

МАТУРСКИ РАД

ТЕОРИЈСКА АНАЛИЗА И ПРАКТИЧНА РЕАЛИЗАЦИЈА ГЕНЕРАТОРА ЕЛЕКТРИЧНИХ ВАРНИЦА КОРИШЋЕЊЕМ ИНДУКЦИОНОГ КАЛЕМА

Ментор:
Др Бранислав Цветковић

Ученик:
Ђорђе Нешковић

Београд, мај 2016.

САДРЖАЈ

1. ОСНОВНИ ПРИНЦИП ГЕНЕРИСАЊА ВАРНИЦА КОРИШЋЕЊЕМ ИНДУКЦИОНОГ КАЛЕМА У СКЛОПУ СИСТЕМА ЗА ПАЉЕЊЕ БЕНЗИНСКИХ МОТОРА	2
2. ОСНОВНИ ЕЛЕМЕНТИ ЕЛЕКТРИЧНИХ МРЕЖА	4
2.1 ОТПОРНИК	4
2.2 КАЛЕМ	5
2.2.1 Реални калем	6
2.3 КОНДЕНЗАТОР	7
2.4 ТРАНСФОРМАТОР	9
2.5 РЕЛЕЈ	10
3. ПРЕЛАЗНИ РЕЖИМ У РЕДНОМ RLC КОЛУ	12
3.1 СЛАБО ПРИГУШЕНО RLC КОЛО - ОСЦИЛАТОРНИ СЛУЧАЈ ($\zeta < 1$)	14
3.2 ЈАКО ПРИГУШЕНО RLC КОЛО - АПЕРИОДИЧАН СЛУЧАЈ ($\zeta > 1$)	18
3.3 КРИТИЧНО ПРИГУШЕНО RLC КОЛО - КРИТИЧНО АПЕРИОДИЧАН СЛУЧАЈ ($\zeta = 1$)	21
4. ПРАКТИЧНА РЕАЛИЗАЦИЈА ГЕНЕРАТОРА ЕЛЕКТРИЧНИХ ВАРНИЦА	24
4.1 ПРИНЦИП РАДА ПОБУДНОГ КОЛА (КОЛА РЕЛЕЈА)	25
4.2 ПРИНЦИП РАДА КОЛА ИНДУКЦИОНОГ КАЛЕМА	26
4.3 ПРАКТИЧНА РЕАЛИЗАЦИЈА	26
5. ЗАКЉУЧАК	33
6. ЛИТЕРАТУРА	34
ПРИЛОГ - ЛИСТИНГ МАТЛАБ КОДА ЗА ЦРТАЊЕ ФУНКЦИЈА	35

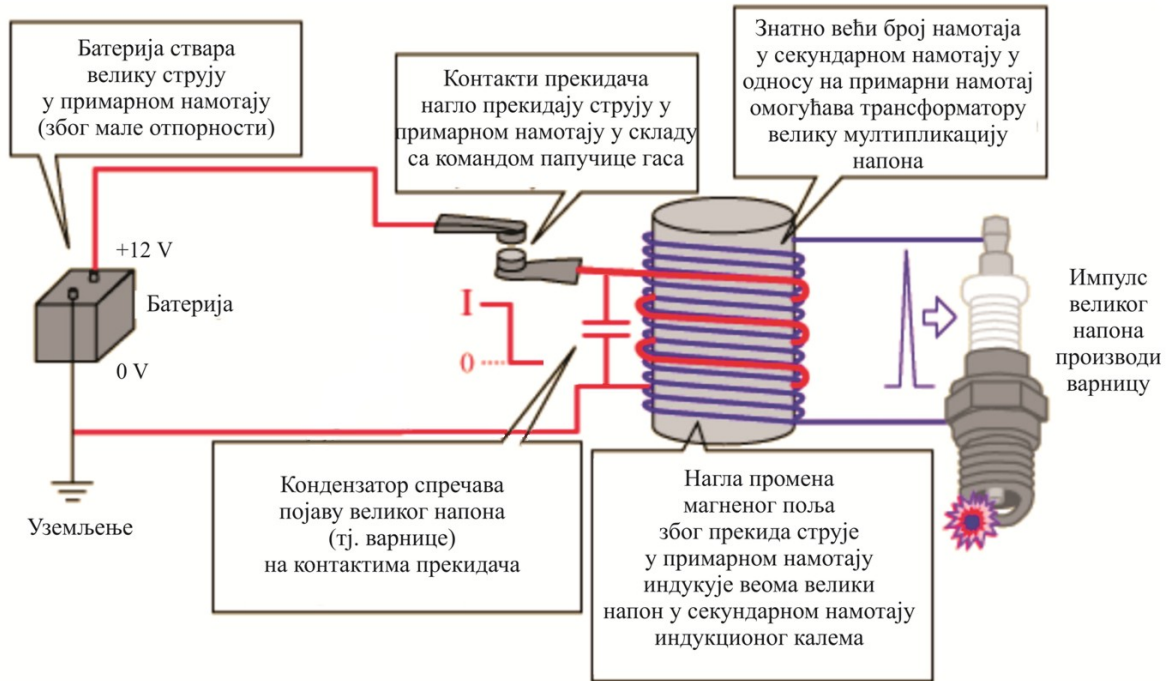
1. ОСНОВНИ ПРИНЦИП ГЕНЕРИСАЊА ВАРНИЦА КОРИШЋЕЊЕМ ИНДУКЦИОНОГ КАЛЕМА У СКЛОПУ СИСТЕМА ЗА ПАЉЕЊЕ БЕНЗИНСКИХ МОТОРА

Индукциони калемови су трансформаторске направе (о трансформаторима ће више речи бити у поглављу 2.4) које се користе у аутомобилима са бензинским моторима за генерисање високог напона. Висок напон производи варницу (у тзв. „свећици”) која доводи до паљења гасовите смеше бензина и ваздуха и на тај начин се мотор покреће. Интересантно је нагласити да се велики напон реда величине 40 000 V добија из извора једносмерне струје напона 12 V (акумулатора). У суштини, процес генерисања високог напона заснива се на тзв. Фарадејевом закону који гласи - *Индукована електромоторна сила бројно је једнака брзини промене магнетног флукса:*

$$\varepsilon_i = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (1.1)$$

Основни принцип генерисања варнице у бензинским моторима илустрован је на слици 1.1. Примарни намотај индукционог калема садржи мали број намотаја и има малу отпорност. Повезивањем акумулатора (једносмерног извора напајања) на примарни намотај индукционог калема долази до протока једносмерне струје кроз њега (Омов закон). На овом месту треба приметити да због релативно велике вредности индуктивности, индуктивност примарног намотаја утиче на промену јачине струје на тај начин да се њена вредност не мења тренутно, већ се релативно споро повећава до своје максималне вредности. Са друге стране, секундарни намотај има много већи број намотаја и због тога се цео индукциони калем понаша као трансформатор за повећавање напона. Трансформатори по правилу раде у колима наизменичне струје/напона. Међутим, индукциони калем је осмишљен тако да на свом излазу прави импулсе високог напона када дође до прекида струје у примарном намотају у складу са Фарадејевим законом. Наиме, индуковани напон у секундарном намотају индукционог калема пропорционалан је промени флукса магнетног поља који постоји у њему. Интензитет магнетног поља директно зависи од струје која протиче кроз примарни намотај. Због тога, прекид тока струје (коришћењем прекидача) у примарном намотају генерише велики напон у

примарном намотају (по правилу неколико стотина волти), а у складу са преносним бројем трансформатора (поглавље 2.4) у секундарном намотају долази до генерисања веома великог напона (неколико десетина хиљада волти). Велики напон на секундарном намотају доводи до појаве варнице између електрода свећице што за последицу има паљење запаљиве смеше горива и ваздуха.



Слика 1.1 - Основни принцип генерисања варнице у бензинским моторима

Дуги низ година, прекидање струје у примарном намотају индукционог калема вршило се коришћењем механичког прекидача (тзв. „платинско дугме“) чија је брзина прекидања била одређена положајем папучице за гас на аутомобилу (што је већа брзина прекидања, запаљива смеша се чешће пали, па мотор има већу снагу). Овакав принцип прекидања тока струје има једну озбиљну ману. Наиме, због појаве релативно великог напона на крајевима примарног намотаја, прекидање струје често доводи до појаве варнице између контаката прекидача. Овај проблем је решен на тај начин што се паралелно са примарним намотајем индукционог калема прикључује одговарајућа капацитивност (кондензатор) која има улогу да на себе прими наглу промену напона и на тај начин спречи појаву варнице на прекидачу (платинском дугмету). У савременим аутомобилима, уместо платинског дугмета користи се електронски (транзисторски) прекидач за прекидање струје у примарном намотају индукционог калема.

У овом матурском раду извршена је теоријска анализа и практична реализација генератора електричних варница коришћењем индукционог калема. У другој глави дефинисани су основни елементи електричних мрежа који су били од интереса за израду овог матурског рада: отпорник, калем, кондензатор, трансформатор и релеј. Прелазни режим у редном RLC колу теоријски је анализиран у трећој глави. У четвртој глави објашњена је практична реализација генератора електричних варница. Закључци везани за израду матурског рада дати су петој глави. У шестој глави је списак коришћене литературе. У прилогу је дат МАТЛАБ код за цртање функција изведених у глави 3.

2. ОСНОВНИ ЕЛЕМЕНТИ ЕЛЕКТРИЧНИХ МРЕЖА

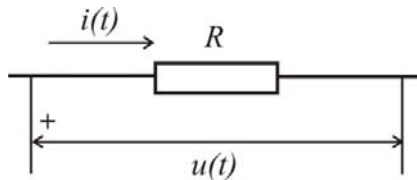
У мрежама са временски променљивим струјама користи се велики број елемената различите природе, нпр. полупроводничке диоде, транзистори, трансформатори, калемови, релеји, кондензатори, отпорници итд. Неки од тих елемената, као нпр. транзистори, могу да трансформишу неку другу врсту енергије у енергију временски променљивог електричног поља, па се називају активни елементи. Они елементи који немају такву особину називају се пасивни елементи. Мрежа која је предмет пројектовања и реализације овог матурског рада садржи искључиво пасивне елементе и о њима ће бити речи у наредним поглављима.

2.1 ОТПОРНИК

Под отпорником се подразумева такав елемент за који веза између напона $u(t)$ који постоји између његових приључака и јачине струје $i(t)$ кроз њега (слика 2.1) има облик:

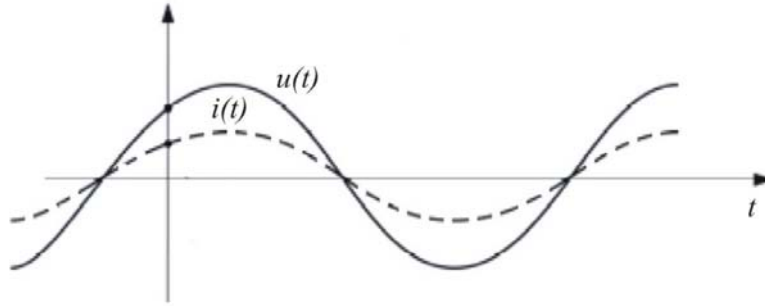
$$u(t) = R \cdot i(t) \quad (2.1)$$

где је R отпорност отпорника.



Слика 2.1 - Илустрација отпорника са усклађеним смеровима за напон и струју

Према једначини (2.1), напон између крајева отпорника је у сваком тренутку сразмеран јачини струје кроз њега. Ако се јачина струје и напон представе у облику функције времена на истој слици, биће то сличне криве, такве да између њихових вредности у сваком тренутку постоји сталан однос. Пример напона $u(t)$ између крајева неког отпорника и јачине струје $i(t)$ кроз њега приказан је на слици 2.2.



Слика 2.2 - Пример временски променљивог напона између крајева отпорника и временски променљиве струје кроз њега

Релација (2.1) између временски променљивог напона и јачине струје у случају отпорника је проста сразмерност, тако да је лако изразити и јачину струје $i(t)$ преко напона:

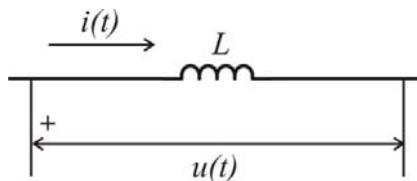
$$i(t) = \frac{u(t)}{R} \quad (2.2)$$

2.2 КАЛЕМ

Под калемом се подразумева такав елемент за који веза између напона $u(t)$ између његових крајева и јачине струје $i(t)$ кроз њега (слика 2.3) има облик:

$$u(t) = L \cdot \frac{di(t)}{dt} \quad (2.3)$$

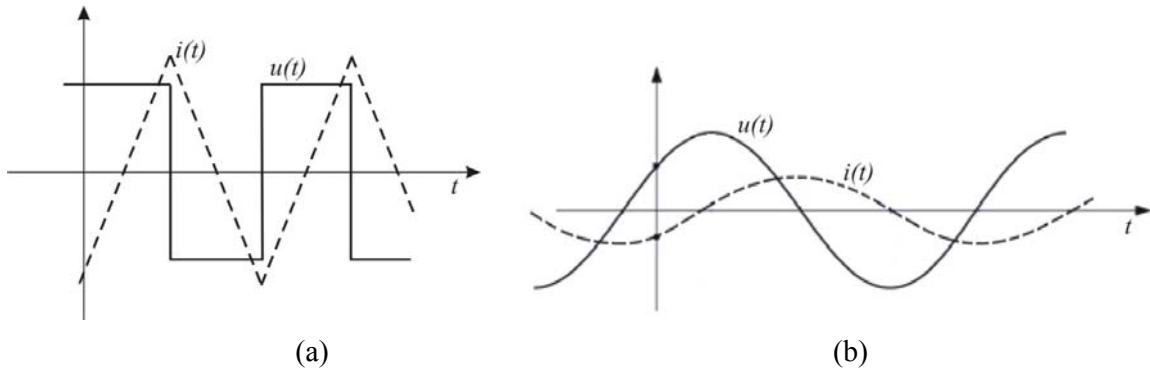
где је L индуктивност калема.



Слика 2.3 - Илустрација калема са усклађеним смеровима за напон и струју

На слици 2.4 приказана су два примера напона између крајева калема који одговарају карактеристичним облицима јачине струје кроз калем.

Међутим, одговарајућа релација (2.3) за калем није тако једноставна, пошто описује везу између једне од две поменуте величине и временског извода друге. Одатле је релацију обрнуту релацији (2.3) теже добити него у случају отпорника.



Слика 2.4 - Примери напона између крајева калема који одговара датој јачини струје кроз њега

Да би се јачина струје кроз калем изразила преко напона између његових крајева, једначина (2.3) може се помножити са dt и затим интегралити. Приликом интеграције јавља се додатна константа, чији физички смисао треба објаснити. Као што је познато, извод неке функције се не мења ако јој се дода нека константа. На пример, ако би кроз калем поред временски променљиве струје $i(t)$ постојала и временски константна струја јачине I_0 , једначина (2.3) би остала задовољена и за укупну јачину струје $[i(t)+I_0]$ кроз калем. Према томе, интеграција једначине (2.3) у општем случају даје:

$$i(t) = \frac{1}{L} \int u(t) dt + I_0 \quad (2.4)$$

где је I_0 константа која зависи од тога на шта је калем прикључен.

2.2.1 Реални калем

Пошто је калем увек начињен у виду жичане спирале, увек има и неку, обично малу, омску отпорност. Ту отпорност је природно замислити везану на ред са „чистим” индуктивним калемом. Ако је калем намотан на феромагнетно језгро, постоје допунски губици који се, такође, могу узети у обзир помоћу редног отпорника.

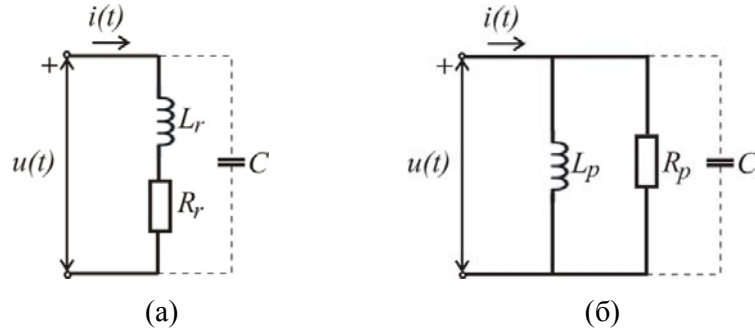
„Чист” индуктивни калем не може се начинити чак ни од савршено проводне жице, пошто се не може избећи капацитивност између појединих завојака калема, што је илустровано на слици 2.5.



Слика 2.5 - Реални калем - утицај капацитивности између навојака калема

Међутим, тачнија анализа оваквог система је изузетно сложена и у овом раду она неће бити разматрана. Уместо тога, појава се може упростити и замислити да се утицај свих тих парцијалних капацитивности може свести на капацитивност кондензатора везаног паралелно калему. Тако се добијају две приближно еквивалентне шеме за реални калем приказане на сликама 2.6(а) и 2.6(б), где су губици узети у обзир помоћу редног и паралелног везаног отпорника, респективно. Најчешће се калем користи у оном опсегу

учестаности у коме се утицај капацитивности C може занемарити. У супротном је анализа веома сложена и непогодна за практичне примене. Стога се анализе кола које укључују реалне калемове свде на анализу еквивалентних шема приказаних на сликама 2.6(а) и 2.6(б) без кондензатора. У даљој анализи у оквиру овог рада реални калем ће бити представљен еквивалентном шемом приказаном на слици 2.6(а).



Слика 2.6 - Еквивалентне шеме реалног калема
 (а) губици узети у обзир помоћу редно везаног отпорника
 (б) губици узети у обзир помоћу паралелно везаног отпорника

2.3 КОНДЕНЗАТОР

Ако је наелектрисање на облогама кондензатора временски константно и једнако Q , веза између напона U који постоји између његових крајева и наелектрисања Q је облика:

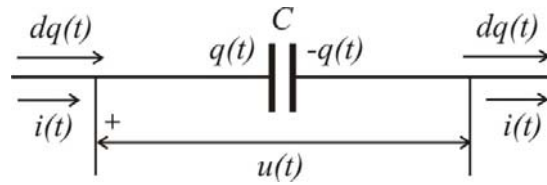
$$Q = C \cdot U \quad (2.5)$$

где је C капацитивност кондензатора. Веза представљена једначином (2.5) тачна је и за временски променљиво наелектрисање $q(t)$ на електродама кондензатора, па у том случају добија облик представљен једначином (2.6).

$$q(t) = C \cdot u(t) \quad (2.6)$$

Сада треба објаснити како се на електродама кондензатора може променити наелектрисање (пратити илустрацију на слици 2.7). Нека је $q(t)$ наелектрисање референтне електроде кондензатора у тренутку t , а $dq(t)$ прираштај тог наелектрисања у интервалу времена између t и $(t+dt)$. Да би се на референтној електроди кондензатора наелектрисање променило за $dq(t)$, потребно је да се на његову референтну электроду, кроз прикључак, доведе наелектрисање $dq(t)$, а на другу электроду, кроз њен прикључак, доведе $-dq(t)$. Међутим, свеједно је да ли се неком телу додаје неко негативно наелектрисање, или се од њега одузима исто толико позитивно наелектрисање. Према томе, како је на слици 2.7 показано, промена наелектрисања референтне електроде кондензатора за $dq(t)$ у суштини значи да је кроз његове прикључке протекла за то време количина електрицитета $dq(t)$ ($dq(t)$ се рачуна у односу на усвојени референтни смер струје). Стога важи:

$$dq(t)_{\text{на референтној електроди кондензатора}} = dq(t)_{\text{кроз прикључке кондензатора}} \quad (2.7)$$



Слика 2.7 - Илустрација уз објашњење физичког смисла струје „кроз” кондензатор

Ако кроз пресек неког проводника (у овом случају жичаних прикључака кондензатора) у интервалу времена dt прође количина електрицитета $dq(t)$, тада је, по дефиницији, интензитет струје кроз проводник у том тренутку једнак $dq(t)/dt$. На основу овога и једначине (2.7), временски променљива струја кроз прикључке кондензатора може се записати у облику:

$$i(t) = \frac{dq(t)_{\text{кроз прикључке кондензатора}}}{dt} \quad \text{или}$$

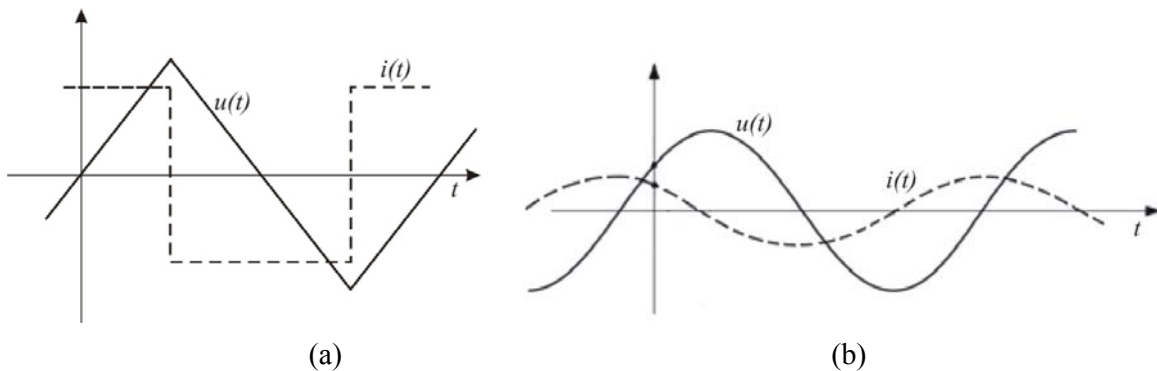
$$i(t) = \frac{dq(t)_{\text{на референтној електроди кондензатора}}}{dt} \quad (2.8)$$

Наравно, пошто кроз сам кондензатор не постоји проводан пут, наелектрисање се задржава на електродама кондензатора. Наиме, кроз сам кондензатор (тј. његов изолатор) нема струје у уобичајеном смислу речи, иако кроз његове прикључке постоји временски променљива струја. Са становишта теорије електричних мрежа понашање неког елемента карактерише се искључиво везом између напона који постоји између његових прикључака и јачине струје кроз те прикључке. Према томе, када се говори о „јачини струје кроз кондензатор”, подразумева се јачина струје кроз његове прикључке.

На основу претходно анализираних може се успоставити веза између напона који постоји између крајева кондензатора и јачине струје кроз њега. На основу једначина (2.6) и (2.8) добија се:

$$i(t) = C \frac{du(t)}{dt} \quad (2.9)$$

Два примера облика јачине струје кроз кондензатор који одговарају типичним облицима напона између његових крајева приказана су на слици 2.8.



Слика 2.8 - Примери временски променљиве струје кроз кондензатор који одговара датом временски променљивом напону између његових прикључака

На сличан начин као у поглављу 2.2 долази се до везе која је обрнута вези (2.9). Пошто, у принципу, кондензатор може бити приључен истовремено на временски променљив напон $u(t)$ и на временски константан напон U_0 , интеграцијом једначине (2.9), добија се:

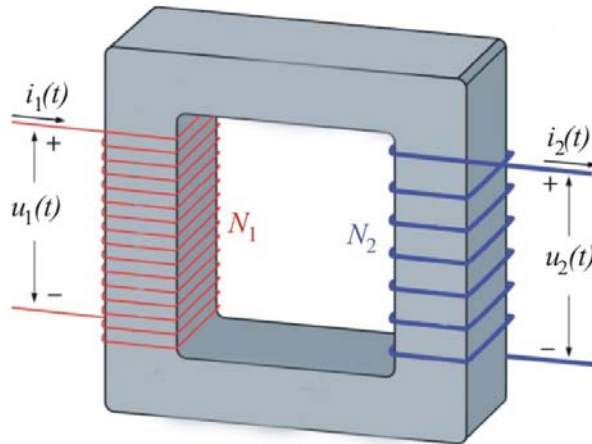
$$u(t) = \frac{1}{C} \int i(t) dt + U_0 \quad (2.10)$$

2.4 ТРАНСФОРМАТОР

За економичан пренос електричне енергије помоћу водова погодно је користити што већи напон. Са друге стране, на месту пријема обично није згодно имати висок напон, нпр. у случају апарата за домаћинство (због сигурности). Отуда потиче потреба за направама које су у стању да повећају напон на месту где је генератор прикључен за трансмисиони вод, а да га смањују близу места где је пријемник.

У случају временски константних напона овакав процес је врло сложен. Међутим, простопериодичне напоне могуће је врло лако повећавати и смањивати помоћу једноставних направа које се зову електрични трансформатори, или просто трансформатори. Примене трансформатора су многобројне у свим областима електротехнике. У уводу овог поглавља наведени пример примене трансформатора при преносу електричне енергије је само један од многих видова њихове примене.

Трансформатор се обично састоји од феромагнетског језгра и два намотаја, што је илустровано на слици 2.9. Један намотај, тзв. примар или примарни намотај, везује се за дати напон, а други, тзв. секундар или секундарни намотај, везује се за пријемник. На слици 2.9 са N_1 означен је број навојака примара, док је N_2 број навојака секундара. Да би се смањили губици трансформатора, језгро трансформатора се прави од танких, међусобно изолованих, лимова или од ферита. Губици у реалним трансформаторима су релативно мали, обично мањи од 10%, а у случају великих трансформатора мањи од 2%. Трансформатор у коме се могу заменарити губици назива се савршен трансформатор.



Слика 2.9 - Савршен трансформатор

Приликом анализе кола које је предмет пројектовања овог матурског рада трансформатор ће се сматрати савршеним. За савршен трансформатор важи да је однос напона на крајевима намотаја једнак односу N_1/N_2 броја навојака примара и секундара:

$$\frac{u_1(t)}{u_2(t)} = \frac{N_1}{N_2} \frac{N_1}{N_2} \quad (2.11)$$

Подесним избором односа N_1/N_2 може се напон $u_1(t)$ „трансформисати” било у нижи, било у виши напон. Однос N_1/N_2 назива се преносни број трансформатора.

За савршен трансформатор важи да је однос струја кроз намотаје приближно једнак односу N_2/N_1 броја навојака секундарна и примара:

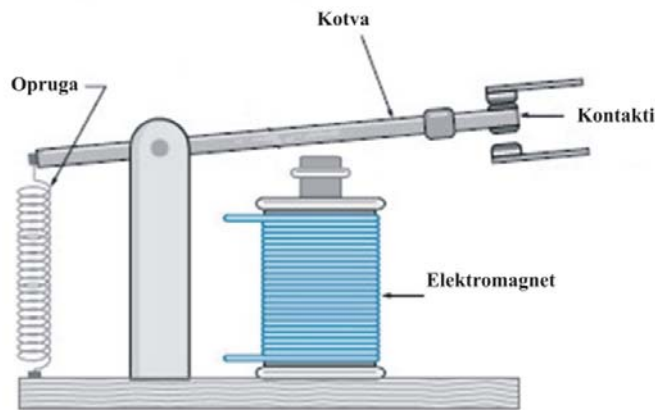
$$\frac{i_1(t)}{i_2(t)} \cong \frac{N_2}{N_1} \quad (2.12)$$

Такође, снага на примару, P_1 , једнака је снази на секундару, P_2 :

$$P_1 = P_2. \quad (2.13)$$

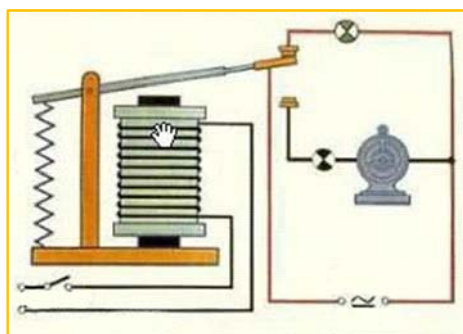
2.5 РЕЛЕЈ

Релеј је елемент који се користи за прекидање или успостављање струјног кола путем електромагнета који отвара и затвара струјне контакте. Релеј се састоји од следећих делова: 1) електромагнет, 2) котва, 3) контакти и 4) опруга (слика 2.10). Електромагнет се обично састоји од већег броја намотаја бакарне жице на језгру од гвожђа. Када струја тече кроз бакарну жицу (тзв. примарно струјно коло), око електромагнета се ствара магнетно поље које привлачи гвоздену котву. Котва носи на себи електрични контакт, који отвара или затвара секундарно струјно коло (струјни круг), што је илустровано на сликама 2.11(а) и 2.11(б), респективно. Када се прекине струја кроз електромагнет, електромагнет више не привлачи гвоздену котву, и она се враћа у почетни положај, обично уз помоћ опруге.

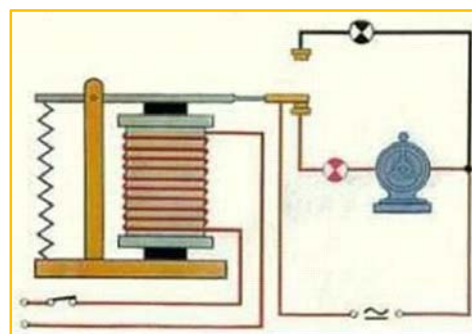


Слика 2.10 - Делови релеја

На слици 2.11(а), релеј је искључен и при томе крај котве, односно средњи контакт, успоставља везу са горњим контактом. На слици 2.11(б), релеј је укључен. У том случају електромагнетно поље привлачи котву која помера средњи контакт који сада успоставља везу са доњим, а прекида везу са горњим контактом. У примеру на слици 2.11(б) укључењем релеја затвара се секундарно струјно коло које укључује моторчић.



(а)



(б)

Слика 2.11 - Искључење (а) и укључење (б) релеја

За укључење релеја у случају електричног кола које је предмет пројектовања овог матурског рада на улаз електромагнета доводи се једносмерна побуца.

3. ПРЕЛАЗНИ РЕЖИМ У РЕДНОМ RLC КОЛУ

Полазећи од основих принципа рада генератора варница коришћењем индукционог калема, који су описани у глави 1 овог рада, јасно је да се генерисање варница реализује коришћењем редног осцилаторног RLC кола. При томе, разликују се две независне фазе рада овог кола:

- укључење RLC кола на једносмерни извор напајања (12V) при чему долази до успостављања једносмерне струје кроз коло калема и пуњења кондензатора док се на његовим крајевима не оствари стабилни напон који је једнак напону извора, и
- искључење RLC кола када се на индуктивности (примарна страна индукционог калема) ствара велики напон који се потом у секундарном колу индукционог калема повећава у складу са преносним бројем трансформатора (често је тај однос 60, што је коришћено и у овом раду).

С обзиром на чињеницу да се генерисање варница дешава непосредно након искључења RLC кола са једносмерног извора напајања, у оквиру ове главе ће (као и у оквиру овог матурског рада) бити разматран само прелазни режим који се односи на искључење.

На слици 3.1 приказана је блок шема редног осцилаторног RLC кола. Након прелазне фазе укључења RLC кола на једносмерни извор напајања, на кондензатору C напон је константан и једнак напону једносмерног напајања.

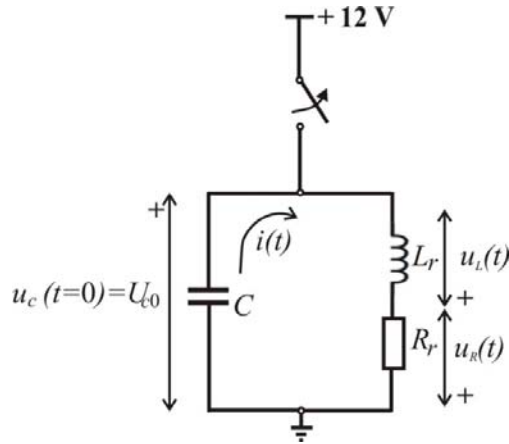
Полазна претпоставка: тренутак искључења RLC кола биће означен са $t = 0$ и напон на кондензатору C у редном осцилаторном RLC колу у том тренутку једнак је U_{c0} .

У разматраном колу отпорност (R), индуктивност (L) и капацитивност (C) повезани су редно тако да важи следећи израз:

$$u_R(t) + u_L(t) + u_C(t) = 0 \quad (3.1)$$

При томе, с обзиром да су везане на ред, кроз R , L и C компоненте протиче иста јачина струја:

$$i_R(t) = i_L(t) = i_C(t) = i(t) \quad (3.2)$$



Слика 3.1 – Блок-шема редног осцилаторног RLC кола

Полазећи од основних израза који повезују тренутне вредности напона и струје за три претходно наведене компоненте (детално размотрено у глави 2), израз (3.1) може се приказати у следећој форми:

$$R \cdot i(t) + L \frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i(\tau) d(\tau) = 0 \quad (3.3)$$

Диференцирањем претходног израза, добија се диференцијална једначина другог реда:

$$L \frac{d^2 i(t)}{dt^2} + R \frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{C} i(t) = 0 \quad (3.4)$$

Израз (3.4) може се написати и у нешто другачијој форми:

$$\frac{d^2 i(t)}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{LC} i(t) = 0 \quad (3.5)$$

односно,

$$\frac{d^2 i(t)}{dt^2} + 2\beta \frac{di(t)}{dt} + \omega_0^2 i(t) = 0 \quad (3.6)$$

где су:

$$\beta = \frac{R}{2L} \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (3.7)$$

Параметар ω_0 се назива основном (или природном) фреквенцијом осцилаторног кола.

Допунски се дефинише још један параметар који је познат под називом фактор пригушења осцилаторног кола

$$\zeta = \frac{\beta}{\omega_0} \quad (3.8)$$

У зависности од конкретне вредности фактора пригушења разликују се три случаја:

- ① $\zeta < 1$... слабо пригушено коло,
- ② $\zeta > 1$... јако пригушено коло,
- ③ $\zeta = 1$... критично пригушено коло.

Карактеристична једначина диференцијалне једначине (3.6) је:

$$p^2 + 2 \cdot \beta \cdot p + \omega_0^2 = 0 \quad (3.9)$$

Корени карактеристичне једначине (3.9) су:

$$\begin{aligned} p_1 &= -\beta + \sqrt{\beta^2 - \omega_0^2} \\ p_2 &= -\beta - \sqrt{\beta^2 - \omega_0^2} \end{aligned} \quad (3.10)$$

На овом месту треба приметити да диференцијална једначина (3.6) има форму хомогене једначине (диференцијална једначина код које је десна страна једнакости једнака нули). Решење ове хомогене једначине има форму:

$$i(t) = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t} \quad (3.11)$$

где се коефицијенти A_1 и A_2 одређују на основу полазних граничних услова о чему ће више речи бити у наставку текста.

У зависности од конкретне вредности фактора пригушења диференцијална једначина (3.6) има три различита решења.

3.1 СЛАБО ПРИГУШЕНО RLC КОЛО - ОСЦИЛАТОРНИ СЛУЧАЈ ($\zeta < 1$)

Корени карактеристичне једначине (3.10) су комплексно коњуговани, па се опште решење дато изразом (3.11) може приказати у нешто измењеном облику:

$$i(t) = B_1 e^{-\beta t} \cos(\omega_d t) + B_2 e^{-\beta t} \sin(\omega_d t) \quad (3.12)$$

где је:

$$\omega_d = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2} = \omega_0 \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (3.13)$$

Примењујући стандардне тригонометријске трансформације израз (3.12) се може написати у још једној форми:

$$i(t) = B_3 e^{-\beta t} \sin(\omega_d t + \varphi) \quad (3.14)$$

Као што се из израза (3.14) може видети, временска зависност струје $i(t)$ има облик пригушених осцилација чија је учестаност једнака ω_d . Са друге стране, брзина слабљења осцилација директно зависи од параметра слабљења β . Експонент параметра $-\beta$ уствари дефинише енвелопу осцилаторног сигнала.

Параметри B_1 и B_2 из израза (3.12), односно B_3 и φ из израза (3.14), одређују се на основу граничних услова.

У случају редног RLC кола (приказаног на слици 3.1) постоје два основна гранична услова. Наиме, од интереса за овај рад је тренутак када се прекида напајање RLC кола једносмерним напоном. Непосредно пре прекида напајања, у колу је успостављен стационарни режим који подразумева да кроз индуктивност L протиче једносмерна струја ограничена само отпорношћу R реалног калема. Са друге стране, напон на идеалном калему је једнак нули с обзиром да кроз њега протиче једносмерна струја.

1° први гранични услов

У тренутку $t = 0$ тренутна јачина струје је једнака:

$$i(t = 0) = \frac{U_{c0}}{R} \quad (3.15)$$

Израз (3.14) се сада може написати у следећем облику:

$$i(t = 0) = B_3 e^{-\beta \cdot 0} \sin(\omega_d \cdot 0 + \varphi) = \frac{U_{c0}}{R} \quad (3.16)$$

односно,

$$B_3 \sin(\varphi) = \frac{U_{c0}}{R} \quad (3.17)$$

2° други гранични услов

Посматра се тренутак $t = 0_+$. Вредност напона на идеалној индуктивности у овом тренутку једнака је нули:

$$u_L(t = 0_+) = 0 \quad (3.18)$$

На основу основног израза који повезује тренутне вредности струје и напона у случају индуктивности, може се написати:

$$u_L(t = 0_+) = L \left. \frac{di(t)}{dt} \right|_{t=0_+} = 0 \quad (3.19)$$

Уводећи смену за тренутну вредност јачине струје (3.14) у (3.19) добија се:

$$L \left. \frac{di(t)}{dt} \right|_{t=0_+} = LB_3 e^{-\beta \cdot 0} [(-\beta) \sin(\omega_d \cdot 0 + \varphi) + \omega_d \cos(\omega_d \cdot 0 + \varphi)] = 0 \quad (3.20)$$

односно, одавде је:

$$L \left. \frac{di(t)}{dt} \right|_{t=0_+} = LB_3 [(-\beta) \sin(\varphi) + \omega_d \cos(\varphi)] = 0 \quad (3.21)$$

С обзиром на чињеницу да B_3 не може да има вредност нула, израз (3.21) своди се на:

$$\omega_d \cos(\varphi) - \beta \sin(\varphi) = 0 \quad (3.22)$$

Одавде је:

$$\operatorname{tg}(\varphi) = \frac{\omega_d}{\beta} \quad (3.23)$$

односно,

$$\operatorname{tg}(\varphi) = \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta} \quad (3.24)$$

Полазећи од основне тригонометријске трансформације:

$$\sin(\varphi) = \frac{\operatorname{tg}(\varphi)}{\sqrt{1+\operatorname{tg}^2(\varphi)}} \quad (3.25)$$

и сменом (3.24) и (3.25) у (3.17), након сређивања добија се:

$$B_3 = \frac{U_{c0}}{R\sqrt{1-\zeta^2}} \quad (3.26)$$

Коначно, израз за временски облик струје у редном RLC колу има облик:

$$i(t) = \frac{U_{c0}}{R\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\beta t} \sin(\omega_d t + \operatorname{arctg}(\frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta})) \quad (3.27)$$

Напон на крајевима индуктивности је сада:

$$u_L(t) = L \frac{di(t)}{dt} = \frac{LU_{c0}}{R\sqrt{1-\zeta^2}} \left[(-\beta) \cdot e^{-\beta t} \sin(\omega_d t + \operatorname{arctg}(\frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta})) + \omega_d e^{-\beta t} \cos(\omega_d t + \operatorname{arctg}(\frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta})) \right] \quad (3.28)$$

Користећи зависност β од R и L дату у једначини (3.7), претходна једначина може се представити у следећој форми:

$$u_L(t) = \frac{U_{c0}}{2\beta\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\beta t} [(-\beta) \cdot \sin(\omega_d t + \varphi) + \omega_d \cos(\omega_d t + \varphi)] \quad (3.29)$$

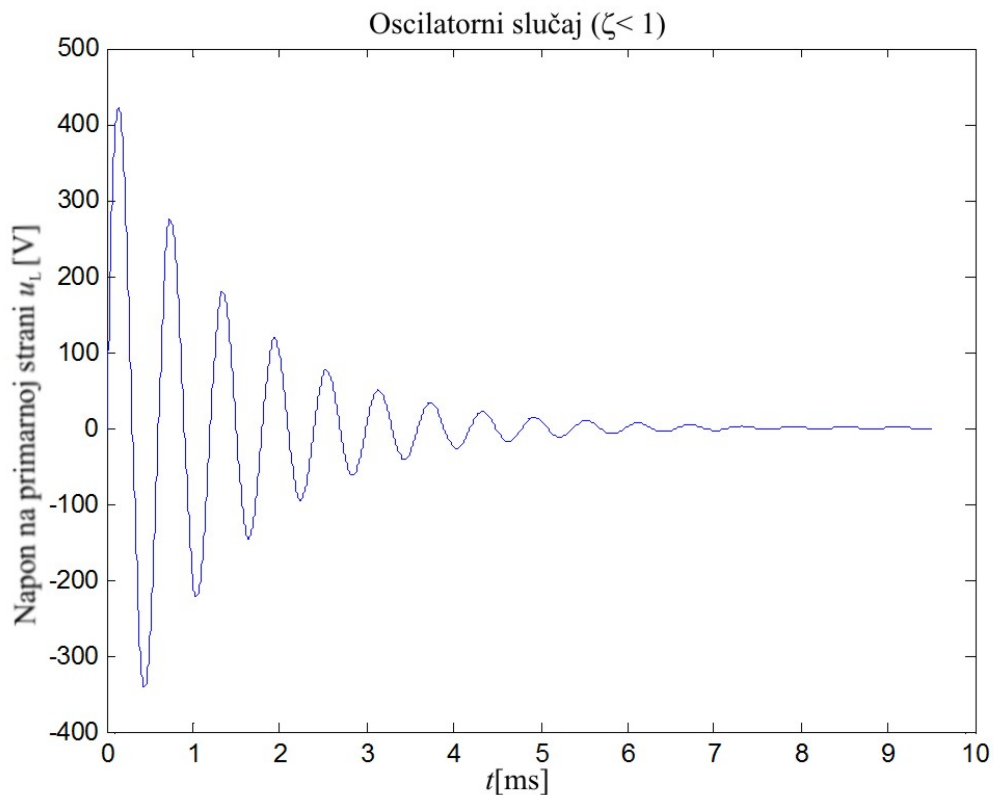
Користећи релације (3.8) и (3.13) претходна једначина може се представити:

$$u_L(t) = \frac{U_{c0}}{2\zeta\omega_d} e^{-\beta t} [\omega_d \cos(\omega_d t + \varphi) - \beta \cdot \sin(\omega_d t + \varphi)] \quad (3.30)$$

На крају израз за напон на крајевима индуктивности поприма облик:

$$u_L(t) = \frac{U_{c0}}{2\zeta} e^{-\beta t} \left[\cos(\omega_d t + \varphi) - \frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \cdot \sin(\omega_d t + \varphi) \right] \quad (3.31)$$

На слици 3.2 дат је пример временске промене напона на крајевима индуктивности примарне стране индукционог калема за случај слабо пригушеног RLC кола.



Слика 3.2 – Временска промена напона на крајевима индуктивности примарне стране индукционог калема за случај слабо пригушеног RLC кола ($R=46\Omega$, $L=32,6\text{mH}$, $C=0.227\mu\text{F}$)

3.2 ЈАКО ПРИГУШЕНО RLC КОЛО - АПЕРИОДИЧАН СЛУЧАЈ ($\zeta > 1$)

Корени карактеристичне једначине (3.10) су реални, па се опште решење диференцијалне једначине (3.6) може приказати у форми датој изразом (3.11):

$$i(t) = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t} \quad (3.32)$$

Израз (3.32) се може приказати у нешто измењеној форми:

$$i(t) = A_1 e^{-\omega_0(\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1})t} + A_2 e^{-\omega_0(\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1})t} \quad (3.33)$$

Параметри A_1 и A_2 из израза (3.33) одређују се на основу граничних услова.

У случају редног RLC кола (приказаног на слици 3.1) постоје два основна гранична услова. Наиме, од интереса за овај рад је тренутак када се прекида напајање RLC кола једносмерним напоном. Непосредно пре прекида напајања, у колу је успостављен стационарни режим који подразумева да кроз индуктивност L протиче једносмерна струја ограничена само отпорношћу R реалног калема. Са друге стране, напон на идеалном калему је једнак нули с обзиром да кроз њега протиче једносмерна струја.

1° први гранични услов

У тренутку $t = 0$ тренутна јачина струје је једнака нули:

$$i(t = 0) = \frac{U_{c0}}{R} \quad (3.34)$$

Израз (3.34) се сада може написати у следећем облику:

$$i(t = 0) = A_1 + A_2 = \frac{U_{c0}}{R} \quad (3.35)$$

односно,

$$A_1 + A_2 = \frac{U_{c0}}{R} \quad (3.36)$$

2° други гранични услов

Посматра се тренутак $t = 0_+$. Вредност напона на идеалној индуктивности у овом тренутку једнака је нули:

$$u_L(t = 0_+) = 0 \quad (3.37)$$

На основу основног израза који повезује тренутне вредности струје и напона у случају индуктивности може се писати:

$$u_L(t=0_+) = L \left. \frac{di(t)}{dt} \right|_{t=0_+} = 0 \quad (3.38)$$

Уводећи смену за тренутну вредност јачине струје (3.33) у (3.38) добија се:

$$L \left. \frac{di(t)}{dt} \right|_{t=0_+} = -L \left[A_1 \omega_0 (\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1}) e^{-\omega_0 (\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1}) t} + A_2 \omega_0 (\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1}) e^{-\omega_0 (\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1}) t} \right]_{t=0_+} = 0 \quad (3.39)$$

$$L \left. \frac{di(t)}{dt} \right|_{t=0_+} = -\omega_0 L \left[A_1 (\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1}) + A_2 (\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1}) \right] = 0 \quad (3.40)$$

$$A_1 (\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1}) + A_2 (\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1}) = 0 \quad (3.41)$$

Решавајући систем линеарних једначина (3.36) и (3.41) са две непознате добија се решење за параметре A_1 и A_2 :

$$A_1 = \left(1 + \frac{\zeta}{\sqrt{\zeta^2 - 1}} \right) \cdot \frac{U_{c0}}{2R} \quad (3.42)$$

$$A_2 = \left(1 - \frac{\zeta}{\sqrt{\zeta^2 - 1}} \right) \cdot \frac{U_{c0}}{2R} \quad (3.43)$$

Коначно, израз за временски облик струје у редном RLC колу има облик:

$$i(t) = \frac{U_{c0}}{2R} \left(1 + \frac{\zeta}{\sqrt{\zeta^2 - 1}} \right) e^{-\omega_0 (\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1}) t} + \frac{U_{c0}}{2R} \left(1 - \frac{\zeta}{\sqrt{\zeta^2 - 1}} \right) e^{-\omega_0 (\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1}) t} \quad (3.44)$$

$$i(t) = \frac{U_{c0}}{2R} e^{-\zeta \omega_0 t} \left[\left(1 + \frac{\zeta}{\sqrt{\zeta^2 - 1}} \right) e^{\omega_0 (\sqrt{\zeta^2 - 1}) t} + \left(1 - \frac{\zeta}{\sqrt{\zeta^2 - 1}} \right) e^{-\omega_0 (\sqrt{\zeta^2 - 1}) t} \right] \quad (3.45)$$

$$i(t) = \frac{U_{c0}}{2R} e^{-\zeta \omega_0 t} \left[e^{\omega_0 (\sqrt{\zeta^2 - 1}) t} + e^{-\omega_0 (\sqrt{\zeta^2 - 1}) t} + \frac{\zeta}{\sqrt{\zeta^2 - 1}} \left(e^{\omega_0 (\sqrt{\zeta^2 - 1}) t} - e^{-\omega_0 (\sqrt{\zeta^2 - 1}) t} \right) \right] \quad (3.46)$$

Узимајући у обзир да је $shx = \frac{e^x - e^{-x}}{2}$ и $chx = \frac{e^x + e^{-x}}{2}$ једначина (3.46) може се свести на следећи облик:

$$i(t) = \frac{U_{c0}}{2R} e^{-\zeta\omega_0 t} \left[2ch(\sqrt{\zeta^2 - 1} \omega_0 \cdot t) + 2 \frac{\zeta}{\sqrt{\zeta^2 - 1}} sh(\sqrt{\zeta^2 - 1} \omega_0 \cdot t) \right] \quad (3.47)$$

$$i(t) = \frac{U_{c0}}{R} e^{-\beta t} \left[ch(\sqrt{\zeta^2 - 1} \omega_0 \cdot t) + \frac{\zeta}{\sqrt{\zeta^2 - 1}} sh(\sqrt{\zeta^2 - 1} \omega_0 \cdot t) \right] \quad (3.48)$$

Напон на крајевима индуктивности је сада:

$$u_L(t) = L \frac{di(t)}{dt} = L \frac{U_{c0}}{R} \left[\begin{array}{l} (-\beta) \cdot e^{-\beta t} \cdot ch(\sqrt{\zeta^2 - 1} \cdot \omega_0 t) + \\ \sqrt{\zeta^2 - 1} \cdot \omega_0 \cdot e^{-\beta t} \cdot sh(\sqrt{\zeta^2 - 1} \cdot \omega_0 t) + \\ (-\beta) \cdot e^{-\beta t} \cdot \frac{\zeta}{\sqrt{\zeta^2 - 1}} sh(\sqrt{\zeta^2 - 1} \cdot \omega_0 t) + \\ \sqrt{\zeta^2 - 1} \cdot \omega_0 \cdot e^{-\beta t} \cdot \frac{\zeta}{\sqrt{\zeta^2 - 1}} ch(\sqrt{\zeta^2 - 1} \cdot \omega_0 t) \end{array} \right] \quad (3.49)$$

$$u_L(t) = L \frac{di(t)}{dt} = L \frac{U_{c0}}{R} e^{-\beta t} \left[\begin{array}{l} (\zeta\omega_0 - \beta) \cdot ch(\sqrt{\zeta^2 - 1} \cdot \omega_0 t) + \\ \left(\sqrt{\zeta^2 - 1} \cdot \omega_0 - \beta \cdot \frac{\zeta}{\sqrt{\zeta^2 - 1}} \right) \cdot sh(\sqrt{\zeta^2 - 1} \cdot \omega_0 t) \end{array} \right] \quad (3.50)$$

$$u_L(t) = L \frac{di(t)}{dt} = L \frac{U_{c0}}{R} e^{-\beta t} \left[\left(\sqrt{\zeta^2 - 1} \cdot \omega_0 - \omega_0 \zeta \cdot \frac{\zeta}{\sqrt{\zeta^2 - 1}} \right) \cdot sh(\sqrt{\zeta^2 - 1} \cdot \omega_0 t) \right] \quad (3.51)$$

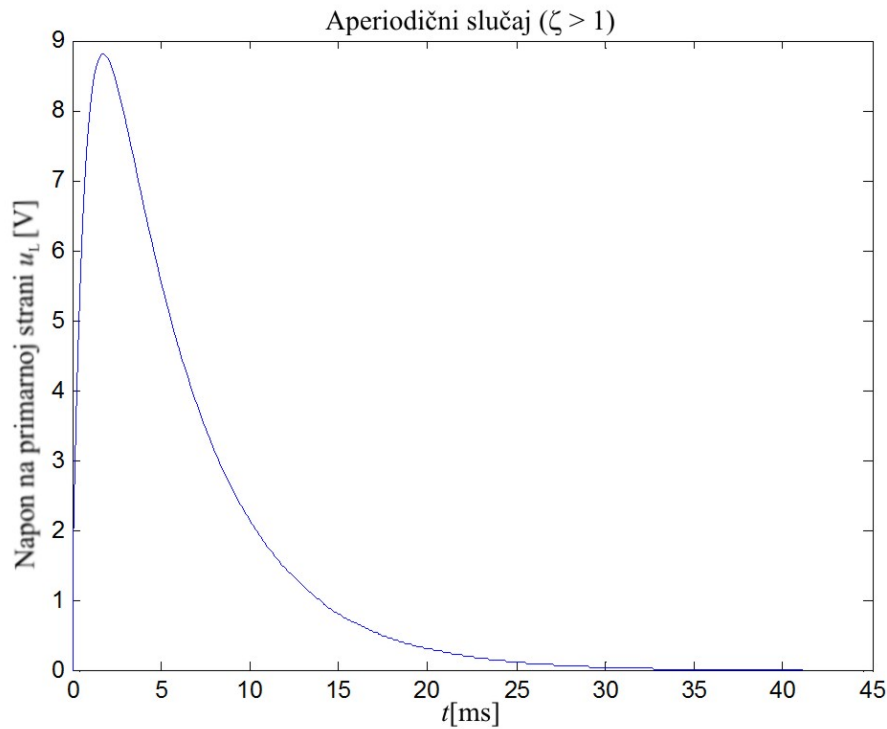
$$u_L(t) = L \frac{di(t)}{dt} = L \frac{U_{c0}}{R} e^{-\beta t} \left[\omega_0 \left(\sqrt{\zeta^2 - 1} - \frac{\zeta^2}{\sqrt{\zeta^2 - 1}} \right) \cdot sh(\sqrt{\zeta^2 - 1} \cdot \omega_0 t) \right] \quad (3.52)$$

$$u_L(t) = L \frac{di(t)}{dt} = -L \frac{U_{c0}}{R} e^{-\beta t} \left[\omega_0 \frac{1}{\sqrt{\zeta^2 - 1}} \cdot sh(\sqrt{\zeta^2 - 1} \cdot \omega_0 t) \right] \quad (3.53)$$

$$u_L(t) = L \frac{di(t)}{dt} = -\frac{U_{c0}}{2\beta} e^{-\beta t} \left[\omega_0 \frac{1}{\sqrt{\zeta^2 - 1}} \cdot sh(\sqrt{\zeta^2 - 1} \cdot \omega_0 t) \right] \quad (3.54)$$

$$u_L(t) = -\frac{U_{c0}}{2\zeta} e^{-\beta t} \left[\frac{1}{\sqrt{\zeta^2 - 1}} \cdot sh(\sqrt{\zeta^2 - 1} \cdot \omega_0 t) \right] \quad (3.55)$$

На слици 3.3 дат је пример временске промене напона на крајевима индуктивности примарне стране индукционог калема за случај јако пригушеног RLC кола.



Слика 3.3 – Временска промена напона на крајевима индуктивности примарне стране индукционог калема за случај јако пригушеног RLC кола ($R=46\Omega$, $L=32,6\text{mH}$, $C=130\mu\text{F}$)

3.3 КРИТИЧНО ПРИГУШЕНО RLC КОЛО - КРИТИЧНО АПЕРИОДИЧАН СЛУЧАЈ ($\zeta=1$)

Опште решење диференцијалне једначине (3.6) у овом случају може се приказати у следећој форми:

$$i(t) = (A_1 \cdot t + A_2) e^{-\beta t} \quad (3.56)$$

Параметри A_1 и A_2 из израза (3.56) одређују се на основу граничних услова.

У случају редног RLC кола (приказаног на слици 3.1) постоје два основна гранична услова. Наиме, од интереса за овај рад је тренутак када се прекида напајање RLC кола једносмерним напонем. Непосредно пре прекида напајања, у колу је успостављен стационарни режим који подразумева да кроз индуктивност L протиче једносмерна струја ограничена само отпорношћу R реалног калема. Са друге стране, напон на идеалном калему је једнак нули с обзиром да кроз њега протиче једносмерна струја.

1^о први гранични услов

У тренутку $t = 0$ тренутна јачина струје је једнака нули:

$$i(t=0) = \frac{U_{c0}}{R} \quad (3.57)$$

Израз (3.56) се сада може написати у следећем облику:

$$i(t=0) = (A_1 \cdot 0 + A_2)e^{-\beta \cdot 0} = \frac{U_{c0}}{R} \quad (3.58)$$

односно,

$$A_2 = \frac{U_{c0}}{R} \quad (3.59)$$

Дакле, на основу првог граничног услова се закључује да је:

$$i(t) = \left(A_1 \cdot t + \frac{U_{c0}}{R} \right) \cdot e^{-\beta t} \quad (3.60)$$

2° други гранични услов

Посматра се тренутак $t = 0_+$. Вредност напона на идеалној индуктивности у овом тренутку једнака је нули:

$$u_L(t=0_+) = 0 \quad (3.61)$$

На основу основног израза који повезује тренутне вредности струје и напона у случају индуктивности може се писати:

$$u_L(t=0_+) = L \left. \frac{di(t)}{dt} \right|_{t=0_+} = 0 \quad (3.62)$$

Уводећи смену за тренутну вредност јачине струје (3.60) у (3.62) добија се:

$$L \left. \frac{di(t)}{dt} \right|_{t=0_+} = L \left[A_1 e^{-\beta \cdot 0} - \beta \cdot \left(A_1 \cdot 0 + \frac{U_{c0}}{R} \right) \cdot e^{-\beta \cdot 0} \right] = 0 \quad (3.63)$$

односно, одавде је:

$$A_1 - \beta \cdot \frac{U_{c0}}{R} = 0 \quad (3.64)$$

$$A_1 = \beta \cdot \frac{U_{c0}}{R} = \frac{R}{2L} \cdot \frac{U_{c0}}{R} = \frac{U_{c0}}{2L} \quad (3.65)$$

$$A_1 = \frac{U_{c0}}{2L} \quad (3.66)$$

Коначно, израз за временски облик струје у редном RLC колу има облик:

$$i(t) = \left(\frac{U_{c0}}{2L} \cdot t + \frac{U_{c0}}{R} \right) \cdot e^{-\beta t} \quad (3.67)$$

Напон на крајевима индуктивности је сада:

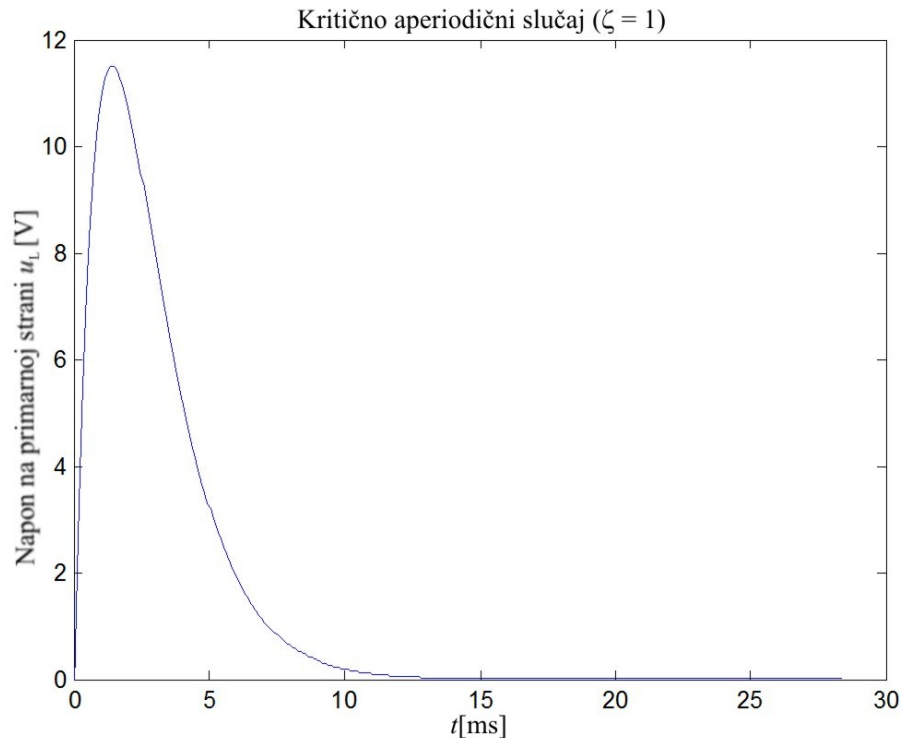
$$u_L(t) = L \frac{di(t)}{dt} = L \cdot \left[\frac{U_{c0}}{2L} e^{-\beta t} - \beta \cdot \left(\frac{U_{c0}}{2L} t + \frac{U_{c0}}{R} \right) \cdot e^{-\beta t} \right] \quad (3.68)$$

$$u_L(t) = L \frac{di(t)}{dt} = U_{c0} e^{-\beta t} \left[\frac{1}{2} - \beta \cdot \left(\frac{1}{2} t + \frac{L}{R} \right) \right] \quad (3.69)$$

$$u_L(t) = L \frac{di(t)}{dt} = U_{c0} e^{-\beta t} \left[\frac{1}{2} - \beta \cdot \frac{1}{2} t - \beta \frac{L}{R} \right] \quad (3.70)$$

$$u_L(t) = L \frac{di(t)}{dt} = - \frac{\beta \cdot t \cdot U_{c0}}{2} e^{-\beta t} \quad (3.71)$$

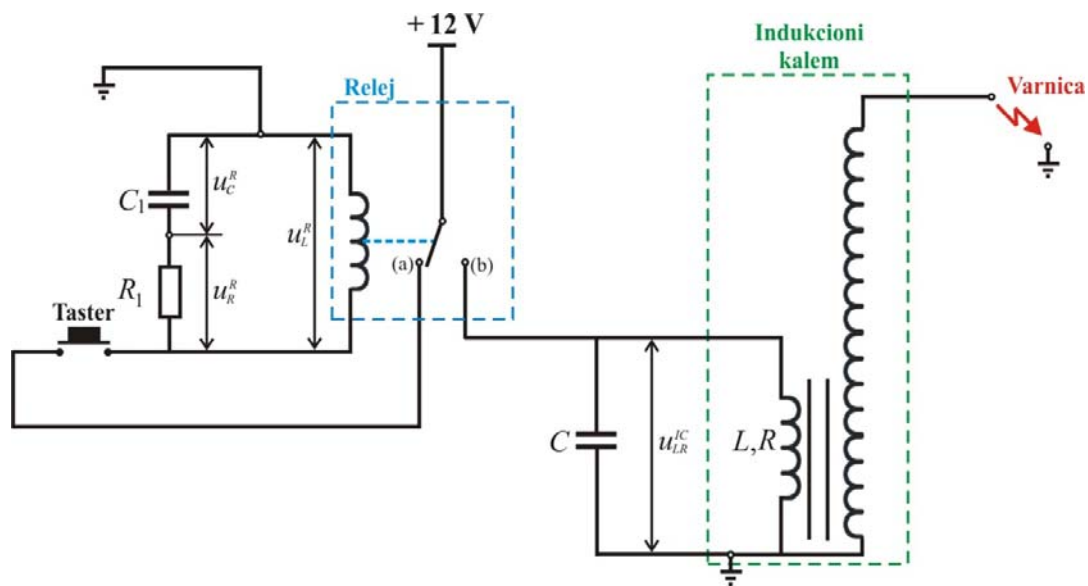
На слици 3.4 дат је пример временске промене напона на крајевима индуктивности примарне стране индукционог калема за случај критично пригушеног RLC кола.



Слика 3.4 – Временска промена напона на крајевима индуктивности примарне стране индукционог калема за случај критично пригушеног RLC кола ($R=46\Omega$, $L=32,6\text{mH}$, $C=62\mu\text{F}$)

4. ПРАКТИЧНА РЕАЛИЗАЦИЈА ГЕНЕРАТОРА ЕЛЕКТРИЧНИХ ВАРНИЦА

На слици 4.1 приказана је основна блок-шема генератора електричних варница који је реализован у овом раду.



Слика 4.1 - Блок-шема генератора електричних варница

($C_1=22\mu\text{F}$, $R_1=4.7\Omega$, релеј FRA2C-S2, произвођача *FORWARD INDUSTRIAL COMPANY*,
 $C=0,227\mu\text{F}$, $R=46\Omega$, $L=32,6\text{mH}$, индукциони калем Б117, произвођача *ELPROM ELHOVO*,
код кога је преносни број трансформатора једнак 60)

На основној блок шеми генератора електричних варница јасно се раздвајају две целине:

- побудно коло (коло релеја), и
- коло индукционог калема.

4.1 ПРИНЦИП РАДА ПОБУДНОГ КОЛА (КОЛА РЕЛЕЈА)

Као што се са слике 4.1 може видети побудно коло генератора електричних варница састоји се од индуктивности релеја повезаног у паралели са кондензатором C_1 и отпорности R_1 . Када је тастер отворен (тј. када је веза тастера раскинута), котва релеја непрестано се налази у положају (а), а све струје и напони у колу су једнаки нули. На излазу, у колу секундарног намотаја не генерише се варница, тј. генератор не ради.

Побудно коло (као и комплетан генератор) почиње да ради када се активира тастер (тј. успостави веза између контаката тастера). Побудно коло том приликом улази у периодични режим који карактеришу две јасно дефинисане фазе:

- Фаза укључења побудног кола (на напајање): У иницијалном тренутку котва релеја је у положају (а) тако долази до постепеног пуњења кондензатора C_1 преко отпорности R_1 . Пошто је отпорност R_1 мала, кондензатор C_1 се веома брзо пуни до вредности напона напајања што доводи до престанка протока струје кроз отпорност R_1 . Истовремено, напон на примарном намотају релеја врло брзо достиже вредност једносмерног извора напајања. У случају постепене промене напона у примарном колу релеја, напон на коме долази до привлачења котве износи неколико волти (за коришћени релеј та вредност је 5,2V). Међутим, релеји су електромеханичке направе које карактерише релативно велика инертност. Из тог разлога, напон на примарном колу релеја ће достићи вредност напона једносмерног извора пре привлачења котве. Након достизања стабилног једносмерног напона на крајевима примарног кола релеја кроз њега тече константна једносмерна струја ограничена отпорношћу реалног калема (примарног намотаја). Збирно гледано, процес од почетка пуњења кондензатора до привлачења котве и пребацивања у положај (б) траје у разматраном колу око 1,5 ms (податак одређен мерењем коришћењем осцилоскопа - слика 4.4).
- Фаза искључења побудног кола (са напајања): Када котва релеја пређе у положај (б), кондензатор почиње да се празни преко отпорности R_1 , али и отпорности реалног калема примарног намотаја релеја. С обзором да су отпорност R_1 и отпорност примарног намотаја релеја у овом случају повезани редно, еквивалентна отпорност једнака је збиру ове две вредности. Из тог разлога процес пражњења кондензатора C_1 је доста успоренији. Додатно, на спорије пражњење енергије нагомилане у кондензатору утиче и индуктивност примарног намотаја. Напон отпуштања котве у случају постепене промене напона у примарном колу релеја, по правилу је мањи за неколико волти од напона привлачења котве (за коришћени релеј та вредност је приближно 2,62V). Слично као и у претходној фази, због електромеханичке инертности релеја, до отпуштања котве релеја неће доћи баш у тренутку када напон на крајевима примарног намотаја достигне вредност напона отпуштања већ неколико ms касније (у разматраном случају око 4,5 ms - слика 4.4).

У тренутку када дође до отпуштања котве релеја, побудно коло (коло релеја) поново улази у прву фазу и на тај начин цео процес се периодично понавља. За

разматрано коло, учестаност понављања целог процеса је око 121,4 Hz (податак одређен мерењем коришћењем осцилоскопа - слика 4.4).

4.2 ПРИНЦИП РАДА КОЛА ИНДУКЦИОНОГ КАЛЕМА

На основу принципа рада побудног кола (кола релеја) јасно је да се котва релеја наизменично пребацује са прикључка (а) на прикључак (b) и то са фреквенцијом од приближно 121,4 Hz (ово је уједно и учестаност генерисања варница). Из наведеног разлога, коло индукционог калема карактерише периодични режим рада у оквиру кога се јасно разликују две фазе:

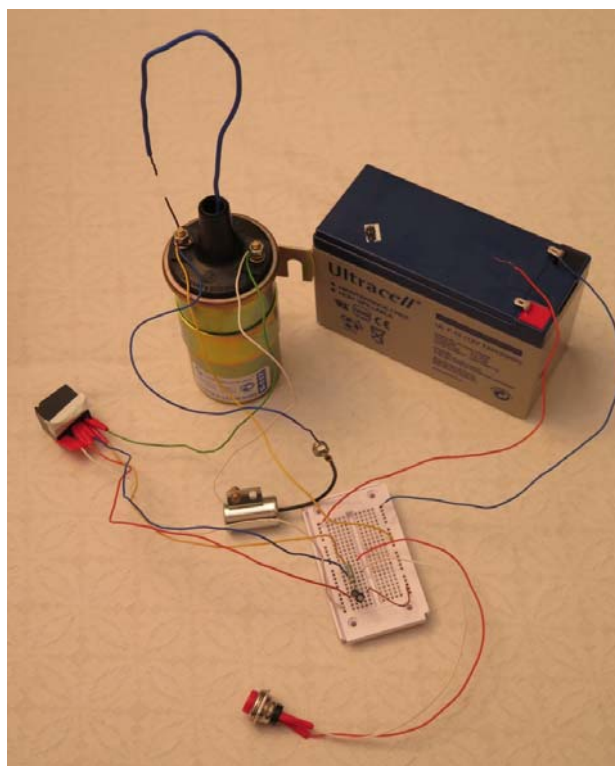
- Фаза укључења кола индукционог калема на једносмени извор напајања: У овој фази котва релеја налази се на прикључку (b). Одмах по пребивању котве на прикључак (b), струја која протиче кроз примарни намотај индукционог калема почиње постепено да расте до стабилне стационарне вредности I_0 (једносмерна струја) ограничене само отпорношћу реалног калема примарног намотаја ($I_0 = \frac{U_0}{R}$). Истовремено, кондензатор C почиње да се пуни све док се на његовим крајевима не достигне вредност напона једносмерног извора. На основу наведеног, јасно се изводи закључак да се у овој фази рада индукционог калема на примарном намотају формирају напони који су мањи од напона једносмерног извора напајања. Из тог разлога у секундарном колу индукционог калема не долази до генерисања великих напона, па последично нема ни генерисања варница.
- Фаза искључења кола индукционог калема: Ово је фаза у којој долази до генерисања варнице у секундарном колу индукционог калема. Процес генерисања варнице започиње у тренутку када котва релеја нагло пређе на прикључак (а), тј. када се индукциони калем нагло искључи са напајања. При томе, пошто је напон на кондензатору једнак напону једносмерног извора неће доћи до генерисања варнице (а отуда ни до нежељеног губитка енергије) на контактима котве релеја. Даљи процес промена струја и напона у индукционом колу детаљно је размотрен у глави 3. На основу наведеног јасно је да у случају слабо пригушеног кола долази до појаве великих напона на индуктивности примарног намотаја, а отуда и до веома великих напона на секундарном намотају што коначно доводи до појаве варница.

4.3 ПРАКТИЧНА РЕАЛИЗАЦИЈА

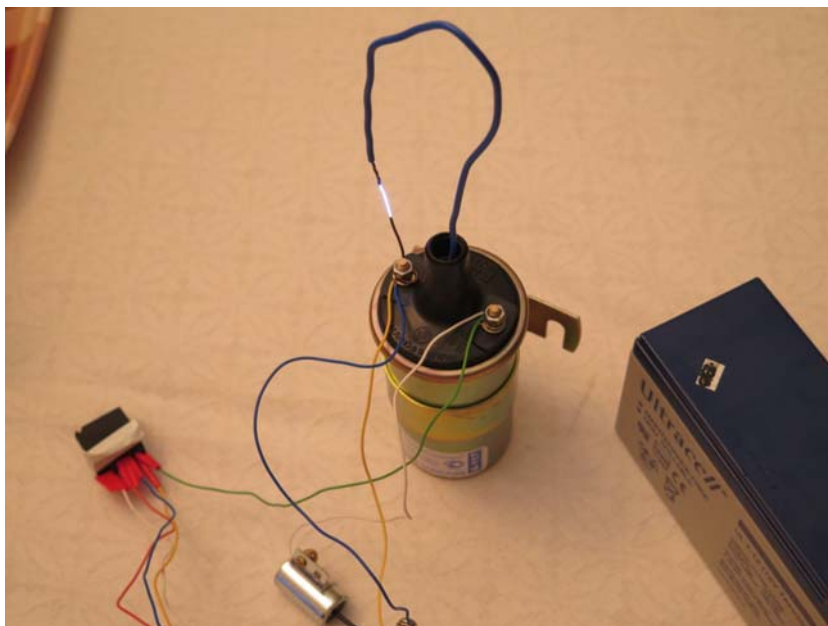
На сликама 4.2 и 4.3 приказане су фотографије реализованог система у неактивном режиму и у режиму генерисања варница, респективно. Прикази вредности карактеристичних напона добијени мерењима коришћењем осцилоскопа дати су на сликама 4.4. до 4.12. При томе, треба напоменути да је тачна вредност напона једносмерног извора износила 12,5 V.

На основу теоријских прорачуна на бази реалних вредности коришћених компоненти (слика 3.2) види се да је максимална вредност напона на крајевима примарног намотаја приближно 420 V. Узимајући у обзир преносни број трансформатора за индукциони калем (60) долази се до приближно 25 000 V на крајевима секундарног намотаја. Коначно, коришћењем реализованог система могуће је генерисати варницу

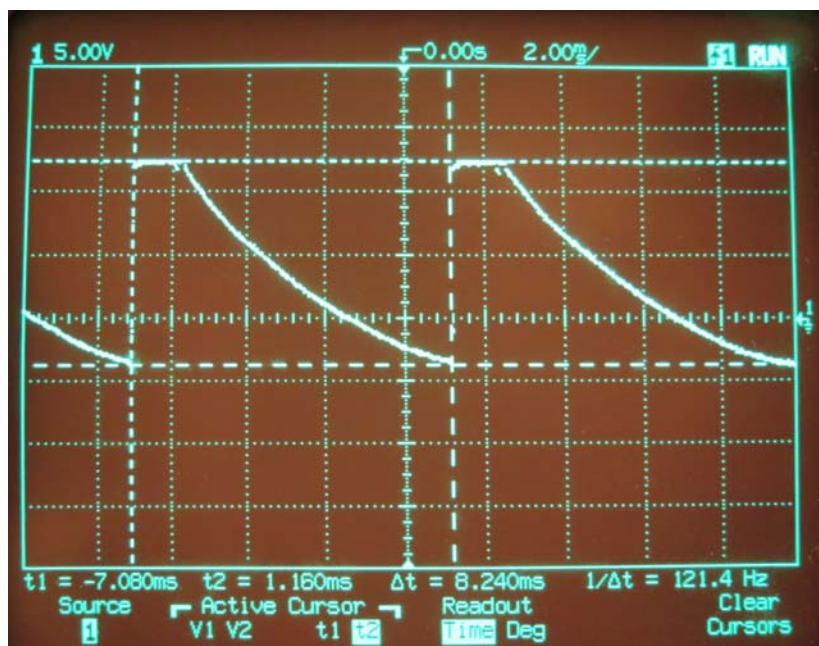
између извода секундарног намотаја до међусобног растојања извода од приближно 1,5 cm. Добијено растојање на коме се може генерисати варница у потпуности је у сагласности са теоријским прорачуном.



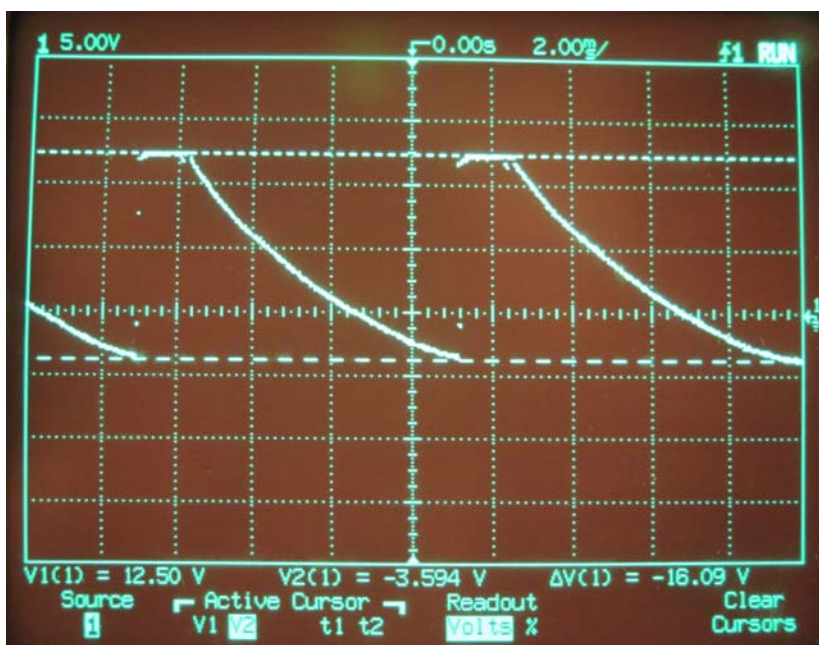
Слика 4.2 - Приказ реализованог система у неактивном стању



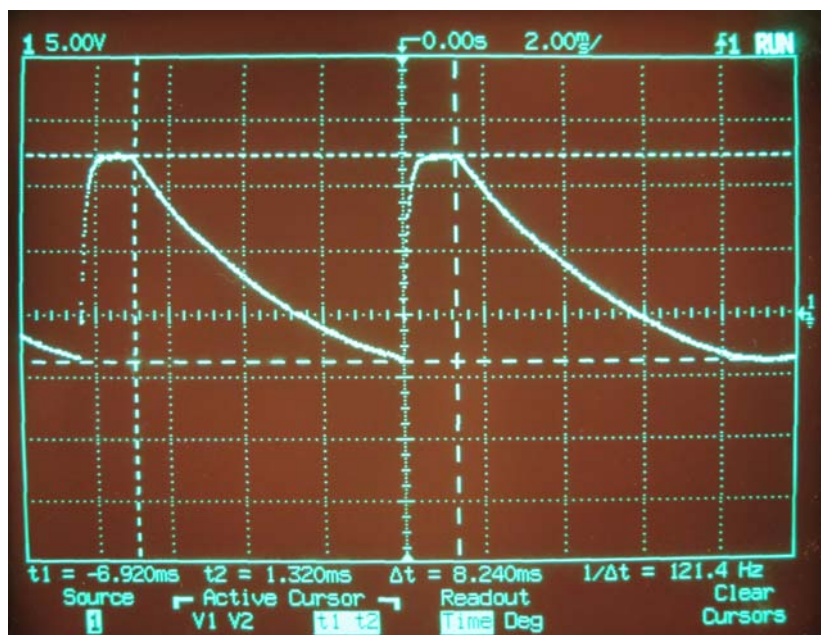
Слика 4.3 - Приказ реализованог система у режиму генерисања варница



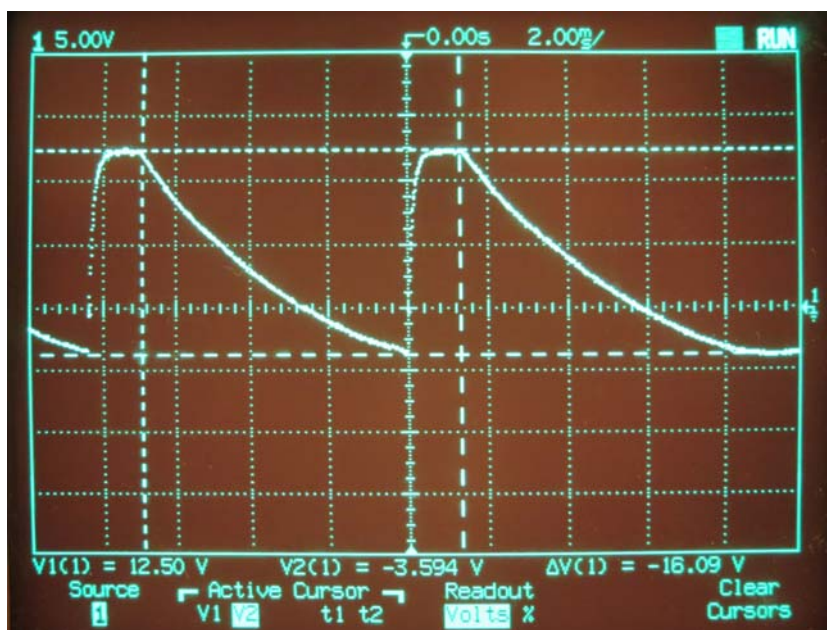
Слика 4.4 - Временска промена напона u_L^R на примарној страни релеја (истакнути временски параметри)



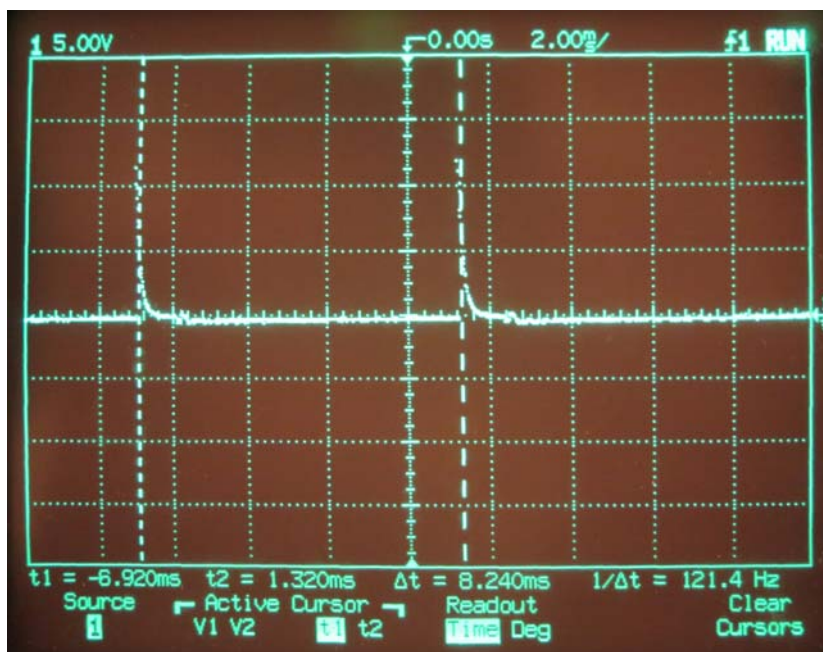
Слика 4.5 - Временска промена напона u_L^R на примарној страни релеја (истакнути напонски параметри)



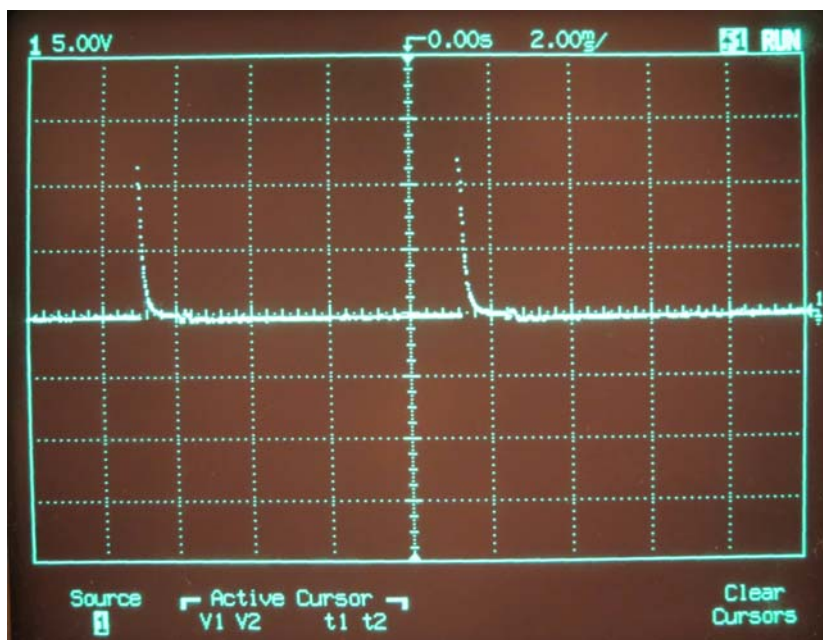
Слика 4.6 - Временска промена напона на кондензатору u_C^R у колу релеја (истакнути временски параметри)



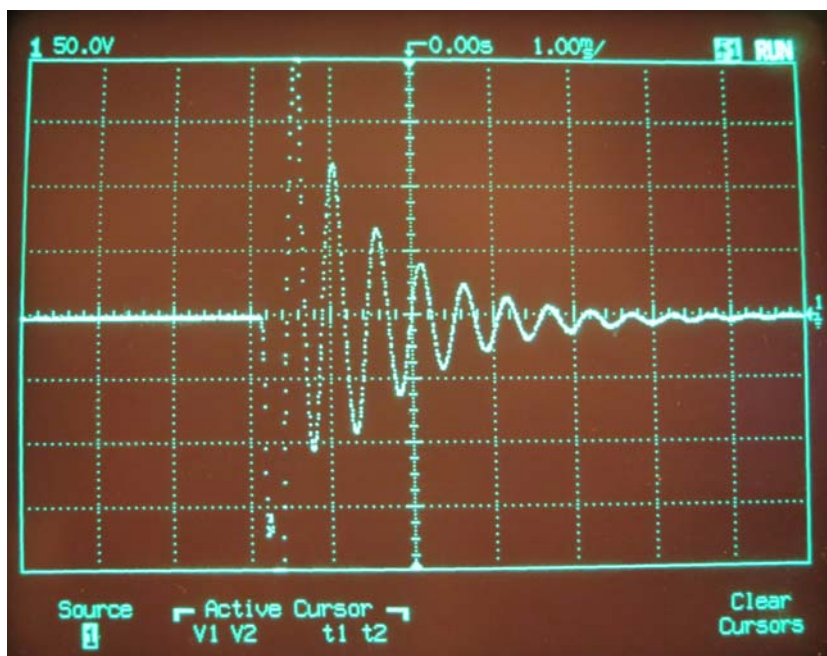
Слика 4.7 - Временска промена напона на кондензатору u_C^R у колу релеја (истакнути напонски параметри)



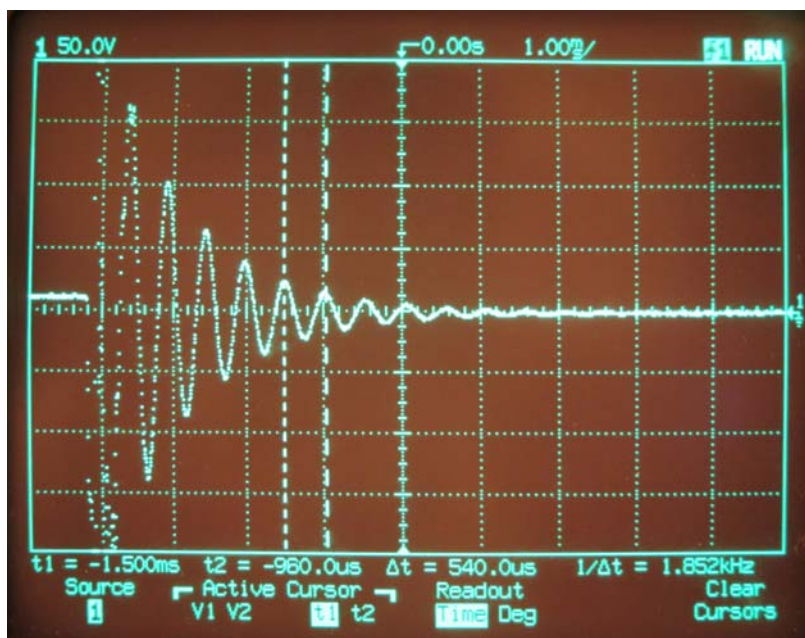
Слика 4.8 - Временска промена напона на отпорнику u_R^R у колу релеја (истакнути временски параметри)



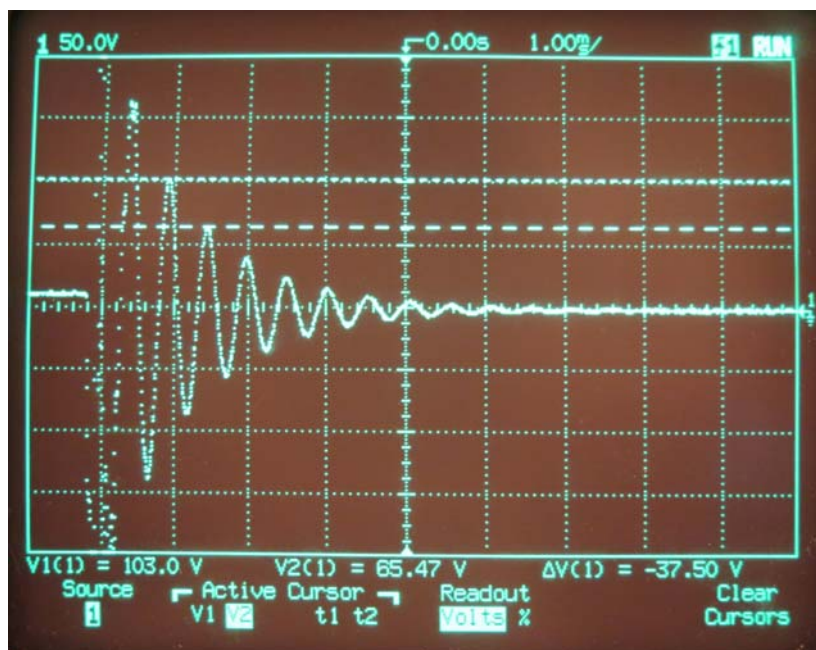
Слика 4.9 - Временска промена напона на отпорнику u_R^R у колу релеја (истакнути напонски параметри)



Слика 4.10 - Временска промена напона u_{LR}^{IC} на примарној страни индукционог калема



Слика 4.11 - Временска промена напона u_{LR}^{IC} на примарној страни индукционог калема (истакнути временски параметри)



Слика 4.12 - Временска промена напона u_{LR}^{IC} на примарној страни индукционог калема (истакнути напонски параметри)

5. ЗАКЉУЧАК

У овом матурском раду извршена је теоријска анализа и практична реализација генератора електричних варница коришћењем индукционог калема. У раду су дате дефиниције основних елемената електричних мрежа који су били од интереса за израду овог матурског рада: отпорник, калем, кондензатор, трансформатор и релеј. С обзиром да се генерисање варница реализује коришћењем редног осцилаторног RLC кола теоријски је анализиран прелазни режим у редном RLC колу. Посебно су размотрена три случаја чија разлика потиче од конкретних вредности фактора пригушења (ζ):

- $\zeta < 1$... слабо пригушено коло - осцилаторни случај,
- $\zeta > 1$... јако пригушено коло - апериодичан случај, i
- $\zeta = 1$... критично пригушено коло - критично апериодичан случај.

За сва три случаја изведена је временска промена напона на крајевима индуктивности примарне стране индукционог калема.

У четвртој глави овог рада објашњена је практична реализација генератора електричних варница. Посебна пажња посвећена је двема јасно раздвојеним целинама: побудном колу (односно колу релеја) и колу индукционог калема. Објашњена је улога сваког од кола у формирању електричне варнице.

На крају су на реализованом колу извршена мерења временских промена напона на кондензатору и отпорнику у колу релеја, и калему на примарној страни релеја, као и временских промена напона на примарној страни индукционог калема.

Генератор електричних варница постиже се за случај слабо пригушеног RLC кола. Теоријска анализа која се односи на слабо пригушено RLC коло и практична реализација кола показују прилично добра слагања по питању временске промене напона на крајевима индуктивности примарне стране индукционог калема.

6. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Др Бранко Поповић, "Основи електротехнике 2", Грађевинска књига, Београд 1986.
- [2] Слободан Милојковић, "Теорија електричних кола", Свјетлост, ООУР Завод за уџбенике и наставна средства, Сарајево 1989.
- [3] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/magnetic/ignition.html>
- [4] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/magnetic/igcoil.html>
- [5] <http://www.electroboom.com/?tag=stun-gun>
- [6] <http://www.automatika.rs/baza-znanja/teorija-upravljanja/releji.html>
- [7] Индукциони калем: <http://elprom-elhovo.eu/joomla/index.php/component/djcatalog2/?view=item&id=80:117-at-1016&cid=7:2014-06-02-13-45-16&Itemid=479>
- [8] Релеј: <http://www.tme.eu/en/details/fra12-wd/automotive-electromagnetic-relays/forward-industrial-co/fra2c-s2-dc12/>

ПРИЛОГ - ЛИСТИНГ МАТЛАБ КОДА ЗА ЦРТАЊЕ ФУНКЦИЈА

```
clc
clear all

R=46; L=32.6e-3; C=45e-6;

Uc0=12.5;
Uc0=5*Uc0;
beta=R/(2*L);
w0=1/(sqrt(L*C))
f0=w0/6.28
ksi=beta/w0
fi=atan(sqrt(1-ksi*ksi)/ksi);
korak=1/(w0*20);
t_max=100/w0;
t=(0:korak:t_max);

if (ksi<1)
    wd=w0*sqrt(1-ksi*ksi)
    uL=Uc0/(2*ksi)*exp(-1*beta.*t).*(ksi/sqrt(1-ksi*ksi)*sin(wd.*t+fi)-
cos(wd.*t+fi));
    uR=Uc0/sqrt(1-ksi*ksi)*exp(-1*beta.*t).*(sin(wd.*t+fi));
    uLR=uR+uL;
    MAKSIMUM=max(uL)
    NAPON_VARNICE=MAKSIMUM*60
    t=t*1000;
    plot(t, uL);
    title('oscilatorni slucaj (ksi < 1)');
    xlabel('t[ms]');
    ylabel('napon na primarnoj strani uL[V]');
end

if (ksi>1)
    ws=w0*sqrt(ksi*ksi-1)
    uL=Uc0/(2*ksi)*exp(-1*beta.*t).*(ksi/sqrt(ksi*ksi-1)*sinh(ws.*t));
    t=t*1000;
    plot(t(1:400), uL(1:400));
    title('aperiodicni slucaj (ksi > 1)');
    xlabel('t[ms]');
    ylabel('napon na primarnoj strani [V]');
end

if (ksi==1)
    uL=Uc0*exp(-1*beta.*t).*(beta.*t/2);
    t=t*1000;
    plot(t(1:400), uL(1:400));
    title('kriticno aperiodicni slucaj (ksi = 1)');
    xlabel('t[ms]');
    ylabel('napon na primarnoj strani [V]');
end
```