

# Blikač, bzučák, stroboskop

Leoš Dvořák

KDF MFF UK Praha

Abstrakt

*Příspěvek popisuje jednoduchou pomůcku s integrovaným obvodem NE555, která může fungovat jako blikač, bzučák nebo stroboskop. Díky konstrukci na dřevěné destičce s mosaznými hřebíčky jako pájecími body je zapojení názorné a lze jej snadno modifikovat. V příspěvku je vysvětlen i princip činnosti daného oscilátoru a odvozen vztah pro frekvenci kmitů.*

## Obsah

1. Úvod – co chceme postavit a proč.....	14
2. Pro ty, kdo chtějí rovnou schéma .....	14
2.1. Základní vlastnosti našeho stroboskopu .....	15
2.2. Použité součástky .....	15
3. Konstrukce přístroje .....	16
3.1. Rozložení součástek .....	16
3.2. Detaily konstrukce.....	17
3.3. Co dělat, když vše nefunguje na první pokus.....	18
4. Pro ty, kdo chtějí rozumět principu činnosti.....	19
4.1. Základem je nabíjení a vybíjení kondenzátoru.....	19
4.2. Funkce obvodu NE555 .....	21
4.3. Nejjednodušší blikač s obvodem 555 .....	21
4.4. Spínáme větší proudy .....	22
5. Jaká je perioda kmitů? .....	22
5.1. Jednoduché přibližné odvození periody .....	23
5.2. Přesný výpočet.....	24
6. Měníme střidu kmitů .....	25
6.1. Modifikace zapojení .....	25
6.2. Výpočet periody a střidy.....	25
6.3. Praktické chování přístroje .....	27
7. Varianty zapojení.....	29
7.1. Bzučák (generujeme obdélníkové kmity se střidou 1:1) .....	29
7.2. Pomalé blikání (zapojení s větší hodnotou kapacity) .....	29
7.3. Spínání vyšších proudů.....	30
8. Závěr.....	30
Literatura a odkazy .....	30

## 1. Úvod – co chceme postavit a proč

Motivační dílny „Pojďme si zas vyrobit něco s polovodiči“ bylo umožnit účastníkům postavit si opět nějakou jednoduchou pomůcku s polovodičovými součástkami. A to pomůcku, která by byla:

- zajímavá a užitečná  
(tedy dělala něco, co učitele i žáky zaujme, a je využitelné ve výuce fyziky),
- názorná  
(tedy do její konstrukce a principu činnosti by „bylo vidět“, nešlo by o záhadnou černou skříňku)
- a využívala by nějakou součástku, s níž jsme se dosud neseznámili.

Jednoduché konstrukce s rezistory, svítivými diodami a jedním či dvěma tranzistory jsme už na Heurce konstruovali. Zkušenosti z těchto a podobných konstrukcí jsou shrnuty v příručce [1], která je i volně dostupná na webu.

Použití i složitější součástky, například některý z integrovaných obvodů, je výzva. Ve středoškolské výuce (s výjimkou speciálně zaměřených oborů) se neprobírají a učitelé fyziky se s nimi zřejmě většinou příliš nesešli. Přesto – alespoň letmo a nepatrně do této oblasti nahlédnout může být lákavé.

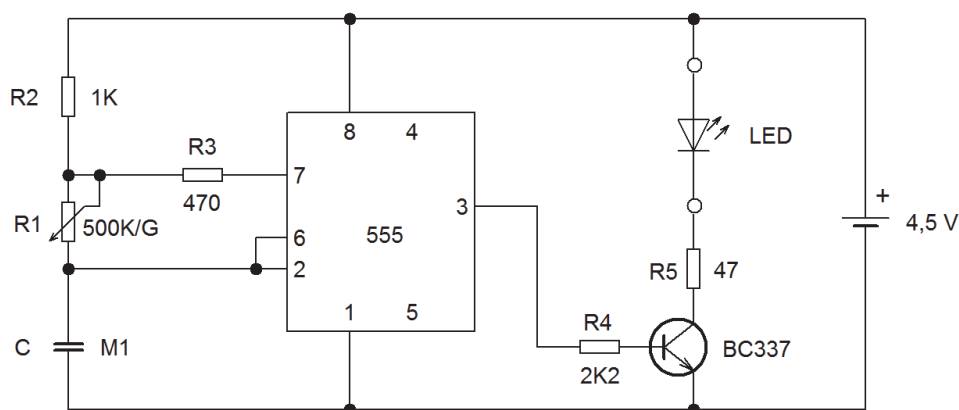
Jednou z možností je zkusit postavit něco s obvodem NE555. Ten bývá označován jako „časovač“ a může mimo jiné sloužit jako základ nejrůznějších blikáčů, bzučáků a podobných atraktivních zapojení. Je velmi často užívaný a velice populární. Zpráva [2], která se na webu objevila těsně po letošních Dílnách Heuréky, jej dokonce označuje za „nejoblíbenější součástku na světě“. Obvod 555 se vyrábí už 40 let, podle [2] se ho v roce 2003 vyrobilo okolo jedné miliardy kusů.

Návodů na obvody s časovačem 555 lze najít nepřehledně, jak na internetu, tak v knihách, viz např. [3]. My využijeme jedno z „nejklasičtějších“ zapojení, budeme ho ale drobně modifikovat, aby lépe posloužilo zamýšlenému účelu. Navíc konstrukci zvolíme takovou, aby do celého zapojení „bylo vidět“.

Co tedy postavíme? Jednoduchý stroboskop s LED diodou, který lze snadno změnit na blikáč nebo (po připojení reproduktoru) na bzučák.

## 2. Pro ty, kdo chtějí rovnou schéma

Tady je (nebojte se, za chvíli vše vysvětlíme):



Obr. 1. Schéma stroboskopu s obvodem NE555.

## 2.1. Základní vlastnosti našeho stroboskopu

Frekvence blikání se nastavuje potenciometrem R1 zapojeným jako reostat. S danými hodnotami součástek je frekvence asi od 4 Hz do řádově 1 kHz.<sup>1</sup>

*Střída kmitů*, tedy poměr mezi dobou, kdy LED svítí a kdy nesvítí, je asi 1:6 (u vyšších frekvencí je tento poměr trochu jiný, např. 1:5). Pro stroboskop by samozřejmě bylo nejlepší, kdyby LED svítila jen po co nejkratší dobu, dejme tomu setinu či tisícinu periody – jenže v tom případě bychom její světlo vnímali jako velmi slabé, stokrát resp. tisíckrát slabší, než kdyby svítila stále. LED totiž ani v krátkém záblesku nepřinutíme svítit stokrát či tisíckrát jasněji, aby se vykompenzovala kratší doba svitu. Zvolený poměr 1:5 až 1:6 je tedy kompromisem.

Vlastnosti našeho zapojení můžeme snadno měnit. Frekvenci blikání lze měnit změnou kapacity kondenzátoru C. Střídu kmitů můžeme z výše uvedené hodnoty změnit na poměr 1:1, vhodnější například pro blikač nebo bzučák, zkratováním rezistoru R3. Tyto možnosti budou podrobněji popsány dále.

## 2.2. Použité součástky

V zapojení jsou použity běžné součástky; jejich celková cena (na podzim 2012) je necelých 25 Kč.

Kondenzátor C (0,1  $\mu$ F) je tzv. fóliový, pro vyšší kapacity lze použít i kondenzátor elektrolytický. Pokud na místě C použijete keramický kondenzátor, nestane se nic jiného, než že frekvence kmitů bude víc záviset na teplotě. V případě použití jako bzučák se pak frekvence tónu slyšitelně mění i při zahřátí kondenzátoru v prstech. (I to může být někdy zajímavé ve výuce ukázat.)

Potenciometr R1 (o odporu 500 k $\Omega$ ) je *logaritmický*, to znamená, že jeho odpor narůstá nejprve velmi pomalu (z hodnot od stovek ohmů) a ke konci se mění velmi rychle. To se velmi hodí pro plynulé nastavování frekvence v rozsahu více než dvou řádů.

Svítilivou diodu je vhodné použít bílou, s co nejvyšší svítivostí. Na dílně jsme použili LED se svítivostí 8000 mcd, konkrétně viz [4], protože měla při dostatečné svítivosti velmi příznivou cenu (jen 7,20 Kč). Sortiment LED se ale s časem mění, takže bude vhodné vyhledat vždy LED, která bude vašim účelům vyhovovat co nejlépe. Uvedená LED vydrží proud do 30 mA, k dostání jsou však i svítivé diody podstatně výkonnější. Těmi běžně tečou proudy řádu stovek mA. Tranzistor BC337 takovouto zátěž vydrží, jeho maximální kolektorový proud je 0,8 A. Aby proud svítivou diodou byl větší, je třeba zmenšit velikost odporu R5, třeba až na jednotky ohmů.

Samotný integrovaný obvod NE555 je překvapivě levný (v současných cenách necelých 5 Kč). Pokud se nám tedy stane, že jej při experimentování nechtěně zničíme, nejedná se o nijak závažnou škodu. Ve schématu na obr. 1 jsou jeho vývody značeny čísly; číslování vývodů ukazuje fotografie na obr. 2. Vývody jsou číslovány zleva zdola, orientace pouzdra je přitom taková, že nápis na pouzdře je čitelný, navíc vlevo je na pouzdře malé polokruhové vybrání.



Obr. 2. Číslování vývodů obvodu NE555.

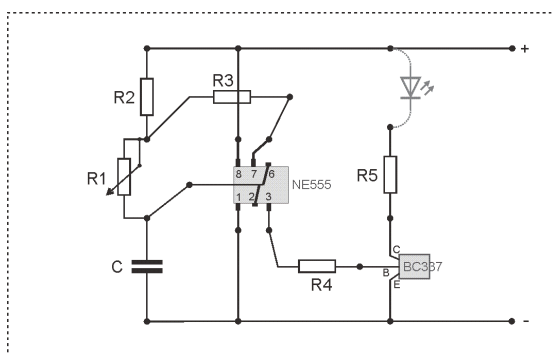
<sup>1</sup> Při otočení osy potenciometru „nadoraz“ na nejmenší hodnotu odporu je frekvence i vyšší, ale LED pro takto vysoké frekvence už svítí skoro celou polovinu periody, což není pro stroboskop vhodné, viz dále.

### 3. Konstrukce přístroje

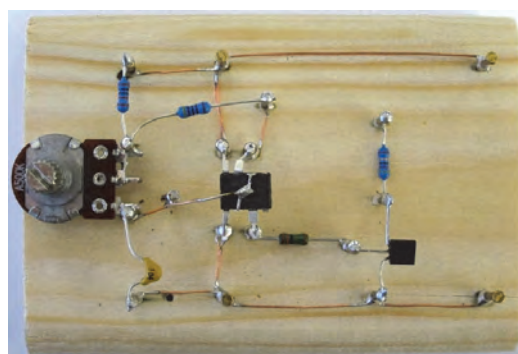
Jak už bylo řečeno, záměrem bylo, aby do zhotovené pomůcky „bylo vidět“, tedy aby rozložení součástek pokud možno odpovídalo schématu. Navíc je vhodné, aby zapojení šlo různě upravovat: zkoušet, jak činnost ovlivní změna kondenzátoru C, zkratování rezistoru R3 apod. Proto bylo zapojení opět realizováno na dřevěné destičce, do níž jako pájecí body zatlučeme mosazné hřebíčky – tak, jak už jsme to na seminářích Heuréky víckrát dělali a jak je to popsáno v příručce [1].

#### 3.1. Rozložení součástek

Rozložení součástek ukazuje „šablona“ na obr. 3.a), příklad konkrétní konstrukce (prototyp přístroje) fotografie na obr. 3.b).



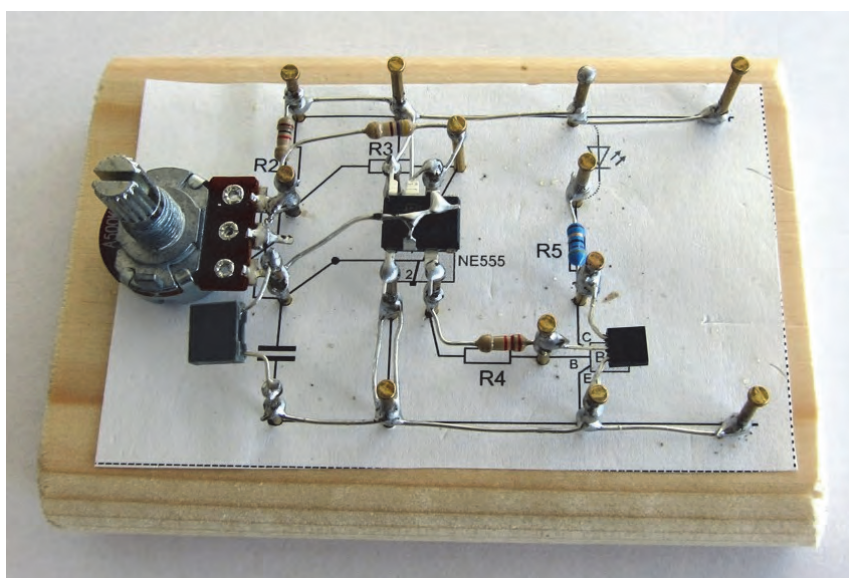
a)



b)

Obr. 3. Konstrukce stroboskopu: a) rozložení součástek, b) možná realizace přístroje.

Na dílně samotné se osvědčilo dát vytištěnou papírovou šablonu na destičku, hřebíčky zatluoci do příslušných bodů a podle šablony pak propojit jednotlivé součástky. Výsledek ukazuje obr. 4.



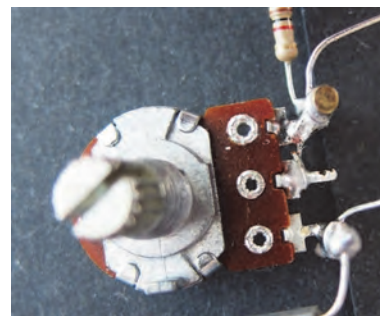
Obr. 4. Stroboskop postavený podle šablony rozložení součástek.

Svítivá dioda není do obvodu připájena – připojuje se kablíkem dlouhým třeba 20–30 cm, abychom mohli pohodlně osvětlit potřebné místo.

### 3.2. Detaily konstrukce

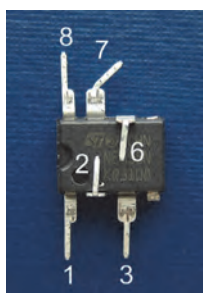
Vývody součástek jsou omotány kolem hřebíčků a připájeny. Je vhodné začínat propojovacími dráty, pak přidat rezistory, potenciometr a kondenzátor a teprve nakonec připájet polovodiče, tedy tranzistor a integrovaný obvod, abychom je zbytečně dlouho netrápili vysokou teplotou.

Při zapojení nezapomeňte propojit drátem prostřední vývod potenciometru s „horním“ vývodem, aby potenciometr fungoval jako reostat. Propojení ukazuje fotografie na obr. 5. (Pozor, pokud byste prostřední vývod potenciometru propojili s dolním, při otáčení by se odpor velmi rychle „vyšplhal“ na hodnoty stovek kiloohmů a pak už by se měnil jen pomalu.)



Obr. 5. Propojení vývodů potenciometru.

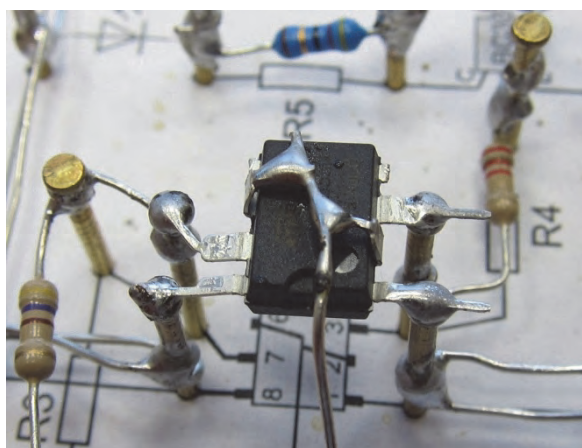
Jak připojit vývody integrovaného obvodu, aby vše bylo názorné a nemuseli jsme pájet vývody těsně u sebe, je trochu „výzva“. Vývody integrovaného obvodu jsou od sebe vzdáleny jen 2,54 mm, a to už je na pistolovou páječku a mosazné hřebíčky trochu blízko. Řešení, které je zde použito, je sice poněkud „hrubou silou“, ale funguje:



Obr. 6. Úprava vývodů obvodu 555.

Vývody 4 a 5 integrovaného obvodu nevyužíváme, takže je můžeme prostě ulomit. (Několikerým ohnutím; alespoň tak zjistíme, že při ohýbání ostatních vývodů si musíme dát pozor, abychom je nechtěně neulomili také.) Vývody 1, 3, 7 a 8 ohneme o 90 stupňů, aby směřovaly co nejdál od pouzdra obvodu. Vývod 7 pak ještě trochu vyhneme do strany, jak to ukazuje fotografie na obr. 6. A konečně vývody 2 a 6 ohneme zcela nahoru, nad pouzdro obvodu. Tam k nim potom připájíme drát vedoucí k jednomu pólu kondenzátoru. Jak už bylo řečeno, jde o řešení trochu „drsné“, ale hřebíčky tak mohou být 5 mm od sebe a je názorně vidět, který vývod je k čemu připojen.

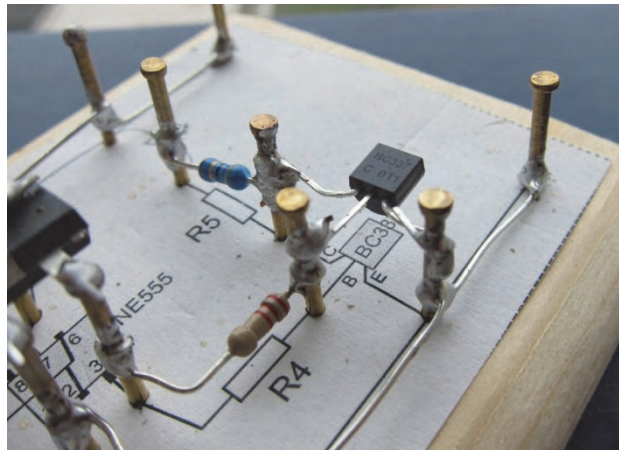
Vývody integrovaného obvodu je vhodné pájet shora k hlavičkám hřebíčků (viz obr. 7); ty je vhodné nejdříve pocínovat, abychom pak vývody pájeli jen krátce<sup>2</sup>.



Obr. 7. Detail připájení vývodů integrovaného obvodu.

<sup>2</sup> Podle „datasheetu“ k obvodu 555 smíme vývody ve vzdálenosti 1,6 mm od pouzdra pájet při teplotě 260°C po dobu 10 s, lepší je však dobu pájení příliš neprodlužovat.

Fotografie na následujícím obrázku ukazuje zapojení vývodů tranzistoru:



Obr. 8. Detail připájení vývodů tranzistoru.

Po připájení všech součástek připojíme, třeba pomocí kablíku s krokodýlky, baterii a svítivou diodu a obvod by měl začít pracovat. V jedné krajní poloze potenciometru (při nastavení na největší odpor) je jasně patrné blikání diody, při otáčení osičkou potenciometru se frekvence blikání zvyšuje, až již jednotlivá bliknutí nerozlišíme.

### 3.3. Co dělat, když vše nefunguje na první pokus

Pokud náš výrobek nepracuje na první pokus, vzpomeňme na důležitou radu ze *Stopařova průvodce po Galaxii*:

***Don't panic!***

Takže nepropadejme panice. Že něco nepracuje napoprvé, je naprosto normální – a je to výborná příležitost zapojit šedé buňky mozkové a něco se přiučit.

Takže co můžeme například dělat a zkontrolovat:

- Je LED zapojena se správnou polaritou?
- Je dobře (a se správnou polaritou) připojena baterie?  
Pro kontrolu můžeme kablíkem propojit (zkratovat) kolektor a emitor tranzistoru; LED přitom musí svítit. (Propojení pak zase odstraníme.)
- Funguje a je dobře připojen tranzistor?  
LED musí svítit, když bázi tranzistoru přes odpor o hodnotě několika kiloohmů spojíme s kladným pólem baterie.

Pokud všechny tyto kontroly dopadnou dobře, znamená to, že integrovaný obvod nedává do báze tranzistoru „správný signál“, tedy pulzy napětí, které má dodávat. Chyba může být ve spojích, takže se vyplatí zkontrolovat i ty nejjednodušší věci:

- Nechybí v zapojení nějaký spoj?  
(Například pokud chybí drátová propojka od vývodu 7 integrovaného obvodu k rezistoru R3, zapojení opravdu nemůže fungovat. Právě na tuto propojku je přitom snadné zapomenout.)
- Jsou všechny spoje dobře připájené?  
(Pokud je někde špatný kontakt, zapojení také nepracuje.)

- Jsou použity správné vývody integrovaného obvodu?  
(Může se stát, že nechtěně zaměníme vývody 7 a 6, ono to k tomu trochu svádí.)
- Nepoužili jsme někde rezistor špatné hodnoty?  
Pro klid duše je možná lepší proměřit si ohmmetrem odpory mezi příslušnými mosaznými hřebíčky ještě než připájíme integrovaný obvod, ale i následná kontrola, třeba podle barevného kódu rezistorů, se vyplatí.  
Pro kontrolu můžeme také zkusit zkratovat rezistor R3, pak by měl obvod spolehlivě kmitat se střídou (poměrem dob „světlo“:„tma“) asi 1:1, byť frekvence se tím zvýší. (Viz též dále upozornění na konci části 6.3.)

V ojedinělém případě jsme na dílně narazili na potenciometr, který měl zřejmě nespolehlivý kontakt běžce s dráhou, takže stroboskop chvílemi blikal a chvílemi ne. Pomohla výměna potenciometru. Právě tak ojediněle jsme vyměňovali obvod NE555 pro podezření, že byl možná poškozen teplem při dlouhém pájení. Nakonec se však podařilo „rozchodit“ všechny kusy, které při prvním zapojení „stávkovaly“.

#### 4. Pro ty, kdo chtějí rozumět principu činnosti

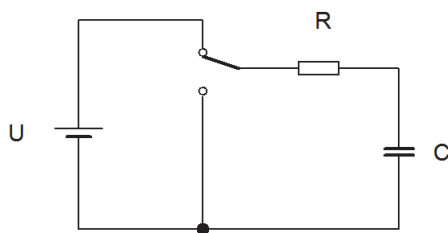
Vyrobít stroboskop podle šablony a tiše doufat, že bude fungovat, je ovšem málo. Fyzikář by měl rozumět tomu, *jak* dané zapojení funguje. Jednak se to hodí při „oživování“ přístroje a jednak – přece pro nás takovéto zapojení nebude „černou skříňkou“! Od toho jsme fyzikáři, abychom se snažili věcem a principům jejich činnosti *rozumět*. A v tomto případě to naštěstí není nic nepřekonatelného.

Nebudeme ovšem rozebírat strukturu samotného obvodu NE555. Ten tedy pro nás malou černou skříňkou, resp. „černým broučkem“ zůstane.<sup>3</sup> Pro další rozbory a výklad zde pro nás bude důležité jen jeho vnější chování.

##### 4.1. Základem je nabíjení a vybíjení kondenzátoru

Zajímavé je, že na našem zapojení si můžeme ilustrovat a vyzkoušet i leccos z fyziky. Principem činnosti blikače, bzučáku, i toho stroboskopu, je totiž obyčejné nabíjení a vybíjení kondenzátoru.

Při vysvětlování činnosti můžeme vyjít z jednoduchého zapojení na obr. 9.



Obr. 9. Obvod pro demonstraci nabíjení a vybíjení kondenzátoru.

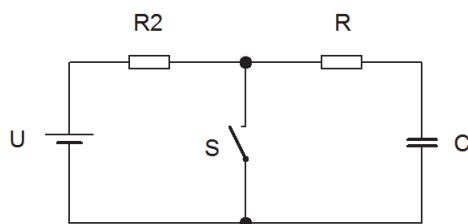
Je-li přepínač v horní poloze, jak je vyznačeno na obr. 9, kondenzátor se nabíjí z baterie přes rezistor R. Napětí na kondenzátoru můžeme měřit např. multimetrem (ve schématu není zakreslen): Až napětí dosáhne 2/3 napětí baterie, přepneme přepínač do spodní

<sup>3</sup> Zájemci mohou najít alespoň částečné poučení o základní struktuře obvodu 555 v pramenech [2] a [3], resp. v odkazech uvedených v [2].

polohy. Kondenzátor se začne vybíjet. Až napětí klesne pod  $1/3$  napětí baterie, přepínač opět přepneme do horní polohy. Kondenzátor se začne nabíjet... a tak dále. Jednodušší už to snad být nemůže, že?<sup>4</sup>

Aby naše zapojení odpovídalo blikáči s obvodem 555, musíme ho trochu modifikovat. V obvodu 555 totiž nemáme k dispozici přepínač, ale jen *spínač*, který umožňuje jeden z vývodů (konkrétně vývod 7) spojit, tj. vlastně zkratovat, se záporným pólem baterie.

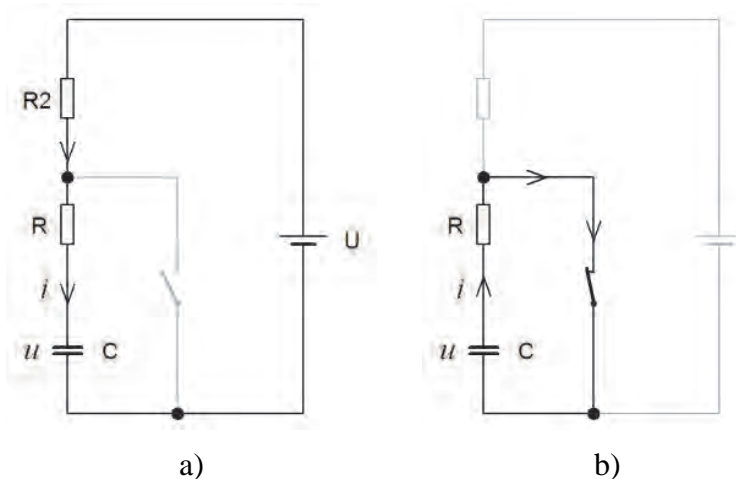
Princip zapojení, které bude i v tomto případě blikat, vymysleli elektronici už dávno. Ukazuje ho obrázek 10.



Obr. 10. Princip zapojení využitý v blikáči s obvodem 555.

Pro naše účely budeme předpokládat, že  $R_2 \ll R$ . (Například  $R_2 = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $R = 100 \text{ k}\Omega$ . Rezistor  $R_2$  je v zapojení proto, abychom při sepnutém spínači nezkratovali baterii.) Pokud je spínač  $S$  rozepnutý, nabíjí se kondenzátor přes rezistor  $R$  (v sérii s  $R_2$ , ten ale celkový odpor příliš nezvýší). Když spínač  $S$  sepneme, kondenzátor se přes rezistor  $R$  vybíjí.<sup>5</sup>

Schéma obvodu na obr. 10 bude výhodné překreslit do tvaru, v němž ho pak budeme jen s minimálními změnami, kreslit i při použití obvodu 555. Tento tvar ukazuje obr. 11:



Obr. 11. Obvod z obr. 10. překreslený do tvaru, v němž ho budeme dále užívat:  
a) nabíjení kondenzátoru, b) vybíjení kondenzátoru.

Funkce je samozřejmě stále stejná: Při rozepnutém spínači se kondenzátor nabíjí, při sepnutém spínači vybíjí.

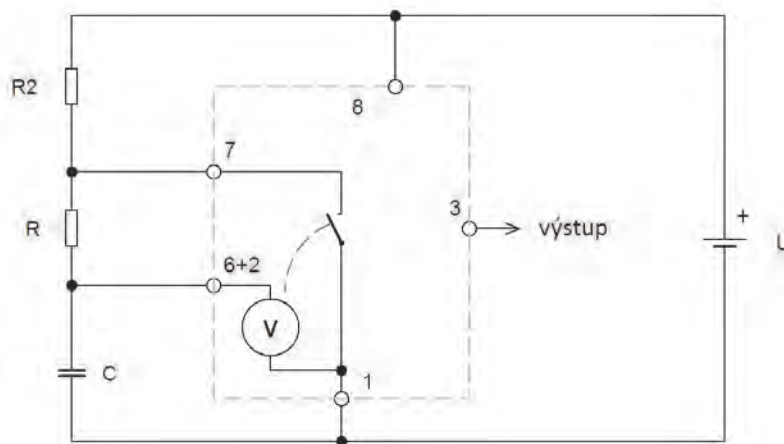
<sup>4</sup> Celé zapojení můžeme skutečně prakticky realizovat. S elektrolytickým kondenzátorem například o kapacitě  $100 \mu\text{F}$  a rezistorem o odporu  $100 \text{ k}\Omega$  bude perioda přepínání něco přes deset sekund, takže přepínání se dá zvládnout ručně. (Pokud použijete kondenzátor o vyšší kapacitě, snižte odpor rezistoru, aby perioda nebyla příliš dlouhá. Rozhoduje součin  $RC$ , jak si ještě ukážeme dále.)

<sup>5</sup> Z baterie přitom navíc teče do spínače proud rezistorem  $R_2$ , ale to na věci nic nemění, spínač prostě své vývody při sepnutí (prakticky) zkratuje, takže je mezi nimi (prakticky) nulové napětí.



## 4.2. Funkce obvodu NE555

Hlídat napětí na kondenzátoru a přepínat spínač rukou je samozřejmě nepohodlné. Obě tyto funkce však stejně dobře zastane právě obvod 555. Princip ukazují obr. 12.

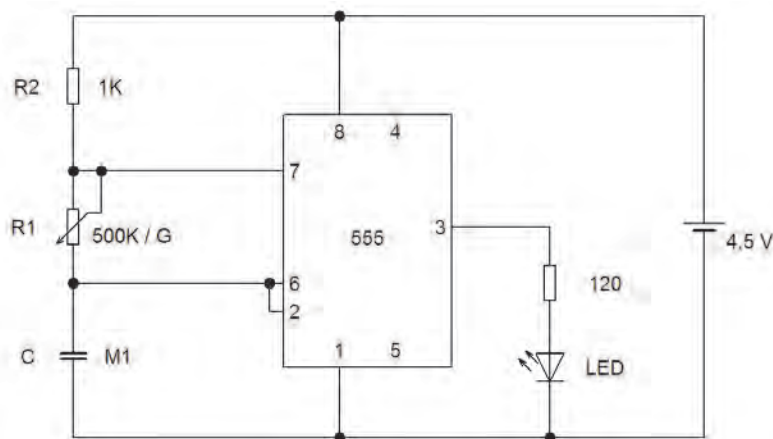


Obr. 12. Princip činnosti blikače s obvodem NE555.

Integrovaný obvod je ve schématu vyznačen čárkovaným obdélníkem, symbolicky je v něm vyznačen spínač<sup>6</sup> a značkou voltmetru obvod, který hlídá pokles napětí na kondenzátoru pod  $1/3 U$  a vzestup nad  $2/3 U$ .<sup>7</sup> (Tyhle hodnoty napětí jsou takto nastaveny v obvodu, tak to jeho autor kdysi vymyslel. Napětí baterie prostě rozdělil třemi stejnými odpory  $5 \text{ k}\Omega$ ; prý se právě podle toho obvod jmenuje 555.)

## 4.3. Nejjednodušší blikač s obvodem 555

Skutečné zapojení nejjednoduššího blikače s obvodem NE555 ukazují obr. 13.



Obr. 13. Skutečné zapojení blikače s obvodem NE555.

<sup>6</sup> Nemusíme snad zdůrazňovat, že v integrovaném obvodu ve skutečnosti není žádný mechanický spínač ani voltmetr; vše je realizováno polovodičovými obvody.

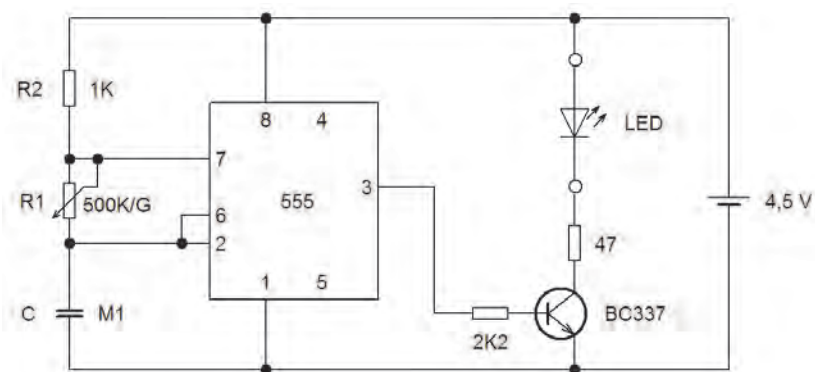
<sup>7</sup> Vývod 2 hlídá pokles napětí pod  $1/3 U$ . Pokud napětí na vývodu 2 poklesne pod tuto hodnotu, „rozpne spínač“ a navíc na vývodu 3 (výstup) přivede téměř plné napětí baterie. Vývod 6 naopak hlídá vzestup napětí nad  $2/3 U$ . Pokud napětí na vývodu 6 vzroste nad tuto hodnotu, „spínač se sepne“ a navíc se na výstupu 3 nastaví prakticky nulové napětí (oproti zápornému pólu baterie, tedy vývodu 1). V našem zapojení budeme mít vždy vývody 2 a 6 spojeny, proto jsou v obr. 12 zakresleny dohromady.

Tedy, blikače... V daném zapojení a s uvedenými hodnotami součástek mají bliknutí střídou (poměr trvání světla a tmy) 1:1 a nejnižší frekvence blikání je asi 15 Hz – tedy příliš vysoká, než abychom ji vnímali jako blikání. Pokud by naše zapojení mělo fungovat opravdu jako blikač, museli bychom kondenzátor 0,1  $\mu\text{F}$  nahradit kondenzátorem s vyšší kapacitou, např. 1  $\mu\text{F}$  nebo 10  $\mu\text{F}$ . Nejnižší frekvence blikání by pak byla asi 1,5 Hz resp. 0,15 Hz.

#### 4.4. Spínáme větší proudy

Zapojení na obr. 13. má jednu drobnou nevýhodu. Integrovaný obvod má maximální povolený proud na výstupu 30 mA. To by se mohlo zdát pro malé LED dostatečné. Problémem ale je, že už při zatížení proudem například 10 mA není napětí na výstupu rovno „ideálním hodnotám“ 0 V a  $U$ , protože v integrovaném obvodu nastávají úbytky napětí. Reálně tedy výstup obvodu 555 „utáhne“ vysokosvítivou diodu jen „zčásti“, její svit je slabší, než by mohl v ideálním případě být.

Je proto vhodné nepřipojovat výstup integrovaného obvodu přímo k LED, ale řídit jím tranzistor, který bude do diody (ale třeba i do žárovčky nebo do reproduktoru) spínat i podstatně vyšší proud. Výsledné zapojení ukazuje obr. 14.



Obr. 14. Blikač, v němž tranzistor může spínat do LED či jiné zátěže vyšší proud.

Základní zapojení s obvodem 555 zůstalo naprosto stejné, tranzistor však nyní může spínat proud až přes půl ampéru. Jako zátěž tedy místo LED můžeme zapojit třeba i reproduktor s odporem 8  $\Omega$  (odpor 47  $\Omega$  v kolektoru tranzistoru přitom můžeme zkratovat) a zapojení využívat jako bzučák. Pokud je chceme využít jako skutečný blikač, musíme, jak už bylo uvedeno výše, použít kondenzátor C o vyšší kapacitě.

Pro stroboskop ještě zapojení na obr. 14 není vhodné, protože LED svítí příliš velkou část periody. K tomuto problému se vrátíme dále. Nejdříve si však spočteme, s jakou frekvencí vlastně náš blikač či bzučák má teoreticky kmitat.

#### 5. Jaká je perioda kmitů?

Řešit přesně problém nabíjení a vybíjení kondenzátoru znamená řešit příslušnou diferenciální rovnici. Pro přibližné odvození periody však kupodivu vystačíme i s prostředky středoškolské fyziky.

### 5.1. Jednoduché přibližné odvození periody

K přibližnému odvození periody kmitů nám bude stačit Ohmův zákon, znalost faktu, že náboj rovná se proud krát čas a vztah mezi nábojem a napětím na kondenzátoru.

Začněme fází nabíjení kondenzátoru. Řekněme, že na začátku je napětí  $u$  na kondenzátoru rovno  $1/3 U$ . Na rezistor  $R$  (viz obr. 15) zbývá napětí  $2/3 U$ . Teče jím tedy proud  $i = \frac{2}{3} \frac{U}{R}$ .

Kondenzátor se postupně nabíjí až na napětí  $2/3 U$ , na rezistoru je na konci napětí  $1/3 U$  a teče jím proud  $i = \frac{1}{3} \frac{U}{R}$ .

**Průměrný proud**, který teče do kondenzátoru  $C$  je zřejmě mezi  $1/3$  a  $2/3$  proudu  $U/R$ . Můžeme proto odhadnout, že je přibližně

$$i_{\text{prům.}} \doteq \frac{\frac{1}{2}U}{R} = \frac{U}{2R}. \quad (1)$$

Doba nabíjení bude v našem případě polovinou periody  $T$ . Za tuto dobu do kondenzátoru přiteče náboj přibližně

$$q_p = i_{\text{prům.}} \cdot \frac{T}{2} \doteq \frac{U}{2R} \cdot \frac{T}{2}. \quad (2)$$

Náboj  $q_p$ , který přitekl, způsobil zvýšení napětí o  $1/3 U$ . Ze známého zvýšení napětí a kapacity  $C$  proto pro náboj plyne vztah

$$q_p = \frac{1}{3} U \cdot C. \quad (3)$$

Kombinací vztahů (2) až (3) dostaneme

$$\frac{U}{2R} \cdot \frac{T}{2} \doteq \frac{1}{3} U \cdot C. \quad (4)$$

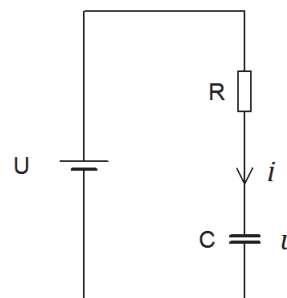
Napětí  $U$  se vykrátí (to znamená, že perioda kmitů nezávisí na napětí baterie – důležité zjištění!) a po úpravě ze (4) dostaneme výsledný přibližný vztah pro periodu:

$$T \doteq \frac{4}{3} RC. \quad (5)$$

Poznámka:

Výše jsme konstatovali, že doba nabíjení kondenzátoru je polovinou periody (a využili jsme toho při „budování“ vztahu (2). Pro „š'ouravější“ žáky je vhodné to dokázat. Není to nic obtížného:

Při vybíjení kondenzátoru v druhé polovině periody je opět průměrný vybíjecí proud roven  $U/(2R)$ , napětí klesá opět o  $1/3 U$  a jednoduše se přesvědčíme, že vybíjení trvá opravdu stejně dlouho jako nabíjení, jak jsme předpokládali výše.<sup>8</sup> Doba nabíjení je tedy skutečně polovinou periody.



Obr. 15. Nabíjení kondenzátoru (z napětí  $1/3 U$  na  $2/3 U$ ).

<sup>8</sup> Pokud by vám to při odvozování přišlo korektnější, spočtete nejdříve dobu  $T_1$  nabíjení kondenzátoru, ta vyjde  $(2/3) RC$ , pak dobu vybíjení  $T_2$ , ta vyjde stejně dlouhá. Sečtením pak dostaneme výsledek (5).

## 5.2. Přesný výpočet

Proud  $i$ , který teče rezistorem do kondenzátoru, je dán vztahem  $i = \frac{U - u}{R}$ , kde  $U$  je napětí baterie a  $u$  napětí na kondenzátoru, viz obr. 15. Označíme-li  $q$  náboj na kondenzátoru, je jeho časová změna

$$\frac{dq}{dt} = i = \frac{U - u}{R}. \quad (6)$$

Mezi nábojem a napětím na kondenzátoru platí vztah

$$q = C \cdot u. \quad (7)$$

Dosazením (7) do (6) získáme

$$C \frac{du}{dt} = \frac{U - u}{R}. \quad (8)$$

Pro další výpočet je vhodné označit  $\tilde{u} = U - u$ . ( $\tilde{u}$  je vlastně napětí na rezistoru  $R$ , viz obr. 15.) Z (8) pak získáme pro  $\tilde{u}$  diferenciální rovnici

$$\frac{d\tilde{u}}{dt} = -\frac{1}{RC} \tilde{u}. \quad (9)$$

Její řešení je

$$\tilde{u}(t) = u_0 \cdot e^{-\frac{t}{RC}}. \quad (10)$$

Počáteční hodnota je  $\tilde{u}(0) = u_0 = U - (1/3)U = 2/3 U$ .

V čase, kdy se kondenzátor nabije na  $2/3 U$  (označme tuto dobu jako  $T_1$ ), bude  $\tilde{u}(T_1) = U - (2/3)U = 1/3 U$ . Dosazení těchto hodnot do (10) dá

$$\frac{1}{3}U = \frac{2}{3}U \cdot e^{-\frac{T_1}{RC}}.$$

Odtud po úpravě

$$e^{\frac{T_1}{RC}} = 2,$$

a po další úpravě konečně

$$T_1 = \ln 2 \cdot RC. \quad (11)$$

Analogicky by se řešilo vybíjení kondenzátoru v druhé části periody. Pro pokles napětí bychom dostali opět vztah (10) a z něj bychom prakticky stejně jako výše odvodili, že vybíjení kondenzátoru trvá stejně dlouho, jako nabíjení. (Viz též dále část 6.2.) Pokud bychom dobu vybíjení označili jako  $T_2$ , je  $T_2 = T_1$ . Perioda kmitů je tedy dvojnásobná:  $T = T_2 + T_1 = 2 T_1$ ,

$$T = 2 \cdot \ln 2 \cdot RC \doteq 1,386 RC. \quad (12)$$

Je zajímavé, že přibližný výsledek (5) odvozený středoškolsky, se od přesného výsledku (12) vlastně příliš neliší: faktory  $4/3$  a  $2 \ln 2$  (tedy přibližně 1,333 a 1,386) se liší jen asi o 4 %.

## 6. Měníme střidu kmitů

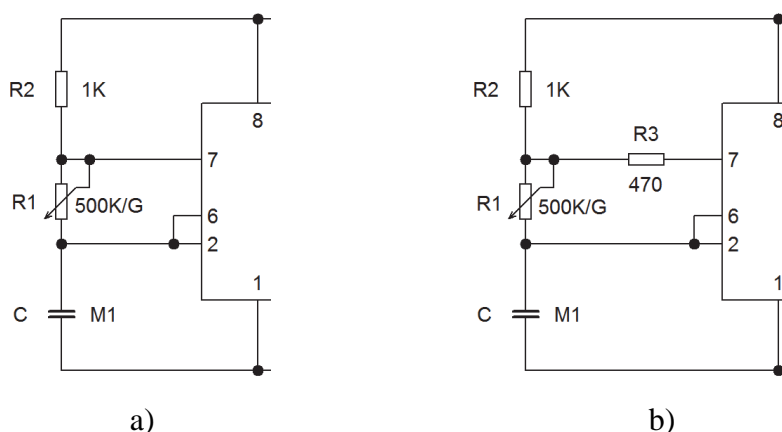
Náš blikač zatím funguje tak, že doby, v nichž v každé periodě svítí a nesvítí, jsou v poměru 1:1. (Výše už jsme uvedli, že se říká, že *střída kmitů* je 1:1.)<sup>9</sup>

Pro stroboskop však potřebujeme, aby LED blikla jen krátce a pak byla po většinu periody tma. Jen tehdy máme šanci uvidět díky stroboskopickému jevu pohyb zpomalen nebo zastaven. Podstata tohoto jevu totiž spočívá v tom, že LED osvítí např. značku na rotujícím kotouči opakovaně v okamžiku, kdy je značka vždy na určitém místě (nebo téměř na stejném místě). Pokud bude LED svítit dlouho, budeme vidět značku rozmazanou.

Naštěstí lze jednu část periody prodloužit poměrně jednoduchou úpravou zapojení.<sup>10</sup>

### 6.1. Modifikace zapojení

Modifikace zapojení oproti obr. 14 spočívá v tom, že vývod 7 integrovaného obvodu nespojíme s uzlem mezi R1 a R2 přímo, ale přes rezistor R3, jak to ukazuje obr. 16.



Obr. 16. Část zapojení určující frekvenci a střidu kmitů pro:  
a) blikač (viz obr. 14), b) stroboskop.

Modifikované zapojení bylo využito ve výsledné konstrukci stroboskopu, viz obr. 1.

### 6.2. Výpočet periody a střidy

Pojďme nyní vysvětlit chování modifikovaného obvodu – nejprve spíše kvalitativně. Pro nabíjení kondenzátoru platí totéž, co jsme odvodili výše, doba  $T_1$  je stále dána vztahem (11). (Přitom  $R = R_1 + R_2 \doteq R_1$ , protože bereme  $R_2 \ll R_1$ .) Po tuto dobu LED dioda svítí.

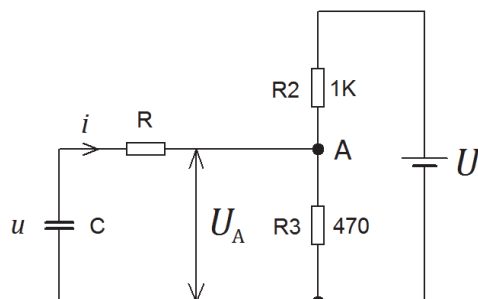
Při vybíjení je ale situace jiná. Kondenzátor C se totiž přes odpor potenciometru R1 nevybíjí přímo. Odpor R1 kondenzátor spojuje s bodem, v němž je napětí jen nepatrně nižší než  $1/3 U$  (jde o bod A na obr. 17). Toto napětí je dáno poměrem odporů  $R_3$  a  $(R_2+R_3)$ .

<sup>9</sup> V angličtině se používá termín *duty cycle*, který se definuje jako poměr části periody ku celé periodě. V našem případě by tedy *duty cycle* byl  $1:2 = 0,5$ .

<sup>10</sup> Nepochybně je tato úprava už někde popsána. V návodech, které jsem procházel (např. [3] a některé návody na internetu) však uvedena není. Vznikla jako nápad při teoretických úvahách, jak by se dal jednoduchý obvod z obr. 13 nebo 14 přimět k tomu, aby v něm například vybíjení kondenzátoru trvalo podstatně déle, než nabíjení, a aby poměr dob obou částí periody zůstal přibližně stejný i při změnách frekvence kmitů.

Jsou-li totiž odpory  $R_2$  a  $R_3$  mnohem menší než  $R$ , lze proud  $i$ , přitékající z kondenzátoru do A uzlu, zanedbat a napětí  $U_A$  spočítat jen z odporů  $R_2$  a  $R_3$ , které tvoří dělič napětí:

$$U_A = \frac{R_3}{R_2 + R_3} U. \quad (13)$$



Obr. 17. Vybíjení kondenzátoru v modifikovaném zapojení (princip).

Kdyby bylo  $R_2 = 1000 \Omega$  a  $R_3 = 500 \Omega$ , vycházelo by z (13)  $U_A = 1/3 U$ . V tom případě by se kondenzátor na napětí  $1/3 U$  (kdy integrovaný obvod zase „přepne“ na nabíjení) vybíjel teoreticky nekonečně dlouho.

Pro použité hodnoty  $R_2 = 1000 \Omega$  a  $R_3 = 470 \Omega$  dává (13) hodnotu  $U_A \approx 0,320 U$ . Kondenzátor se tedy na hodnotu  $1/3 U$  vybije, ale trvá mu to podstatně déle, než kdyby bylo  $U_A \approx 0 \text{ V}$  (tedy když by  $R_3$  byl zkratován).

Kvalitativně již tedy chování modifikovaného obvodu rozumíme. Dá se doba vybíjení vypočítat i **kvantitativně**?

Pokud budeme napětí  $U_A$  považovat za konstantní (což je rozumný předpoklad v případě  $R_3 \ll R$ , který uvažujeme), není to o nic těžší než výpočet nabíjení, který jsme dělali v části 5.2. Pro změnu náboje na kondenzátoru platí

$$\frac{dq}{dt} = -i = -\frac{u - U_A}{R}. \quad (14)$$

Znaménko mínus je ve vztahu proto, že  $i$  je proud vytékající z kondenzátoru. Když je proud kladný, kondenzátor se vybíjí, náboj na něm klesá.

Náboj na kondenzátoru je svázán s napětím  $u$  na něm vztahem (7), tedy  $q = C \cdot u$ , takže ze (14) plyne

$$\frac{du}{dt} = -\frac{u - U_A}{RC}. \quad (15)$$

Označíme-li  $u_1 = u - U_A$  (opět jde o napětí na rezistoru  $R$ ), stane se z (15) jednoduchá rovnice

$$\frac{du_1}{dt} = -\frac{u_1}{RC}, \quad (16)$$

která má řešení

$$u_1(t) = u_0 \cdot e^{-\frac{t}{RC}}. \quad (17)$$

Počáteční napětí je  $u_1(0) = u_0 = (2/3)U - U_A$ , koncové napětí (kdy je na kondenzátoru napětí  $1/3 U$ ) je  $u_1(T_2) = (1/3)U - U_A$ . Ze (17) pak plyne

$$\frac{U}{3} - U_A = \left( \frac{2U}{3} - U_A \right) \cdot e^{-\frac{T_2}{RC}}.$$

Odtud po úpravě

$$e^{\frac{T_2}{RC}} = \frac{2U - 3U_A}{U - 3U_A}$$

a po logaritmování konečně

$$T_2 = \ln \left( \frac{2U - 3U_A}{U - 3U_A} \right) \cdot RC. \quad (18)$$

Za povšimnutí stojí, že pro  $U_A = 0$  V (tedy pro případ, kdy  $R_3 = 0 \Omega$ , tedy pro blikač, jehož frekvenci jsme odvozovali výše v části 5) vychází  $T_2 = \ln 2 \cdot RC$ , tedy stejná doba, jako pro nabíjení, viz vztah (11).

Dosadíme-li do (18) hodnotu  $U_A$  ze (13), můžeme po troše úprav vyjádřit vztah pro dobu  $T_2$  jako

$$T_2 = \ln \left( \frac{2R_2 - R_3}{R_2 - 2R_3} \right) \cdot RC. \quad (19)$$

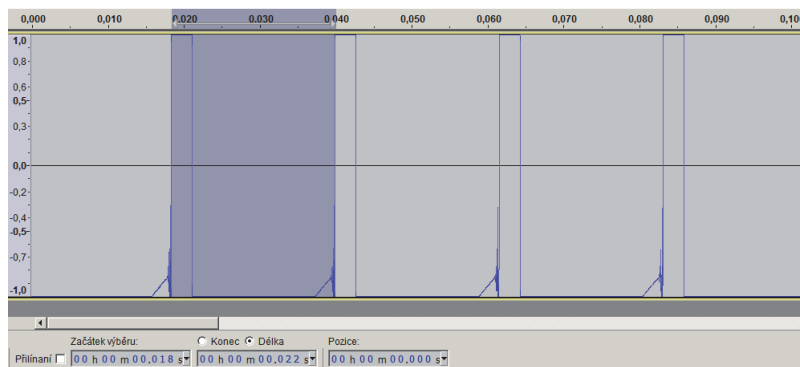
Pro  $R_2 = 1000 \Omega$  a  $R_3 = 470 \Omega$  dává (19) hodnotu  $T_2 \doteq 3,24 \cdot RC$ . Protože (viz (11))  $T_1 = \ln 2 \cdot RC \doteq 0,69 \cdot RC$ , dostáváme pro celkovou periodu  $T = T_1 + T_2 \doteq 3,9 \cdot RC$ , tedy téměř třikrát delší, než tomu bylo v případě blikače (vztah (12)). Pro střidu, tedy poměr  $T_2/T_1$ , dává náš výpočet hodnotu o něco menší než 5.

Při dosazení maximální hodnoty odporu potenciometru ( $R = 5 \cdot 10^5 \Omega$ ) a kapacity kondenzátoru ( $C = 10^{-7}$  F) vychází perioda  $T$  asi 0,2 s, tedy frekvence blikání asi 5 Hz.

### 6.3. Praktické chování přístroje

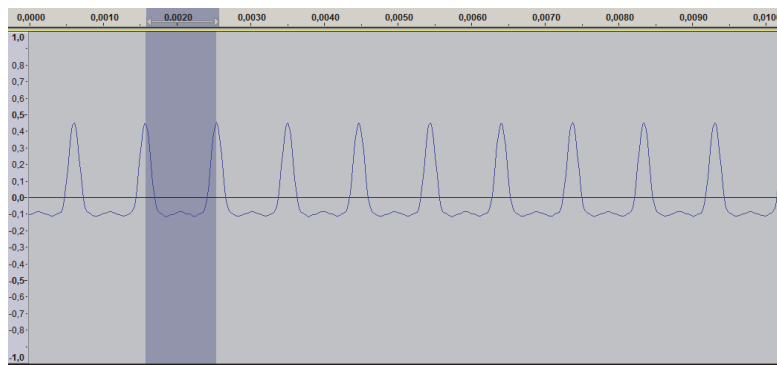
Nejnižší frekvence blikání změřená na dvou vzorcích přístroje byla 3,7 Hz a 3,9 Hz. Střída kmitů byla v rozmezí 1:6 až 1:7 (konkrétně na daných vzorcích 1:6,8 a 1:6,4). Tyto hodnoty přibližně odpovídají hodnotám plynoucím z teorie.

Časový průběh svitu LED lze alespoň přibližně snímat fototranzistorem připojeným k mikrofonnímu vstupu zvukové karty počítače; průběh lze prohlížet programem Audacity, jak to ukazuje obr. 18.

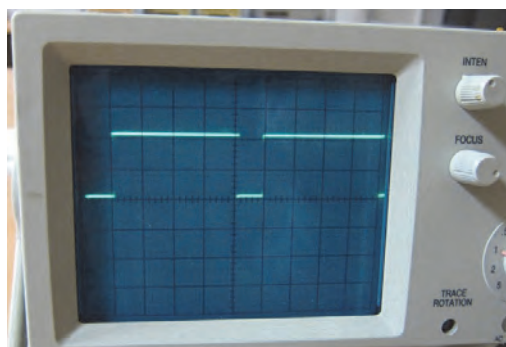


Obr. 18. Typický časový průběh svitu LED stroboskopu.

Nejvyšší kmitočet blikání, kdy je ještě dostatečně malá střída, byl asi 1 kHz, viz obr. 19. (Průběh signálu na obr. 19 trvá 0,01 s, jak uvidíte, když si zvětšíte měřítko zobrazení.) Skutečnost, že světelný signál už má „vyhlazenější“, a ne striktně obdélníkový průběh, je zřejmě dána dosvitem luminoforu svítivé diody – časový průběh signálu, který spíná tranzistor, je stále obdélníkový, jak to ukazuje obr. 20.

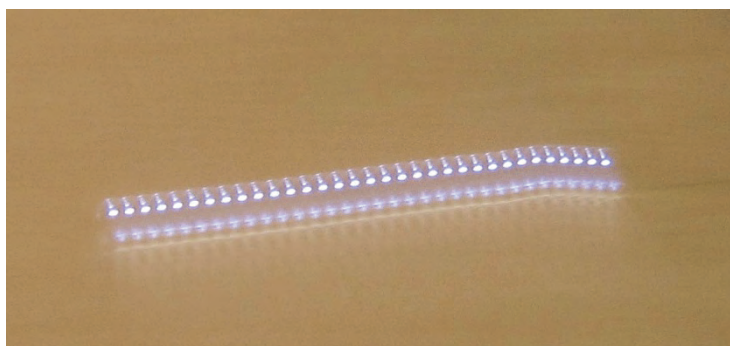


Obr. 19. Časový průběh svitu LED při kmitočtu asi 1 kHz.



Obr. 20. Časový průběh elektrického signálu na kolektoru tranzistoru při kmitočtu asi 1 kHz.

O frekvenci blikání LED se lze přesvědčit ještě jedním pokusem. Fotografujeme-li blikající LED a hneď-li přitom fotoaparát, bude na fotografii LED zachycena tolikrát, kolikrát blikla za dobu expozice. Obr. 21 ukazuje fotografii pořízenou s dobou expozice 1/30 s, tedy asi 33 ms. Opravdu je na ní 33 obrazů rozsvícené LED.



Obr. 21. Fotografie blikající LED stroboskopu při 1 kHz zachycená fotoaparát, kterým jsme při fotografování rychle otáčeli do strany. Doba expozice je 1/30 s.

Pozn.: Jde o výřez malé části fotografie. Matnější obrazy LED „ve spodní řadě“ jsou odrazy od desky stolu.



A teď drobný dodatek pro „šoury“, jímž vrtá hlavou, kde je příčina toho, že skutečný nejnižší kmitočet blikání je pod 4 Hz místo teoreticky odvozených 5 Hz a že střída je téměř 1:7 místo 1:5, které předpověděla teorie (dle vztahu (19)). Potřebujeme vysvětlit, že oproti teoretické hodnotě je poněkud delší ta část periody, v níž LED nesvítí.

Pohled na vztah (18) napovídá, že dané chování lze objasnit, pokud  $U_A$  je o něco vyšší, než odpovídá dělicímu poměru děliče z rezistorů  $R_2$  a  $R_3$ . (Je-li  $U_A$  bližší hodnotě  $U/3$ , je ve vztahu (18) jmenovatel ve zlomku menší, výsledná hodnota  $T_2$  je větší.) Tak tomu opravdu je: skutečné napětí  $U_A$  je větší. Je to proto, že na vývodu 7 integrovaného obvodu není přesně nulové napětí oproti vývodu 1 (viz obr. 16 b). Příčinou je skutečnost, že spínač uvnitř integrovaného obvodu je realizován tranzistorem, na tranzistoru i v sepnutém stavu je mezi emitorem a kolektorem určité malé napětí. Na skutečném zapojení naměříme v sepnutém stavu mezi vývody 1 a 7 napětí asi 65 mV. Když se započte vliv tohoto napětí, dává teoretický výpočet hodnotu frekvence asi 3,86 Hz a střídu asi 1:6,48, tedy ve velmi dobré shodě s naměřenými hodnotami.

### Upozornění:

Pokud by hodnota odporu  $R_3$  byla jen o málo větší, než uvedených 470  $\Omega$ , může už nastat situace, že  $U_A$  bude větší, než  $3 \cdot U$ . Napětí na kondenzátoru by pak nikdy nekleslo pod hodnotu, při níž integrovaný obvod „přepíná“, a stroboskop by neblinkal. (To nastane už při zvýšení  $R_3$  o pouhých 10  $\Omega$ .) Pokud stroboskop neblinká, je tedy vždy vhodné zkusmo zkratovat rezistor  $R_3$ . Pokud v tomto případě přístroj začne blikat, je potřeba snížit hodnotu rezistoru  $R_3$ , například připojením paralelního rezistoru.

## 7. Varianty zapojení

### 7.1. Bzučák (generujeme obdélníkové kmity se střídou 1:1)

Zapojení bzučáku již vlastně bylo uvedeno na obr. 14. V našem přístroji stačí zkratovat rezistor  $R_3$ . Přístroj pak vytváří obdélníkové kmity se střídou 1:1.

Abychom kmity skutečně slyšeli, místo LED zapojíme reproduktor. Má-li odpor 8  $\Omega$  nebo vyšší, můžeme ho zapojit přímo mezi kolektor tranzistoru a + pól baterie, tedy nepřipojovat sériově rezistor 47  $\Omega$ . Zvuk pak bude hlasitější.

Frekvenci kmitů v tomto zapojení lze měnit asi od 15 Hz do téměř 10 kHz. Při kmitočtech nad několik kHz už ale střída kmitů není 1:1, neboť pak neplatí  $R_2 \ll R_1$ .

### 7.2. Pomalé blikání (zapojení s větší hodnotou kapacity)

Pokud chceme zapojení použít jako blikač, potřebujeme výrazně nižší frekvence. K tomu stačí na místě C použít kondenzátor s výrazně vyšší kapacitou. Například pokud je  $C = 10 \mu\text{F}$ , budou frekvence od 0,15 Hz do téměř 100 Hz; pro  $C = 100 \mu\text{F}$  bude frekvenční rozsah od 0,015 Hz do asi 10 Hz, tedy interval mezi bliknutími bude od cca desetiny sekundy do asi minuty. Pokud rezistor  $R_3$  nebude zkratován, budou periody více než třikrát delší.

Poznamenejme, že chceme-li náš přístroj rychle změnit na pomalu blikající blikač, stačí samozřejmě ke kondenzátoru 0,1  $\mu\text{F}$ , který je v přístroji zapájen, připojit paralelně další kondenzátor, třeba pomocí kablíků s krokodýlky.

### 7.3. Spínání vyšších proudů

Tranzistor BC337, použitý v přístroji, má maximální povolený kolektorový proud 0,8 A. Pokud bychom chtěli spínat větší proudy, například pro „baterii“ výkonových LED, museli bychom proud zesílit dalším, tentokrát výkonovým tranzistorem, a spínat proudy z nějakého výkonnějšího zdroje, než je plochá baterie.

### 8. Závěr

Na dílně v Náchodě v říjnu 2012 si ve čtyřech běžích dílny postavilo vlastní stroboskop 36 účastníků. Většina přístrojů fungovala na první zapojení, drobné problémy v ostatních případech se podařilo najít a odstranit. Zapojení i skutečnou konstrukci přístroje lze tedy považovat za ověřené; stejně tak bylo ověřeno, že na stavbu tohoto stroboskopu stačí 90 minut, které dílna trvala. (Rekordní čas byl jen asi 30 minut, takhle rychle to nezvládám ani já.)

Snad se tedy tato pomůcka má šanci uplatnit při některých pokusech, kdy potřebujeme jednoduchý a levný blikač, bzučák či stroboskop. Navíc může být zajímavou ilustrací nabíjení a vybíjení kondenzátoru a možných aplikací tohoto děje.

### Literatura a odkazy

- [1] Dvořák L.: *Polovodiče a jejich aplikace*. Výukový a metodický text. Projekt OPPA Přírodní vědy a matematika na středních školách v Praze: aktivně, aktuálně a s aplikacemi. P3K s.r.o. Praha 2012. ISBN 978-80-87186-83-1. 44 s. Dostupné online: <http://kdf.mff.cuni.cz/projekty/oppa/> včetně dodatečných materiálů; vlastní příručka je konkrétně na adrese: <http://kdf.mff.cuni.cz/projekty/oppa/polovodice.pdf>, [cit. 9. 10. 2012].
- [2] Kasík P.: *Nejoblíbenější součástka na světě je NE555. Bzučí a bliká už 40 let*. Dostupné online: [http://technet.idnes.cz/hans-camenzind-vynalezce-555-timer-chip-dxg-/sw\\_internet.aspx?c=A121008\\_150143\\_sw\\_internet\\_pka](http://technet.idnes.cz/hans-camenzind-vynalezce-555-timer-chip-dxg-/sw_internet.aspx?c=A121008_150143_sw_internet_pka) [cit. 9. 10. 2012].
- [3] Hájek J.: *Časovač 555. Praktická zapojení s jedním časovačem*. BEN – technická literatura, Praha 1999. ISBN 80-901984-1-4. 120 s.
- [4] GM Electronic: LED 10MM WHITE 8000/25°. Online: <http://www.gme.cz/led-kulate-pouzdro/led-10mm-white-8000-25-p511-791/> [cit. 18. 10. 2012]