

Výpočet předřadníku a bočnicku k měřidlu

Alexandra Svobodová

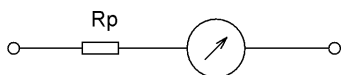
V PE 8/2017 jsme si pověděli o tom, jak změřit parametry neznámého měřidla nebo měřícího přístroje. Dnes si ukážeme, jak k takovému měřidlu spočítat vhodné předřadníky nebo bočníky tak, aby nám měřidlo mohlo sloužit pro účel, ke kterému jej potřebujeme. Opatřit totiž měřidlo s přesně takovými parametry, které pro svoji konstrukci potřebujeme, se totiž povede jen vzácně.

Výpočty lze použít jak pro měřidla analogová, ručičková, tak pro měřidla digitální. Zrovna tak se dá spočítat dodatečný předřadník pro multimetr, když je potřeba měřit napětí či proud, které jsou mimo jeho nejvyšší rozsahy.

Jaký je rozdíl mezi předřadníkem a bočníkem? Předřadník je rezistor, kterým se zvětšuje napěťový rozsah voltmetru. Předřadník proto, že je v obvodu zapojený před měřidlem (byť fyzicky může být zapojený i za ním). Naproti tomu bočník slouží ke zvětšení proudového rozsahu. Bočník proto, že je zapojený bokem k měřícímu přístroji a odvádí bokem část proudu mimo měřidlo.

Voltmetr s jedním rozsahem

Nejjednodušší je předřadník pro voltmetr s jedním rozsahem. Schéma zapojení takového obvodu je na obr. 1.



Obr. 1. Voltmetr s jedním rozsahem

Celek vlastně tvoří jednoduchý dělič napětí, jednu část tvoří předřadník, druhou část tvoří vnitřní odpor měřidla, a podle toho se také počítá. Možností, jak vypočítat předřadník, je více a nedá se říci, že jeden způsob je lepší než druhý.

$$R_p = \frac{U - U_m}{I_m} \quad (1)$$

$$R_p = \frac{U - (R_i \times I_m)}{I_m} \quad (2)$$

$$R_p = \frac{U}{I_m} - R_m \quad (3)$$

kde R_p je odpor předřadníku, U měřené napětí, U_m základní rozsah měřidla, I_m proud měřidlem při plné výchylce a R_i vnitřní odpor měřidla.

Všechny vzorce jsou rovnocenné a vlastně se jedná jen o jiný zápis téhož. Úbytek napětí na měřidle je daný jeho vnitřním odporem a proudem přes něj protékajícím. Je jedno, pomocí kterého vzor-

ce se bude předřadník počítat, výsledky jsou stejné.

Příklad 1:

Parametry použitého měřidla: $R_i = 2 \text{ k}\Omega$, $U_m = 0,2 \text{ V}$, $I_m = 100 \text{ }\mu\text{A}$. Požadovaný nový rozsah měřidla $U = 10 \text{ V}$.

Výpočet podle prvního vzorce:

$$R_p = (10 \text{ V} - 0,2 \text{ V}) / 100 \text{ }\mu\text{A}$$

$$R_p = (10 - 0,2) / 0,0001 = 9,8 / 0,0001 = 98\,000 \text{ }\Omega = 98 \text{ k}\Omega.$$

Výpočet podle druhého vzorce:

$$R_p = (10 \text{ V} - (2 \text{ k}\Omega \cdot 100 \text{ }\mu\text{A})) / 100 \text{ }\mu\text{A}$$

$$R_p = (10 - (2000 \cdot 0,0001)) / 0,0001 = (10 - 0,2) = 98\,000 \text{ }\Omega = 98 \text{ k}\Omega.$$

Výpočet podle třetího vzorce:

$$R_p = (10 \text{ V} / 100 \text{ }\mu\text{A}) - 2 \text{ k}\Omega$$

$$R_p = (10 / 0,0001) - 2000 = 98\,000 \text{ }\Omega = 98 \text{ k}\Omega.$$

Na předřadníku se ztrácí jistý výkon a ten je také potřeba ověřit. U malých napětí a citlivých měřidel je to spíše formalita, ale u napětí větších nebo měřidel s větší spotřebou je potřeba s výkonem již počítat, protože to někdy může být výkon docela značný.

$$P_p = I_p \times U_p = I_p \times (U - U_m) \quad (4)$$

kde P_p je ztracený výkon na předřadníku, U_p napětí na předřadníku, U je měřené napětí, U_m základní rozsah měřidla a I proud předřadníkem (i přístrojem). V našem případě tedy:

$$P_p = 100 \text{ }\mu\text{A} \cdot (10 \text{ V} - 0,2 \text{ V})$$

$$P_p = 0,0001 \cdot (10 - 0,2) = 0,0001 \cdot 9,8 = 0,00098 \text{ W}$$

Jak je vidět, výkon ztracený na předřadníku je nepatrný. Pokud však použijeme jiné měřidlo, nebo budeme měřit větší napětí, jsou čísla již o dost jiná.

Pokud stejné měřidlo použijeme pro měření vysokého napětí 1000 V a 10 000 V:

$$P_p = 0,0001 \cdot (1000 - 0,2) = 0,09998 \text{ W}$$

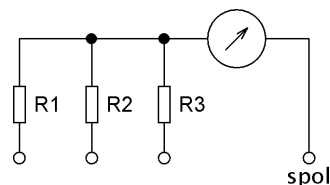
$$P_p = 0,0001 \cdot (10\,000 - 0,2) = 0,99998 \text{ W}$$

Kdybychom například pro rozsah 1000 a 10 000 V použili mohutné rozváděčové měřidlo se spotřebou 10 mA pro plnou výchylku, byla by výkonová ztráta na předřadníku dokonce 9,998 W, resp. 99,998 W.

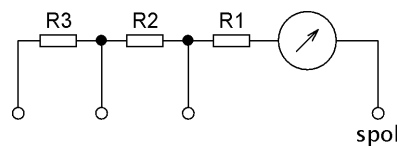
Výkonovou zatížitelnost předřadníku je potřeba volit o dost větší, než odpovídá vypočítanému výkonu. To proto, aby ztracený výkon předřadník ohřival co nejméně a neměnil se odpor předřadníku s teplotou. Většinou se doporučuje zatěžovat předřadník výkonem do 10 % jeho maximálního příkonu.

Voltmetr s několika rozsahy

Někdy je potřeba voltmetr s několika rozsahy a ty přepínat. Možnosti jsou vlastně dvě. Buď se použije pro každý rozsah samostatný předřadník a ty se spočítají podle výše uvedeného postupu, nebo se použije předřadník složený. Každý z nich má svoje pro a proti, jako vždy. Příklad vidíte na obrázcích.



Obr. 2. Voltmetr s několika rozsahy a jednotlivými předřadníky



Obr. 3. Voltmetr s několika rozsahy a sdruženým předřadníkem

Jednotlivé předřadníky

Výpočet je identický jako u voltmetru s jedním rozsahem.

Příklad 2:

Použijeme stejné měřidlo jako v příkladu s jedním rozsahem. Nové rozsahy zvolíme $U_1 = 10 \text{ V}$, $U_2 = 100 \text{ V}$ a $U_3 = 500 \text{ V}$.

$$R_{p1} = 98 \text{ k}\Omega, \text{ viz příklad 1.}$$

$$R_{p2} = (100 - 0,2) / 0,0001 = 998\,000 = 998 \text{ k}\Omega.$$

$$R_{p3} = (500 - 0,2) / 0,0001 = 4\,998\,000 = 4,998 \text{ M}\Omega.$$

Složený neboli sdružený předřadník

Výpočet je opět obdobou výpočtů předchozích, jako základní rozsah se však použije vždy rozsah předchozí.

Příklad 3:

Měřidlo i rozsahy jsou stejné jako v minulém příkladu.

$$R_{p1} = (10 - 0,2) / 0,0001 = 9,8 / 0,0001 = 98\,000 \text{ }\Omega = 98 \text{ k}\Omega.$$

$$R_{p2} = (100 - 10) / 0,0001 = 90 / 0,0001 = 900\,000 \text{ }\Omega = 900 \text{ k}\Omega.$$

$$R_{p3} = (500 - 100)/0,0001 = 400/0,0001 = 4\,000\,000\ \Omega = 4\ \text{M}\Omega.$$

Jako kontrolu správnosti můžeme spočítat celkový odpor předřadníku pro nejvyšší rozsah. Počítáme stejně jako pro jednoduchý předřadník.

$$R_p = (U - U_m)/I_m = (500 - 0,2)/0,0001 = 4\,998\,000\ \Omega.$$

Celkový odpor všech tří předřadníků je:

$$R_{pc} = 98\,000 + 900\,000 + 4\,000\,000 = 4\,998\,000\ \Omega.$$

Výhodou samostatných předřadníků je naprostá nezávislost součástí mezi sebou, výhodou předřadníku sdruženého je menší napěťové namáhání jednotlivých rezistorů při měření větších napětí. U sdruženého předřadníku také často vycházejí odpory předřadníků jako okrouhlá čísla, což může zjednodušovat jejich koupi a výrobu. Jinak jsou zapojení rovnocenná.

Příklad 4:

Než se pustíme do počítání bočnicků pro ampérmetry, ukážeme si ještě jeden příklad. A tím bude přídavný předřadník k digitálnímu multimetru.

Mějme multimetr se vstupním odporem 10 M Ω a nejvyšším rozsahem 200 V. Potřebujeme měřit napětí 300 V.

Nejprve je potřeba zjistit vstupní proud voltmetru. Ten spočítáme lehce z vnitřního odporu a měřicího rozsahu:

$$I_m = 200\ \text{V}/10\ \text{M}\Omega \\ I_m = 200/10\,000\,000 = 0,000\,02\ \text{A} = 20\ \mu\text{A}$$

Potřebujeme měřit napětí do 300 V, ale voltmetr má rozsahy v násobcích 2 (z důvodu použitého AD převodníku). Takže pro jednoduchost odečítání napětí na displeji přístroje zvolíme nový rozsah 2000 V.

Přídavný předřadník je pak:

$$R_p = (U - U_m)/I_m = \\ = (2000 - 200)/0,000\,02 = 90\,000\,000\ \Omega = 90\ \text{M}\Omega.$$

Při čtení velikosti napětí je potřeba údaj na displeji násobit deseti, protože jsme předřadníkem desetkrát zvětšili rozsah.

Najít v zásobách nebo koupit nový rezistor s odporem 90 M Ω nebude vždy snadné, a tak by někoho mohlo napadnout použít předřadník s menším odporem a spočítat jej pouze na rozsah 400 V. Odpor předřadníku pak bude:

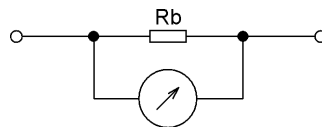
$$R_p = (U - U_m)/I_m = \\ = (400 - 200)/0,000\,02 = 10\,000\,000\ \Omega = 10\ \text{M}\Omega.$$

Takový rezistor se snadno koupí a toto řešení se zdá být ideální. Jenže údaj na displeji bude potřeba násobit dvěma, protože jsme rozsah pouze zdvojnásobili. Násobení dvěma je jednoduché a dá se použít, na rozdíl od situace, kdy by někoho napadlo zvětšit rozsah voltmetru například 7,5krát. Výhodou menšího zvětšení rozsahu je, že multimetr bude ukazovat větší číslo, a proto bude měření zatíženo menší chybou.

Ampérmetr s jedním rozsahem

Rozsah ampérmetru se zvětšuje bočníkem. Na rozdíl od předřadníku se bočník zapojuje paralelně k měřidlu a je obvykle výkonově výrazně více namáhaný než předřadník. Zatím co u předřadníků pro malá napětí s citlivým měřicím přístrojem není téměř třeba se výkonem zabývat, u bočnicku to je třeba téměř vždy.

Pokud potřebujeme ampérmetr s jedním rozsahem, použije se jednoduchý bočník podle obrázku 4.



Obr. 4. Jednoduchý bočník

Vzorců pro výpočet bočnicku je opět několik, uvedu tři, ale je jich ještě více.

$$R_b = \frac{R_i}{\frac{I}{I_m} - 1}, \quad (5)$$

$$R_b = \frac{U_m}{I - I_m}, \quad (6)$$

$$R_b = R_i \frac{I_m}{I - I_m}, \quad (7)$$

kde R_b je odpor bočnicku, R_i vnitřní odpor měřidla, I měřený proud, I_m citlivost měřidla (jeho základní rozsah) a U_m úbytek napětí na měřidle.

Příklad 5:

Použijeme stejné měřidlo jako v předchozích příkladech: $R_i = 2\ \text{k}\Omega$, $I_m = 100\ \mu\text{A}$ a $U_m = 0,2\ \text{V}$. Nový rozsah bude 1 A. Výpočet podle vzorců 5, 6 a 7 bude:

$$R_b = 2\ \text{k}\Omega / ((1\ \text{A}/100\ \mu\text{A}) - 1) = \\ = 2000 / ((1/0,0001) - 1) = \\ = 2000/9999 = 0,200\,02\ \Omega$$

$$R_b = 0,2\ \text{V} / (1\ \text{A} - 100\ \mu\text{A}) = \\ = 0,2 / (1 - 0,0001) = \\ = 0,2/0,9999 = 0,200\,02\ \Omega$$

$$R_b = 2\ \text{k}\Omega \cdot (0,0001 / (1 - 100\ \mu\text{A})) = \\ = 2000 \cdot (0,0001 / 0,9999) = \\ = 0,200\,02\ \Omega.$$

Již dříve jsem psala, že je správné ověřovat výkonovou ztrátu na předřadníku a ještě důležitější je to u bočnicku. Proto tento výkon ověříme (proud bočníkem zaokrouhlen na 1 A):

$$P_b = U_b \cdot I = 0,2 \cdot 1 = 0,2\ \text{W}.$$

Zkušenost praví, že i tento zdánlivě malý výkon stačí k citelnému ohřevu malého rezistoru a je potřeba jako bočník použít rezistor s výkonovou zatížitelností alespoň 2 W, raději ale ještě více. Poučka o 10 % platí i zde. U ampérmetru se snažíme použít měřidlo s nejmenším potřebným napětím pro plný rozsah. Je to z důvodu, aby potřebné napětí bočnicku bylo co nejmenší a tím byl i co nejmenší ztrátový výkon jím vyzařovaný.

Příklad 6:

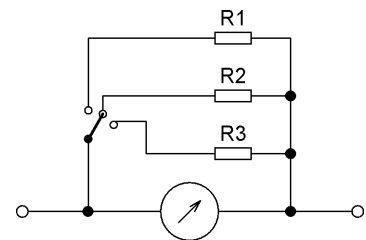
Stále stejné měřidlo použijeme jako ampérmetr s rozsahem 100 A.

$$P_b = U_b \cdot I = 0,2 \cdot 100 = 20\ \text{W}$$

Zde uvedeného měřidla je vhodné jako voltmetr; jako ampérmetr pro malé proudy také vyhoví, ale jako ampérmetr pro větší proudy již moc ne, právě z důvodu relativně velkého potřebného napětí na bočnicku.

Ampérmetr s několika rozsahy

Stejně jako u voltmetru lze i ampérmetr s několika rozsahy vyrobit více způsoby. Opět lze použít jednotlivé bočnicku nebo bočník sdružený.

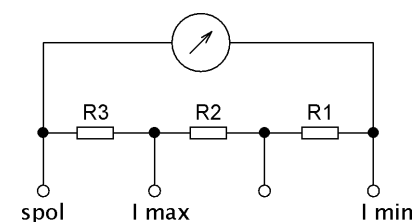


Obr. 5. Ampérmetr s několika přepínatelnými bočnicku

Postup výpočtu bočnicku je identický jako u bočnicku jednoho. Výhodou tohoto zapojení je opět nezávislost bočnicku na sobě. Toto jednoduché zapojení však má jednu obrovskou nevýhodu a tou je nebezpečí velkého přetížení měřidla v okamžiku přepínání rozsahu. Jak k tomu dojde? Při přepínání rozsahu většina přepínačů na malý okamžik přeruší procházející proud. V ten okamžik je v obvodu zapojeno pouze měřidlo a prochází jím celý měřený proud, někdy velmi značný. Tento proudový náraz může způsobit poškození či zničení měřicího přístroje (u ručkového přístroje spálení jeho cívky nebo mechanické poškození ručičky, u přístroje digitálního poškození jeho vstupních obvodů). Proto je u tohoto zapojení potřeba vybrat přepínač, který bezpečně přepíná bez přerušování obvodu, nebo rozsahy přepínat bez procházejícího proudu. Případně je možné měřidlo chránit nějakou elektronickou cestou, jako jsou například diodové omezovače nebo i kondenzátor a podobně. Tato nevýhoda se nejvíce projeví při měření větších proudů.

Složený, sdružený, kruhový neboli Ayrtonův bočník

Výpočet tohoto typu bočnicku je poněkud náročnější, ale není to zase tak tra-



Obr. 6. Sdružený (Ayrtonův) bočník

gické, jak se může na první pohled zdát. Velikou nevýhodou tohoto řešení je to, že se součástky navzájem ovlivňují a je potřeba je pečlivě spočítat a stejně pečlivě je potom vybrat a nastavit. Velikou výhodou naopak je to, že při přepínání rozsahů není nikdy měřidlo ohroženo, a tak lze použít jednoduchý přepínač. Přepínač totiž nepřipojuje bočníky k měřidlu, ale měřený obvod k bočníkům, takže přerušení kontaktu přepínače nevede k přetížení měřidla, ale naopak k přerušení proudu celým obvodem, což je vlastnost tohoto zapojení a je potřeba s ní počítat, pokud by přerušení mohlo vadit.

Příklad 7:

Použijeme stejné měřidlo jako v minulých příkladech. Nové rozsahy budou $I_1 = 10 \text{ mA}$, $I_2 = 100 \text{ mA}$ a $I_3 = 500 \text{ mA}$.

Nejprve spočítáme celkový odpor bočníku. Ten se vypočítá stejně jako odpor bočníku jednoduchého pro nejmenší rozsah. Použijeme některý ze vzorců 5, 6 nebo 7:

$$R_b = 2000 \cdot (0,0001 / (0,01 - 0,0001)) = 2000 \cdot 0,0001 / 0,0099 = 20,202 \Omega$$

Velikost odporu jednotlivých bočníků určíme podle tohoto vzorce:

$$R_n = I_m (R_b + R_m) \frac{I_{n+1} - I_n}{I_n \times I_{n+1}} \quad (8)$$

kde R_n je odpor dílčího bočníku pro daný rozsah, I_m základní rozsah měřidla, R_b je celkový odpor bočníku podle výpočtu, R_m odpor měřidla, I_n právě počítaný rozsah a I_{n+1} sousední vyšší rozsah.

Odpor posledního rezistoru, v našem příkladu se jedná o R_3 , určíme podle tohoto vzorce:

$$R_k = (R_b + R_m) \frac{I_0}{I_k} \quad (9)$$

$$R_1 = \frac{0,0001 \cdot (20,20 + 2000)}{((0,1 - 0,01) / (0,01 \cdot 0,1))} = 0,20202 \cdot (0,09 / 0,001) = 0,20202 \cdot 90 = 18,1818 \Omega$$

$$R_2 = \frac{0,0001 \cdot (20,20 + 2000)}{((0,5 - 0,1) / (0,1 \cdot 0,5))} = 0,20202 \cdot (0,4 / 0,05) = 0,20202 \cdot 8 = 1,61616 \Omega$$

$$R_3 = 20,20 + 2000 \cdot (0,0001 / 0,5) = 2020,20 \cdot 0,0002 = 0,40404 \Omega$$

Kontrola výpočtu:

$$R_1 + R_2 + R_3 = 18,1818 + 1,6161 + 0,4040 = 20,202 = R_b$$

Jak je vidět, je při výpočtech potřeba počítat na více desetinných míst a pokusit se co nejméně zaokrouhlovat. Pochopitelně v rozumných mezích, pro měřidlo s třídou přesnosti 2,5 % nemá smysl počítat na deset desetinných míst. Ale je zbytečné zaokrouhlovat na místo jediné.

Možná někoho napadne otázka, proč jsou výpočty vlastně takto složité? Je to proto, že pro každý rozsah je vlastně jiný vnitřní odpor měřidla. Jeho skutečný vnitřní odpor se totiž sčítá se zbytkem, v daném rozsahu nepoužitým bočníkem. Pokud by měl někdo zájem o hlubší rozbor tohoto výpočtu, včetně odvození vzorců, doporučuji prostudovat knižičku Ing. Pacáka (viz doporučená literatura).

Malá odbočka pro digitální ampérmetry

Pokud budeme chtít použít jako ampérmetr digitální měřidlo, tak lze postupovat stejně jako pro měřidlo analogové. Nebo si lze výpočet zjednodušit tím, že se vstupní proud měřidla prostě zanedbá. Vstupní odpor digitálních měřidel je běžně $10 \text{ M}\Omega$, $100 \text{ M}\Omega$ nebo i větší a to je proti odporům bočníků „praktické nekonečno“. Pro výpočet tedy zvolíme vzorec (6):

$$R_b = \frac{U_m}{I - I_m}$$

a upravíme jej pro nulový vstupní proud měřidla:

$$R_b = \frac{U_m}{I}$$

Příklad 8:

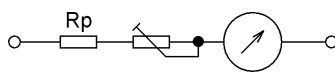
Digitální panelové měřidlo má vstupní odpor $100 \text{ M}\Omega$ a základní rozsah 200 mV . Chceme jej použít jako ampérmetr s rozsahem 2 A .

$$R_b = U_m / (I - I_m) = 200 \text{ mV} / (1 \text{ A} - 0,2 \mu\text{A}) = 0,2 / (1 - 0,00000002) = 0,2 / 0,99999998 = 0,200000004 \Omega$$

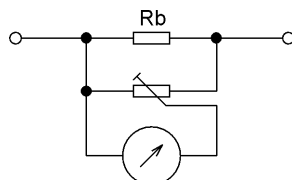
Zjednodušený postup:

$$R_b = 200 \text{ mV} / 1 \text{ A} = 0,2 / 1 = 0,2 \Omega$$

Jak je vidět, chyba způsobená zanedbáním vstupního proudu měřidla je



Obr. 7. Přesné nastavení odporu předřadníku



Obr. 8. Přesné nastavení odporu bočníku

opravdu velmi malá. Chyba způsobená tolerancí bočníku, změnou teploty i vlastní chybou měřidla bude výrazně větší než chyba způsobená zjednodušením výpočtu. Je však potřeba dávat pozor u jednoduchých nebo velmi laciných měřidel, která mohou mít vstupní odpor výrazně menší než uvažovaných $10 \text{ M}\Omega$ a pak je potřeba při výpočtu brát tento vstupní odpor v potaz.

Po spočítání předřadníků a bočníků pro nové přístroje je potřeba je také zhotovit. Koupit vhodné rezistory na předřadníky není celkem problém, byť ty přesnější nejsou zrovna nejlevnější. Koupit rezistory na bočníky pro větší proudy problém někdy je. Odpory bočníků jsou malé a takové rezistory se běžně nevyrobují a neprodávají. Přesný odpor lze také získat proměnným rezistorem v podobě kvalitního, ideálně víceotáčkového trimru nebo potenciometru. U voltmetru se zapojí jako část předřadníku do série s měřidlem. U ampérmetru se trimr zapojí paralelně k bočníku. Při cejchování se pak nastaví přesný odpor.

Z předchozího textu by se mohlo zdát, že bočníky i předřadníky mohou být pouze odporové, ale není tomu tak. Lze použít obecně jakoukoli impedanci, ale v praxi se používají jen ty rezistory a v oblasti velkých střídavých napětí ještě kondenzátory (pro elektrostatická měřidla). Použití předřadníku nebo bočníku indukčního jsem ještě neviděla, ale možná se také někdy někde používá. Výpočet kapacitních, případně indukčních předřadníků a bočníků je ale nad rámec tohoto článku. Nevýhodou jiného než odporového předřadníku či bočníku je jeho frekvenční závislost.

Napadá mě ještě drobná poznámka, a to, že není možné pomocí předřadníku zmenšit napěťový rozsah voltmetru nebo pomocí bočníku zmenšit proudový rozsah ampérmetru. Takto jednoduše se dají rozsahy pouze zvětšovat. Pro zmenšení rozsahu je potřeba sáhnout po vhodném zesilovači.

Závěrem zbývá jen popřát všem, kdož se rozhodnou si nějaký měřicí přístroj postavit nebo vybavit novými rozsahy, pevné nervy při počítání s velkými a zároveň malými čísly. Je lepší postup ověřit opakovaným výpočtem například podle jiného vzorce, proto jsou v článku také uvedené další možnosti, než chybou určit špatný odpor a následně se divit, proč měřidlo ukazuje jiné napětí, než by ukazovat mělo.

Použitá a doporučená literatura

- [1] Pacák, M.: Měřicí metody a přístroje pro radiotechniku. Vycházelo v letech 1946 až 1949 jako příloha časopisu Radioamatér v nakladatelství Orbis.
- [2] Malina, V.: Poznáváme elektroniku III. Kopp 2003.
- [3] <http://elektrika.cz/data/clanky/clanek.2006-02-05.1331239165>.
- [4] <http://sroll.net/ok1srd/technika/ayrton/index.html>.
- [5] Wikipedia a internet obecně.