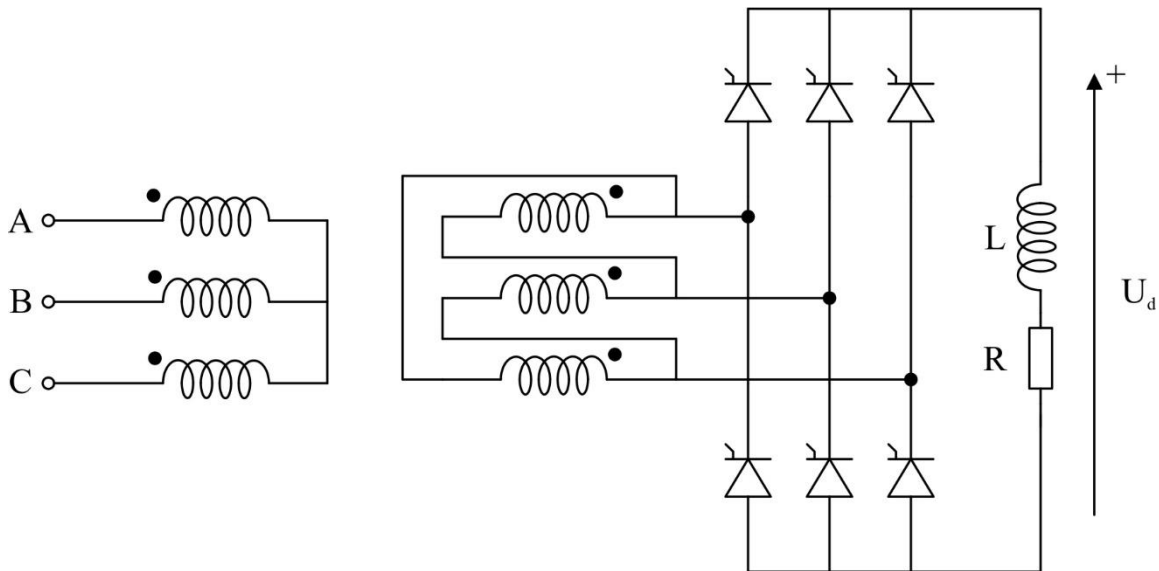


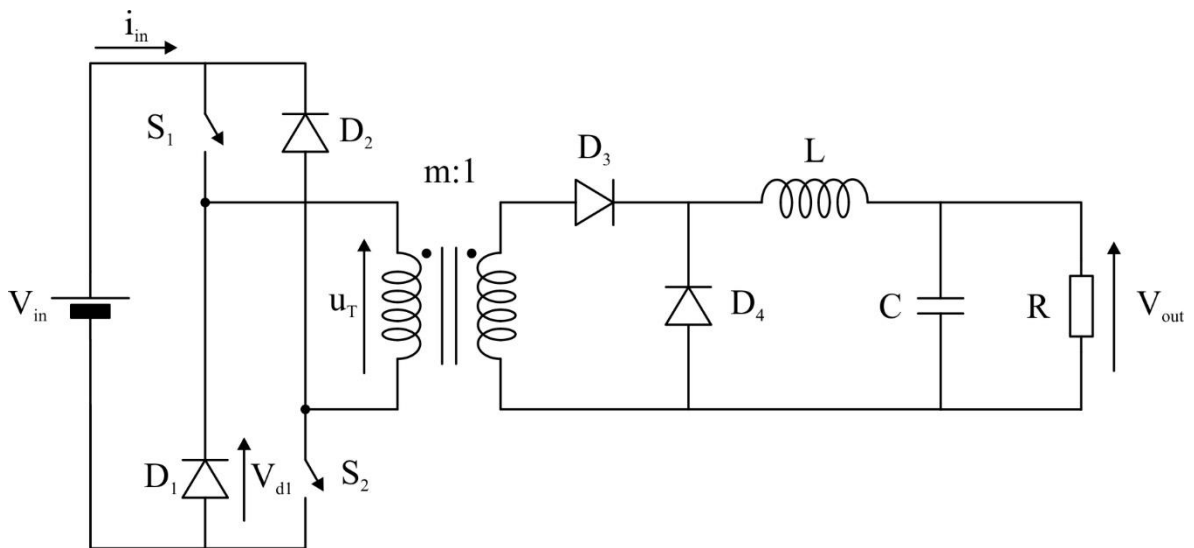
1. Мосни исправљач прикључен је на кругу мрежу  $3 \times 380\text{V}$ ,  $50\text{Hz}$  преко трансформатора у спреси  $Yd$ , као на слици 1. Отпорност оптерећења износи  $R = 3\Omega$  док је индуктивност пригушнице довољно велика да се наизменична компонента струје оптерећења може занемарити. Тиристори се могу сматрати идеалним прекидачима. Уколико је преносни однос трансформатора  $m = 2$ , а угао управљања тиристорима  $\alpha = 60^\circ$ :

- Извести израз за средњу вредност напона на оптерећењу  $U_d$  и израчунати његову вредност
- Скицирати струју једне фазе секундара трансформатора и одредити ефективну вредност првог хармоника исте
- Колико износи фактор снаге првог хармоника целог постројења?



**Слика 1.**

2. Чопером са слике 2. потребно је одржавати константан напон  $V_{\text{out}} = 4\text{V}$  у случају варијација улазног напона у опсегу 18-24V. Одредити минималну индуктивност пригушнице  $L$  тако да чопер никада не уђе у прекидни режим рада. Скицирати  $i_{\text{in}}$ ,  $u_T$ ,  $V_{D1}$  и струју пригушнице у случају према коме се иста димензионише. Колика је најмања вредност улазног напона са којом се може постићи жељени излазни напон? Капацитивност кондензатора у филтру је довољно велика да се може занемарити наизменична компонента напона на оптерећењу. Остали подаци су  $f = 100\text{kHz}$ ,  $R = 10\Omega$ ,  $m = \frac{N_1}{N_2} = 2$ .

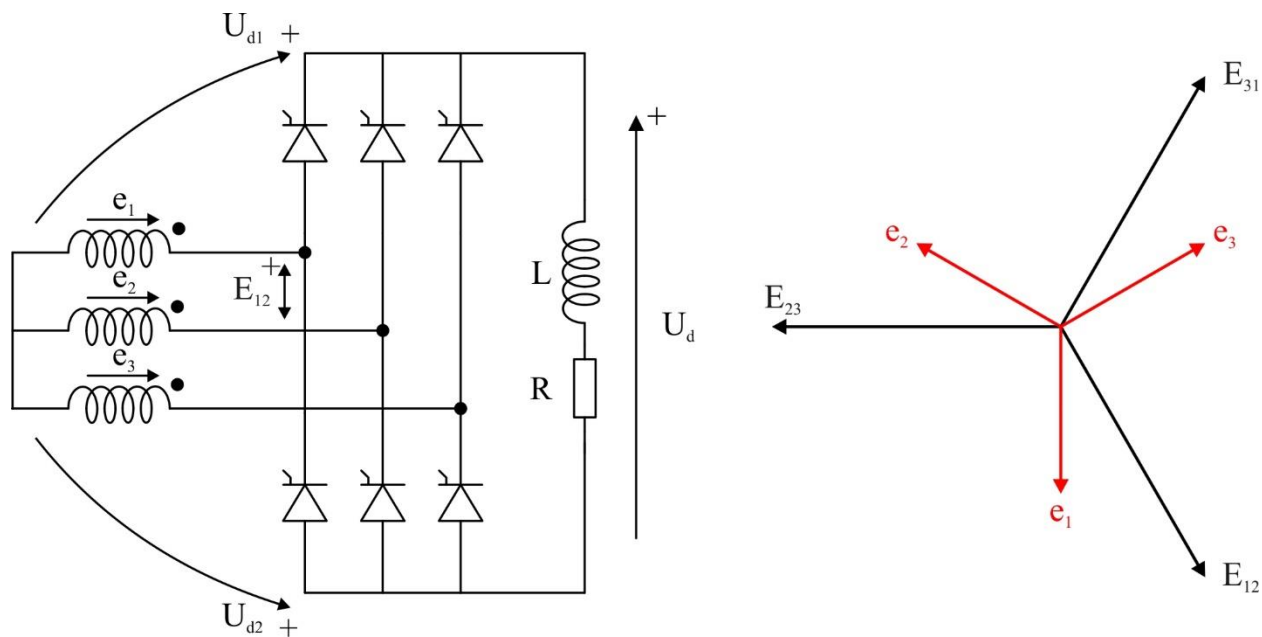


Слика 2.

**Напомена:** Сваку тврдњу изнесу у задатку потребно је поткрепити кратком дискусијом. У супротном, задатак неће бити оцењен пуним бројем поена. Дозвољена је употреба калкулатора и графитне оловке. Срећно!

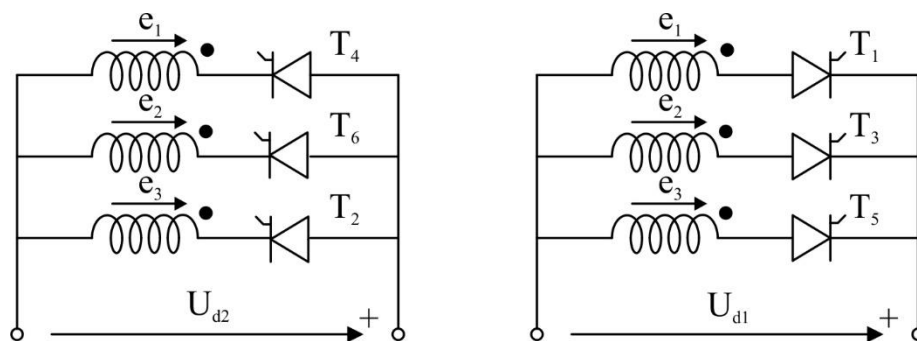
## РЕШЕЊЕ ЗАДАТКА 1.

При управљању мосним исправљачем битно је посматрати међуфазне напоне с обзиром на то да се у односу на пролазак истих кроз нулу дефинишу углови паљења тиристора у мосту. Такође, укључењем различитих комбинација тиристора из горње и доње половине моста, на оптерећење се доводе међуфазни напони. Дакле, уколико се секундар трансформатора са слике 1. еквивалентира звездом која има исте међуфазне напоне, са стране потрошача ситуација ће остати непромењена.



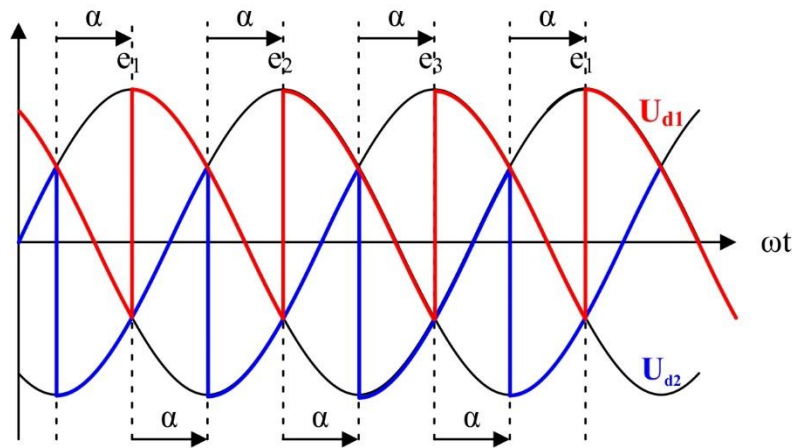
Слика 1.1.

Мосни исправљач са слике 1.1. може се посматрати као редна веза два трофазна једностранна исправљача као на слици 1.2.



Слика 1.2.

Средња вредност напона на оптерећењу може се добити као разлика напона  $U_{d1}$  и  $U_{d2}$ . На слици 1.3. приказани су таласни облици напона на излазу из трофазних једностранних исправљача са слике 1.2., при чему је  $|e| = E = \frac{U_{LIN}}{\sqrt{3}}$ . Са  $U_{LIN}$  означена је ефективна вредност међуфазног напона секундара трансформатора са слике 1. и може се изразити и као  $E_{LIN} = \frac{U_m}{m\sqrt{3}}$ , где је са  $U_m$  означена ефективна вредност мрежног напона.



Слика 1.3.

Средња вредност напона на излазу једног трофазног једностраног исправљача израчунава се према изразу 1.1.

$$U_d = \frac{3}{2\pi} \int_{\alpha + \frac{\pi}{6}}^{\alpha + \frac{\pi}{6} + \frac{2\pi}{3}} E\sqrt{2} \sin(\omega t) d(\omega t) \quad (1.1)$$

Решавањем интеграла из израза 1.1 долази се до израза 1.4.

$$U_d = \frac{3E\sqrt{2}}{2\pi} \int_{\alpha + \frac{\pi}{6}}^{\alpha + \frac{\pi}{6} + \frac{2\pi}{3}} d(\cos(\omega t)) \quad (1.2)$$

$$U_d = \frac{3E\sqrt{2}}{2\pi} \left( \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{6}\right) - \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{6} + \frac{2\pi}{3}\right) \right) \quad (1.3)$$

$$U_d = \frac{3E\sqrt{6}}{2\pi} \cos\alpha \quad (1.4)$$

Како је трофазни мост представљен редном везом два једностранна исправљача, средња вредност напона на оптерећењу двоструко је већа него код трофазног једностраног исправљача. На основу тога може се извести релација 1.7.

$$U_d = 2 \frac{3E\sqrt{6}}{2\pi} \cos\alpha \quad (1.5)$$

$$U_d = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} \frac{U_m}{\sqrt{3m}} \frac{1}{\sqrt{3}} \cos\alpha \quad (1.6)$$

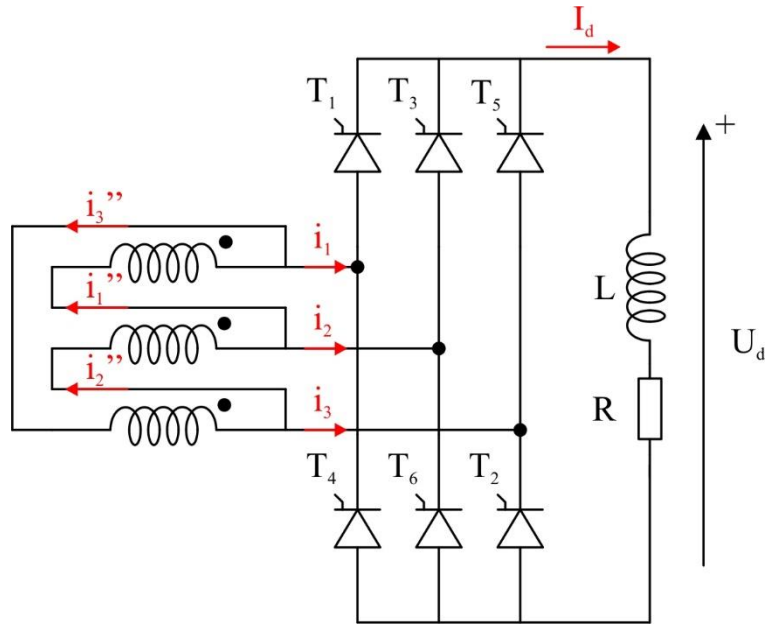
$$U_d = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \frac{U_m}{m} \cos\alpha = 74.07V \quad (1.7)$$

Оптерећење представља редну везу отпорника и пригушнице, што је линеарно коло. Напон којим се побуђује ово линеарно коло садржи средњу вредност  $U_d$  и низ виших хармоника  $\tilde{i}$ . Одзив линеарног кола на сложену побуду може се потражити као збир одзива на сваку од побуда понаособ. То значи да се струја оптерећења може изразити следећом релацијом.

$$i_{\text{LOAD}} = I_d + \tilde{i} \quad (1.8)$$

Наизменична компонента струје оптерећења  $\tilde{i}$  зависи од индуктивности пригушнице. Како је индуктивност пригушнице јако велика, наизменична компонента струје оптерећења се може занемарити (услов задатка).

$$i_{\text{LOAD}} = \frac{U_d}{R} \quad (1.9)$$



Слика 1.4.

Према слици 1.4., линијске струје  $i_1$  и  $i_2$  могу се изразити релацијама 1.10 и 1.11 и приказане су на слици 1.5.

$$i_1 = i_1'' - i_3'' \quad (1.10)$$

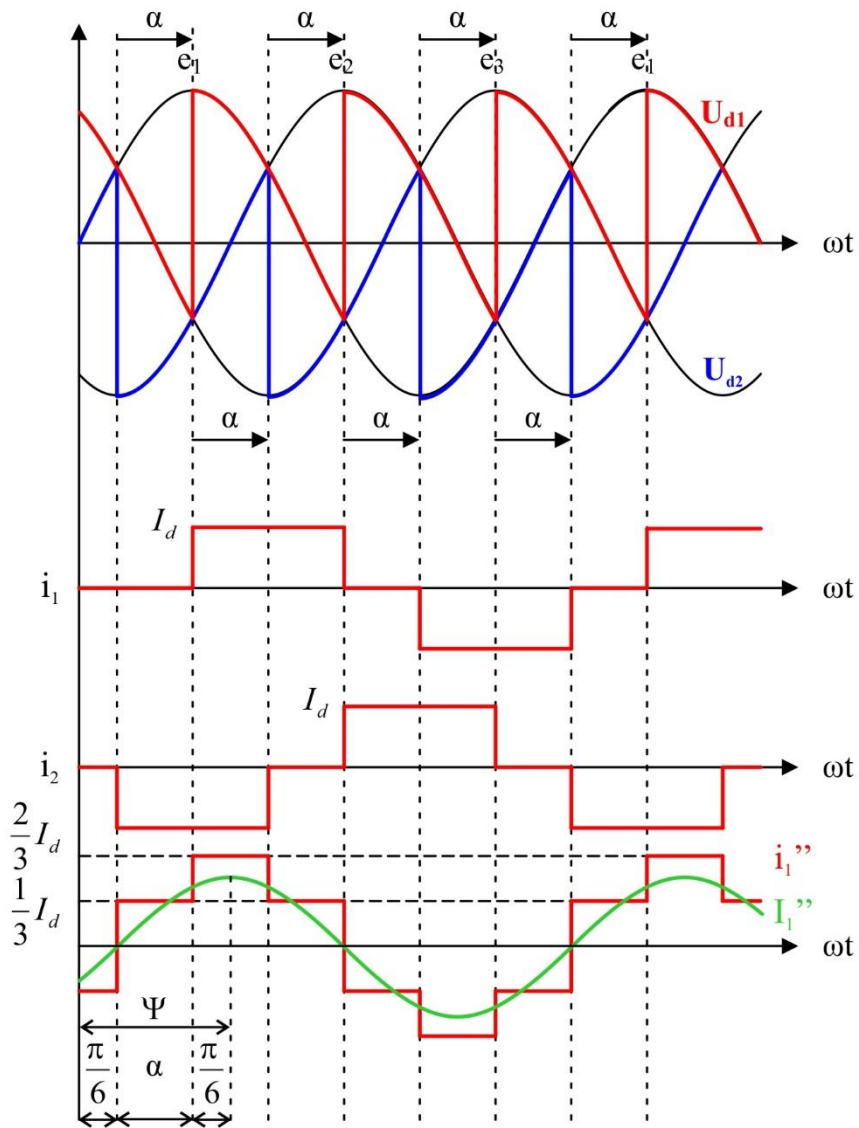
$$i_2 = i_2'' - i_1'' \quad (1.11)$$

Развојем линијских струја у Фуријеов ред може се показати да исте не садрже хармонике на троструким умношцима мрежне учестаности. Дакле, са стране секундара трансформатора не постоји извор трећих хармоника. Примар трансформатора којим се напаја трофазни мостни исправљач повезан је у звезду у којој, због изолованог звездишта, не могу постојати трећи хармоници. Стога, може се тврдити да је збир струја у троуглу трансформатора једнак нули.

$$i_1'' + i_2'' + i_3'' = 0 \quad (1.12)$$

Решавањем система који чине релације 1.10, 1.11 и 1.12 долази се до таласног облика струје једне фазе секундара трансформатора.

$$i_1'' = \frac{i_1 - i_2}{3} \quad (1.13)$$



Слика 1.5.

На слици 1.5. приказан је основни хармоник струје једне фазе секундара трансформатора  $I_1''$ . Уколико је напон на секундару синусоидалан и без присуства виших хармоника, може се показати да само основни хармоник струје учествује у преносу активне снаге. Такође, са слике 1.5. може се уочити да је фазни став основног хармоника струје секундара једнак  $\Psi = -\left(\frac{\pi}{6} + \alpha + \frac{\pi}{6}\right)$ .

Напони  $e_1, e_2$  и  $e_3$  су „фиктивни“ и уведени су ради свођења мосног исправљача на редну везу два трофазна једнострана (битно је одржати међуфазне напоне). Напон који стварно постоји на фази трансформатора је разлика напона  $e_1$  и  $e_2$ . Према слици 1.5. фазни став тог напона износи  $\xi = -\frac{\pi}{3}$ . Фазни раскорак између напона на фази секундара и основног хармоника струје исте те фазе износи:

$$\varphi = \xi - \Psi \quad (1.14)$$

$$\varphi = \alpha \quad (1.15)$$

Губици у тиристорском мосту могу се занемарити одакле следи релација 1.15.

$$P'' = RI_d^2 \quad (1.16)$$

$$\sqrt{3} \frac{U_m}{m} I_{1\text{eff}}'' \cos \alpha = \frac{U_d^2}{R} \quad (1.17)$$

$$\sqrt{3} \frac{U_m}{m} I_{1\text{eff}}'' \cos \alpha = \frac{1}{R} \left\{ \frac{3\sqrt{6}}{\pi} \frac{U_m}{\sqrt{3m}} \frac{1}{\sqrt{3}} \cos \alpha \right\}^2 \quad (1.18)$$

$$I_{1\text{eff}}'' = \frac{6U_m}{R\sqrt{3m\pi^2}} \cos \alpha \quad (1.18)$$

$$I_{1\text{eff}}'' = 11.11A \quad (1.19)$$

До истог резултата могло се доћи и развојем таласног облика са слике 1.5. у Фуријеов ред. Фазни померај између првих хармоника струје и напона секундара одређује фактор снаге првог хармоника читавог постројења.

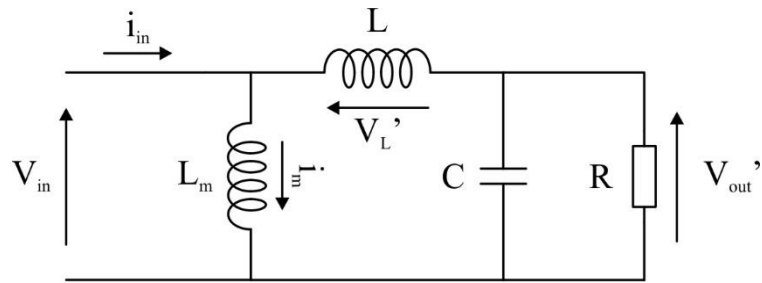
$$\lambda_1 = \cos \alpha = 0.5 \quad (1.20)$$



## РЕШЕЊЕ ЗАДАТКА 2.

Рад претварача са слике 2. може се посматрати у случају када су прекидачи  $S_1$  и  $S_2$  затворени и у случају када су исти отворени.

Уколико су прекидачи затворени, диоде  $D_1$  и  $D_2$  су инверзно поларисане улазним напонам  $V_{in}$ . На примар трансформатора доводи се улазни напон, што доводи до укључења диоде  $D_3$ . Уколико је диода  $D_3$  укључена, диода  $D_4$  је инверзно поларисана напонам на секундару трансформатора и претварач се може представити колом са слике 2.1.



Слика 2.1.

У колу са слике 2.1. важе релације 2.1-2.4.

$$V_{in} = V_L' + V_{out}' \quad (2.1)$$

$$V_L = \frac{V_{in}}{m} - V_{out} \quad (2.2)$$

$$V_m = V_{in} \quad (2.3)$$

$$i_{in} = i_L + i_m \quad (2.4)$$

Под дејством позитивног напона на индуктивност магнећења трансформатора, долази до раста струје магнећења. Такође, напон на пригушници  $L$  је позитиван па струја исте расте.

Пре искључења прекидача  $S_1$  и  $S_2$  у магнетском колу трансформатора мора бити задовољена равнотежа магнетопобудних сила (постоји акумулисана енергија у магнетском колу).

$$N_1 i_1 - N_2 i_2 = N_1 i_m \quad (2.5)$$

где су:

$N_1$  - број навојака примара трансформатора

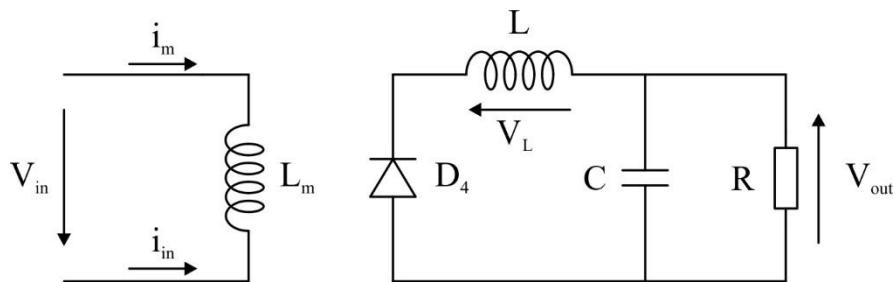
$N_2$  - број навојака секундара трансформатора

$i_m$  - струја магнећења

$i_1$  - струја примара трансформатора

$i_2$  - струја секундара трансформатора

Искључењем прекидача  $S_1$  и  $S_2$  струја  $i_1$  постаје једнака нули и долази до тренутког нарушавања релације 2.5. Струја магнећења представља флуks у језргу трансформатора и како не би дошло до нарушавања релације 2.5., по искључењу прекидача  $S_1$  и  $S_2$ , негде у трансформатору мора доћи до затварања струје „у тачку“. Диода  $D_3$  не дозвољава такав ток струје па долази до укључења диода  $D_1$  и  $D_2$  и размагњења трансформатора улазним напоном. Део периоде одабирања током кога се трансформатор размагњењује износи  $t_m = D_m T = DT$ . Диода  $D_3$  је искључена и током овог интервала не долази до преноса енергије од извора ка потрошачу. Претварач се може представити помоћу два одвојена кола са слике 2.2.



Слика 2.2.

По искључењу диоде  $D_3$  долази до укључења диоде  $D_4$  због одржавања струје (магнетске енергије) пригушнице  $L$ . У колу са слике 2.2. важе релације 2.6 и 2.7.

$$V_L = -V_{\text{out}} \quad (2.6)$$

$$i_{\text{in}} = -i_{\text{m}} \quad (2.7)$$

У устаљеном стању, средња вредност напона на пригушници  $L$  током једне периоде одабирања мора бити једнака нули, одакле се изводи релација 2.10.

$$\left( \frac{V_{\text{in}}}{m} - V_{\text{out}} \right) t_{\text{on}} = V_{\text{out}} (T - t_{\text{on}}) \quad (2.8)$$

$$V_{\text{out}} = \frac{V_{\text{in}} t_{\text{on}}}{m T} \quad (2.9)$$

$$V_{\text{out}} = \frac{V_{\text{in}}}{m} D \quad (2.10)$$

Релација 2.10 важи уколико претварач ради у непрекидном режиму рада. Средња вредност струје кондензатора у устаљеном стању једнака је нули, па се закључује да је средња вредност струје оптерећења једнака средњој вредности струје пригушнице. Да би претварач радио у непрекидном режиму рада мора бити испуњен услов дат релацијом 2.11.

$$\frac{V_{\text{out}}}{R} \geq \frac{\Delta i_{\text{pp}}}{2} \quad (2.11)$$

Уколико су прекидачи искључени, таласност струје пригушнице  $\Delta i_{\text{pp}}$  може се израчунати према релацији 2.14.

$$L \frac{di}{dt} = -V_{\text{out}} \quad (2.12)$$

$$\Delta i_{\text{pp}} = -\frac{t_{\text{off}}}{L} V_{\text{out}} \quad (2.13)$$

$$|\Delta i_{pp}| = \frac{1}{Lf} (1-D)V_{out} \quad (2.14)$$

Релација 2.11 постаје:

$$\frac{V_{out}}{R} \geq \frac{V_{out}}{2Lf} (1-D) \quad (2.15)$$

$$L \geq \frac{R}{2f} (1-D) \quad (2.16)$$

Критичан случај је онај у коме је улазни напон највећи. Тада су прекидачи  $S_1$  и  $S_2$  најдуже искључени и струја пригушнице  $L$  дуго опада са нагибом  $\frac{di}{dt} = -\frac{V_{out}}{L}$  (нагиб се мења са променом *duty cycle* јер је вредност излазног напона константна). Дакле, потребно је пронаћи минималан *duty cycle* при коме се одржава жељена вредност излазног напона.

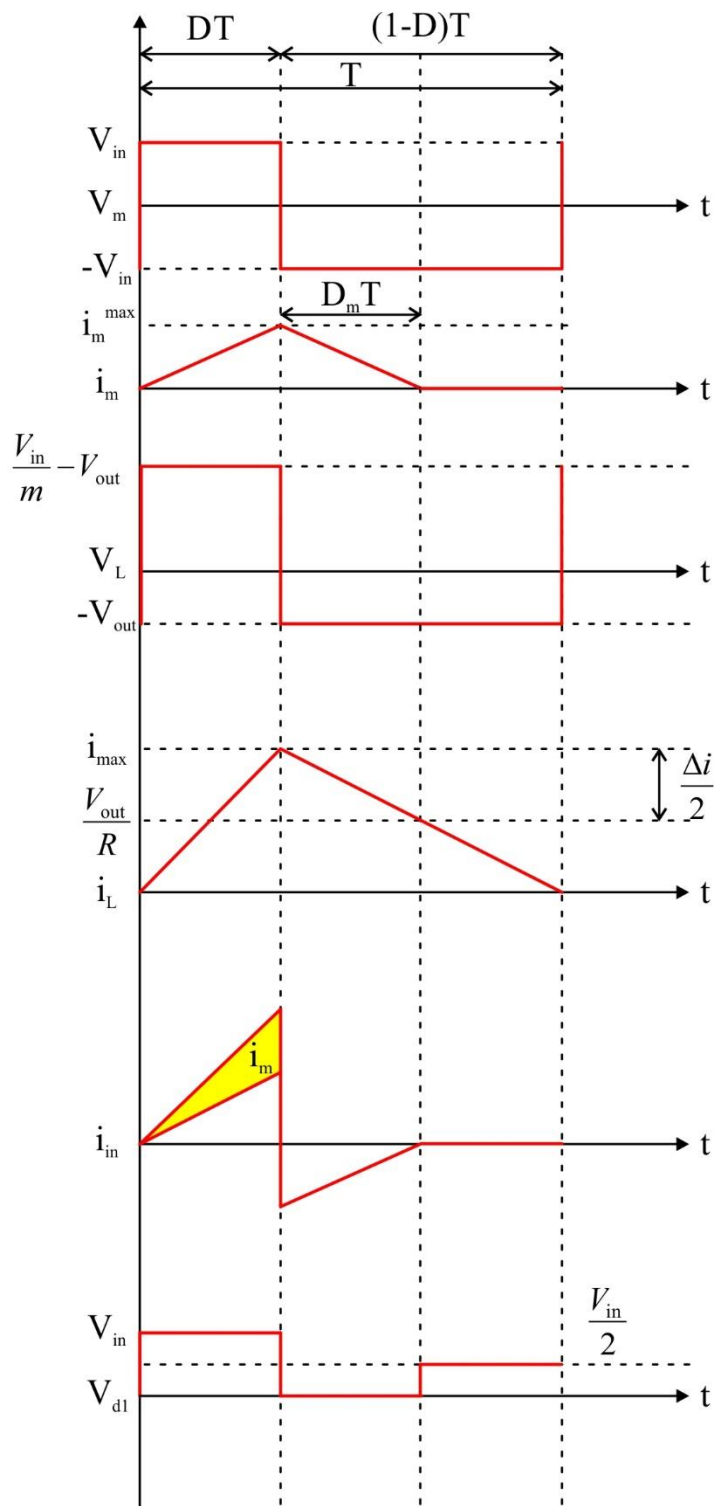
$$D_{min} = \frac{V_{out}}{V_{in}^{max}} m \quad (2.17)$$

Коришћењем релације 2.17 релација 2.16 постаје:

$$L \geq \frac{R}{2f} \left( 1 - \frac{V_{out}}{V_{in}^{max}} m \right) = 33\mu\text{H} \quad (2.18)$$

Време које је потребно да се трансформатор размагнети једнако је времену укључења прекидача  $S_1$  и  $S_2$ . Дакле, максимално дозвољени *duty cycle* износи  $D_{max} = 0.5$ . Стога, најмањи улазни напон којим је могуће одржавати жељену вредност излазног напона износи  $V_{in}^{min} = \frac{m}{D_{max}} V_{out} = 16\text{V}$ .

Тражени таласни облици дати су на слици 2.3.



Слика 2.3.