$

postaje u slučaju protutaktnog spoja:

$$\boxed{U_1 - U_{CES} = N_p Q \frac{2B_M}{t_v}} \; ! \quad (1)$$

$$= L_p \frac{\Delta I_{pM}}{t_v}$$

(za određivanje N_p, tj. potrebnog ψ)

$$\Rightarrow N_p = \frac{(U_1 - U_{CES})t_v}{2QB_M}$$

$$N_p \geq \frac{(U_{1min} - U_{CES})t_{vmax}}{2QB_{Mmax}} = \frac{(210-0{,}5)\,8\cdot 10^{-6}}{2\cdot 0{,}25\cdot 10^{-4}\cdot 0{,}2} = 167{,}6 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \boxed{N_p = 168}$$

(isto kao i prije iako je sad Q 2x manja!)

$\boxed{SW\ 2C-3}$

$$(U_1 - U_{CES})\frac{N_S}{N_P} - U_D - U_2 = L_X \frac{\Delta I_{LX}}{t_V} \quad (2) \quad (T_1\ \text{vodi}) \qquad (T_2 - \text{sym.})$$

$$-U_2 - U_D = L_X \frac{-\Delta I_{LX}}{\frac{T}{2} - t_V} \quad (3) \quad (T_1\ \text{ne vodi})$$

$$\boxed{U_2 = 2\frac{t_V}{T}(U_1 - U_{CES})\frac{N_S}{N_P} - U_D} \quad (4) \Rightarrow (U_1 - U_{CES})\, t_V = \text{const} \quad !$$

(4) $\Rightarrow$

$$N_S = N_P \frac{U_2 + U_D}{U_1 - U_{CES}} \cdot \frac{T}{2 t_V} \; ; \; \left.\begin{matrix} U_1 = U_{1min} \\ t_V = t_{Vmax} \end{matrix}\right\} \text{najgori slučaj (ne možeš kompenzirati } N_S\text{!)}$$

$$N_S \geq 168 \cdot \frac{5 + 0{,}8}{210 - 0{,}5} \cdot \frac{20}{16} = 5{,}8 \Rightarrow \boxed{N_S = 6}$$

(12 u SW-2a)

$$L_P = A_L N_P^2 = 70{,}56\ mH$$

$$t_{Vmax} = \frac{T}{2}\frac{N_P}{N_S}\frac{U_2 + U_D}{U_{1min} - U_{CES}} = 7{,}752\,\mu s \quad \text{(korekcija zbog zaokr. } N_S \text{ i } N_P\text{)}$$

$$I_{PXmax} = I_{2max}\frac{N_S}{N_P} = 5 \cdot \frac{6}{168} = 179\, mA$$

$$\Delta I_{PM} = \frac{(U_{1min} - U_{CES})\, t_{Vmax}}{L_P} = 23\, mA \neq f(\cancel{U_1})$$

$$I_{CMmax} = I_{PXmax} + \frac{\Delta I_{PX}}{2} = 190{,}5\, mA \quad (390\ SW-2a)$$

$$I_{CM} \geq \phi \Rightarrow I_{PX} \geq \frac{\Delta I_{PM}}{2} \Rightarrow \Delta I_{PM} \leq 2\frac{N_S}{N_P} I_{2min} \leftarrow 0{,}1 \cdot I_{2N}$$

uvjet kontinuiranog režima

L_{Pmin}

tipično

ostalo analogno prop. spoju

zbog $\Delta B = 2B_M \Rightarrow$ može ići 2x veća snaga u istom protjecaju! (razlog zašto je protaktni spoj dobar)