

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Примењена механика и аутоматско управљање ПМИАУ

Предмет: Сензори и актуатори

Број индекса: 239/2012

Милош Ђ. Ђорђевић

Мерење, прикупљање и визуелизација сигнала путем минирачунара „Raspberry Pi“ и програмског језика „Python“

завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

- 1. Проф. др Милан Матијевић - ментор**
- 2. Проф др Александар Даинић**
- 3. Проф др Драган Тарановић**

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог завршног рада кандидат треба да:

У оквиру овог завршног рада кандидат треба да опише примене минирачунара RaspberryPi у инжењерским апликацијама мерења и управљања система са једним улазом и једним излазом. Изабрани апликативни пример је: мерење одзива електричног RC кола на одскочну или хармонијску побуду. У раду ће користити Пајтон програмски језик за програмирање на микрорачунару. Обзиром да не поседује кола за аналогно дигиталну конверзију потребно је одабрати аналогно дигитални конвертор преко кога ће вршити мерења код наведеног кола.

Препоручена литература:

- [1] Милан Матијевић, Горан Јакуповић, Јелена Цар, *-Рачунарски подржано мерење*, друго издање, Универзитет у Крагујевцу 2008
- [2] „Tim Cox“, - „*Raspberry Pi Cookbook*“, „PACKT publishing“ 2014
- [3] Милић Р. Стојић – *Дигитални системи управљања*, Универзитет у Београду 1989.

Крагујевац, датум

Ментор:
ред. проф. др Милан Матијевић

*Захваљујем се старијем колеги Николи Јовићу око помоћи
у изради програмских решења која су коришћена у овом раду*

Садржај

1. Резиме	2
1. Summary	2
2. Увод.....	3
2.1 Увод у „Raspberry Pi“	4
2.2 Увод у Пајтон	4
2.3 Д/А конверзија.....	4
2.4 А/Д конверзија.....	5
3. Пример коришћења „Raspberry Pi“ микрорачунара и А/Д конвертора	7
3.1 Теоријско објашњење РЦ кола	7
3.1.2 Решавање једначина и графички приказ битних функција („RC“) кола	7
3.1.2 Међусобне релације између функција кола	12
3.1.3 Прелазни процес („RC“) кола	14
3.1.4 Начини мерења у колу и могуће верзије резултата	15
3.2 Лабораторијска мерења преко А/Д конверзије	17
3.2.1 Постављање кола	17
3.2.2 Постављање А/Д конвертора	19
3.2.3 Повезивање са „Raspberry Pi“	23
3.2.4 Структура програма.....	26
3.2.5 Анализа измерених резултата.....	30
4. Закључак	33
5. Литература.....	34

1. Резиме

Овај рад има за циљ да опише употребу минирачунара „**Raspberry PI**“ за потребе **апликација мерења и управљања, односно у процесима а А/Д (аналогно/дигиталне)**. Рад садржи конкретне експерименталне резултате: 1) мери се **одзив RC** кола на одскочну побуду, 2) Дати су листинзи направљених програмских апликација у програмском језику **Пајтон**, 3) Графички приказ и одступање од очекиваног резултата. У раду је детаљно описана структура овог лабораторијског система, архитектура коришћеног минирачунара, принципи програмирања и кораци за поновну апликацију овог експеримента.

Кључне речи: А/Д конверзија, Д/А конверзија, „**Raspberry PI**“ минирачунар, **Пајтон**

1. Summary

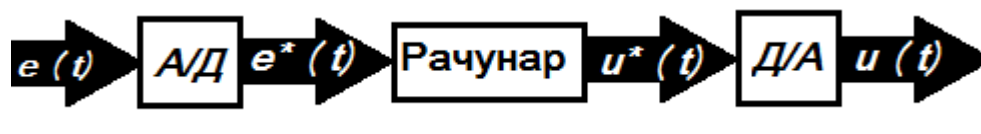
The goal of this paper is to describe the role of a **Raspberry Pi microcomputer in measuring and control application, or more specifically in an analog-digital conversion process**. It contains specific experiments and results: 1) measuring the **response of an RC circuit** 2) Listings of the programs applied, written in **Python**, 3) A deviation of the measured results displayed in graphic form. The structure of the lab system, the architecture of our microcomputer, the principle of the applied program and the steps to repeat the entire process are all described in detail.

Key words: A/D conversion, D/A conversion, **Raspberry Pi**, **Python**

2. Увод

Системи за пренос информација, мерење, регулацију у управљање, у ширем смислу, су базирани на обради и преносу сигнала. При томе, поступци обраде и преноса сигнала се могу сврстати у две категорије зависно од природе сигнала који се преноси: 1) **Аналогни** (континуални) поступци, код којих обрађују и преносе све тренутне вредности сигнала или тачније сигнала у целини; 2) **Дискретни** поступци, код којих се аналогни сигнал најпре дискретизује по времену и евентуално квантује по нивоу, па се затим обрађују и преносе дискретне вредности сигнала које се називају одбирцима. Систем се сматра дигиталним ако неке његове променљиве подлежу дискретизацији и по нивоу и по времену.^[1]

Континуални сигнали су по свом карактеру непрекидне функције времена, са једне, и амплитудне са друге стране. Дискретни сигнали прате промене сигнала у дискретним тренуцима времена и/или са дискретним нивоима амплитуде. Дискретни сигнали се могу добити дискретизацијом континуалних, односно њиховим квантовањем по нивоу и/или по времену. Према томе дискретни сигнали се деле на 1) **релејне**, 2) **импулсне**, и 3) **дигиталне** сигнале. На исти начин системи дискретних сигнала се могу поделити на исти начин. Квантовање по нивоу се постиже релејним елементима чији излаз може попримити неке унапред фиксирани нивое, зависно од тренутне вредности континуалног улаза. Квантовање по времену, односно, дискретизација или одабирање сигнала по времену се обавља у временским тренуцима који се унапред фиксирају. Континуални сигнал се у процесу дискретизације замењује се у процесу дискретизације заменује поворком одабирака $f(0)$, $f(T)$... које сугнале поседује у тренуцима одабирања $t=kT$, $k=0, 1, 2, 3, \dots$, где је T фиксирана, унапред одређена **периода одабирања**. За превођење континуалног сигнала у дигитални еквивалент користимо уређај који зовео **аналогно дигиталним конвертором** или А/Д конвертором а за супротан процес тј. превођење дигиталног сигнала у аналогни еквивалент користимо **дигитално аналогни конвертор** или Д/А конвертор. Најразличитије рачунске примене дигиталне обраде сигнала, синхронно повезују процес А/Д у Д/А конверзије као на слици 2.1^[1]



Слика 2.1^[1] Карактер односа између А/Д и Д/А конверзије

2.1 Увод у „Raspberry Pi“

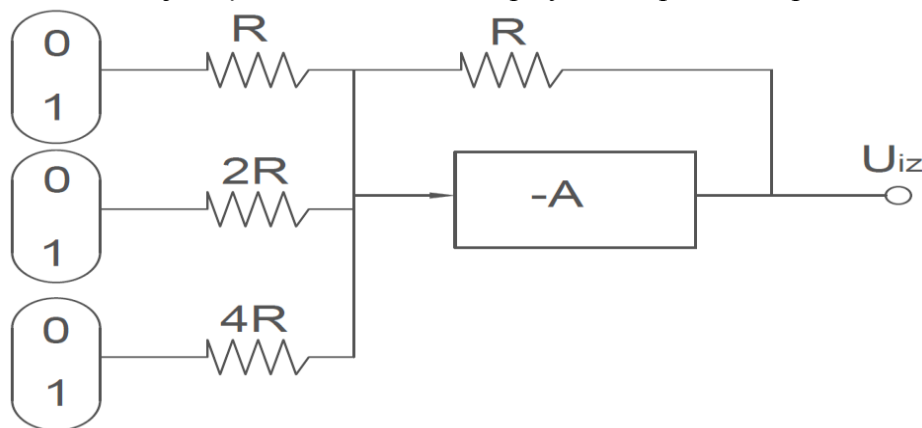
„Raspberry Pi“ је микрорачунар на једној плочи створен од стране „Raspberry Pi“ фондације, добротворне организације, чији је примарни задатак образовање деце у сфери рачунарске технике. Циљ је био да се понови микрорачунарска револуција као у 1980. години која је створила целу генерацију вештих програмера. Чак и пре продаје самог микрорачунара у 2012. години било је јасно да је „Raspberry Pi“ добио велику пажњу широм света јер је продато око 2 милиона јединица. Име „Raspberry Pi“ једобијено из комбинација новог „воћно“ орјентисаног брэнда рачунара (као „Apple“, „BlackBerry“ и „Apricot“) и потребе за постојањем простог програмирања који ће користити у овом систему као Пајтон („Python“ ра из тога „Pi“).^[2]

2.2 Увод у Пајтон

Данас у свету постоји велики број програмских језика који се могу наћи на тржишту. Од програма велике сложености као „Scratch“, традиционалног „C“, „Basic“, све до „Machine Code Assembler“. Добар програмер треба да има вишејезичне способности да би могао да пореди предности и мане сваког да би знао који најбоље одговара њиховим потребама. Потребно је познавати програмске језике да би могли да поставимо питање „Шта је потребно?“ и „Шта се добија?“ јер је ово кључна карактеристика пожељна за време програмирања. Пајтон дозвољава лаки почетак у учењу који ће се поступно постати сложенији како се усавршавање наставља. Са развијеним датотекама које опремају овај програмски језик, кориснику је се пружа могућност да користи готове рутине као црне кутије: из одређеног улаза добија предвиђен излаз без познавања састава црне кутије.^[2]

2.3 Д/А конверзија

Најједноставнији дигитално аналогни конвертор се може реализовати у виду спреге, на [слици 2.2](#), меморијског регистра и операционог појачавача типа сабирача. Дигитална реч коју треба конвертовати у аналогни напон се најпре упише у регистар. На истините излазе флип флопова прикључени су улази сабирача, тако да у зависности од стања флип-флопова зависи да ли ће улази сабирача бити везани на масу или на U_{ref} . Релативни однос отпорности директних грана и повратне гране сабирача су подешени да одговарају тежинским факторима позиција цифара у бинарном броју. Тако, улазна грана са најстаријег бита има отпорност „ R “, исту као отпорност повратне гране, грана са следећег бита „ $2R$ “ итд. све до најмлађег бита коме одговара улазна грана отпорности „ nR “.^[3]

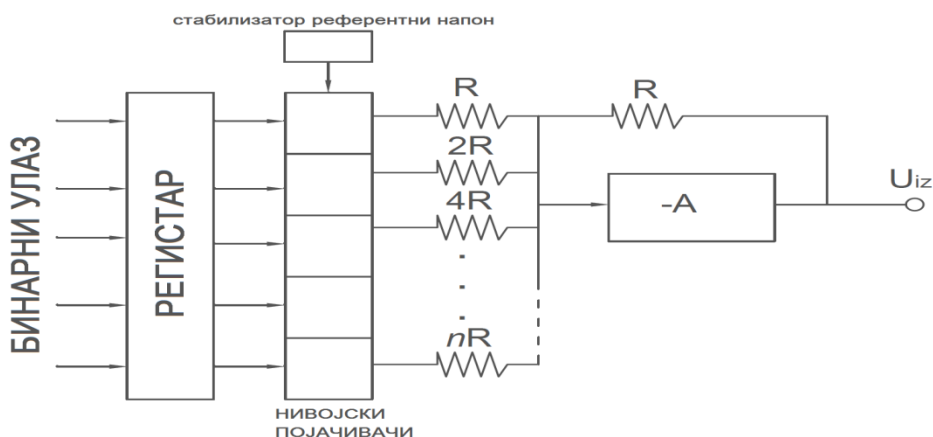


Слика 2.2 ^[3]Принцип дигитално аналогне конверзије

На слици 2.2 је приказана конверзија 3-битне речи. Опште узев, у случају конверзије n-битне речи излаз сабирача би био:

$$U_{iz} = - \left[1 * (FF_1) + \frac{1}{2} (FF_2) + \dots + \frac{1}{2^{n-1}} (FF_n) \right] * U_{REF} \quad (2.1)$$

где „FF_i“ означава стање i-тог флип-флопа унутар регистра. У шеми на слици 2.2 напонски ниво U_{ref} одговара логичког јединици дигиталних модула. Будући да овај напон није стабилисан у мери који захтева аналогни сабирач, између регистра и операционог појачивача се постављају нивојски појачивачи који, када се на њиховим улазима доведу сигнали логичких јединица, на својим излазима дају сигнале строго одређених амплитуда. Тако употпуњен Д/А конвертор приказан је на слици 2.3. У њему нивојски сабирач прекључују улазе сабирача или на масу или на излаз стабилизатора референтног напона. Отуда и с обзиром на једначину (2.1) излаз дигитално аналогног конвертора је ограничен узима вредност унутар опсега од нуле (маса) двоструке вредности референтног напона.



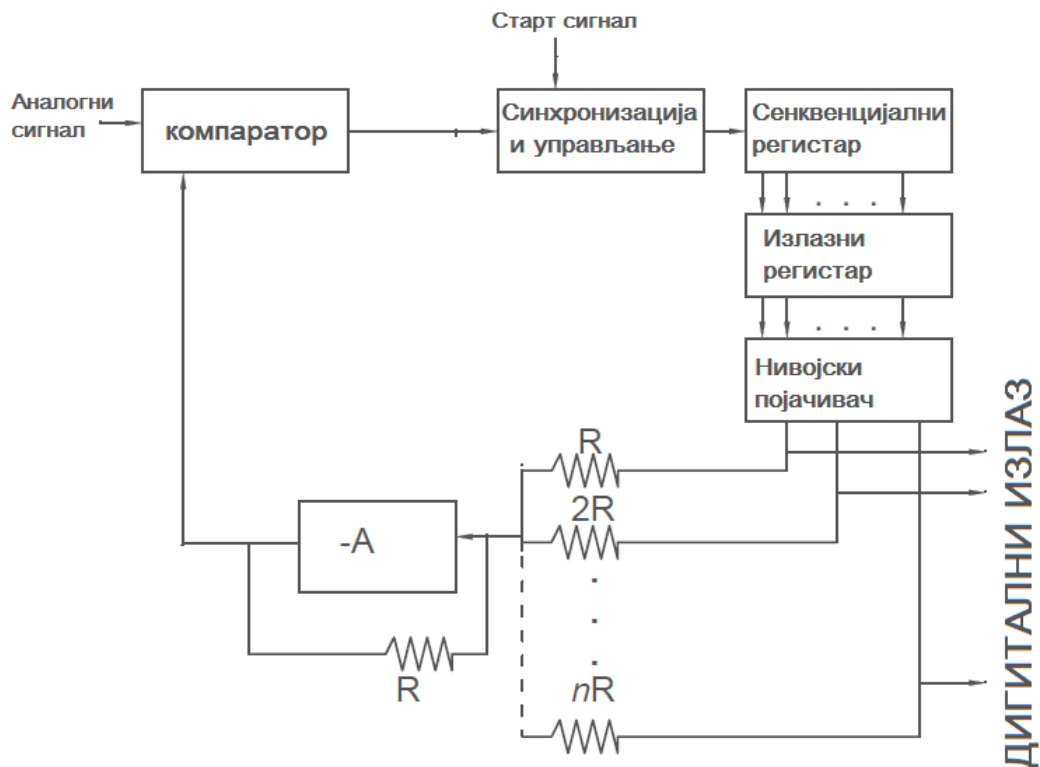
Слика 2.3^[3] Дигитално аналогни конвертор

2.4 А/Д конверзија

Процес конверзије аналогног напона у дигитални сигнал се може извршити на више начина. Поступак који омогућава задовољавајући компромис између сложености и цене конвертора заснива се на тзв. сукцесивној апроксимацији. Конвертор користи поступак сукцесивне конверзије. Као што је показано у блок шеми, поседује повратну спрегу, слика 2.4. Његове главне компоненте су: компаратор коло синхронизације и управљања, управљачки регистар секвенцијалног типа и додатне три компоненте које су већ показане у склопу дигитално аналогне конверзије. Процес конверзије започиње појавом стартног импулса у колу синхронизације и управљања. Одмах затим садржај излазног регистра поставља на бројну вредност која је једнака половини опсега унутар кога се појављује излазни аналогни напон. Та бинарна речу излазном регистру се затим преко нивојских појачивача и сабирача конвертује у аналогни напон преко Д/А конвертора. Напон на излазу сабирача се на компаратору пореди са улазним аналогним напоном. Излаз конвертора ће бити „1“ или „0“, ако је аналогни напон већи или мањи од напона повратне спреге са излаза сабирача, односно у зависности од тога да ли се тренутна вредност аналогног напона налази у горњој или доњој половини опсега.

Ако амплитуда мереног сигнала припада горњој половини, најстарији бит у означеном регистру остаје са затеченом вредношћу „1“, а ако припада доњој бит се

обрише односно враћа се вредности „0“. Секвенцијални регистар у спрези је заправо прстенасти бројач који једну једину логичку јединицу помера у круг од једног до другог степена бројача и на тај начин омогућава да се у другом кораку конверзије следећи бит (са вредношћу од четвртине опсега) у излазном регистру постави на вредност „1“. Сада је поново садржај излазног регистра конвертује и излаз сабирача пореди са улазним аналогним напонем. Дакле, у овом кораку компаратор одређује којој четвртини опсега припада тренутна вредност аналогног напона на улазу. Овај процес се наставља у зависности од дужине излазне речи тј. ако имамо „n“-тобитну реч поцес ће трајати „n“ пута.^[3]



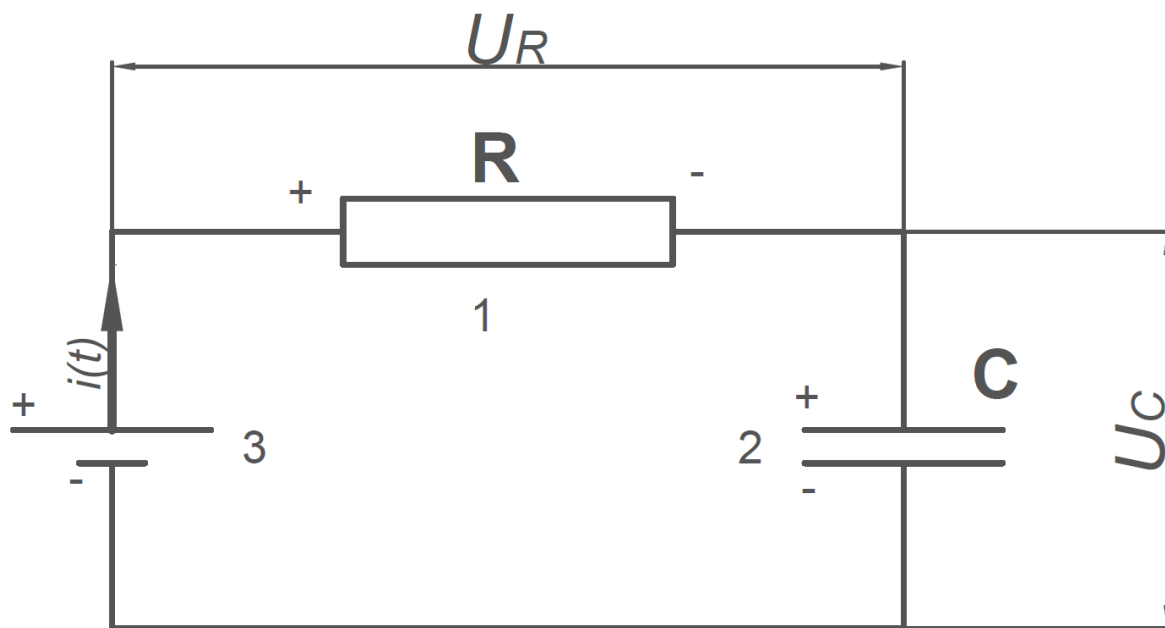
Слика 2.4^[3], Аналогно дигитални конвертор

3. Пример коришћења „Raspberry Pi“ микрорачунара и А/Д конвертора

3.1 Теоријско објашњење РЦ кола

3.1.2 Решавање једначина и графички приказ битних функција („RC“) кола

Пример који је постављен за анализу је редно везано РЦ коло („RC“) које се састоји, као што име указује од отпорника, слика 3.1 позиција 1, чија је вредност отпорности $R=1\text{M}\Omega$, и од кондензатора, слика 3.1 позиција 2, чија је капацитивност $C=10\mu\text{F}$. Као извор побудног сигнала у овом случају је постављен напона напајања микрорачунара $U_1=3,3\text{V}$, слика 3.1 позиција 3. У овом случају потребно је измерити напон кондензатора U_C , слика 3.1 позиција 2, али у исто време израчунати грешку насталу у току мерења и проценити исту.



Слика 3.1, Приказ кола чији напон меримо, позиције: 1) Отпорник, 2)Кондензатор, 3) Извор енергије

Када имамо у обзир мерење напона кондензатора као функцију времена и рачунање грешке мерења која се прави у времену, потребно је имати детаљну слику процеса која би се узела као тачна и коју би поредили са измереним информацијама и одредили одступање па тако проверити исправност мерења.^[4] Ту тачну слику могуће је добити математичким извођењем базираним на основним законима физике или II Кирковог закона:

$$\sum_{k=1}^3 U_k = 0 \quad (3.1)$$

Када разложимо II Киркоховзакон,(3.1) за ово коло у обрнутом смеру казаљке на сату добијамо једначину:

$$U_i - U_1 - U_2 = 0 \quad (3.2)$$

А сменом позиција са симболима на слици следи:

$$U_i - U_R - U_C = 0 \quad (3.2^*)$$

где је $U_R = i(t)R$ напон отпорника и $U_C = Q/C$ напон на кондензатору па по том принципу долази до смене у једначини:

$$U_i - i(t)R - \frac{Q}{C} = 0 \quad (3.3)$$

По дефиницији у којој је интензитет струје по дефиницији: $i(t) = \frac{dQ}{dt}$

$$U_i - R \frac{dQ}{dt} - \frac{1}{C} Q = 0 \quad (3.4)$$

Ради лакше лакше манипулације са једначином правимо смену $W = \frac{1}{C}$ следи:

$$U_i - R \frac{dQ}{dt} - WQ = 0 \quad (3.5)$$

Померањем чланова са негативном вредностима тј напона на отпорнику и кондензатору са друге стране једначине добијамо, као што је приказано код једначине (3.6), и сменом знака $\frac{dQ}{dt} = Q'$ добијамо једначину сличну са диференцијалном једначином (3.7) па можемо закључити да су истог облика:

$$RQ' + WQ = U_i \quad (3.6)$$

$$C_1 y' + C_2 y = C_3 \quad (3.7)$$

где су C_1, C_2, C_3 константе. Када анализирамо облик једначине (3.7) можемо закључити да постоји само једно решење може које би задовољило тачност једначине у којој би разлика између променљиве и њеног извода могла да резултира константом. То решење је експоненцијална функција облика:

$$y = Ae^{bt} + D \quad (3.8)$$

где би извод овог решења био:

$$y' = Abe^{bt} \quad (3.9)$$

Даљим извођењем можемо доказати тачност овог решења једначине и да њена тачност зависи од услова (3.12) која показује да експоненцијална функција времена мора да се помножи са нулом да би се изгубила зависност од времена.

Користећи генерална решења (3.9), (3.8) диференцијалне једначине (3.7) развијамо једначину (3.6) како би добили непознате „A, b i D“. Тај процес се добија коришћењем услова тачности једначине поменут раније као и коришћење почетних услова када је „t=0“. Следи:

$$RAbe^{bt} + WAe^{bt} + DW = U_i \quad (3.10)$$

$$(RAb + WA)e^{bt} + DW = U_i \quad (3.11)$$

$$RAb + WA = 0 / A \quad (3.12)$$

$$Rb + W = 0 \quad (3.13)$$

$$b = -\frac{W}{R} \quad (3.14)$$

Враћањем смене из једначине (3.5) следи добијање облика непознате b:

$$b = -\frac{1}{RC} \quad (3.15)$$

што ће служити у каснијем прорачуну. Када је употпуњен услов код једначине (3.12) из постојаће једначине (3.10) следи:

$$DW = U_i \quad (3.16)$$

$$D = \frac{U_i}{W} \quad (3.17)$$

И сменом промењиве добијамо из једначине (3.5) долазимо до закључка

$$D = U_i C \quad (3.18)$$

Остаје само непозната A коју рачунамо преко једначине (3.8) па следи

$$Q = Ae^{-\frac{t}{RC}} + U_i C \quad (3.19)$$

која се добија из почетног услова Q(0).

$$Q(0) = Ae^0 + U_i C \quad (3.20)$$

$$0 = A + U_i C \quad (3.21)$$

$$A = -U_i C \quad (3.22)$$

Са решеним непознатим члановима можемо се вратити у назад на једначину (3.9) где је по дефиницији показаној у једначини (3.4) јачина струје промена наелектрисања по времену тако следи:

$$y' = \frac{dQ}{dt} = i(t) = -U_i C * \left(-\frac{1}{RC}\right) e^{-\frac{t}{RC}} \quad (3.23)$$

$$i(t) = \frac{-CU_i}{-RC} e^{-\frac{t}{RC}} \quad (3.24)$$

$$i(t) = \frac{U_i}{R} e^{-\frac{t}{RC}} \quad (3.25)$$

Када погледамо члан који се множи са експоненцијалном функцијом можемо видети да краћењем јединица напона[A*Ω] и отпорности[Ω] добијамо почетну јачину електричне

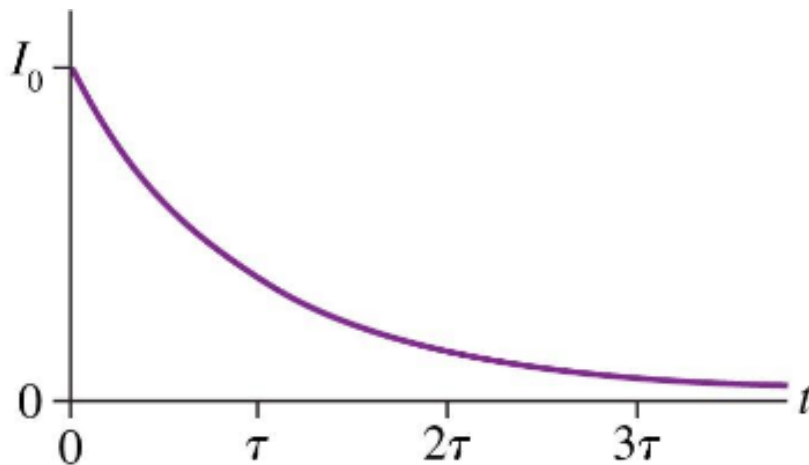
струје I_0 . Такође када посматрамо ближе степен експоненцијалне функције види се зависност од производа „RC“. Ако разложимо овај производ преко релације $U = RI$ сводимо га на: $\frac{U}{I} C$ и анализом вредности добијамо његову природу:

$$\frac{[V]}{[A]} * [F] = \frac{[V]}{\frac{[C]}{[s]}} * [F] = \frac{[V][s]}{[C]} * \frac{[C]}{[V]} = [s]$$

Видимо да је производ резултира у константној временској вредности и означава се са словом τ . Из закључака који су изведени коначна једначина јачине електричне струје тако следи:

$$i(t) = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (3.26)$$

Тако из добијене функције (3.26) се може нацртати график јачине струје као функције времена.



Слика 3.2, Функција јачине струје у времену

Као што се примећује са слике 2 и из саме једначине да је максимум јачине електричне струје у колу на почетку процеса или

$$i(0) = i_{max} = I_0 = \frac{U_i}{R} \quad (3.27)$$

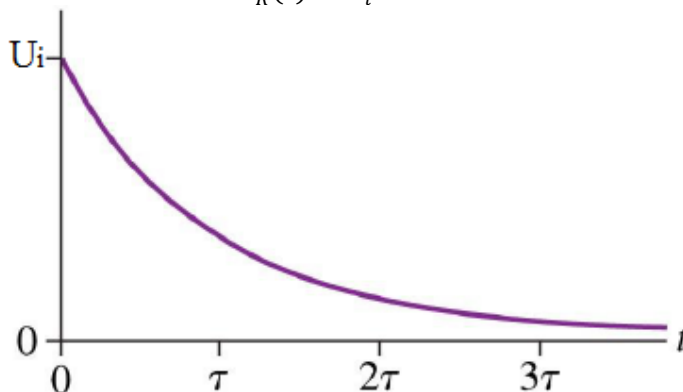
као што се исто може закључити да минимална вредност јачине тежи нули

$$i(t \rightarrow +\infty) \approx 0 \quad (3.28)$$

Преко графика такође се може закључити велика зависност од временске константе τ чија вредност диктира брзину опадања функције тј. јачине електричне енергије. Што се више повећава то је више времена потребно да се јачина електричне енергије спусти на нулу.

Када погледамо резултат јачине струје потребно је посматрати напоне свих елемената кола тј. кондензатора и отпорника. За напон у отпорнику довољно је коришћење једначине (3.25) да би добили резултат:

$$\begin{aligned} i(t) &= \frac{U_i}{R} e^{-\frac{t}{RC}} \\ U_R(t) &= U_i e^{-\frac{t}{RC}} \end{aligned} \quad (3.29)$$



Слика 3.3. Напон отпорника у колу

Можемо уочити да је функција напона у времену, (3.29) врло сличног облика са функцијом јачине струје у времену (3.26). Када је у питању напон на кондензатору морамо се вратити на решење диференцијалне једначине (3.8) и из решења непознатих следи:

$$Q = -U_i C e^{-\frac{t}{\tau}} + U_i C \quad (3.30)$$

$$Q = U_i C (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (3.31)$$

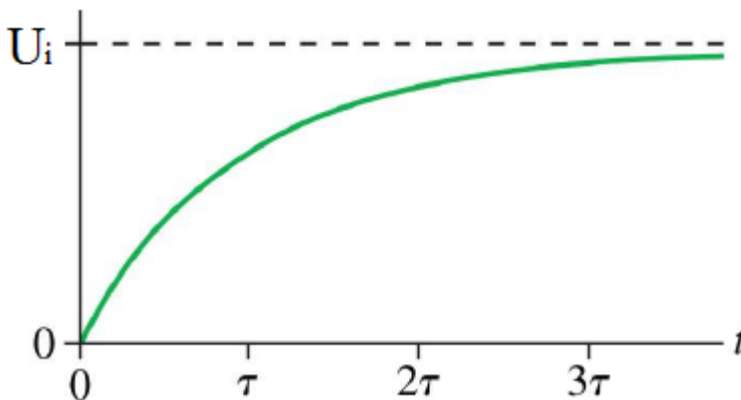
$$\frac{Q}{C} = U_i (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (3.32)$$

Где се по дефиницији напон кондензатора дефинише као:

$$U_c = \frac{Q}{C}$$

$$U_c(t) = U_i (1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \quad (3.33)$$

где је график ове функције на слици 3.4.

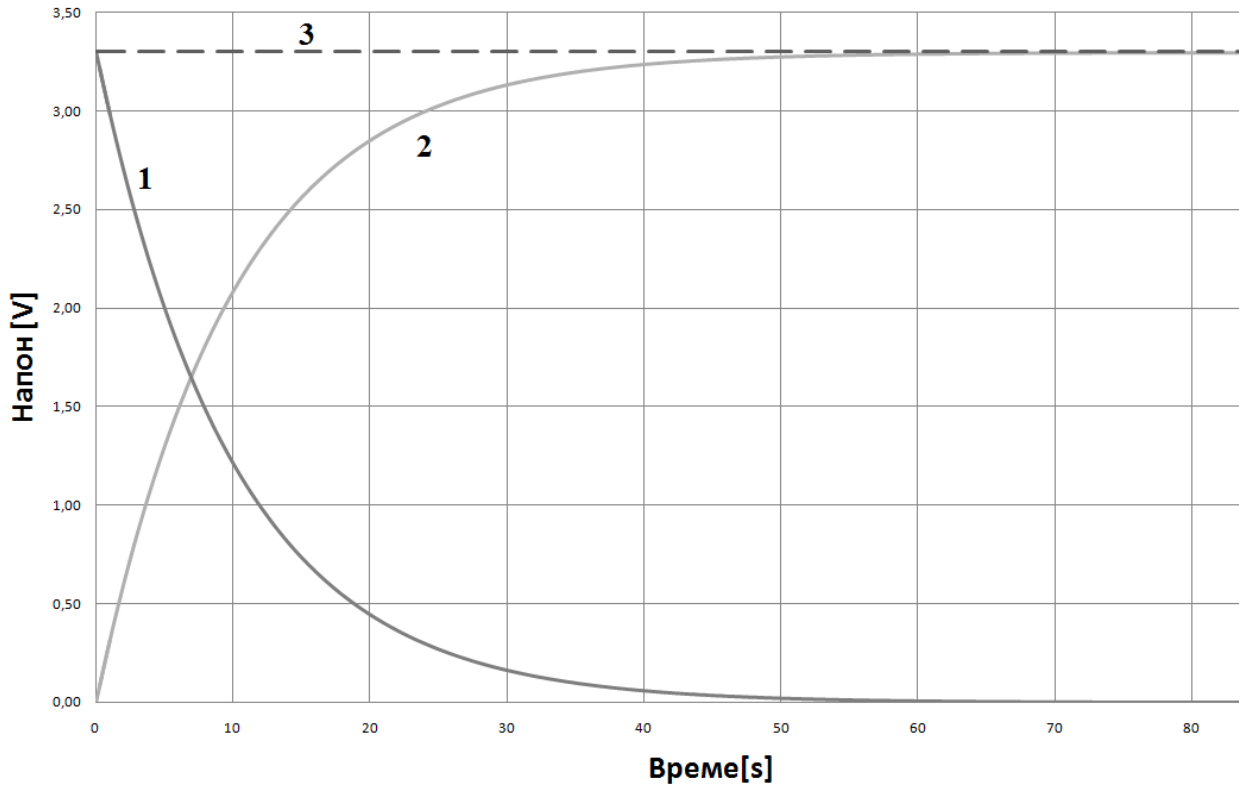


Слика 3.4. Функција напона кондензатора у времену

3.1.2 Међусобне релације између функција кола

Поређењем напона на отпорнику и на кондензатору можемо закључити да ће њихова сума увек резултирати U_i за исти интервал у времену што се може закључити и из доказа (3.34) за интервал t_1 , као и код графичког приказа напона кола на слици 3.5.

$$U_R + U_c = Ri(t_1) + U_c = U_i e^{-\frac{t_1}{RC}} + U_i \left(1 - e^{-\frac{t_1}{RC}}\right) = U_i e^{-\frac{t_1}{\tau}} + U_i - U_i e^{-\frac{t_1}{\tau}} = U_i \quad (3.34)$$



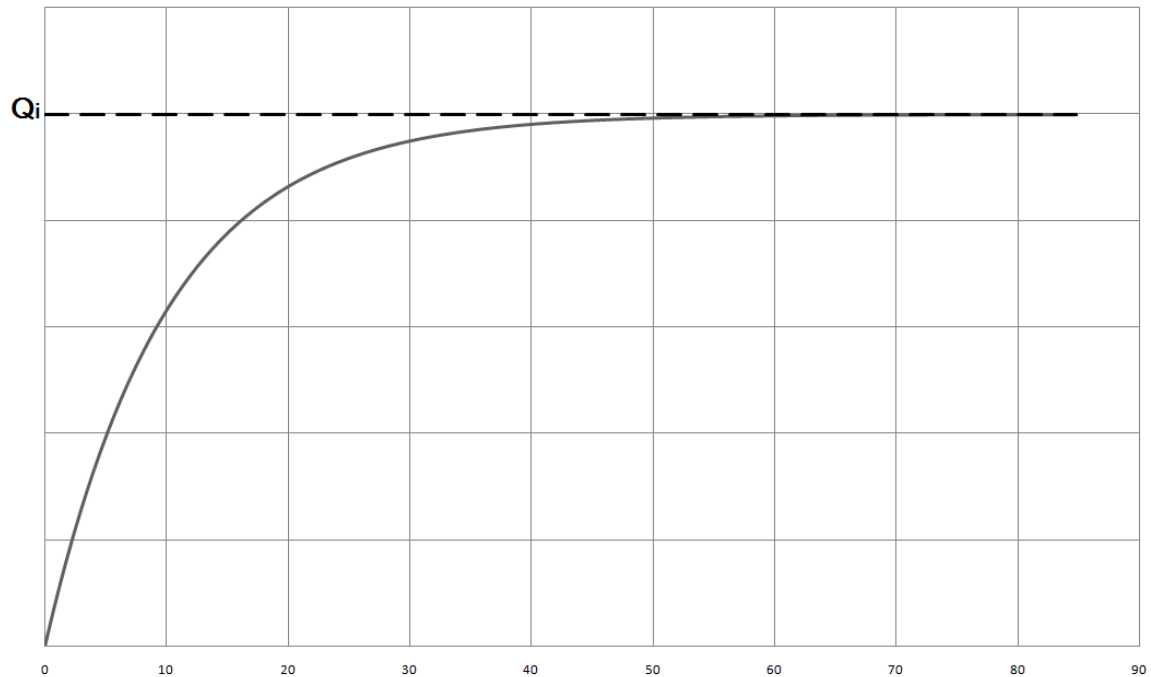
Слика 3.5, Графички приказ присутних напона у „RC“ колу као функције времена,позиције
1)Напон отпорника, 2) Напон кондензатора, 3) Напон који долази из извора

Поред приказаних функција и законима по којима се оне мењају потребно је приказати разлог оваквог понашања напона и јачине електричне струје што је могуће преко једне једначине која произилази из једначине (3.32) у којој долази до пражњења наелектрисања кондензатора:

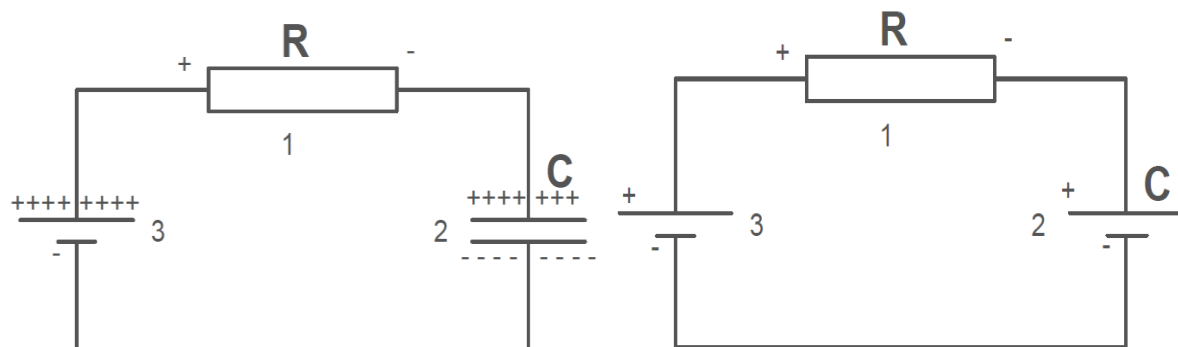
$$\begin{aligned} \frac{Q}{C} &= U_i (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \\ Q &= CU_i (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \end{aligned} \quad (3.35)$$

где се члан производа „ CU_i “ сматра наелектрисањем извора електричне енергије Q_i .

Може се приметити како време пролази да наелектрисање кондензатора, „ Q “, слика 3.6, позиција 1 тежи вредности „ Q_i “, слика 3.6, позиција 2, на исти начин као што напон кондензатора „ U_c “ тежи ка напону који долази са извора електричне енергије, U_i . За време протока струје наелектрисање долази до једне стране, слика 3.7, лево позиција 2, кондензатора и наелектрисањем једне плоче и тако ствара негативно наелектрисање са друге стране све док не постигне величину наелектрисања као и извор енергије. У том тренутку кондензатор се напунио до краја и почиње да се понаша као сам извор енергије (батерија) која ће се супростављати првом, слика 3.7, позиција десно због позитивног наелектрисања плоче кондензатора, слика 3.7, десно, позиција 2. Види се јасан разлог тежње јачине електричне енергије нули



Слика 3.6, графички приказ наелектрисања извора електричне енергије и кондензатора, позиције:
1) Наелектрисање кондензатора, 2) Наелектрисање извора енергије кола.



Слика 3.7, Приказ „RC“ кола на врхунцу наелектрисања кондензатора, слика лево приказ кола, слика десно приказ функционисања кола, позиције 1) Отпорник, 2) Кондензатор, 3) Извор електричне струје

3.1.3 Прелазни процес („RC“) кола

Са приказаним графиком напона кондензатора, отпорника и протока електричне енергије треба утврдити генерална зависност оваквепојаве од параметра. Поред напона извора према коме тежи напон кондензатора и почетне јачине електричне струје са које се смањује до нуле остаје само још један параметар: τ . Према поменутим једначинама његова зависност се дефинише као производ отпорности, R , и капацитивности, C . Оваква правилност може помоћи у одређивању стања функције напона и јачине електричне струје у прелазном процесу између две статичке вредности (ненаелектрисаног стања и максималног наелектрисања кондензатора). Применом почетног услова:

$$t = \tau$$

добија се увид у стање напона кондензатора U_c као и јачине електричне струје $i(t)$ где из једначине (3.26) и (3.33) следи:

$$i(\tau) = I_0 e^{-\frac{\tau}{\tau}}$$

$$U_c(\tau) = U_i (1 - e^{-\frac{\tau}{\tau}})$$

$$Ri(\tau) = U_i e^{-\frac{\tau}{\tau}}$$

$$i(\tau) = I_0 e^{-1}$$

$$U_c(\tau) = U_i (1 - e^{-1})$$

$$Ri(\tau) = U_i e^{-1}$$

$$i(\tau) = 0,3678 I_0$$

$$U_c(\tau) = U_i (1 - 0,3678) = 0,6322 U_i$$

$$Ri(\tau) = 0,3678 U_i$$

Закључујемо да ће вредност јачине електричне струје пасти на 36,78% своје почетне вредности I_0 , напон кондензатора ће достићи 63,22% напона извора електричне енергије а напон на отпорнику напон опада на 36,78% напона извора. Преко ове правилности можемо применити табелу 3.1 која опсиује прелазни процес $i(t)$, $U_c(t)$, $U_R(t)$ и долазимо до закључка да ће све поменуто функције ући у стационарно стање после треће временске константе (3τ)-ако увидимо да је стационарно стање напона кондензатора напон извора а нула јачини електричне струје и напону отпорника. Поред овог процеса се такође у пракси добија релација која је приказана једначином (3.34) где сума напона $U_c(t)$ и $U_R(t)$ резултира са 100%.

Табела 3.1 Процентуалне вредности јачине електричне струје напона кондензатора и отпорника у прелазном процесу

t	$i(t)$	U_c	U_R
τ	36.78%	63.22%	36.78%
2τ	13.54%	86.46%	13.54%
3τ	4.98%	95.02%	4.98%
4τ	1.83%	98.16%	1.84%

3.1.4 Начини мерења у колу и могуће верзије резултата

Поред примера кола која су постављена потребно је нагласити пример у коме би извор енергије био супротно окренут као на слици 3.8. Овакв почетни услов мења знак и узимајући у обзир смер као и код првог примера (позитивни математички смер) и у другом киркоховом закону се примењује:

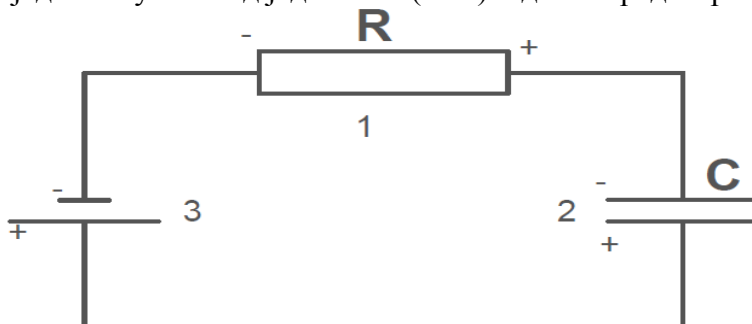
$$\sum_{k=1}^3 U_k = 0$$

$$U_2 + U_1 - U_3 = 0 \quad (3.36)$$

$$U_2 + U_1 = U_3 \quad (3.37)$$

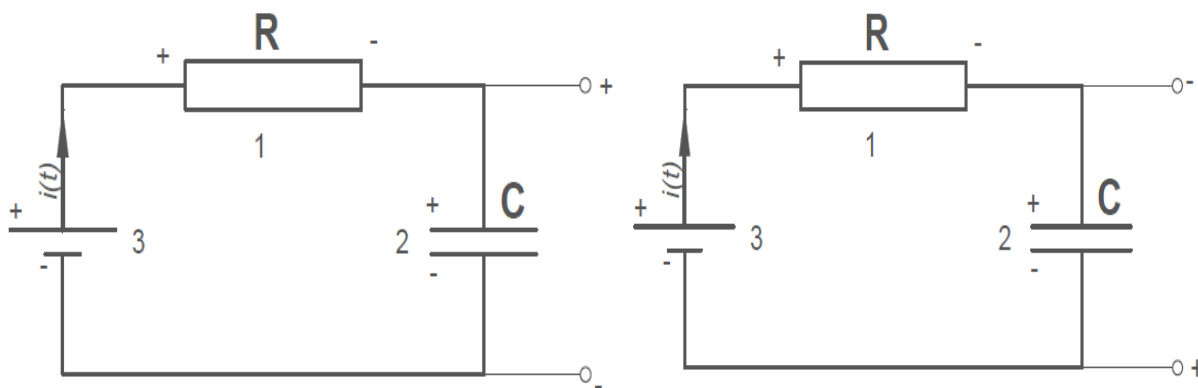
$$U_C + U_R = U_i \quad (3.38)$$

где добијамо исту једначину као код једначине (3.2*) и даљим радом резултира исто



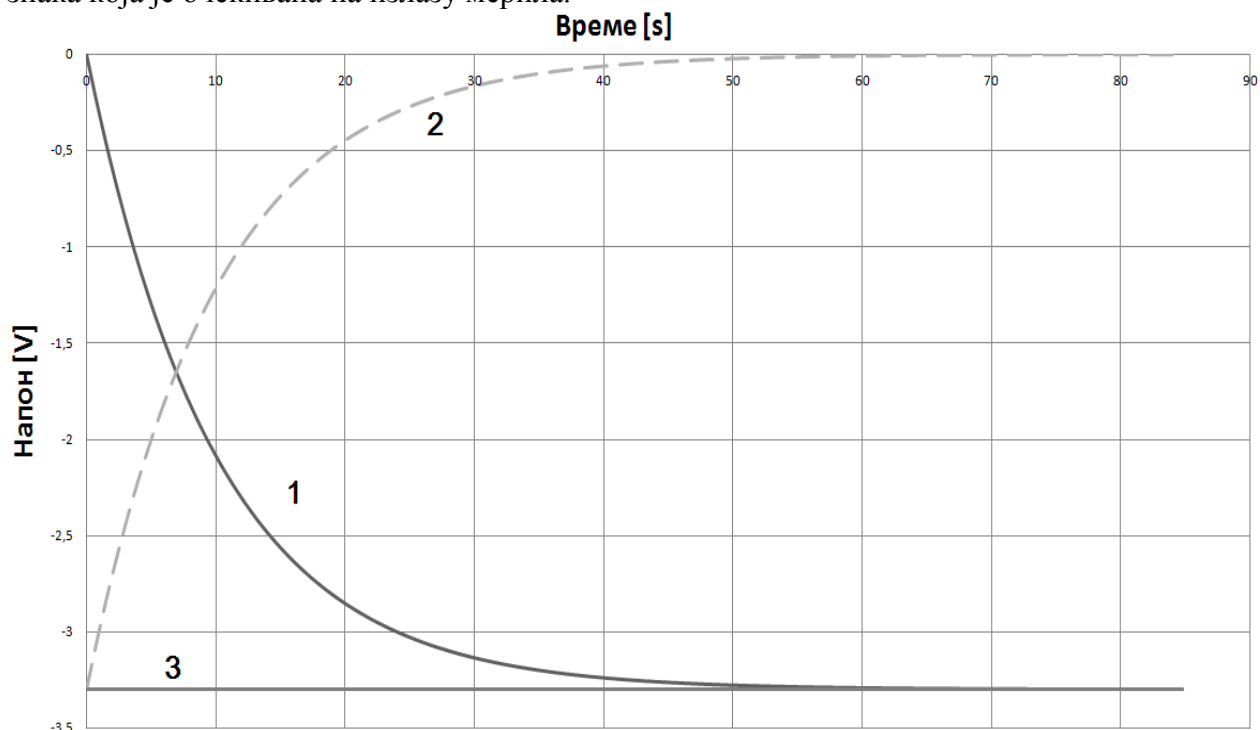
Слика 3.8. Приказ РЦ кола са извором у супротном смеру

У покушају снимања врло је битно одредити позитиван или негативан крај мерења напона на кондензатору. Могуће је на измерити по истом смеру као проток струје и добити графике као у поглављу 3.1.1 напона кондензатора, слика 4, и јачине електричне струје, слика 2, као што се може видети код слике 9, лево. Али поред тог начина могуће је окренути поларизацију мерног инструмента, слика 9, десно, где би снимљена резултат има негативну вредност, слика 10.

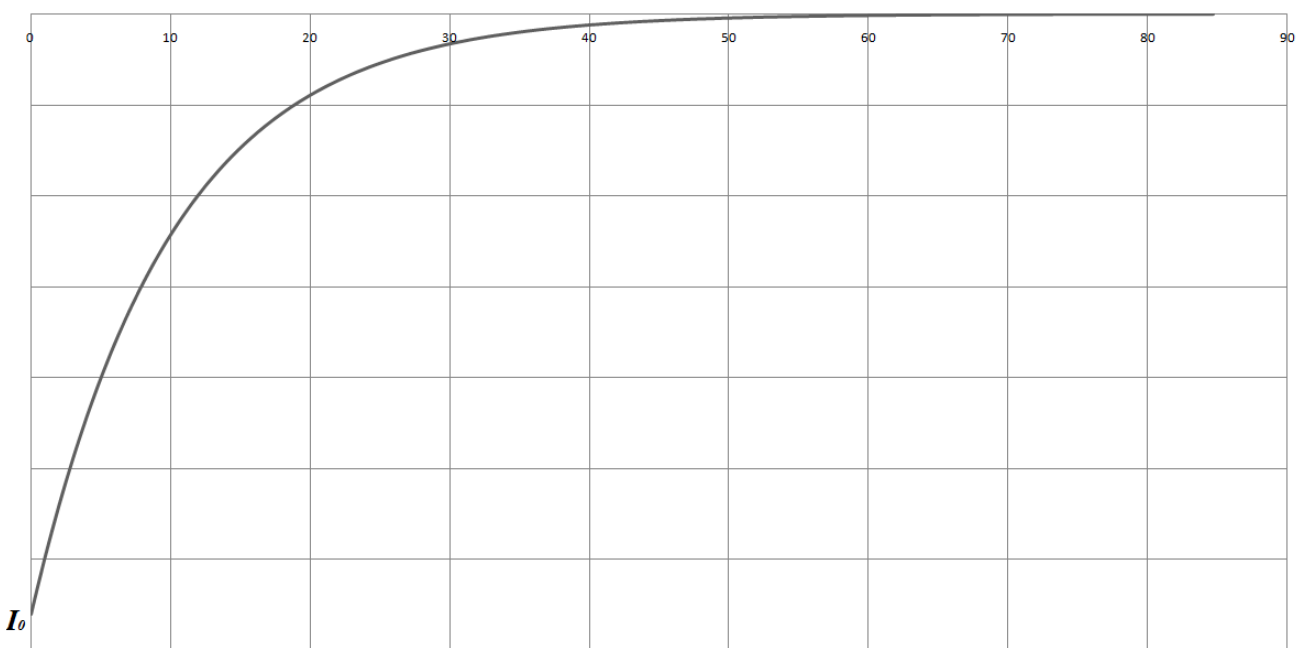


Слика 3.9. Приказ могућих начина мерила, лево: мерење у смеру протицања струје, десно: мерење са окренутом поларизацијом

Мерењем са окренутом поларизацијом графички приказ вредности напона елемената кола као и јачине електричне струје је приказан на сликама 3.10 и 3.11 где се види промена знака која је очекивана на излазу мерила.



Слика 3.10, Напони код мерења са обрнутим поларитетом, позиције 1) Напон кондензатора, 2) Напон отпорника, 3) Напон извора енергије



Слика 3.11, Јачина електричне струје као функција времена по мерењу са окренутом поларизацијом

3.2 Лабораторијска мерења преко А/Д конверзије

За добијање резултате мерења потребно је прво поставити оглед који потврђује теорију (поменуто у поглављу 3.1.2). За експеримент коришћено је два протоборда („proto board“), отпорник од 1 МΩ (једног мега ома), кондензатор од 10μF (десет микро фарада) и једну „Raspberry Pi“. Ради јасније поделе делимо експеримент на три поља: поље кола (протоборд који садржи РЦ коло), поље А/Д конверзије (протоборд који садржи интегрално коло А/Д конверзије MCP3201) и поље „GPIO“, (General-Purpose Input Output) „Raspberry Pi“ јединице.

3.2.1 Постављање кола

Процес постављања првог поља заснива се на постављању „РЦ“ колаза које издвајамо:

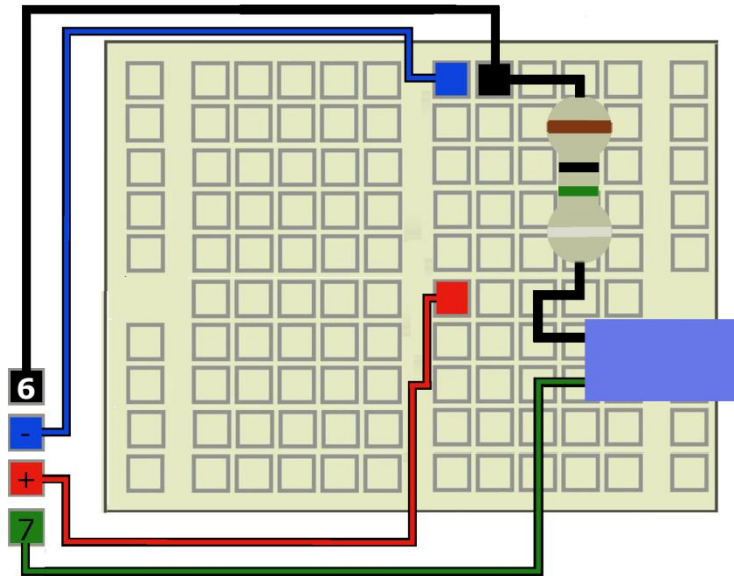
- 1) Отпорник
- 2) Кондензатор
- 3) Четири проводника
- 4) Један протоборд.

Ако узмемо у обзир да функционисање протоборда и чињеницу да је сваки ред повезан:

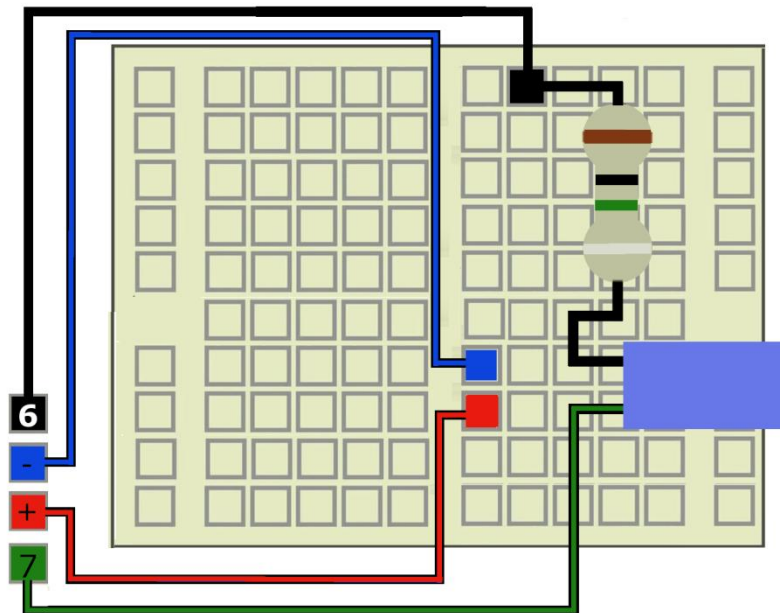
1. Починемо повезивање једног краја отпорника у један ред а други крај у други ред.
2. Одмах након тога у један од редова који је повезан са крајем отпорника повезује се и кондензатор али у исто време друга страна кондензатора остаје у одвојеном реду.
3. Тако повезано „РЦ“ колу потребно је још само извор електричне енергије кој се добија повезивањем слободног краја кола један за извор други за уземљење (масу)
4. Остаје само да продужимо крајеве напона којег меримо а захваљујући повезаности протоборда и њих повезујемо жицу са редом који деле отпорник и кондензатор и са слободним делом отпорника (ако желимо да меримо напон на отпорнику) или са слободним делом кондензатора (ако желимо да меримо напон на кондензатору).

На слици 3.12 види се пример који је постављен за мерење напона на отпорнику. Поред тога означени су слободни крајеви продужних жица са пиновима „Raspberry Pi“ микрорачунара који ће играти улогу извора побудног сигнала.

Код првог поља протоборда присутни су отпорник, и кондензатор редно везани преко протоборда, слика 3.12, где наелектрисање долази директно до кондензатора из позиције 7 тј.пина број 7 картице „Raspberry Pi“ који се укључује преко програма. Уземљење које се надовезује на отпорник такође је повезано са пином број 6. Поред потребних елемената за функционисање „RC“ кола, на местима у којим меримо напон поставили смо продужетке које иду на конвертер. Овај лабораторијски пример постављен је у према слици 3.8.



Слика 3.12, Шема „RC“ кола- мерења напона отпорника

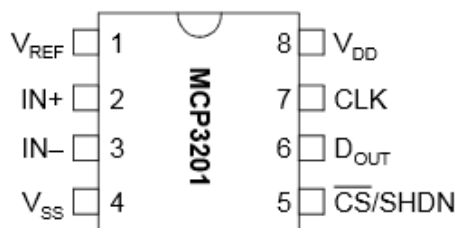


Слика 3.13 Шема „RC“ кола -мерења напона кондензатора

3.2.2 Постављање А/Д конвертора

Као А/Д конвертор за експеримент изабрано је интегрално коло ознаке МСР3201 са дванаестобитном резолуцијом што доводи до 4096 различитих вредности у опсегу од 0 до 3,3V. У нашем случају добијамо највећу грешку мерења од $4 \cdot 10^{-4}$ V. Ово чини половину опсега вредности резолуције конвертора.

Када је у питању периода одабирања иста се одређује у написаном програму. Структура интегралног кола садржи осам пинова који су приказани као на слици 3.14 чије се позиције објашњене у табели 3.2.



Слика 3.14. Приказ структуре интегралног кола, Позиције: 1) референтни напон, 2) позитивни крај напона, 3) негативни крај напона, 4) уземљење, 5) улаз за паљење и гашење интегралног кола, 6) Дигитални излаз, 7) Тактни сигнал, 8) Напајање кола

Табела 3.2 Објашњење извода А/Д конвертора

1	V_{REF}	Референтни напон или максимум напона који је предвиђен за мерење
2	$IN+$	Позитивни крај аналогног сигнала-напона који се мери и претвара у дигитални сигнал
3	$IN-$	Негативни крај аналогног сигнала-напона који се мери и претвара у дигитални сигнал
4	V_{SS}	Негативно напајање кола
5	$\overline{CS}$	„chip select“, селекторски сигнал или улаз који укључује функционисање А/Д конверзије
6	D_{OUT}	Дигитални излазни сигнал који се очитава преко „Raspberry Pi“
7	CLK	Тактни сигнал А/Д конверзије
8	V_{DD}	Напајање интегралног кола позитиван напон потребан за функционисање интегралног кола 2,5 од 5,5V у односу на V_{SS}

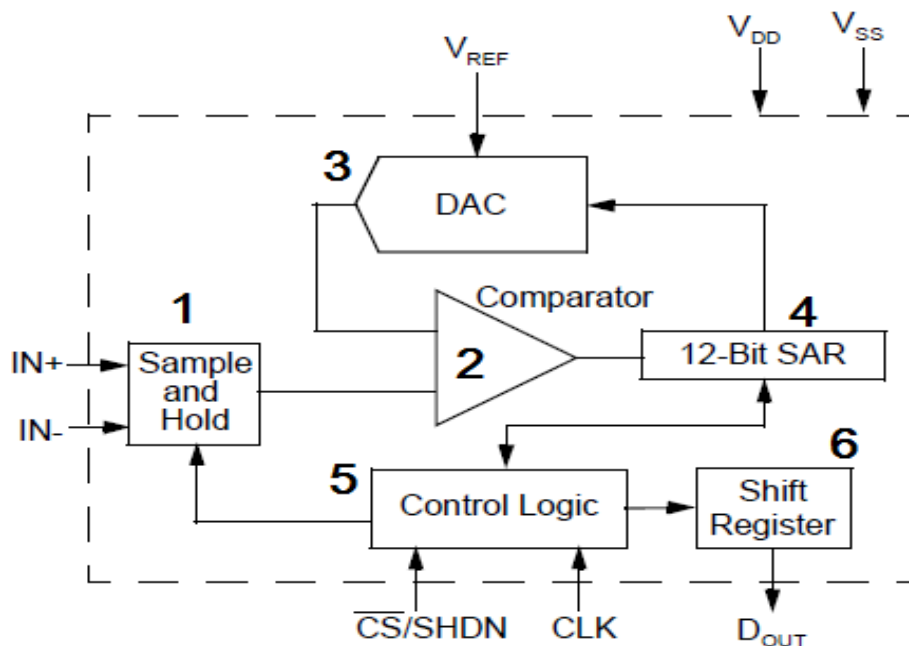
Када се погледају перформансе везана за напајање види се још једна битна карактеристика вредна спомињања приказана у табели 3.3 где постоји јасна релација између напона напајања и броја одабирака у секунди у зависности од напона напајања.

Табела 3.3. Однос напајања интегралног кола и броја одабира

НАПОН [V]	БРОЈ ОДАБИРА [ks^{-1}]
2.5	50
5.5	100

У нашем случају при напајању од 3,3 V следи релацијом да ће перформанса нашег конвертора имати 60k одабирака по секунди.

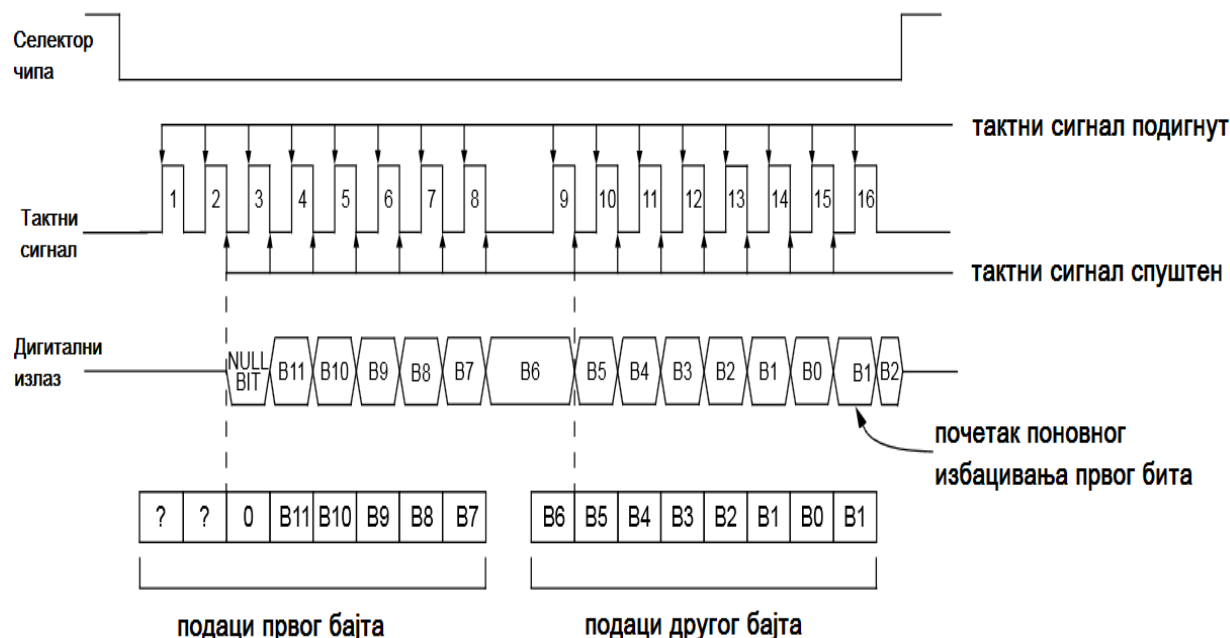
Аналогни сигнал који се претвара у дигитални доводи се на два улаза („IN+“ и „IN-“) где се извршава процес одмеравања и задржавања („Sample and Hold“), слика 3.15, позиција 1, под контролом управљачке логики, слика 3.15 позиција 5 након чега се обрађен сигнал преусмерава на компаратор слика 3.15, позиција 2. Од компаратора следи процес sukcesивне апроксимације за који су задужени дванаестобитни регистар, слика 3.15, позиција 4, Д/А конвертор, слика 3.15, позиција 3, и компаратор слика 3.15, позиција 2. Сваки бит у регистру има своју вредност у односу на референтни напон са првим од $1/2$ вредности референтног напона до последњег бита са $1/2^{12}$, и у комбинацији ових бита детерминише се вредност конверзије. Процес почиње са највећим битом са којим се шаље на Д/А конвертор и који претвара дигитални бит у напон и тако се компаратором проверава да ли је та вредност већа од измереног напона. Ако се утврди да је измерен напон већи од напона који послат са компаратора остаје јединица на биту а у супротном уписује се нула. Када се процес са највећим битом заврши следи процес са другим битом по величини па се у комбинацији са први битом (зависно да ли је нула или јединица) и додаје се четвртина реф. вредности и пореди се поново са измереним напоном и тако сваку мању вредност. Када се цео процес заврши са свих дванаест бита шаље се контролној логици, слика 3.15, позиције 5, и преусмерава га ка померачком регистру., слика 3.15, позиција 6 и ка дигиталном излазу. За сваки тактни сигнал који стиже требало би да се проверава вредност једног бита у дванаестобитном регистру.



Слика 3.15. Функционални дијаграм А/Д конвертора, Позиције 1) одмеравање и задржавање, 2) компаратор, 3) Д/А конвертор, 4) Дванаестобитни регистар sukcesивне апроксиматрације, 5) Контролна логика, 6) Померачки регистар

Код одабраног А/Д конвертора треба водити рачуна о начину читавања резултата мерења. Резултат мерења се добија као поворка битова и читава се серијски. Начин читања резултата а/д конверзије приказан је на слици 3.16 где се види да је приликом читавања вредности мерења потребно водити рачуна о временским карактеристикама кола. За читавање резултата мерења користе се три сигнала и то:

- 1) активирање интегралног кола или селектор интегралног кола („chip select“)
- 2) Тактног сигнала („serial clock“) и
- 3) дигитални излаз („Digital output“).



Слика 3.16, Функционисање А/Д конверзије интегралног кола

Примећујемо да цео процес почиње спуштањем сигнала селектора интегралног кола (CS-chip select). После овога доводе се два тактна сигнала (промена из логичке „0“ у логичку „1“ и то два пута). После сваке предње ивице тактног сигнала могуће је учитати један бит резултата а свака задња ивица тактног сигнала поставља се нови податак на пину дигиталног излаза (DO - digital output). Са слике се примећује да се прва два бита учитавају без било какве гаранције да ли је бит у логичком стању „нула“ или „јединица“. После трећег сигнала учитава се бит који је увек логичка „0“ и даље се учитавају битови од највеће тежине (MSB-most significant bit) све док се не попуни цео бајт тј. све до седмог бита где се одваја бајт, након чега се очитава други бајт. Примећује се да се последњег или нултог бита у бајт очитава изнова први бит како би добио буни бајт где шестнаести тактни сигнал означава крај и где се сигнал селектора интегралног кола подиже и деактивира даљи процес конверзије. Сваки измерен одбирок пролази кроз овај процес да би се очитао један број у распону од 000000000000 до 111111111111.

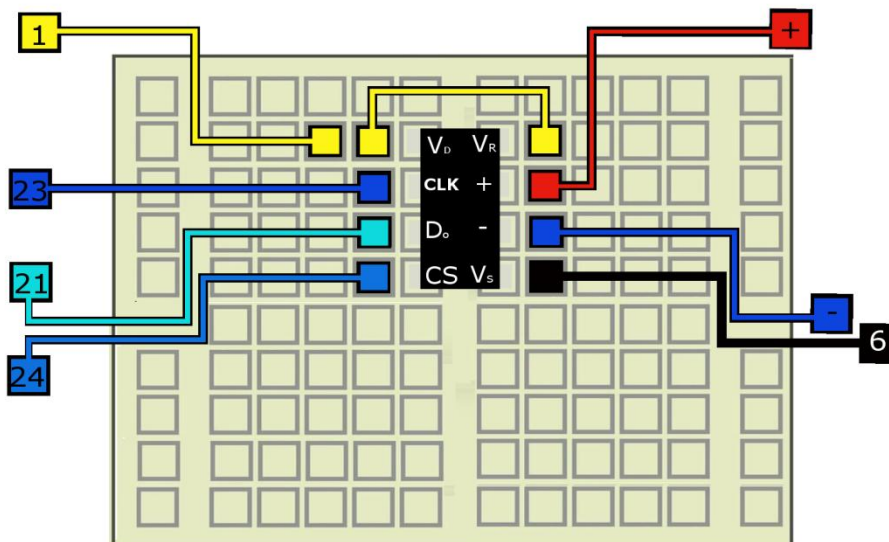
На другом прото борду повезали сло А/Д конвертор. За ово поље потребни су следећи елементи:

- 1) А/Д конвертор
- 2) Шест проводника

Процес почиње на следећи начин:

1. Конвертор се поставља у средину протоборда између два поља редова и на тај начин спајају једну и други страну.
2. Три проводника се постављају на позиције „CLK“, „D₀“, „CS“, слике 3.17 са редовима којима се те позиције везују где се други крајеви тих проводника остављају слободним за даље повезивање
3. Један проводник повезати на једном крају са позицијом „V_D“ слика 3.17 а са другим крајем повезати са позицијом „V_R“ слика 3.17 и још један проводник поставити у продужетку позиције „V_R“.
4. На крају повезати последњи проводник у било кој отвор повезан са позицијом 4

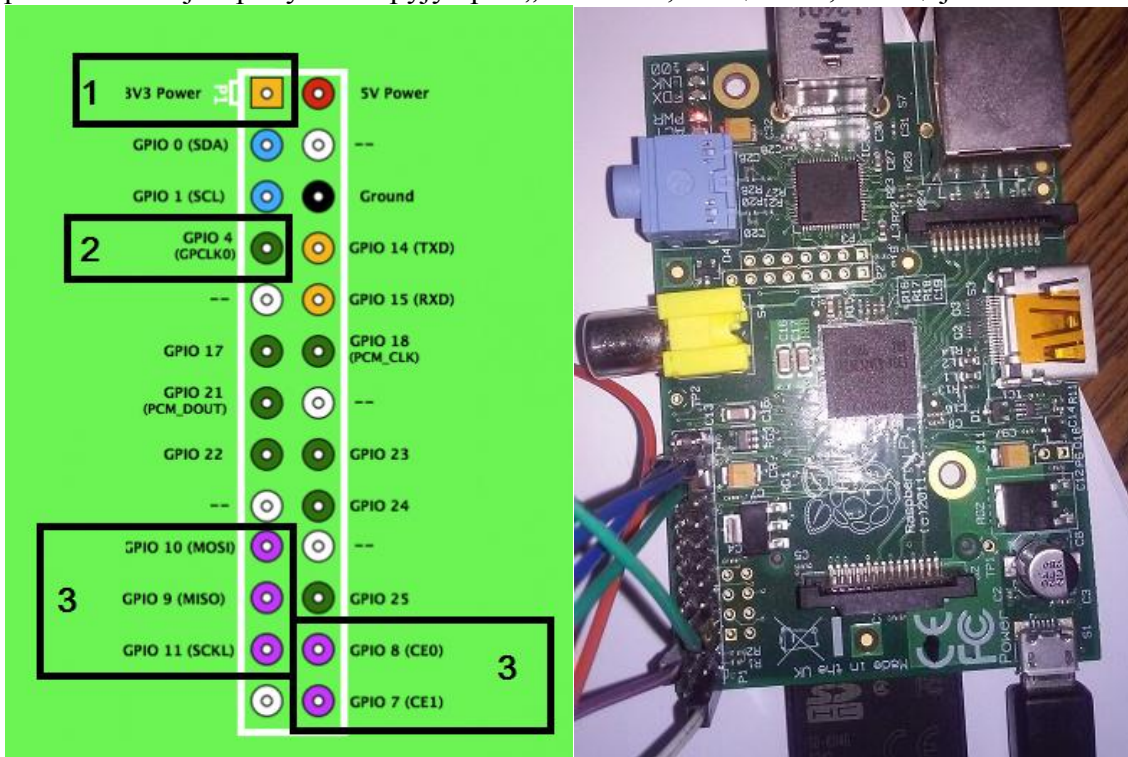
Овако постављено друго поље постаје спремо за финално повезивање са првим пољем и касније са микрорачунаром. Слободне крајеве које су намењени за мерење напона поставити на позиције 2 и 3 слике 14 (у овом случају обратити пажњу на + и - проводнике). Слободно уземљење са првог поља повезати у ред отвора позицијом 4, слика 14. Друго поље добија изглед слике 3.17 након чега следи финално спајање.



Слика 3.17, Шема дугог поља за Конверзију

3.2.3 Повезивање са „Raspberry Pi“

За коришћење очитавања резултата користи се „GPIO“ („General-purpose input/output“) пинови који су подељени на различите групе у зависности од специјализоване функције као што је постављено на слици 3.18. Група пинова која се користи у нашем примеру за очитавање дигиталних сигнала је „Serial Peripheral Interface“ или „SPI“ означен на слици 3.18 позиција 3, где су пинови специјализовани за примање или слање дигиталних сигнала. Видимо да су пинови ове сабирнице регистровани по бројевима 19, 21, 23, 24 и 26. Поред „SPI“ користе се и остали пинови као пин за напајање од 3,3V, слици 3.18, позиција 1, за референтни напон и напајање интегралног кола али и генерички пин који пропушта струју кроз „RC“ коло, слици 3.18, позиција 2.



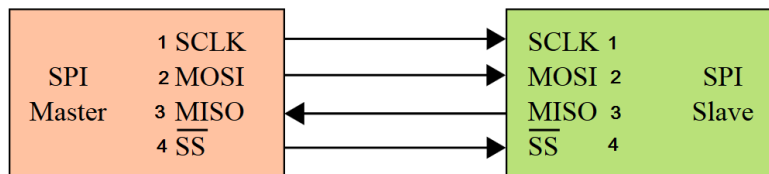
Слика 3.18, лево: Приказ пинова „Raspberry Pi“, десно: позиција пинова код „Raspberry Pi“
Позиција 1) Пин напона од 3,3 V, 2) Генерички пин за напајање кола, 3) Пинови „SPI“

Функција „SPI“ се је посебна сабирница са специјализованим пиновима који су у стању да обављају посебне функције. Она је се базира на „Master/Slave“ односу у коме „Master“ или надређено шаље одређене сигнале и добија повратну информацију од „Slave“ или подређене јединице са селектором интегралног кола и тактним сигналом.

Код ове сабирнице присутна су четири логичка сигнала:

- 1) Тактни сигнал („Serial clock“ или „SCLK“), слика 3.19, позиција 1
- 2) Селектор интегралног кола („Slave“ селектор у нашем случају) слика 3.19, позиција 4
- 3) „Master“ излаз-„Slave“ улаз, слика 3.19, позиција 2
- 4) „Master“ улаз-„Slave“ излаз, слика 3.19, позиција 3

Сваки од ових сигнала су логички сигнали (могу да узму вредност логичке „0“ или логичке „1“, слика 19. У нашем случају „Slave“ јединица је А/Д конвертор а „Master“ је „Raspberry Pi“.

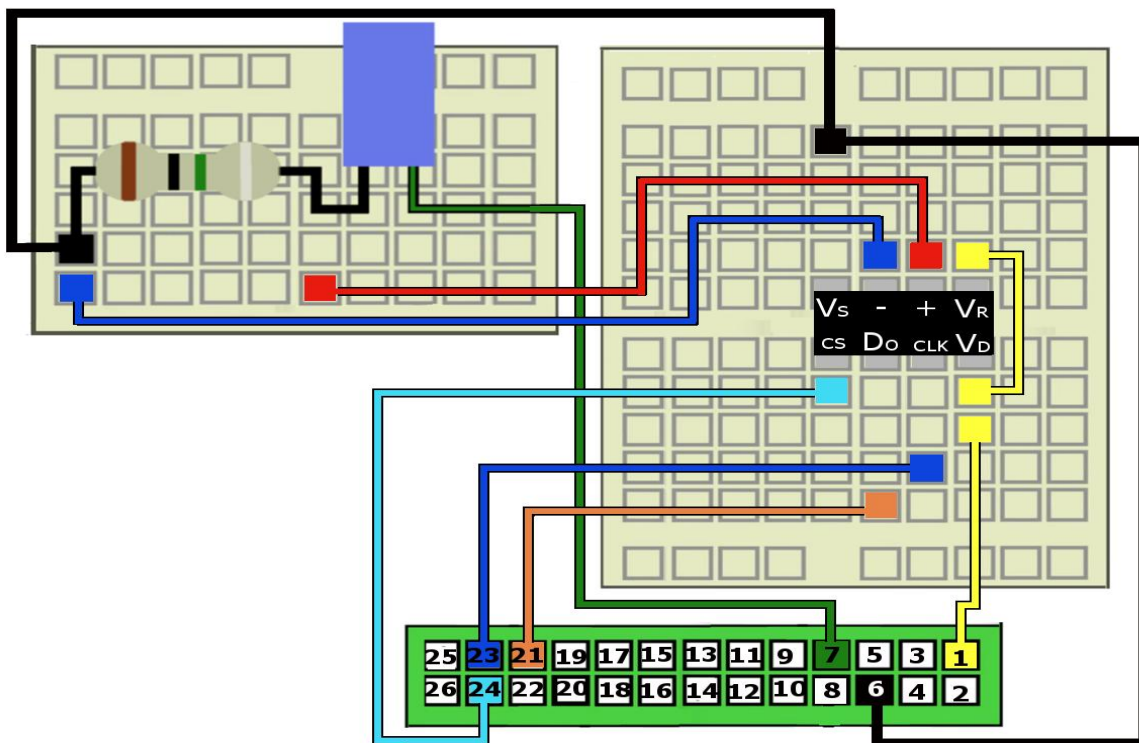


Слика 3.19. Генерални принципи „Master/Slave“ односа Позиције: 1) Тактни сигнал, 2) „Master Output, Slave Input“, 3) „Slave Output, Master Input“, 4) „Slave Select“

Коначно повезивање добијамо тако што:

1. слободно уземљење које нам је остало повезујемо са пином 6.
2. Слободни проводник који је остао повезан са позицијом „ V_D “, слика 3.20 повезати са пином 1.
3. Слободне крајеве позиције „CLK“, „ D_O “, „CS“, слике 3.20, повезати са пиновима 24, 21 и 23
4. Једино што је остало је повезивање напона који долази на кондензатор са пином 7

Овако довршено сви елементи су спремни за пренос информација и за програм који је исписан у Пајтону.

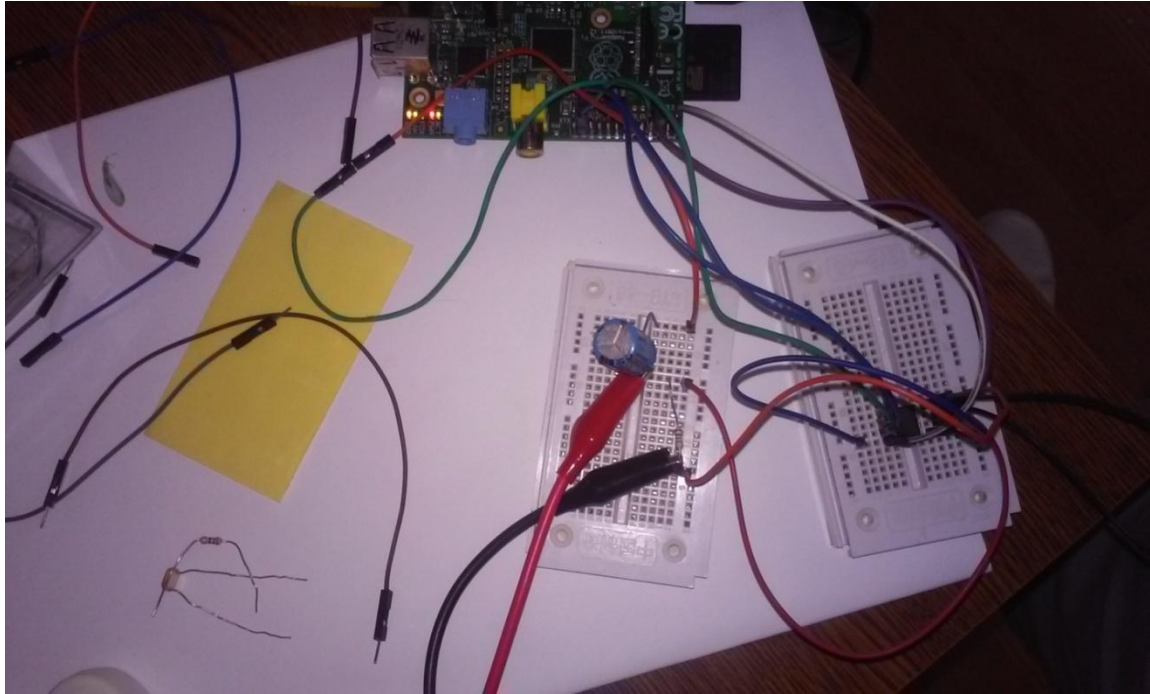


Слика 3.20. Шема приказа „Master/Slave“ односа у експерименту мерење напона отпорника

The diagram illustrates a 2D sensor array (left) connected to a readout circuit (right). The sensor array consists of a grid of elements, with a central region highlighted in blue. The readout circuit includes a multiplexer (MUX) and a register. The MUX selects data from the sensor array based on a control signal (CS). The register stores the selected data (Do) and provides a clock signal (CLK) to the sensor array. The readout circuit also includes a voltage source (V_S) and a resistor (R) connected to the sensor array. The sensor array is connected to a readout circuit via a series of colored lines (red, blue, green, yellow, orange, cyan). The readout circuit is connected to a register with 26 inputs, numbered 1 to 26. The register outputs are connected to a readout circuit via a series of colored lines (red, blue, green, yellow, orange, cyan). The readout circuit is connected to a register with 26 inputs, numbered 1 to 26. The register outputs are connected to a readout circuit via a series of colored lines (red, blue, green, yellow, orange, cyan).

Монтажна шема тестираног лабораторијског примера, слика 20, где су приказани „Master/Slave“ односи између „Raspberry Pi“ и интегралног кола па и самим тиме са колом чији напон се мери. Јасно се види да ће генерички пин пустити струју напона 3,3V кроз коло и наићи прво на кондензатор и проследити кроз отпорник где се завршава у уземљењу тј пину 6. За то време напон на отпорнику се продужава до интегралног кола где се конвертује по принципима интегралног кола и на дигиталном излазу интегралног кола добијамо вредност измереног напона који долази се повезује са пином 21.

Примећује се да није коришћен пин 19 или „Master Output, Slave Input“ линија се не користи јер је непотребна у нашем случају али можемо сматрати да је пин 7 узима његово место ако за „Slave“ јединицу. На слици 3.22 приказана је целокупна опрема коришћена у експерименту.



Слика 3.22, Приказ лабораторијског експеримента мерење „RC“ кола

3.2.4 Структура програма

После завршене конверзије потребно је добијени резултат прерачунати у јединицу за мерење напона тако да знамо тачно колики је измерен напон у датом тренутку и да исти можемо обрадити без додатне конверзије бинарних бројева. Структура овог програма се са стоји од пет делова где сваки има своју функцију у обради сигнала.

I. Учитавање потребних модула

Као и код других програмских језика, и код Пајтона на почетку програма потребно је учитати одређене модуле са скупом функција које се користе у програму. Тиме добијамо јаснији преглед у програму који служи у процесу читања напона. Из слике 3.23 види се да се користе СПИ модули где је „spi“ модул преко кога контролишемо „SPI“ сабирницу, „Rpi.GPIO as GPIO“ модул преко кога активирамо пинове. Библиотека „time“ контролише временске функције тј сат реалног времена на „Raspberry Pi“.

```
import spidev
import time
import RPi.GPIO as GPIO
```

Слика 3.23, Учитавање модула у програм

II. Дефинисање променљивих и активирање потребних програма за анализу

У нашем програму резервисана је меморија за два реда: један за време други за измерен напон и још бројач постављен за одређивање времена. Поред тога командом „spi.open“ укључујемо „SPI“ а „“ тј дефинишемо тип и начин коришћења линија на микрорачунару. Ово је илустровано на слици 3.24.

```
spi = spidev.SpiDev()  
spi.open(0,0)  
GPIO.setmode(GPIO.BOARD)  
vreme = []  
napon = []  
k = 0
```

Слика 3.24, Дефинисање потребних променљивих и активирање „SPI“

III. Пажњење кондензатора

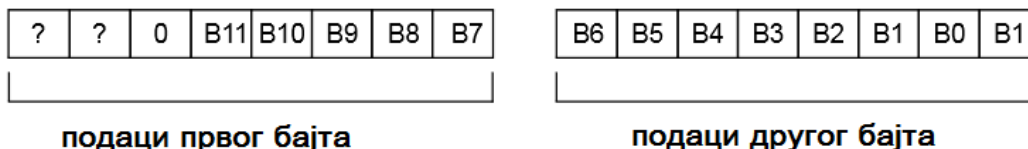
У случају да је кондензатор већ напуњен када почнемо мерење поставља се проблем добијања другачијих резултата тј почених услова који су различити од оних претпостављених у теориском разматрању. Тако је потребно време да се кондензатор испразни пре него се крене са мерењима и то се постиже тако што се побудни пин доводи на нулти потенцијал довољно дуго време или у нашем случају три временске константе испитиваног кола. Овакви услови треба да буду довољни чак и у случају да је кондензатор напуњен највећом количином наелектрисања која се може наћи у кондензатору. Након овога проток струје заједно са напонам пада у стационарно стање тј. пада на нулу. Ово је илустровано у програму на слици 3.25, код које видимо дефинисање побудног пина као излаз од 3,3V па се онда исти искључује позивањем као „FALSE“. После овога програм чека 30 секунди или три временске константе.^[5] Након пражњења кондензатора, пин 7 се поставља као „TRUE“ и струја протиче поново кроз коло и тако процес мерења може да почне.

```
GPIO.setup(7, GPIO.OUT)  
GPIO.output(7, False)  
time.sleep(30)  
GPIO.output(7, True)
```

Слика 3.25, Пажњење кондензатора помоћу програма

IV. Очитавање вредности напона и времена

Следећа фаза је кључни део задатка: очитавање вредности напона преко „SPI“ интерфејса. Први корак је укључивање „SPI“ сабирнице али када се укључи потребно је анализирати облик информације у којој добијамо да би знали на кој начин је обрадити. На слици 3.26 види се резултат очитавања два бајта у коме постоје и непотребне информације које су последица процеса очитавања конвертора.



Слика 26, Приказ дигиталне информације на улазу „SPI“ сабирнице

Јасно је да су у првом бајту непотребна прва три бита јер је бит највеће тежине „В11“ као што се види да у другом бајту последњи бит се понавља. Да би се побринули за први бајт потребно је повргну га операцијом „I“ са константом 00011111 и тако пропуштамо само битове битне нама. Код другог бајта непотребно нам је само последњи бит којег се решавамо померањем целог бајта у десну страну за један бит. Померањем првог бајта у десну страну смањујемо вредност сваког бита за два као што је и потребно. Па зато množимо први бајт са 2^7 уместо 2^8 . Исти захвати се изводе и у програму одмах након стартовања „SPI“ сабирнице која шаље тактне сигнале и спушта селектор интегралног кола. Након одрађене конверзије раде се „I“ операција и померање другог бајта долази до претварања у волте, исписивања вредности на екрану као и стављање вредности у низ вредности напона као на слици 3.27. Цела трансформација се дешава у оквиру „While“ петље у којој је постављен блок „try“ петље која ће чекати одређен прекид а до тог прекида ће константно читати нове вредности.

```
while True:
    try:
        adc = spi.xfer2([0,0])
        podaci = ((adc[0] & 0x1f) * (2**7)) + (adc[1] >> 1)
        napon2 = ((float(podaci) / 4096) * 3.3)
        print "ADC: " + str(podaci)
        print str(voltage) + " V"
        time.sleep(0.25)
        k += 0.25
        vreme.append(k)
        napon.append(napon2)
```

Слика 3.27. Очитавање дигиталних података у „While“ петљи

V. Прекид мерења и писање датотеке

Када смо задовољни мерењима тј. када је прошло довољно времена да се стекне довољно добра слика о напону који пролази кроз коло можемо прекинути процес мерења и сачувати податке који су измерени. Подаци се чувају као матрица где је први члан реда време а други напон за свако снимање. Цео процес се подстиче тако што се у „try“ петљи поставља „ехсерт“ у којој се постављају услови прекидања блока „try“ петље. У нашем случају ти услови су било кој прекид са тастатуре или излажење из покренутог програма као на слици 3.28. Када се испуне услови прекида се „SPI“ сабирница, као и рад „GPIO“ пинова и чува се датотека под именом напон.

```
except (KeyboardInterrupt, SystemExit):
    spi.close()
    GPIO.cleanup()
    f = open('napon', 'w')
    for i in range(len(vreme)):
        f.write(str(vreme[i]) + ', ' + str(napon[i]) + '\n')
    f.close()
    raise
```

Слика 3.28. Приказ услова прекида и обраде резултата после прекида

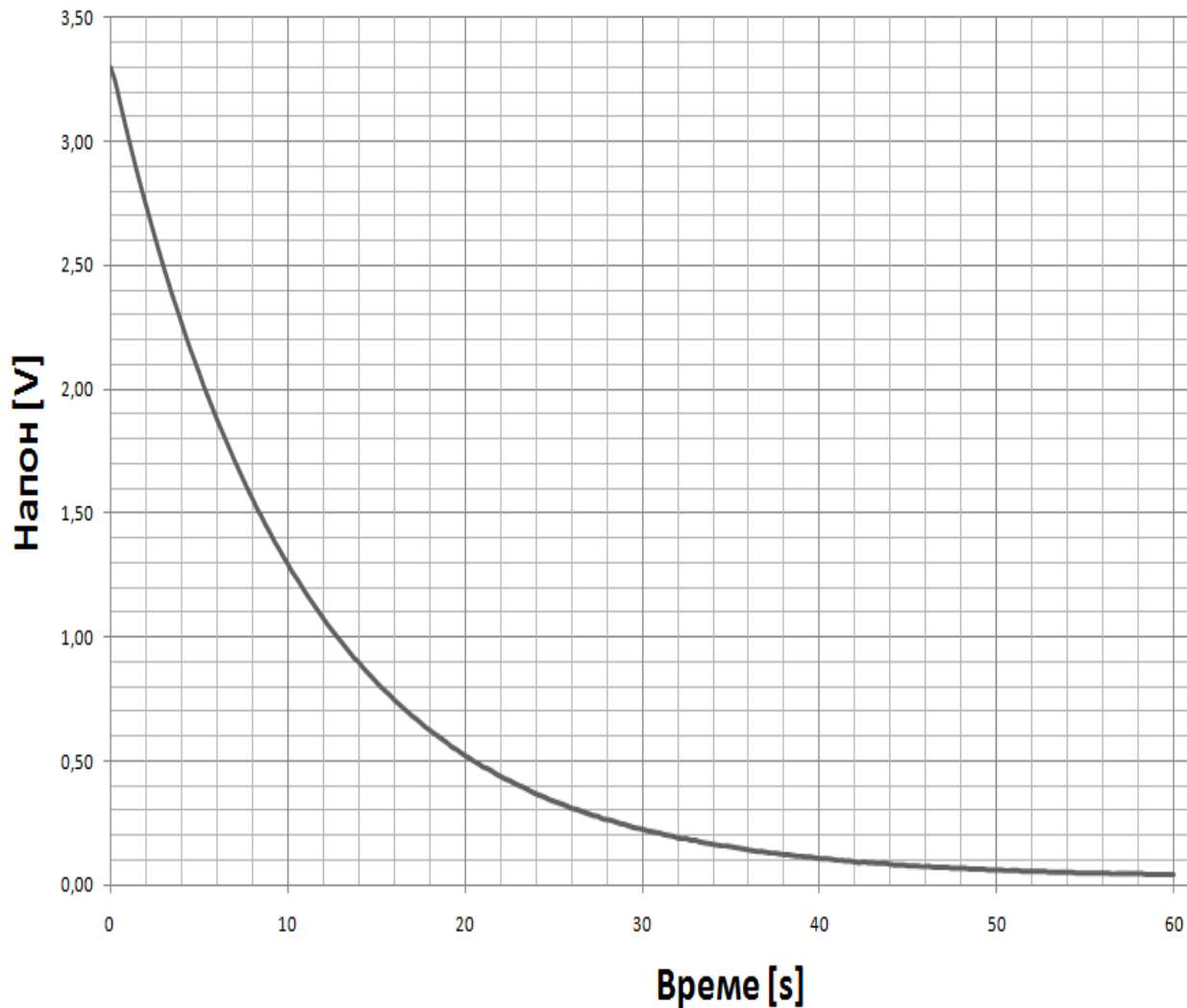
Цео програм је показан на слици 3.29 где се може добити целовит увид у програм. На овај начин добија се јаснији концепт програма где су прва три дела предуслови за почетак мерења а преостала два петља која служи за читавање дигиталног сигнала.

```
import spidev
import time
import RPi.GPIO as GPIO
spi = spidev.SpiDev()
spi.open(0,0)
GPIO.setmode(GPIO.BOARD)
vreme = []
napon = []
k = 0
GPIO.setup(7, GPIO.OUT)
GPIO.output(7, False)
time.sleep(30)
GPIO.output(7, True)
while True:
    try:
        adc = spi.xfer2([0,0])
        podaci = ((adc[0] & 0x1f)*(2**7))+(adc[1]>>1)
        voltage = ((float(podaci) / 4096) * 3.3)
        print "ADC: " + str(podaci)
        print str(voltage) + " V"
        time.sleep(0.25)
        k += 0.25
        vreme.append(k)
        napon.append(voltage)
    except (KeyboardInterrupt, SystemExit):
        spi.close()
        GPIO.cleanup()
        f = open('napon', 'w')
        for i in range(len(vreme)):
            f.write(str(vreme[i]) + ', ' + str(napon[i]) + '\n')
        f.close()
        raise
```

Слика 3.29, Пуни склоп програма за читање дигиталног сигнала

3.2.5 Анализа измерених резултата

Добијени резултати постављени су у облику матрице где је прва колона време а друга напон који одговара том времену. Приказано решење има експоненцијалан облик, слика 3.30, као и карактеристику да достиже стационарно стање после треће временске константе. Али овакво разматрање је недовољно да би се сматрало као довољно тачно мерење па је зато потребна детаљнија анализа. Ако се узме у обзир да мерење није идеално и да су могућа одређена одступања потребно је поредити га са неком врстом еталона или било којој мери коју сматрамо за веродостојну. Према томе измерене резултате поредимо са напонима теоријског решења за исте временске интервале измерене у експерименту.



Слика 3.30, Напон измерен из А/Д конвертора преко „Raspberry Pi“ интерфејса

Потребно је поменути да отпорник и кондензатор имају своје толеранције од којих варира временска константа, τ . Потребно је узети у обзир све комбинације крајњих варијанти вредности отпора и капацитивности да би постојала потпуна слика о скали могућег мерења и грешке, табела 3.3, да би се квалитетно анализирано мерење. Ако је толеранција отпорника и кондензатора од 10% следи временска константа у распону од 12,1s до 8,1s. Поред толеранција „Raspberry Pi“ није стран временским кашњењем и па се треба узети и у обзир такав недостатак.

Табела 3.3 Распон временске константе у зависности на толеранцију

Отпорник $R[1M\Omega]$ [10%]	1.1	1.1	1	1	1.1	0.9	1	0.9	0.9
Кондензатор $C[\mu F]$ [10%]	11	10	11	10	9	11	9	10	9
Временска константа $\tau[s]$	12.1	11	11	10	9.9	9.9	9	9	8.1

Када издвојимо резултате измереног напона за предвиђену временску константе долазимо до табеле 3.4 где се види разлика између теорије и измереног узорка.

Табела 3.4 Приказ измереног напона за предвиђене временске константе

Теоријски Напон [%]	36.78	13.53	4.9	1.83
Измерен напон [%]	38,22	15,44	6,54	3,12
Временска константа [s]	10	20	30	40

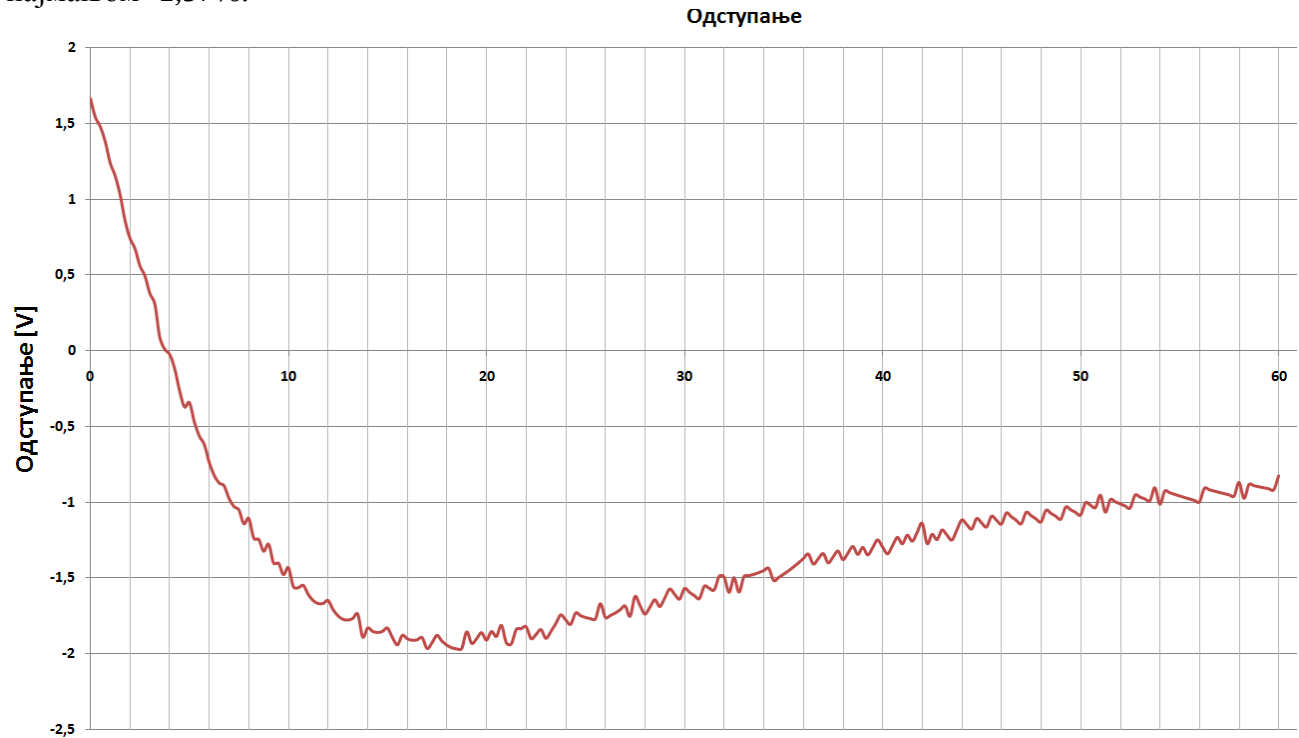
Види се да ови напони нису поклопили са довољно па као контраст тражимо најближе мере теоријским ради испитивања временске константе у табели 3.5.

где се примећује већа временска константа него обично што значи да је једно од елемената има одређено одступање.

Табела 3.5 Приказ временских интервала за очекиван напон

Теоријски Напон [%]	36.78	13.53	4.9	1.83
Измерени напон [%]	36.55	13.48	4.98	1.85
Временски интервал	10,5	21,5	32,25	50,25

Поређењем између теоријских и измерених вредности добијамо слику о присутности грешке и могуће одступање од решења које смо добили у мерењу. Грешку меримо у процентуалној форми где је 100% 3,3V. Из резултата, слика 3.31, закључујемо да је толеранција измереног напона овог мерења $\pm 2\%$ са са највећом вредношћу од 1,66% а а најмањом -1,97%.



Слика 3.31, Приказ одступања [%] мерења у времену

4. Закључак

У овом раду разматрана је употреба микрорачунара на плочи „Raspberry Pi“ за процесе мерења аналогног напона. Обзиром да овај микрорачунарски систем нема кола за А/Д конверзију, коришћено је интегрално коло „MCP3201“ дванеастобитни А/Д конвертор произвођача MICROCHIP.

Као програмска подршка коришћен је програмски језик вишег нивоа Пајтон (Python). Овај програмски језик замишљен је тако да се лако учи али поседује све елементе структурних програмских језика.

Програмски језик коришћен је као подршка за повезивање А/Д конвертора и интерфејса микрорачунара. Интерфејс за повезивање је серијски (SPI-serial to parallel interface).

Измерени резултати поређени су са математичким моделом. Анализа показује доста добро поклапање математичког модела и измерених резултата мерења. Релативна грешка налази се у распону од $\pm 2\%$.

5. Литература

- [1] Милан Матијевић, Горан Јакуповић, Јелена Цар, -*Рачунарски подржано мерење*, друго издање, Универзитет у Крпагујевцу 2008
- [2] „Tim Cox“, - „*Raspberry Pi Cookbook*“, „PACKT publishing“ 2014
- [3] Милић Р. Стојић – *Дигитални системи управљања*, Универзитет у Београду 1989.
- [4]http://www.validate.in/lab1/pages/RC/RCIntegrator/RCIntegrator_T.html (15.07.2015)
- [5] „Allan H. Robbins“, „Wilhelm C. Miller“ – „*Circuit Analysis theory and practice*“, пето издање, 2013