



**КАТЕДРА ЗА ЕНЕРГЕТСКЕ ПРЕТВАРАЧЕ И ПОГОНЕ  
ЛАБОРАТОРИЈА ЗА ЕНЕРГЕТСКЕ ПРЕТВАРАЧЕ  
ЕНЕРГЕТСКИ ПРЕТВАРАЧИ 1**

---

Лабораторијска вежба број 3

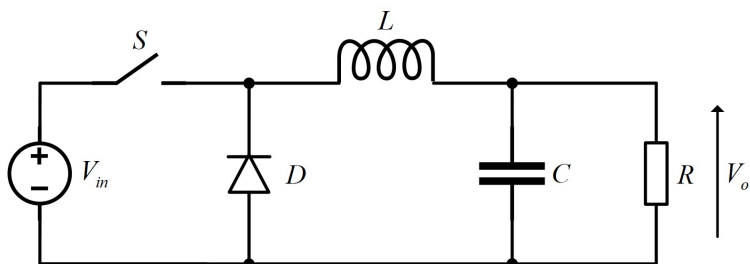
**ЧОПЕР СПУШТАЧ НАПОНА БАЗИРАН НА РЕГУЛАТОРУ *TPS54160***

## 1. ЦИЉ ЛАБОРАТОРИЈСКЕ ВЕЖБЕ

Циљ ове лабораторијске вежбе је упознавање студента са основним принципима рада чопера спуштача напона, као и практична примена знања стеченог на часовима предавања и рачунских вежби. Лабораторијска вежба биће изведена на чоперу *TI-PMLK BUCK*, базираном на регулатору *TPS54160*.

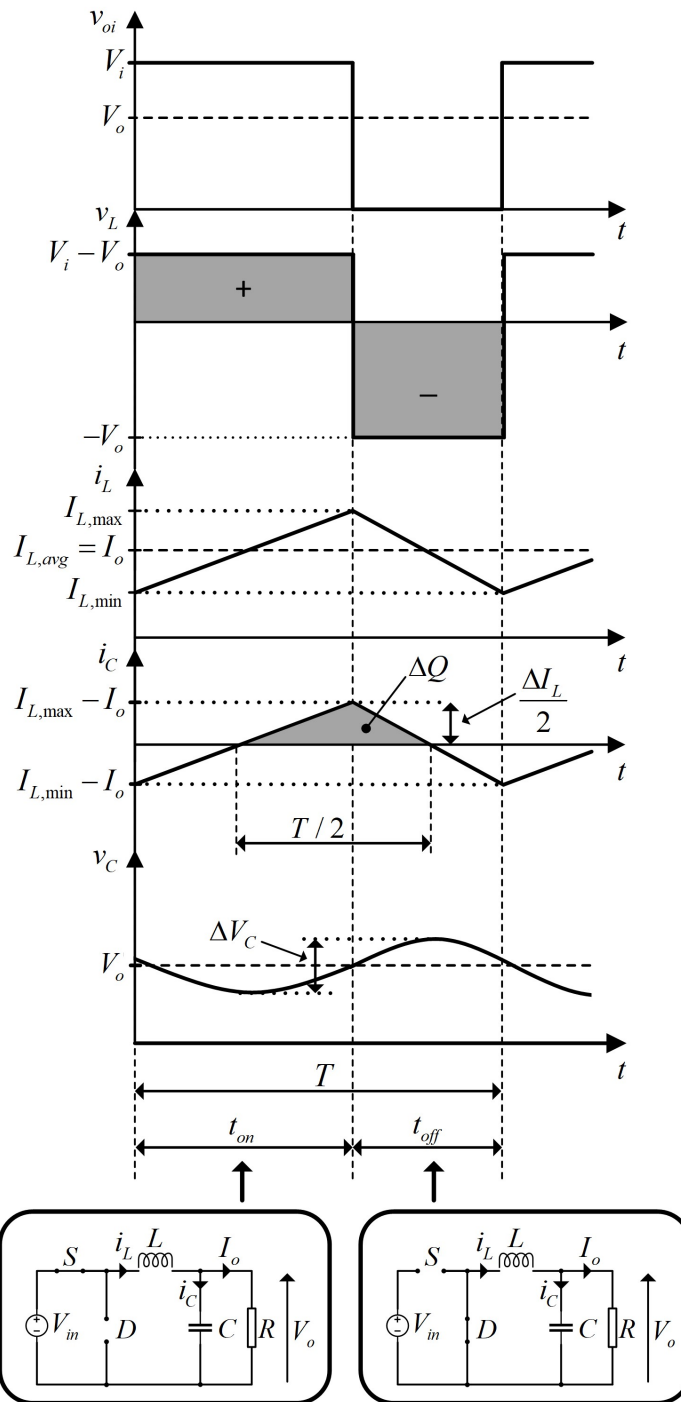
## 2. ТЕОРИЈСКИ УВОД

Принцип рада чопера спуштача напона може се објаснити помоћу упрошћене шеме која је приказана на Слици 1.



Слика 1. Упрошћена шема чопера спуштача напона

С обзиром на то да је таласност (*ripple*) излазног напона мала, приликом анализе рада чопера у устаљеном стању сматраћемо да је излазни напон чопера константан, чиме се анализа знатно упрошћава. Касније ћемо увести таласност напона на оптерећењу да бисмо могли да одредимо потребну капацитивност филтерског кондензатора. За почетак, сматраћемо и да је струја пригушнице непрекидна (тј. да чопер ради у непрекидном режиму). Период рада чопера приказаног на слици можемо поделити на два интервала. У првом интервалу прекидач  $S$  је укључен и струја кроз пригушницу  $L$  линеарно расте од вредности  $I_{L,min}$  до вредности  $I_{L,max}$ , под утицајем разлике улазног и излазног напона, као што је приказано таласним обликом струје пригушнице на Слици 2. У овом интервалу рада чопера, у пригушници се акумулише магнетска енергија. Време у току којег је прекидач укључен означено је као  $t_{on}$ . Када се прекидач искључи, струја кроз пригушницу не може тренутно да се промени, напон на пригушници мења поларитет и проведе диода  $D$ . Струја кроз пригушницу сада линеарно опада од вредности  $I_{L,max}$  до вредности  $I_{L,min}$ , под утицајем излазног напона. Магнетска енергија нагомилана у пригушници предаје се једним делом филтерском кондензатору, док се део енергије предаје оптерећењу. Време у току којег је прекидач искључен означено је као  $t_{off}$ . Потребно је рећи да се пренос енергије помоћу чопера спуштача напона врши искључиво у једном смеру: од стране са вишим напонам ка страни са нижим напонам.



Слика 2. Карактеристични таласни облици за чопер са Сликe 1. (непрекидни режим)

С обзиром на то да анализирамо рад чопера у устаљеном стању, средња вредност струје кондензатора једнака је нули (што је дуално чињеници да је средња вредност напона на пригушници у устаљеном стању једнака нули), па је средња вредност струје пригушнице једнака струји оптерећења која је константна (јер је претходно занемарена наизменична компонента напона на оптерећењу). Средња вредност напона на излазу чопера може да се одреди на

више начина. На основу таласних облика са Сlike 2 следи да ће у интервалу у коме је прекидач укључен струја линеарно да расте од вредности  $I_{L,\min}$  до вредности  $I_{L,\max}$ , под утицајем разлике улазног и излазног напона. Према томе, у овом интервалу важи једначина:

$$V_i - V_o = L \cdot \frac{I_{L,\max} - I_{L,\min}}{t_{on}} = L \cdot \frac{\Delta I_L}{t_{on}} \quad (2.1)$$

Ова једначина може да се пише и као:

$$t_{on} = \frac{L \cdot \Delta I_L}{V_i - V_o} \quad (2.2)$$

У интервалу у коме је прекидач искључен, струја кроз пригушницу линеарно опада од вредности  $I_{L,\max}$  до вредности  $I_{L,\min}$ , под утицајем излазног напона, и важи једначина:

$$V_o = L \cdot \frac{\Delta I_L}{t_{off}} \quad (2.3)$$

Ова једначина може да се пише и као:

$$t_{off} = \frac{L \cdot \Delta I_L}{V_o} \quad (2.4)$$

Изједначавањем вредности за  $\Delta I_L$  у једначинама (1.1) и (1.3) добија се:

$$\Delta I_L = \frac{(V_i - V_o) \cdot t_{on}}{L} = \frac{V_o \cdot t_{off}}{L} \Rightarrow V_i \cdot t_{on} = V_o \cdot (t_{on} + t_{off}) \quad (2.5)$$

тј., важи:

$$V_o = D \cdot V_i \quad , \quad D = \frac{t_{on}}{T} \quad (2.6)$$

Средња вредност напона на излазу чопера може да се одреди и на основу чињенице да је средња вредност напона на пригушници, у устаљеном стању, једнака нули:

$$(V_i - V_o) \cdot t_{on} - V_o \cdot t_{off} = 0 \Rightarrow V_o = D \cdot V_i \quad , \quad D = \frac{t_{on}}{T} \quad (2.7)$$

Периода рада чопера може се добити сабирањем једначина (1.2) и (1.4):

$$T = \frac{1}{f} = t_{on} + t_{off} = \frac{L \cdot \Delta I_L}{V_i - V_o} + \frac{L \cdot \Delta I_L}{V_o} = \frac{L \cdot \Delta I_L \cdot V_i}{(V_i - V_o) \cdot V_o} \quad (2.8)$$

Одавде се добија израз за *peak-to-peak* таласност струје кроз пригушницу:

$$\Delta I_L = \frac{V_o \cdot (V_i - V_o)}{f L V_i} \quad (2.9)$$

или:

$$\Delta I_L = \frac{V_i \cdot D(1-D)}{f L} \quad (2.10)$$

*Peak-to-peak* таласност напона на кондензатору може се одредити посматрајући таласни облик струје кроз кондензатор. Претпоставићемо да целокупна наизменична компонента струје пригушнице пролази кроз кондензатор, а да само једносмерна компонента струје пригушнице пролази кроз оптерећење. Са слике се види да се кондензатор пуни количином електрицитета  $\Delta Q$  док год је струја пригушнице већа од струје оптерећења. Према томе, *peak-to-peak* таласност напона на кондензатору је:

$$\Delta V_C = \frac{\Delta Q}{C} = \frac{1}{C} \frac{1}{2} \frac{\Delta I_L}{2} \frac{T}{2} \quad (2.11)$$

Чопер ради у непрекидном режиму уколико је средња вредност струје пригушнице (која је једнака средњој излазној струји) већа од половине рипла те струје, тј.:

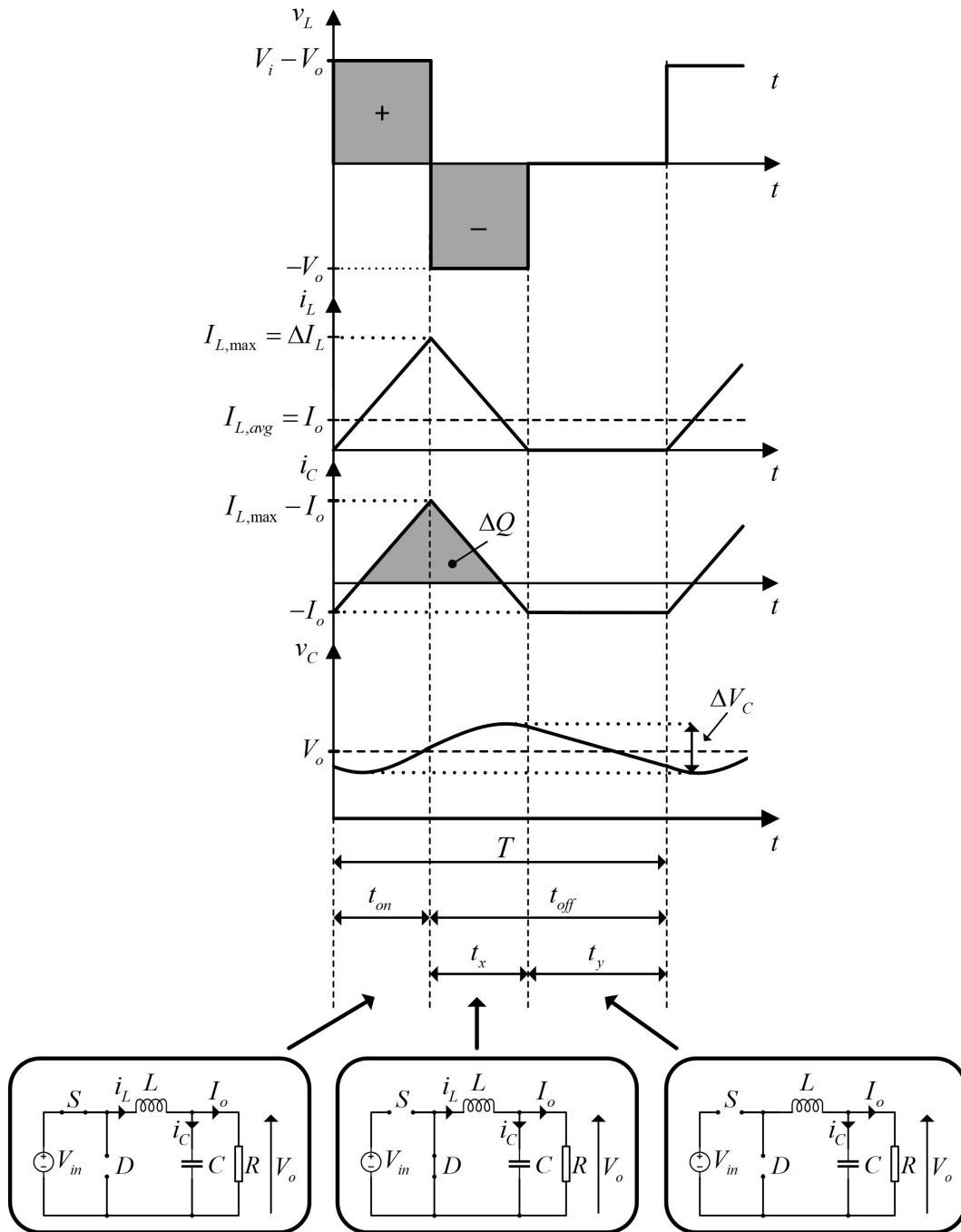
$$I_o > \frac{\Delta I_L}{2} \quad (2.12)$$

Уколико пак, овај услов није задовољен, чопер ради у прекидном режиму. Карактеристични таласни облици за прекидни режим налазе се на Слици 3. Прекидни режим настаје уколико струја пригушнице, током интервала прекидачког периода када та струја опада, падне на нулу у неком тренутку  $t = DT + t_x < T$ . Такође, током овог интервала, струја диоде једака је струји пригушнице, па како диода не може да проводи у контра смеру, она се гаси. То доводи до појаве новог стања у раду чопера, када су и прекидач и диода угашени. За то време, кондензатор  $C$  празни се на отпорном оптерећењу  $R$ . Струја пригушнице остаје једнака нули све до новог укључења прекидача  $S$ , односно до почетка следећег прекидачког периода. Одавде, могуће је закључити да је у устаљеном стању, струја пригушнице једнака нули на почетку сваког прекидачког периода.

Као и у случају непрекидног режима, претпоставимо да је кондензатор  $C$  димензионисан тако да се рипл излазног напона може занемарити, па се може

занемарити и рипл излазне струје. Средња вредност струје пригушнице у прекидном режиму једнака је:

$$I_{L, sr} = \frac{\Delta I_L (DT + t_x)}{2T} \quad (2.13)$$



Слика 3. Карактеристични таласни облици за чоपर са Сликe 1. (прекидни режим)

Израз за дужину трајања временског интервала  $t_x$  могуће је извести из услова да је у устаљеном стању, средња вредност напона на пригушници једнака нули, одакле следи:

$$t_x = \frac{(V_i - V_o)}{V_o} DT \quad (2.14)$$

Када овај израз уврстимо у претходни, и када у обзир узмемо да је код чопера спуштача, средња вредност струје пригушнице једнака је излазној струји, добијамо:

$$I_o = \frac{\Delta I_L (DT + \frac{V_i - V_o}{V_o} DT)}{2T} \quad (2.15)$$

тј.:

$$\frac{V_o}{R} = \frac{\frac{V_i - V_o}{L} D^2 T (1 + \frac{V_i - V_o}{V_o})}{2} \quad (2.16)$$

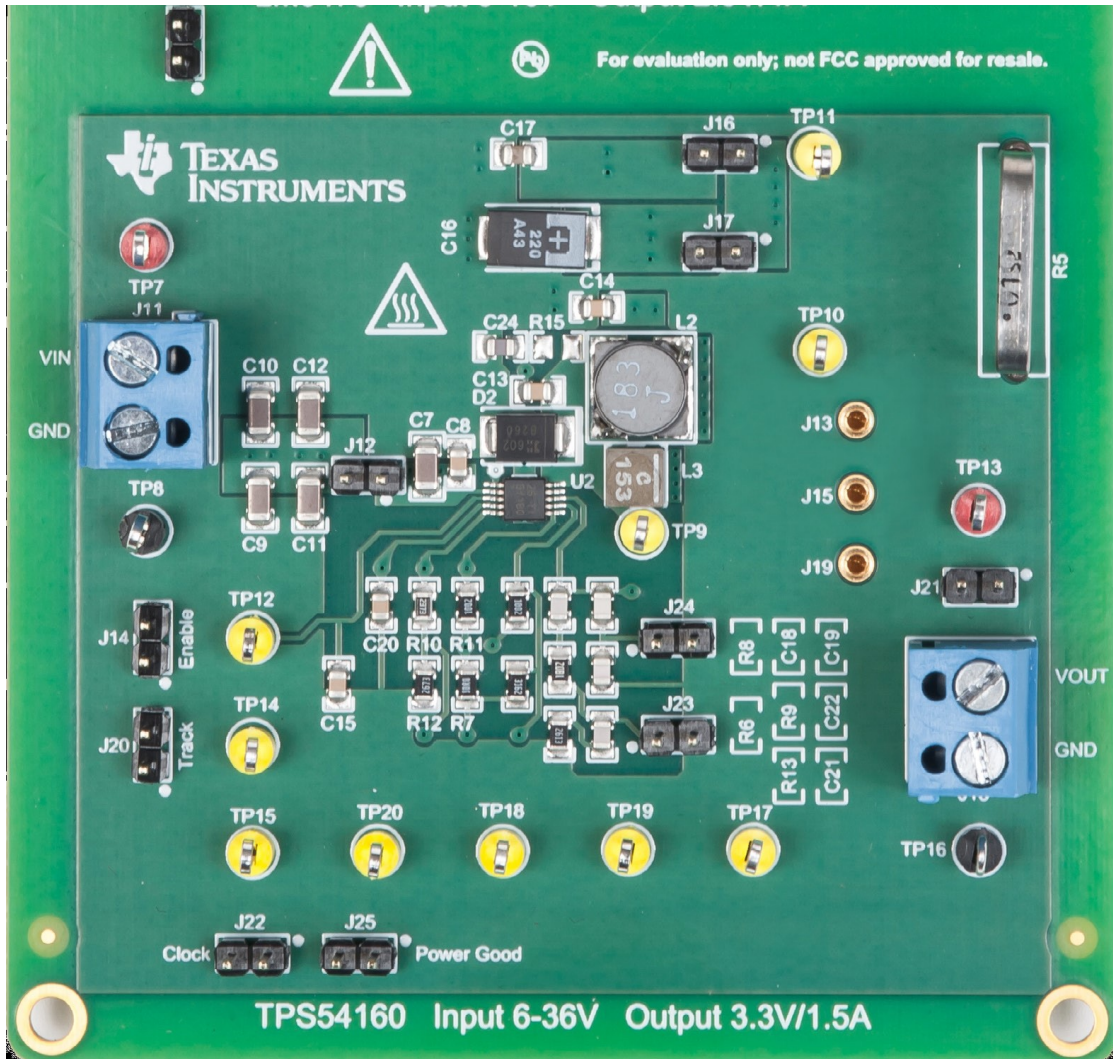
Решавањем претходне једначине по  $V_o$ , добија се израз за излазни напон за чопер спуштач напона који ради у прекидном режиму:

$$V_o = \frac{-D^2 E + DE \sqrt{D^2 + 8 \frac{Lf}{R}}}{4Lf} R \quad (2.17)$$

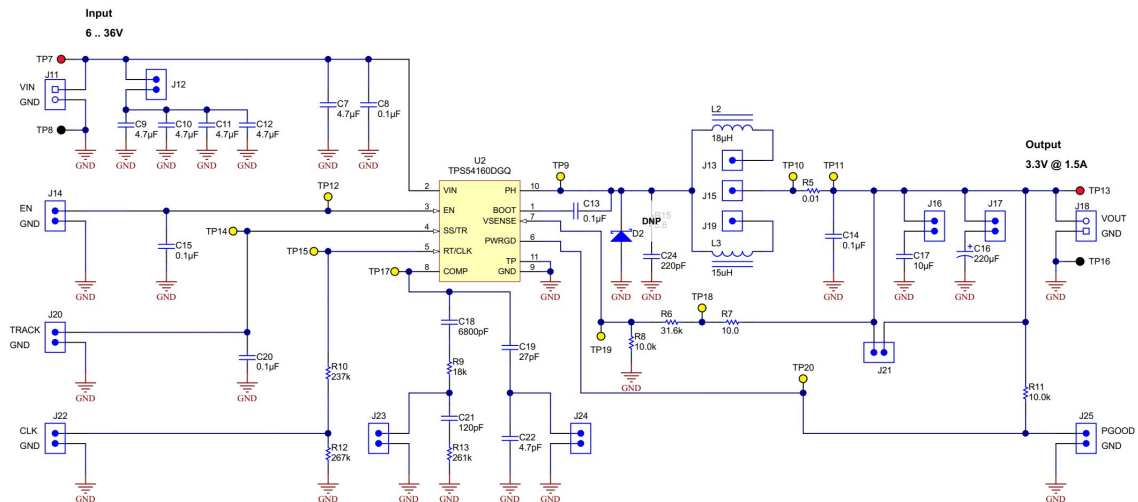
### 3. ОПИС ПОСТАВКЕ

Чопер спуштач напона *TPS54160* приказан је на Слици 4., док је његова електрична шема приказана на Слици 5. Номинална снага овог претварача је 4.95W. Опег улазног напона овог претварача је од 6V до 36V, док се излазни напон одржава на констатној вредности од 3.3V, захваљујући регулатору *TPS54160DGQ* (детаљан *datasheet* овог регулатора у додатним материјалима ове лаб. вежбе). *N*-канални *MOSFET*, који има улогу прекидача у овом колу, налази се унутар регулатора *TPS54160DGQ*.

Пре пуштања у рад чопера, један од конектора J13 или J19 мора бити краткоспојен са конектором J15, у супротном, у колу чопера неће бити прикључена ниједна пригушница. Постављањем краткоспојника између конектора J13 и J15, у коло је укључена пригушница индуктивности од 18μН, а уколико се краткоспојник постави између конектора J19 и J15, у коло је укључена пригушница од 15μН. Такође, бар један од конектора J16 и J17 мора бити затворен краткоспојником, да би у коло био прикључен излазни кондензатор.



Слика 4. Чопер TPS54160



Слика 5. Електрична шема чопера TPS54160



#### 4. ЗАДАТАК

**Напомена:** Пре доласка на лабораторијску вежбу, попунити поља табела и скицирати графике који се односе на теоријске вредности.

##### 4.1 Зависност *DUTY CYCLE*-а од улазног напона при константном оптерећењу и радној фреквенцији

Као што је познато, чопер спуштач напона може да ради у 2 режима, у режиму када је струја кроз пригушницу непрекидна (непрекидан режим рада), као и у режиму када је струја кроз пригушницу прекидна (прекидан режим рада). Из теоријског увода знамо да у непрекидном режиму рада важи:

$$D = \frac{V_o}{V_i} \quad (4.1.1)$$

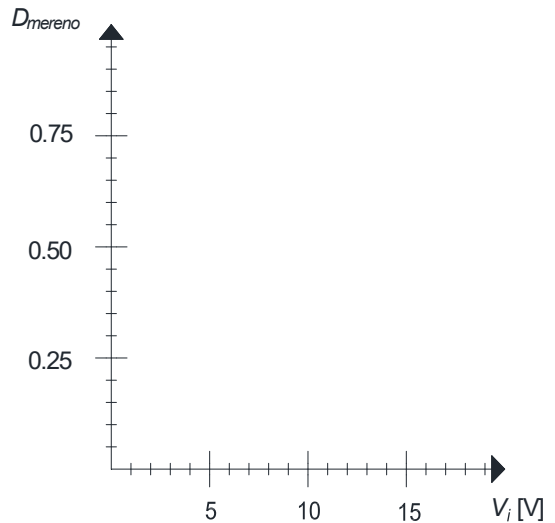
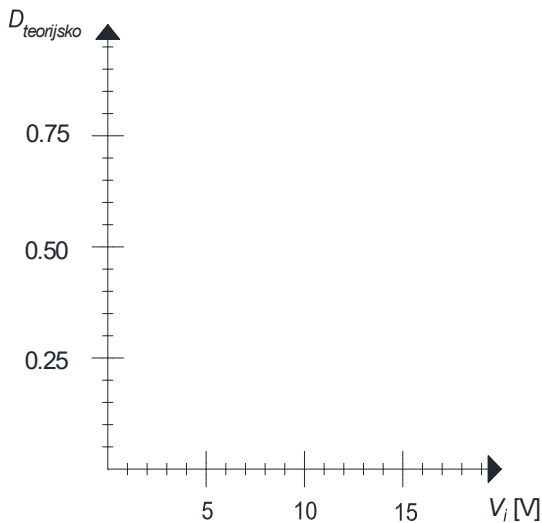
Када је струја кроз пригушницу прекидна, има се мало другачија зависност *duty cycle*-а од улазног напона. Она се може извести решавањем једначине (2.16) по D:

$$D = \sqrt{\frac{2Lf}{R} \frac{V_o^2}{V_i^2 - V_i V_o}} \quad (4.1.2)$$

Сада, када познајемо потребне релације, потребно је попунити Табелу 4.2. и нацртати одговарајуће графике. Циљ овог дела вежбе је, да се на основу израза који важе за чопер спуштач напона и параметара датог чопера, **пре доласка на вежбу** израчуна *duty cycle* ( $D_{\text{теоријско}}$ ), а потом, пуштањем у рад чопера, уз помоћ осцилоскопа, измери стварна вредност *duty cycle* ( $D_{\text{мерено}}$ ). Чопер ради са константним оптерећењем од  $R=11\Omega$  и константном радном фреквенцијом од  $f=233\text{kHz}$  (краткоспојник J22 је отворен), индуктивност пригушнице је  $L=18\mu\text{H}$  (краткоспојник J13-J15 је затворен), а капацитивност излазног кондензатора једнака је  $C=220\mu\text{F}$  (краткоспојник J17 затворен). Улазни напон ( $V_i$ ) мења у опсегу од 6V до 18V са кораком од 1V.

Табела 4.1 Израчунасте и измерене вредности *duty cycle*-а

$V_i$ [V]	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
$D_{\text{теоријско}}$													
$D_{\text{мерено}}$													



#### 4.2 Зависност рипла струје пригушнице од улазног напона при константном оптерећењу и радној фреквенцији

Као и у претходном делу задатка, у овој вежби ће такође бити потребно познавање релација за рипл струје пригушнице, како у непрекидном, тако и у прекидном режиму рада чопера спуштача напона. Оно што би требало знати јесте да је релација за рипл струје пригушнице увек истог облика, без обзира да ли је режим прекидан или непрекидан, и гласи:

$$\Delta I_L = \frac{(V_i - V_o) D}{Lf} \quad (4.2.1)$$

У вежби (4.2) евидентно је да су изрази за *duty cycle* у функцији улазног напона чопера различити за прекидан и непрекидан режим, и када се релације (4.1.1) и (4.1.2) примене на израз (4.2.1), за непрекидан режим рада добија се:

$$\Delta I_L = \frac{(V_i - V_o) V_o}{Lf V_i} \quad (4.2.2)$$

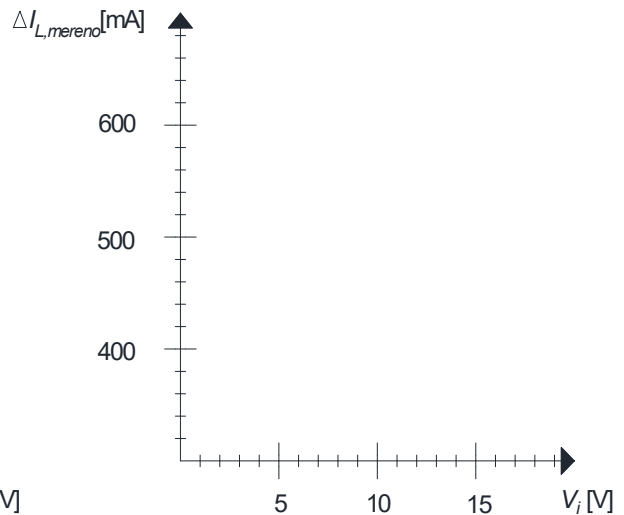
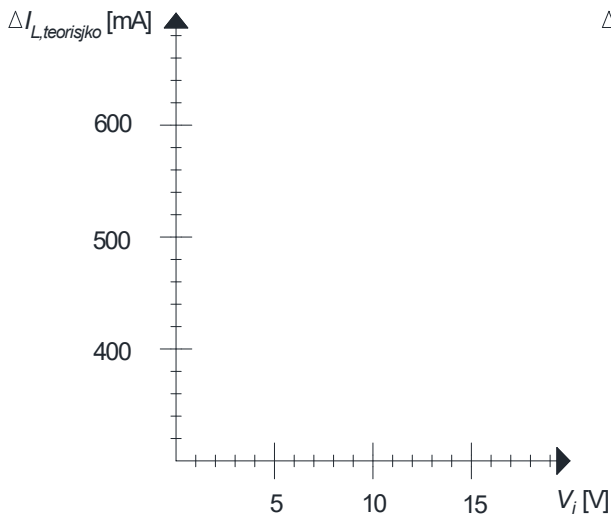
а за прекидан режим рада:

$$\Delta I_L = \frac{(V_i - V_o)}{Lf} \sqrt{\frac{2Lf}{R} \frac{V_o^2}{V_i^2 - V_i V_o}} = \sqrt{\frac{2}{RLf} \frac{V_o^2}{V_i} (V_i - V_o)} \quad (4.2.3)$$

У овом делу вежбе потребно је **пре доласка на вежбу** израчунати  $\Delta I_{L,teorijsko}$ , а током саме вежбе измерити  $\Delta I_{L,mereno}$ , и резултате унети у табелу (4.3). Након тога, потребно је и нацртати одговарајуће графике. Чопер ради са константним оптерећењем од  $R=13\Omega$  и константном радном фреквенцијом од  $f=233\text{kHz}$  (краткоспојник J22 је отворен), индуктивност пригушнице је  $L=18\mu\text{H}$  (краткоспојник J13-J15 је затворен), а капацитивност излазног кондензатора једнака је  $C=220\mu\text{F}$  (краткоспојник J17 затворен). Улазни напон ( $V_i$ ) мења у опсегу од 6V до 18V са кораком од 1V.

Табела 4.2 Израчунате и измерене вредности рипла струје пригушнице

$V_i$ [V]	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
$\Delta I_{L,teorijsko}$													
$\Delta I_{L,mereno}$													



### 4.3 Одређивање границе прекидног и непрекидног режима променом отпорности оптерећења

Одржавањем улазног и излазног напона константним, рипл струје пригушнице остаје константан. Повећавањем отпорности оптерећења, смањује се излазна струја, тј. средња вредност струје пригушнице. Уколико се отпорност  $R$  довољно повећа, струја пригушнице постаје прекидна. Вредност  $R$  при којој чопер ради на граници непрекидног и прекидног режима може се израчунати изједначавањем израза (4.1.1) и (4.1.2), одакле следи:

$$R = \frac{2LfV_i}{V_i - V_o} \quad (4.3.1)$$

**Пре доласка на вежбу**, потребно је израчунати вредност те отпорности, користећи следеће параметре:  $V_i=8V$ ,  $V_o=3.3V$ ,  $f=233kHz$ ,  $L=18\mu H$ .

$$R_{teorijsko} = \underline{\hspace{2cm}}$$

На почетку експеримента потребно је подесити улазни напон на вредност  $8V$ , затим, поставити краткоспојнике тако да је  $L=18\mu H$ ,  $C=220\mu F$ , а фреквенција прекидања  $f=233kHz$ . Мењати отпорност оптерећења уз помоћ потенциометра, све док чоपर не уђе у прекидни режим (посматрати одговарајуће таласне облике на осцилоскопу), а потом уз помоћ унимера одредити вредност  $R$  при којој чоपर прелази из непрекидног у прекидни режим.

$$R_{mereno} = \underline{\hspace{2cm}}$$

#### 4.4 Степен искоришћења

У овом делу вежбе потребно је одредити степен искоришћења чопера. То је веома важна карактеристика сваког уређаја, која заправо осликава квалитет и ефикасност његовог рада. У интересу је да губици буду што мањи, што се може постићи употребом квалитетних материјала (што са друге стране кошта) и унапређивањем управљачких метода.

На излаз чопера прикључити константно оптерећење од  $R=12\Omega$ , подесити прекидачку фреквенцију на  $f=233kHz$  (краткоспојник J22 је отворен), индуктивност пригушнице је  $L=18\mu H$  (краткоспојник J13-J15 је затворен), а капацитивност излазног кондензатора једнака је  $C=220\mu F$  (краткоспојник J17 затворен). Улазни напон ( $V_i$ ) подесити на вредност  $10V$ .

Први начин да се израчуна степен искоришћења је одређивањем губитака у чоперу. Губитке прорачунати користећи Matlab фајл gubici.m, који се налази у додатним материјалима, и попунити Табелу 4.4.

Табела 4.4 Прорачун губитака у чоперу

$P_{MOS,c}$	$P_{MOS,sw}$	$P_{MOS,g}$	$P_{sns}$	$P_{diode}$	$P_{L,w}$	$P_{L,c}$	$P_{ctm}$	$P_{Cout}$	$P_{TC}$	$P_{\Sigma 1}$

Степен искоришћења једнак је:

$$\eta_1 = \frac{P_{out}}{P_{\Sigma 1} + P_{out}} = \underline{\hspace{2cm}}$$

Други, директни начин јесте да се измере улазна снага (производ измереног улазног напона и измерене улазне струје) и излазна снага. Степен искоришћења рачуна се по формули:

$$\eta_2 = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \underline{\hspace{2cm}}$$

