

Netradiční měřicí přístroje 2: Indikátor malých proudů

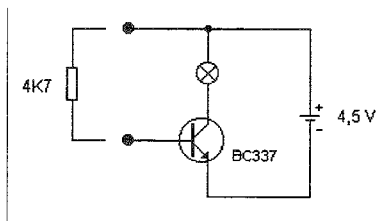
LEOŠ DVOŘÁK

Matematicko-fyzikální fakulta UK Praha

Podtitulek tohoto příspěvku by také mohl znít „Nanoampérmetr za dvacku“. Nejde o měřicí přístroj s ručičkou či digitálním ukazatelem, ale opravdu o indikátor, který proud indikuje rozsvícením žárovčky či svítivé diody. Dokáže však věci, které bychom od tak jednoduchého přístroje možná ani nečekali.

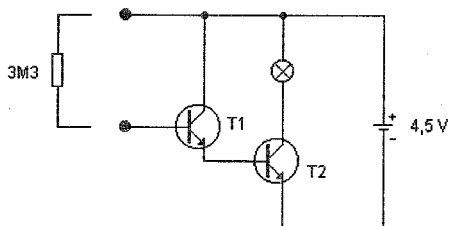
Počátky indikátoru: jednodušší konstrukce s jedním a se dvěma tranzistory

Dále popsaná konstrukce se vyvinula z velmi jednoduchého zapojení, které demonstrovalo, že tranzistor zesiluje proud. Spojíme-li bázi tranzistoru přes rezistor s kladným pólem baterie, žárovčka v kolektoru se rozsvítí. Žárovčkou přitom teče proud řádově stovek mA (jde o žárovčku 3,5V/0,2 až 0,3 A). Proud do báze je výrazně nižší. Použijeme-li tranzistor např. typu BC337, stačí do báze přivádět proud asi 0,5 mA. (Proudový zesilovací činitel tranzistoru BC337C je zhruba 500. Některé tranzistory BC337 mají proudový zesilovací činitel poněkud nižší; proud do báze by pak musel být samozřejmě větší.)



Obr. 1. Proudem menším než 1 mA do báze ovládáme proud řádu desetin A tekoucí žárovčkou

Již v příspěvku [1], kde bylo toto zapojení popsáno, je zmíněna jeho varianta se dvěma tranzistory. Proudový zesilovací činitel obou tranzistorů se v tomto zapojení násobí. Lze to vidět (a žákům vysvětlit) velice jednoduše: Aby tranzistor T2 rozsvítil žárovku, musí do jeho báze téci proud asi uvedených 0,5 mA. Tento proud tam teče z emitoru tranzistoru T1.



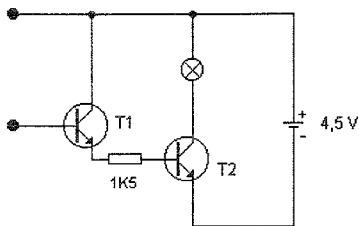
Obr. 2. Toto zapojení dvou tranzistorů umožňuje detekovat proudy řádu mikroampér

K tomu stačí do báze T1 přivádět proud opět asi 500-krát menší, tedy přibližně 1 mikroampér. Takto malým proudem tedy řídíme proud asi 0,25 A tekoucí do žárovčky. Celkový proudový zesilovací činitel je $500 \cdot 500 = 250000$.

Aby žárovčka svítila, stačí tedy spojit bázi tranzistoru T1 s kladným pólem baterie přes rezistor o odporu

několika megaohmů. Místo rezistoru lze použít i vlastních prstů. Vodivost kůže a lidských tkání stačí k tomu, aby do báze prošel potřebný proud. Pokud je kůže příliš suchá, je třeba prsty trochu navlhčit.

Dvě technické poznámky:



Obr. 3. Ochranný rezistor zabrání zničení tranzistorů při přímém spojení báze s kladným pólem baterie

1) Rezistor samozřejmě může mít nižší odpor. Nepřipojujte však bázi T1 ke kladnému pólu baterie přes rezistor o příliš malém odporu (menším než asi 100 kΩ), velký proud procházející bází T2 by mohl tento tranzistor zničit. Spojíte-li bázi T1 s kladným pólem přímo, povede se vám patrně zničit oba tranzistory. Lepší je uvedeným nehodám předejít a zapojit přímo do báze T1 ochranný rezistor s odporem např. 100 kΩ. Druhou možností je zapojit ochranný rezistor mezi emitor T1 a bázi T2, jak to ukazuje obr. 3. Odpor tohoto rezistoru musí být nižší; vyhoví např. 1,5 kΩ.

zesilovacím činitelem, bude muset být proud do báze T1 samozřejmě vyšší a příslušné rezistory musí mít menší odpory.

2) Použijete-li tranzistory s nižším proudovým

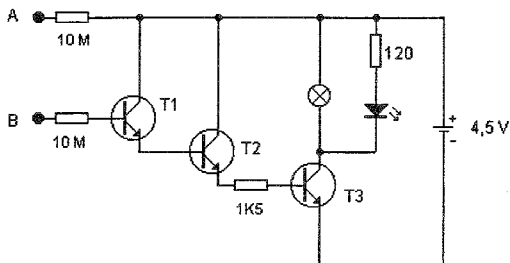
A ještě jedna poznámka téměř didaktická:

Při vysvětlování funkce tohoto zapojení žákům či studentům bych se nebál formulací typu „napětí z ploché baterie protlačí odporem 1 megaohm do báze proud několik mikroampér“ apod. Zpřesňující formulace „rezistor o odporu tolik a tolik“ a upozornění, že na přechodech báze-emitor je úbytek napětí asi 0,7 V mohou samozřejmě následovat. Ale vždy je lepší, když žák či student má o funkci zapojení dobrou kvalitativní představu a dovede příslušné hodnoty zhruba odhadnout, než když sice dovede odříkat definici Ohmova zákona a brilantně rozlišuje mezi pojmy „odpor“ a „rezistor“, ale na otázku, jak velký proud tedy rezistorem prochází, rozpačitě krčí rameny a pak po dlouhém boji s kalkulačkou sdělí výsledek na pět platných cifer, ale třeba o několik řádů chybný.

„Plná verze“: indikátor se třemi tranzistory

Verze se dvěma tranzistory umožňuje indikovat proud řádu mikroampér. Přidáním dalšího tranzistoru můžeme zvýšit citlivost ještě zhruba 500-krát. Výsledné zapojení, umožňující indikovat proud řádu několika nanoampér, je na obr. 4.

Tranzistor T3 musí vydržet proud několika desetin ampéru tekoucí žárovíčkou. Vyhoví již



Obr. 4. Schéma „nanoampérmetru za dvacku“

zmíněný typ BC337. Tranzistory T1 a T2 jsou běžné nízkovýkonové NPN tranzistory, např. typu BC547. Všechny tyto typy lze koupit v prodejnách pro radioamatéry (např. GM Electronic, Compo apod.) a to za cenu asi 2,50 Kč za kus [2]. Rezistory lze též použít nejlacinějších typů, takže jejich celková cena je 1,60 Kč. Svítivou diodu (LED), kterou bychom ani nemuseli v přístroji mít (viz dále), lze také koupit nejlacinější v ceně pod 2 Kč. Nepočítáme-li plochou baterii, která indikátor napájí, jsou nejdražšími součástkami žárovka s objímkou a cena celé konstrukce opravdu vyjde zhruba na dvacetikorunu.

Poznámky k realizaci indikátoru

Pro použití ve škole doporučuji realizovat celou konstrukci doslova a do písmene „na prkénku“ – na kousku dřevěné destičky, do níž zatlučeme malé hřebíčky, na něž pájíme vývody součástek. Nejlepší jsou mosazné hřebíčky, protože se na ně dobře pájí. K sehnání jsou ve větších železářstvích.

Rozložení součástek na destičce může přesně kopírovat schéma na obr. 4. Schéma zapojení je pak na destičce názorně vidět, což pomůže při vysvětlování jeho funkce. Indikátor tak může být pro žáky a studenty něčím, co mohou pochopit. Rozhodně nejde o tajemnou „černou skříňku“, která záhadným způsobem něco indikuje, ukazuje či sděluje.

Rezistory o odporech 1,5 k Ω a 10 M Ω (na jejich přesných hodnotách nezáleží) mají ochrannou funkci. Zabráňují zničení tranzistorů velkým proudem, který by mohl téci bázemi při trochu „divočejším“ experimentování s přístrojem. Např. když svorky A nebo B, k nimž při pokusech budeme připojovat kablíky, vodivě spojíme s kterýmkoli vývodem kterékoli součástky v naší konstrukci.

K indikaci slouží žárovka (3,5 V / 0,2 nebo 0,3 A) a k ní paralelně zapojená svítivá dioda (LED) spolu se sériově zapojeným rezistorem asi 120 až 150 Ω omezujícím proud diodou. Stačí samozřejmě použít buď jen žárovičku nebo jen LED s rezistorem. Ovšem svit žárovičky je lépe vidět z větší vzdálenosti, např. při demonstracích pro celou třídu, a více přitáhne pozornost. Naopak se svítivou diodou je přístroj citlivější. Je tedy výhodné mít v zapojení jak žárovičku, tak LED. Povolíme-li žárovičku v objímce, bude indikovat jen svítivá dioda a citlivost přístroje vzroste asi desetkrát.

Ještě jednu poznámku k realizaci „vstupní“ svorky B. Tuto svorku (a rovněž bázi tranzistoru T1) je třeba izolovat od dřevěné destičky, tvořící základ konstrukce. Indikátor je totiž tak citlivý, že se projeví i vodivost dřeva. (V konstrukcích realizovaných autorem nestačila vodivost dřeva k rozsvícení žárovky, ale k rozsvícení samotné LED ano.) Jednoduchým řešením je navléci na hřebíček kousek izolační bužírky stažené např. ze zvonkového drátu a jeden vývod rezistoru kolem ní prostě omotat. Druhý vývod rezistoru připájíme na bázi T1 „ve vzduchu“, aniž bychom toto spojení pájeli k hřebíčku zaraženému do destičky.

K čemu je to dobré 1 - indikátor vodivosti

Přístroj funguje jako velice citlivý indikátor vodivosti. Spojíme-li svorky A a B třeba i velmi suchýma rukama, žárovka se rozsvítí. Můžeme též jednu ze svorek vzít do ruky a koncem kablíku, připojeného k druhé elektrodě, se dotknout třeba čela, nosu, ucha ... nebo palce u nohy, je-li zrovna léto a studenti chodí naboso v otevřených botách. Můžeme též udělat „vodivý řetěz“ z více lidí držících se za ruce. (Nebo třeba za uši, chcete-li z této demonstrace udělat ještě více „šou“. Můžete ji také zpestřit konstatováním, že daný indikátor ukazuje, že „nikdo nejsme nekonečně odporový“.)

Různé „přechodové odpory“ indikaci vodivého spojení nevadí. Žárovička svítí, i když je mezi svorkami A a B odpor řádu stovek megaohmů. Bez problémů bude indikováno vodivé spojení třeba přes navlhčený hadr apod. S překvapením můžete zjistit, že vedou např. i některé plastické hmoty – o čáře tužkou na papíře ani nemluvě.

K čemu je to dobré 2 - aneb s bipolárními tranzistory i na elektrostatiku

Citlivost uvedeného indikátoru je tak velká, že jej můžeme využít i při některých pokusech z oblasti elektrostatiky.

Zkuste například sáhnout na svorku B a v botách s gumovými či podobnými podrážkami šoupat nohou po suché podlaze – nebo jen silněji došlápnout a zase botu odlehčit. Výsledek samozřejmě závisí na materiálu podrážky a podlahy (koberec, PVC atd.). Ve většině případů však žárovka zasvítí. Šoupaním podrážky o podlahu se naše tělo nabíjí elektrickým nábojem. Jeho část pak přes svorku B prochází do báze tranzistoru T1 – a žárovka zasvítí.

Trocha pokusničení s kondenzátory různých hodnot ukáže, že k bliknutí žárovky stačí, aby do báze T1 prošel náboj několika nanocoulombů - a pro bliknutí LED při povolené žárovičce dokonce náboj jen několika desetin nanocoulombu.

Indikátor není ani potřeba nijak „uzemňovat“, tj. vodivě spojovat např. svorku A třeba s vodovodem nebo kolíkem „nuláku“ v zásuvce. Pokud to uděláme, reakce indikátoru budou ještě výraznější, ale přístroj může začít reagovat i na rušivé vlivy dané přítomností elektrické sítě, vysokofrekvenčního pole vysílačů apod. Pro běžné pokusy stačí, že přístroj má určitou kapacitu „vůči zemi“.

Pro další pokusy připojte ke svorce B krátký kablík. Hodí se kablíky, které mají na svých koncích malé krokosvorky. Na konec kablíku můžete připojit kousek alobalu nebo malou plechovku, ale není to nezbytné. Podobný kablík můžete do jiného směru natáhnout od svorky A. Pokud by stůl, na němž pokusy provádíte, dostatečně neizoloval, můžete zmíněné plechovky či alobal podložit např. kusy pěnového polystyrenu.

Nabijte teď třením plastickou tyč (stačí i vhodné plastické pravitko). Přiblížte ji ke svorce B a zase oddalte. Při *oddálení* žárovička zasvítí. Se svorkou A to funguje naopak: žárovička svítí při *přiblížování* nabitě plastové tyče.

Proč to tak funguje

Plastiková tyč se třením nabije záporně. Přibližujete-li ji ke svorce B, přitáhne k sobě (do plechovky, alobalu resp. konce kablíku) kladný náboj. Proud tedy protekl z báze T1 do kablíku. Tranzistor se neotevře, žárovka nesvítí.

Vzdálíte-li tyč, kladný náboj již není přitahován do plechovky a oteče do báze T1. Proud tedy teče *do* báze tranzistoru, ten se otevře, další tranzistory proud ještě zesílí... a žárovička zasvítí.

Naopak přiblížíme-li tyč ke kablíku A, přitáhne se tam kladný náboj. Odkud? Z celého přístroje, tedy i z plechovky a kablíku připojeného ke svorce B. To znamená, že do báze T1 opět chvíli teče proud – žárovička zasvítí. Při *oddálení* teče proud v opačném směru a indikátor nereaguje.

Poznámka pro skeptiky: Možná namítnete, že proud nemůže téci z báze T1 do kablíku. Musel by přece téci přechodem báze-emitor nebo báze-kolektor v závěrném směru! Zdánlivě máte pravdu, ovšem např. přechod báze-emitor vydrží v závěrném směru jen napětí necelých deset voltů. Při vyšším se prostě „prorazí“ a vede proud. A při elektrostatických pokusech jde o

napětí stovek i tisíců voltů. Právě proto je vhodné mít v zapojení u svorek A a B rezistory o odporu 10 M Ω . Ty i při tomto „průrazu“ omezí proud na dostatečně malou hodnotu a zamezí tak případnému poškození tranzistorů. Proto indikátor vydrží třeba i to, když se svorkou A či B dotknete nabitě koule školního van de Graafova generátoru.

Další elektrostatické pokusy

Jak už bylo výše naznačeno, indikátor umožní jednoduše rozhodnout, které předměty jsou nabitě kladně a které záporně. Nabijte třením sklo (stačí obyčejná sklenička) a přiblížte je ke svorce B. Žárovka zasvítí. Pokud náboj na skle není dostatečný, povolte v indikátoru žárovku a sledujte svit diody LED. S takto zvýšenou citlivostí by již měl indikátor na přibližování nabitě skleničky reagovat. Indikátor také reaguje výrazněji při rychlejším přibližování nabitěho předmětu.

Indikátor umožní demonstrovat i skutečnost, že při tření plastické tyče látkou se látka nabíjí opačným nábojem než tyč, tedy kladně. Držíme-li ovšem látku přímo v ruce, odvádíme vzniklé náboje. Držte proto látku přes nějakou plastickou fólii, která dostatečně izoluje (tenký plastický sáček apod.) a třete s ní plastickou tyč. Pak tyč vzdalte, aby přístroj nereagoval na náboj tyče, a poté upustěte látku na kablík spojený se svorkou B. Žárovka zasvítí – na látce byl kladný náboj. (Pokud se pokus nedaří, povolte žárovku a využijte opět citlivější indikaci pomocí svítivé diody.)

Podobně můžeme zjistit polaritu náboje vytvářeného piezoelektrickým zapalovačem plynu. (Jde o upravený zapalovač s vyvedeným kontaktem, jehož využití bylo popsáno v [3]). Při všech těchto pokusech víme, že žárovka svítí, přivedeme-li na svorku B kladný náboj. Nevěřící Tomáše lze přesvědčit, že to je náboj stejné polarity jako na kladném pólu baterie. Prostě ke svorce B připojíme obyčejnou plochou baterii, jejíž druhý pól spojíme s emitorem T3.

Chceme-li zjišťovat polaritu náboje např. nabitě plechovky nebo koule van de Graafova generátoru, nestačí jen kablík vedoucí od svorky B dát do nějaké vzdálenosti od nabitěho tělesa a nechat být. Musíme si uvědomit, že náš přístroj neindikuje přímo přítomnost náboje či velikost elektrického potenciálu, ale jeho změny. Aby žárovka svítila, musí do báze T1 téci nějaký proud.

Naštěstí vše lze vyřešit velmi jednoduše. Vezměte přístroj do ruky, sáhněte přitom na svorku A (aby byl indikátor na vás „uzemněn“) a kablíkem, visícím ze svorky B kývejte v blízkosti nabitěho tělesa. Při přibližování kablíku ke kladně nabitěmu tělesu resp. při vzdalování od záporně nabitěho tělesa indikátor reaguje. Můžete tak například ukázat, že při nabíjení plechovky elektrostatickou indukci je její náboj opačný než nabijeme-li ji dotykem.

Podobných pokusů jistě dokážeme vymyslet víc. Například pohybuje-li se při kývání konec kablíku po místech stejného potenciálu, indikátor nereaguje. Tak by šlo zhruba určovat směr ekvipotenciálních ploch nebo ověřovat, že uvnitř nabitěho tělesa je konstantní potenciál. Do jakých detailů jít a jak indikátor zajímavě a užitečně využít samozřejmě záleží na typu školy, úrovni žáků a dalších podmínkách – a nakonec na rozhodnutí každého učitele. Vynalézavosti a obměnám se meze nekladou.

K čemu je to dobré 3 - hrátky s kondenzátorem

Indikátor nám umožní ukázat například i to, že kondenzátor ze dvou kusů alobalu oddělených plastickou fólií může po nabíjení ploché baterie dodávat chvíli proud... Ale bližší popis

příslušných pokusů už si necháme „jako bonus“ do elektronické verze tohoto příspěvku na Web a na CD.

Závěr

Ke konstrukci indikátoru a měření jeho vlastností by bylo vhodné doplnit ještě pár poznámek. Třeba o tom, jak v případě potřeby zmenšit jeho citlivost, proč naopak přidání čtvrtého tranzistoru citlivost už příliš nezvýší, jak lze ověřit, že je citlivost indikátoru opravdu několik nanoampér (a s LED řádu desetin nA) a citlivost na náboj řádu nanocoulombů, že lze samozřejmě postavit i variantu indikátoru s PNP tranzistory (ta by reagovala na opačnou polaritu náboje), jak by bylo možno obě varianty propojit a proč to možná ve výuce nemusí být nejvhodnější atd. O některé z těchto poznámek bude doplněna elektronická verze tohoto příspěvku, která bude dostupná na webu [4] a na připravovaném CD. Elektronická verze příspěvku bude také doplněna ilustračními fotografiemi.

Domnívám se však, že už výše uvedený popis „nanoampérmetru za dvacku“ může být pro učitele fyziky dostatečnou inspirací k tomu, aby jej zkusili realizovat (ať už sami nebo svými žáky) a užívat jej ve výuce a třeba i mimo ni. Na MFF UK visel prototyp tohoto indikátoru několik měsíců na nástěnce na chodbě – a se zájmem s ním experimentovali i nefyzikové. Třeba může takto lákat pozornost i ve vaší škole...

Výše popsaná konstrukce indikátoru je výsledkem pozvolného vývoje – a nikde není řečeno, že tento příspěvek v něm řekl poslední slovo. (Snad jen směrem k jednoduchosti; víc zjednodušit už tento indikátor asi nepůjde.) Věřím, že učitelé v praxi mohou přijít jak na další zajímavé uplatnění tohoto přístroje v experimentech, tak na případná konstrukční vylepšení. Za všechny připomínky a náměty budu vděčen.

Literatura

- [1] Dvořák L.: *Pár věcí z tábora 3 – tentokrát o čase a trochu i o elektronice*. In: *Sborník konference Veletrh nápadů učitelů fyziky 5*, Ed. K.Rauner, ZČU Plzeň 2000, s.147-150.
- [2] *Součástky pro elektroniku*. Katalog GM Electronic. GM Electronic Praha 2000, s.76.
- [3] Patč B.: *Netradiční pokusy z elektrostatiky*. In: *Sborník konference Veletrh nápadů učitelů fyziky 4*, Ed. K.Rauner, ZČU Plzeň 1999, s. 113-114.
- [4] <http://fyzweb.cuni.cz>