Stroboskopski učinak

Igrec, Andreja

Master's thesis / Diplomski rad

2016

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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:217:682235

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-19**

Repository / Repozitorij:

Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

PRIRODOSLOVNO–MATEMATIČKI FAKULTET

MATEMATIČKI ODSJEK

Andreja Igrec

STROBOSKOPSKI UČINAK

Diplomski rad

Voditelj rada:
doc. dr. sc. Nikola Poljak

Zagreb, 2016.

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

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

Povjerenstvo je rad ocijenilo ocjenom _____.

Potpisi članova povjerenstva:

1. _____
2. _____
3. _____

Sadržaj

Sadržaj **iii**

Uvod **1**

1 Stroboskop i stroboskopski učinak **2**
1.1 Stroboskop 2
1.2 Stroboskopski učinak 7

2 Stroboskopski učinak oko nas **15**
2.1 Regulacija brzine vrtnje gramofona 15
2.2 Uštimavanje gitare 16
2.3 Ispitivanje klizanja remena 17
2.4 Podešavanje kuta paljenja 18
2.5 Lebdeća voda 19
2.6 Efekt kotača 20

3 Lebdeća voda: izrada uređaja **21**
3.1 Postizanje oscilacija napona 21
3.2 Shema elektroničkog sklopa na pločici 27
3.3 Izgled pločice 29
3.4 Izrada pločice 30
3.5 Izrada drvenog kućišta i posude za vodu 34
3.6 Konačan izgled uređaja 36
3.7 Određivanje akceleracije slobodnog pada pomoću stroboskopa 38

Bibliografija **42**

Uvod

Ovog smo ljeta, u nastavku filma *Majstori iluzije*, imali priliku vidjeti jedan od mađioničarskih trikova s vodom, u kojem mađioničar "zaustavlja", a onda i "podiže" kišu. Kišu u filmu proizvode prskalice koje periodično izbacuju kapi vode i voda se obasjava stroboskopskim reflektorima. Takva vizualna iluzija nazvana je lebdeća voda i posljedica je stroboskopskog učinka.

U prvom poglavlju će ukratko biti opisana povijest razvoja stroboskopa te objašnjen stroboskopski učinak. U drugom poglavlju će biti dan pregled primjera iz života gdje se koristi stroboskopski učinak te primjeri vizualnih iluzija koje su posljedica stroboskopskog učinka. Također, dio ovog diplomskog rada je i izrada uređaja koji demonstrira stroboskopski učinak prilikom promatranja vode koja teće iz titrajuće cjevčice pod stroboskopskim svjetlom. Uređaj i proces njegove izrade biti će opisan u trećem poglavlju.

Poglavlje 1

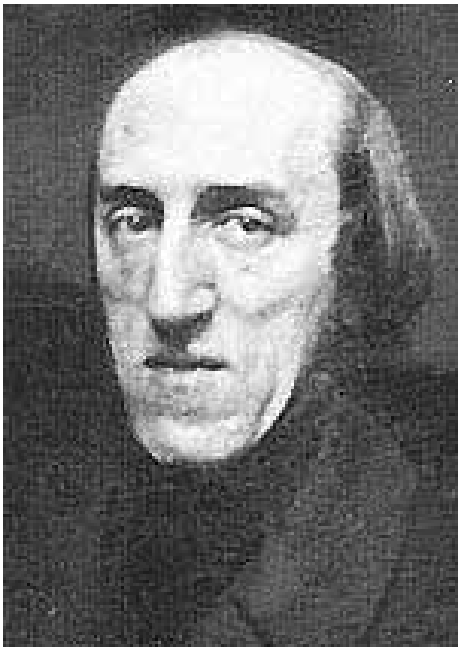
Stroboskop i stroboskopski učinak

1.1 Stroboskop

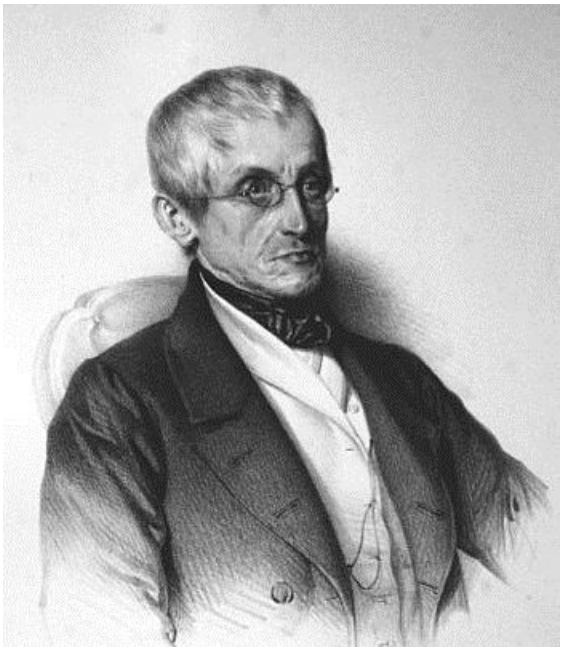
Stroboskop je uređaj koji proizvodi periodične bljeskove svjetlosti. Najraniji stroboskopi bili su mehanički, u obliku diskova, s radijalno smještenim pukotinama, kao što je prikazano na slici 1.1. Pukotine su simetrično raspoređene tako da su kutni razmaci između bilo koje dvije susjedne pukotine jednaki.

Slika 1.1: Izgled prvotnih stroboskopa

Prema [15], prve stroboskope su, neovisno jedan o drugome, oko 1832. godine izumili belgijski fizičar Joseph Plateau (slika 1.2) i austrijski matematičar i geodetski tehničar Simon Ritter von Stampfer (slika 1.3). Plateau je svoj uređaj nazvao fenakistoskop, a Stampfer stroboskop. Prema [15] riječ stroboskop ima značenje "gledatelj vrtloga", a prema [14] riječ fenakistoskop se može prevesti kao "obmanjivanje gledatelja". U početku su ti



Slika 1.2: Joseph Plateau

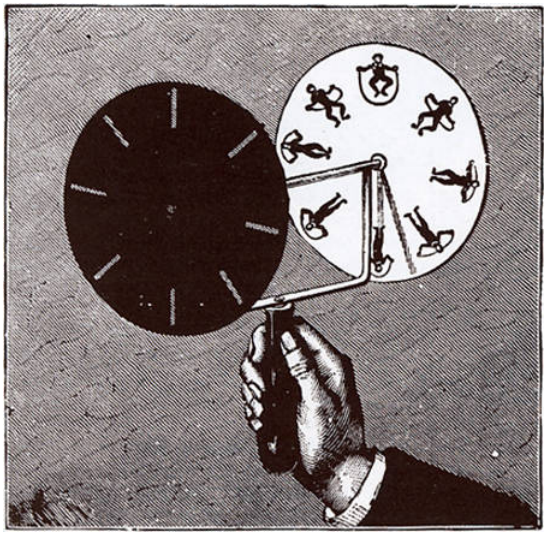


Slika 1.3: Simon Ritter von Stampfer

uređaji zapravo bili igračke i kod gledatelja su stvarali iluziju kretanja na temelju brzog izmjenjivanja nekoliko sličica poredanih u krug. Fenakistoskop i Stampferov stroboskop su po izgledu bili veoma slični, a s vremenom se izgled tih uređaja mijenjao.

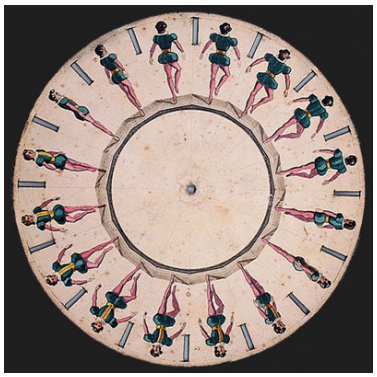
Slika 1.4: Početni izgled fenakistoskopa i Stampferovog stroboskopa

Početni izgled uređaja prikazan je na slici 1.4. Na disk s pukotinama, sličan onome na slici 1.1, naslikane su s jedne strane slike u seriji od kojih svaka prikazuje jednu poziciju objekta u kretanju. Disk je učvršćen tako da se može okretati oko osi koja prolazi središtem diska i okomita je na površinu diska. Kako bi gledatelj vidio iluziju kretanja bilo je potrebno jednoliko okretati disk i kroz pukotine gledati sliku u zrcalu.

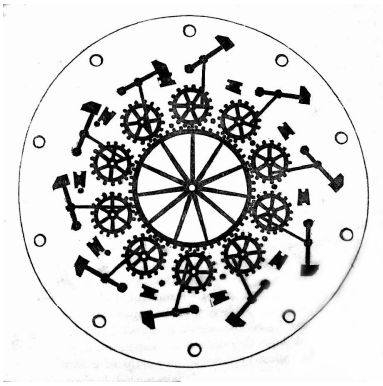


Slika 1.5: Fenakistoskop s dva diska

Kasnije je dodan još jedan disk kao što je prikazano na slici 1.5 (preuzeto iz [14]) čime je nestala potreba za zrcalom. Oba diska su bila učvršćena na nekoj udaljenosti tako da su zajedno rotirala oko osi koja je bila okomita na površine diskova i spajala njihova središta. Prvi disk imao je pukotine, a drugi slike. Diskovi su se zajedno okretali i gledatelj bi kroz



Slika 1.6: Motiv plesača

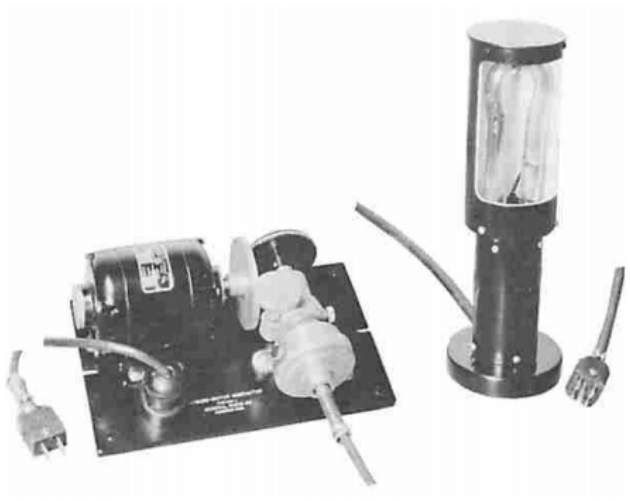


Slika 1.7: Disk s kružnim

Slika 1.8: Motiv konjanika

pukotine prvog diska promatrao iluziju kretanja objekta čije faze kretanja su bile naslikane na drugom disku. Na slikama 1.6, 1.7 i 1.8 (preuzeto iz [14]) prikazani su primjeri oslikanih diskova. Slika 1.6. prikazuje disk s motivom plesača koji je oslikao Plateau, slika 1.7 prikazuje jedan od prvih Stampferovih diskova s kružnim pukotinama. Slika 1.8 također prikazuje Stampferov disk, ali s motivom konjanika. Stroboskop kao disk je s vremenom prestao biti samo dio igračke i pronašao je svoju primjenu u znanosti i industriji. Prema

Slika 1.9: Harold Edgerton



Slika 1.10: Jedan od prvih elektroničkih stroboskopa

[15], razvojem stroboskopa u obliku diska povećao se broj njegovih pukotina, a brzina njegovog okretanja se preciznije regulirala pomoću motora.

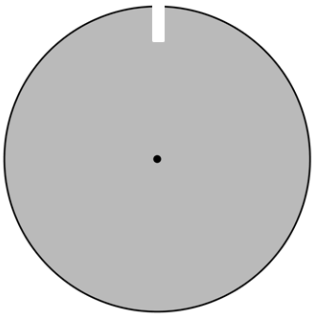
Oko 1930. profesor s MIT-a Harold Edgerton otkrio je kako proizvesti vrlo kratke bljeskove svjetlosti čija frekvencija se mogla kontrolirati. Time je započelo doba elektroničkih stroboskopa koji proizvode vrlo kratke bljeskove svjetlosti odvojene jednakim vremenskim razmacima.

Slika 1.11: Suvremeni stroboskop

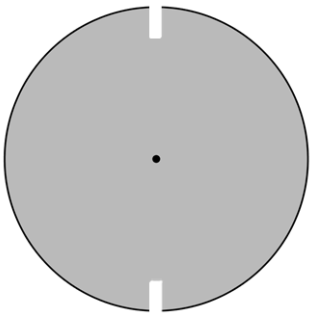
Slika 1.12: Suvremeni stroboskop

Na slici 1.9 (preuzeto iz [4]) prikazan je profesor Edgerton, a na slici 1.10 (preuzeto iz [15]) je jedan od njegovih prvih stroboskopa. Suvremeni stroboskopi su poboljšani elektronički stroboskopi čija se frekvencija bljeskanja može regulirati. Na slikama 1.11 i 1.12 prikazani su neki primjeri suvremenih stroboskopa.

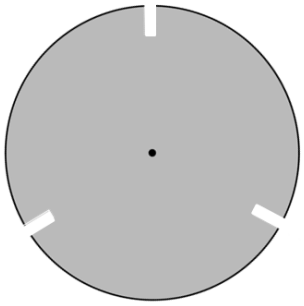
Frekvencija bljeskanja je određena brojem bljeskova u sekundi i kod elektroničkog stroboskopa ovisi o vrijednostima elektroničkih komponenata koje sačinjavaju stroboskop. Što se tiče mehaničkog stroboskopa, tj. stroboskopskog diska koji jednoliko rotira oko svog središta, frekvencija isprekidane svjetlosti koju on proizvodi ovisi o brzini rotiranja diska i o broju njegovih pukotina. Ako disk ima samo jednu pukotinu, kao što je prikazano na slici 1.13, onda je frekvencija isprekidane svjetlosti jednaka frekvenciji rotacije diska. To je zbog toga što se gledatelj ne pomiče pa njegovo oko prima svjetlost od promatranog objekta samo kad je ispred njega pukotina, a pukotina treba proći cijeli krug kako bi se vratila ispred oka. Ako dodamo još jednu pukotinu, kao što je prikazano na slici 1.14, frekvencija isprekidane svjetlosti će biti dvostruko veća od frekvencije rotacije diska jer sada disk napravi pola kruga do sljedeće pukotine. Odnosno, kad disk napravi jedan krug, gledatelj je vidio dva, vremenski jednako razmaknuta, bljeska svjetlosti kroz pukotine. Analogno, za tri pravilno raspoređene pukotine (slika 1.15) frekvencija bljeskova svjetlosti će biti tri puta veća od frekvencije okretanja diska, a za četiri, četiri puta i tako dalje.



Slika 1.13: Disk s jednom pukotinom



Slika 1.14: Disk s dvije pukotine



Slika 1.15: Disk s tri pukotine.

Razlika između stroboskopskih diskova (mehaničkih stroboskopa) i elektroničnih stroboskopa, osim izgleda, je u tome što je kod promatranja periodičnog kretanja objekta s mehaničkim stroboskopom objekt osvijetljen vanjskim izvorom svjetlosti koja nema oku vidljive prekide, a kod elektroničkog stroboskopa se objekt osvjetljava bljeskovima. Međutim, mehanički stroboskopi propuštaju od objekta reflektiranu svjetlost u oko gledatelja samo kad je ispred gledateljevog oka pukotina. Dakle, i kod mehaničkih stroboskopa gledatelj prima "isprekidanu" svjetlost, odnosno bljeskove svjetlosti. Zbog toga i mehanički i elektronički stroboskopi mogu izazvati stroboskopski učinak.

1.2 Stroboskopski učinak

Optička iluzija mirovanja tijela, koje se periodički giba, ili njegova usporenog kretanja ili kretanja u suprotnom smjeru od stvarnog smjera kretanja, prilikom promatranja njegova gibanja u periodično izdvojenim trenutcima, naziva se stroboskopski učinak. Osim mehaničkim i elektroničkim stroboskopom, stroboskopski učinak se može postići i pomoću kamere. Kamera u jednakim vremenskim razmacima "uzima" slike tijela u gibanju pa se na taj način promatra gibanje tijela u periodično izdvojenim trenutcima. Prema [17], periodično gibanje tijela se opisuje periodom T, frekvencijom f i kutnom frekvencijom ω. Period T je vrijeme potrebno da tijelo koje se periodično giba napravi jedan ciklus. Frekvencija je broj ciklusa u jedinici vremena. Ako frekvenciju pomnožimo s 2π, onda taj umnožak zovemo kutna frekvencija. Veze između tih veličina su dane sljedećim formulama:

$$T = \frac{1}{f}\,, \tag{1.1}$$

$$f = \frac{1}{T}\,, \tag{1.2}$$

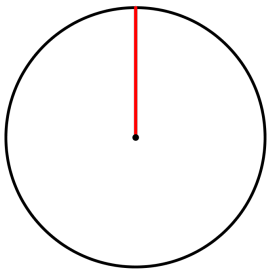
$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}\,. \tag{1.3}$$

Objasnimo sad kako dolazi do prividnog mirovanja tijela, odnosno njegova usporenog gibanja u istom smjeru ili čak u suprotnom smjeru, na primjeru okretanja kruga oko svog središta opisanom u [13]. Na krugu označimo crvenom bojom jedan polumjer. Period, frekvenciju i kutnu frekvenciju gibanja kruga ćemo označiti redom s T_K, f_K i ω_K, a stroboskopske svjetlosti s T_S, f_S i ω_S. Kutna frekvencija zakretanja polumjera odgovara njegovoj kutnoj brzini jer se polumjer zakreće za neki kut u vremenu Δt pa vrijedi:

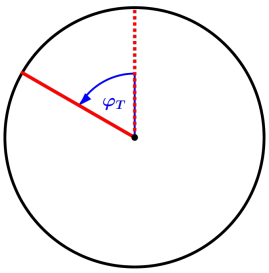
$$\omega_K = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}\,. \tag{1.4}$$

Recimo da se krug okreće u smjeru suprotnom od kazaljke na satu. Položaj istaknutog polumjera u vrijeme prvog bljeska stroboskopa prikazan je na slici 1.16. Za početak, neka je vrtnja kruga toliko spora da se polumjer do sljedećeg bljeska stroboskopa zakrene za manje od pola kruga, tj. neka je kut φ_T, za koji se polumjer u vremenu T_S zakrene, između 0 i π radijana ($0 < \varphi_T < \pi$).

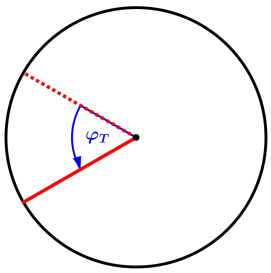
Na slici 1.17 prikazan je položaj istaknutog polumjera nakon T_S vremena, tj. u vrijeme drugog bljeska. Nakon još T_S vremena polumjer će se zakrenuti za još φ_T od zadnjeg vidljivog položaja te je njegov položaj u vrijeme trećeg bljeska prikazan na slici 1.18. Preklope li se slike 1.16, 1.17 i 1.18 te se označi redoslijed kojim oko prima te slike, kao



Slika 1.16: Početni položaj polumjera ($0 < \varphi_T < \pi$)



Slika 1.17: Položaj nakon T_S sekundi($0 < \varphi_T < \pi$)

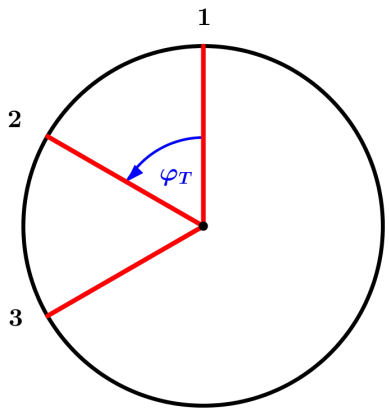


Slika 1.18: Položaj nakon $2T_S$ sekundi ($0 < \varphi_T < \pi$)

što je prikazano na slici 1.19, uočavamo da oko vidi zakretanje polumjera u smjeru u kojem se stvarno i zakreće. Za kut φ_T prema (1.4) vrijedi:

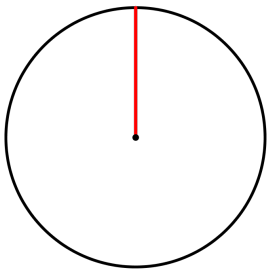
$$\varphi_T = \omega_K \cdot T_S \ . \tag{1.5}$$

Prividna kutna frekvencija ω_P je jednaka kvocijentu kuta za koji se istaknuti polumjer zakrene u vremenu T_S i vremena T_S. Zbog toga je $\omega_P = \frac{\varphi_T}{T_S} = \frac{\omega_K \cdot T_S}{T_S} = \omega_K$. Dakle, u slučaju kad je $0 < \varphi_T < \pi$, oko vidi zakretanje polumjera njegovom stvarnom kutnom brzinom.

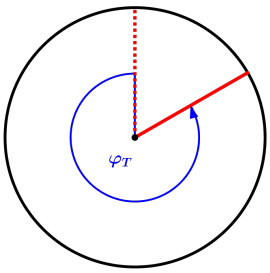


Slika 1.19: Preklopljene i uvećane slike 1.16, 1.17, 1.18

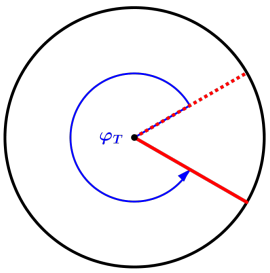
Promotrimo sad slučaj kad se polumjer zakreće brže tako da se u vremenu T_S zakrene za više od pola kruga, ali manje od cijelog kruga, tj. slučaj kad je $\pi < \varphi_T < 2\pi$. Položaj istaknutog polumjera u vrijeme prvog bljeska stroboskopa prikazan je na slici 1.20. Nakon T_S vremena polumjer će se zakrenuti za neki kut φ_T za koji u ovom slučaju vrijedi $\pi < \varphi_T < 2\pi$.



Slika 1.20: Početni položaj polumjera ($\pi < \varphi_T < 2\pi$)

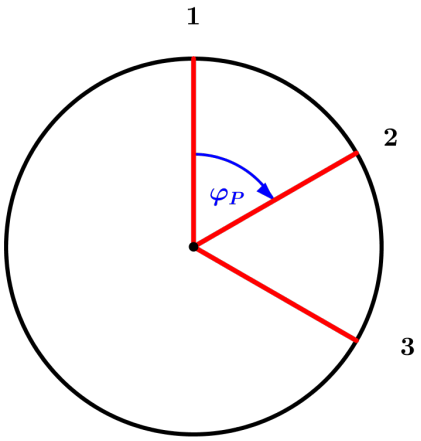


Slika 1.21: Položaj polumjera u $t = T_S$ ($\pi < \varphi_T < 2\pi$)



Slika 1.22: Položaj u $t = 2T_S$ ($\pi < \varphi_T < 2\pi$)

Na slici 1.21 prikazan je položaj polumjera u vrijeme drugog bljeska za neki odabir $\varphi_T \in \langle \pi, 2\pi \rangle$. Nakon sljedećeg vremenskog intervala duljine T_S, polumjer se zakrene za još φ_T. Na slici 1.22 prikazan je položaj polumjera u vrijeme trećeg bljeska. Preklope li se slike 1.20, 1.21 i 1.22 te se označi redoslijed kojim oko prima te slike, kao što je prikazano na slici 1.23, uočavamo da se polumjer prividno zakreće u suprotnom smjeru.



Slika 1.23: Preklopljene i uvećane slike 1.20, 1.21, 1.22

Prividan kut za koji se polumjer zakrene u vremenu T_S je:

$$\varphi_P = \varphi_T - 2\pi \,. \tag{1.6}$$

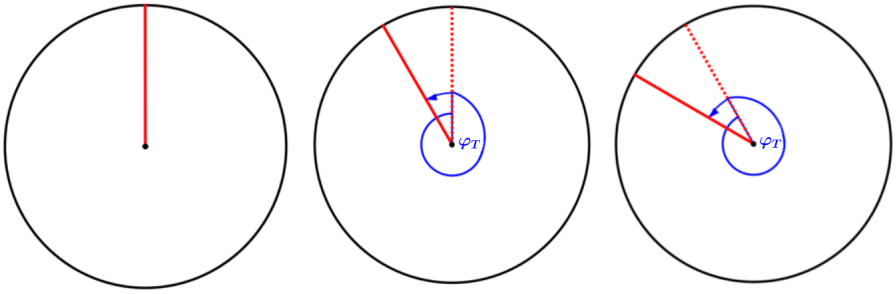
Prema tome je prividna frekvencija za ovaj slučaj:

$$\omega_P = \frac{\varphi_P}{T_S} = \frac{\varphi_T}{T_S} - \frac{2\pi}{T_S} \,.$$

Također, pošto vrijedi izraz (1.5), slijedi da je kutna frekvencija za slučaj $\pi < \varphi_T < 2\pi$:

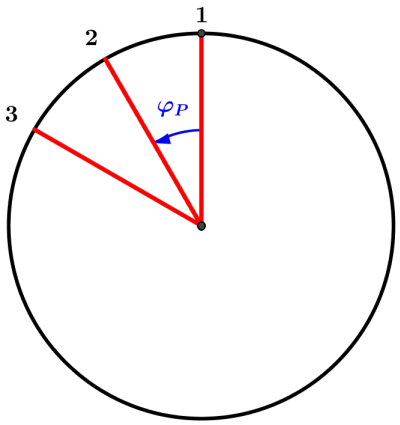
$$\omega_P = \omega_K - \frac{2\pi}{T_S} \,. \tag{1.7}$$

Kutna frekvencija je u ovom slučaju negativna jer je i prividan kut negativan. Takav negativan rezultat opisuje prividno zakretanje polumjera u suprotnom smjeru od stvarnog smjera. Promotrimo sad sljedeći slučaj.



Slika 1.24: Položaj polumjera u početnom trenutku, u vrijeme drugog bljeska i u vrijeme trećeg bljeska ($\pi < \varphi_T < 2\pi$)

Neka je brzina okretanja kruga još veća tako da se polumjer unutar T_S zakrene za više od jednog kruga, ali manje od kruga i pol, odnosno sad je $2\pi < \varphi_T < 3\pi$. Slično kao i prije, polumjer će se nakon svakog vremenskog perioda duljine T_S zakrenuti za φ_T koji je sad između 2π i 3π.



Slika 1.25: Preklopljeni i uvećani krugovi sa slike 1.24

Na slici 1.24 prikazan je položaj polumjera redom u vrijeme prvog bljeska pa drugog i onda trećeg. Preklope li se krugovi sa slike 1.24 te se označi redoslijed kojim oko prima

položaje polumjera, kao što je prikazano na slici 1.25, uočavamo da oko vidi zakretanje polumjera u stvarnom smjeru. Međutim, ne i stvarnom frekvencijom.

U ovom slučaju je prividni kut za koji se polumjer zakrene u vremenu T_S:

$$\varphi_P = \varphi_T - 2\pi \,. \tag{1.8}$$

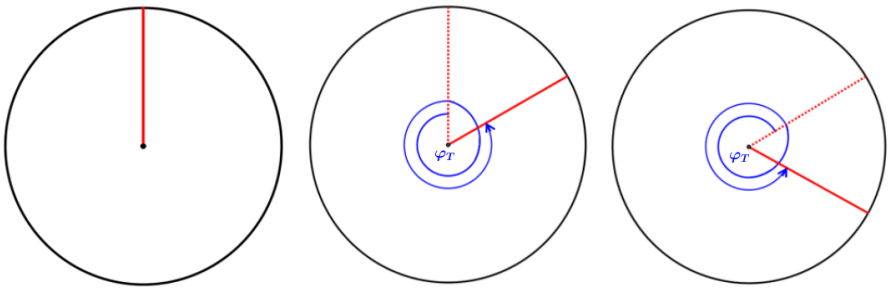
Prema tome je privdna kutna frekvencija za ovaj slučaj:

$$\omega_P = \frac{\varphi_P}{T_S} = \frac{\varphi_T}{T_S} - \frac{2\pi}{T_S} \,.$$

Odnosno zbog (1.5) je izraz za kutnu frekvenciju i u slučaju $2\pi < \varphi_T < 3\pi$:

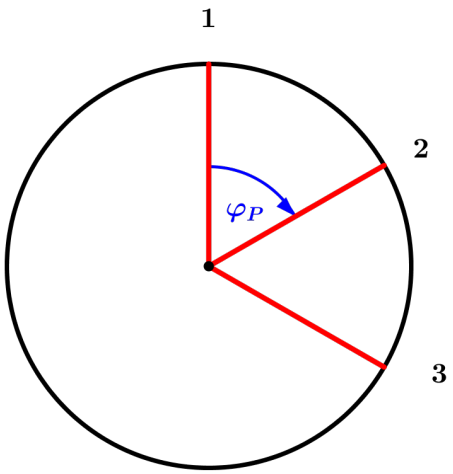
$$\omega_P = \omega_K - \frac{2\pi}{T_S} \,. \tag{1.9}$$

Uočavamo da je izraz za kutnu frekvenciju jednak izrazu za kutnu frekvenciju iz prethodnog slučaja (1.7) međutim, u ovom slučaju je prividni kut pozitivan pa je i kutna frekvencija pozitivna što je i očekivano jer oko vidi da se polumjer zakreće u smjeru stvarnog gibanja. Također, iznos prividne kutne frekvencije je manji od stvarne kutne frekvnecije, što znači da oko vidi sporije okretanje kruga, ali u smjeru u kojem se stvarno i okreće. Promotrimo još jedan slučaj bržeg okretanja kruga.



Slika 1.26: Položaj polumjera u početnom trenutku, u vrijeme drugog bljeska i u vrijeme trećeg bljeska ($3\pi < \varphi_T < 4\pi$)

Sad se polumjer u vremenu T_S zakrene za više od punog i pol kruga, ali manje od dva kruga. Dakle, u ovom slučaju vrijedi $3\pi < \varphi_T < 4\pi$. Na slici 1.26 prikazan je položaj polumjera redom u vrijeme prvog bljeska pa drugog i onda trećeg.
Preklope li se krugovi sa slike 1.26 te se označi redoslijed kojim oko prima položaje polumjera, kao što je prikazano na slici 1.27, uočavamo da oko vidi zakretanje polumjera u suprotnom smjeru od stvarnog smjera.



Slika 1.27: Preklopljeni i uvećani krugovi sa slike 1.26

Prividni kut za koji se polumjer zakrene u vremenu T_S za ovaj slučaj je:

$$\varphi_P = \varphi_T - 4\pi \, . \tag{1.10}$$

Prema tome je privdna kutna frekvencija za ovaj slučaj:

$$\omega_P = \frac{\varphi_P}{T_S} = \frac{\varphi_T}{T_S} - \frac{4\pi}{T_S} \, .$$

Odnosno zbog (1.5) je izraz za kutnu frekvenciju u slučaju $3\pi < \varphi_T < 4\pi$:

$$\omega_P = \omega_K - \frac{4\pi}{T_S} \, . \tag{1.11}$$

Prividni kut i kutna frekvencija su i u ovom slučaju negativni. Poveća li se kutna brzina kruga tako da se sada polumjer zakrene za više od dva cijela kruga, ali manje od dva cijela i pola kruga ($4\pi < \varphi_T < 5\pi$), oko će opet vidjeti sporiju vrtnju u stvarnom smjeru. Prividni kut φ_P će u ovom slučaju biti pozitivan:

$$\varphi_P = \varphi_T - 4\pi \, . \tag{1.12}$$

Također, prividna kutna frekvencija za slučaj $4\pi < \varphi_T < 5\pi$ će biti:

$$\omega_P = \omega_K - \frac{4\pi}{T_S} \, . \tag{1.13}$$

Isto tako bismo razmatrali slučaj kada je $5\pi < \varphi_T < 6\pi$ te bismo došli do izraza za prividni kut:

$$\varphi_P = \varphi_T - 6\pi \, . \tag{1.14}$$

I prema tome bi izraz za prividnu kutnu frekvenciju u slučaju $4\pi < \varphi_T < 5\pi$ glasio:

$$\omega_P = \omega_K - \frac{6\pi}{T_S} \, . \tag{1.15}$$

Analogno bismo mogli nastaviti dalje, no već sad možemo uočiti određenu pravilnost. Naime, oko vidi krug samo u trenutcima kada je osvijetljen. Zbog toga, svaki puni krug koji istaknuti polumjer napravi između dva bljeska ne utječe na prividnu kutnu frekvenciju, već utječe samo onaj ostatak, koji ostane nakon što se od φ_T oduzmu svi puni kutevi koje je polumjer napravio između dva bljeska. Za taj ostatak se polumjer zakrene od položaja za vrijeme prethodnog bljeska do novog položaja koji će "uhvatiti" sljedeći bljesak. Također, ako je taj ostatak veći od π, onda se oduzima još jednom 2π kako bi se dobio prividni kut φ_P za koji se polumjer zakrene u vremenu T_S jer se u tom slučaju krug prividno okreće u suprotnom smjeru. Kvocijent $\frac{\varphi_T}{2\pi}$ govori koliko puta je 2π sadržan u φ_T. Prema tome možemo pisati:

$$\varphi_P = \varphi_T - 2\pi \cdot \text{round}\left[\frac{\varphi_T}{2\pi}\right] , \tag{1.16}$$

gdje je s round $[x]$ označen najbliži cijeli broj od x. Podijelimo li izraz (1.16) s T_S slijedi da je izraz za prividnu kutnu frekvenciju:

$$\omega_P = \omega_K - \frac{2\pi}{T_S} \cdot \text{round}\left[\frac{\varphi_T}{2\pi}\right] . \tag{1.17}$$

Odnosno, uvrstimo li izraz (1.5) slijedi:

$$\omega_P = \omega_K - \frac{2\pi}{T_S} \cdot \text{round}\left[\frac{\omega_K \cdot T_S}{2\pi}\right] . \tag{1.18}$$

Zbog (1.2) i (1.3), izraz (1.18) možemo zapisati preko "običnih" frekvencija:

$$2\pi f_P = 2\pi f_K - 2\pi f_S \cdot \text{round}\left[\frac{2\pi f_K}{2\pi f_S}\right] .$$

Odnosno nakon dijeljenja jedne i druge strane jednakosti s 2π i kraćenja razlomka dobije se:

$$f_P = f_K - f_S \cdot \text{round}\left[\frac{f_K}{f_S}\right] . \tag{1.19}$$

Izraz (1.19) je primjenjiv za određivanje prividne frekvencije kod promatranja stroboskopskim svjetlom (frekvencije f_S) tijela koje se periodično giba (ne nužno kruži) frekvencijom f_K. Dakle, ako je vrijednost f_P negativna, onda se tijelo prividno giba u suprotnom smjeru od stvarnog smjera, a ako je vrijednost pozitivna onda se giba u stvarnom smjeru. Vrijednost prividne frekvencije je dana izrazom (1.19). Dakle, promotrili smo slučajeve u kojima se tijelo prividno giba sporije u istom smjeru i u suprotnom smjeru. Preostaje promotriti u kojim slučajevima tijelo izgleda kao da miruje. Kako bi tijelo pod stroboskopskim svjetlom izgledalo kao da miruje, treba se, koliko god da punih ciklusa napravi, u vremenskom periodu između dva bljeska vratiti u početni položaj u kojem se nalazilo u vrijeme prethodnog bljeska. To je moguće u slučaju kad je frekvencija gibanja tijela f_K višekratnik iznosa frekvencije f_S. U tom je slučaju f_K djeljiv s f_S, a količnik $\frac{f_K}{f_S}$ govori koliko ciklusa napravi tijelo u vrijeme kad stroboskopsko svjetlo napravi svoj jedan ciklus, tj. koliko ciklusa napravi tijelo između dva bljeska. Kako je u ovom slučaju taj količnik cijeli broj, to znači da će promatrano tijelo napraviti cijeli broj ciklusa, a to znači da će se u vremenu između dva bljeska vratiti u položaj u kojem je bilo za vrijeme prvog bljeska. Izraz (1.19) je primjenjiv i u ovom slučaju. Zbog činjenice da je f_K višekratnik od f_S vrijedi: $f_K = n \cdot f_S$ za $n \in \mathbb{N}$. Uvrštavanjem u izraz (1.19) se dobije:

$$f_P = n \cdot f_S - f_s \cdot \text{round}\left[\frac{n \cdot f_S}{f_S}\right] \Leftrightarrow f_P = 0\,.$$

Dakle, izraz (1.19) u ovom slučaju daje vrijednost nula prividne frekvencije što odgovara tijelu koje miruje. Također, ukoliko umjesto f_P u izrazu (1.19) uvrstimo nulu dobit ćemo:

$$0 = f_K - f_S \cdot \text{round}\left[\frac{f_K}{f_S}\right]$$

Odnosno, kako je za pozitivan $\frac{f_K}{f_S}$, $\text{round}\left[\frac{f_K}{f_S}\right] \in \mathbb{N}$ slijedi:

$$f_K = n \cdot f_S\,.$$

Kako su f_K i f_S istog predznaka (pozitivne) vrijedi da je kvocijent $\frac{f_K}{f_S}$ pozitivan pa možemo tvrditi da je prividna frekvencija jednaka nuli samo u slučaju kada je f_K višekratnik od f_S, odnosno da tijelo samo u tom slučaju prividno miruje. Konačno, izraz (1.19) daje vrijednost prividne frekvencije za bilo koji slučaj: kad se tijelo sporije giba u stvarnom smjeru, kad se giba u suprotnom smjeru ili kad miruje. Također, izraz (1.19) daje informaciju i o smjeru prividnog gibanja jer negativan predznak iznosa frekvencije označava prividno gibanje tijela u suprotnom smjeru od stvarnog smjera gibanja.

Poglavlje 2

Stroboskopski učinak oko nas

2.1 Regulacija brzine vrtnje gramofona

Slika 2.1: Stroboskopska lampica na gramofonu

Prema [16], brzina vrtnje gramofona se regulira pomoću male stroboskopske lampe. Na slici 2.1, preuzetoj iz [16], prikazana je jedna takva lampica i dio gramofona. Za takvu lampicu je karakteristično da daje bljeskove stalne frekvencije i to dvostruko veće od frekvencije mreže. Kako je frekvencija mreže 50Hz, frekvencija lampice je 100Hz. Gramofonska ploča se može okretati različitim brzinama. Tanjur gramofona na slici 2.1 ima četiri brzine i ima četiri obodna prstena s točkicama. Točkice u pojedinom prstenu su pravilno raspoređene, tj. susjedne su točke jednako udaljene. Broj točaka je takav da prilikom os-

vjetljavanja svih četiriju prstena stroboskopom čija frekvencija je stalna i iznosi 100Hz, samo jedan od njih izgleda kao da miruje. Na primjer, jedna od frekvencija okretanja gramofonskog tanjura je obično $f = \frac{5}{9}$Hz. Onda je prema (1.3) njegova kutna brzina jednaka $\omega = \frac{10\pi}{9}$rad/s. Stroboskop će zabljesnuti svakih $\frac{1}{100}$s jer je njegova frekvencija 100Hz. Gramofonski tanjur se u $\frac{1}{100}$s okrene za kut $\alpha = \frac{10\pi}{9} \cdot \frac{1}{100}$ što je jednako $\frac{\pi}{90}$, odnosno ako proširimo razlomak s 2, $\frac{2\pi}{180}$. Dakle, u vrijeme sljedećeg bljeska tanjur će biti zaokrenut za $\frac{1}{180}$ punog kruga u odnosu na svoj položaj u vrijeme prethodnog bljeska. Zbog toga ako želimo da prsten s točkama prilikom okretanja tanjura navedenom kutnom brzinom izgleda kao da miruje potrebno je po prstenu pravilno rasporediti 180 točaka kako bi svaki bljesak stroboskopa uhvatio sljedeću točku na mjestu prethodne točke. Na isti način se određuje broj točaka u preostalim prstenima.

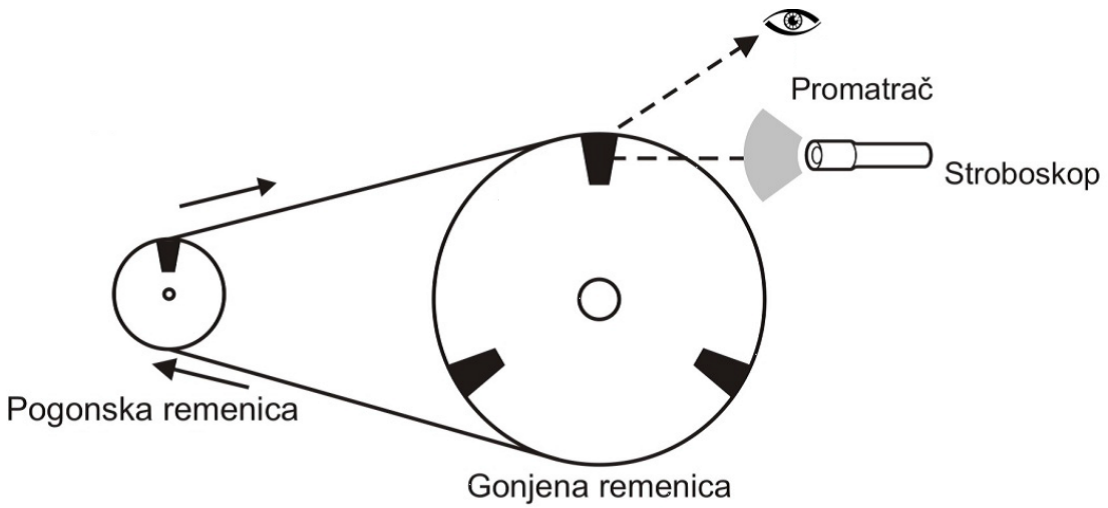
2.2 Uštimavanje gitare

Prema [12], jedan od načina uštimavanja gitare je pomoću stroboskopskog svjetla. Na slici 2.2, preuzetoj iz [12], prikazan je dio gitare s LED žaruljicama koje su izvor stroboskopskog svjetla. Kad su žice uštimane, ton A na 5. pragu prve žice ima frekvenciju od 440Hz, a ton A na 5. pragu šeste žice ima frekvenciju 110Hz. Prema tome, LED lampica koja se nalazi kod prve žice treba bljeskati frekvencijom od 440Hz, a LED lampica kod šeste žice frekvencijom od 110Hz. Vibriranjem i gledanjem prve žice pod stroboskopskim svjetlom njene LED lampice, žica se zateže tako dugo dok ne izgleda kao da miruje. Prividno mirovanje žice je znak da žica vibrira frekvencijom bljeskanja lampice, odnosno tad je žica dovoljno stegnuta i titra željenom frekvencijom.

Slika 2.2: Uštimavanje gitare pomoću stroboskopa

2.3 Ispitivanje klizanja remena

Kod remenskog prijenosa može doći do klizanja remena što umanjuje prijenos snage s pogonske remenice na gonjenu remenicu. Kako bi se otkrilo klizanje remena, pri pregledu se koristi stroboskop. Na slici 2.3, preuzetoj iz [16], prikazana je skica remenskog prijenosa kod kojeg dolazi do promjene broja okretaja. Prema [16], prilikom pregleda stroboskop se obično sinkronizira s manjom remenicom tako da oznaka na njoj prividno miruje pri okretanju pogonske remenice. Nakon toga se stroboskop s tako podešenom frekvencijom bljeskanja usmjeri prema većoj remenici. Na većoj remenici se nalaze radijalno i jednoliko raspoređene oznake čiji je broj jednak prijenosnom omjeru remenskog prijenosa. U primjeru prikazanom na slici 2.3 izabran je omjer prijenosa 3 pa su na gonjenoj remenici tri oznake. Omjer prijenosa jednak 3 označava da je broj okretaja veće remenice tri puta manji od broja okretaja manje remenice ako remen ne klizi. U primjeru na slici 2.3 je pogonska remenica manja od gonjene pa je frekvencija gonjene remenice tri puta manja. Zbog toga gonjena remenica ima tri jednoliko raspoređene oznake jer se u vremenu između dva susjedna bljeska stroboskopa gonjena remenica treba zaokrenuti za trećinu kruga. Znak da remen ne klizi je prividno mirovanje oznaka gonjene remenice, promatranih pod stroboskopskim svjetlom sinkroniziranim s pogonskom remenicom. Ukoliko postoji klizanje remena, oznake gonjene remenice neće mirovati pod stroboskopskim svjetlom.



Slika 2.3: Ispitivanje klizanja remena

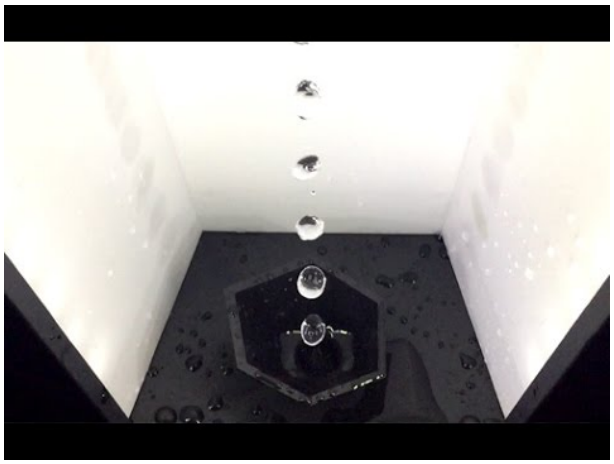
2.4 Podešavanje kuta paljenja

Prema [6], izgaranje smjese u motoru traje jednako dugo bez obzira na broj okretaja motora. Tako se u praznom hodu paljenje smjese događa neposredno prije nego što klip u taktu kompresije dođe u gornju mrtvu točku jer tad plinovi koji izgaraju imaju dovoljno vremena da dogore i potisnu klip prema dolje. Međutim, ako se poveća broj okretaja motora, hod klipa gore-dolje je brži pa se trenutak paljenja treba pomaknuti naprijed tako da se smjesa zapali malo ranije nego što klip dođe u gornju mrtvu točku tako da smjesa ima i dalje potrebno vrijeme za izgaranje iako se klip giba brže. Prema [10], svaki proizvođač definira trenutak paljenja smjese s obzirom na karakteristike motora i za njega predviđenog goriva. Podešavanje trenutka paljenja provodi se pomoću stroboskopa, oznaka na pločici i oznaka na prednjoj remenici radilice koje je postavio proizvođač (slika 2.4, preuzeta iz [10]). Na pločici je označena skala u stupnjevima zdesna ulijevo počevši od 0° čime je označena gornja mrtva točka u hodu klipa motora. Na primjer, ako se za neki motor u specifikacijama podešavanja paljenja nalazi podatak da je pri 850 okretaja u minuti kut paljenja 4° to znači da, kada motor radi 850 okretaja u minuti, zarez na remenici treba poravnati s oznakom 4° na pločici. Stroboskop se namješta na frekvenciju okretanja motora te se promatra remenica radilice. Kako su frekvencije bljeskanja i okretanja radilice jednake, oznaka na radilici će prividno mirovati. Zatim se pomoću razvodnika paljenja oznaka na remenici namješta tako da se poklopi s oznakom 4° na pločici.

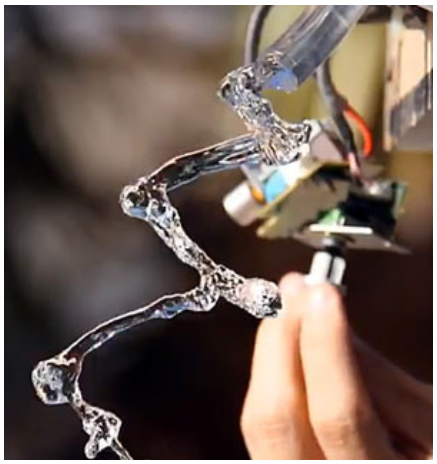
Slika 2.4: Remenice radilice s oznakom i pločica sa skalom za podešavanje kuta paljenja

2.5 Lebdeća voda

Lebdeća voda je naziv za optičku iluziju koja se javlja prilikom promatranja vode pod stroboskopskim svjetlom koja teče iz titrajuće cjevčice ili periodično kaplje. Naravno, isti učinak je moguće postići i s nekom drugom tekućinom, ne mora nužno biti voda. Ukoliko je frekvencija titranja cjevčice ili kapanja tekućine višekratnik frekvencije bljeskanja stroboskopa, tekućina će izgledati kao da ne teče, tj. kao da lebdi. To je zbog toga što su kapi vode (tekućine) ljudskom oku po izgledu jednake, a svaki put kad stroboskop zabljesne će jedna kap zauzeti mjesto prethodne kapi pa će oku izgledati kao da je uvijek ista kap na jednom položaju. Također, ako su frekvencije bljeskanja stroboskopa i titranja cjevčice (ili kapanja tekućine) takve da je prividna frekevencija određena izrazom (1.19) negativna, onda će tekućina prividno ići prema gore, a ne prema dolje. To je zbog toga što sada sljedeća kap neće stići doći na položaj prethodne kapi jer će stroboskop zbog veće frekvencije zabljesnuti prije pa će nova kap biti "uhvaćena" na nekom položaju prije. Na isti način će sljedeća kap biti uhvaćena na položaju prije pa će se oku činiti da voda ide prema gore. Moguć je i slučaj kad su frekvencije bljeskanja stroboskopa i titranja cjevčice (ili kapanja tekućine) takve da je prividna frekevencija određena izrazom (1.19) pozitivna. U tom će slučaju izgledati kao da kapi vode sporije padaju. Na slici 2.5 prikazan je jedan trenutak u primjeru kada voda periodično kaplje pod stroboskopskim svjetlom, a na slici 2.6 prikazan je trenutak u primjeru kad voda teče iz titrajuće cjevčice (voda poprima spiralni oblik). U poglavlju 3 je opisan proces izrade i izgled jednog uređaja koji daje optičku iluziju lebdeće vode.



Slika 2.5: Voda periodično kaplje



Slika 2.6: Voda teče iz cjevčice koja titra

2.6 Efekt kotača

Prema [5], ovu vizualnu iluziju najčešće primjećujemo u filmovima. Na primjer, kad kotači automobila, koji se giba naprijed, izgledaju kao da se okreću unazad ili čak miruju. To je zbog toga što kamera uzima sličice kotača određenom frekvencijom čime uzrokuje stroboskopski učinak. Prividno okretanje kotača unatrag je posljedica vrijednosti frekvencija uzimanja sličica kamere i okretanja kotača koje u izrazu (1.19) daju negativnu prividnu frekvenciju. Prividno mirovanje kotača pak se pojavljuje u slučajevima kad je iznos frekvencije okretanja kotača višekratnik iznosa frekvencije uzimanja sličica kamere.

Poglavlje 3

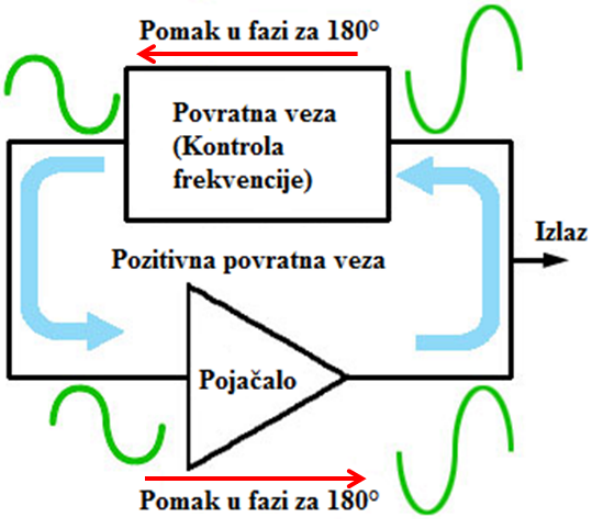
Lebdeća voda: izrada uređaja

Lebdeća voda kao primjer vizualne iluzije objašnjena je u drugom poglavlju. U ovom poglavlju opisan je proces izrade uređaja te objašnjen njegov princip rada. Uređaj se sastoji od pločice, drvenog kućišta, posude za vodu, pumpice i cijevi za vodu te tvrdog diska. Na pločici se nalazi elektronički sklop koji proizvodi oscilacije napona potrebne za bljeskanje stroboskopa i titranje cjevčice kroz koju teče voda. Svjetlost daju LED žaruljice, a titranje cjevčice se ostvaruje preko tvrdog diska.

3.1 Postizanje oscilacija napona

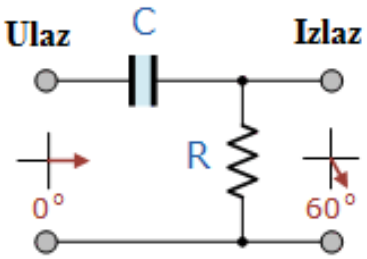
Prema [8], određene elektroničke komponente, povezane na poseban način, mogu na svom izlazu davati izmjenični signal iako su priključene samo na izvor istosmjernog napona. Tako povezane komponente čine oscilator koji daje ponavljajući signal na svojem izlazu dokle god je priključen na izvor istosmjernog napona. Oblik, amplituda i frekvencija izlaznog signala određeni su načinom na koji su komponente oscilatora povezane i njihovim iznosima.

Prema [9], većina oscilatora se sastoji od tri osnovna dijela: pojačala napona, spoja komponenata koji oblikuje signal i pozitivne povratne veze. Osnovni princip rada oscilatora prikazan je na slici 3.1 preuzetoj iz [9]. Dio signala, koji izlazi iz pojačala, povratnom se vezom vraća u pojačalo. Kako bi oscilator održao oscilacije, povratna veza mora biti pozitivna. Pozitivna povratna veza znači da se dio izlaznog signala koji se vraća u pojačalo, vrati tako da je u fazi s ulaznim signalom u pojačalo kako bi se amplituda ulaznog signala povećala. Međutim, oscilator na svom izlazu daje signal stalne amplitude. To je zbog toga što se signal kroz povratnu vezu smanji onoliko puta koliko ga je pojačalo povećalo. Promotrimo primjer pojačala u čijem spoju se nalazi bipolarni tranzistor. Prema [11], takvo pojačalo uzrokuje pomak u fazi od 180° između svog ulaznog i izlaznog signala. Kako bi ostvarili pozitivnu povratnu vezu, potrebno je izlaznom signalu iz pojačala promijeniti



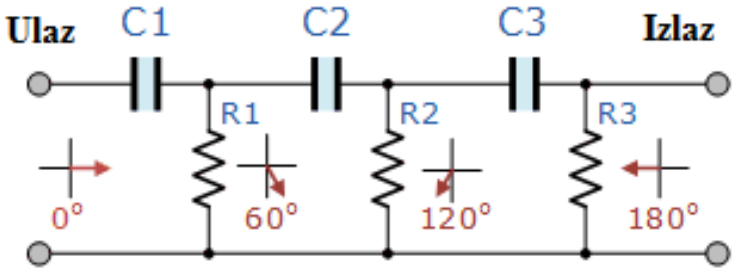
Slika 3.1: Osnovni princip rada oscilatora

fazu za dodatnih 180° i takav signal vratiti na ulaz pojačala. Time u pojačalo dolazi signal pomaknut u fazi za 360° u odnosu na signal koji je prvotno ulazio u pojačalo. Pomak u fazi od 360° odgovara pomaku u fazi od 0°, tj. signali na ulazu u pojačalo su u fazi. Prema [11], jedan od načina ostvarenja pozitivne veze je pomoću RC mreže. Na slici 3.2, preuzetoj iz [11], prikazana je RC mreža koja se sastoji od jednog otpornika i kondenzatora.



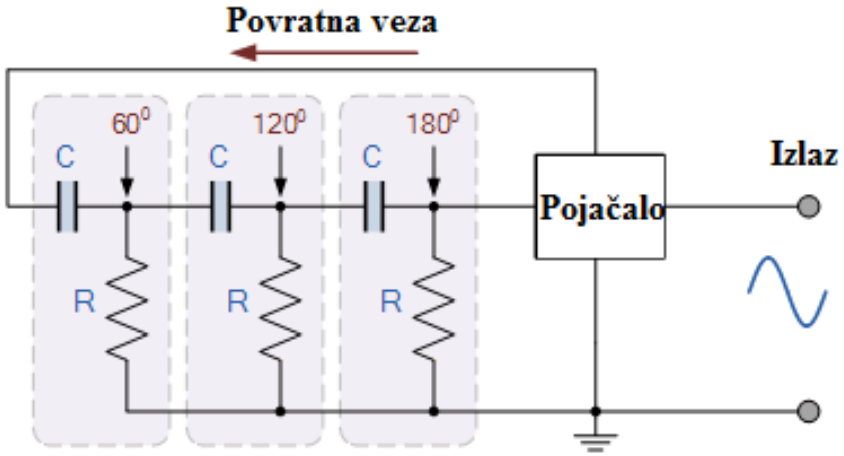
Slika 3.2: Jedinična RC mreža

Kad su otpornik i kondenzator spojeni na takav način, pojavi se između ulaznog i izlaznog signala te mreže pomak u fazi. Pomak u fazi može biti između 0° i 90° ovisno o iznosima otpornika i kondenzatora. Na slici 3.2 su izabrani iznosi tako da je pomak u fazi 60°. Spajanjem dviju takvih istih RC mreža, na izlazu se dobije pomak u fazi od 60° + 60° = 120°. Spajanjem triju takvih mreža kao na slici 3.3, preuzetoj iz [11], dobije se na izlazu pomak u fazi od 60° + 60° + 60° = 180°.



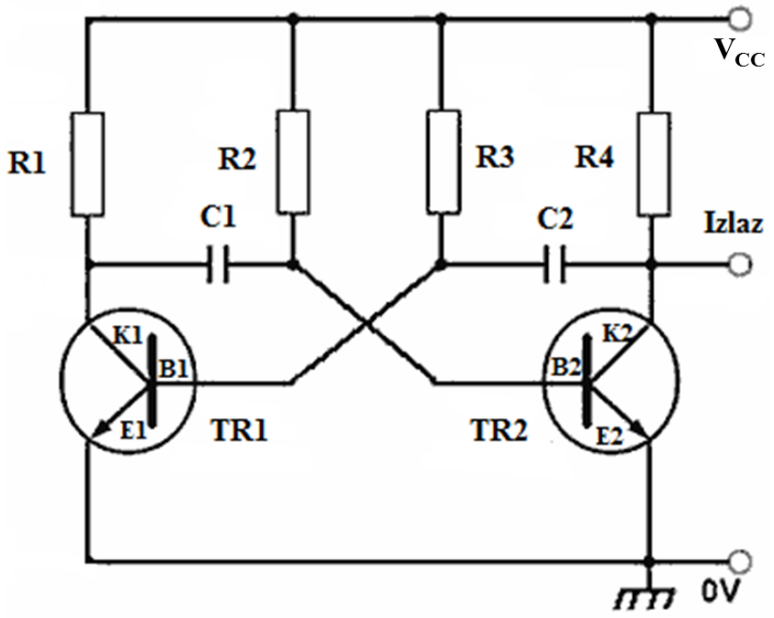
Slika 3.3: RC mreža sastavljena od tri jedinične RC mreže

Spojimo li pojačalo s RC mrežom kako je prikazano na slici 3.4, preuzetoj iz [11], dobiti ćemo spoj s pozitivnom povratnom vezom jer RC mreža, signal pomaknut u fazi za 180°, pomakne za još 180° pa u pojačalo dolazi signal koji je u fazi s ulaznim signalom u pojačalo. Iz baterije je napon stalan, no ima male oscilacije. RC mreža pojačava samo oscilacije određene frekvencije pa se samo signal te frekvencije pojačava.



Slika 3.4: RC mreža kao pozitivna povratna veza

Stroboskop, čija je shema prikazana na slici 3.7, sadrži oscilator koji pripada astabilnim multivibratorima. Na slici 3.5 prikazana je shema jednostavnog astabilnog multivibratora s bipolarnim tranzistorima. Rad astabilnog multivibratora temelji se na stalnoj izmjeni dvaju njegovih nestabilnih stanja. U jednom stanju tranzistor TR2 provodi struju između svog kolektora (oznaka K2 na slici 3.5) i emitera (oznaka E2 na slici 3.5), a TR1 ne, dok u drugom stanju tranzistor TR2 ne provodi struju, a TR1 provodi. Prema [3], izmjena tih



Slika 3.5: Astabilni multivibrator s bipolarnim tranzistorima

dvaju stanja odvija se na sljedeći način: pretpostavimo da je tranzistor TR1 upravo prestao provoditi struju, a TR2 počeo provoditi struju između svog kolektora i emitera. Zbog toga što TR1 više ne provodi struju se na njegovom kolektoru povećava potencijal prema iznosu istosmjernog napona V_{CC} na koji je multivibrator priključen jer sad struja ne prolazi kroz otpornik R1 pa na njemu nema "pada" napona. Lijeva ploča kondenzatora C1 je priključena na isti potencijal kao i kolektor tranzistora TR1 pa se i potencijal na toj ploči povećava prema V_{CC}. Desna strana kondenzatora C1 je priključena na bazu (oznaka B2 na slici 3.5) tranzistora TR2. Kako TR2 provodi struju, tj. aktivan je, njegova baza je na karakterističnom aktivacijskom potencijalu V_B pa je stoga i desna ploča kondenzatora C1 na istom potencijalu. Također, kako tranzistor TR1 ne provodi struju između K1 i E1, ali postoji razlika potencijala između B1 i E1, kondenzator C2 se puni preko otpornika R3 pa se potencijal njegove lijeve ploče povećava. Na istom potencijalu nalazi se i baza tranzistora TR1 (oznaka B1). Kad vrijednost tog potencijala postane jednaka aktivacijskom potencijalu V_B, tranzistor TR1 se aktivira, tj. počinje provoditi struju između K1 i E1. U tom trenutku potencijal lijeve ploče kondenzatora C1 naglo padne jer sad postoji pad napona na otporniku R1. Takva promjena potencijala na jednoj ploči kondenzatora uzrokuje sličnu promjenu na drugoj ploči. Kako se potencijal na lijevoj ploči smanjio, smanjiti će se i potencijal na desnoj ploči koja je u tom trenutku na aktivacijskom potencijalu V_B jer je na istom potencijalu kao i baza tranzistora TR2. Kako se sada potencijal na B2 smanjio na

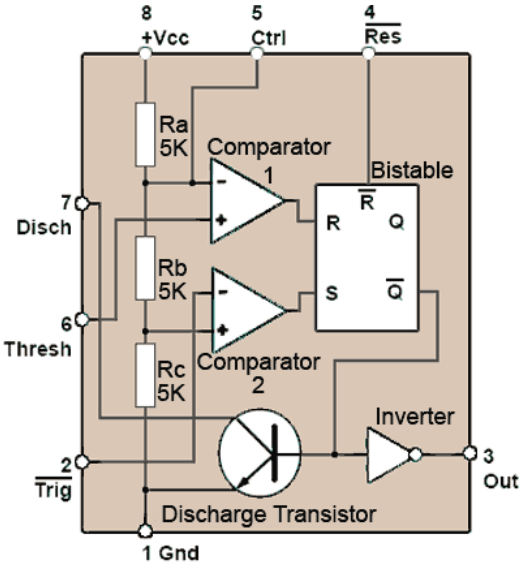
neki iznos koji ne upada u aktivno područje tranzistora, tranzistor TR2 će prestati provoditi struju između K2 i E2 čime astabilni multivibrator ulazi u drugo nestabilno stanje.

Kako sad tranzistor TR2 ne provodi struju, potencijal njegovog kolektora (K2) se povećava prema V_{CC} jer nema pada napona na otporniku R4. Ista promjena potencijala se događa i na desnoj ploči kondenzatora C2 jer su kolektor K2 i ta ploča na istom potencijalu. Kako je sad TR1 aktivan, njegova baza je na karakterističnom aktivacijskom potencijalu V_B pa je stoga i lijeva ploča kondenzatora C2 na istom potencijalu. Kondenzator C1 se puni preko otpornika R2, tj. potencijal na desnoj ploči se povećava. Kad potencijal poprimi vrijednost V_B, aktivira se tranzistor TR2 čime potencijal na desnoj ploči kondenzatora C2 naglo padne. Zbog toga padne i vrijednost potencijala lijeve ploče kondenzatora C2 na neku vrijednost ispod aktivacijskog potencijala što uzrokuje deaktivaciju tranzistora TR1. Nakon toga se opisani proces ponavlja sve dok je astabilni multivibrator spojen na izvor istosmjernog napona. Na taj način astabilni multivibrator daje izmjenični signal na svojem izlazu.

Promjenom vrijednosti kondenzatora C1, C2 ili otpornika R2, R3 mijenja se frekvencija signala. Na slici 3.7 prikazan je spoj sličan spoju na slici 3.5. Razlika je u tome što spoj na slici 3.7 ima potenciometar (100K), dva otpornika i sklopku (SW) umjesto otpornika R3 sa slike 3.5. Potenciometrom se može promijeniti otpor pa time i frekvencija signala na izlazu. Sklopka služi tome da se promijeni minimalni otpor u toj grani. Ako sklopka spaja pinove SW2 i SW3 (slika 3.7), onda je minimalni otpor 2.2kΩ jer je otpornik od 100kΩ kratko spojen. Ako je minimalni otpor manji onda su sve frekvencije koje određuje potenciometar veće od odgovarajućih frekvencija kada je minimalni otpor veći. Dakle, sklopkom (SW) mijenjamo minimalni otpor što onda dodatno utječe na frekvenciju. Također, spoj na slici 3.7 sadrži dodatnu granu s LED žaruljicama (tj. s konektorima L12-1, L12-2, L12-3, L12-4 i L34-1, L34-2, L34-3, L34-4 na koje se spajaju LED žaruljice pomoću žica). LED žaruljice su preko otpornika 1kΩ (slika 3.7) i tranzistora spojene na izlaz astabilnog multivibratora te se na taj način postiže bljeskanje LED žaruljica.

Titranje cjevčice kroz koju će teći voda pak se postiže elektroničkim sklopom čija shema je prikazana na slici 3.8. Glavni dio ovog sklopa je 555-sklop (oznaka LM555N na slici 3.8). Njegove nožice su označene brojevima 1-8. Broj 1 (oznaka GND) se uzemljuje. Prema [1], broj 2 (oznaka TR-"Trigger") je obično na nekom pozitivnom potencijalu, ali kad se potencijal naglo smanji, TR pokreće niz događaja unutar sklopa zbog kojih se na nožici 3 pojavi napon koji se zadrži toliko dugo koliko određuju vrijednosti vanjskog otpornika i kondenzatora. Na nožici 3 je izlaz 555-sklopa koji daje izmjenični signal tvrdom disku pomoću kojeg se postiže titranje cjevčice (oznake SIN-1, SIN-2 na slici 3.8). Broj 4 resetira sklop kad na njemu dovoljno padne napon. Nožice 5 i 7, u shemi na slici 3.8, nisu ni na što spojene. Nožica 6 (oznaka THR-Threshold) je spojena na vanjski kondenzator i otpornik putem kojeg se kondenzator puni. Preko nožice 6, povećanje potencijala do određene vrijednosti na gornjoj ploči kondenzatora uzrokuje niz događaja unutar 555 inte-

griranog sklopa koji zatim potaknu taj kondenzator na pražnjenje. Nožica 8 (oznaka V+) je spojena na pozitivni pol izvora istosmjernog napona za taj sklop. Na slici 3.6, preuzetoj iz [1], prikazan je izgled 555-sklopa iznutra. Sklop u sebi sadrži naponsko djelilo spojeno na dva komparatora čiji izlazi idu na S i R ulaze flip-flop pojačala. Djelilo napona sastoji se od tri otpornika, svaki vrijednosti 5kΩ (oznake Ra, Rb i Rc na slici 3.6). Prema [7], komparator je sklop koji prihvaća dva ulazna napona, uspoređuje ih te na svom izlazu daje digitalni signal ovisno o tome koji napon je veći.

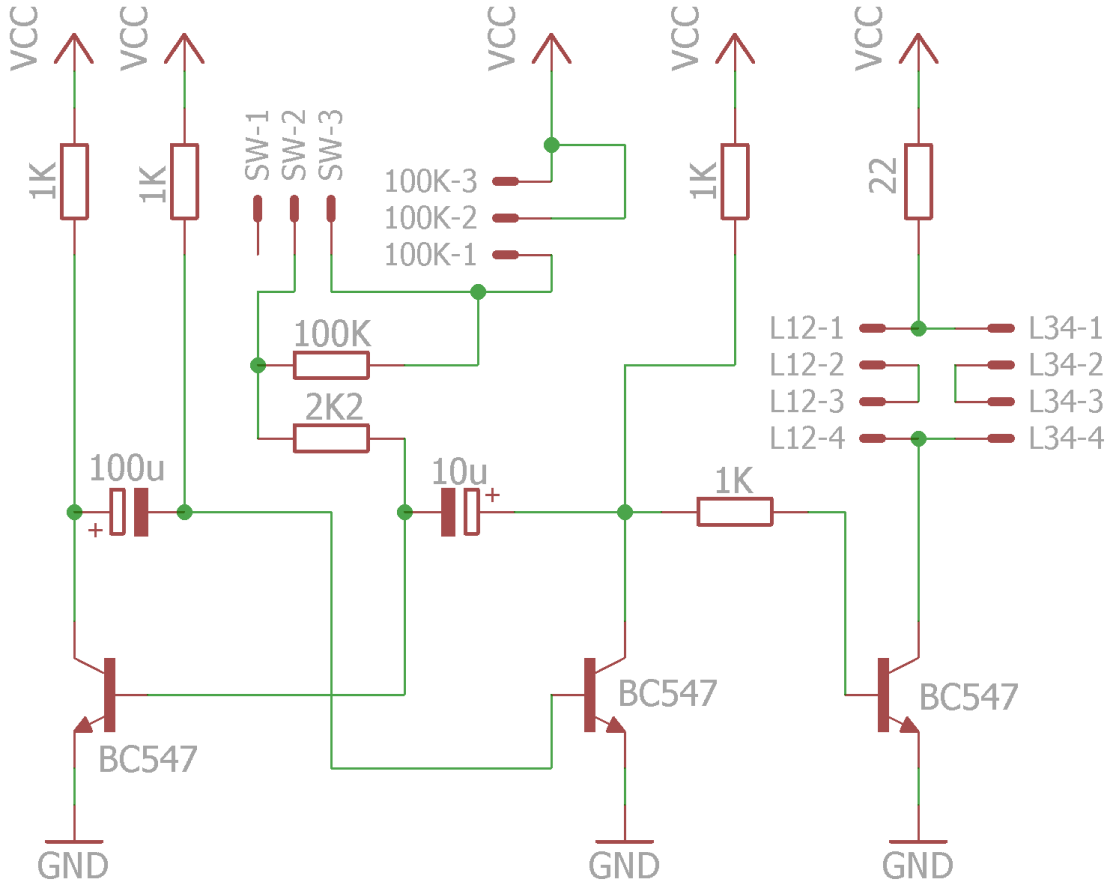


Slika 3.6: 555 vremenski sklop

Prema [1], oscilacije napona se postižu na sljedeći način: U trenutku kad se nožica 8 spoji na V_{CC}, vanjski kondenzator još nema pohranjen naboj pa su nožice 2 i 6 na potencijalu 0V. Kad se kondenzator počne puniti, povećava se potencijal na "+" ulazu prvog komparatora jer je kondenzator spojen na nožicu 6. Na "-" ulazu prvog komparatora je potencijal $\frac{2}{3}V_{CC}$. To je zbog toga što je "-" prvog komparatora spojen na potencijal ispod otpornika R_a i svi otpornici imaju iste vrijednosti. Sve dok je na "+" ulazu prvog komparatora potencijal manji od potencijala na "-" ulazu, komparator će na svom izlazu davati približno 0V. Međutim, čim napon na vanjskom kondenzatoru dosegne $\frac{2}{3}V_{CC}$, komparator će na svom izlazu davati napon od V_{CC}. Na taj način signal dolazi na R-ulaz flip-flop pojačala zbog čega se na njegovom Q-izlazu pojavi 0V, odnosno na $\overline{Q}$ se pojavi napon V_{CC} jer su Q i $\overline{Q}$ uvijek u suprotnom stanju. Taj signal dodatno prolazi kroz inverter što za posljedicu ima napon od 0V na izlazu 555-sklopa (nožica 3). Time se vanjski kondenzator počne prazniti. Pražnjenjem kondenzatora izlaz prvog komparatora prijeđe na približno 0V jer je sad napon na "+" ulazu manji od napona na "-" izlazu. Pražnjenje kondenzatora utječe i na "-"

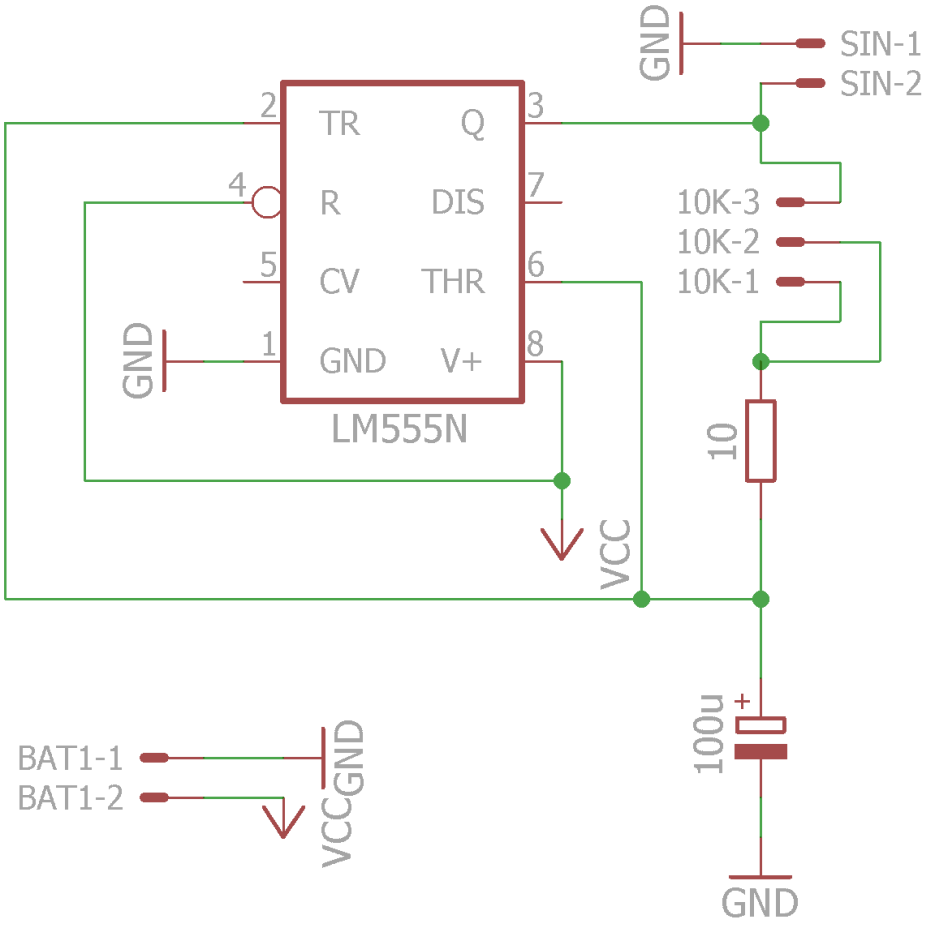
ulaz drugog komparatora jer je spojen na njega preko nožice 2. Potencijal na "+" ulazu drugog komparatora jednak je potencijalu ispod drugog otpornika od 5kΩ, tj. $\frac{1}{3}V_{CC}$. Kad se potencijal na "-" ulazu drugog komparatora, zbog pražnjenja kondenzatora, smanji ispod $\frac{1}{3}V_{CC}$, komparator će na svom izlazu davati signal napona V_{CC}. Izlaz drugog komparatora je spojen na S-ulaz flip-flop pojačala te će signal na njemu uzrokovati pad napona na 0V na izlazu flip-flop pojačala koji će prekinuti pražnjenje kondenzatora i nakon invertera davati na izlazu 555-sklopa signal određenog napona. Nakon toga se ciklus ponavlja sve dok je cijeli sklop priključen na izvor napona te se na taj način proizvode oscilacije napona za titranje cjevčice za vodu.

3.2 Shema elektroničkog sklopa na pločici



Slika 3.7: Shema stroboskopa

Na slici 3.7 prikazana je shema elektroničkog sklopa koji proizvodi potrebne oscilacije napona za stroboskopsko svjetlo. Oznakom BC547 označeni su bipolarni tranzistori čije karakteristike su priložene kao dodatak A. BC547 tranzistori su izabrani jer su u ulozi naponskog pojačala pouzdani i njihova cijena nije previsoka. Kao izvor svjetlosti izabrane su LED žaruljice (oznake L12-1, L12-2, L12-3, L12-4, L34-1, L34-2, L34-3 i L34-4 na slici 3.6) zbog toga što se ne pregrijavaju jako, imaju dugačak vijek trajanja i njihove cijene su pristupačne. Svjetlosna jakost svake LED žaruljice je 15 000 milikandela.



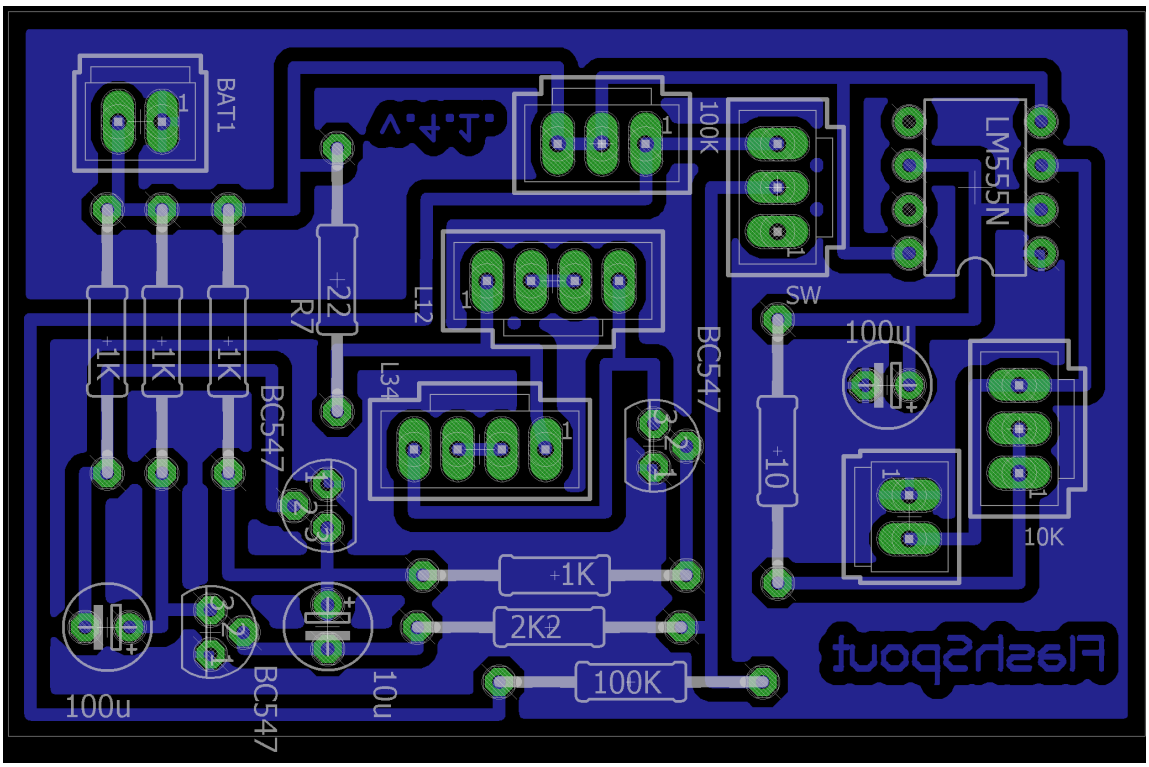
Slika 3.8: Shema oscilatora cjevčice za vodu

Na slici 3.8 prikazana je shema elektroničkog sklopa za titranje cjevčice iz koje će teći voda. Tip 555-sklopa je LM555N te su njegove karakteristike priložene u dodatku B. Izabran je zbog svoje pouzdanosti i pristupačne cijene.

U oba sklopa su vrijednosti otpornika izabrane tako da na ostalim komponentama budu padovi napona koji su propisani u njihovim karakteristikama. Kondezatori su elektrolitski zbog pristupačnije cijene te pošto su dio RC-mreže, njihove su vrijednosti izabrane tako da se mogu postići frekvencije oscilacija napona koje je autor shema zamislio.

Sheme su nacrtane u programu *Eagle* (jedan od programa za projektiranje tiskanih pločica) prema shemama iz literature [2].

3.3 Izgled pločice



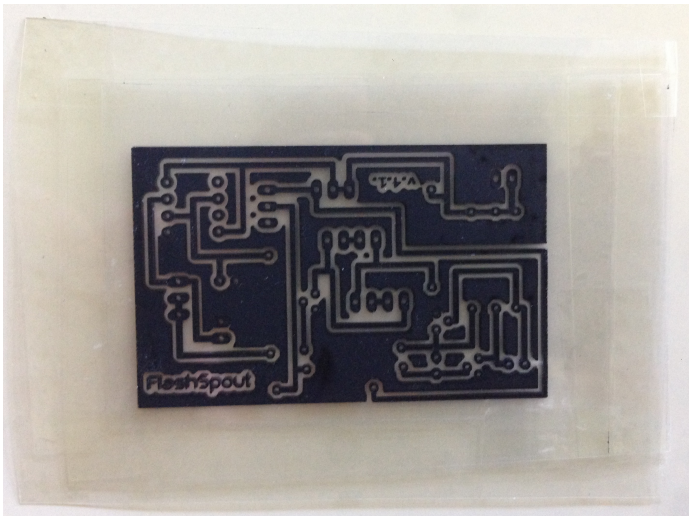
Slika 3.9: Izgled pločice prije izrade

Nakon što su sheme nacrtane prema njima se, također pomoću programa *Eagle*, izrađuje izgled same pločice. Na slici 3.9 prikazan je izgled pločice prije njene izrade. Izgled pločice izrađen je prema shemama sa slika 3.7 i 3.8 (oba sklopa nalaze se na istoj pločici). Program prikazuje rubove odabranih komponenata, tj. slikovni prikaz koliko površine pločice zauzima pojedina komponenta te vodove kojima su povezane. Komponente su "ručno" raspoređene tako da je pločica što manja i da je komponente moguće međusobno povezati na samo jednom sloju pločice, a da se pritom nespojivi vodovi ne sijeku. Zbog

takvih uvjeta, sam proces raspoređivanja komponenti može potrajati dosta dugo jer se rješavanjem jednog problema povezivanja komponenti obično pojavi novi problem, pogotovo kada je sklop složeniji. Na primjer, u želji da pločica bude što manja se komponente raspoređuju što bliže jedna drugoj. Nakon što se komponente povežu može se dogoditi da nožica neke komponente koja treba biti uzemljena nema dovoljno površine pločice za uzemljenje. Tada je potrebno ili pronaći novi put povezivanja komponenti čiji vod "smeta" ili razmaknuti određene komponente. Ponovnim micanjem već vodovima spojenih komponenti se pomiću i vodovi koje je zatim potrebno ispravljati ili obrisati i ponovo nacrtati što dodatno oduzima vrijeme. Također, potrebno je posebno pripaziti jesu li u shemi povezane sve komponente koje trebaju biti povezane jer ukoliko nisu, neće biti povezane niti prilikom izrade izgleda pločice pa pločica neće raditi. Prilikom izrade izgleda pločice mijenjale su se i vrste komponenti zbog naknadnog uočavanja potencijalnih problema kod montiranja pločice na drveno kućište pa je na slici 3.9 zapravo prikazana četvrta verzija izgleda pločice.

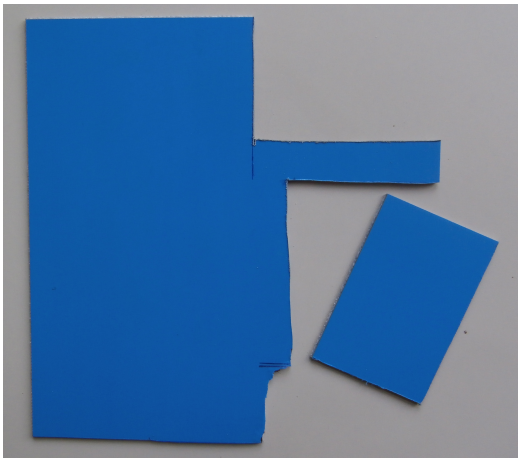
3.4 Izrada pločice

Nakon što je izrađen konačan izgled pločice, kreće njena izrada. Najprije se na prozirnu foliju isprinta napravljen izgled pločice prikazan na slici 3.9 bez bijelo označenih granica komponenata i njihovih naziva. Radi boljeg zatamnjenja crnih dijelova isprintaju se još dvije kopije folije pa se postave jedna na drugu tako da se poklope svi dijelovi. Folije se fiksiraju pomoću selotejpa kako se ne bi pomakle nakon namještanja. Na slici 3.10 prikazane su fiksirane folije.



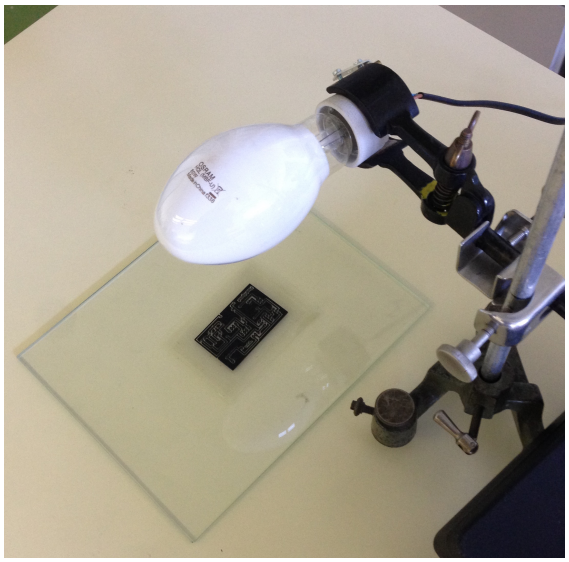
Slika 3.10: Folije s isprintanim vodovima

Iz ploče, na čijoj podlozi od vitroplasta je nanesen sloj bakra i foto lak preko kojeg se nalazi zaštitna folija, izrezuje se njišućom pilom manja pločica tako da na nju stane isprintan nacrt vodova na folijama (slika 3.11).



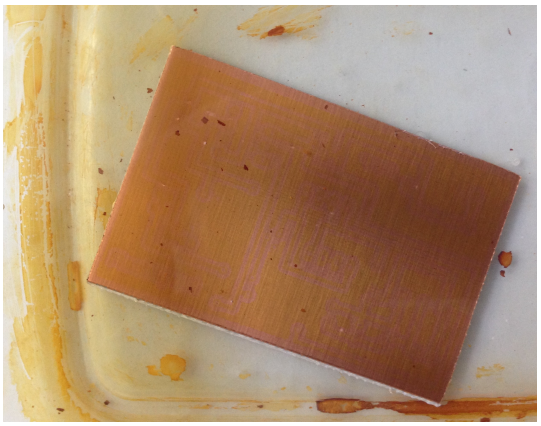
Slika 3.11: Izrezana foto pločica

Nakon što se makne zaštitna folija s male foto pločice, na nju se postavljaju folije s nacrtom vodova. Na folije se dodatno postavlja tanka staklena ploča kako bi bile ravne prilikom osvjetljavanja s UV-lampom kao što je prikazano na slici 3.12. Vrijeme osvjetljavanja se podešava ovisno o udaljenosti pločice od UV-lampe i debljini staklene ploče.

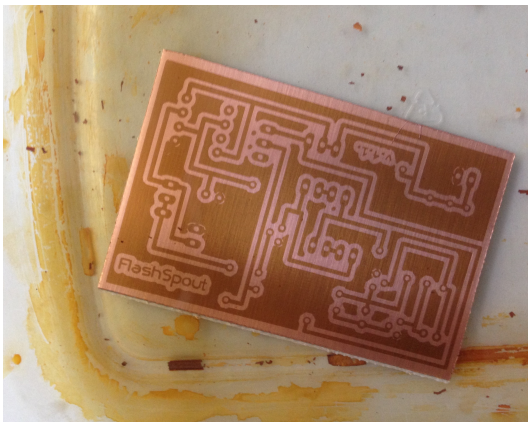


Slika 3.12: UV-lampa za osvjetljavanje foto pločice

Tijekom izloženosti UV svjetlu dolazi do reakcije laka koji nije zaštićen ispisanim tiskanim vodovima na foliji. Osvjetljena pločica na prvi pogled izgleda isto kao i prije osvjetljavanja, ali ako se pogleda izbliza mogu se uočiti blijedi tiskani vodovi. Nakon toga se foto pločica razvije u otopini NaOH. Otopina se radi tako da se na 0.3l do 0.5l vode stavlja 22g NaOH. Osvjetljena pločica uroni se u tako pripremljenu otopinu i lagano trese nekoliko minuta (slika 3.13). Otopina NaOH skida foto lak na mjestima gdje je aktiviran UV svjetlom.

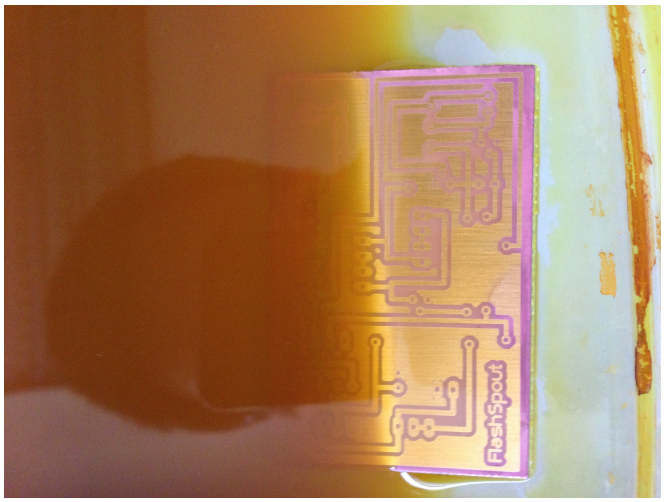


Slika 3.13: Pločica u otopini NaOH

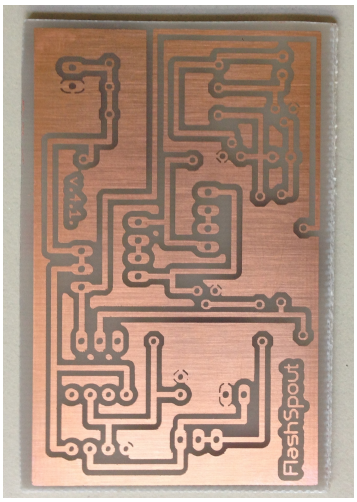


Slika 3.14: Razvijeni vodovi

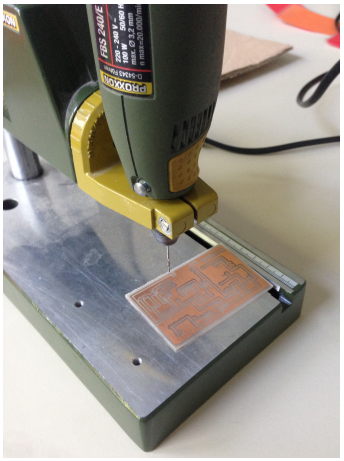
Kad postanu vidljivi svi vodovi (slika 3.14), pločica se izvadi iz otopine i ispere u običnoj vodi. Nakon toga slijedi jetkanje, odnosno nagrizanje tiskane pločice. Ovim postupkom



Slika 3.15: Jetkanje pločice

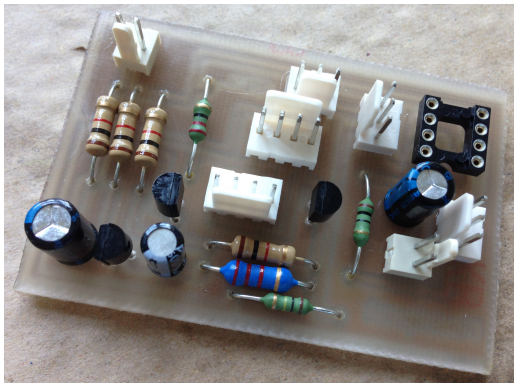


Slika 3.16: Pločica nakon čišćenja

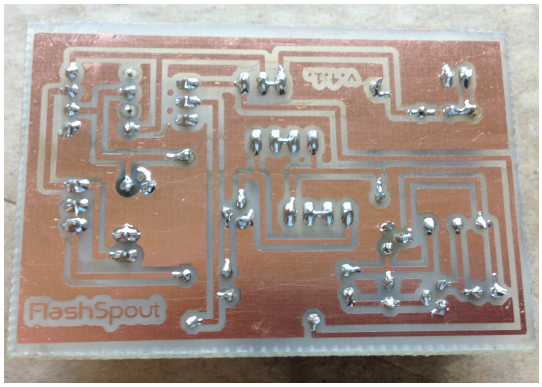


Slika 3.17: Bušenje rupica

uklanja se višak bakra s pločice. Za jetkanje je potrebna otopina feriklorida. Pločica se uroni u otopinu i opet lagano trese (slika 3.15). Nakon nekoliko minuta, uklonjen je bakar iz izolacijskih vodova. Pločica se ponovo ispere običnom vodom kako bi se prekinulo jetkanje i očisti izopropilnim alkoholom kako bi se maknuo višak fotosloja. Izgled pločice nakon čišćenja je prikazan na slici 3.16. Sad je pločica spremna za bušenje rupica potrebnih za postavljanje komponenata. Veličina provrta ovisi o debljini nožica komponenti. Za konektore su korišteni provrti veličine 1mm, a za sve ostale komponente provrti veličine 0.5mm. Na slici 3.17 prikazana je korištena modelarska bušilica učvršćena na vertikalni nosač. Nakon što su sve rupice izbušene, kreće lemljenje samih komponenata na pločicu.



Slika 3.18: Gotova pločica (odozgo)

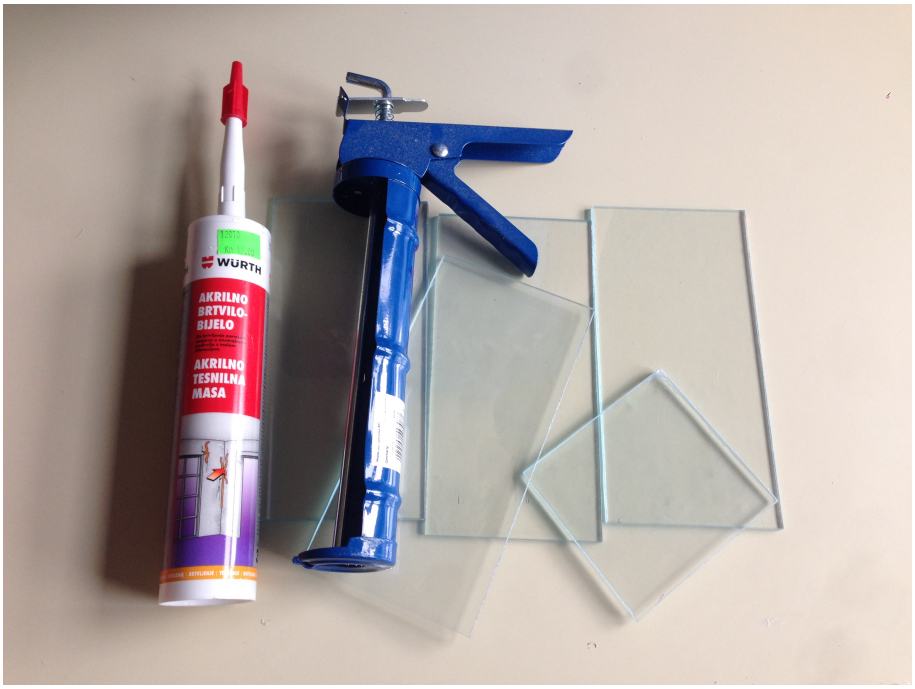


Slika 3.19: Gotova pločica (odozdo)

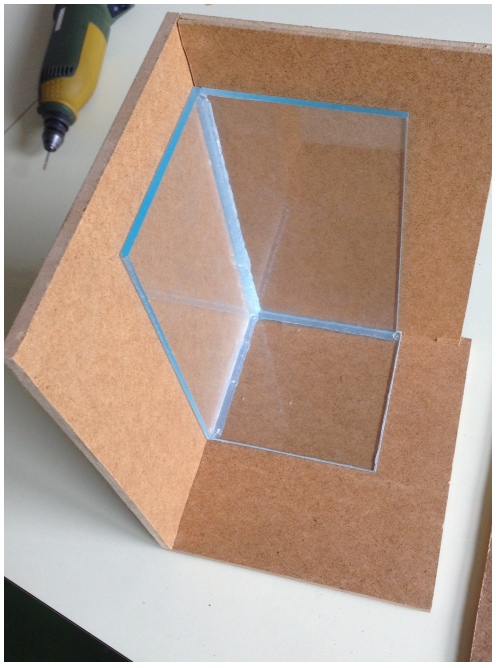
Radi lakšeg lemljenja, pločica se prije naspreja s FLUX-om. Na slikama 3.18 i 3.19 je prikazana gotova pločica.

3.5 Izrada drvenog kućišta i posude za vodu

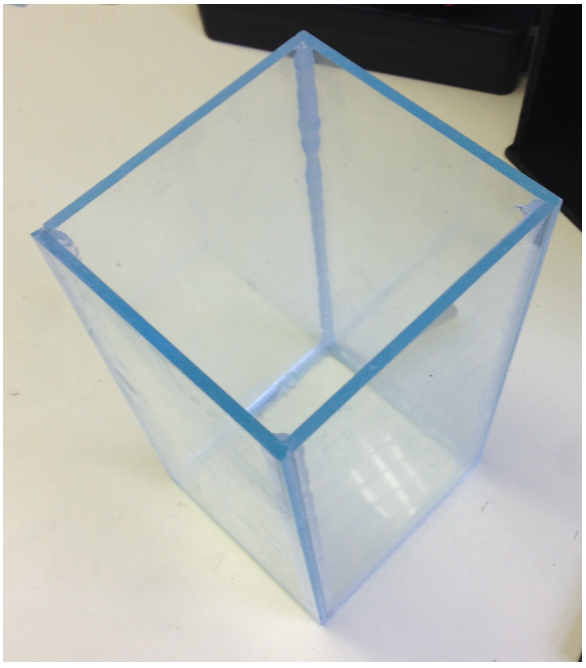
Strane kućišta su pomoću ubodne pile izrezane iz drvene ploče te su vijcima međusobno spojene. Jedna pobočna strana kućišta je pričvršćena preko šarki pa se kućište može otvarati i zatvarati. Vrata kućišta imaju i prozor tako da kad su zatvorena, vizualna iluzija se može promatrati kroz taj prozor. Strane posude za vodu su dobivene tako da se ploča pleksiglasa više puta zarezala skalpelom po istoj crti uz kutnik, a zatim lomila po toj istoj crti. Na slici 3.20 prikazane su strane za posudu vode i silikon pomoću kojeg su međusobno spojene. Na slici 3.21 prikazan je dio drvenog kućišta i sušenje silikona kojim su spojene tri strane posude za vodu. Na slici 3.22 prikazana je gotova posuda za vodu. Drveno kućište je nasprejano crno i na jednoj pobočnoj strani su, pomoću stolne bušilice, napravljene rupe za potenciometre i sklopke (slika 3.23), a na stražnjoj su strani, pomoću modelarske bušilice, napravljene rupice kroz koje će prolaziti nožice LED žaruljica (slika 3.24).



Slika 3.20: Ploče od pleksiglasa i silikon

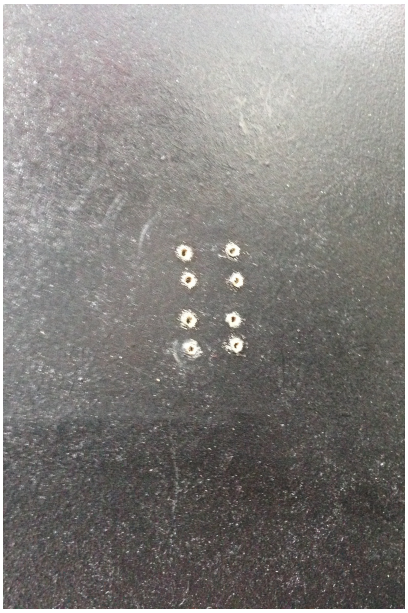


Slika 3.21: Sušenje silikona



Slika 3.22: Gotova posuda za vodu

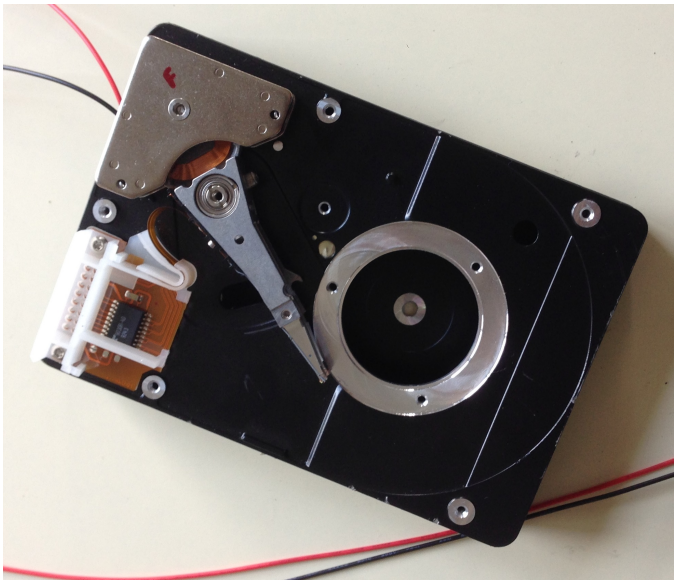
Slika 3.23: Nasprejano drveno kućište



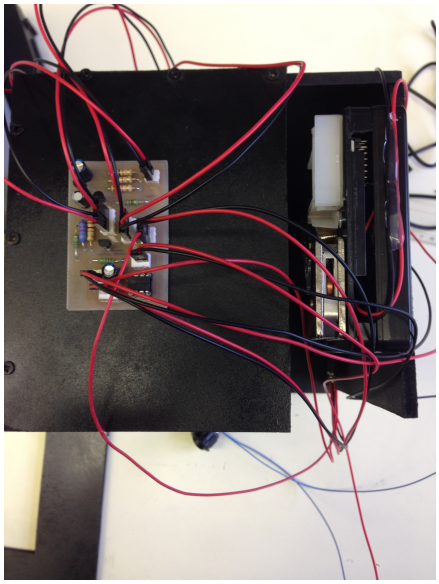
Slika 3.24: Rupice za žaruljice

3.6 Konačan izgled uređaja

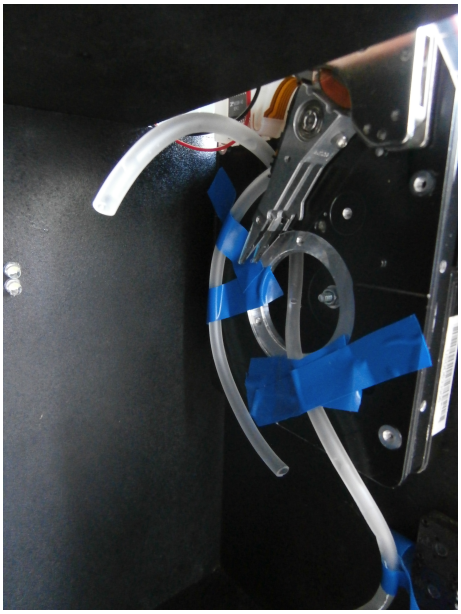
Nakon što je kućište izrađeno, u njega se montiraju LED žaruljice i tvrdi disk. LED žaruljice su unutar kućišta zalijepljene vrućim ljepilom, a njihove nožice su s vanjske strane kućišta spojene preko žica na pločicu. Tvrdi disk je učvršćen pomoću vijka i vrućeg ljepila te je i on spojen putem žica na pločicu. Na slici 3.25 je posebno prikazan tvrdi disk sa žicama za spajanje na pločicu, a na slici 3.26 je prikazana, vrućim ljepilom na gornju stranu kućišta zalijepljena, pločica. Sklopka za paljenje i gašenje titranja cjevčice i stroboskopa i sklopka za izmjenu načina rada stroboskopa te potenciometri se također spajaju preko žica na pločicu. Na tvrdi disk se djelomično fiksira cjevčica (slika 3.27) koja će titrati i kroz koju će teći voda u posudu. Pumpica za vodu će podizati vodu iz posude nazad na titrajući dio cijevi. Na slikama 3.28, 3.29 i 3.30 prikazan je konačan izgled uređaja.



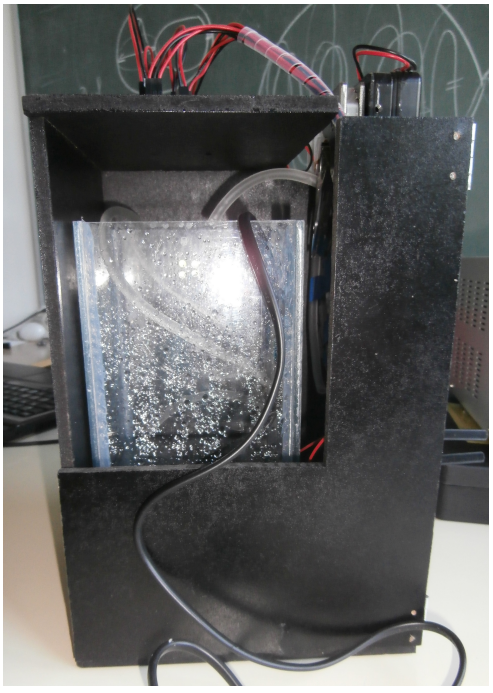
Slika 3.25: Tvrdi disk



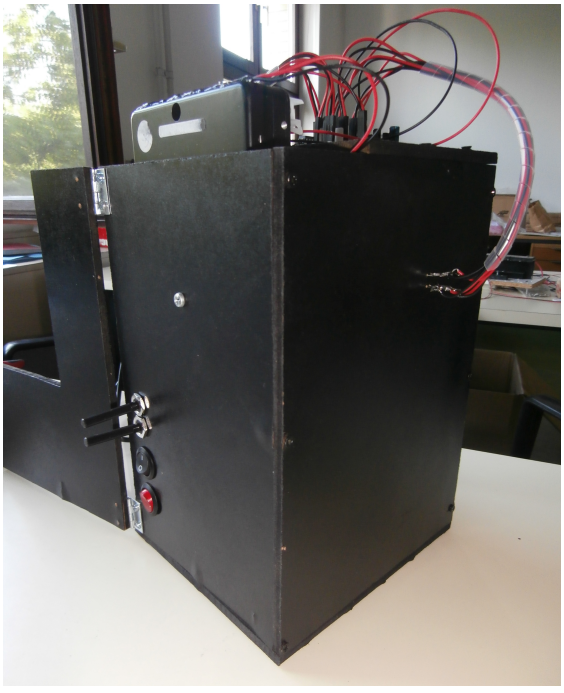
Slika 3.26: Zalijepljena pločica



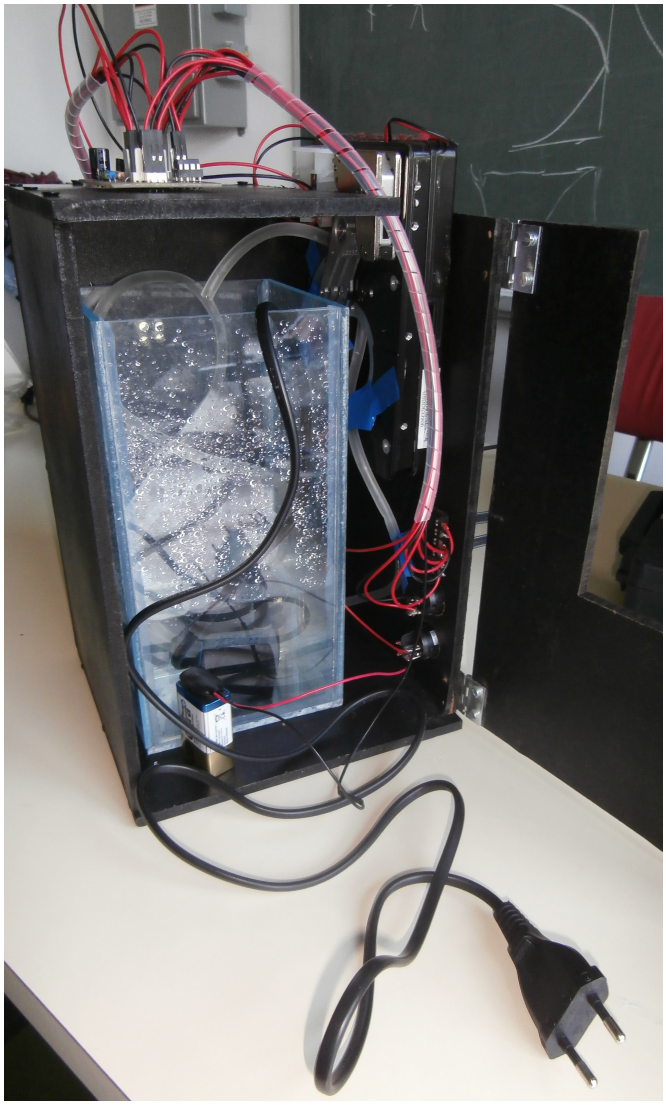
Slika 3.27: Fiksirana cijev za vodu



Slika 3.28: Konačan izgled uređaja



Slika 3.29: Konačan izgled uređaja

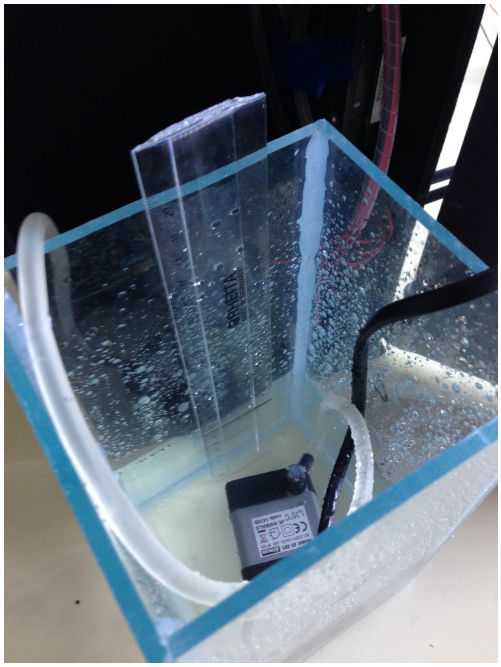


Slika 3.30: Konačan izgled uređaja

3.7 Određivanje akceleracije slobodnog pada pomoću stroboskopa

U posudu s vodom postavljeno je obično ravnalo kao što je prikazano na slici 3.31. Pomoću potenciometra podešena je neka frekvencija titranja cjevčice na kojoj se dobro vidi kako voda miruje pod stroboskopskim svjetlom (slika 3.32). Elektroničkim stroboskopom s mogućnošću očitavanja frekvencije kojom bljeska, određuje se frekvencija titranja cjev-

čice. Frekvencija stroboskopa se polako povećava počevši od 0Hz te u trenutku kad voda prvi put izgleda kao da miruje se očitava.



Slika 3.31: Ravnalo u posudi s vodom

Slika 3.32: Voda prividno miruje

Izmjerene vrijednosti frekvencije stroboskopa f_S i titranja cjevčice f_V su:

$$f_S = f_V = (22 \pm 1)\ \text{Hz}\ .$$

Na ravnalu očitani položaji centara svijetlih dijelova vodene spirale (njeni "brijegovi" i "dolovi") su prikazani u tablici 1. Prvi podatak je vertikalni položaj prvog odozgo svijetlog dijela.

Tablica 1. Na ravnalu očitani vertikalni položaji svijetlih dijelova vodene spirale

n	Položaj na ravnalu / cm
1	20.5 ± 0.1
2	19.0 ± 0.1
3	16.9 ± 0.1
4	14.0 ± 0.1
5	10.4 ± 0.1

Dio složenog gibanja koje kap vode izvodi je i slobodan pad. Kako su frekvencije titranja cjevčice i bljeskanja jednake, kap vode koja je u vrijeme prvog bljeska bila u prvom svije-

tlom dijelu spirale (npr. "brijegu"), u vrijeme sljedećeg bljeska će biti u trećem svijetlom dijelu (opet "brijeg") pa je iznos vertikalnog pomaka kapi u tom vremenu jednak razlici prvog i trećeg položaja. Prema [17], udaljenost y koju tijelo pri slobodnom padu, s početnom brzinom v_0 u smjeru y-osi, u vremenu Δt prijeđe dana je relacijom:

$$y = \frac{g}{2} \cdot \Delta t^2 + v_0 \Delta t \,. \tag{3.1}$$

Označimo s ΔT_S vrijeme između dva bljeska. Neka je t_0 vrijeme koje je prošlo od izlaska vode iz cjevčice do dolaska na poziciju na kojoj se nalazi na prvom bljesku. Ako je Δy_1 udaljenost koju kap vode prođe između zabilježenih položaja n_1 i n_2 (u vremenu $\Delta T_S/2$) nakon toga i analogno dalje Δy_k udaljenost koju prođe između zabilježenih položaja n_k i n_{k+1} (isto u vremenu $\Delta T_S/2$), onda prema (3.1) slijedi:

$$\begin{aligned} \Delta y_k = \frac{g}{2} \cdot \left(t_0 + k\frac{\Delta T_S}{2} \right)^2 + v_0 \left(t_0 + k\frac{\Delta T_S}{2} \right) \\ -\frac{g}{2} \cdot \left(t_0 + (k-1)\frac{\Delta T_S}{2} \right)^2 - v_0 \left(t_0 + (k-1)\frac{\Delta T_S}{2} \right) \\ = (v_0 + g t_0)\frac{\Delta T_S}{2} + g \left(\frac{\Delta T_S}{2} \right)^2 \left(k - \frac{1}{2} \right) . \end{aligned} \tag{3.2}$$

Vrijednosti Δy_1, Δy_2 i Δy_3 se dobiju pomoću podataka iz tablice:

$$\begin{aligned} \Delta y_1 &= n_1 - n_2 = 1.5\text{cm} \,, \\ \Delta y_2 &= n_2 - n_3 = 2.1\text{cm} \,, \\ \Delta y_3 &= n_3 - n_4 = 2.9\text{cm} \,. \end{aligned} \tag{3.3}$$

Za pripadne varijable propagira se greška iz mjerenja položaja na ravnalu, te vrijedi:

$$\begin{aligned} \sigma_{\Delta y_1} &= \sqrt{\left(\frac{\partial \Delta y_1}{\partial n_1} \right)^2 \sigma_{n_1}^2 + \left(\frac{\partial \Delta y_1}{\partial n_2} \right)^2 \sigma_{n_2}^2} = 0.1\text{cm} \,, \\ \sigma_{\Delta y_2} &= \sqrt{\left(\frac{\partial \Delta y_2}{\partial n_2} \right)^2 \sigma_{n_2}^2 + \left(\frac{\partial \Delta y_2}{\partial n_3} \right)^2 \sigma_{n_3}^2} = 0.1\text{cm} \,, \\ \sigma_{\Delta y_3} &= \sqrt{\left(\frac{\partial \Delta y_3}{\partial n_3} \right)^2 \sigma_{n_3}^2 + \left(\frac{\partial \Delta y_3}{\partial n_4} \right)^2 \sigma_{n_4}^2} = 0.1\text{cm} \,. \end{aligned} \tag{3.4}$$

Iz dobivenih vrijednosti za Δy_1 i Δy_2 mogu se, uz poznatu frekvenciju stroboskopa, odrediti ubrzanje sile teže, vrijeme t_0 i brzina v_0, od kojih nas zanima samo g:

$$g = 4 f_S^2 (\Delta y_2 - \Delta y_1) \,, \tag{3.5}$$

pri čemu se uzela u obzir relaciija (1.2). Uvrštavanjem vrijednosti (3.3) dobija se vrijednost $g = 11.6\,\mathrm{m/s^2}$. Greška za g nalazi se na isti način kao i ranije:

$$\begin{aligned}
\sigma_g &= \sqrt{\left(\frac{\partial g}{\partial f_s}\right)^2 \sigma_{f_s}^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial \Delta y_1}\right)^2 \sigma_{\Delta y_1}^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial \Delta y_2}\right)^2 \sigma_{\Delta y_2}^2} \\
\left(\frac{\partial g}{\partial f_s}\right)^2 \sigma_{f_s}^2 &= 64 f_s (\Delta y_2 - \Delta y_1)^2 \sigma_{f_s}^2 = 0.05\,\frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{s}^4}\,, \\
\left(\frac{\partial g}{\partial \Delta y_1}\right)^2 \sigma_{\Delta y_1}^2 &= 16 f_s^4 \sigma_{\Delta y_1}^2 = 3.75\,\frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{s}^4}\,, \\
\left(\frac{\partial g}{\partial \Delta y_1}\right)^2 \sigma_{\Delta y_1}^2 &= 16 f_s^4 \sigma_{\Delta y_1}^2 = 3.75\,\frac{\mathrm{m}^2}{\mathrm{s}^4}\,,
\end{aligned} \tag{3.6}$$

Kad se greške zbroje u kvadraturi, konačno slijedi $g = (12 \pm 3)\,\mathrm{m/s^2}$. Prema [17] vrijednost akceleracije slobodnog pada je $g = 9.81$ m/s. Literaturna vrijednost se nalazi u dobivenom intervalu, međutim mjerenje je dosta neprecizno zbog nemogućnosti preciznog mjerenja ovakvim postavom.

Bibliografija

[1] *555 Astables*, http://www.learnabout-electronics.org/Oscillators/osc43.php.

[2] *555 Hysteretic Oscillator*, http://www.allaboutcircuits.com/textbook/experiments/chpt-8/555-hysteretic-oscillator/.

[3] *Astable Multivibrator*, http://www.electronics-tutorials.ws/waveforms/astable.html.

[4] *Harold "Doc" Edgerton*, http://web.mit.edu/6.933/www/Fall2000/edgerton/www/intro.html.

[5] *How come wheels rotate backwards in movies?*, http://www.sciencelet.com/2013/05/how-come-wheels-rotate-backwards-in.html.

[6] *Mijenjanje trenutka paljenja*, http://www.oktani.com/razvodnik_paljenja.php.

[7] *Nelinearni sklopovi s operacijskim pojačalima*, http://marjan.fesb.hr/~mateljan/evi/Lek04%20-%20Sklopovi%20analogne%20obrade%20signala.pdf.

[8] *Oscillator Basics*, http://www.learnabout-electronics.org/Oscillators/osc10.php.

[9] *Oscillator Operation*, http://www.learnabout-electronics.org/Oscillators/osc11.php.

[10] *Paljenje i predpaljenje*, http://www.auto-mart.hr/edukacija_3.htm.

[11] *The RC Oscillator Circuit*, http://www.electronics-tutorials.ws/oscillator/rc_oscillator.html.

[12] *Stroboscopic Effect : Applications And Mechanism*, http://functionspace.com/articles/134/Stroboscopic-Effect---Applications-And-Mechanism.

[13] *Vrtnja kotača*, http://www.phy.pmf.unizg.hr/~pzugec/Vrtnja/Vrtnja.html.

[14] S. Herbert, *The Phenakistiscope and Stroboscopic Disc*, http://www.stephenherbert.co.uk/phenakPartOne.htm.

[15] F. Van Veen, *Handbook of Stroboscopy*, http://www.ietlabs.com/pdf/application_notes/Handbook_Stroboscopy.pdf.

[16] Ž. Vrcan, N. Lovrin i G. Gregov, *Primjene stroboskopa*, http://hrcak.srce.hr/39448.

[17] H. D. Young i R. A. Freedman, *University Physics*, Pearson, 2012.

Sažetak

Stroboskop je uređaj koji proizvodi periodične bljeskove svjetlosti. Postoje mehanički i elektronički stroboskopi. Razlika između mehaničkih i elektroničnih stroboskopa, osim izgleda, je u tome što je kod promatranja periodičnog kretanja objekta s mehaničkim stroboskopom objekt osvijetljen vanjskim izvorom svjetlosti koja nema oku vidljive prekide, a kod elektroničkog stroboskopa se objekt osvjetljava bljeskovima.

Stroboskopski učinak je optička iluzija mirovanja tijela, koje se periodički giba, ili njegova usporenog kretanja ili kretanja u suprotnom smjeru od stvarnog smjera kretanja, prilikom promatranja njegova gibanja u periodično izdvojenim trenutcima. Stroboskopski učinak može se postići i pomoću kamere. Jedan od primjera u kojima se uočava stroboskopski učinak je lebdeća voda. Prilikom promatranja vode koja teče iz titrajuće cjevčice ili periodično kaplje, ovisno o frekvencijama titranja cjevčice/kapanja vode i stroboskopskog svjetla, promatraču se može činiti da voda polako teče prema dolje, da lebdi ili čak da ide prema gore. Dio ovog diplomskog rada je i izrada uređaja koji demonstrira lebdeću vodu. Konačan izgled uređaja je dan na slikama 3.28, 3.29 i 3.30.

Summary

A stroboscope is an instrument which produces brief repetitive flashes of light. There are two types of stroboscopes: mechanical and electronic. The difference between them is not only in their appearance. In a mechanical stroboscope an object is illuminated by an external light source which doesn't flicker visibly, while in an electronic stroboscope the object is being illuminated by light flashes.

The stroboscopic effect is a perceptual illusion that causes objects in periodic motion to appear stationary, moving more slowly in their proper direction or even moving in reverse direction when observed in periodically separated moments. The stroboscopic effect may be also acchieved with a camera. Levitating water is one of the perceptual ilusions due to the stroboscopic effect. Under stroboscopic light, periodically falling water may appear stationary, falling more slowly or even moving upwards. A part of this thesis was to build a device which demonstrates levitating water. The final look of device is shown in figures 3.28, 3.29 i 3.30.

Životopis

Rođena sam 1993. godine u Čakovcu gdje sam pohađala II osnovnu školu Čakovec i Gimnaziju Josipa Slavenskog, opći program. Nakon završetka gimnazije upisala sam integrirani preddiplomski i diplomski studij Matematika i fizika, nastavnički smjer na Matematičkom odsjeku Prirodoslovno-matematičkog fakulteta u Zagrebu.

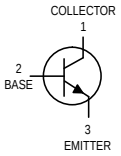
Dodatak A - karakteristike BC547

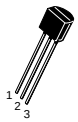
MOTOROLA
SEMICONDUCTOR TECHNICAL DATA

Order this document
by BC546/D

Amplifier Transistors
NPN Silicon

BC546, B
BC547, A, B, C
BC548, A, B, C





CASE 29–04, STYLE 17
TO–92 (TO–226AA)

MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	BC 546	BC 547	BC 548	Unit
Collector–Emitter Voltage	V_{CEO}	65	45	30	Vdc
Collector–Base Voltage	V_{CBO}	80	50	30	Vdc
Emitter–Base Voltage	V_{EBO}	6.0			Vdc
Collector Current — Continuous	I_C	100			mAdc
Total Device Dissipation @ T_A = 25°C Derate above 25°C	P_D	625 5.0			mW mW/°C
Total Device Dissipation @ T_C = 25°C Derate above 25°C	P_D	1.5 12			Watt mW/°C
Operating and Storage Junction Temperature Range	T_J, T_{stg}	–55 to +150			°C

THERMAL CHARACTERISTICS

Characteristic	Symbol	Max	Unit
Thermal Resistance, Junction to Ambient	$R_{\theta JA}$	200	°C/W
Thermal Resistance, Junction to Case	$R_{\theta JC}$	83.3	°C/W

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (T_A = 25°C unless otherwise noted)

Characteristic		Symbol	Min	Typ	Max	Unit
OFF CHARACTERISTICS						
Collector–Emitter Breakdown Voltage (I_C = 1.0 mA, I_B = 0)	BC546 BC547 BC548	$V_{(BR)CEO}$	65 45 30	— — —	— — —	V
Collector–Base Breakdown Voltage (I_C = 100 μAdc)	BC546 BC547 BC548	$V_{(BR)CBO}$	80 50 30	— — —	— — —	V
Emitter–Base Breakdown Voltage (I_E = 10 μA, I_C = 0)	BC546 BC547 BC548	$V_{(BR)EBO}$	6.0 6.0 6.0	— — —	— — —	V
Collector Cutoff Current (V_{CE} = 70 V, V_{BE} = 0) (V_{CE} = 50 V, V_{BE} = 0) (V_{CE} = 35 V, V_{BE} = 0) (V_{CE} = 30 V, T_A = 125°C)	 BC546 BC547 BC548 BC546/547/548	I_{CES}	 — — — —	 0.2 0.2 0.2 —	 15 15 15 4.0	 nA μA

REV 1

© Motorola, Inc. 1996

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (T_A = 25°C unless otherwise noted) (Continued)

Characteristic		Symbol	Min	Typ	Max	Unit
ON CHARACTERISTICS						
DC Current Gain		h_{FE}				—
(I_C = 10 μA, V_{CE} = 5.0 V)	BC547A/548A		—	90	—	
	BC546B/547B/548B		—	150	—	
	BC548C		—	270	—	
(I_C = 2.0 mA, V_{CE} = 5.0 V)	BC546		110	—	450	
	BC547		110	—	800	
	BC548		110	—	800	
	BC547A/548A		110	180	220	
	BC546B/547B/548B		200	290	450	
	BC547C/BC548C		420	520	800	
(I_C = 100 mA, V_{CE} = 5.0 V)	BC547A/548A		—	120	—	
	BC546B/547B/548B		—	180	—	
	BC548C		—	300	—	
Collector–Emitter Saturation Voltage		$V_{CE(sat)}$				V
(I_C = 10 mA, I_B = 0.5 mA)			—	0.09	0.25	
(I_C = 100 mA, I_B = 5.0 mA)			—	0.2	0.6	
(I_C = 10 mA, I_B = See Note 1)			—	0.3	0.6	
Base–Emitter Saturation Voltage		$V_{BE(sat)}$	—	0.7	—	V
(I_C = 10 mA, I_B = 0.5 mA)						
Base–Emitter On Voltage		$V_{BE(on)}$				V
(I_C = 2.0 mA, V_{CE} = 5.0 V)			0.55	—	0.7	
(I_C = 10 mA, V_{CE} = 5.0 V)			—	—	0.77	
SMALL–SIGNAL CHARACTERISTICS						
Current–Gain — Bandwidth Product		f_T				MHz
(I_C = 10 mA, V_{CE} = 5.0 V, f = 100 MHz)	BC546		150	300	—	
	BC547		150	300	—	
	BC548		150	300	—	
Output Capacitance		C_{obo}	—	1.7	4.5	pF
(V_{CB} = 10 V, I_C = 0, f = 1.0 MHz)						
Input Capacitance		C_{ibo}	—	10	—	pF
(V_{EB} = 0.5 V, I_C = 0, f = 1.0 MHz)						
Small–Signal Current Gain		h_{fe}				—
(I_C = 2.0 mA, V_{CE} = 5.0 V, f = 1.0 kHz)	BC546		125	—	500	
	BC547/548		125	—	900	
	BC547A/548A		125	220	260	
	BC546B/547B/548B		240	330	500	
	BC547C/548C		450	600	900	
Noise Figure		NF				dB
(I_C = 0.2 mA, V_{CE} = 5.0 V, R_S = 2 kΩ,	BC546		—	2.0	10	
f = 1.0 kHz, Δf = 200 Hz)	BC547		—	2.0	10	
	BC548		—	2.0	10	

Note 1: I_B is value for which I_C = 11 mA at V_{CE} = 1.0 V.

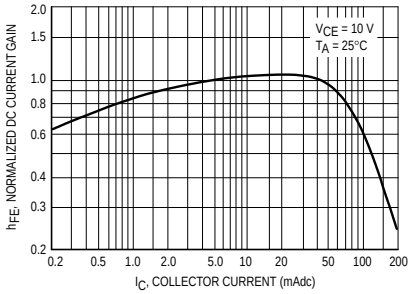


Figure 1. Normalized DC Current Gain

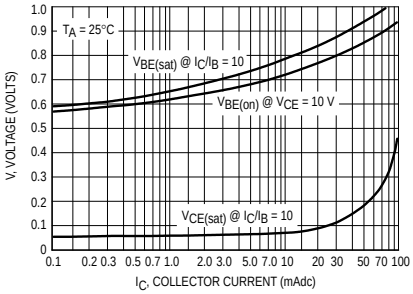


Figure 2. "Saturation" and "On" Voltages

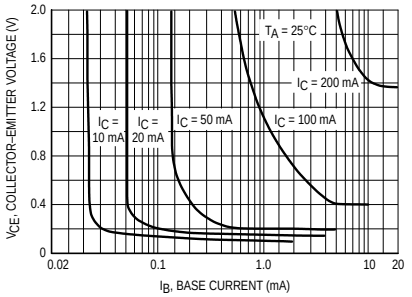


Figure 3. Collector Saturation Region

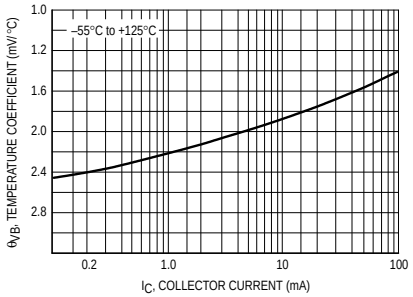


Figure 4. Base–Emitter Temperature Coefficient

BC547/BC548

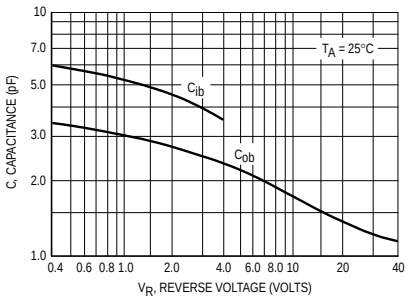


Figure 5. Capacitances

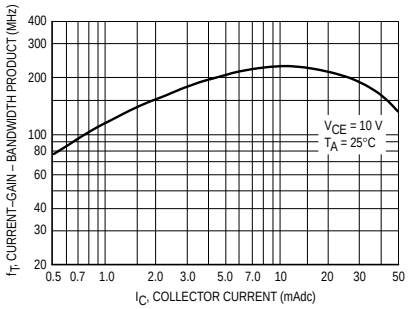


Figure 6. Current–Gain – Bandwidth Product

BC547/BC548

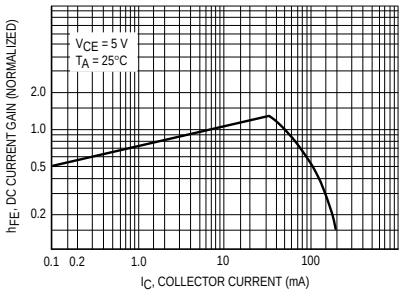


Figure 7. DC Current Gain

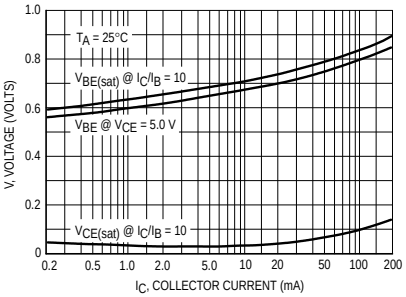


Figure 8. “On” Voltage

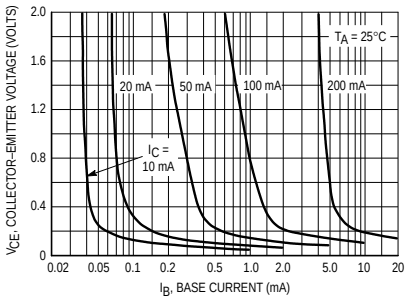


Figure 9. Collector Saturation Region

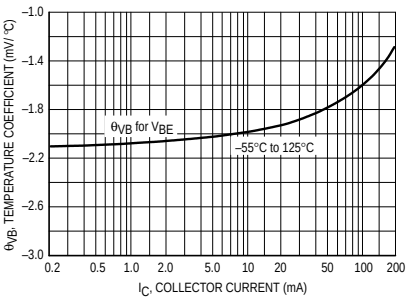


Figure 10. Base–Emitter Temperature Coefficient

BC546

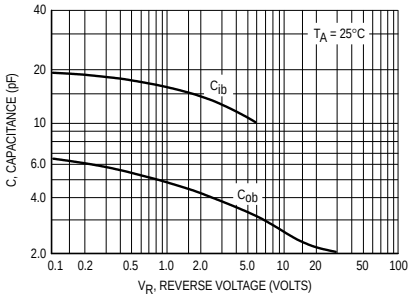


Figure 11. Capacitance

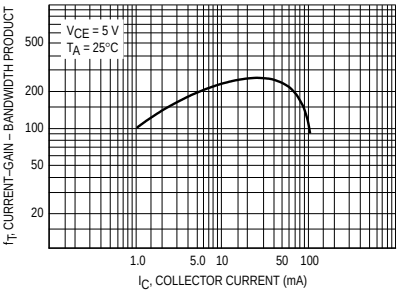
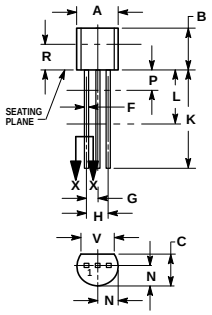


Figure 12. Current–Gain – Bandwidth Product

PACKAGE DIMENSIONS



NOTES:
1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.
2. CONTROLLING DIMENSION: INCH.
3. CONTOUR OF PACKAGE BEYOND DIMENSION R IS UNCONTROLLED.
4. DIMENSION F APPLIES BETWEEN P AND L. DIMENSION D AND J APPLY BETWEEN L AND K MINIMUM. LEAD DIMENSION IS UNCONTROLLED IN P AND BEYOND DIMENSION K MINIMUM.

	INCHES		MILLIMETERS	
DIM	MIN	MAX	MIN	MAX
A	0.175	0.205	4.45	5.20
B	0.170	0.210	4.32	5.33
C	0.125	0.165	3.18	4.19
D	0.016	0.022	0.41	0.55
F	0.016	0.019	0.41	0.48
G	0.045	0.055	1.15	1.39
H	0.095	0.105	2.42	2.66
J	0.015	0.020	0.39	0.50
K	0.500	—	12.70	—
L	0.250	—	6.35	—
N	0.080	0.105	2.04	2.66
P	—	0.100	—	2.54
R	0.115	—	2.93	—
V	0.135	—	3.43	—

CASE 029–04
(TO–226AA)
ISSUE AD

STYLE 17:
PIN 1. COLLECTOR
2. BASE
3. EMITTER

Dodatak B - karakteristike NE555N

HARRIS SEMICONDUCTOR

CA555, CA555C, LM555, LM555C, NE555

Timers for Timing Delays and Oscillator Application in Commercial, Industrial and Military Equipment

May 1997

Features

- Accurate Timing From Microseconds Through Hours
- Astable and Monostable Operation
- Adjustable Duty Cycle
- Output Capable of Sourcing or Sinking up to 200mA
- Output Capable of Driving TTL Devices
- Normally ON and OFF Outputs
- High Temperature Stability . . . . . 0.005%/^{o}C
- Directly Interchangeable with SE555, NE555, MC1555, and MC1455

Applications

- Precision Timing
- Sequential Timing
- Time Delay Generation
- Pulse Generation
- Pulse Detector
- Pulse Width and Position Modulation

Ordering Information

PART NUMBER (BRAND)	TEMP. RANGE (^{o}C)	PACKAGE	PKG. NO.
CA0555E	-55 to 125	8 Ld PDIP	E8.3
CA0555M (555)	-55 to 125	8 Ld SOIC	M8.15
CA0555M96 (555)	-55 to 125	8 Ld SOIC †	M8.15
CA0555T	-55 to 125	8 Pin Metal Can	T8.C
CA0555CE	0 to 70	8 Ld PDIP	E8.3
CA0555CM (555C)	0 to 70	8 Ld SOIC	M8.15
CA0555CM96 (555C)	0 to 70	8 Ld SOIC †	M8.15
CA0555CT	0 to 70	8 Pin Metal Can	T8.C
LM555N	-55 to 125	8 Ld PDIP	E8.3
LM555CN	0 to 70	8 Ld PDIP	E8.3
NE555N	0 to 70	8 Ld PDIP	E8.3

NOTE: † Denotes Tape and Reel

Description

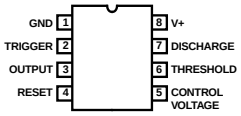
The CA555 and CA555C are highly stable timers for use in precision timing and oscillator applications. As timers, these monolithic integrated circuits are capable of producing accurate time delays for periods ranging from microseconds through hours. These devices are also useful for astable oscillator operation and can maintain an accurately controlled free running frequency and duty cycle with only two external resistors and one capacitor.

The circuits of the CA555 and CA555C may be triggered by the falling edge of the waveform signal, and the output of these circuits can source or sink up to a 200mA current or drive TTL circuits.

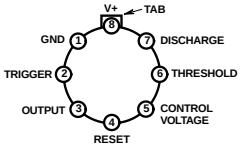
These types are direct replacements for industry types in packages with similar terminal arrangements e.g. SE555 and NE555, MC1555 and MC1455, respectively. The CA555 type circuits are intended for applications requiring premium electrical performance. The CA555C type circuits are intended for applications requiring less stringent electrical characteristics.

Pinouts

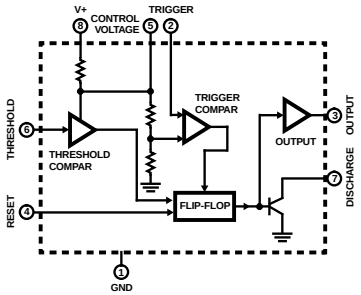
CA555, CA555C (PDIP, SOIC)
LM555, LM555C, NE555 (PDIP)
TOP VIEW



CA555, CA555C (METAL CAN)
TOP VIEW



Functional Block Diagram



CAUTION: These devices are sensitive to electrostatic discharge. Users should follow proper IC Handling Procedures.

Copyright © Harris Corporation 1997

File Number **834.4**

Absolute Maximum Ratings

DC Supply Voltage 18V

Operating Conditions

Temperature Range
- CA555, LM555 . . . . . -55^{o}C to 125^{o}C
- CA555C, LM555C, NE555 . . . . . .0^{o}C to 70^{o}C

Thermal Information

Thermal Resistance (Typical, Note 1)	θ_{JA} (^{o}C/W)	θ_{JC} (^{o}C/W)
Metal Can Package	170	85
PDIP Package	100	N/A
SOIC Package	160	N/A

Maximum Junction Temperature (Hermetic Package) . . . . . 175^{o}C
Maximum Junction Temperature (Plastic Package) . . . . . 150^{o}C
Maximum Storage Temperature Range . . . . . -65^{o}C to 150^{o}C
Maximum Lead Temperature (Soldering 10s) . . . . . 300^{o}C
(SOIC - Lead Tips Only)

CAUTION: Stresses above those listed in "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. This is a stress only rating and operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operational sections of this specification is not implied.

NOTE:

1. θ_{JA} is measured with the component mounted on an evaluation PC board in free air.

Electrical Specifications

T_A = 25^{o}C, V+ = 5V to 15V Unless Otherwise Specified

PARAMETER	SYMBOL	TEST CONDITIONS	CA555, LM555			CA555C, LM555C, NE555			UNITS
			MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
DC Supply Voltage	V+		4.5	-	18	4.5	-	16	V
DC Supply Current (Low State), (Note 2)	I+	V+ = 5V, $R_L = \infty$	-	3	5	-	3	6	mA
		V+ = 15V, $R_L = \infty$	-	10	12	-	10	15	mA
Threshold Voltage	V_{TH}		-	($^{2}/_{3}$)V+	-	-	($^{2}/_{3}$)V+	-	V
Trigger Voltage		V+ = 5V	1.45	1.67	1.9	-	1.67	-	V
		V+ = 15V	4.8	5	5.2	-	5	-	V
Trigger Current			-	0.5	-	-	0.5	-	µA
Threshold Current (Note 3)	I_{TH}		-	0.1	0.25	-	0.1	0.25	µA
Reset Voltage			0.4	0.7	1.0	0.4	0.7	1.0	V
Reset Current			-	0.1	-	-	0.1	-	mA
Control Voltage Level		V+ = 5V	2.9	3.33	3.8	2.6	3.33	4	V
		V+ = 15V	9.6	10	10.4	9	10	11	V
Output Voltage	V_{OL}	V+ = 5V, I_{SINK} = 5mA	-	-	-	-	0.25	0.35	V
Low State		I_{SINK} = 8mA	-	0.1	0.25	-	-	-	V
		V+ = 15V, I_{SINK} = 10mA	-	0.1	0.15	-	0.1	0.25	V
		I_{SINK} = 50mA	-	0.4	0.5	-	0.4	0.75	V
		I_{SINK} = 100mA	-	2.0	2.2	-	2.0	2.5	V
		I_{SINK} = 200mA	-	2.5	-	-	2.5	-	V
Output Voltage	V_{OH}	V+ = 5V, I_{SOURCE} = 100mA	3.0	3.3	-	2.75	3.3	-	V
High State		V+ = 15V, I_{SOURCE} = 100mA	13.0	13.3	-	12.75	13.3	-	V
		I_{SOURCE} = 200mA	-	12.5	-	-	12.5	-	V
Timing Error (Monostable)		R_1, R_2 = 1kΩ to 100kΩ, C = 0.1µF Tested at V+ = 5V, V+ = 15V	-	0.5	2	-	1	-	%
Frequency Drift with Temperature			-	30	100	-	50	-	ppm/^{o}C
Drift with Supply Voltage			-	0.05	0.2	-	0.1	-	%/V

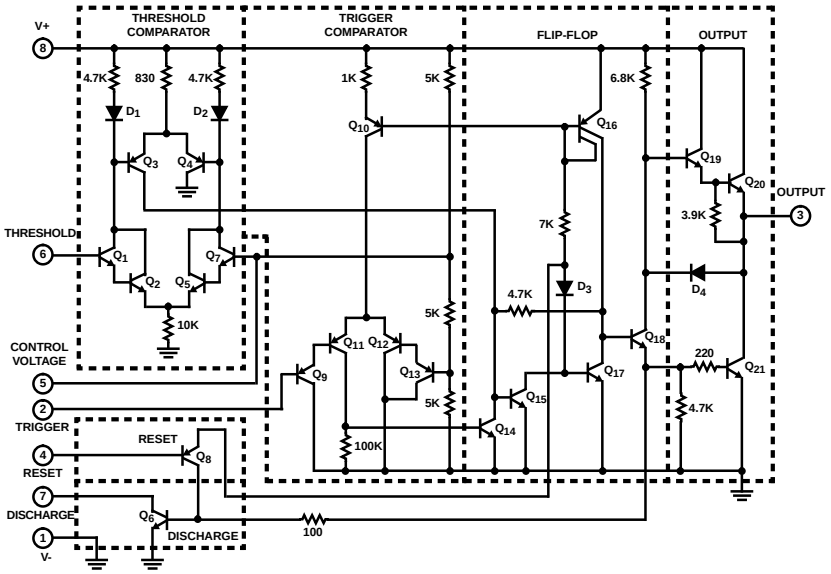
Electrical Specifications $T_A = 25^oC$, V+ = 5V to 15V Unless Otherwise Specified **(Continued)**

PARAMETER	SYMBOL	TEST CONDITIONS	CA555, LM555			CA555C, LM555C, NE555			UNITS
			MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
Output Rise Time	t_R		-	100	-	-	100	-	ns
Output Fall Time	t_F		-	100	-	-	100	-	ns

NOTES:

2. When the output is in a high state, the DC supply current is typically 1mA less than the low state value.
3. The threshold current will determine the sum of the values of R_1 and R_2 to be used in Figure 4 (astable operation); the maximum total $R_1 + R_2 = 20M\Omega$.

Schematic Diagram

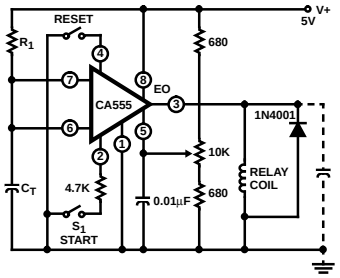


NOTE: Resistance values are in ohms.

Typical Applications

Reset Timer (Monostable Operation)

Figure 1 shows the CA555 connected as a reset timer. In this mode of operation capacitor C_T is initially held discharged by a transistor on the integrated circuit. Upon closing the "start" switch, or applying a negative trigger pulse to terminal 2, the integral timer flip-flop is "set" and releases the short circuit across C_T which drives the output voltage "high" (relay energized). The action allows the voltage across the capacitor to increase exponentially with the constant $t = R_1C_T$. When the voltage across the capacitor equals 2/3 V+, the comparator resets the flip-flop which in turn discharges the capacitor rapidly and drives the output to its low state.



NOTE: All resistance values are in ohms.

FIGURE 1. RESET TIMER (MONOSTABLE OPERATION)

Since the charge rate and threshold level of the comparator are both directly proportional to V+, the timing interval is relatively independent of supply voltage variations. Typically, the timing varies only 0.05% for a 1V change in V+.

Applying a negative pulse simultaneously to the reset terminal (4) and the trigger terminal (2) during the timing cycle discharges C_T and causes the timing cycle to restart. Momentarily closing only the reset switch during the timing interval discharges C_T, but the timing cycle does not restart.

Figure 2 shows the typical waveforms generated during this mode of operation, and Figure 3 gives the family of time delay curves with variations in R_1 and C_T.

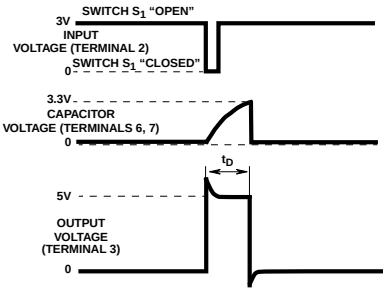


FIGURE 2. TYPICAL WAVEFORMS FOR RESET TIMER

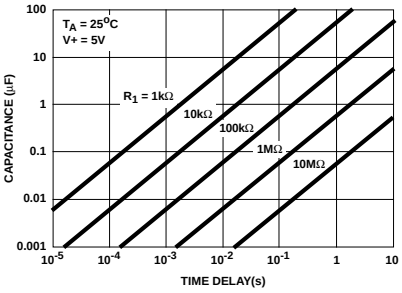


FIGURE 3. TIME DELAY vs RESISTANCE AND CAPACITANCE

Repeat Cycle Timer (Astable Operation)

Figure 4 shows the CA555 connected as a repeat cycle timer. In this mode of operation, the total period is a function of both R_1 and R_2.

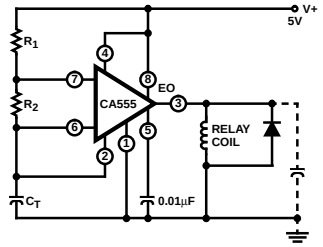


FIGURE 4. REPEAT CYCLE TIMER (ASTABLE OPERATION)

$$T = 0.693 (R_1 + 2R_2) C_T = t_1 + t_2$$

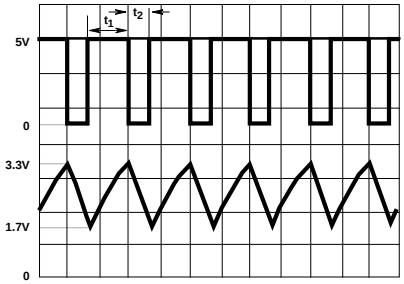
where $t_1 = 0.693 (R_1 + R_2) C_T$

and $t_2 = 0.693 (R_2) C_T$

the duty cycle is:

$$\frac{t_1}{t_1 + t_2} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 + 2R_2}$$

Typical waveforms generated during this mode of operation are shown in Figure 5. Figure 6 gives the family of curves of free running frequency with variations in the value of $(R_1 + 2R_2)$ and C_T.



Top Trace: Output voltage (2V/Div. and 0.5ms/Div.)
Bottom Trace: Capacitor voltage (1V/Div. and 0.5ms/Div.)

FIGURE 5. TYPICAL WAVEFORMS FOR REPEAT CYCLE TIMER

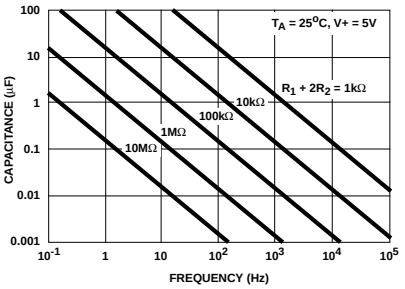
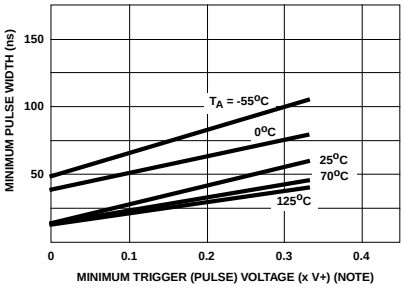


FIGURE 6. FREE RUNNING FREQUENCY OF REPEAT CYCLE TIMER WITH VARIATION IN CAPACITANCE AND RESISTANCE

Typical Performance Curves



NOTE: Where x is the decimal multiplier of the supply voltage.

FIGURE 7. MINIMUM PULSE WIDTH vs MINIMUM TRIGGER VOLTAGE

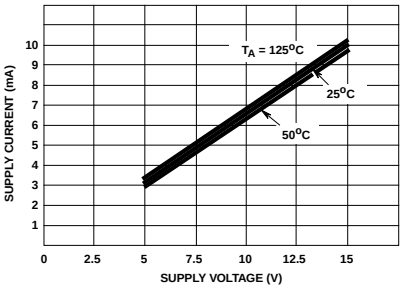


FIGURE 8. SUPPLY CURRENT vs SUPPLY VOLTAGE

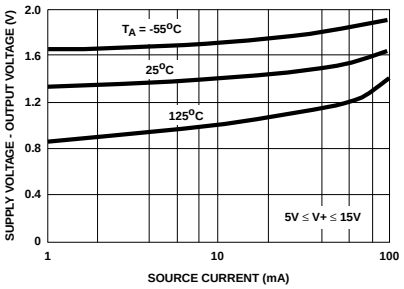


FIGURE 9. OUTPUT VOLTAGE DROP (HIGH STATE) vs SOURCE CURRENT

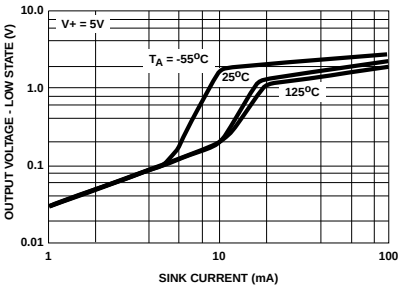


FIGURE 10. OUTPUT VOLTAGE LOW STATE vs SINK CURRENT

Typical Performance Curves (Continued)

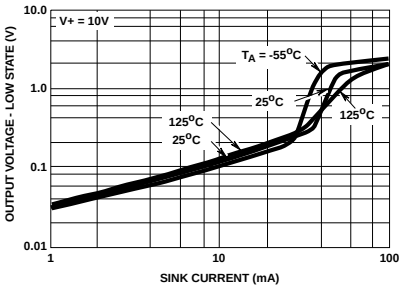


FIGURE 11. OUTPUT VOLTAGE LOW STATE vs SINK CURRENT

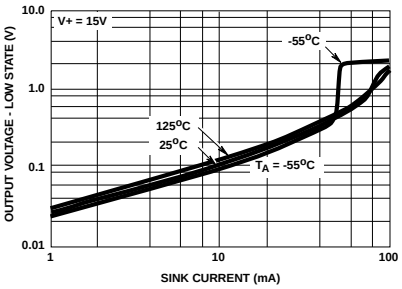


FIGURE 12. OUTPUT VOLTAGE LOW STATE vs SINK CURRENT

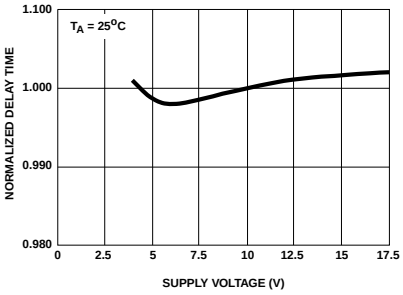


FIGURE 13. DELAY TIME vs SUPPLY VOLTAGE

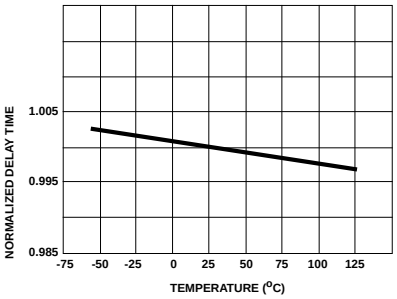
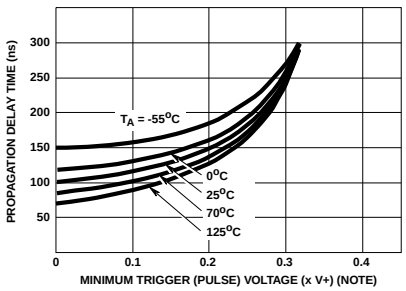


FIGURE 14. DELAY TIME vs TEMPERATURE



NOTE: Where x is the decimal multiplier of the supply voltage.

FIGURE 15. PROPAGATION DELAY TIME vs TRIGGER VOLTAGE