

Električni oscilatori

Ramulić, Dennis

Master's thesis / Diplomski rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:943275>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-23**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)



Električni oscilatori

Ramulić, Dennis

Master's thesis / Diplomski rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:943275>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-06-19**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
MATEMATIČKI ODSJEK

Dennis Ramulić

ELEKTRIČNI OSCILATORI

Diplomski rad

Voditelj rada:

Nikola Poljak

Zagreb, 2020.

Ovaj diplomski rad obranjen je dana _____ pred ispitnim povjerenstvom u sastavu:

1. _____, predsjednik
2. _____, član
3. _____, član

Povjerenstvo je rad ocijenilo ocjenom _____.

Potpis članova povjerenstva:

1. _____

2. _____

3. _____

Sadržaj

Uvod	1
Harmonijski oscilator	2
Gušeni oscilator	4
Tjerani oscilator	6
Tjerani gušeni oscilator	7
Električni oscilator	8
RC titrajni krug	9
RL titrajni krug	15
LC titrajni krug	17
RLC titrajni krug	21
Moderni električni oscilator	22
Operacijsko pojačalo	23
Wienov most	24
Vremenski sklop 555	26
SR flip-flop	29
Multivibratori	30
Bistabil	30
Monostabil	32
Astabil	34
Izrada	38

Izrada korištenjem BreadBoard-a	40
Izrada korištenjem univerzalne pločice	42
Izrada korištenjem tiskane pločice	44
Ekperimentalna provjera	50
Zadatak 1: Bistabil	50
Zadatak 2: Monostabil	51
Zadatak 3: Astabil	52
Literatura	53
Sažetak	54
Summary	55
Životopis	56
Prilozi	57

Uvod

U osnovnoj školi učenici se susreću s fizikalnom interpretacijom gibanja. No, znamo da se djeca i puno ranije susreću s raznim gibanjima kroz razne interakcije s okolinom. Bilo to pomicanje njihovih igračaka, udaranje lopte na igralištu, vihorenja lišća na vjetru ili pak njihanja ljuljačke. Upravo ovo zadnje predstavlja jednu posebnu vrstu gibanja – osciliranje. Iako im u toj dobi još uvijek ono nije poznato pod tim nazivom, već pod nekim intuitivnijim poput njihanje ili ljuljanje.

Nakon osnovne škole, jedino harmonijsko gibanje koje poznaju im je ono mehaničke vrste. U srednjoj školi (u većini slučajeva 3. razred srednje škole) učenici se upoznaju s novom vrstom harmonijskog osciliranja, točnije električnim oscilatorima. I iako će cijeli život biti okruženi raznim sklopovima čiji su sastavni dijelovi harmonijski oscilatori, rijetko ih prepoznaju kao takve. Ovaj rad je stoga pokušaj približavanja teme električnih harmonijskih oscilatora kroz što jednostavnije, a ipak praktične primjere, uz teorijsku pozadinu koja će nam biti temelj za praktičnu izvedbu nekoliko vrsta harmonijskih oscilatora. Rad ćemo dovršiti s nekoliko eksperimentalnih zadataka s izrađenim oscilatorima.

Želja je autora potaknuti nastavnike fizike na proširenje gradiva na temu električnih harmonijskih oscilatora s nekoliko praktičnih primjera te potencijalno i fizičkom izradom nekog od multivibratora na satu redovne ili dodatne nastave.

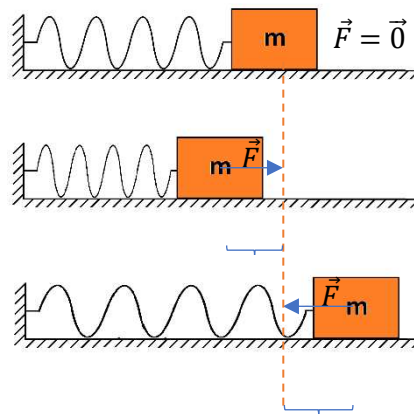
Harmonijski oscilator

Harmonijsko gibanje poznajemo prvenstveno na primjeru jednostavnog matematičkog njihala ili utega na opruzi. U potonjem slučaju ubrzo se upoznajemo s izrazom:

$$\vec{F} = -k\vec{x}, \quad (1)$$

pri čemu su \vec{F} sila koja djeluje na uteg na opruzi, k je konstanta te opruge a \vec{x} je pomak iz ravnotežnog položaja.

Iz (1) je odmah vidljivo da sila uvijek djeluje u suprotnom smjeru od odmaka od ravnoteže. To nam je vidljivo iz negativnog (-) predznaka. Na slici (1) vidimo pojednostavljeni prikaz smjera i iznosa sile u slučaju otklona utega iz ravnotežnog stanja. Bitno je napomenuti da smo se ograničili pretpostavkom da je zbroj svih vertikalnih sila nula i nema trenja.



Slika (1) - Uteg na opruzi.

Ako želimo opisati gibanje utega u ovisnosti o vremenu, silu u izrazu (1) možemo zapisati u malo drugačijem obliku:

$$\vec{F} = m\vec{a}, \quad (2)$$

pri čemu su \vec{a} akceleracija, a m masa utega. Akceleraciju \vec{a} možemo izraziti kao prvu derivaciju brzine \vec{v} po vremenu, odnosno drugu derivaciju pomaka \vec{x} po vremenu, čime izraz (1) postaje:

$$m \frac{d^2}{dt^2} \vec{x} = -k\vec{x} \quad (3)$$

$$\frac{d^2}{dt^2} \vec{x} = -\frac{k}{m} \vec{x}.$$

Zadržimo li se u 1D, vektore možemo zamijeniti skalarima jer će nam smjer vektora pomaka \vec{x} biti uvijek isti i poznat, u smjeru paralelnom sabijanju i širenju opruge, dok ćemo orijentaciju vektora predstavljati predznakom ispred iznosa pomaka. Izraz 3 nam predstavlja diferencijalnu jednadžbu čije je moguće rješenje izraz (4):

$$x(t) = A \cos(\omega t), \quad (4)$$

pri čemu su A amplituda pomaka utega od ravnotežnog položaja, ω kružna frekvencija osciliranja, a t proteklo vrijeme od početka osciliranja, pri čemu početak osciliranja obično definiramo kao trenutak u kojem smo uteg odmakli iz ravnotežnog položaja na udaljenost A te ga pustili da slobodno titra. Pri tome za kutnu frekvenciju ω vrijedi:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}. \quad (5)$$

Korekcija φ koju dodajemo u slučaju da smo pri otpuštanju utega dali mu neku početnu brzinu nam daje izraz (6):

$$x(t) = A \cos(\omega t + \varphi). \quad (6)$$

Dodatno, period titranja T možemo izraziti pomoću ω :

$$T = \frac{2\pi}{\omega}, \quad (7)$$

a frekvenciju titranja utega na opruzi f u odnosu na kružnu frekvenciju izražavamo izrazom (8):

$$f = \frac{\omega}{2\pi}. \quad (8)$$

Time smo opisali gibanje harmonijskog oscilatora na primjeru utega na opruzi, koji je jedan od najjednostavnijih školskih primjera mehaničkog harmonijskog oscilatora. Ključno je napomenuti da time nismo opisali sve harmonijske oscilatore, jer po načinu pobude i po načinu interakcije s okolinom, harmonijske oscilatore dijelimo na:

- 1) slobodne oscilatore,
- 2) gušene oscilatore,
- 3) tjerane oscilatore i
- 4) tjerane gušene oscilatore.

Gušeni oscilator

Prvu razinu postepenog prelaska iz idealne u realniju situaciju s kojom ćemo se u susresti u stvarnom životu je korigiranje diferencijalne jednadžbe (3) s dodatnim članom koji predstavlja gušenje. Najčešće taj izraz opisujemo samo kao dodatnu ovisnost o prvoj derivaciji odnosno, u slučaju našeg utega, brzini:

$$m \frac{d^2}{dt^2} x + b \frac{d}{dt} x + kx = 0, \quad (9)$$

pri čemu je b faktor gušenja. Potencijalno rješenje diferencijalne jednadžbe (8) je:

$$x(t) = B e^{-\frac{b}{2m}t} \cos(\omega t + \varphi), \quad (10)$$

pri čemu je B početna amplituda titranja u slučaju kad nismo tijelu zadali početnu brzinu.

Sada za kutnu frekvenciju ω vrijedi:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m} - \left(\frac{b}{2m}\right)^2}. \quad (11)$$

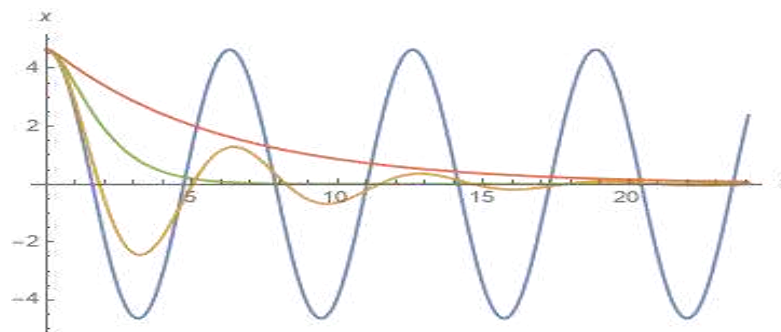
Prisjetimo se da kružna frekvencija titranja slobodnog harmonijskog oscilatora bila jednaka isključivo korijenu omjera konstante opruge i mase utega na opruzi (5). Tu kružnu frekvenciju ćemo zvati *prirodnom kružnom frekvencijom* sustava i definirati ćemo je nadalje kao:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}. \quad (12)$$

Iz (10) je vidljivo da će period titranja biti konstantan odnosno neovisan o vremenu, ali da će se amplituda mijenjati s vremenom i to tako da će eksponencijalno opadati s $e^{-\frac{b}{2m}t}$.

Ovisno o iznosu faktora gušenja b , gibanje može biti:

- 1) Natkritično gušeno, za $b > \sqrt{4mk}$,
- 2) Kritično gušeno, za $b = \sqrt{4mk}$ i
- 3) Potkritično gušeno, za $b < \sqrt{4mk}$.



Slika (2) – primjer potkritično gušenog osciliranja (žuto), kritično gušenog osciliranja (crveno) i natkritično gušenog osciliranja (zeleno) u usporedbi sa slobodnim osciliranjem (plavo).

Tjerani oscilator

Drugu razinu približavanja sustava realnim svakodnevnim primjerima je uvođenje reakcije sustava na vanjsku harmonijsku pobudu odnosno na silu F_v , koju možemo opisati s:

$$F_v = F_0 \sin(\omega t), \quad (13)$$

pri čemu su F_0 amplituda vanjske pobude, ω njena kružna frekvencija. Pri tome nam jednačba gibanja izgleda

$$m \frac{d^2}{dt^2} x + kx = F_0 \sin(\omega t). \quad (14)$$

Moguće rješenje ove jednačbe je:

$$x(t) = C \cos(\omega t + \varphi), \quad (15)$$

pri čemu uvrštavanjem rješenja (15) u diferencijalnu jednačbu (14) dobijemo iznos konstante C :

$$C = \frac{F_0}{m(\omega^2 - \omega_0^2)}, \quad (16)$$

pri čemu je ω_0 ista prirodna kružna frekvencija sustava opisana s (12).

Tjerani gušeni oscilator

Kombinacijom prethodna dva primjera dobivamo zadnji od osnovnih primjera mehaničkog harmonijskog oscilatora. Jednadžba gibanja takvog oscilatora jednaka je:

$$m \frac{d^2}{dt^2} x + b \frac{d}{dt} x + kx = F_0 \sin(\omega t). \quad (17)$$

Rješenje jednadžbe nam je poznato od prije, jer nismo dodali nikakve nove elemente u jednadžbu gibanja i jednako je:

$$x(t) = D \cos(\omega t + \varphi), \quad (18)$$

pri čemu ponavljajući postupak od prije, vraćanjem rješenja u početnu jednadžbu gibanja, dobivamo jednakost za D :

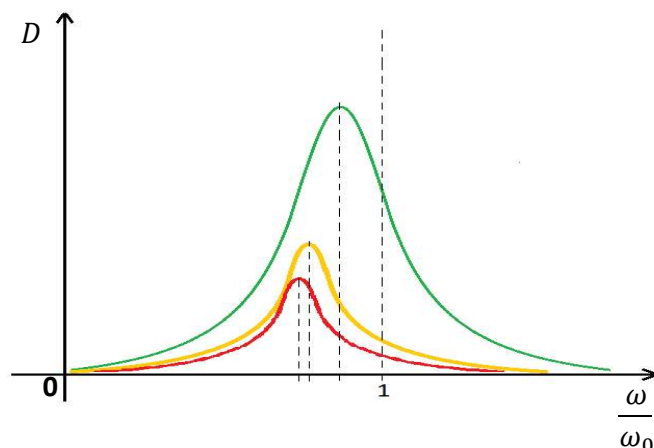
$$D = \frac{F_0}{\sqrt{m^2(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + b^2\omega^2}}. \quad (19)$$

Izraz (19) je identičan izrazu (16) osim što sada ima dodatni element koji odgovara gušenju osciliranja. Vidimo da izjednačavanjem faktora gušenja b s nulom dobivamo prijašnji primjer čisto tjeranog harmonijskog oscilatora.

U primjeru tjeranog gušenog oscilatora, detaljnijom analizom izraza (19) vidimo da je amplituda osciliranja D maksimalna u slučaju kada je kružna frekvencija vanjske pobude ω jednaka

$$\begin{aligned} \frac{dD}{d\omega} &= 0 \\ \omega_{max} &= \sqrt{\omega_0^2 - \frac{b^2}{2m}}. \end{aligned} \quad (20)$$

Ovisnost D o ω možemo prikazati slikom (3). U slučaju tjeranog (gušenog i ne gušenog) harmonijskog oscilatora prirodnu kružnu frekvenciju sustava ω_0 nazivamo i rezonantnom frekvencijom sustava.



Slika (3) – Ovisnost amplitude harmonijskog oscilatora D o frekvenciji vanjske pobude ω za slučaj slabog gušenja (zeleno), srednjeg gušenja (narančasto) i jakog gušenja (crveno).

Električni oscilator

Harmonijski oscilatori, osim što mogu biti mehanički, mogu biti i električni. Bitno je razumjeti da pri tome više nemamo slučaj titranja nekog utega odnosno tijela mase m oko ravnotežnog položaja, već govorimo ili o titranju električnog polja ili oscilirajućem gibanju nosioca naboja. Najčešće govorimo o promjeni jakosti i smjera struje elektrona unutar strujnog kruga.

Učenici i studenti su već upoznati s osnovnim strujnim krugovima (osnovni strujni krug u 8. razredu osnovne škole, detaljniju analizu strujnog kruga u 2. razredu srednje škole) prije nego se prvi puta susretnu s električnim titrajnim krugovima (3. razred srednje škole). Harmonijski oscilatori i električni harmonijski oscilatori obično se obrađuju iste

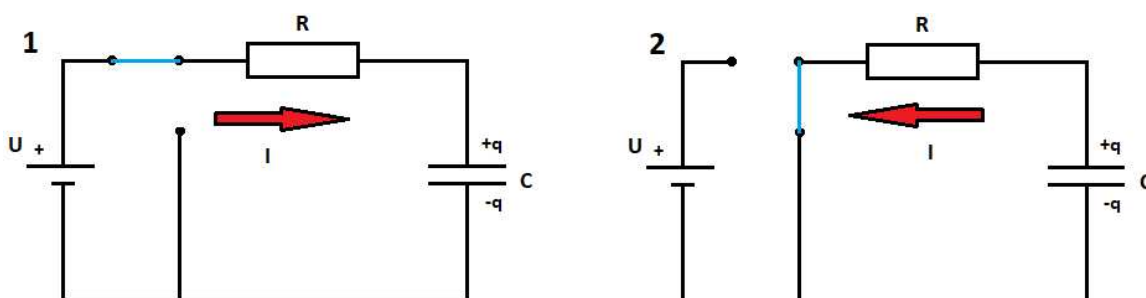
školske godine (3. razred srednje škole), pa se lako radi analogija između mehaničkog i električnog harmonijskog oscilatora.

Osnovni električni titrajni strujni krug odnosno harmonijski oscilator obrađuje se u izvedbi RLC strujnog kruga. U svrhu ovog rada objasniti ćemo princip rada RL strujnog kruga, RC strujnog kruga i kombiniranog RLC strujnog kruga.

RC titrajni krug

Učenici se po osnovnoškolskom kurikulumu prvo susreću s otpornikom kao osnovnim pasivnim elementom strujnog kruga. Zatim slijede malo kompliciraniji ali svejedno dosta intuitivni pasivni elementi induktivna zavojnica i kondenzator.

U slučaju RC strujnog kruga R nam označava element otpora (eng. resistor), a C označava element strujnog kruga kondenzator (eng. capacitor). U sva tri kruga imati ćemo i izvor napona, oznake U. Potrebno je napomenuti da će izvor napona biti istosmjerni i nepromjenjiv. Kondenzator je element električnog kruga koji može akumulirati i pohraniti naboj.



Slika (4) – električna shema RC strujnog kruga. U prvom slučaju (nabijanje kondenzatora - lijevo) strujni krug je zatvoren i spojen na izvor istosmjernog napona U, dok je u drugom slučaju (pražnjenje kondenzatora - desno) strujni krug također zatvoren, ali bez izvora istosmjernog napona U.

U slučaju kad je RC strujni krug spojen tako da se kondenzator nabija (lijevi dio slike (4)), koristeći Kirchhoffovo pravilo petlje, često nazivan i Kirchhoffovo drugo pravilo, koji kaže da je zbroj svih razlika potencijala u zatvorenoj petlji jednaka 0, dobivamo sljedeću jednakost:

$$U - U_R - U_C = 0, \quad (21)$$

pri čemu su U_R i U_C pad napona na otporniku i kondenzatoru. Izraz (21) možemo dalje raspisati koristeći Ohmov zakon (22):

$$I = \frac{U_R}{R}, \quad (22)$$

pri čemu nam I predstavlja struju kroz otpornik R , kada se na njegovim krajevima nalazi razlika potencijala odnosno napon U_R i jednakost koja opisuje kapacitet kondenzatora C :

$$C = \frac{q}{U_C}, \quad (23)$$

pri čemu je q maksimalni naboj koji kondenzator može akumulirati pri naponu U_C . Također ćemo definirati pojam električne struje kao količinu naboja q koji protekne poprečnim presjekom vodiča u vremenu t :

$$I = \frac{dq}{dt}, \quad (24)$$

Sada razvojem izraza (21) dobivamo:

$$U - U_R - U_C = 0, \quad (25)$$
$$U - R \frac{dq}{dt} - \frac{q}{C} = 0.$$

Ovu diferencijalnu jednadžbu možemo riješiti integriranjem kako bi dobili izraz (26):

$$\frac{dq}{dt} = \frac{UC - q}{RC}$$

$$\int_0^q \frac{1}{UC - q} dq = \int_0^t \frac{1}{RC} dt$$

$$\ln \left(\frac{UC - q}{UC} \right) = -\frac{1}{RC} t$$

$$q(t) = UC \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right). \quad (26)$$

Koristili smo pretpostavku da je naboj $q(t)$ na kondenzatoru u trenutku $t = 0$ jednak nuli. Zanimljivo je primijetiti da će protekom vremena, eksponencijalni dio težiti 0 odnosno vrijedi:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e^{-\frac{t}{RC}} = 0, \quad (27)$$

pa će time $q(t)$ težiti maksimalnom iznosu naboja na kondenzatoru Q :

$$Q = UC. \quad (28)$$

Dimenzijskom analizom, poznajući činjenicu da eksponent mora uvijek biti bezdimenzionalan, vidimo da je dimenzija umnoška RC jednaka dimenziji vremena t . Stoga taj iznos definiramo kao vremensku konstantu τ :

$$\tau = RC. \quad (29)$$

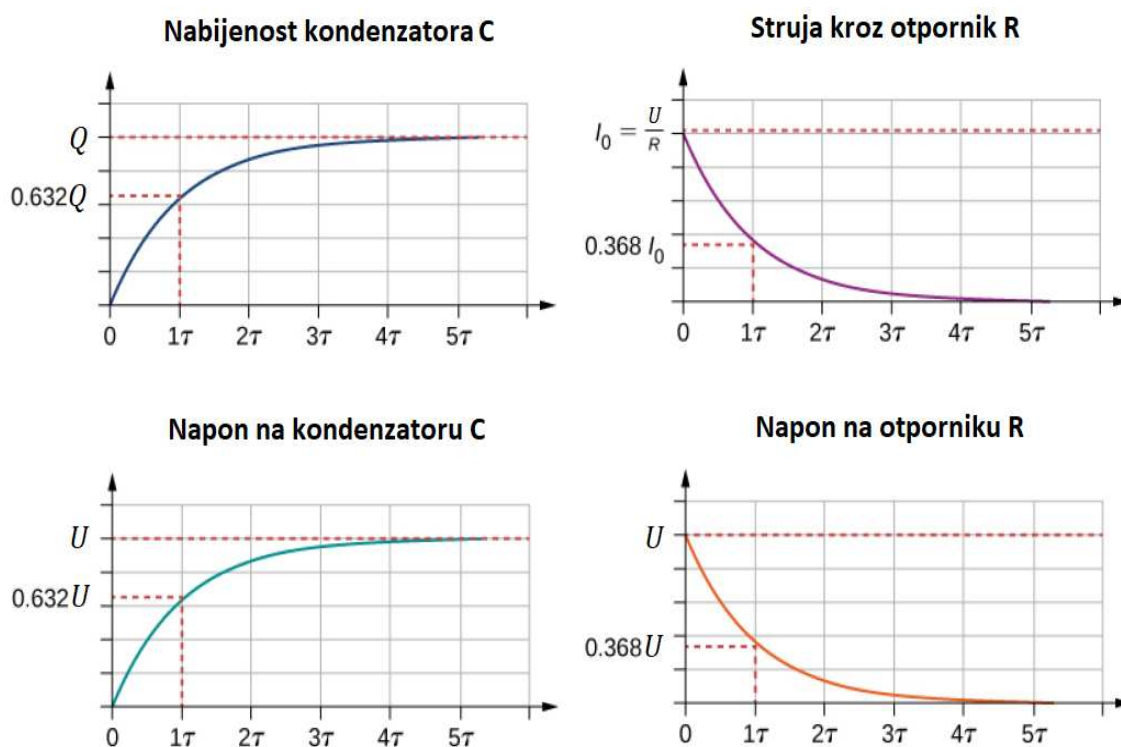
Time izraz (26) možemo prikazati i kao:

$$q(t) = Q \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right). \quad (30)$$

Koristeći definiciju električne struje (24) dobivamo ekvivalentnu jednakost za struju u RC krugu:

$$I(t) = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (31)$$

pri čemu je I_0 početni i maksimalni iznos struje u strujnom krugu, u trenutku $t = 0$. Grafički možemo prikazati ovisnosti naboja, napona i struje kroz elemente u RC krugu:



Slika (5) – naboj, struja i napon na elementima RC strujnog kruga pri nabijanju kondenzatora

Time smo detaljnije pokrili strujni krug u kojem su otpornik i kondenzator spojeni na izvor istosmjernog napona. U slučaju kad izvor napona maknemo iz strujnog kruga, te

taj krug zatvorimo, tako da nam strujni krug čine samo otpornik i u početnom trenutku potpuno nabijeni kondenzator, po drugom Kirchhoffovom pravilu vrijedi:

$$U_R + U_C = 0. \quad (32)$$

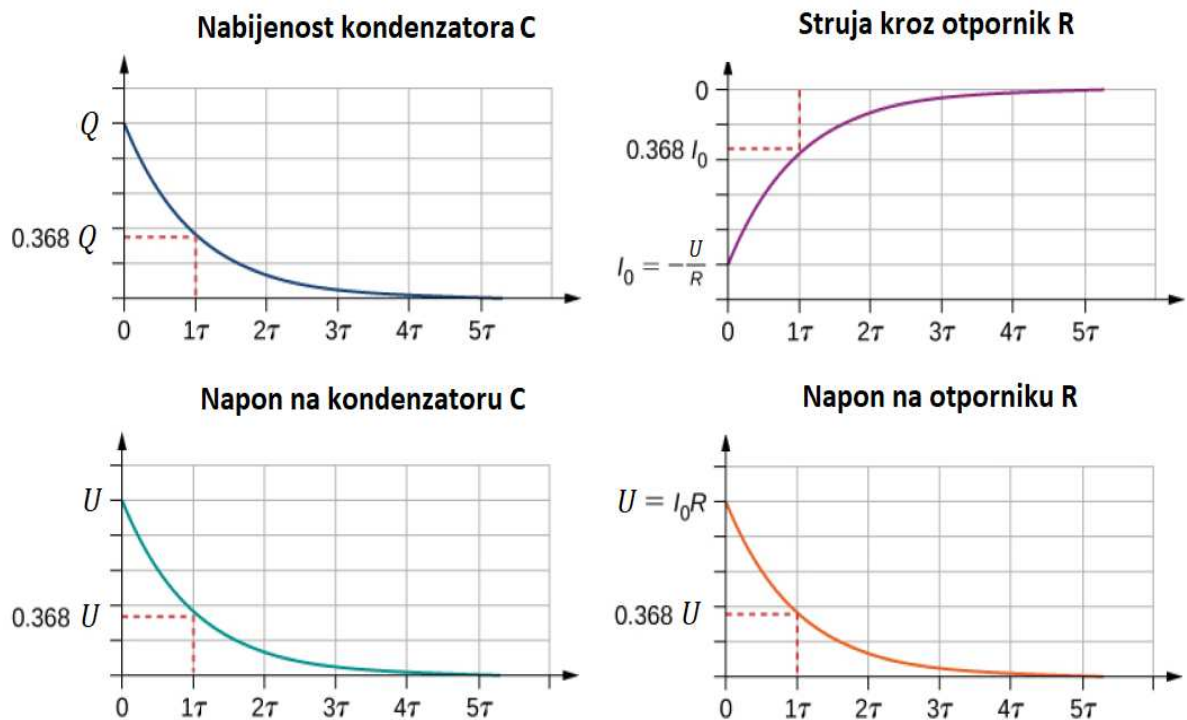
Ovaj slučaj zovemo izbijanje kondenzatora, jer je sada kondenzator taj koji ima ulogu izvora električne struje u strujnom krugu, te sada prethodno akumulirani naboj napušta kondenzator. Odgovarajuća jednakost koja opisuje vremensku promjenu nabijenosti kondenzatora opisana je s:

$$q(t) = Q e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (33)$$

a struja kroz elemente opisana je s:

$$I(t) = -\frac{Q}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (34)$$

pri čemu nam minus znak označava promjenu smjera toka struje kroz elemente u odnosu na slučaj dok smo nabijali kondenzator.

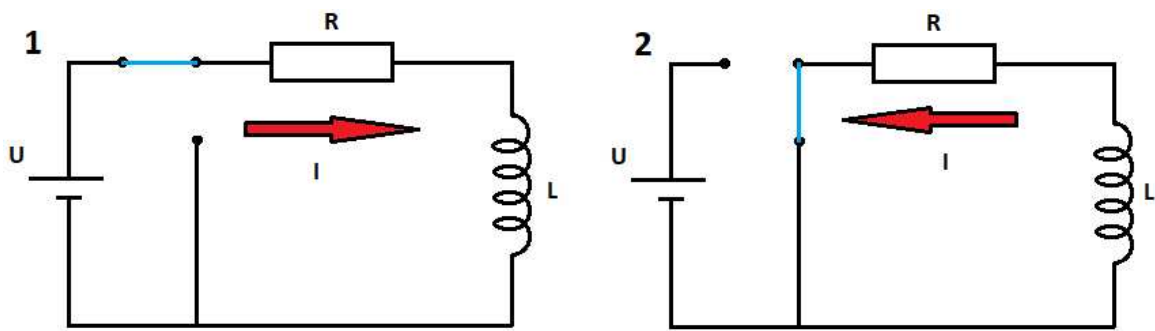


Slika (6) - naboj, struja i napon na elementima RC strujnog kruga pri izbijanju kondenzatora

RL titrajni krug

Treći pasivni element, nakon već spomenutog otpornika i kondenzatora, je induktivna zavojnica ili neka druga vrsta induktivnog elementa, u literaturi često referiran i kao samo-induktivni element. Oznaka za induktivnost L dana je u čast fizičara Heinricha Lenza.

RL titrajni strujni krug opet dijelimo u dva posebna slučaja, slično kao i kod RC kruga:



Slika (7) – RL strujni krug spojen na izvor istosmjernog napona (lijevo), zatvoreni RL krug bez izvora napona (desno).

U prvom slučaju, u trenutku zatvaranja strujnog kruga, rastući iznos struje I izaziva stvaranje inducirane elektromotorne sile na krajevima zavojnice u skladu s Faradayevim zakonom:

$$U_L = -L \frac{dI}{dt}. \quad (35)$$

Bitno je napomenuti da iako koristimo istosmjerni izvor, struja kroz elemente nije istog trena, pri uključanju sklopke, jednaka omjeru napona U i otpora R strujnog kruga, kao što to kaže Ohmov zakon, već postoji jedan kratak period brzog rasta jakosti struje od 0 ampera do maksimalnog iznosa po Ohmovom zakonu. Taj rast je upravo spomenuta promjena jakosti struje u strujnom krugu. Lenzovo pravilo nam kaže da je inducirana elektromotorna sila takva da se protivi rastu iznosa struje izvora. To matematički opisujemo negativnim predznakom u Faradayevom zakonu (35). Koristeći Faradayev zakon dobivamo jednadžbu koja opisuje odnos napona i elektromotorne sile na svim elementima RL strujnog kruga:

$$U - U_R + U_L = 0. \quad (36)$$

Odnosno:

$$U - IR - L \frac{dI}{dt} = 0, \quad (37)$$

čije je rješenje:

$$I(t) = \frac{U}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right). \quad (38)$$

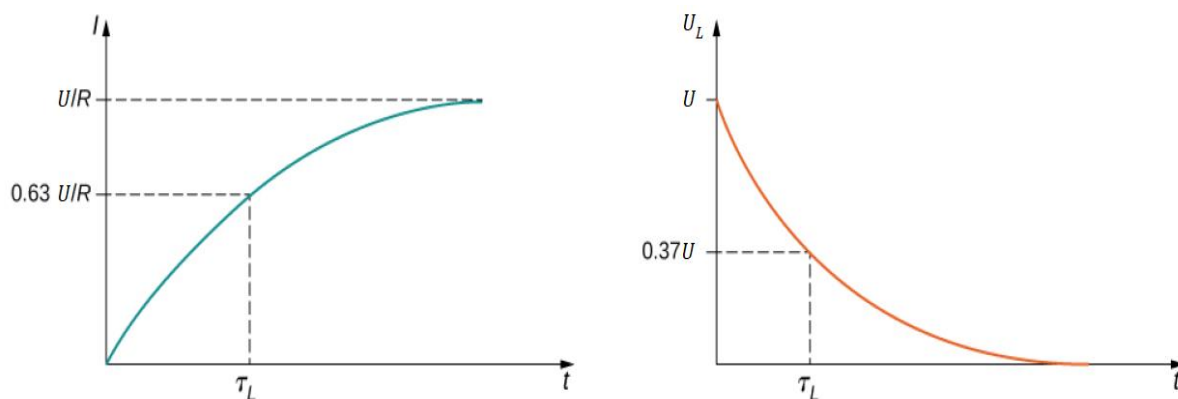
Definiramo (induktivnu) vremensku konstantu τ_L kao omjer ukupnog otpora i ukupne induktivnosti strujnog kruga:

$$\tau_L = \frac{L}{R}. \quad (39)$$

Primijetimo da prolaskom vremena, iznos jakosti struje $I(t)$ asimptotski teži iznosu omjeru napona U i otpora R tj.:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} I(t) = \frac{U}{R}, \quad (40)$$

što nam govori da će se inducirana elektromotorna sila na zavojnici s protekom vremena smanjiti s maksimalnog iznosa U na iznos 0 volti.

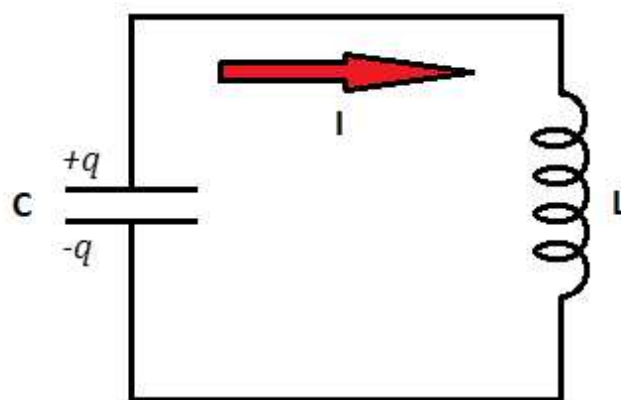


Slika (8) – struja kroz zavojnicu (lijevo) i inducirana elektromotorna sila na krajevima zavojnice (desno) u odnosu s vremenom t .

LC titrajni krug

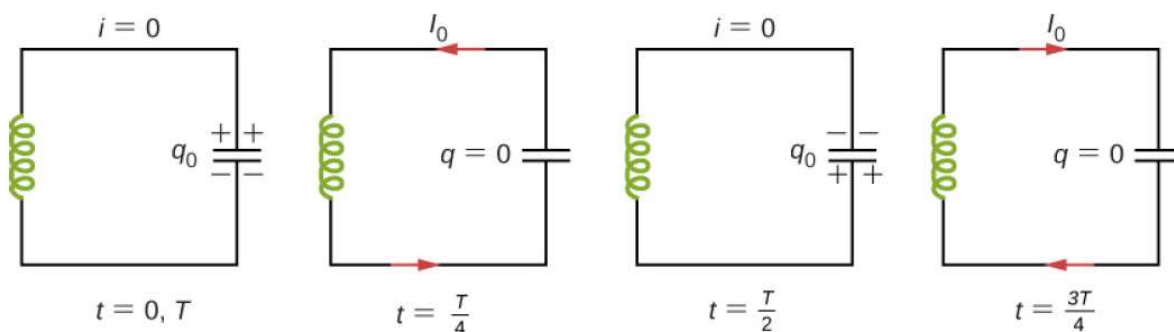
Do sada smo prošli RC i RL krug kao uvod u RLC titrajni krug. U oba uvodna slučaja, nismo imali istinski električni titrajući krug iz razloga što smo imali samo jedan dio oscilacije, bilo rastući ili padajući dio, koji bi se dogodio samo jednom, nakon čega bi se strujni krug našao u ravnoteži. Kako bi istinski postigli harmonijski oscilator, bilo bi potrebno mehanički sklopkom prebacivati između strujnih krugova na slici (4) odnosno slici (7), ovisno o kojem krugu govorimo. Potpuno električni harmonijski oscilator možemo dobiti kombinacijom već spomenutih kapacitivnih i induktivnih elemenata.

Za početak pogledajmo idealni LC strujni krug. U ovom slučaju nećemo koristiti dodatni izvor istosmjernog napona, već ćemo krenuti s pretpostavkom da je kondenzator u potpunosti nabijen. Ta potpuna nabijenost nije uvjet, ali nam pojednostavljuje analizu. Stoga ćemo dalje u tekstu za početni naboj koristiti oznaku q_0 umjesto oznake za maksimalni iznos naboja na kondenzatoru Q .



Slika (9) – LC strujni krug

U trenutku zatvaranja LC strujnog kruga, nabijeni kondenzator se počinje izbijati preko zavojnice pri čemu se počinje formirati električna struja u krugu. Ta se struja mijenja na način prikazan slikom (5) te svojom promjenom stvara magnetsko polje kroz zavojnicu, čija promjena zatim inducira elektromotornu silu na krajevima zavojnice. Time se energija s kondenzatora prenijela na zavojnicu. Ta elektromotorna sila sad stvara struju suprotnog predznaka od početne struje, koja rezultira ponovnim nabijanjem kondenzatora. Završavamo s ponovno nabijenim kondenzatorom, u idealnom slučaju istog iznosa naboja kao i na početku. Taj proces možemo opisati i sljedećom slikom:



Slika (10) - proces izmjene energije između elemenata LC strujnog kruga.

LC strujni krug je direktna analogija slobodnog mehaničkog harmonijskog oscilatora. Odgovarajuće veličine su:

$$m \rightarrow L; \quad v \rightarrow I(t); \quad k \rightarrow \frac{1}{C}; \quad x \rightarrow q$$

Analogiju između brzine i jakosti struje ćemo koristiti pri obradi RLC titrajnog strujnog kruga. Ovime iz izraza (3) dobivamo diferencijalnu jednadžbu:

$$L \frac{d^2}{dt^2} q = -\frac{1}{C} q, \quad (41)$$

čije je rješenje:

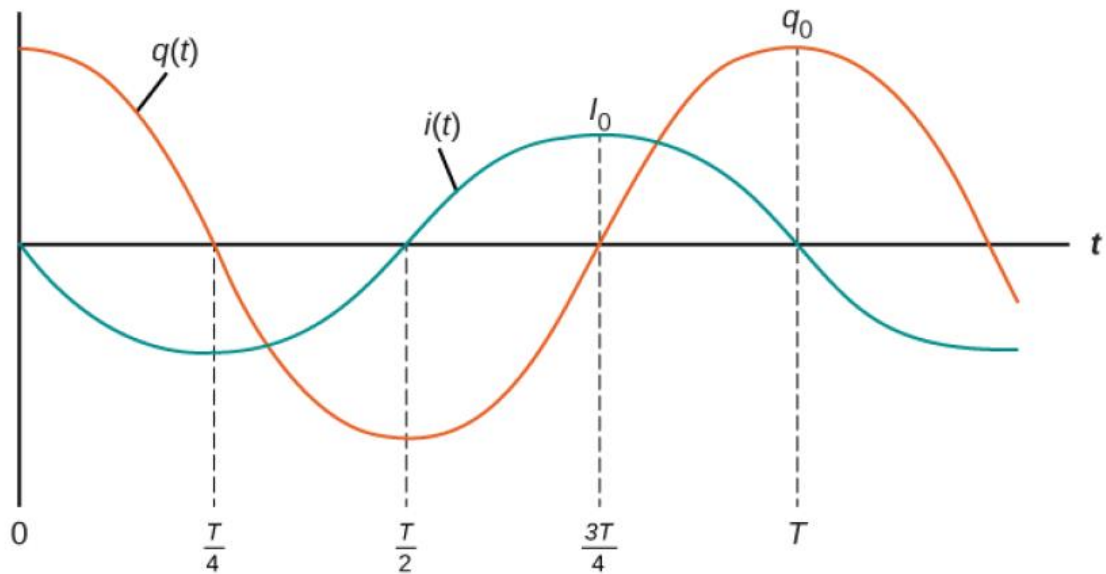
$$q(t) = q_0 \cos(\omega t + \varphi), \quad (42)$$

te analogno izrazu (5) dobivamo da je kružna frekvencija titranja LC strujnog kruga:

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC}}. \quad (43)$$

Ako nas zanima iznos jakosti struje u ovisnosti o vremenu, potrebno je samo derivirati promjenu naboja po vremenu koristeći izraz (23) čime dobivamo:

$$i(t) = \frac{dq}{dt} = -\omega q_0 \sin(\omega t + \varphi). \quad (44)$$



Slika (11) - grafički prikaz promjene naboja i struje kroz kondenzator s vremenom.

Korisno je napomenuti da smo do izraza (40) mogli doći i preko zakona o očuvanju energije kao i preko Faradayevog zakona. Koristeći izraze (23) i (35) koji opisuju elektromotornu silu na zavojnici i napon na kondenzatoru, slijedi:

$$U_L + U_c = 0, \quad (45)$$

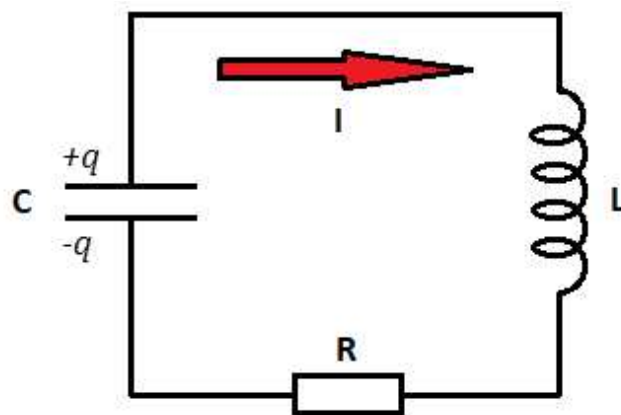
$$L \frac{di(t)}{dt} + \frac{q}{C} = 0,$$

$$L \frac{d^2}{dt^2} q = -\frac{1}{C} q,$$

čime smo ponovno dobili izraz (41).

RLC titrajni krug

Uspješno smo pronašli električnu analogiju slobodnog mehaničkog harmonijskog oscilatora, sada ćemo vidjeti kako izgleda primjer gušenog električnog harmonijskog oscilatora. Element koji će nam doprinijeti gušenju trebao bi, po analogiji, imati pad napona linearno ovisan o prvoj derivaciji promjene naboja po vremenu, odnosno struji. Takav element već poznajemo, a matematički je opisan Ohmovim zakonom (22). Radi se naravno o otporniku.



Slika (12) – RLC strujni krug

Dodavanjem otpornika u seriju s induktivnom zavojnicom i kondenzatorom, pretvaramo naš slobodni električni harmonijski oscilator u gušeni harmonijski oscilator. U tom slučaju drugo Kirchhoffovo pravilo nam daje sljedeću jednakost:

$$U_L + U_R + U_C = 0 \quad (46)$$

Nakon uvrštavanja izraza (22), (23) i (35) dobivamo:

$$L \frac{d^2}{dt^2} q + R \frac{dq}{dt} + \frac{1}{C} q = 0 \quad (47)$$

Rješenje ove diferencijalne jednadžbe nam je već poznato otprije dok smo obrađivali gušeni harmonijski oscilator:

$$q(t) = q_0 e^{-\frac{R}{2L}t} \cos(\omega' t + \varphi) \quad (48)$$

Pri čemu je iznos kružne frekvencije ω' :

$$\omega' = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2} \quad (49)$$

Na sličan način možemo doći i do tjeranog harmonijskog oscilatora, no on nam nije potreban za ovaj rad, pa ga nećemo detaljnije razrađivati. Zanimljivo je napomenuti da se električna analogija vanjske pobude u obliku sile (13) postiže dodavanjem izvora izmjenične struje u strujni krug.

Moderni električni oscilator

Velika povijesna prednost RLC titrajnih krugova je njihova pouzdanost i teorijska jednostavnost, zbog čega su ih električari amateri često upotrebljavali u svojim projektima, RF prijemnicima i odašiljačima, izvorima izmjeničnih signala i sl. No, razvojem tehnologije, potrebom za smanjenjem fizičke veličine elemenata, što lakšom modulacijom amplitude i frekvencije titranja i ponajviše prelaskom iz analognih sklopova u digitalne, postepeno se prelazilo iz poznatih RLC oscilirajućih krugova na PN titrajne krugove.

PN spojevi su jedna veoma duboka tema, te bi za kvalitetnu analizu rada bio potreban semestar ili čak dva na fakultetu. No potrebno je barem zagrepsti površinu kako bi učenicima i nastavnicima približili princip rada modernih oscilatora.

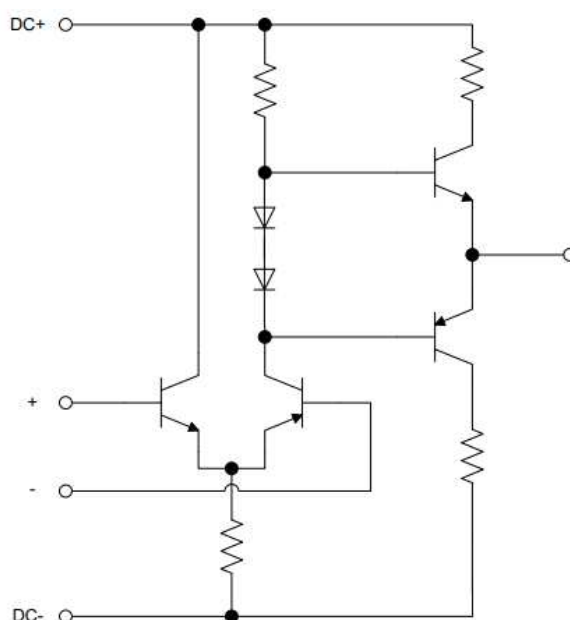
PN spojevi su tehnološka kombinacija dvije vrste poluvodiča, tzv. N i P tip. Pri spajanju u PN spoj, prijelazni sloj između njih odgovara za svojstveno ponašanje

elektroničkih komponenti baziranih na PN spoju u strujnog krugu. Neki PN elementi strujnih krugova su poluvodičke diode (jedan PN spoj), bipolarni tranzistori (dva PN spoja, u PNP i ili NPN strukturi), svjetleće diode poznatije pod nazivom LED (jedan PN spoj), tiristori (3 PN spoja), itd.

Nama najbitniji elektronički elementi strujnog kruga koji koriste PN spojeve su poluvodičke diode i bipolarni tranzistori. Zanimljivo je napomenuti da su ti elementi, za razliku od prethodno spomenutih pasivnih elemenata otpornika, kondenzatora i induktivne zavojnice, aktivni elementi. Razlika između aktivnih i pasivnih elemenata je ta što se aktivni elementi koriste za prijenos energije odnosno snage, dok se pasivni koriste za pohranu energije putem električnog napona ili naboja.

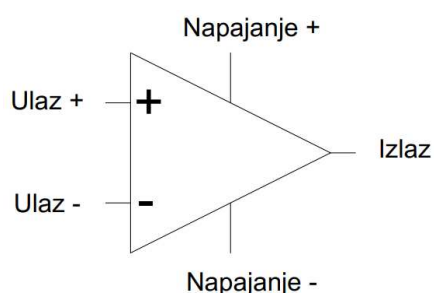
Operacijsko pojačalo

Kombiniranjem poluvodičkih elemenata, najčešće diode i tranzistora, zajedno s pasivnim elementima, možemo dobiti tzv. operacijsko pojačalo.



Slika (13) – električna shema operacijskog pojačala

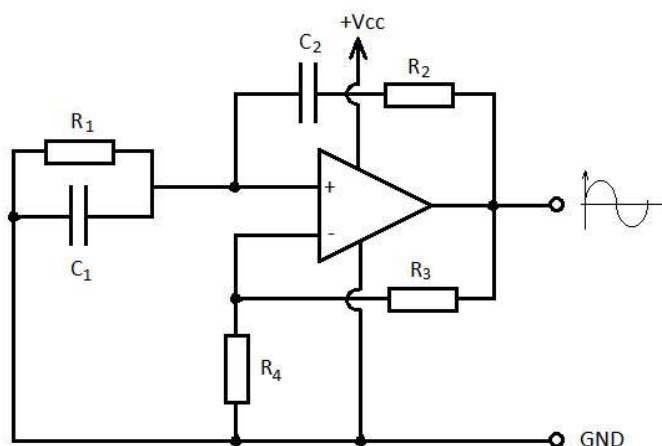
Operacijsko pojačalo je elektronički sklop ili integrirana elektronička komponenta s mogućnošću pojačanja izmjeničnog i istosmjernog napona. Operacijska pojačala najčešće koriste neku vrstu povratne veze (pozitivna ili negativna), koja se izvodi upotrebom pasivnih elemenata, a koja im služi za odabir načina rada operacijskog pojačala i modulacije izlaznog signala. Načini rada operacijskog pojačala mogu biti pojačalo, komparator, precizni detektor napona, analogno-digitalni pretvarač itd.



Slika (14) – simbol operacijskog pojačala.

Wienov most

Jedan od najosnovnijih primjera električnog oscilatora koji koristi PN spojeve je Wienov most. Preciznije, Wienov most koristi operacijsko pojačalo u kombinaciji s otpornicima i kondenzatorima odnosno RC mrežom.



Slika (15) – shematski prikaz Wienovog mosta.

Potrebno je prvo objasniti koncept dvostrukog RC oscilatora. Jedan par otpornika i kondenzatora spojen je u serijski spoj, dok je drugi par otpornika i kondenzatora spojen u paralelni spoj. Na slici (15) prvi serijski spojen par predstavljen je s R_2 i C_2 , a drugi paralelno spojen par predstavljen je s R_1 i C_1 . Kada na ulaz te mreže dovedemo izmjenični napon, serijski RC spoj će ponašati kao filter za niske frekvencije, a paralelni spoj će biti propustan. U slučaju visokih frekvencija serijski će spoj biti propusniji, a paralelni će imati visoku impedanciju. Vidimo da postoji određena rezonantna frekvencija srednjeg raspona f_r pri kojoj će propusnost RC mreže biti maksimalna.

Ulaz RC mreže nam je ujedno i izlaz operacijskog pojačala. Taj izlaz dovodimo preko RC mreže natrag na neinvertirajući ulaz operacijskog pojačala te preko mreže djelitelja napona R_3 i R_4 natrag na invertirajući ulaz operacijskog pojačala.

Prvotno će se RC mreža početi nabijati i izbijati, mijenjajući pritom frekvenciju osciliranja. Pri frekvenciji f_r naponi na neinvertirajućem i invertirajućem ulazu operacijskog pojačala biti će jednaki i u fazi, zbog čega će se naizmjenice pozitivna i negativna povratna veza poništavati te će Wienov most dalje oscilirati isključivo na toj frekvenciji f_r .

Iako nije apsolutno nužno, najčešće se u praksi uzimaju jednake vrijednosti otpornika i kondenzatora u tim mrežama odnosno vrijedi $R_1 = R_2 = R$ i $C_1 = C_2 = C$. Kružna frekvencija Wienovog mosta ω_w ovisi o tim vrijednostima otpora otpornika R i kapaciteta kondenzatora C . Vrijedi:

$$\omega_w = \frac{1}{RC}. \quad (50)$$

Koristeći izraz (8) dobivamo iznos frekvencije titranja f_w :

$$f_w = \frac{1}{2\pi RC}. \quad (51)$$

Kada definiramo željenu frekvenciju, proizvoljno odabiremo vrijednosti kapaciteta kondenzatora C , a vrijednost otpora otpornika R računamo uz pomoć (51). Da bi na izlazu operacijskog pojačala a time ujedno i samog Wienovog mosta dobili oscilirajući signal, potrebno je da je faktor pojačanja operacijskog pojačala A_U jednak 3 ili više. Taj omjer reguliramo odabirom otpora otpornika R_3 i R_4 . Vrijedi:

$$A_U = \frac{U_{Izlaz}}{U_{Ulaz}}, \quad (52)$$

odnosno ako pogledamo elemente u povratnoj vezi (spoj između izlaza i negativnog ulaza), dobivamo:

$$A_U = 1 + \frac{R_3}{R_4}. \quad (53)$$

S obzirom da mora vrijediti $A_U \geq 3$ dobivamo da pri odabiru otpora otpornika R_3 i R_4 mora vrijediti $R_3 \geq 2R_4$.

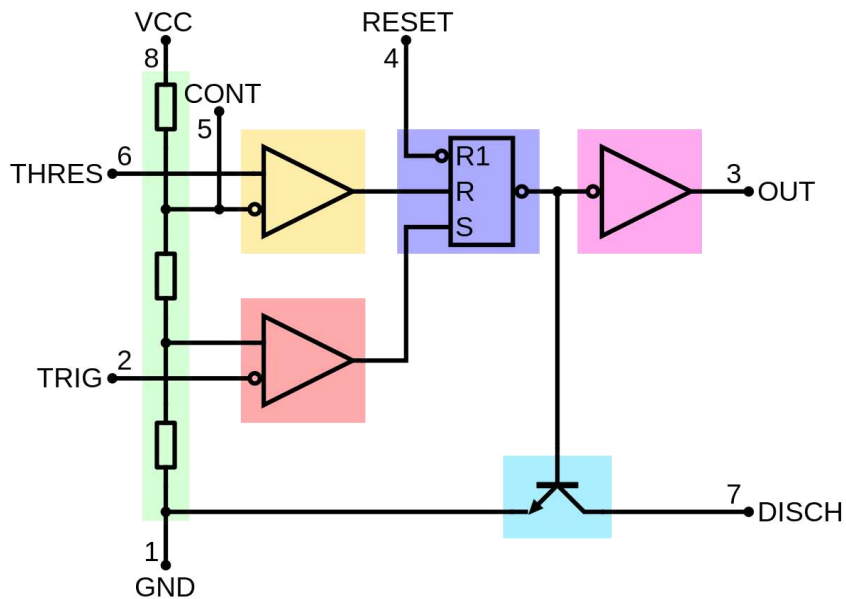
Zanimljivo je primijetiti da zamjenom svih otpornika s potenciometrima možemo veoma lako regulirati željenu frekvenciju titranja oscilatora. To je u također jedna od najvećih prednosti modernih oscilatora. Možemo se pitati: Zar nismo mogli u RLC krugu umjesto fiksnih elemenata koristiti izmjenjive pasivne elemente? No sjetimo se da nam promjenjivi otpornik odnosno potenciometar ne bi nikako pomogao pri promjeni frekvencije RLC titrajnog kruga, jer nam otpor utječe jedino na jačinu gušenja oscilirajućeg signala, a ne i na njegovu frekvenciju. Kondenzator, čiji kapacitet utječe na frekvenciju titranja RLC kruga, se može pronaći na tržištu u izmjenjivoj varijanti, ali puno teže nego potenciometri, dok je zavojnicu promjenjive induktivnosti dosta teže pronaći te su cijene oboje puno veće od cijena potenciometra.



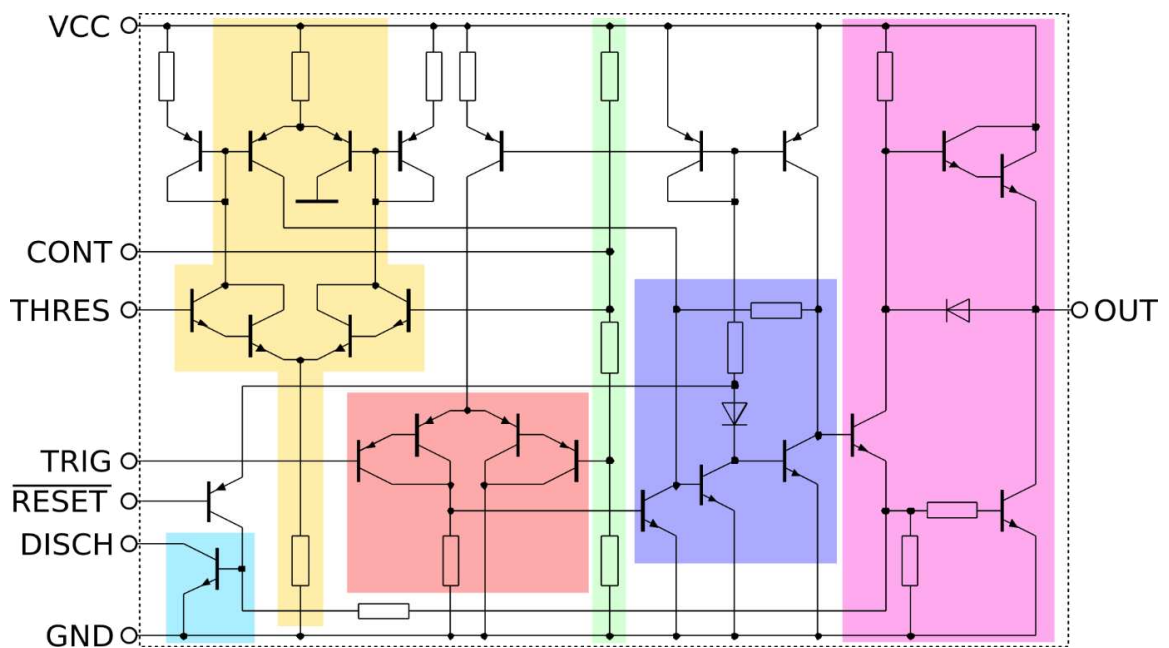
Slika (16) – primjeri kondenzatora promjenjivog kapaciteta (lijevo) i zavojnica promjenjive induktivnosti (desno).

Vremenski sklop 555

Sljedeći moderni oscilator koji ćemo obraditi u ovom radu biti će baziran na integriranom krugu 555. U praksi, najčešće ga se može pronaći s oznakom LE555, NE555 itd. ovisno o temperaturnom radnom području, vrsti kućišta, proizvođaču itd. Integrirani krug 555 naziv je dobio po tri 5 k Ω otpornika koji se nalaze između pina za napajanje i pina za uzemljenje [1]. Dolazi u 8-pinskom kućištu. Sami integrirani krug sastoji se od 3 operacijska pojačala, SR flip-flopa, nekoliko tranzistora različitih uloga i tri 5 k Ω otpornika.



Slika (17) – pojednostavljena shema integriranog kruga 555.



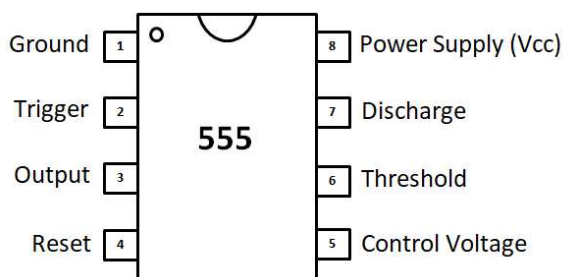
Slika (18) – detaljna shema integriranog kruga 555.

Naziv i svrhu spomenutih 8 pinova možemo naći u tablici (1). Pozicije tih pinova na fizičkom sklopu možemo vidjeti na slici (19), s napomenom da se na svim integriranim

krugovima nalazi malo udubljenje koje okrenuto prema naprijed označava da je prvi pin s lijeve pin broj 1. Svaki sljedeći pronalazimo gibajući se u smjeru suprotnom od kazaljke na satu. Na slici (19) to je udubljenje prikazano u dvije varijante, prva je u obliku slova U na vrhu slike, a druga je u obliku malog kružića u gornjem lijevom kutu kućišta sklopa.

Br. pina	Naziv	Svrha
1	Ground	Uzemljenje, spajamo na 0 (negativni) pol napajanja
2	Trigger	Okidač, na taj pin dovodimo ulazni signal u obliku rastućeg ili padajućeg dijela promjene napona
3	Output	Izlaz, pin izlaznog signala
4	Reset	Reset, pin na koji rastućim ili padajućim dijelom signala postavljamo izlaz u stanje logičke nule
5	Control Voltage	Kontrolni napon, služi za postavljanje razine napona koji definira razinu ispod i iznad koje definiramo logičku jedinicu i nulu, obično $\frac{2}{3}V_{cc}$, u slučaju astabila može se koristiti za frekvencijsku modulaciju
6	Threshold	Prag, ako napon na ovom pinu padne ispod napona na pinu 5 ($\frac{2}{3}V_{cc}$), postavlja izlaz (pin 3) u logičku nulu
7	Discharge	Izbijanje, služi za izbijanje kondenzatora RC kruga u slučaju upotrebe 555 kao monostabila ili astabila
8	Power Supply (V_{cc})	Napajanje, spajamo na pozitivni pol napajanja

Tablica (1) – redoslijed i funkcije pinova vremenskog sklopa 555.

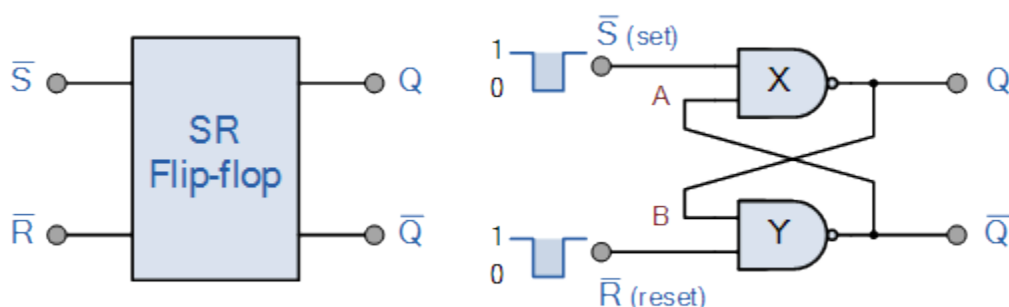


Slika (19) – fizički raspored pinova na kućištu vremenskog sklopa 555.

SR flip-flop

Jedina veća novost u ovom trenutku, a koje se nismo nimalo dotakli, je SR flip-flop. SR u nazivu označava dva inputa: Set (eng. *postaviti*) i Reset (eng. *resetirati*). Flip-flop u nazivu označava izlaz (koji je obično komplementaran s dodatnim izlazom na kojem je uvijek logički suprotna vrijednost) kao i način rada. Dvije su moguće logičke vrijednosti na izlazu SR flip-flopa: logička jedinica i logička nula. SR flip-flop radi kao bistabil odnosno kolokvijalnije poznatije kao računalna (digitalna) memorija.

Postoje razne izvedbe SR flip-flopa. Jedan od primjera prikazan je slikom (20). U tom primjeru, ovisno o tome dovedemo li vrijednost logičke nule na S ili R ulaz, izlaz će se postaviti i ostati u tom stanju dok god mu ponovno ne dovedemo vrijednost logičke nule ali ovaj put na suprotni ulaz.



Slika (20) – Simbol (lijevo) i električna shema SR flip-flopa (desno).

Ponašanje SR flip-flopa možemo prikazati sljedećom tablicom:

S	R	Q	\bar{Q}	Opis
0	0	X	X	Nedefinirano, zabranjeno stanje ili pri nekim izvedbama SR flip-flopa jednako prijašnjem stanju
0	1	1	0	Postavljanje u stanje logičke jedinice
1	0	0	1	Postavljanje u stanje logičke nule
1	1	Q	\bar{Q}	Stanje ostaje nepromjenjivo, jednako prijašnjem stanju

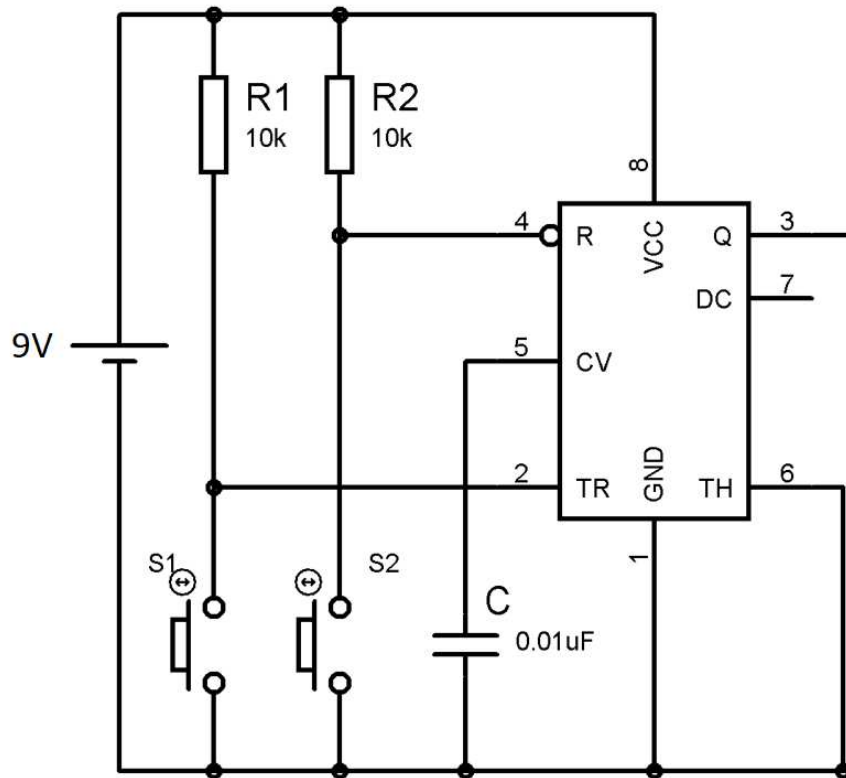
Tablica (2) – ponašanje SR flip-flopa.

Multivibratori

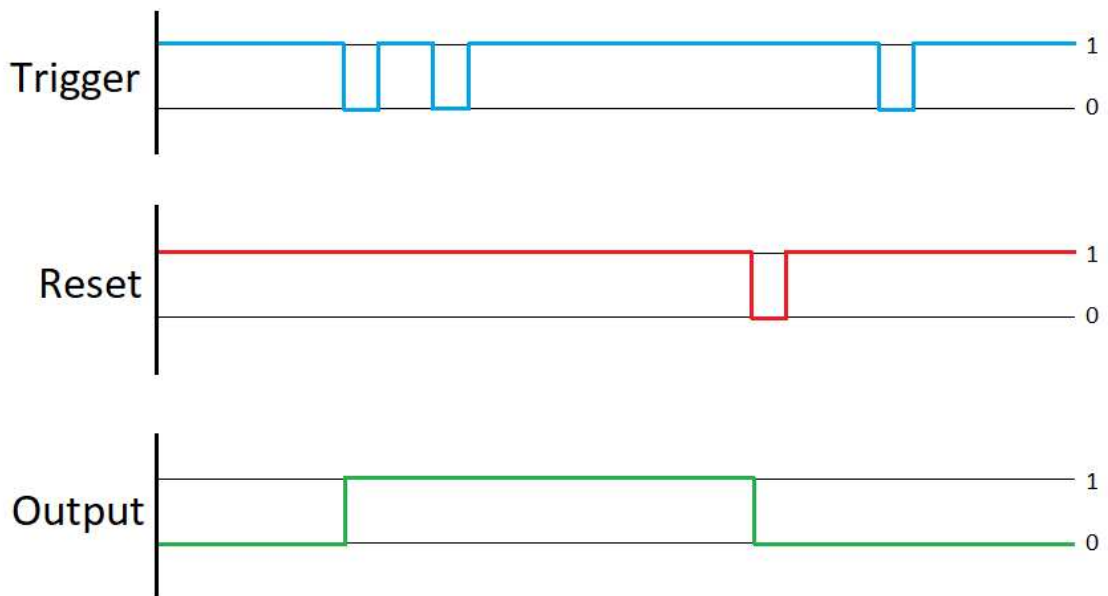
U prijašnjoj cjelini smo spomenuli da se SR flip-flop ponaša kao bistabil. No što zapravo znači taj pojam? Bistabil je jedan od tri podvrste ponašanja sklopova pod zajedničkim nazivom multivibratori. Multivibratori su skup svih jednostavnih elektroničkih sklopova s dva stanja. Najčešće ih se pronalazi u izvedbi s kombinacijom operacijskog pojačala i RC kruga. Spomenuli smo već da vremenski sklop 555 koristi operacijska pojačala već ugrađena u sebe, pa ćemo pokušati prikazati nekoliko praktičnih primjera raznih vrsta multivibratora koji koriste vremenski sklop 555.

Bistabil

Pri spomenu pojma bistabil, mogli bi već po imenu razaznati njegovu svrhu. „Bi“ označava 2 izlazna stanja, a „stabil“ označava da su ta dva izlazna stanja stabilna. Ovisno o logičkom stanju ulaza bistabil postavlja i trajno drži određeno stabilno logičko stanje na izlazu, barem do trenutka dok mu na ulaz ne dovedemo neku novu informaciju u obliku logičke jedinice ili nule. Tablica (2) nam može poslužiti za osnovni opis rada bistabila, ali praktične izvedbe bistabila češće za ulaz koriste rastući ili padajući dio pri promjeni stanja na ulazu. Jedna od takvih izvedbi koristi vremenski sklop 555, koju ćemo opisati i izraditi u fizičku testnu verziju s kojom će učenici i studenti moći raditi razne praktične vježbe.



Slika (21) – Električna shema bistabila s vremenskim sklopom 555.



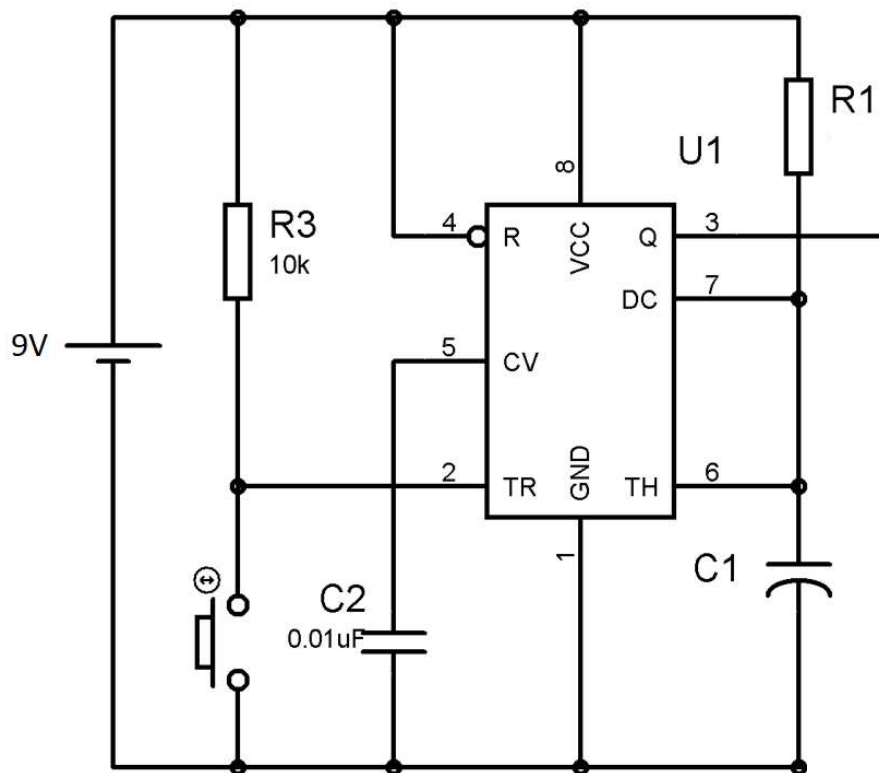
Slika (22) – logička stanja izlaza bistabila u ovisnosti o padajućem bridu ulaznih signala na pinu Trigger i Reset.

Na slici (22) vidimo da na ponavljajući inputi, u našem slučaju padajući brid napona, na ulazima Trigger i Reset ne mijenjaju stanje izlaza tj. ne rezultiraju nikakvom novom promjenom na izlazu. Samo prvi input obliku padajućeg brida mijenja stanje izlaza bistabila.

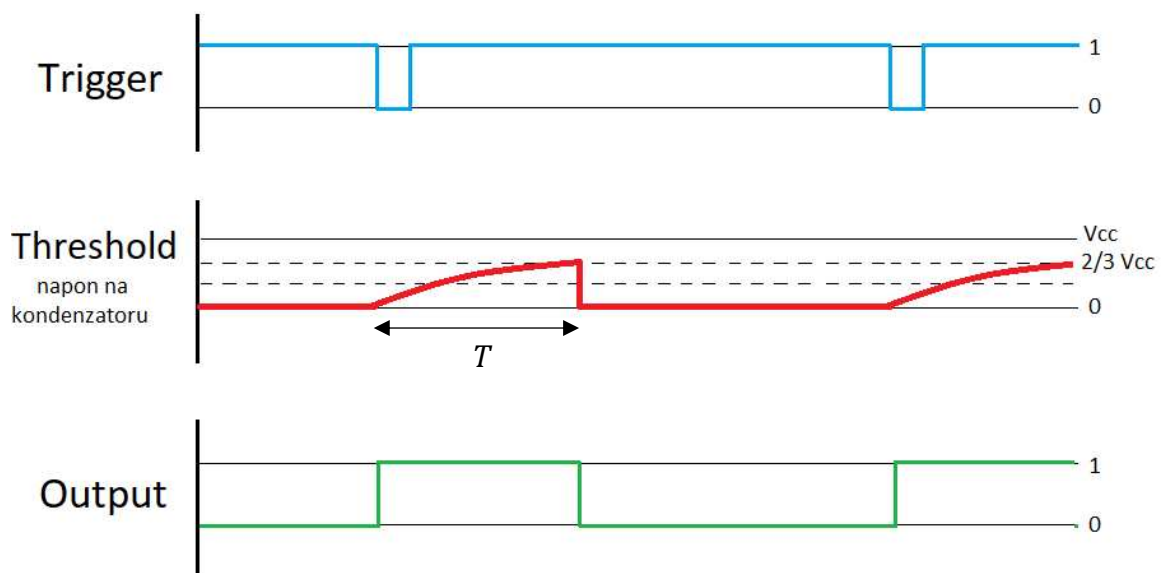
Monostabil

Kako mu ime sugerira, radi se multivibratoru s „Mono“ odnosno jednim stabilnim stanjem. Drugo stanje tog multivibratora nije nestabilno već ga zovemo kvazistabilnim. Kvazistabilno stanje je takvo stanje koje se mijenja s vremenom po nekom poznatom ili predvidljivom uzorku. Tu ipak treba biti oprezan jer ako bi koristili točno tu definiciju kvazistabilnog stanja, za monostabil bi lako mogli zaključiti da su mu stanja na izlazu stabilna (vidi sliku (24)). Zato ćemo malo proširiti definiciju. Iako su oba izlazna stanja monostabila stabilna po iznosu napona, nisu oba stabilni po trajanju. Točnije, jedno od stanja je stabilno tj. traje dok god ne pritisnemo tipkalo, nakon čega počinje kvazistabilno stanje koje traje određeni period T .

Ovakvi se sklopovi stoga pretežito koriste kao timeri jer je trajanje kvazistabilnog stanja moguće lako i veoma precizno podesiti vanjskim RC krugom odnosno odabirom iznosa otpora i kapaciteta tih elemenata.



Slika (23) - Električna shema monostabila s vremenskim sklopom 555.



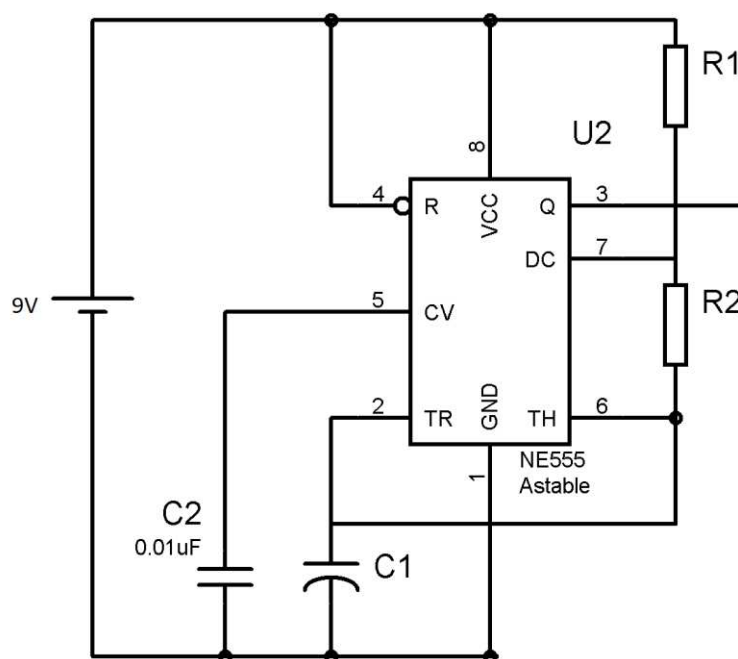
Slika (24) - logička stanja izlaza monostabila u ovisnosti o padajućem bridu ulaznog signala na pinu Trigger i naponu na kondenzatoru spojenom na pin Threshold.

Trajanje kvazistabilnog stanja monostabila ovisi o iznosima R_1 i C_1 . Vrijedi:

$$T = \ln(3)R_1C_1. \quad (54)$$

Astabil

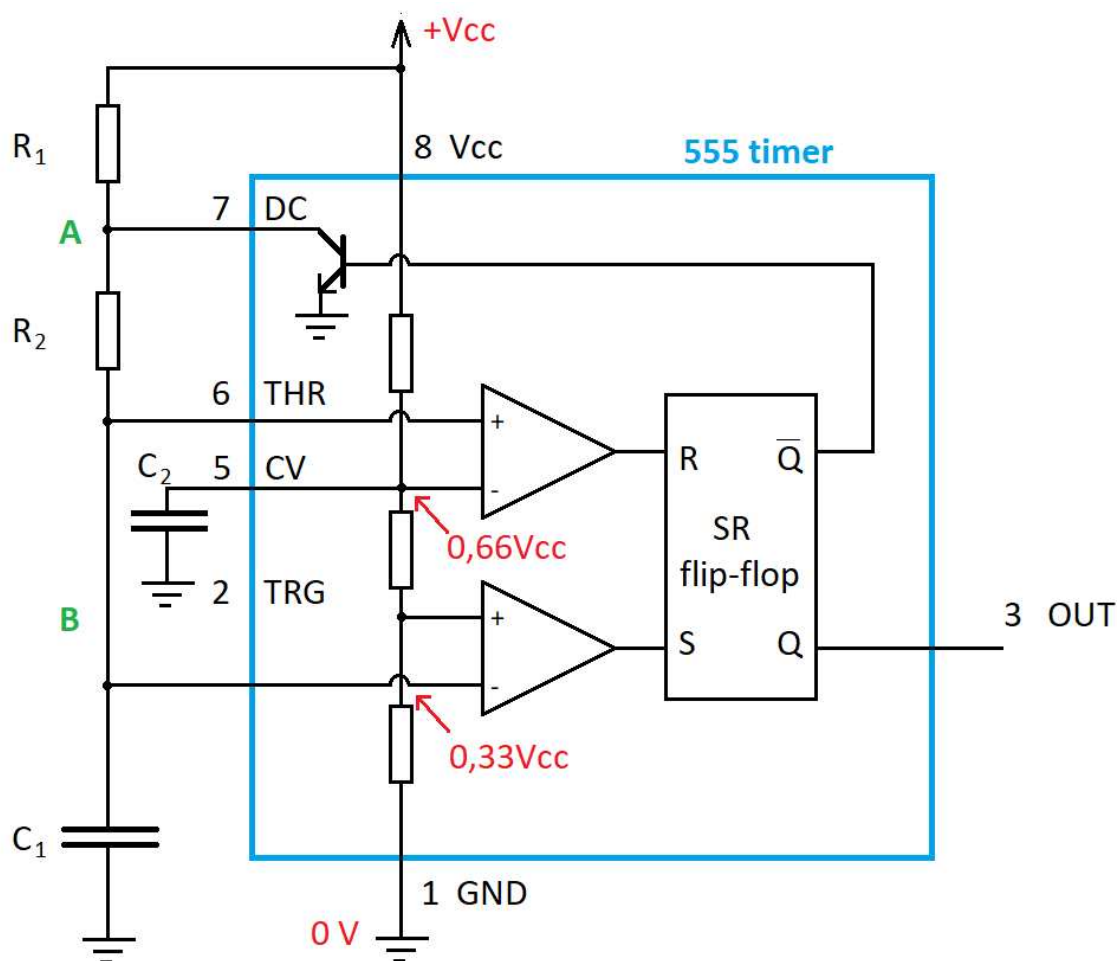
S bistabilom i monostabilom glavno svojstvo izlaza bilo je da su stanja stabilna. No tema ovog rada su električni oscilatori, što je upravo glavna karakteristika izlaza astabila. Astabil po svojem nazivu sugerira da nemamo niti jedno stabilno stanje što je upravo i stvarni slučaj. Ponovno je potrebno napomenuti da se radi o vremenski kvazistabilnim stanjima tj. biti će stabilni po iznosu napona, ali trajanje ni jednog stanja neće biti trajno već će biti određeno RC mrežom kao i kod monostabila.



Slika (25) - Električna shema astabila s vremenskim sklopom 555.

Pri pogledu na električnu shemu astabila (25) primjećujemo nedostatak vanjskog okidača u obliku sklopke ili tipkala. Štoviše, vidimo kako je pin Trigger, koji služi za okidanje kvazistabilnog stanja, spojen na RC mrežu otpornika R_1 , R_2 i C_1 . Zaključak je da

napon na kondenzatoru C_1 služi kao okidač za oba kvazistabilna stanja. Za precizniju i zorniju analizu koristiti ćemo pojednostavljenu shemu (17), ali sada spojenu s vanjskom RC mrežom u konfiguraciju astabil (26).



Slika (26) – Pojednostavljena shema 555 u konfiguraciji astabil.

Tri neoznačena otpornika unutar pojednostavljene sheme predstavljaju djelitele napona napajanja V_{cc} . Operacijska pojačala unutar vremenskog sklopa 555 imaju ulogu komparatora. Ako je napon na pozitivnom ulazu veći od napona na negativnom ulazu izlaz će biti logička jedinica (u našem slučaju V_{cc}). Ako je iznos napona na pozitivnom ulazu manji od napona na negativnom ulazu komparatora izlaz će biti logička nula (u našem slučaju 0 volti). Krenemo li od pina 8 prema pinu 1 vidimo da će nakon svakog otpornika

potencijal pasti za jednu trećinu iznosa V_{cc} . Uloga kondenzatora C_2 je filtriranje bilo kakvih šumova u signalu zbog vanjskih utjecaja, kako ne bi utjecali na izlaz astabila.

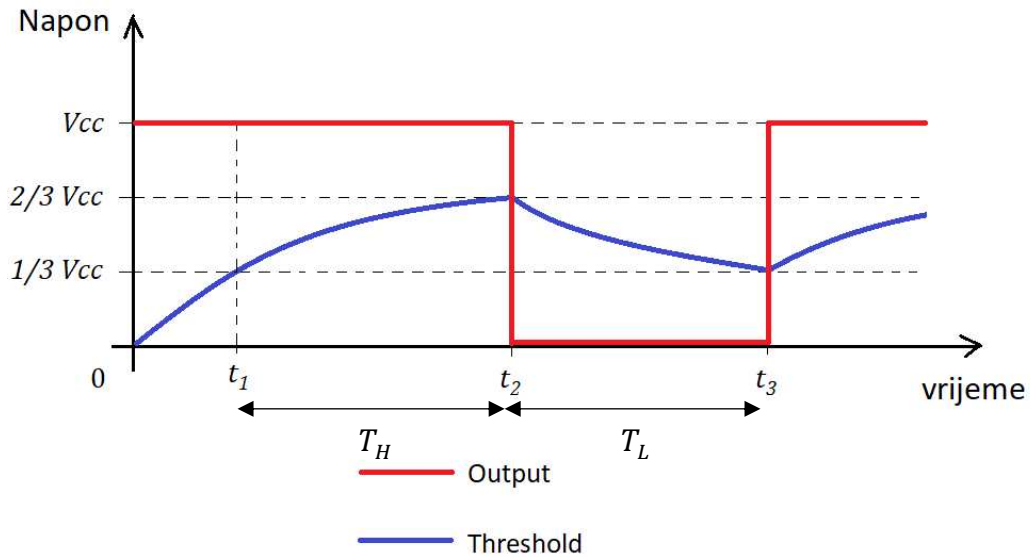
Točke A i B predstavljaju čvorišta s potencijalima U_A i U_B . U trenutku priključenja napona napajanja i uz pretpostavku da je kondenzator C_1 potpuno izbijen tom trenutku, vrijediti će $U_B = 0 V$. U kojem se stanju tada nalazi izlaz 3? Donji komparator se će na svom izlazu dati logičku jedinicu, jer je pozitivni ulaz na višem potencijalu ($0,33V_{cc}$) od negativnog ulaza (0 volti). Gornji komparator će na svom izlazu dati logičku nulu, jer se pozitivni ulaz nalazi na nižem potencijalu (0 volti) nego negativni ulaz ($0,66V_{cc}$). Vidimo da se S ulaz SR flip-flopa nalazi na logičkoj jedinici, a R ulaz SR flip-flopa se nalazi na logičkoj nuli. Prema tablici (2) vidimo da se izlaz Q nalazi u stanju logičke jedinice, a izlaz \bar{Q} u stanju logičke nule (slika (27), trenutak t_1).

Kondenzator C_1 će se početi nabijati, te će se U_B povećavati. U trenutku kada vrijednost U_B prijeđe vrijednost $0,33V_{cc}$, na S ulazu „Set“ SR flip-flopa biti će logička nula, no „Reset“ će i dalje ostati nepromijenjen, sve dok iznos U_B ne prijeđe vrijednost $0,66V_{cc}$. Oba ulaza SR flip-flopa se sad nalaze u stanju 0, te prema tablici (2) vidimo da se ništa ne mijenja.

Prva promjena događa se u trenutku kada je $U_B > 0,66V_{cc}$. U tom se trenutku t_2 izlaz gornjeg komparatora postavlja u logičku jedinicu, zbog čega se Q izlaz flip-flopa postavlja u logičku nulu, a izlaz \bar{Q} u stanje logičke jedinice. Ta logička jedinica „otvara“ NPN bipolarni tranzistor odnosno otpor između emitera (pin 7) i kolektora koji je spojen na uzemljenje (0 volti) postaje zanemariv, te sva struja izvora napajanja se preusmjerava kroz pin 7 te vrijedi $U_A = 0 V$. To znači da se kondenzator C_1 počinje izbijati, napon U_B počinje padati, te se izlaz prvog komparatora opet postavlja u stanje logičke 0. Ponovno vidimo da SR flip-flop ne mijenja stanje, jer su mu oba ulaza postavljena u stanje logičke nule.

U trenutku t_3 kada $U_B < 0,33V_{cc}$, izlaz donjeg komparatora se postavlja u stanje logičke jedinice, otpor između pina 7 i uzemljenja postaje veoma velik, kondenzator C_1 se

počinje ponovno nabijati te ciklus počinje iznova kao od trenutka t_1 . Time smo dobili električni oscilator kojemu izlazni napon ne titra prateći oblik sinusoide već pravokutni oblik.



Slika (27) - logička stanja izlaza astabila u ovisnosti o potencijalu na kondenzatoru C_1 odnosno pinu 6 – Threshold.

Koristeći RC mrežu tj. odabirom vrijednosti otpora R_1 i R_2 i kapaciteta kondenzatora C_1 definiramo trajanje prvog kvazistabilnog stanja T_H , kada se izlaz astabila nalazi u stanju logičke jedinice:

$$T_H = t_2 - t_1 = \ln(2)(R_1 + R_2)C_1. \quad (55)$$

Trajanje drugog kvazistabilnog stanja T_L , kada se izlaz astabila nalazi u stanju logičke nule, definiramo s:

$$T_L = t_3 - t_2 = \ln(2)R_2C_1, \quad (56)$$

iz čega slijedi da je ukupan period titranja izlaznog signala astabila jednak:

$$T = T_H + T_L. \quad (57)$$

U praksi se, u slučaju monostabila i astabila, željeno trajanje kvazistabilnih stanja obično postiže odabirom različitih iznosa kapaciteta kondenzatora RC mreže, dok iznose otpora držimo fiksnim, iako je moguće isto postići i odabirom različitih otpornika. To se obično izbjegava kako slučajni odabir otpornika premalog otpora ne bi rezultirao neželjeno velikim iznosima struje kroz vremenski sklop 555 zbog čega on može pregoriti. U slučaju monostabila, standardni iznos otpora otpornika R_1 je oko 100 k Ω , a u slučaju astabila standardni iznosi su obično $R_1 = 1$ k Ω i $R_2 = 100$ k Ω .

Izrada

Multivibratori koje smo obradili u ovom radu mogu se izraditi na nekoliko načina, ovisno o financijskim mogućnostima ustanove ili edukatora koji želi ovu temu približiti učenicima ili studentima. Također ovisi i o predznanju i prethodnom iskustvu u izradi električnih sklopova, iako autor ovog rada smatra da krivulja učenja nije prestrma te bi se i potpuno neiskusnoj osobi vrijedilo okušati u izradi.

Prvi i ujedno najlakši način izrade spomenutih multivibratora je koristeći univerzalnu testnu pločicu, eng. Breadboard. Za izradu sklopa tom metodom nije potreban skoro nikakav poseban alat, osim možda rezaćih kliješta i kliješta za savijanje.

Drugi način je malo teži, te iziskuje rad s potencijalno opasnim alatima ukoliko se ne pristupa s oprežnošću i odgovornošću, ali može biti vizualno atraktivniji i zorniji za objašnjavanje rada. Svodi se na korištenje univerzalne pločice za lemljenje na kojoj se zalemljuju svi potrebni elementi i električni vodovi.

Treći i najteži način je izrade posebne tiskane pločice fotopostupkom i jetkanjem, uz prethodni dizajn rasporeda elemenata i vodova korištenjem posebnog softvera za dizajn PCB pločica. Iako sigurno najzahtjevniji od ta tri načina, pruža najtrajniji i najotporniji proizvod, vizualno najjasniji za objašnjavanje i rad.

Prikazati ćemo izradu na sva tri spomenuta načina. Potreban materijal neovisan o načinu izrade je:

1) Elektroničke komponente

a. Bistabil

- i. NE555 ili LN555 – 1kom,
- ii. Otpornici 10 k Ω – 2kom, 220 Ω - 1kom, 100 k Ω – 1kom,
- iii. Kondenzatori 10 nF– 1kom,
- iv. Tipkalo – 2kom,
- v. Napajanje, 9V baterija ili drugo – 1kom,
- vi. LED dioda 5mm.

b. Monostabil

- i. NE555 ili LN555 – 1kom,
- ii. Otpornici 100 k Ω ili 10 k Ω – 1kom, 10 k Ω – 1kom, 220 Ω – 1kom,
- iii. Kondenzator 10 nF – 1kom, drugi po želji,
- iv. Tipkalo – 1kom,
- v. Napajanje, 9V baterija ili drugo – 1kom,
- vi. LED dioda 5mm.

c. Astabil

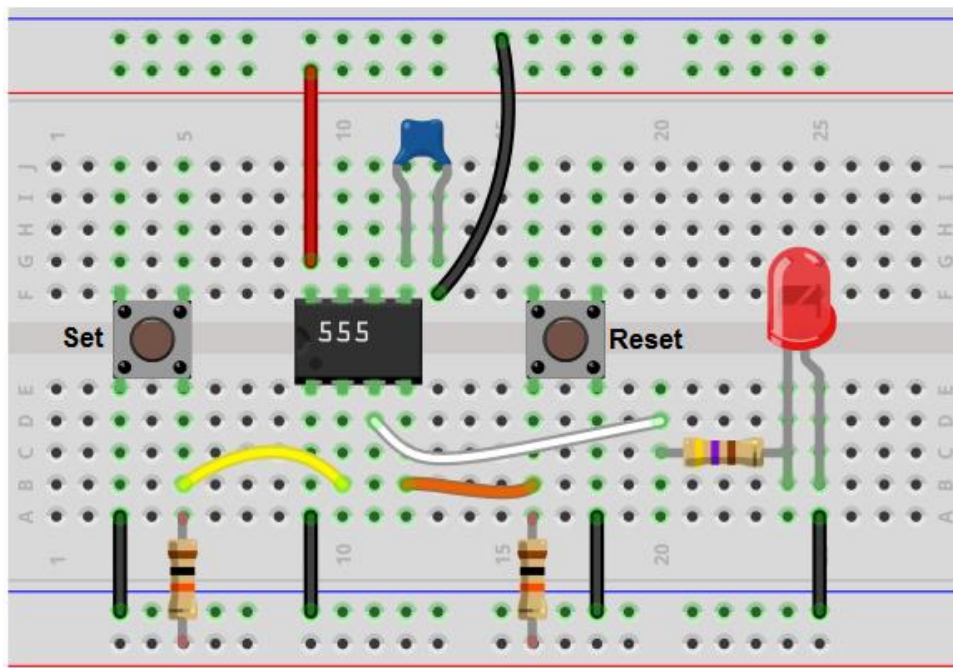
- i. NE555 ili LN555 – 1kom,
- ii. Otpornici 100 k Ω – 1kom, 1 k Ω – 1kom, 220 Ω – 1kom,
- iii. Kondenzator 10 nF – 1kom, drugi po želji,
- iv. Napajanje, 9V baterija ili drugo – 1kom,
- v. LED dioda 5mm.

Izrada korištenjem BreadBoard-a

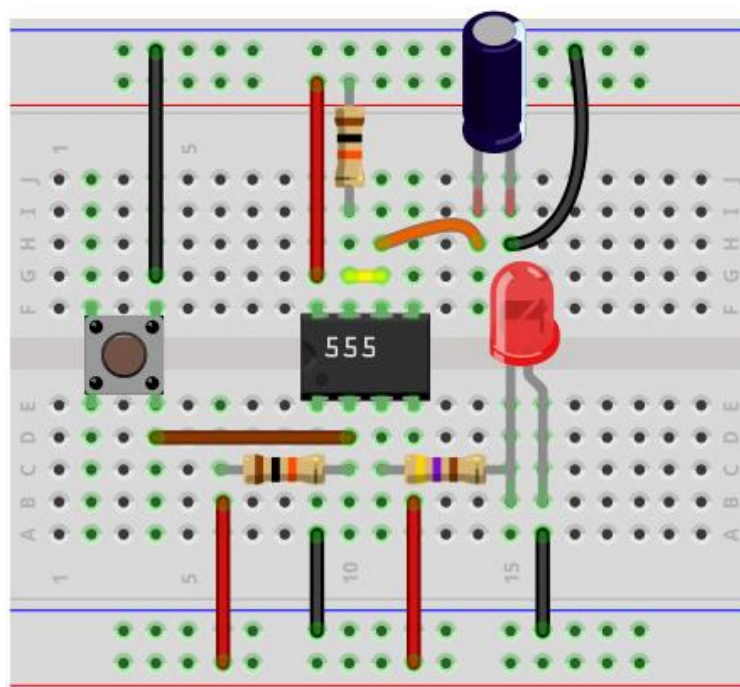
Potreban materijal za izradu:

- 1) Univerzalna testna pločica – Breadboard,
- 2) Vodljiva žica,
- 3) Kliješta za rezanje i savijanje žice,
- 4) Elektroničke komponente 1a, 1b ili 1c, ovisno o tome koji multivibrator izrađujemo.

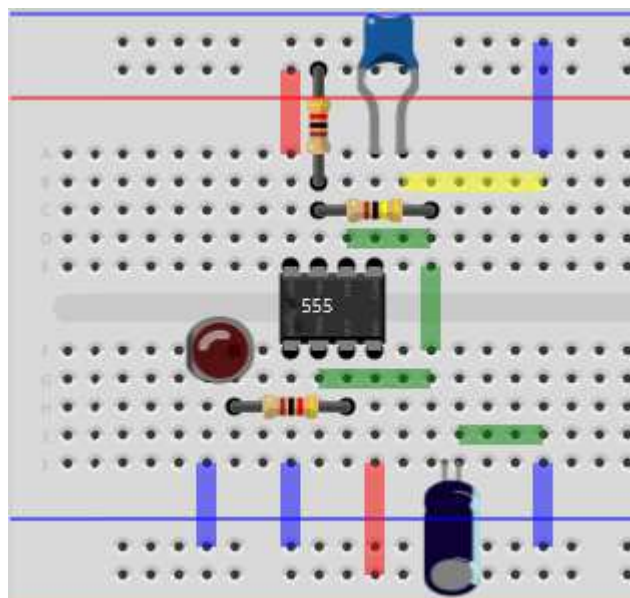
Postupak izrade je jednostavan, potrebno je samo posložiti elemente prema slikama u ovom poglavlju te spojiti pozitivan pol baterije s kontaktima označenim crvenom linijom, te negativni pol s kontaktima označenim plavom linijom.



Slika (28) – električni oscilator s vremenskim sklopom 555 u konfiguraciji bistabil složen korištenjem univerzalne pločice – Breadboard.



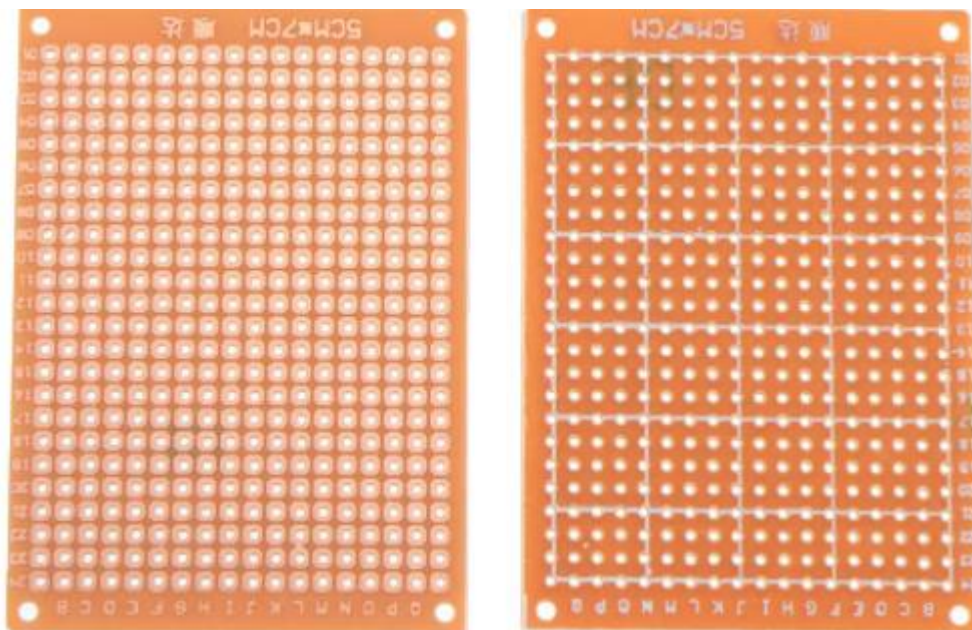
Slika (29) – električni oscilator s vremenskim sklopom 555 u konfiguraciji monostabil složen korištenjem univerzalne pločice – Breadboard.



Slika (30) – električni oscilator s vremenskim sklopom 555 u konfiguraciji astabil složen korištenjem univerzalne pločice – Breadboard.

Izrada korištenjem univerzalne pločice

Univerzalna tiskana pločica može se kupiti u raznim veličinama, no za ovaj projekt dovoljna nam je i veličine 5 cm s 7 cm.

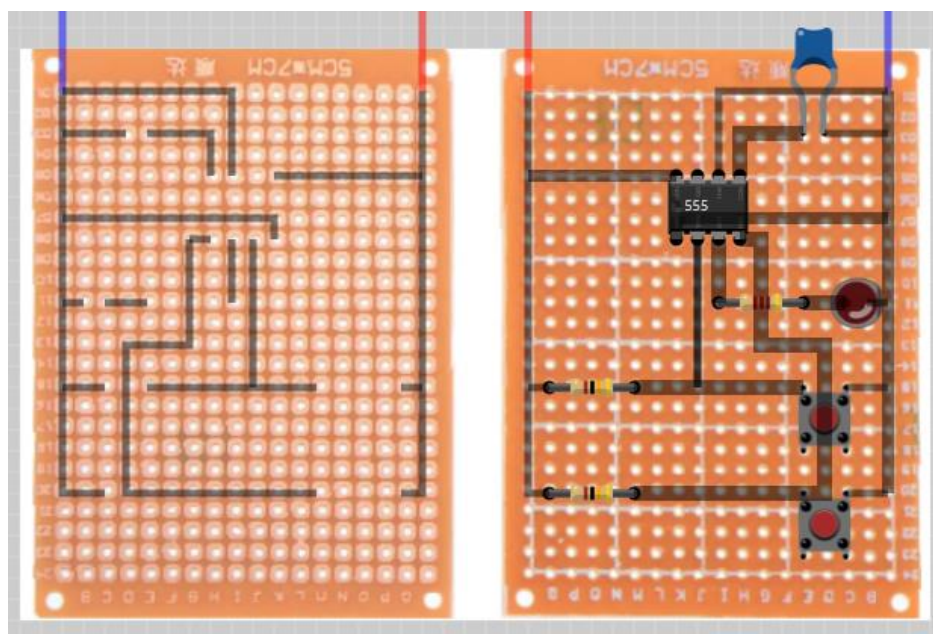


Slika (30) – univerzalna pločica za lemljenje.

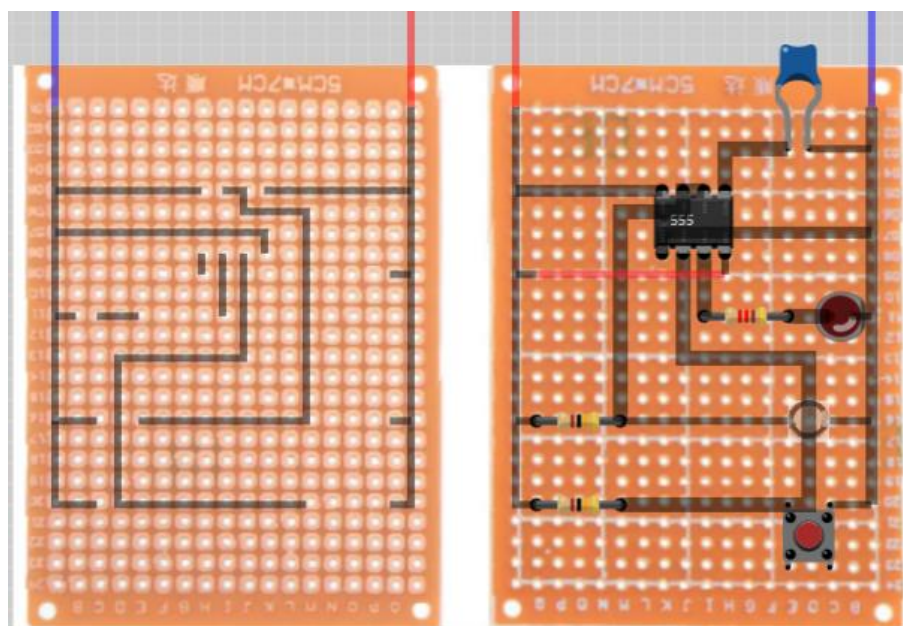
Prednost takve pločice u usporedbi s Breadboard-om je ta što se lemljenjem stvara čvršća veza elementa s cijelim krugom, pa je rizik od kratkog spoja puno niži. Nedostatak je taj što je potrebno posjedovati vještinu lemljenja te je potreban određeni alat.

Potreban materijal za izradu:

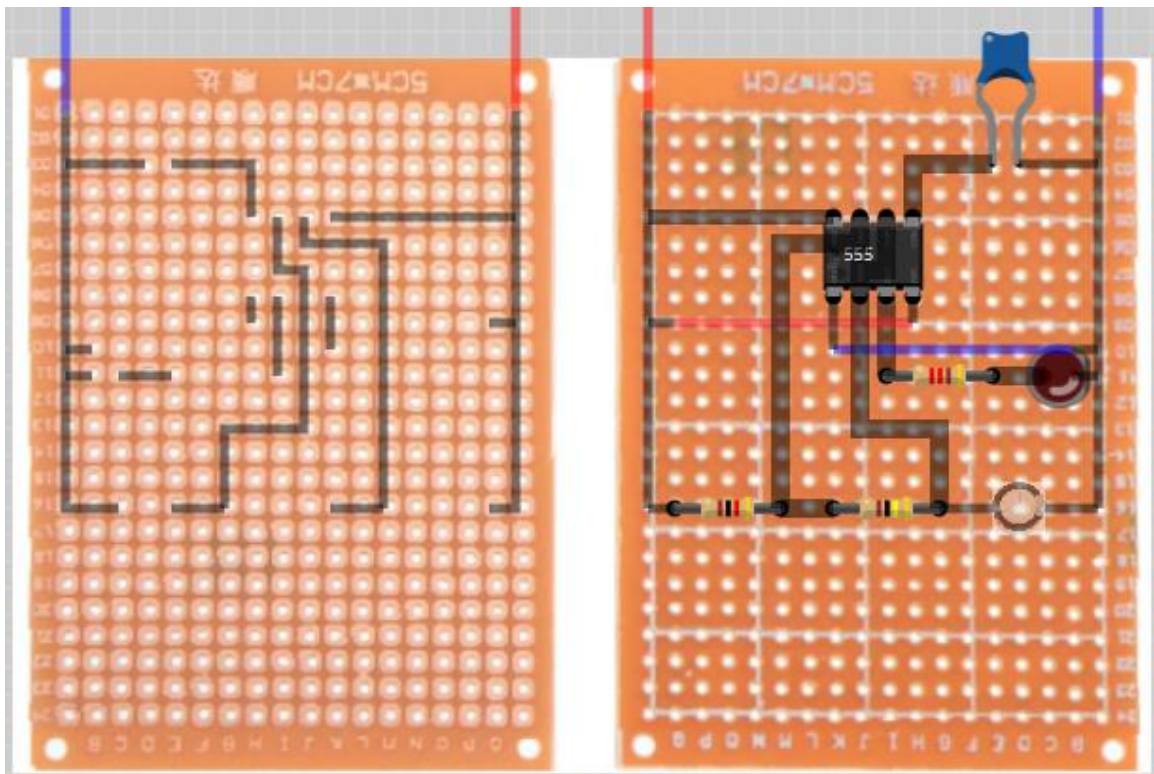
- 1) Univerzalna testna pločica – Breadboard,
- 2) Vodljiva žica i žica za lemljenje,
- 3) Kliješta za rezanje i savijanje žice,
- 4) Lemilica,
- 5) UV lampa ili žarulja sa žarnom niti jača od 100 W,
- 6) Elektroničke komponente 1a, 1b ili 1c, ovisno o tome koji multivibrator izrađujemo.



Slika (31) - električni oscilator s vremenskim sklopom 555 u konfiguraciji bistabil složen korištenjem univerzalne pločice za lemljenje, donja strana s vodovima (lijevo), strana s elementima (desno).



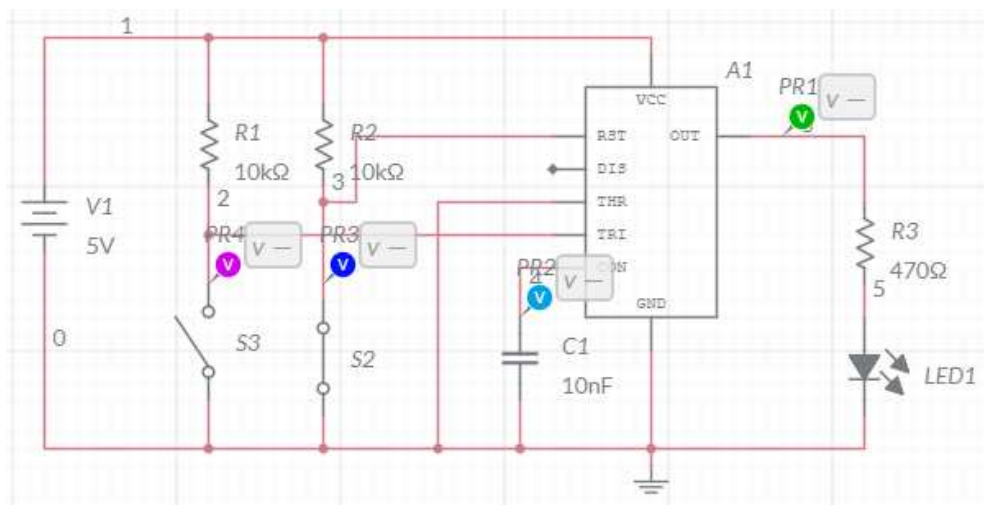
Slika (32) - električni oscilator s vremenskim sklopom 555 u konfiguraciji monostabil složen korištenjem univerzalne pločice za lemljenje, donja strana s vodovima (lijevo), strana s elementima (desno).



Slika (33) - električni oscilator s vremenskim sklopom 555 u konfiguraciji astabil složen korištenjem univerzalne pločice za lemljenje, donja strana s vodovima (lijevo), strana s elementima (desno).

Izrada korištenjem tiskane pločice

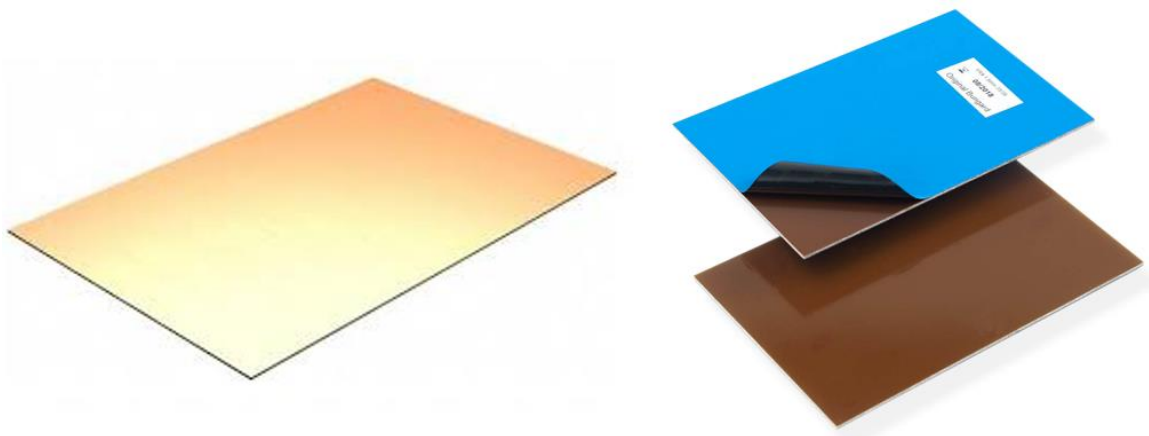
Izrada upotrebom tiskane pločice iziskuje najveći broj potrebnih kompetencija odnosno vještina. Prvi dio izrade sastoji se od dizajna sklopa u nekom od softvera za dizajn električnih krugova, poput Electronic Workbench, Circuitlab ili Multisim. Takvi softveri postoje i u besplatnim inačicama te ih je često moguće koristiti i u online verziji bez potrebe za prethodnom instalacijom na računalo. Veoma su korisni i za testiranje rada sklopa, prije same izrade.



Slika (34) – primjer online editora elektroničkih krugova – Circuitlab.

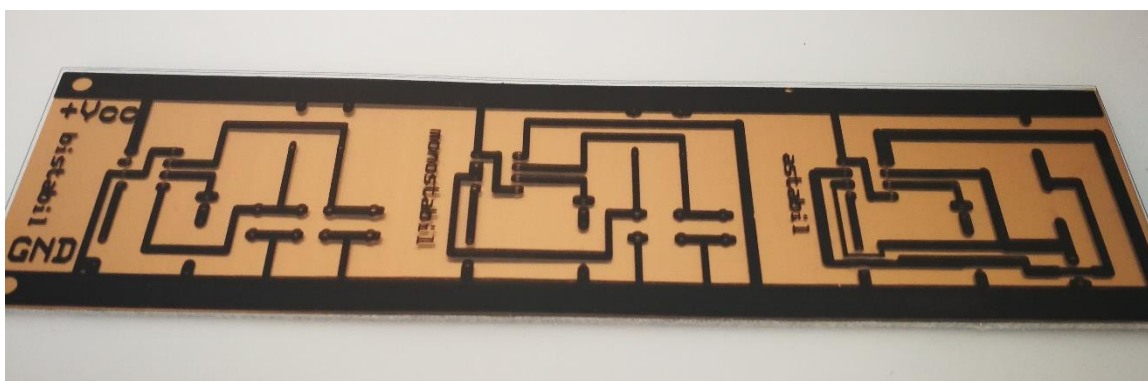
Mnogi od tih softvera imaju integriranu opciju pretvorbe električne sheme u PCB layout odnosno u shemu fizičkih položaja elektroničkih elemenata i vodova na pločici. Postoje također i posebni softveri koji se koriste isključivo za izradu PCB pločica poput ExpressPCB koji je kombiniran sa softverom SchematicPCB te je moguće ili odmah izraditi PCB layout pločice ili prvo dizajnirati električnu shemu te iz nje izvesti PCB layout.

U prilogima se nalazi PCB layout za izradu pločice, no potičem čitaocima da se okušaju i u samostalnoj izradi iste. Nakon izrade i printanja tog PCB layouta, on se postavlja na tiskanu pločicu. Bitno je pri tome naglasiti da je potrebno koristiti tiskane pločice s već tvornički nanesenim slojem laka ili samostalno nanijeti posebni UV osjetljivi lak na pločicu. Pločice s već nanesenim UV osjetljivim lakom je lako za prepoznati po zaštitnom sloju od plave gumirane plastike. Za ovaj rad koristiti ćemo jednoslojnu tiskanu pločicu, iako je moguće kupiti i dvoslojnu i višeslojnu tiskanu pločicu.

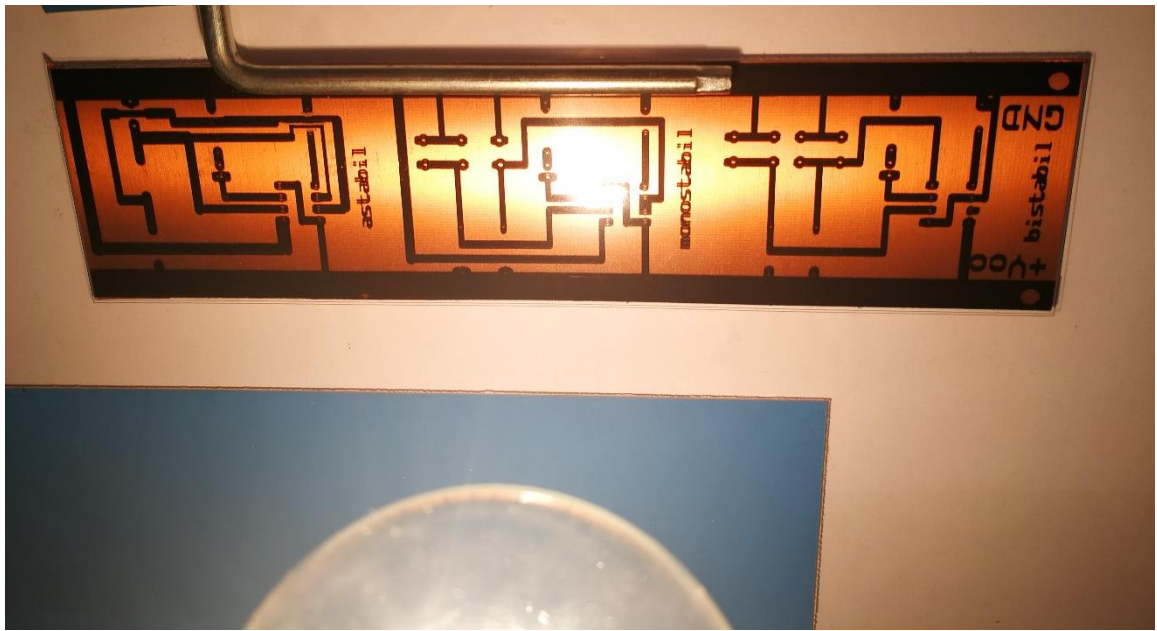


Slika (35) – Tiskane pločice bez (lijevo) i s UV osjetljivim lakom (desno)

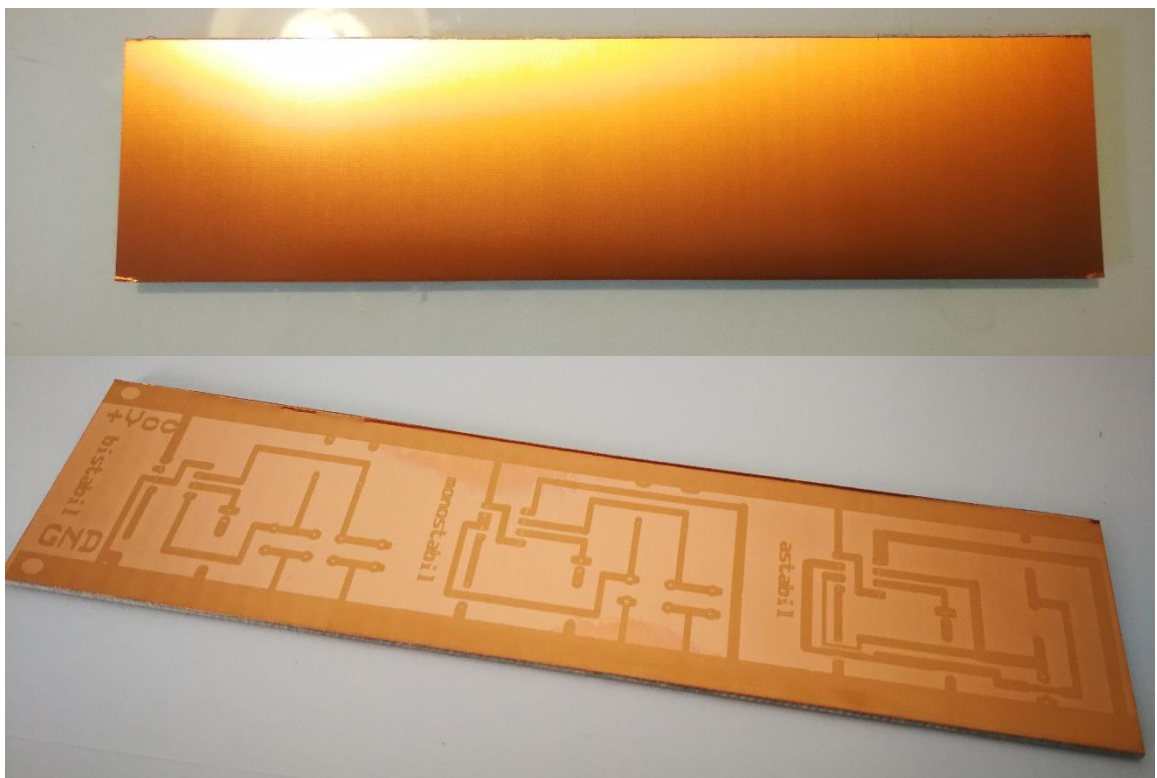
Nakon što s pločice skinemo zaštitni sloj, na nju stavljamo PCB layout isprintan na prozirnom ili masnom papiru, na takav način da je opisni tekst dobro orijentiran prema nama. Preko tog papira obasjamo pločicu UV lampom. Trajanje osvjetljavanja ovisi o vrsti lampe, no obično je oko 15 do 30 min na udaljenosti 30 cm od pločice. Ako nemamo lampu, možemo koristiti i žarulju sa žarnom niti od 100 W ili jaču. Točno trajanje je najbolje odrediti pomoću par testnih primjeraka pločice. UV svjetlo će promijeniti kemijski sastav laka na takav način da će sav obasjani lak biti lako izjeden s lužinom u sljedećem dijelu izrade, dok će sav neobasjani lak izdržati nagrizanje lužine te će preostati samo bakreni sloj ispod neobasjanog laka.



Slika (36) – postavljanje folije na tiskanu pločicu.



Slika (37) – tretiranje laka obasjavanjem UV lampom.



Slika (38) – konačni izgled obasjane pločice prije (gore) i nakon uranjanja u lužinu (dolje).

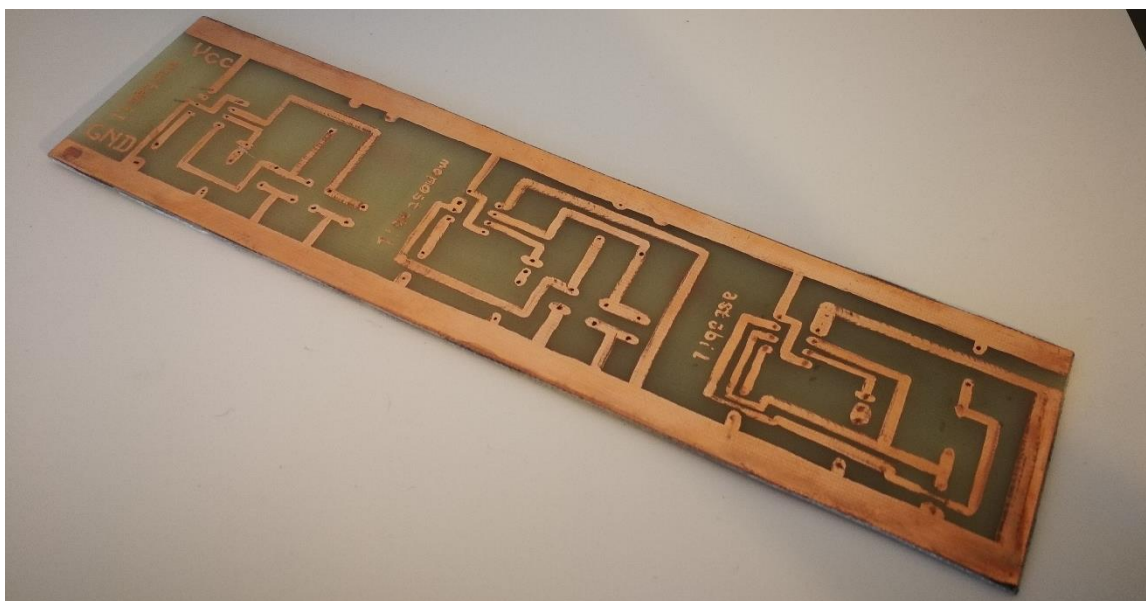
Pločicu nakon obasjavanja UV lampom uranjamo u lužinu, najčešće natrijev hidroksid – NaOH, kolokvijalno poznat pod nazivom kaustična soda, koji reagira s osvijetljenim lakom te ga otapa. Na pločici će nam preostati samo neobasjan lak. Sad je pločica spremna za jetkanje u kiselini.

Ukoliko nam nije bitno jesu li vodovi savršeno ravni, cijeli postupak osvjetljavanja pločice i otapanja laka u lužini možemo zamijeniti crtanjem vodova rukom. Pri tome je bitno samo prethodno skinuti sav lak ili koristiti tiskane pločice koje nisu prethodno tretirane fotosjetljivim lakom te oslikati vodove trajnim markerom.

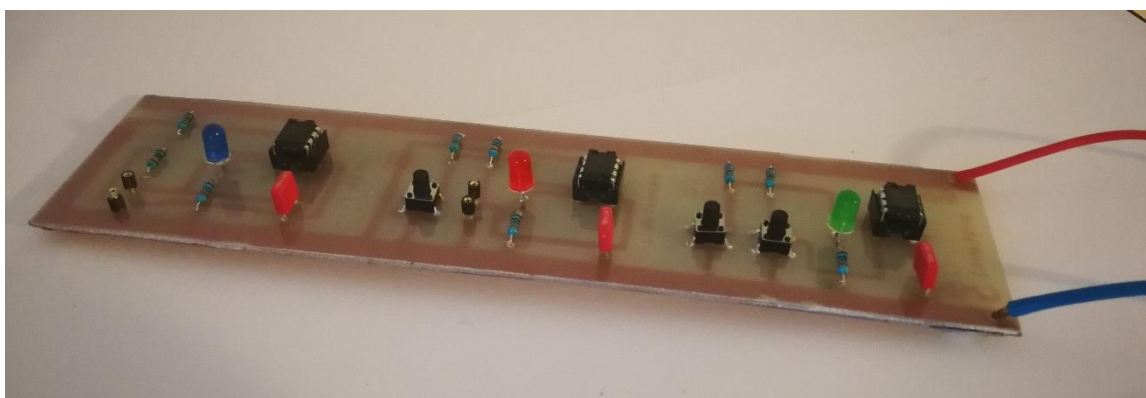
Za otopinu za jetkanje možemo koristiti razne preparate, ali najčešće se koristi mješavina vode, solne kiseline HCl koncentracije 30% i vodikovog peroksida H₂O₂ koncentracije 30% u omjeru miješanja 7:3:0,1-0,5 ili otopina feriklorida FeCl₃. Moguće je korištenje i drugačijih koncentracija solne kiseline i vodikovog peroksida, no onda je potrebno prilagoditi omjer miješanja.

Veoma je važno napomenuti da se jetkanje treba raditi u dobro provjetrenoj prostoriji jer postupak jetkanja oslobađa plin klor koji je otrovan. Sam postupak jetkanja bakrene pločice ne bi trebao trajati dulje od 10-ak minuta, ovisno o otopini koju koristimo. Nakon dovršetka jetkanja potrebno je finim brusnim papirom (granulacija 400 ili viša) ili čeličnom vunom pobrusiti sav preostali fotosjetljivi lak i onečišćenja s pločice.

Na kraju cijelog postupka, kada dobijemo dovršenu tiskanu pločicu, jedino nam preostaje probušiti rupe kroz pločicu vodovima gdje ćemo zalemiti odgovarajuće elemente na odgovarajuće mjesto, zalemiti elemente na pločicu te eventualno provjeriti postoje li prekidi i neželjeni kratki spojevi na pločici te spojiti sklop na izvor napajanja. Preporučljivo je nakon provjere ispravnosti sklopa donju stranu pločice s bakrenim slojem zaštititi premazom bezbojnog laka kako bi se bakar zaštitio od oksidacije te kako bi se spriječili potencijalni kratki spojevi.



Slika (39) – konačni izgled kiselinom jetkane pločice.



Slika (40) – završni proizvod – sklop dobiven upotrebom tiskane pločice.

Eksperimentalna provjera

Najbolji način učenikova odnosno studentova upoznavanja s tematikom je interaktivna upotreba sklopa. Stoga ćemo za svaki od multivibratora navesti idejne zadatke za testiranje funkcionalnosti opisanih električnih titrajnih krugova.

Zadatak 1: Bistabil

Cilj: učenici i studenti će pokušati kritičkim promišljanjem zaključiti kako prepoznati logičku funkcionalnost bistabila. Osim najosnovnijeg zaključka da jedna tipka pali a druga tipka gasi LED diodu, potrebno je i izraditi i popuniti tablicu svih mogućih kombinacija pritisnutih tipki, te probati otkriti radi li bistabil pri detekciji padajućeg ili rastućeg dijela ulaznog napona. Zadatak je potpuno otvorenog tipa te je osnovni cilj procijeniti razinu kritičkog razmišljanja učenika i studenta kao veličinu proporcionalnu kvantiteti i raznovrsnosti njihovih odgovora.

Sredstvo: Sklop bistabila bez oznaka na tipkalima, papir i olovka.

Trajanje: 15 min.

Zadatak:

- a) Pokušajte definirati koja je funkcija sklopa kojeg promatrate (bistabil).
- b) Pokušajte za sve kombinacije tipkala kojih se sjetite opisati što će se dogoditi sa svjetlećom diodom. Kreirajte tablicu koja opisuje ponašanje ovog sklopa.

Zadatak 2: Monostabil

Cilj: učenici i studenti će pokušati kritičkim promišljanjem prepoznati logičku funkcionalnost monostabila. Prepoznati će i definirati ovisnost trajanja kvazistabilnog stanja monostabila o vrijednostima elemenata RC mreže. Također će se prisjetiti označavanja pasivnih elemenata kondenzatora i otpornika u strujnom krugu.

Sredstvo: Sklop monostabila s oznakom elemenata RC mreže (u radu prije spomenuti R_1 i C_1 u električnoj shemi monostabila), multimetar s opcijom mjerenja otpora, nekoliko kondenzatora različitih kapaciteta, papir, olovka i ravnalo.

Trajanje: 35 min.

Zadatak:

- a) Na pločici se nalazi sklop monostabil. Prepoznajte i opišite njegovu funkciju u ovisnosti o pritisku na tipkalo.
- b) Na samom sklopu se nalaze dva elementa označena oznakama R_1 i C_1 . Koji su to elementi? Sjećate li se neke primjene i funkcije tih elemenata u strujnim krugovima? Sjećate li se nekih fizičkih svojstva tih elemenata?
- c) Izmjerite vrijednost R_1 multimetrom. Mijenjajte element označen s C_1 s drugim elementima koje ste dobili uz sklop. Obratite pozornost na orijentaciju spajanja tog elementa. Grafički prikažite ovisnost trajanja osvijetljenosti svjetleće diode o iznosu R_1 i C_1 . Pokušajte tu ovisnost matematički izraziti.

Zadatak 3: Astabil

Cilj: učenici i studenti će pokušati kritičkim promišljanjem prepoznati logičku funkcionalnost astabila. Prepoznati će i definirati ovisnost trajanja kvazistabilnih stanja astabila o vrijednostima elemenata RC mreže. Također će se prisjetiti označavanja pasivnih elemenata kondenzatora i otpornika u strujnom krugu.

Sredstvo: Sklop astabila s oznakom elemenata RC mreže (u radu prije spomenuti R_1 , R_2 i C_1 u električnoj shemi astabila), multimetar s opcijom mjerenja otpora, nekoliko kondenzatora različitih kapaciteta, papir, olovka i ravnalo.

Trajanje: 35 min.

Zadatak:

- a) Na pločici se nalazi sklop astabil. Prepoznajte i opišite njegovu funkciju.
- b) Na samom sklopu se nalaze tri elementa označena oznakama R_1 , R_2 i C_1 . Koji su to elementi? Sjećate li se neke primjene i funkcije tih elemenata u strujnim krugovima? Sjećate li se nekih fizičkih svojstva tih elemenata?
- c) Izmjerite vrijednost R_1 i R_2 multimetrom. Mijenjajte element označen s C_1 s drugim elementima koje ste dobili uz sklop. Obratite pozornost na orijentaciju spajanja tog elementa. Grafički prikažite ovisnost trajanja osvijetljenosti i neosvijetljenosti svjetleće diode o iznosu R_1 , R_2 i C_1 . Pokušajte tu ovisnost matematički izraziti.

Literatura

- [1] C. D. Simpson, *Industrial electronics*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1996.
- [2] Young, Freedman, Sears, Zemansky: *University Physics*, Pearson Education, 2015.
- [3] D. J. Griffiths, *Introduction to electrodynamics*, Pearson Education, 2012.
- [4] E. M. Purcell, *Electricity and magnetism*, McGraw - Hill, 1984.
- [5] Ministarstvo znanosti i obrazovanja, *Odluka o donošenju kurikuluma za nastavni predmet fizike za osnovne škole i gimnazije u Republici Hrvatskoj*, Narodne novine, 2019.
- [6] Harmonijski oscilator – kružno gibanje – titranje atoma u kristalima, dostupno na https://www.pmf.unizg.hr/_download/repository/Harmonicki_oscilator-kruzno_gibanje-Titranje_atoma_u_kristalima.pdf, (rujan 2020.)
- [7] A. Šarčević, *Elektroničke komponente i sklopovi*, Centar odgoja i usmjerenog obrazovanja za elektroniku, preciznu mehaniku i optiku Ruđer Bošković, 1987.

Sažetak

Ovaj rad ima namjeru približiti pojam električnih titrajnih krugova, njihovu teorijsku pozadinu i praktičnu izradu svim učenicima i studentima, od osnovne škole do razine visokog obrazovanja. Sadržaj je osmišljen tako da je nastavnicima i profesorima lako samostalno kreirati zadatke i ciljeve učenja koristeći opisane sklopove, iskorištavajući dio ili sve razine znanja, od prepoznavanja do sinteze. Želja je autora potaknuti kreativnost kako učenika i studenata tako i nastavnika i profesora u nastavi.

Summary

This paper is intended for pupils and students in all educational levels, from primary all the way to tertiary level, to become more familiar with electronic harmonic oscillators, their theoretical background and practical use. The content is designed in such a way that it is easy for teachers and professors to independently create tasks and learning goals using the described circuits, using part or all of the knowledge levels, from recognition to synthesis. The author's desire is to encourage the creativity of pupils and students as well as teachers and professors in teaching.

Životopis

Obrazovanje:

- Srednja škola Sesvete, tehničar za računalstvo, 2004. – 2008.
- Fakultet elektrotehnike i računarstva, 2008. – 2011.
- Prirodoslovno matematički fakultet, smjer matematika i fizika, nastavnički, 2011. – 2020.

Radno iskustvo

- Profesor matematike i fizike, Osnovna škola Grigora Viteza, siječanj 2017. – srpanj 2017.
- Pripravnik, Tokić d.o.o., kolovoz 2017. – siječanj 2018.
- Referent nabave, Tokić d.o.o., siječanj 2018. – travanj 2019.
- Viši specijalist održavanja zalihe, Tokić d.o.o., travanj 2019. – rujan 2019.
- Voditelj Lean-a, Tokić d.o.o., rujan 2019. - aktivno

Prilog 1 – Datasheet vremenskog sklopa 555

Timer

NE/SA/SE555/SE555C

DESCRIPTION

The 555 monolithic timing circuit is a highly stable controller capable of producing accurate time delays, or oscillation. In the time delay mode of operation, the time is precisely controlled by one external resistor and capacitor. For a stable operation as an oscillator, the free running frequency and the duty cycle are both accurately controlled with two external resistors and one capacitor. The circuit may be triggered and reset on falling waveforms, and the output structure can source or sink up to 200mA.

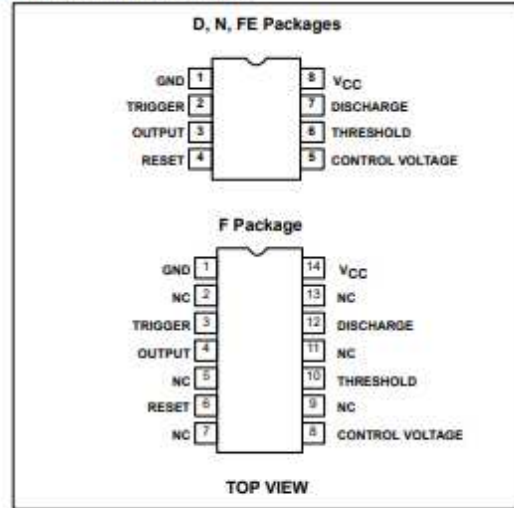
FEATURES

- Turn-off time less than 2µs
- Max. operating frequency greater than 500kHz
- Timing from microseconds to hours
- Operates in both astable and monostable modes
- High output current
- Adjustable duty cycle
- TTL compatible
- Temperature stability of 0.005% per °C

APPLICATIONS

- Precision timing
- Pulse generation
- Sequential timing
- Time delay generation
- Pulse width modulation

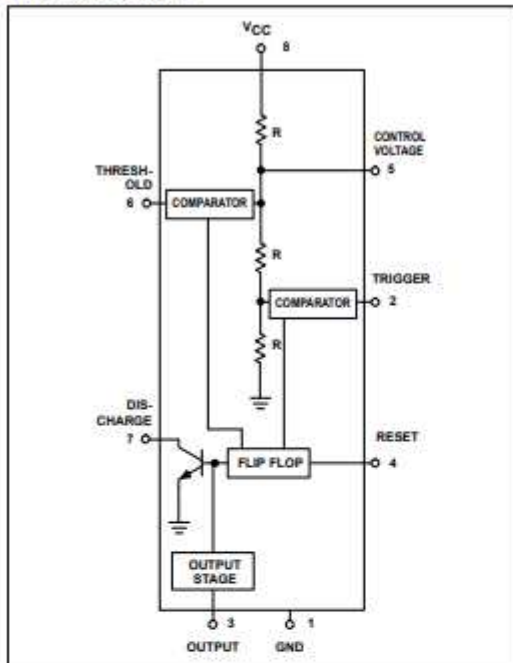
PIN CONFIGURATIONS



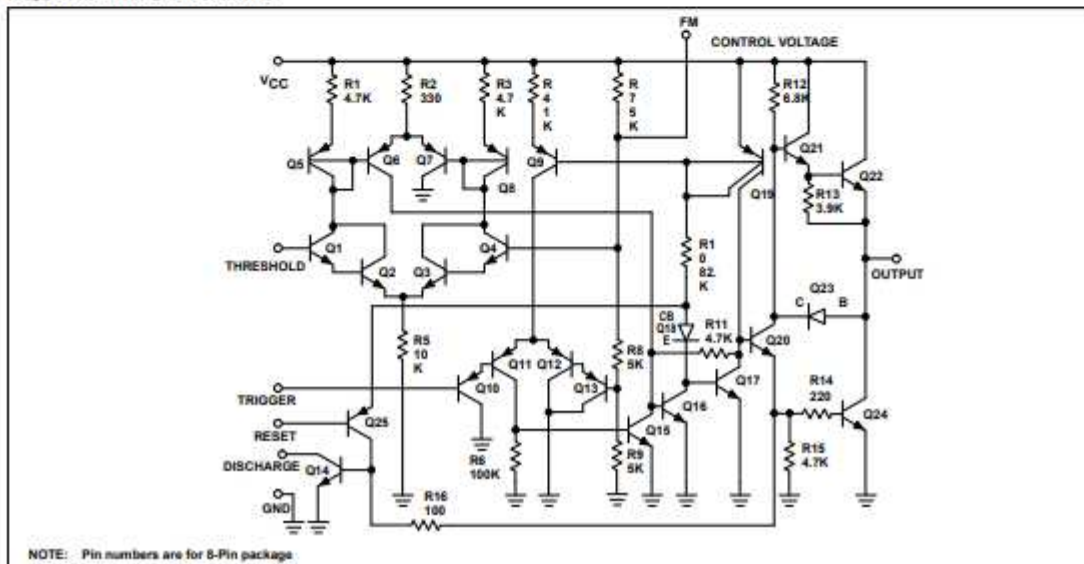
ORDERING INFORMATION

DESCRIPTION	TEMPERATURE RANGE	ORDER CODE	DWG #
8-Pin Plastic Small Outline (SO) Package	0 to +70°C	NE555D	0174C
8-Pin Plastic Dual In-Line Package (DIP)	0 to +70°C	NE555N	0404B
8-Pin Plastic Dual In-Line Package (DIP)	-40°C to +85°C	SA555N	0404B
8-Pin Plastic Small Outline (SO) Package	-40°C to +85°C	SA555D	0174C
8-Pin Hermetic Ceramic Dual In-Line Package (CERDIP)	-55°C to +125°C	SE555CFE	
8-Pin Plastic Dual In-Line Package (DIP)	-55°C to +125°C	SE555CN	0404B
14-Pin Plastic Dual In-Line Package (DIP)	-55°C to +125°C	SE555N	0405B
8-Pin Hermetic Cerdip	-55°C to +125°C	SE555FE	
14-Pin Ceramic Dual In-Line Package (CERDIP)	0 to +70°C	NE555F	0581B
14-Pin Ceramic Dual In-Line Package (CERDIP)	-55°C to +125°C	SE555F	0581B
14-Pin Ceramic Dual In-Line Package (CERDIP)	-55°C to +125°C	SE555CF	0581B

BLOCK DIAGRAM



EQUIVALENT SCHEMATIC



ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

SYMBOL	PARAMETER	RATING	UNIT
V _{CC}	Supply voltage		
	SE555	+18	V
	NE555, SE555C, SA555	+16	V
P _D	Maximum allowable power dissipation ¹	600	mW
T _A	Operating ambient temperature range		
	NE555	0 to +70	°C
	SA555	-40 to +85	°C
	SE555, SE555C	-55 to +125	°C
T _{STG}	Storage temperature range	-65 to +150	°C
T _{SOLD}	Lead soldering temperature (10sec max)	+300	°C

NOTES:

1. The junction temperature must be kept below 125°C for the D package and below 150°C for the FE, N and F packages. At ambient temperatures above 25°C, where this limit would be derated by the following factors:

D package 160°C/W
 FE package 150°C/W
 N package 100°C/W
 F package 105°C/W

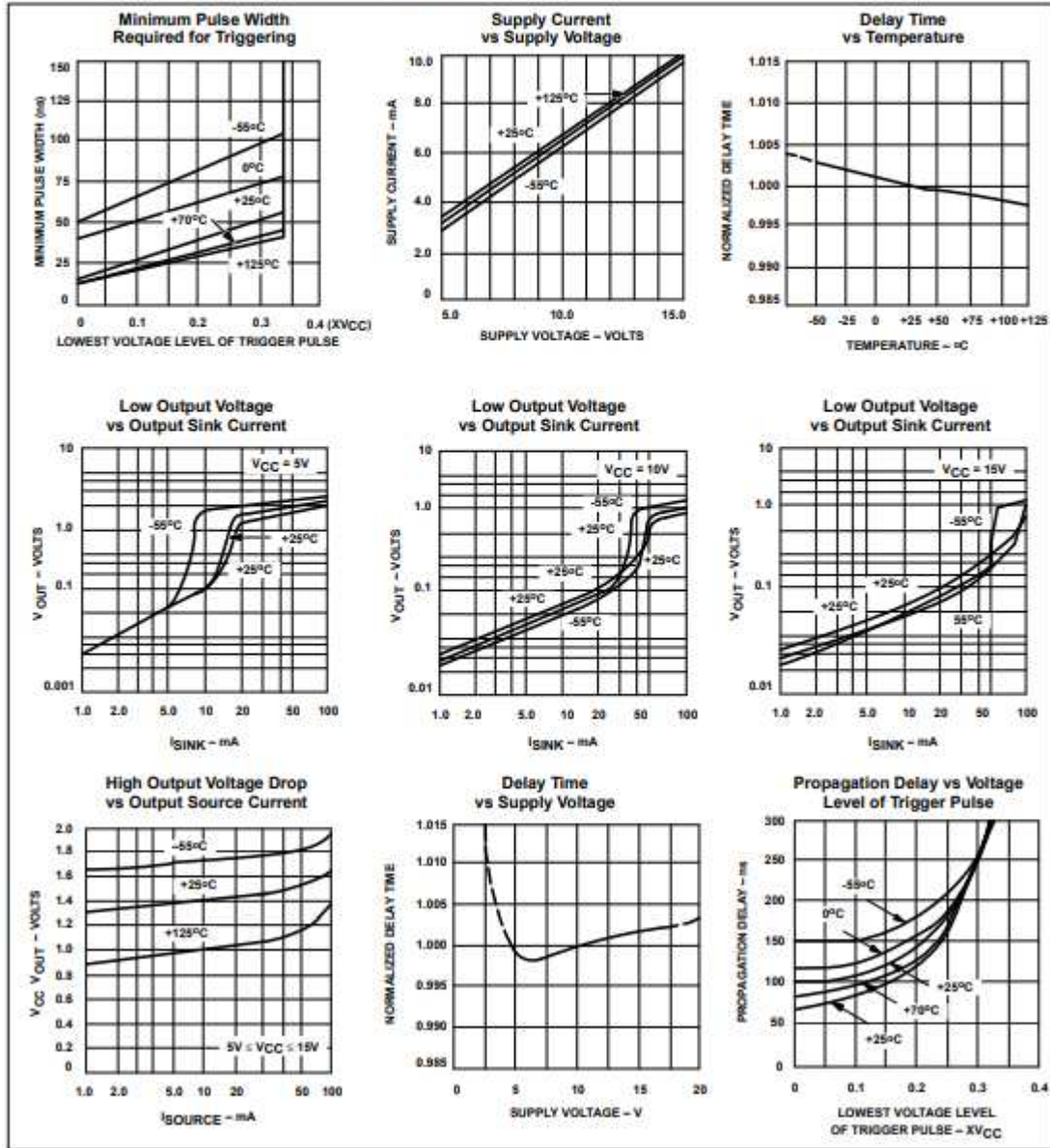
DC AND AC ELECTRICAL CHARACTERISTICST_A = 25°C, V_{CC} = +5V to +15 unless otherwise specified.

SYMBOL	PARAMETER	TEST CONDITIONS	SE555			NE555/SE555C			UNIT
			Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
V _{CC}	Supply voltage		4.5		18	4.5		16	V
I _{CC}	Supply current (low state) ¹	V _{CC} =5V, R _L =∞ V _{CC} =15V, R _L =∞		3 10	5 12		3 10	6 15	mA mA
t _M	Timing error (monostable)	R _A =2kΩ to 100kΩ C=0.1μF		0.5	2.0		1.0	3.0	%
Δt _M /ΔT	Initial accuracy ²			30	100		50	150	ppm/°C
Δt _M /ΔV _S	Drift with temperature Drift with supply voltage			0.05	0.2		0.1	0.5	%/V
t _A	Timing error (astable)	R _A , R _B =1kΩ to 100kΩ C=0.1μF		4	6		5	13	%
Δt _A /ΔT	Initial accuracy ²	V _{CC} =15V		0.15	0.6		0.3	1	ppm/°C
Δt _A /ΔV _S	Drift with temperature Drift with supply voltage			0.15	0.6		0.3	1	%/V
V _C	Control voltage level	V _{CC} =15V V _{CC} =5V	9.6 2.9	10.0 3.33	10.4 3.8	9.0 2.6	10.0 3.33	11.0 4.0	V V
V _{TH}	Threshold voltage	V _{CC} =15V V _{CC} =5V	9.4 2.7	10.0 3.33	10.6 4.0	8.8 2.4	10.0 3.33	11.2 4.2	V V
I _{TH}	Threshold current ³			0.1	0.25		0.1	0.25	μA
V _{TRIG}	Trigger voltage	V _{CC} =15V V _{CC} =5V	4.8 1.45	5.0 1.67	5.2 1.9	4.5 1.1	5.0 1.67	5.6 2.2	V V
I _{TRIG}	Trigger current	V _{TRIG} =0V		0.5	0.9		0.5	2.0	μA
V _{RESET}	Reset voltage ⁴	V _{CC} =15V, V _{TH} =10.5V	0.3		1.0	0.3		1.0	V
I _{RESET}	Reset current	V _{RESET} =0.4V		0.1	0.4		0.1	0.4	mA
	Reset current	V _{RESET} =0V		0.4	1.0		0.4	1.5	mA
V _{OL}	Output voltage (low)	V _{CC} =15V I _{SINK} =10mA I _{SINK} =50mA I _{SINK} =100mA I _{SINK} =200mA V _{CC} =5V I _{SINK} =8mA I _{SINK} =5mA		0.1 0.4 2.0 2.5	0.15 0.5 2.2		0.1 0.4 2.0 2.5	0.25 0.75 2.5	V V V V
V _{OH}	Output voltage (high)	V _{CC} =15V I _{SOURCE} =200mA I _{SOURCE} =100mA V _{CC} =5V I _{SOURCE} =100mA	13.0 3.0	12.5 13.3 3.3		12.75 2.75	12.5 13.3 3.3		V V V
t _{OFF}	Turn-off time ⁵	V _{RESET} =V _{CC}		0.5	2.0		0.5	2.0	μs
t _R	Rise time of output			100	200		100	300	ns
t _F	Fall time of output			100	200		100	300	ns
	Discharge leakage current			20	100		20	100	nA

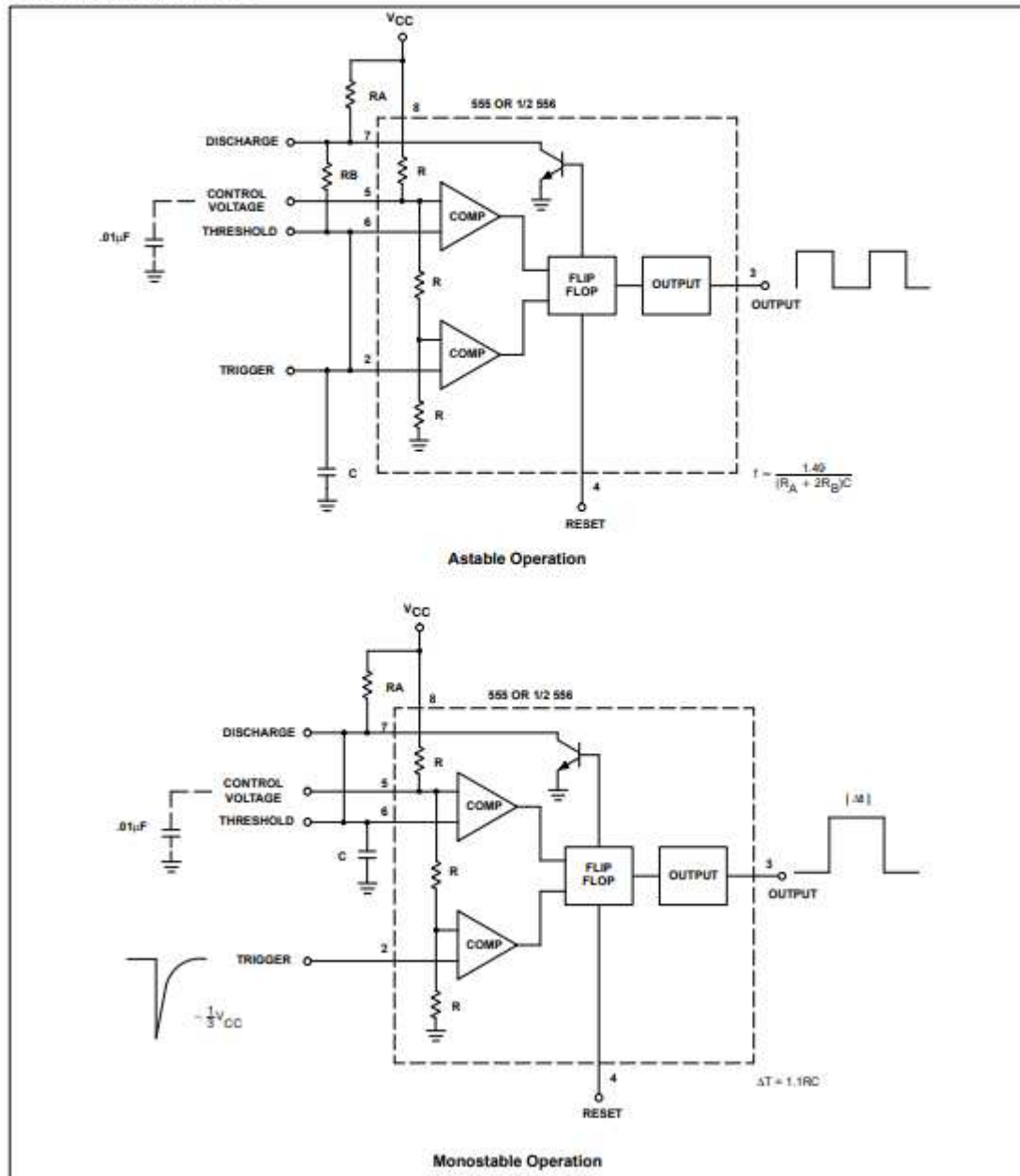
NOTES:

- Supply current when output high typically 1mA less.
- Tested at V_{CC}=5V and V_{CC}=15V.
- This will determine the max value of R_A+R_B, for 15V operation, the max total R=10MΩ, and for 5V operation, the max. total R=3.4MΩ.
- Specified with trigger input high.
- Time measured from a positive going input pulse from 0 to 0.8×V_{CC} into the threshold to the drop from high to low of the output. Trigger is tied to threshold.

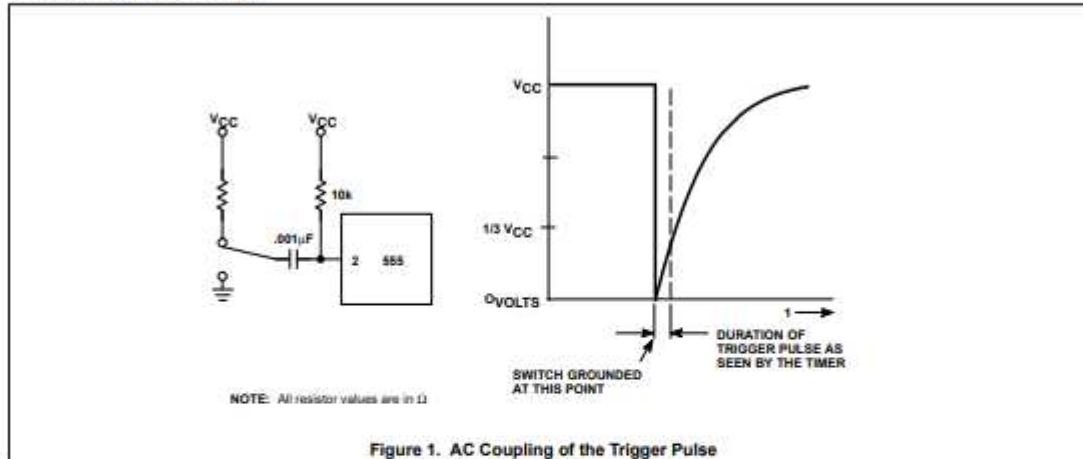
TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS



TYPICAL APPLICATIONS



TYPICAL APPLICATIONS

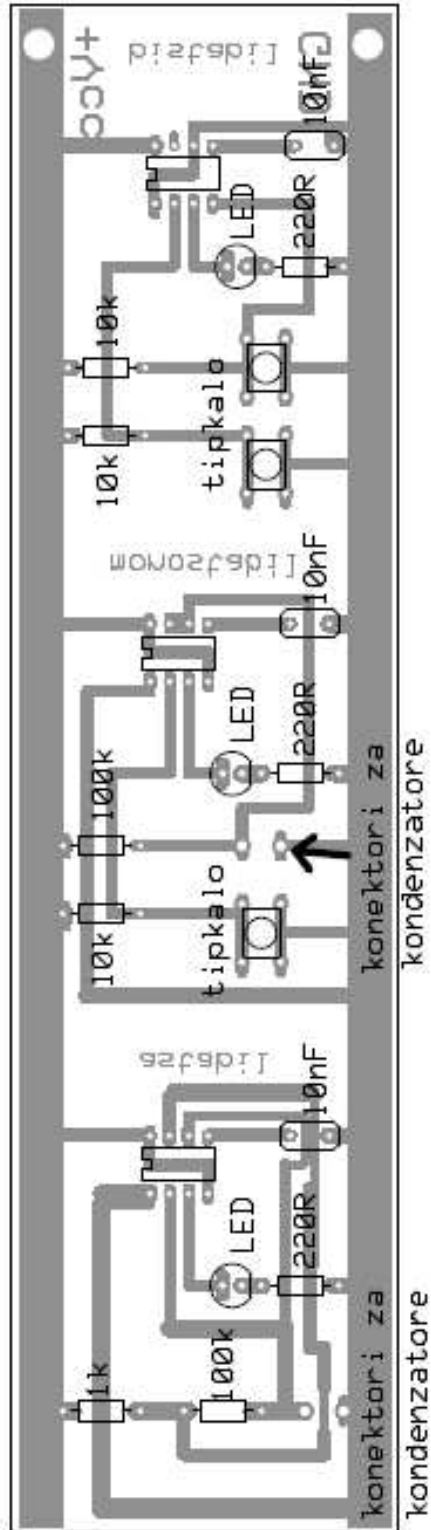
**Trigger Pulse Width Requirements and Time****Delays**

Due to the nature of the trigger circuitry, the timer will trigger on the negative going edge of the input pulse. For the device to time out properly, it is necessary that the trigger voltage level be returned to some voltage greater than one third of the supply before the time out period. This can be achieved by making either the trigger pulse sufficiently short or by AC coupling into the trigger. By AC coupling the trigger, see Figure 1, a short negative going pulse is achieved when the trigger signal goes to ground. AC coupling is most frequently used in conjunction with a switch or a signal that goes to ground which initiates the timing cycle. Should the trigger be held low, without AC coupling, for a longer duration than the timing cycle the output will remain in a high state for the duration of the low trigger signal, without regard to the threshold comparator state. This is due to the predominance of Q_{15} on the base of Q_{16} , controlling the state of the bi-stable flip-flop. When the trigger signal then returns to a high level, the output will fall immediately. Thus, the output signal will follow the trigger signal in this case.

Another consideration is the "turn-off time". This is the measurement of the amount of time required after the threshold reaches $2/3 V_{CC}$ to turn the output low. To explain further, Q_1 at the threshold input turns on after reaching $2/3 V_{CC}$, which then turns on Q_6 , which turns on Q_8 . Current from Q_8 turns on Q_{16} which turns Q_{17} off. This allows current from Q_{19} to turn on Q_{20} and Q_{24} to give an output low. These steps cause the $2\tau_{15}$ max. delay as stated in the data sheet.

Also, a delay comparable to the turn-off time is the trigger release time. When the trigger is low, Q_{10} is on and turns on Q_{11} which turns on Q_{15} . Q_{15} turns off Q_{16} and allows Q_{17} to turn on. This turns off current to Q_{20} and Q_{24} , which results in output high. When the trigger is released, Q_{10} and Q_{11} shut off, Q_{15} turns off, Q_{16} turns on and the circuit then follows the same path and time delay explained as "turn off time". This trigger release time is very important in designing the trigger pulse width so as not to interfere with the output signal as explained previously.

Prilog 2 – Montažna shema tiskane pločice



Prilog 3 – PCB layout tiskanih vodova

