



**КАТЕДРА ЗА ЕНЕРГЕТСКЕ ПРЕТВАРАЧЕ И ПОГОНЕ**  
**ЛАБОРАТОРИЈА ЗА ЕНЕРГЕТСКЕ ПРЕТВАРАЧЕ**  
**ЕНЕРГЕТСКИ ПРЕТВАРАЧИ 2**

---

Лабораторијска вежба број 2

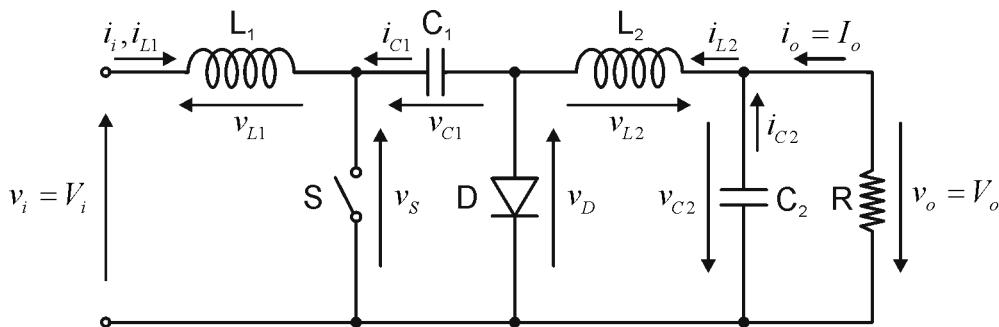
**СИМУЛАЦИЈА РАДА ЋУКОВОГ ПРЕТВАРАЧА ПОМОЋУ**  
**ПРОГРАМСКОГ ПАКЕТА *LTSpice*<sup>®</sup>**

## 1. ЦИЉ ЛАБОРАТОРИЈСКЕ ВЕЖБЕ

Циљ ове лабораторијске вежбе није илустрација могућности програмског пакета *LTSpice*<sup>®</sup>. Основни циљ вежбе је да се на основу резултата симулације рада датог енергетског претварача (у конкретном случају ради се о Ћуковом претварачу) у програмском пакету *LTSpice*<sup>®</sup>, уочи утицај који занемарења и претпоставке које се уводе приликом упрошћене анализе рада енергетског претварача имају на интерпретирање процеса који се одвијају у реалном енергетском претварачу. Поред тога, циљ је и да се студенти увере у неопходност коришћења алата за симулацију рада електричних кола приликом дизајна енергетских претварача, као и предности које симулација кола има у односу на склапање пробних прототипа претварача на прототипској плочи (*breadboard*).

## 2. ТЕОРИЈСКИ УВОД

Ћуков претварач, који је приказан на Слици 1, може да ради и као подизач и као спуштач напона (као *buck-boost* чопер), што зависи од задатог *duty cycle*-а.



Слика 1 Ћуков претварач

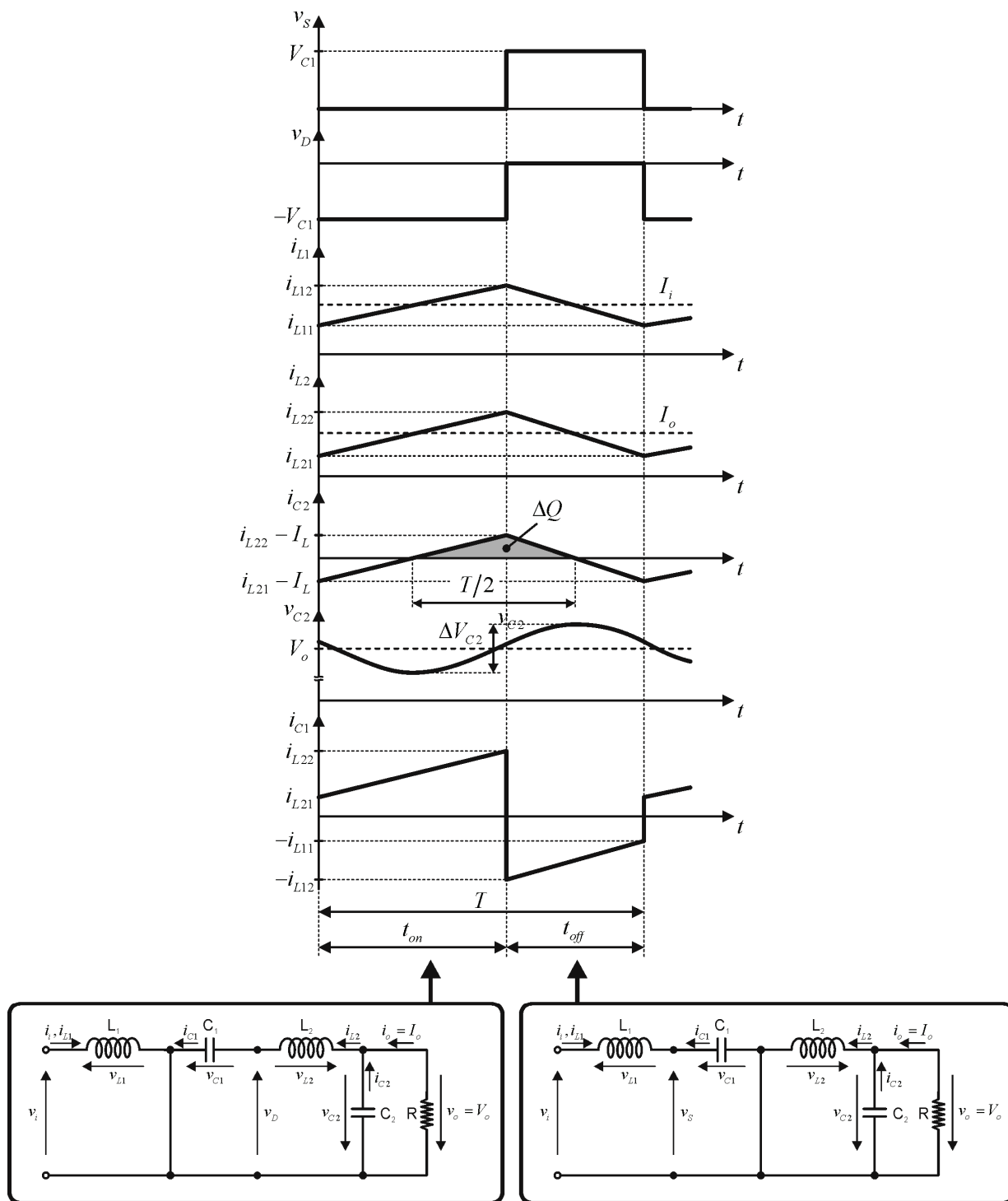
Напон на излазу овог претварача има обрнут поларитет у односу на напон на његовом улазу. Енергија се оптерећењу преноси преко кондензатора  $C_1$ , због чега је рипл (*ripple*=таласност) струје кроз кондензатор  $C_1$  велики. Ако је капацитивност кондензатора  $C_1$  довољно велика, може се занемарити рипл напона на кондензатору, тј. може се сматрати да је напон на кондензатору константан. Такође, претпостављамо да претварач ради у континуалном режиму. Ћуков претварач има мале прекидачке губитке и велику ефикасност.

Када се на улаз претварача прикључи извор  $V_i$ , при чему је прекидач  $S$  искључен, формира се коло:  $V_i$ ,  $L_1$ ,  $C_1$ ,  $D$ , у коме кондензатор  $C_1$  почиње да се пуни. То је редно LC осцилаторно коло у којем ће се појавити слободне осцилације, које ће трајати максимално једну полупериоду тих слободних осцилација (због присуства диоде  $D$ , јер струја кроз њу не може да протиче у непропусном смеру). Дакле, напон на кондензатору имаће поларитет као на Слици 1.

Рад претварача може се поделити на 2 интервала:

- 1) Укључен прекидач S (и самим тим искључена диода D)
- 2) Искључен прекидач S (и самим тим укључена диода D)

Таласни облици напона и струја за Ћуков претварач, као и еквивалентне шеме у појединим интервалима рада, приказани су на Слици 2.

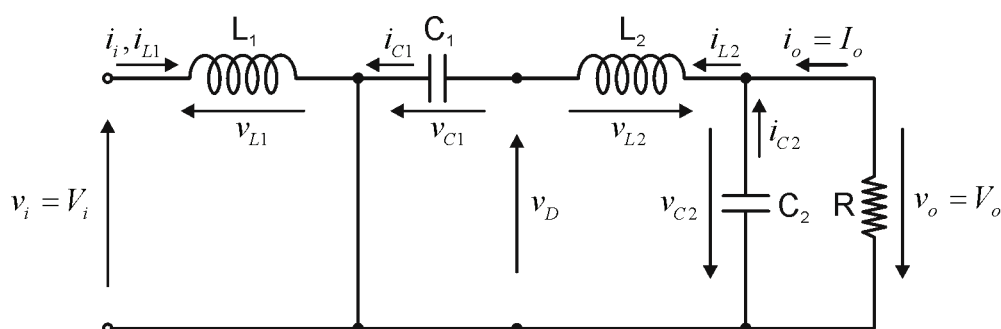


Слика 2 Таласни облици напона и струја за Ћуков претварач, и еквивалентне шеме за поједине интервале рада претварача

У првом интервалу (који почиње у тренутку  $t=0$ , погледати Сliku 2) укључујемо прекидач S, што доводи до искључења диоде, јер она постаје инверзно поларисана напoном на кондензатору  $C_1$ . Струја кроз пригушницу  $L_1$  сада линеарно расте под утицајем напона  $V_i$ , тј. акумулише се енергија у пригушници  $L_1$ . За то време, кондензатор  $C_1$  се празни у колу које чине:  $C_1, C_2 \parallel R, L_2$ , ргi чему струја у колу расте, тј. акумулише се енергија у пригушници  $L_2$ .

Други интервал почиње када се транзистор искључи, што се деси након времена  $t_{on}$  од укључења транзистора (погледати Сliku 2). Кондензатор  $C_1$  се сада пуни из извора  $V_i$ , део енергије акумулисане у пригушници  $L_1$  прелази у кондензатор  $C_1$  (струја кроз пригушницу  $L_1$  притом опада јер је  $V_{C1} > V_i$ ), док се енергија која се претходно акумулисала у пригушници  $L_2$ , пребацује у оптерећење преко диоде D, при чему се допуњава кондензатор  $C_2$ .

Еквивалентна шема претварача за први интервал рада посебно је приказана на Слици 3.



Слика 3 Еквивалентна шема претварача у интервалу у коме је прекидач укључен

У овом интервалу за пригушницу  $L_1$  важи једначина:

$$V_i = L_1 \cdot \frac{\Delta I_{L1}}{t_{on}} = L_1 \cdot \frac{I_{L12} - I_{L11}}{t_{on}} \quad (1.1)$$

тј.:

$$t_{on} = \frac{L_1 \cdot \Delta I_{L1}}{V_i} \quad (1.2)$$

тј.:

$$\Delta I_{L1} = \frac{V_i \cdot t_{on}}{L_1} \quad (1.3)$$

За пригушницу  $L_2$  важи једначина:

$$V_{C1} - V_o = v_{L2} = L_2 \cdot \frac{\Delta I_{L2}}{t_{on}} = L_2 \cdot \frac{I_{L22} - I_{L21}}{t_{on}} \quad (1.4)$$

тј.:

$$t_{on} = \frac{L_2 \cdot \Delta I_{L2}}{V_{C1} - V_o} \quad (1.5)$$

тј.:

$$\Delta I_{L2} = \frac{(V_{C1} - V_o) \cdot t_{on}}{L_2} \quad (1.6)$$

Еквивалентна шема претварача за други интервал рада посебно је приказана на Слици 4. У овом интервалу за пригушницу  $L_1$  важи једначина:

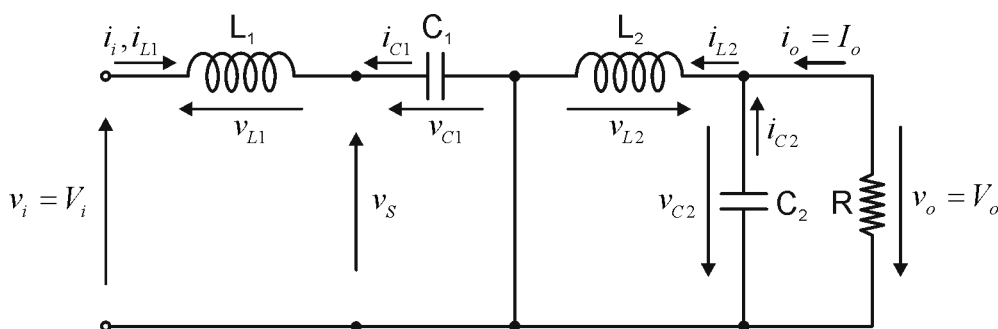
$$V_i - V_{C1} = -L_1 \cdot \frac{\Delta I_{L1}}{t_{off}} = L_1 \cdot \frac{I_{L11} - I_{L12}}{t_{off}} \quad (1.7)$$

тј.:

$$t_{off} = -\frac{L_1 \cdot \Delta I_{L1}}{V_i - V_{C1}} \quad (1.8)$$

тј.:

$$\Delta I_{L1} = -\frac{(V_i - V_{C1}) \cdot t_{off}}{L_1} \quad (1.9)$$



Слика 4 Еквивалентна шема претварача у интервалу у коме је прекидач искључен

За пригушницу  $L_2$  важи једначина:

$$-V_o = v_{L2} = -L_2 \cdot \frac{\Delta I_{L2}}{t_{off}} = L_2 \cdot \frac{I_{L21} - I_{L22}}{t_{off}} \quad (1.10)$$

тј.:

$$t_{off} = \frac{L_2 \cdot \Delta I_{L2}}{V_o} \quad (1.11)$$

тј.:

$$\Delta I_{L2} = \frac{V_o \cdot t_{off}}{L_2} \quad (1.12)$$

Из једначина (1.3) и (1.9) добија се:

$$\frac{V_i \cdot t_{on}}{L_1} = -\frac{(V_i - V_{C1}) \cdot t_{off}}{L_1} \quad (1.13)$$

односно:

$$V_{C1} = \frac{V_i \cdot T}{t_{off}} \quad (1.14)$$

Из једначина (1.6) и (1.12) добија се:

$$\frac{(V_{C1} - V_o) \cdot t_{on}}{L_2} = \frac{V_o \cdot t_{off}}{L_2} \quad (1.15)$$

односно:

$$V_{C1} = \frac{V_o \cdot T}{t_{on}} \quad (1.16)$$

Из једначина (1.14) и (1.16) коначно се добија:

$$\frac{V_i \cdot T}{t_{off}} = \frac{V_o \cdot T}{t_{on}} \quad (1.17)$$

односно:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{t_{on}}{t_{off}} \quad (1.18)$$

Дакле, средња вредност напона на оптерећењу мења се у зависности од *duty cycle*-а, тј. односа времена током којег је прекидач укључен и периода рада чопера. Према томе, ако *duty cycle*,  $D$ , уведемо као:

$$t_{on} = D \cdot T \quad (D \in [0,1]) \quad (1.19)$$

Једначина (1.18) постаје:

$$V_o = \frac{D}{1-D} \cdot V_i \quad (1.20)$$

Ако се претпостави да у колу нема губитака (да су компоненте идеалне), тада је:

$$V_i \cdot I_i = V_o \cdot I_o \quad (1.21)$$

Из (1.20) и (1.21) добија се израз за средњу вредност улазне струје:

$$I_i = \frac{D}{1-D} \cdot I_o \quad (1.22)$$

Период рада чопера,  $T$ , може да се добије из једначина (1.2) и (1.8):

$$T = \frac{1}{f} = t_{on} + t_{off} = L_1 \cdot \frac{\Delta I_{L1}}{V_i} - L_1 \cdot \frac{\Delta I_{L1}}{V_i - V_{C1}} = \frac{L_1 \cdot \Delta I_{L1}}{V_i} \frac{V_{C1}}{V_{C1} - V_i} = \frac{L_1 \cdot \Delta I_{L1}}{V_i} \frac{1}{1 - \frac{V_i}{V_{C1}}} \quad (1.23)$$

Користећи једначину (1.14), из претходне једначине се добија:

$$T = \frac{L_1 \cdot \Delta I_{L1}}{V_i} \frac{1}{1 - \frac{t_{off}}{T}} = \frac{L_1 \cdot \Delta I_{L1}}{V_i} \frac{T}{t_{on}} = \frac{L_1 \cdot \Delta I_{L1}}{V_i \cdot D} \quad (1.24)$$

Из једначине (1.24) може се добити промена струје (*peak-to-peak ripple current*) кроз пригушницу  $L_1$ :

$$\Delta I_{L1} = \frac{V_i \cdot D}{f \cdot L_1} \quad (1.25)$$

где је:  $f$  - учестаност рада чопера.

На сличан начин, из једначина (1.5), (1.11) и (1.16), може се добити промена струје кроз пригушницу  $L_2$ :

$$\Delta I_{L2} = \frac{V_i \cdot D}{f \cdot L_2} \quad (1.26)$$

Максимална тренутна вредност струје прекидача (транзистора) је:

$$I_{S(T)\max} = I_i + \frac{\Delta I_{L1}}{2} + I_o + \frac{\Delta I_{L2}}{2} \quad (1.27)$$

Као што је претходно речено, када је транзистор искључен, кондензатор  $C_1$  се пуни из извора  $V_i$  и из пригушнице  $L_1$ . Средња вредност струје пуњења кондензатора је  $I_i$  (средња вредност струје батерије), па је промена напона на кондензатору  $C_1$  (*peak-to-peak ripple voltage*):

$$\Delta V_{C1} = \frac{1}{C_1} \int_{DT}^T i_{C1} \cdot dt = \frac{1}{C_1} \int_{DT}^T I_i \cdot dt = \frac{I_i \cdot T \cdot (1-D)}{C_1} = \frac{I_i \cdot (1-D)}{f \cdot C_1} \quad (1.28)$$

Ако претпоставимо да је струја оптерећења константна (да нема рипл), тада важи:

$$\Delta i_{C2} = \Delta i_{L2} \quad (1.29)$$

Средња вредност струје пуњења кондензатора  $C_2$  која пуни кондензатор током времена  $T/2$  је:

$$I_{C2} = \frac{\Delta I_{L2}}{4} \quad (1.30)$$

Према томе, промена напона на кондензатору  $C_2$  (*peak-to-peak ripple voltage*) је:

$$\Delta V_{C2} = \frac{1}{C_2} \int_0^{\frac{T}{2}} I_{C2} \cdot dt = \frac{1}{C_2} \int_0^{\frac{T}{2}} \frac{\Delta I_{L2}}{4} \cdot dt = \frac{\Delta I_{L2}}{8f \cdot C_2} \quad (1.31)$$

Користећи једначину (1.26) добија се:

$$\Delta V_{C2} = \frac{V_i \cdot D}{8f^2 C_2 L_2} \quad (1.32)$$

## 2. ЗАДАТАК

У оквиру лабораторијске вежбе биће извршене две симулације рада Ћуковог претварача, тј. одговарајућих модела овог претварача у програмском пакету *LTSpice*<sup>®</sup>. Најпре ће бити симулиран рад Ћуковог претварача са идеалним компонентама. Затим ће бити симулиран рад Ћуковог претварача са реалним компонентама (чије *LTSpice*<sup>®</sup> моделе обезбеђују произвођачи тих компонента). Улазни напон је  $V_i = 12\text{ V}$ , радна учестаност чопера је  $f = 100\text{ kHz}$ , а *duty-cycle*  $D = 0.25$ . Оптерећење је отпорник  $R = 3.3\ \Omega$ . Вредности пасивних компонената које чине идеални Ћуков претварач дате су у Табели 1, док је списак компонената које чине реални Ћуков претварач дат у Табели 2.

Табела 1 Вредности компонената које чине идеални Ћуков претварач

Компонента	Вредност
$L_1$	330 $\mu\text{H}$
$C_1$	22 $\mu\text{F}$
$L_2$	220 $\mu\text{H}$
$C_2$	33 $\mu\text{F}$
$R_1$	3.3 $\Omega$

Табела 2 Компоненте које чине реални Ћуков претварач

Компонента	Вредност	Произвођачева ознака	Произвођач
$L_1$	330 $\mu\text{H}$	B82477G4334M000	EPCOS
$C_1$	22 $\mu\text{F}$	TPSD226K035R0125	AVX
$U_1$	IRF7478	IRF7478	International Rectifier
$D_1$	MB1S	MBRS540T3	ON Semiconductor
$L_2$	220 $\mu\text{H}$	B82477G4224M000	EPCOS
$C_2$	33 $\mu\text{F}$	TPSD336K020R0100	AVX
$R_1$	3.3 $\Omega$	-	-

Након извршених симулација, добијене резултате потребно је унети у Табелу 3 и упоредити их са резултатима добијеним прорачуном на основу једначина датих у теоријском уводу. На основу резултата симулације реалног модела претварача, потребно је одредити степен искоришћења претварача, снагу дисипације на транзистору, ефективну вредност струје кроз кондензатор  $C_1$ , ефективну вредност струје кроз пригушнице  $L_1$  и  $L_2$ , као и снагу дисипације на диоди. Ове величине потребно је унети у Табелу 4. На основу претходно добијених вредности и помоћу података из приложене техничке документације (*datasheet*-ова) компонената проверити да ли су  $T$ ,  $D$ ,  $C_1$ ,  $L_1$ , и  $L_2$  добро одабрани са аспекта дозвољене дисипације.



Табела 3 Резултати симулација и резултати прорачуна Ђуковог претварача

Величина	Ознака	Прорачун	Модел идеалног претварача	Модел реалног претварача
Средња вредност напона на оптерећењу	$V_o$			
Средња вредност струје оптерећења	$I_o$			
Средња вредност улазне струје	$I_i$			
<i>Peak-to-peak</i> рипл струје кроз пригушницу $L_1$	$\Delta I_{L1}$			
<i>Peak-to-peak</i> рипл струје кроз пригушницу $L_2$	$\Delta I_{L2}$			
Максимална тренутна вредност струје прекидача (транзистора)	$I_{S(T)\max}$			
<i>Peak-to-peak</i> рипл напона на кондензатору $C_1$	$\Delta V_{C1}$			
<i>Peak-to-peak</i> рипл напона на кондензатору $C_2$	$\Delta V_{C2}$			

Табела 4 Резултати симулације реалног модела Ђуковог претварача

Величина	Ознака	Вредност
Ефикасност претварача	$\eta$	
Снага дисипације на транзистору	$P_T$	
Ефективна вредност струје кроз кондензатор $C_1$	$I_{C1(RMS)}$	
Ефективна вредност струје кроз пригушницу $L_1$	$I_{L1(RMS)}$	
Ефективна вредност струје кроз пригушницу $L_2$	$I_{L2(RMS)}$	
Снага дисипације на диоди	$P_D$	