

Jednoduché elektronické obvody s možným univerzálním použitím

PETR ADÁMEK – PAVEL VARNUŠKA

Pedagogická fakulta JU, České Budějovice

Současný nedostatek budoucích mladých fyziků, techniků, tvůrců je třeba nahradit. Proces výchovy závisí také na jejich motivaci a dlouhodobé přípravě ve fyzice a praktickým seznámením s fyzikálními aplikacemi a technikou už od základní školy. Nedostatek techniků souvisí s jejich odbornou přípravou a samozřejmě s konkrétním zaměřením na vhodné prezentace, animace atd., které jsou stále dokonalejší po všech stránkách výuky, včetně hygienické a ekonomické [1, 2]. Poněkud se vytrácí praktická i tvůrčí výuka, která vede ke kontaktu s reálným prostředím, reálnou konstrukcí zařízení všech druhů zaměření. Praktická výuka tak ztrácí styk s realitou a ochuzuje žáky o základní a zásadní vjemy, informace osobního kontaktu s materiálem, součástkami, nosným materiálem, procesem spojování, zapojování, ožívování i jeho následnými fyzikálními vlastnostmi včetně pevnosti a hmotnosti. Žáci jsou tak ochuzováni o tyto vstupní informace, které bychom jim poměrně obtížně sdělovali a pomocí abstraktních vyjádření tak nahrazovali jejich vlastní smyslové vnímání. Po vykonání tvůrčí činnosti je dalším přínosem zisk i nefyzikálních neexaktních osobních informací o vlastní pečlivosti, přesnosti, trpělivosti aj. Žáci se navíc dovědí něco o sobě z hlediska rozvoje osobnosti. Praktická výuka je někdy pro žáky obtížná, pro učitele náročná na čas, materiál vhodný na výuku i volbu témat vhodných pro praktickou výuku. V současnosti jsou na trhu běžné a široce rozšířené produkty spotřební elektroniky s velmi různorodou možností aplikací, následované rozvojem a distribucí mikroprocesorových stavebnic různé složitosti i úrovně náročnosti. Hlavně stavebnic typu [3, 4], určených začínajícím inženýrům a technikům pro profesionální aplikace, ze kterých je těžké vytipovat elektronické zajímavé konstrukce, vhodné pro elementární výuku elektronických obvodů.

Pro účely výuky byly vytipovány a vybrány elektronické obvody, které se vyznačují relativně jednoduchou konstrukcí, snadnou realizovatelností a v neposlední řadě nízkými náklady. Pro výuku fyziky mohou elektronické

obvody s tranzistory posloužit pro praktické seznámení s elementární elektronikou i reálnými fyzikálními jevy. Pro aplikovanou informatiku ve spojení s elektronikou poslouží vybrané obvody jako funkční periferní zařízení u procesorových stavebnic jako možné hardwarové rozšíření systému i projektu konkrétního programového vybavení pro řízení procesu. Těmito obvody je číslicový zdroj malého a přesného napětí s jednoduchým A/D převodníkem s aktivním napěťovým výstupem a dále převodník proud/napětí, přepínatelný pro různé proudové intenzity. Toto napětí je pak snáze měřitelné analogově – digitálním převodníkem, osazovaným v mikroprocesorech. Všechna vybraná zapojení by měla sloužit pro badatelsky orientovanou výuku [5, 6], „learning by doing“ nebo podobných přístupů ve shodě s RVP [7], na různých stupních škol. Příspěvek předkládá výběr obvodů, jejich technické řešení s popisem jejich vlastností, vysvětlením funkce a funkce jejich jednotlivých částí, které pokrývá prakticky orientovanou výuku fyziky, elektroniky i aplikované informatiky, podle zvolené aplikace.

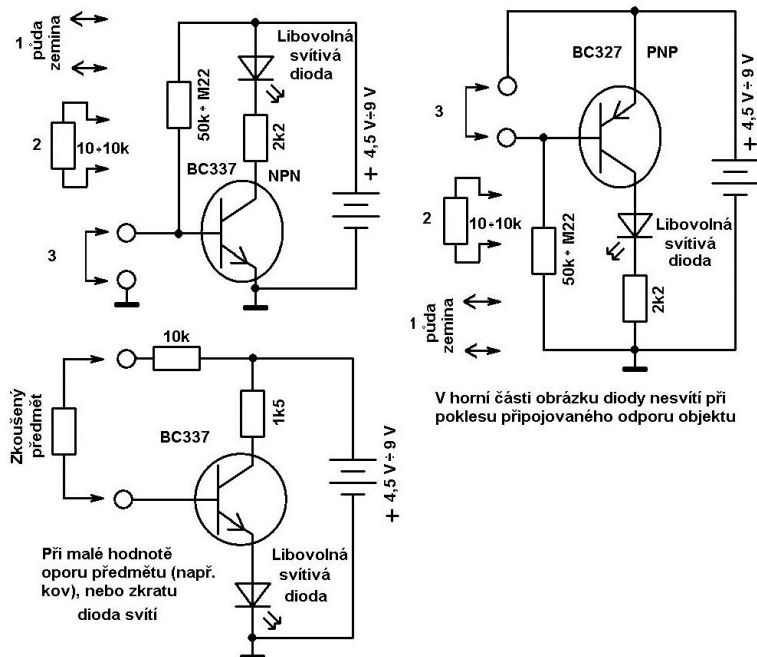
Nejjednodušší tranzistorové aplikace

Nejjednodušší aplikace, obvody s tranzistory, je možné považovat za obvody s nejsložitějším výběrem. Podobná i uvedená zapojení byla publikována v [8, 9] i v učebnicích elektroniky a odpovídají původně vícekrát opakovaně v minulosti publikovaným zapojením, například se žárovkou. Nakonec byly vybrány odkazy s funkčně nejbližšími zapojeními, nejlépe dostupnými na WWW stránkách. Zapojení byla někdy upravena a uzpůsobena požadované aplikaci. Úpravy musely být přiměřeně jednoduché, aby zbytečně nekomplikovaly zapojení a nezvyšovaly náklady na jeho řízení.

Jedno z nejjednodušších zapojení jediného tranzistoru je v poslední době dostupné na [8, 9].

Upravený N-P-N tranzistorový zesilovací spínací stupeň s BC337 [10], v zapojení se společným emitorem, s doplněným rezistorem nebo zátěží (diodou) v emitoru tranzistoru pro zvýšení vstupního odporu, nazývaný původně například dle [8] „kontrola vlhkosti v květináči“, je uveden na obr. 1. Dále je doplněn funkčně podobnému zapojení s tranzistorem BC327 dle [11] s vodivostí typu P-N-P. Využití tohoto upraveného i citovaného zapojení předpokládá zdroj signálu vlhká/suchá půda s relativně malým vnitřním odporem, aby byl omezen průchod dostatečně velkého proudu bázi a tak k rozepnutí tranzistoru a zhasnutí svítivé diody. Když půda zvětší svůj odpor nebo odpojíme přírodní vodiče-elektrody, svítivá di-

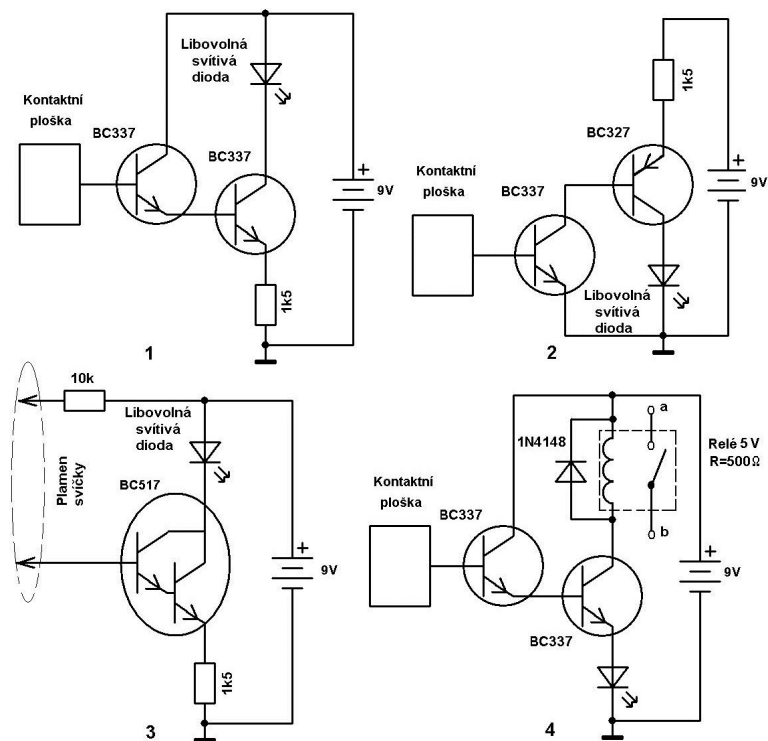
oda se rozsvítí. Využití tohoto zapojení je dostatečně široké, je doplněno v pravé části obr. 1 „zkoušečkou“ uzavřeného/přerušeného obvodu, přes kontrolu přerušené klasické žárovky, tavné pojistky, vinutí elektrických strojů, přerušených diod v usměrňovačích, po citovanou indikaci vlhkosti nebo přítomnost vody v různém materiálu nebo půdě, popř. zjišťování vodivosti/nevodivosti materiálů nebo předmětů.



Obr. 1 Nejjednodušší zapojení zesilovačů s tranzistory N-P-N a P-N-P

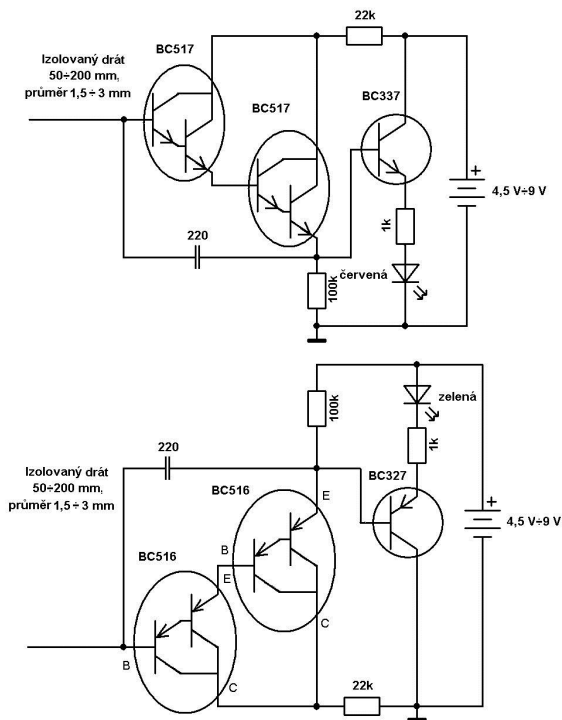
Podobné vlastnosti jednoduchého zesilovače proudu bez komplikování s nastavením pracovního bodu a širokého uplatnění mohou mít schémata na obr. 2, část 1, kde jsou použity dva tranzistory BC337 [10] v Darlingtonově zapojení [12]. Tento spínací zesilovač se vyznačuje větším zesílením, vychází z proudového zesilovacího činitele $\beta = I_c / I_b$ u jediného tranzistoru a u dvou tranzistorů v Darlingtonově zapojení je celkové β rovno přibližně $\beta_1 \cdot \beta_2$. Taktéž vstupní odpor spínacího stupně je přibližně roven $\beta_1 \cdot R_E$ emitorový rezistor, takže je podstatně větší. Umožňuje spínání různé zátěže pouhým prstem, je možné jej použít i jako zesilovací stupeň. Na obr. 2,

část 2 je uveden zesilovací stupeň v Sziklaiově (nepřesně Darlingtonově) NPN+PNP zapojení [13] s velkým proudovým zesílením, avšak podobnou menší hodnotou vstupního odporu jako u jediného tranzistoru. Na obr. 2, části 3 je opět Darlingtonovo zapojení jediné součásti $1 \times BC517$ [14], ve skutečnosti je to opět dvojice tranzistorů v jednom pouzdře. Její použití ukazuje vodivost plamene. Jedná se schopnost získat velké proudové zesílení dvou za sebou zapojených tranzistorů. Je zesílen relativně malý proud do báze, který prochází rezistorem připojeným ke kladnému napětí přes plamen svíčky [15] nebo jiný plamen a sepne tak svítivou diodu. Další část 4 na obr. 2. popisuje připojení induktivní zátěže, relé. Například na napětí 5 V s odporem cívky 500Ω [16]. Spínací tranzistor, jeho přechod kolektor–emitor je nutno ochránit diodou proti přepětí, které se naindukuje na cívce relé i při rozepínání tranzistoru.



Obr. 2 Použití tranzistorů v Darlingtonově zapojení s velkým zesílením a velkým vstupním odporem ke spínání

Zvláštní aplikace je na obr. 3 nahoře s tranzistory NPN a dole s tranzistory PNP.



Obr. 3 Obvody s vysokým ziskem a vstupním odporem s více tranzistory

Původně publikované schéma [17] nazývané „Elektroskop s tranzistory“ je upraveno na použité Darlingtonovy tranzistory pro zjednodušení a snížení počtu součástek. Tato zapojení se vyznačují maximálním dosažitelným vstupním odporem, taktéž s velmi velkým zesílením. Toto zapojení bylo primárně použito jako elektroskop-náhrada klasického elektroskopu. Zapojení s Darlingtonovými tranzistory BC517 N-P-N a jedním tranzistorem BC 337 [10] v horní části obr. 3 slouží jako detektor kladného elektrického pole – je spínána červená dioda a v dolní části obr. 3 s Darlingtonovými tranzistory P-N-P BC516 [18] a jedním tranzistorem BC327 [11] je detekováno elektrické pole se zápornou polaritou, je spínána zelená dioda. Obvody by měly být umístěny do kovové krabičky a vyvedena by měla být pouze drátová elektroda izolovaná od krabičky. Je ho též možné pou-

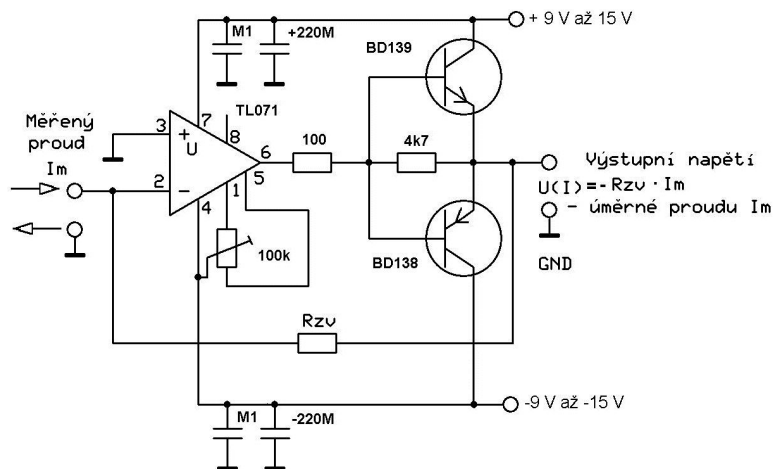
žit jako bezkontaktní detektor síťového („živého vodiče“ – pod napětím) vedení může být i pod omítkou, podobně je uvedeno v [8]. Další aplikace, po doplnění alespoň o alternativní kontaktní plošku, vodivý kovový pásek. Toto zapojení zesilovače s velkým ziskem a velkým vstupním odporem, je uvedeno jako detektor přítomnosti kladných a záporných iontů [19]. Nedá se s jistotou rozlišit, zda se jedná o ionty nebo pole. Pokud s jistotou víme, jaké ionty produkuje například zkoumaný zdroj iontů, můžeme tvrdit, že detekujeme ionty a nikoli elektrické pole.

Další aplikace tranzistorových zesilovačů z obr. 2 a obr. 3 nabízí časopis Praktická elektronika například dle [20], jako velmi citlivý zesilovač k detektorům radioaktivního záření, pro zjednodušení a počáteční nepoužití mikroprocesorové stavebnice, je možno výstup vybavit klasickým panelovým měřidlem, digitálním multimetrem nebo elektromechanickým měřidlem. Jiná možná aplikace tranzistorového zesilovače s velkým ziskem je detektor aktivace mobilního telefonu, který snímá pouze nízkofrekvenční složku mobilním telefonem zpracovaného signálu. Schémata s tranzistory na obr. 3, případně doplněná výše zmíněnými obvody, překračují požadavky na jednoduchost a ekonomičnost řešení, za podmínek relativně malé složitosti a přiměřeně vyšších nákladů je možné vytvořit některé speciální obvody se zajímavými parametry.

Konstrukce převodníku proud/napětí

Na obr. 4 je uvedeno obvodové schéma zapojení převodníku proud/napětí s nastavitelnými proudovými rozsahy. Proud je přiveden mezi vstupní svorky na invertujícím vstupu operačního zesilovače a nulovým potenciálem. Zesilovací stupeň se chová jako proudová nora, tj. má nulový vstupní i vnitřní odpor. Výstupem je napětí, které je úměrné záporné hodnotě vstupního proudu viz na obrázku uvedený vztah. Převodník proud/napětí se chová jako ideální ampérmetr, který není zatížen systémovou chybou, úbytkem napětí na snímacím rezistoru (není použit). Převodník proud/napětí vychází z jednoduchého zapojení operačního zesilovače [21], popsáném v [22], které je doplněno výkonovými komplementárními tranzistory BD139 [23] a BD138 [24] prepínači proudového rozsahu. Převodník proud/napětí funguje jako téměř ideální ampérmetr – proudová nora a je dáno kvalitou operačního zesilovače. Do vstupu převodníku proud/napětí je přiváděn měřený proud a tento proud je operačním zesilovačem a zpětné vazbě převeden na napětí. Obvod není zatížen systémovou chybou, způsobenou vnitřním odporem obvyklého ampérmetru u multimetrů. To znamená úbytkem

napětí na snímacím rezistoru u běžného digitálního multimetru nebo odporu cívky ampérmetru s elektromechanickým systémem. Tento měřený vstupní proud je převeden na napětí podle vztahu $U_m = R_m \cdot I_m$. Toto napětí na výstupu operačního zesilovače je dobře měřitelné obyčejným voltmetrem, nebo analogově-digitálním převodníkem a je tedy doplňkem měřicího systému, přesnějším ampérmetrem.



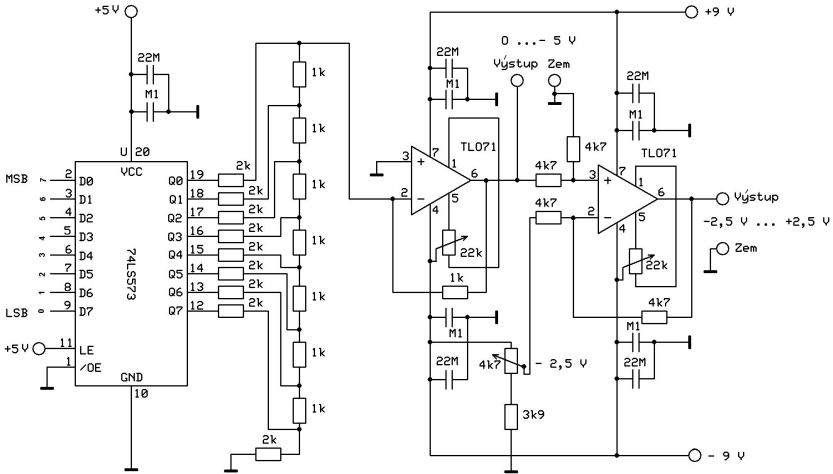
Obr. 4 Upravené schéma převodníku proud/napětí

Konstrukce číslicově řízeného zdroje malých napětí

Číslicově řízený zdroj malých napětí se skládá z účelově zkonstruovaného digitálně-analogového převodníku s nastavitelným aktivním napěťovým výstupem. Převodník je typu proudový násobící [25], tedy s proudovým výstupem a je ho potřebné vybavit převodníkem proud napětí, aby fungoval, jako převodník s aktivním napěťovým výstupem [26].

Uvedené zapojení s výhodou využívá jediný budič sběrnice 74HCT573 [27], Rychlá TTL HCT logika poskytuje při logické nule téměř nulové výstupní napětí (10 mV) a při logické jedničce téměř přesně 5 V, hodnoty se mírně liší v závislosti na sérii dodaných obvodů. To je možné při napájení stabilizovaným zdrojem +5 V. Výstup budiče je možno považovat za dostatečně přesné referenční napětí, včetně nulového napětí. Po připojení a spínání odporové sítě R-2R k poměrně rychlému a přesnému proudovému násobícímu převodníku D/A. Síť je sestavená z devíti rezistorů 2k a ze

sedmi + 1 rezistorů (1 zpětnovazební) 1k (nebo z 18 sériových spojení 1k + 1k). Všechny rezistory jsou nejlépe v provedení SMD.



Obr. 5 Detailní obvodové schéma analogové části zdroje malého napětí

Převodník je typu proudový násobící, tedy s proudovým výstupem a je ho potřebné vybavit převodníkem proud napětí, aby fungoval, jako převodník proudu s aktivním napěťovým výstupem. Použitý operační zesilovač TL071 [21], slouží k převodu proud/napětí a vytváří z D/A převodníku převodník s aktivním napěťovým výstupem. Převodník nepoužívá masívní výstupního filtru jako při stále častějším používání impulsně šířkové modulace PWM. Druhý použitý operační zesilovač je zapojen jako diferenciální stupeň a umožňuje tak upravit výstup D/A převodníku jako bipolární, takže výstup bude v rozsahu $-2,5 \text{ V} \text{ } 0 \text{ V} \text{ } +2,5 \text{ V}$.

Další možná úprava je zvýšení výstupního proudu přidáním komplementárního tranzistorového stupně. Je možné přidáním dalšího budiče 74HCT573 a rozšířením rezistorové sítě o další čtyři bity (čtveřici 2R-R) lze zkonstruovat více bitový až 12 bitový převodník se stejným výstupním napětím avšak s větším rozlišením 2,44 mV na bit. Avšak pouze teoreticky, protože je dosaženo meze přesnosti referenčního napětí, respektive jeho spínačů, které poskytuje budič 74HCT573 a taktéž není optimalizováno zapojení sítě rezistorů pro kompenzaci integrální nelinearity převodníku.

Dosažené parametry

Převodník proud/napětí je navržen, aby na rozsahu 1 A a se zpětno-vazebním rezistorem 10Ω (co nejpřesněji vybrat), dával napětí $\pm 10 \text{ V}$, viz převodní vztah. Rozsah proudu je možné zmenšovat na 0,1 A, 0,01 A postupným zapojováním do zpětné vazby 10Ω , 100Ω , $1\,000 \Omega$ i více. Parametry převodníku proud/napětí jsou dány převážně analogovými součástkami, operačním zesilovačem. Převodník dosahuje od nejmenšího rozsahu 0,01 A, 0,1 A, 1 A výstupního napětí $\pm 10 \text{ V}$ s nelinearitou $\pm 1 \text{ mV}$ a průměrnou dobu ustálení 0,3 ms na nejvyšším rozsahu, nejnižší vstupní proudové hodnotě. Při použití běžně dostupných operačních zesilovačů TL 071, dosahuje jejich linearita $\pm 0,003 \%$, jejich teplotní drift je kolem $\pm 18 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$, rychlost přeběhu $13 \text{ V}/\mu\text{s}$. Je tak možné získat ve spojení s digitálním multimetrem kvalitní ampérmetr pro měření malých proudů. Pozor, můžeme ho používat pouze v obvodech na malé napětí (maximálně $\pm 15 \text{ V}$), napájené zdroji malých napětí, oddělenými od energetické sítě.

Parametry zdroje napětí jsou dány kvalitou budiče převodníku a operačních zesilovačů. Budič 74HCT573 je předimenzován z hlediska rychlosti. Zápis dat je proveden v čase 18 ns. Při osmibitovém rozlišení je výstupní unipolární napětí $0 \div -5 \text{ V}$ s chybou ± 1 nejméně významný bit, který odpovídá $\pm 20 \text{ mV}$ i v bipolárním zapojení $-2,5 \text{ V}$ až $+2,5 \text{ V}$, jmenovitý proud $\pm 0,002 \text{ A}$ bez výstupního proudového zesilovače, teoretická rychlost ustálení lepší než $1 \mu\text{s}$, která je omezena operačním zesilovačem. Rozlišení $0 \div 255$ hodnot na daném rozsahu. Převodník lze dále rozšiřovat až teoreticky na dvanáctibitový, přidáním dalšího budiče a rozšířením sítě R-2R. Výstup převodníku D/A je možné proudově posílit vybavením druhého (diferenčního zesilovače) stejnou dvojicí komplementárních tranzistorů, jako v případě výstupu převodníku proud/napětí až na výstupní proud $\pm 1 \text{ A}$.

Aplikační doporučení

Všechny uvedené obvody jsou určeny ke školským aplikacím, nebo zájmovým kroužkům různé úrovně i zaměření. Zapojení obvodů by měla umožňovat provádění vlastních žákovských experimentů i tvůrčích úprav i kombinací jiných příbuzných zapojení, změnu jejich funkce nebo praktické použití obvodu. Jsou použité standardní běžně dostupné součástky, které jsou i při jakémkoli nezdaru tvůrce-experimentátora snadno nahraditelné.

Závěr

Předložené vybrané jednoduché obvody poskytují společně s částečně redukovaným vysvětlením funkce, dostatek tvůrčího prostoru pro výše uve-

dené výukové postupy. Další využití jednoduchých obvodů tkví ve standardních i nestandardních aplikacích. Ve fyzice, informatice, elektronice i mechatronice.

Literatura

- [1] *Roučová, E.*: Multimedia in Education of Teachers. In: Schola 2001, Trnava, ed. STU Bratislava 2001, s. 104–107.
- [2] *Tesař, J.*: Virtuální měření ve fyzikálním praktiku. Otevřené a distanční vzdělávání na vysokých školách-současný stav a perspektivy. In: Academia film Olomouc 2000, s. 80–83.
- [3] <http://rpishop.cz/raspberry-pi-pocitace/8-raspberry-pi-0766897151323.html>, 23. 11. 2017.
- [4] <http://www.arduino-shop.cz/?gclid=CPHA76XM4MoCFQQUwodD-0CvA>, 23. 11. 2017.
- [5] *Wang, Y. et al.*: Exploration in practical-oriented teaching of mechatronics engineering education. http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-642-27552-4_17#page-1, 23. 11. 2017
- [6] *Průcha, J., Walterová, E., Mareš, J.*: Pedagogický slovník. Portál, Praha, 2001.
- [7] http://www.nuv.cz/uploads/RVP_ZV_2017_verze_cerven.pdf, 22. 11. 2017.
- [8] http://oklike.c-a-v.com/soubory/tranz_zap.htm, 22. 11. 2017.
- [9] *Vobecký, J., Záhlava, V.*: Elektronika – polovodičové součástky a základní zapojení. 3. vydání, GRADA, Praha, 2005.
- [10] <https://www.gme.cz/bipolarni-tranzistor-bc337-40-to92-ammo>, 23. 11. 2017.
- [11] <https://www.gme.cz/bipolarni-tranzistor-bc327-40-to92>, 30. 11. 2017.
- [12] https://en.wikipedia.org/wiki/Darlington_transistor, 30. 11. 2017.
- [13] https://en.wikipedia.org/wiki/Sziklai_pair, 30. 11. 2017.
- [14] <https://www.gme.cz/darlingtonuv-tranzistor-bc517-to92>, 23. 11. 2017.
- [15] Akustický hlídač plynového plamenu, Amatérské radio A, č. 10 (1974), s. 385.
- [16] <https://www.gme.cz/jazyckova-rele-cosmo-reledia-051-000>, 30. 11. 2017.
- [17] Elektroskop s tranzistorem. Amatérské radio B, č. 4 (1986), s. 146.
- [18] <https://www.gme.cz/darlingtonuv-tranzistor-bc516-to92>, 23. 11. 2017.

- [19] <http://www.elektrokoutek.cz/index.php?p=merici-pristroje-a-cidla&page=2>, 30. 10. 2017.
- [20] Detekce a měření radiace, Praktická elektronika, roč. 21 (2016), č. 1.
- [21] <https://www.gme.cz/tl071-dip8-texas-instruments>, 30. 11. 2017.
- [22] *Punčochář, J.:* Operační zesilovače v elektronice. 5. vydání, BEN-technická literatura, Praha, 2017.
- [23] <https://www.gme.cz/bipolarni-tranzistor-bd139-16-to126>, 23. 11. 2017.
- [24] <https://www.gme.cz/bipolarni-tranzistor-bd138-16-to126>, 23. 11. 2017.
- [25] D/A převodník se sítí R-2R. https://www.fd.cvut.cz/personal/janes/zdt/prednasky/3_prevodniky.pdf, 15. 11. 2017.
- [26] *Adámek, P.:* Obvody a části měřicích přístrojů. PF JU, České Budějovice, 2010.
- [27] <https://www.gme.cz/74hct573-dip20-texas-instruments>, 23. 11. 2017.

Demonstrační mikrovlnný radiometr pro školní použití

LEONTÝNA BRÍZOVÁ – MICHAELA KRÍŽOVÁ – JAN ŠLÉGR

Přírodovědecká fakulta UHK, Hradec Králové

Úvod

Objekt o teplotě T a emisivitě e vyzáří do prostoru výkon úměrný čtvrté mocnině teploty T . Část tohoto výkonu je zachycena anténou, která z celého prostoru vytíná prostorový úhel Φ .

Šířka hlavního svazku parabolické antény (kde je anténou přijato maximum energie; na okrajích hlavního svazku je přijatý výkon poloviční než na spojnicí přijímací anténa – zdroj) je určena vztahem

$$\alpha = \frac{70^\circ D}{\lambda} \quad (1)$$