

1.	Rozdělení měřicích přístrojů.....	6
1.1	Měřicí přístroje pasivní	6
1.2	Měřicí přístroje aktivní (elektronické).....	7
1.2.1	Analogové zobrazení.....	8
1.2.2	Digitální zobrazení.....	9
2.	Základní pojmy	10
2.1	Rozsah měřicího přístroje.....	10
2.2	Konstanta přístroje	10
2.3	Příklad	11
3.	Chyby měření	12
3.1	Zdroje chyb.....	12
3.2	Absolutní chyba měření.....	12
3.3	Relativní chyba měření.....	12
3.4	Třída přesnosti	13
4.	Metody měření	15
4.1	Metoda měření nepřímá	15
4.2	Metoda měření přímá	15
5.	Elektromechanické měřicí soustavy	16
5.1	Soustava magnetoelektrická	17
5.1.1	Princip	17
5.1.2	Využití.....	17
5.2	Soustava elektrodynamická.....	18
5.2.1	Princip	18
5.2.2	Využití.....	19
5.3	Soustava elektromagnetická	20
5.3.1	Princip	20
5.3.2	Využití.....	23
5.4	Soustava indukční	24
5.4.1	Princip	24
5.4.2	Využití.....	25
6.	Měření základních elektrických veličin	26
6.1	Měření napětí	26
6.1.1	Zapojení voltmetru.....	26
6.1.2	Zvětšení rozsahu voltmetru	27
6.1.3	Přepínání rozsahů voltmetru	29
6.2	Měření proudu	30
6.2.1	Zapojení ampérmetru	30

6.2.2	Zvětšení rozsahu ampérmetru.....	31
6.2.3	Přepínání rozsahů ampérmetru.....	32
6.3	Měřicí transformátory	33
6.3.1	Měřicí transformátor napětí	34
6.3.2	Měřicí transformátor proudu	36
6.4	Měření odporu	39
6.4.1	Nepřímé měření odporu	39
6.4.2	Přímé měření odporu	39
6.4.3	Můstkové měření odporu.....	40
6.4.4	Měření izolačního odporu	43
a)	Ochrany před úrazem – spotřebiče třídy 1 a 2	43
b)	Měřiče izolačního odporu	45
c)	Měření izolačního odporu spotřebičů třídy 1.....	46
d)	Měření izolačního odporu spotřebičů třídy 2.....	46
6.4.5	Měření zemního odporu	47
a)	Měřiče zemního odporu.....	47
b)	Měření zemního odporu třívodičovou metodou	48
6.5	Měření kapacity	49
6.5.1	Kapacitní reaktance.....	49
6.5.2	Nepřímé měření kapacity	50
6.5.3	Měření kapacity můstkovou metodou.....	51
6.6	Měření indukčnosti	52
6.6.1	Induktivní reaktance	52
6.6.2	Nepřímé měření indukčnosti.....	52
6.6.3	Měření indukčnosti můstkovou metodou	54
6.7	Měření výkonu.....	55
6.7.1	Nepřímé měření výkonu	55
6.7.2	Přímé měření výkonu	55
7.	Měření polovodičových součástek.....	57
7.1	Měření diod	57
7.1.1	Orientační kontrola diod	57
7.1.2	Měření voltampérových charakteristik diod	57
7.2	Měření tranzistorů	57
7.2.1	Orientační kontrola tranzistorů	57
7.2.2	Měření voltampérových charakteristik tranzistorů	57
8.	Digitální osciloskop.....	58
8.1	Výhody paměťového zobrazení.....	58
8.2	Princip	58
8.3	Blokové schéma.....	58
8.4	Způsoby obnovování obrazu	58
a)	Jednorázové obnovování křivky	59

b) Plynulé obnovování křivky	59
8.5 Rozlišovací schopnost.....	59
8.5.1 Vodorovné rozlišení.....	60
8.5.2 Svislé rozlišení	61
8.6 Komerční paměťový osciloskop Voltcraft DSO-2154	63
8.6.1 Základní údaje.....	63
8.6.2 Vlastnosti.....	64
a) Ovládání	64
b) Displej.....	65
8.6.3 Blokové schéma	66
9. Čítače	67
9.1 Princip měření kmitočtu a periody	67
9.2 Blokové schéma čítače	68
10. Zkreslení	70
10.1 Teorie signálů.....	70
10.2 Spektrální analýza.....	73
10.2.1 Spektrum	73
10.2.2 Spektrální analyzátor.....	75
10.3 Druhy zkreslení	76
10.3.1 Nelineární (harmonické) zkreslení	77
a) Limitace	78
b) Přechodové zkreslení	78
c) Intermodulační zkreslení	80
10.3.2 Lineární zkreslení	80
10.4 Měření nelineárního zkreslení	80
11. Oscilátory pro měřicí techniku	82
11.1 Napětím řízené oscilátory.....	82
11.1.1 Varikap	82
11.1.2 Příklad napětím řízeného oscilátoru	83
11.2 Napěťová a kmitočtová syntéza	83
11.2.1 Napěťová syntéza	84
11.2.2 Fázový závěs	85
11.2.3 Kmitočtová syntéza	87
11.3 Digitální generování signálů libovolného průběhu	89
11.3.1 Příklady	89
12. Logické analyzátory.....	90
12.1 Možnosti zobrazení logickými analyzátory	90
12.2 Provedení logických analyzátorů.....	91
12.3 Snímací sondy.....	94

12.4	Možnosti spouštění	95
12.5	Možnosti zobrazení okamžiku spuštění.....	96

1. Rozdělení měřicích přístrojů

Měřicí přístroje můžeme dělit takto:

Měřicí přístroje

- pasivní
- elektronické
 - analogové
 - digitální

1.1 Měřicí přístroje pasivní

Měřicí přístroje pasivní nemají vlastní napájení. energii, kterou potřebují pro svou práci, si musí brát z měřeného objektu. Tím je objekt zatěžován, což zhoršuje přesnost měření.

Např. pružinová váha využije pro pohyb ukazatele tíhu váženého předmětu:



Vážený předmět zavěsíme na dolní hák. Ten táhne za pružinu, která je uvnitř přístroje. Ukazatel ukáže na stupnici váhu předmětu.

Obrázek 1: Pružinová váha

Pasivní voltmetr využije pro pohyb ručky energii z měřeného napětí:

	Tento voltmetr používá soustavu elektromagnetickou. Železné jádro je spojené s ručkou. Měřené napětí se připojí na elektromagnet, ten přitáhne jádro, nastaví ručku. Nevýhoda: Proud tekoucí do elektromagnetu zatěžuje měřené napětí, to se sníží a ukázaná hodnota je menší než skutečná.
---	--

Obrázek 2: Klasický pasivní voltmetr

1.2 Měřicí přístroje aktivní (elektronické)

Měřicí přístroje elektronické obsahují zesilovač, který zlepšuje vlastnosti přístroje. Tento zesilovač potřebuje napájení, např. z baterie nebo ze sítě. Energie pro funkci přístroje se tedy odebírá z tohoto napájení, a ne z měřeného objektu.

Díky zesilovači může měřicí přístroj např. měřit menší napětí a méně zatěžuje měřený objekt.

Měřicí přístroje elektronické používají dva druhy zobrazení:

- analogové
- digitální

1.2.1 Analogové zobrazení

Analogový měřicí přístroj ukazuje hodnotu měřené veličiny pomocí pohyblivého ukazatele, např. ručky.



Tento multimetr je elektronický, má zesilovač, napájí se z baterie.

Proto má velkou citlivost (umožňuje měřit malé hodnoty) a nezatěžuje měřený obvod.

Ale používá **analogové** zobrazení.

Obrázek 3: Analogový multimetr

Výhody analogového zobrazení

- rychlá a přehledná informace
- snadné vyhodnocení překročení meze
- snadné posouzení vývoje veličiny
- (zda je stabilní, stoupá nebo klesá)

Nevýhody analogového zobrazení

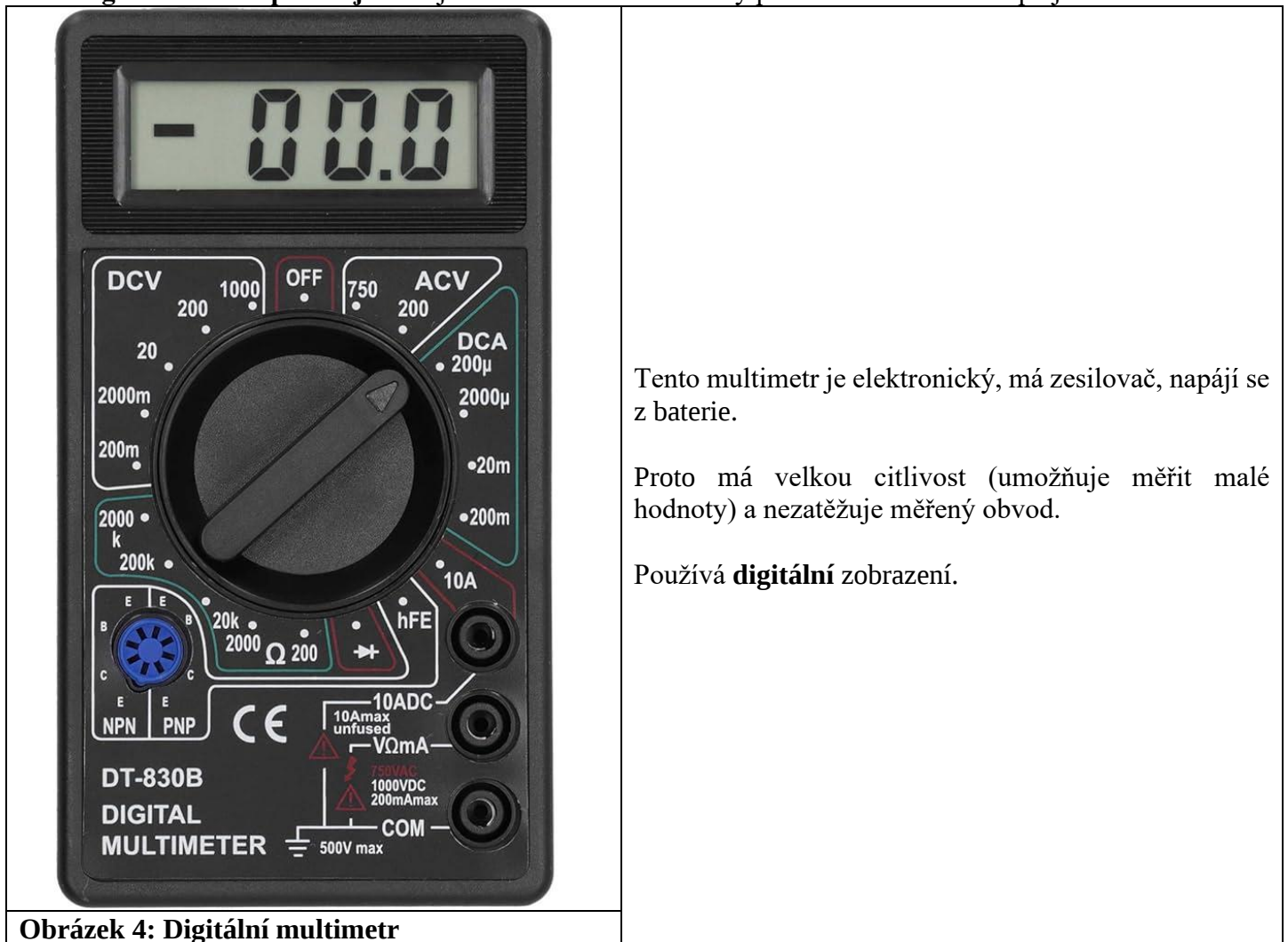
- chyby obsluhy
 - paralaxa – díváme se na ručku šikmo
 - špatné použití rozsahu, konstanty
- obvykle méně přesné

Využití

Vhodné pro rychlou kontrolu, měření v provozu, v terénu.

1.2.2 Digitální zobrazení

Digitální měřicí přístroj ukazuje hodnotu měřené veličiny pomocí číslicového displeje.



Obrázek 4: Digitální multimetr

Výhody digitálního zobrazení

- méně chyb obsluhy
- paralaxa je vyloučena
- rozsah, konstantu přístroj obslouží sám
- obvykle přesnější

Nevýhody analogového zobrazení

- informaci nutno v mysli zpracovat
- nesnadné vyhodnocení překročení meze
- nesnadné posouzení vývoje veličiny
- (zda je stabilní, stoupá nebo klesá)

Využití

Vhodné pro přesná měření, laickou obsluhu.

2. Základní pojmy

2.1 Rozsah měřicího přístroje

Rozsah měřicího přístroje je hodnota měřené veličiny, která je potřebná pro plnou výchylku ručky nebo pro maximální údaj na displeji.

2.2 Konstanta přístroje

Konstanta přístroje je číslo, kterým musíme násobit ukazovaný počet dílků, abychom dostali hodnotu měřené veličiny.

2.3 Příklad



Obrázek 5: Voltmetr má rozsahy 3 V, 15 V, 300 V. Jeho stupnice má 30 dílků.

Je zvolený rozsah 15 V (měřené napětí je připojené do zdírek označených „-“ a „15“). Ručka ukazuje 11 dílků (v obrázku označeno modrou šipkou).

Jaký je rozsah přístroje?

Na plnou výchylku teď přístroj potřebuje 15 V. Při tomto napětí ručka ukáže na poslední, třicátý, dílek, označený na stupnici číslem 3. Rozsah přístroje je 15 V.

Jaká je konstanta přístroje?

Na výchylku 30 dílků teď přístroj potřebuje 15 V. Jednomu dílku tedy odpovídá 0,5 V. Počet dílků, který přístroj ukazuje, musíme tedy násobit číslem 0,5 (neboli dělit dvěma), abychom dostali měřené napětí.

Konstanta přístroje je 0,5.

Jaké je měřené napětí?

Měřené napětí je

počet ukázaných dílků krát konstanta

tj.

$$11 \times 0,5 = 5,5 \text{ V}$$

3. Chyby měření

Při každém měření musíme počítat s chybou, žádné měření není úplně přesné. Abychom mohli mezi sebou porovnávat měřicí přístroje a posuzovat jejich přesnost, a také abychom byli schopni určit, s jakou chybou bylo které měření prováděno, definujeme několik druhů chyb měření.

3.1 Zdroje chyb

- **Chyba metody** – vzniká např. vlivem spotřeby měřicího přístroje. Obvykle je možné tuto chybu určit a výpočtem ji korigovat.
- **Chyba přístroje** – je nahodilá, nelze ji předem určit a korigovat ji výpočtem. Může být způsobena např. tím, že ručka měřicího přístroje se při měření stejné hodnoty zastaví pokaždé v jiném místě stupnice.
- **Chyba obsluhy** – nesprávná volba metody, špatné přečtení hodnoty, chybné vyhodnocení řádu (např. 51 V místo 5,1 V). Chyby obsluhy jsou obvykle nejzávažnější.

3.2 Absolutní chyba měření

Absolutní chyba měření je rozdíl mezi hodnotou, kterou jsme změřili, a správnou hodnotou.

$$\Delta a = X_m - X_s$$

Příklad

Když při měření napětí naměříme 11 V a správná hodnota je 10 V, absolutní chyba našeho měření je

$$\Delta a = 11 \text{ V} - 10 \text{ V} = 1 \text{ V}$$

3.3 Relativní chyba měření

Relativní chyba měření je poměr mezi absolutní chybou a správnou hodnotou. Obvykle se vyjadřuje v procentech.

$$\Delta_r = \frac{\Delta_a}{X_s} \cdot 100 [\%]$$

Příklad

Je-li absolutní chyba 1 V a správná hodnota 10 V, relativní chyba měření je

$$\Delta_r = \frac{1 \text{ V}}{10 \text{ V}} \cdot 100 = 10\%$$

Relativní chyba měření vypovídá o přesnosti měření mnohem více než chyba absolutní. Budeme-li měřit s absolutní chybou 2 V jednou napětí 230 V a podruhé napětí 4 V, tak v případě 230 V bude relativní chyba necelé jedno procento (2 V nejsou ani setina z 230 V) a měření můžeme označit za přesné. V případě měření 4 V bude relativní chyba 50% (2 V jsou polovina z měřených 4 V) a měření bude velmi nepřesné.

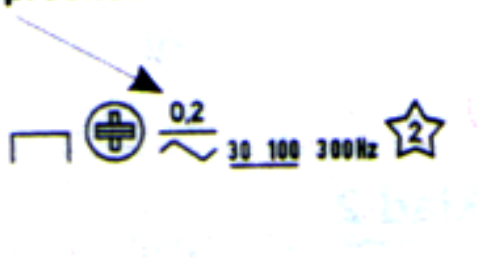
3.4 Třída přesnosti

Třída přesnosti vyjadřuje maximální chybu měřené hodnoty, k jaké může dojít v kterémkoliv místě stupnice. Tato chyba je vyjádřena v procentech použitého rozsahu. Když třída přesnosti je T_p , rozsah je R , tak maximální chyba Δ_{max} je

$$\Delta_{max} = \frac{T_p \cdot R}{100}$$

Třída přesnosti je vyjádřena číslem v pravém dolním rohu stupnice (**Obrázek 6**). Toto číslo může mít jednu z hodnot 0,05 - 0,1 - 0,2 - 1 - 1,5 - 2,5 - 5.

Třída přesnosti



Obrázek 6: Označení třídy přesnosti na stupnici měřicího přístroje

Třída přesnosti pro digitální měřicí přístroje je definována podobně, a to jako maximální chyba měřené hodnoty vyjádřená v procentech použitého rozsahu a ještě s další výhradou, respektující rozlišovací schopnost displeje, viz následující příklad.

Příklad

Digitální voltmetr s rozsahem 999 V má přesnost udanou takto:

Třída přesnosti $T_p = 0.5 (\pm 0.5\% \text{ rozsahu } \pm 1 \text{ číslice})$

Naměřená hodnota je 235 V. Maximální chyba měření může být

$$\Delta_{max} = \frac{T_p \cdot R}{100} + 1 = \frac{0,5 \cdot 999}{100} + 1 = 5 + 1 \Rightarrow \pm 6 V$$

Příklad

Je-li třída přesnosti analogového přístroje $T_p = 5$ a použitý rozsah $R = 10 V$, pak maximální chyba kdekoliv na stupnici může být 5% z 10 V, to je

$$\Delta_{max} = \frac{T_p \cdot R}{100} = \frac{5 \cdot 10}{100} \Rightarrow \pm 0,5 V$$

Nepříjemné zde je ustanovení „kdekoliv na stupnici“. Budeme-li na rozsahu 10 V měřit napětí 10 V (na horním okraji stupnice), tak absolutní chyba 0,5 V způsobí relativní chybu 5%. Budeme-li měřit napětí 5 V (uprostřed stupnice), tak stejná absolutní chyba 0,5 V způsobí relativní chybu 10%. A budeme-li měřit napětí jen 1 V (na dolním okraji stupnice), absolutní chyba 0,5 V způsobí relativní chybu 50%.

Z toho vyplývá, že máme měřicí rozsah zvolit tak, aby při měření byla ručka analogového přístroje v horní části stupnice. Podobně máme dbát na správnou volbu rozsahu i u digitálního přístroje (pokud nemá automatickou volbu rozsahu).

Příklad

Máme digitální voltmetr s trojmístným displejem, který může zobrazit maximální hodnotu 999. Třída přesnosti $T_p = 0.5$ ($\pm 0.5\%$ rozsahu ± 1 číslice).

Budeme měřit napětí 5 V.

Pro rozsah 999 V jsme pro tento přístroj a tento rozsah výše spočítali maximální chybu ± 6 V. Jestliže přístroj ukáže hodnotu 005 V, tak přísně vzato je tento údaj nepoužitelný, neboť je zatížen možnou chybou až ± 6 V.

Zvolíme-li rozsah 9,99 V, maximální chyba měření může být

$$\Delta_{max} = \frac{T_p \cdot R}{100} + 1 = \frac{0,5 \cdot 9,99}{100} + 1 = 0,05 + 0,01 \Rightarrow \pm 0,066 \text{ V}$$

což je přesnost pro běžné měření vyhovující.

4. Metody měření

Metody měření můžeme rozdělit podle různých kritérií, např.

- Podle způsobu získání hodnoty veličiny
 - metoda absolutní
 - metoda porovnávací
- Podle způsobu určení měřené veličiny
 - metoda přímá
 - metoda nepřímá
- Podle funkce a uspořádání měřicího přístroje
 - metoda výchylková
 - metoda nulová

4.1 Metoda měření nepřímá

Při měření nepřímou metodou nejdříve změříme dvě nebo více pomocných veličin, ze kterých potom výpočtem získáme výslednou veličinu. Např. změříme proud do žárovky **I**, napětí na žárovce **U**, výpočtem získáme odpor

$$R = \frac{U}{I}$$

nebo výkon

$$P = U \cdot I$$

4.2 Metoda měření přímá

Měříme-li přímou metodou, přístroj rovnou ukáže hodnotu měřené veličiny, není nutno nic vypočítávat. Např. wattmetr přímo ukáže hodnotu výkonu **P**, ohmmetr přímo ukáže hodnotu odporu **R**.

5. Elektromechanické měřicí soustavy

V názvu těchto soustav – elektromechanické – je obsažen jejich společný princip: Působením **elektrického** proudu něčím **mechanicky** pohnout.

Když k sobě přiblížíme dva magnety, přitahují se nebo odpuzují, podle polarit. A mohou tak jeden druhým pohnout.

Když k sobě přiblížíme magnet a elektromagnet, přitahují se nebo odpuzují. A mohou tak jeden druhým pohnout.

Když k sobě přiblížíme dva elektromagnety, přitahují se nebo odpuzují. A mohou tak jeden druhým pohnout.

Když k sobě přiblížíme elektromagnet a kousek železa, přitahují se. A mohou tak jeden druhým pohnout.

Právě jsme popsali společný princip elektromotorů, měřicích přístrojů, a mnohých dalších zařízení.

A co že je ten elektromagnet? Cívka drátu, do které pustíme elektrický proud. Když drátem protéká elektrický proud, vytvoří kolem drátu magnetické pole. Když ten drát stočíme do cívky s mnoha závitů, magnetické pole je mnohem silnější. A když do té cívky ještě vložíme kousek železa, magnetické pole je ještě silnější.

Všechny popsané soustavy obsahují cívku, do které pouštíme měřený elektrický proud. Ta cívka tedy tvoří elektromagnet, který zkombinujeme s magnetem (soustava magnetoelektrická), s jinou cívku (soustava elektrodynamická), s kouskem železa (soustava elektromagnetická).

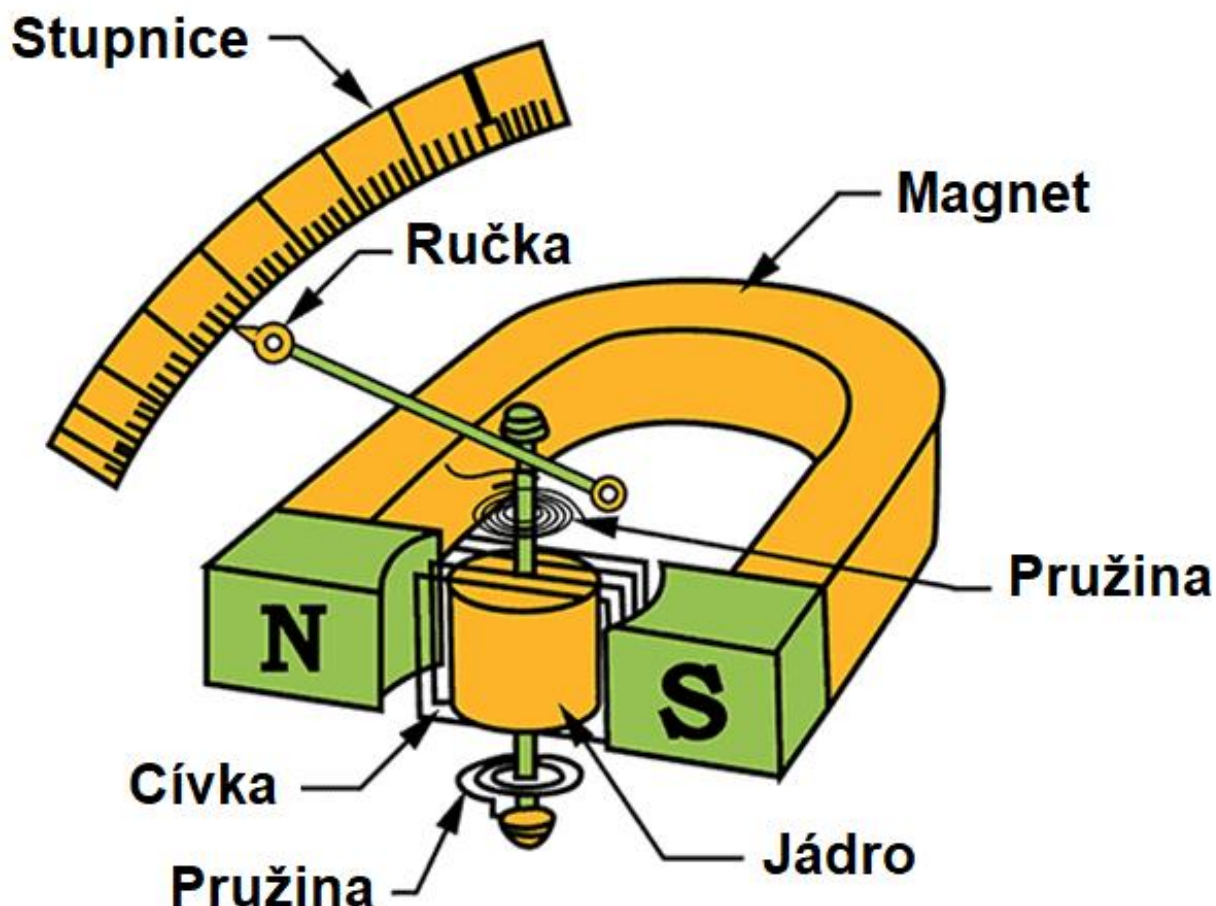
Magnetické pole cívky se přitahuje s tím magnetem, s druhou cívku, se železem. Nastane pohyb, pohne se ručka, ukáže hodnotu.

5.1 Soustava magnetoelektrická

5.1.1 Princip

Magnetoelektrická soustava se skládá z magnetu a pohyblivé cívky.

Cívka se pohybuje v magnetickém poli magnetu. S cívkou je spojena ručka, která ukazuje velikost měřené veličiny. Čím větší proud pustíme do cívky, tím více se cívka pohne, tím větší hodnotu ručka ukáže.



Obrázek 7: Princip magnetoelektrické soustavy

Magnet má tvar podkovy. Mezi póly magnetu je vloženo železné jádro, které zesiluje účinek magnetu na cívku. Cívka se otáčí kolem tohoto jádra.

Když do cívky neteče proud, dvě spirálové pružiny ji vracejí do nulové polohy. Tyto pružiny také přivádějí do cívky proud.

Sestava cívky a ručky je otočně uložena pomocí dvou ložisek.

5.1.2 Využití

Soustava magnetoelektrická má velkou citlivost, tj. hodí se pro měření velmi malých proudů a napětí.

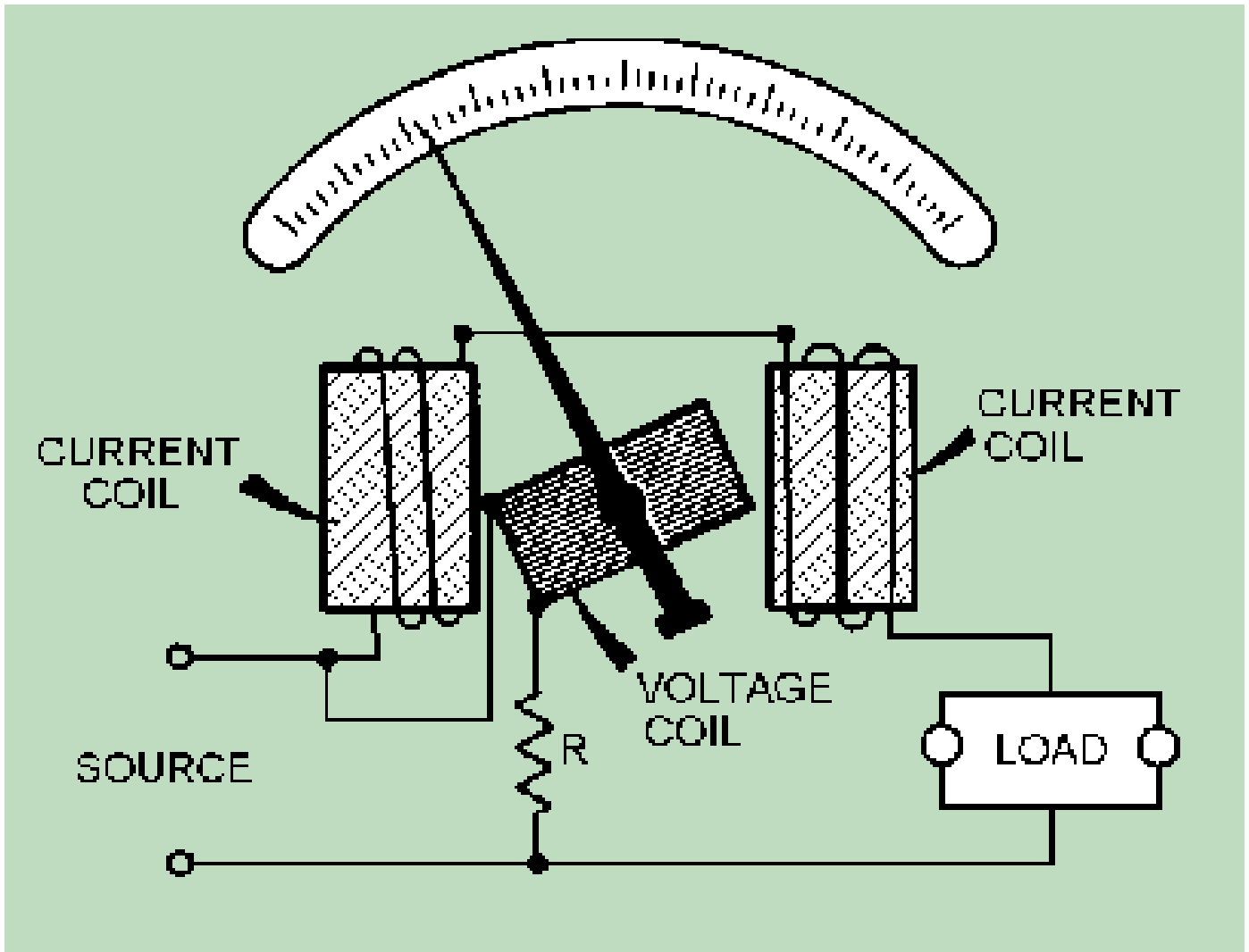
Soustava je použitelná jen k měření stejnosměrného proudu. Střídavý proud by cívku ve stejnosměrném poli magnetu rozkmital sem-tam, ale cívka by se nepohnula z místa.

Proto pro měření střídavých proudů a napětí je nutné doplnit soustavu usměrňovačem. To přináší problémy při měření malých napětí, protože kvůli úbytku napětí na diodách se malá napětí přes diody nedostanou.

5.2 Soustava elektrodynamická

5.2.1 Princip

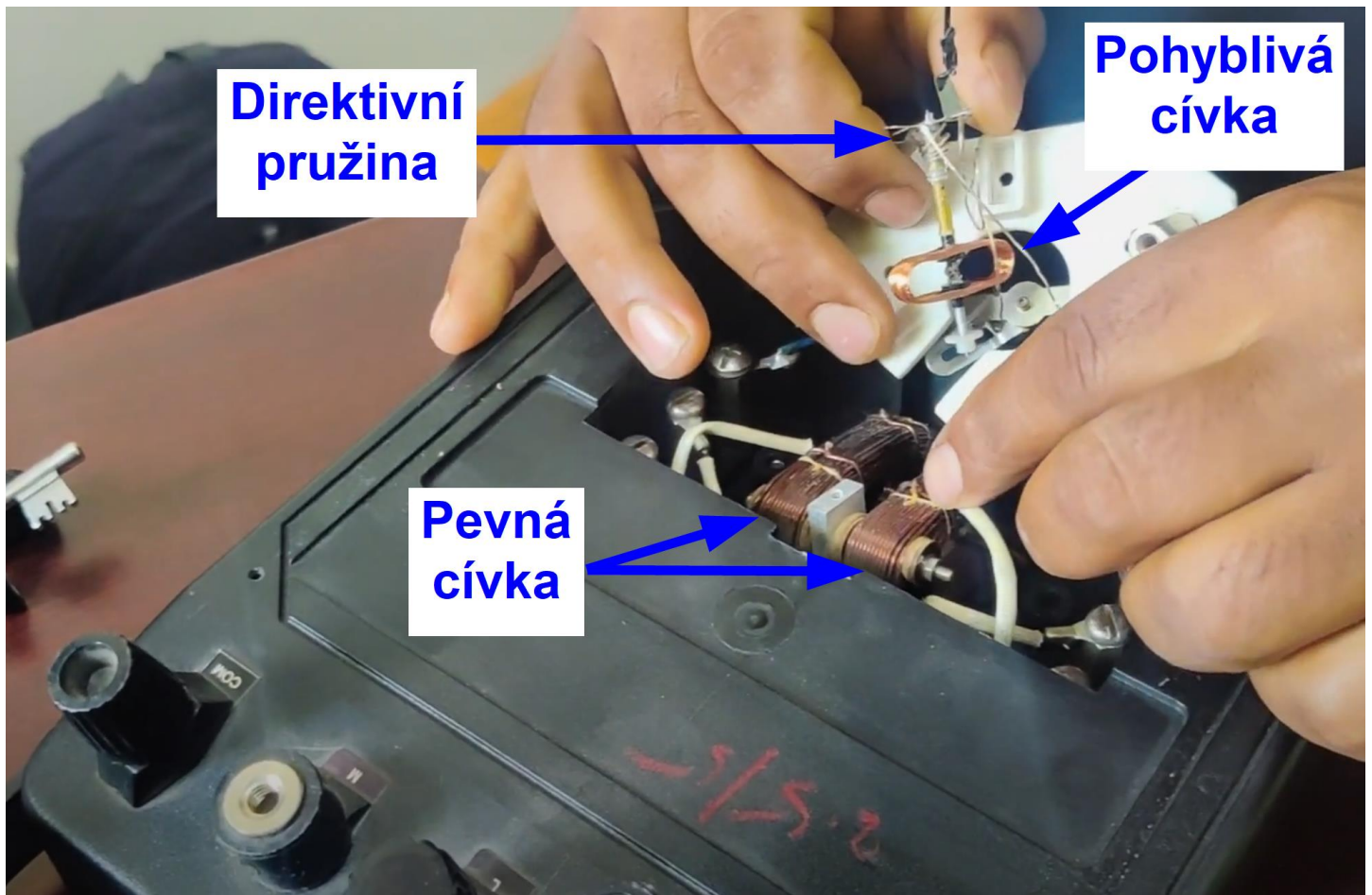
Elektrodynamická soustava se skládá ze dvou cívek: pevné a pohyblivé. Pohyblivá cívka je spojena s ručkou. Pohybuje se v magnetickém poli, které vytvoří pevná cívka. Je to tedy kombinace dvou elektromagnetů, které na sebe mechanicky působí. Výsledkem toho působení se pohyblivá cívka pohne, s ní se pohne i ručka.



Obrázek 8: Princip elektrodynamické soustavy

Aby se pohyblivá cívka mohla pohnout, musí být oba elektromagnety funkční, do obou musí téci proud. Kdyby pevnou cívkou netekl proud, nevytvořila by magnetické pole. Pohyblivá cívka by se pak nemohla pohnout, ani kdyby do ní tekla velký proud, protože její magnetické pole by se nemělo s čím přitahovat ani odpuzovat.

Podobně, kdyby proud tekla jen do pevné cívky, ale ne do pohyblivé, nic by se nepohnulo.



Obrázek 9: Vykuchaný wattmetr: Tento už nikdy nebude fungovat.

Obrázek 9 ukazuje rozmontovaný wattmetr. Direktivní pružina vrací ručku do nulové polohy, když je údaj přístroje nulový.

5.2.2 Využití

Výchylka ručky tedy závisí na obou proudech, na jejich součinu. Proto se tato soustava používá tam, kde je potřeba měřit součin dvou veličin, např. při měření výkonu, v přístroji zvaném wattmetr.

Výkon např. vařiče je součinem napětí na vařiči a proudu, který do vařiče teče. Když tedy proud do vařiče pustíme přes pevnou cívku wattmetru, na pohyblivou cívku připojíme napětí na vařiči, wattmetr ukáže součin napětí a proudu, tj. výkon.

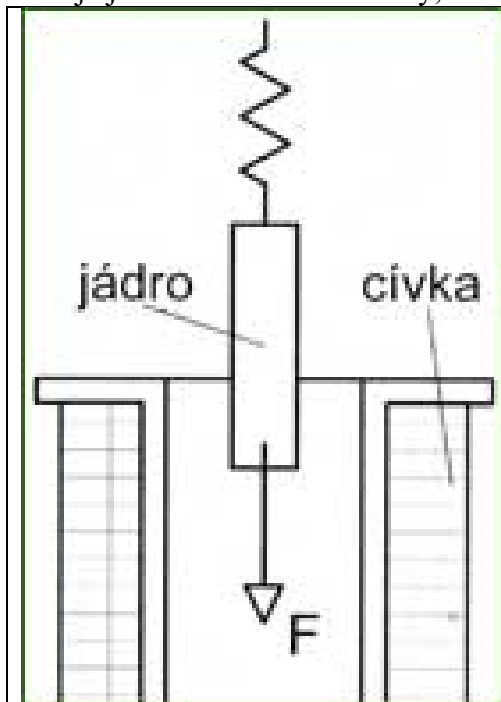
Soustava elektrodynamická může měřit stejnosměrné i střídavé veličiny. Pohyblivá cívka se totiž nepohybuje ve stejnosměrném poli magnetu, ale ve střídavém poli pevné cívky. Proto obě cívky na sebe působí ve střídavém obvodu podobně jako ve stejnosměrném.

Při měření stejnosměrného výkonu soustava nerozlišuje polaritu a při měření střídavého výkonu ukazuje jeho efektivní hodnotu.

5.3 Soustava elektromagnetická

5.3.1 Princip

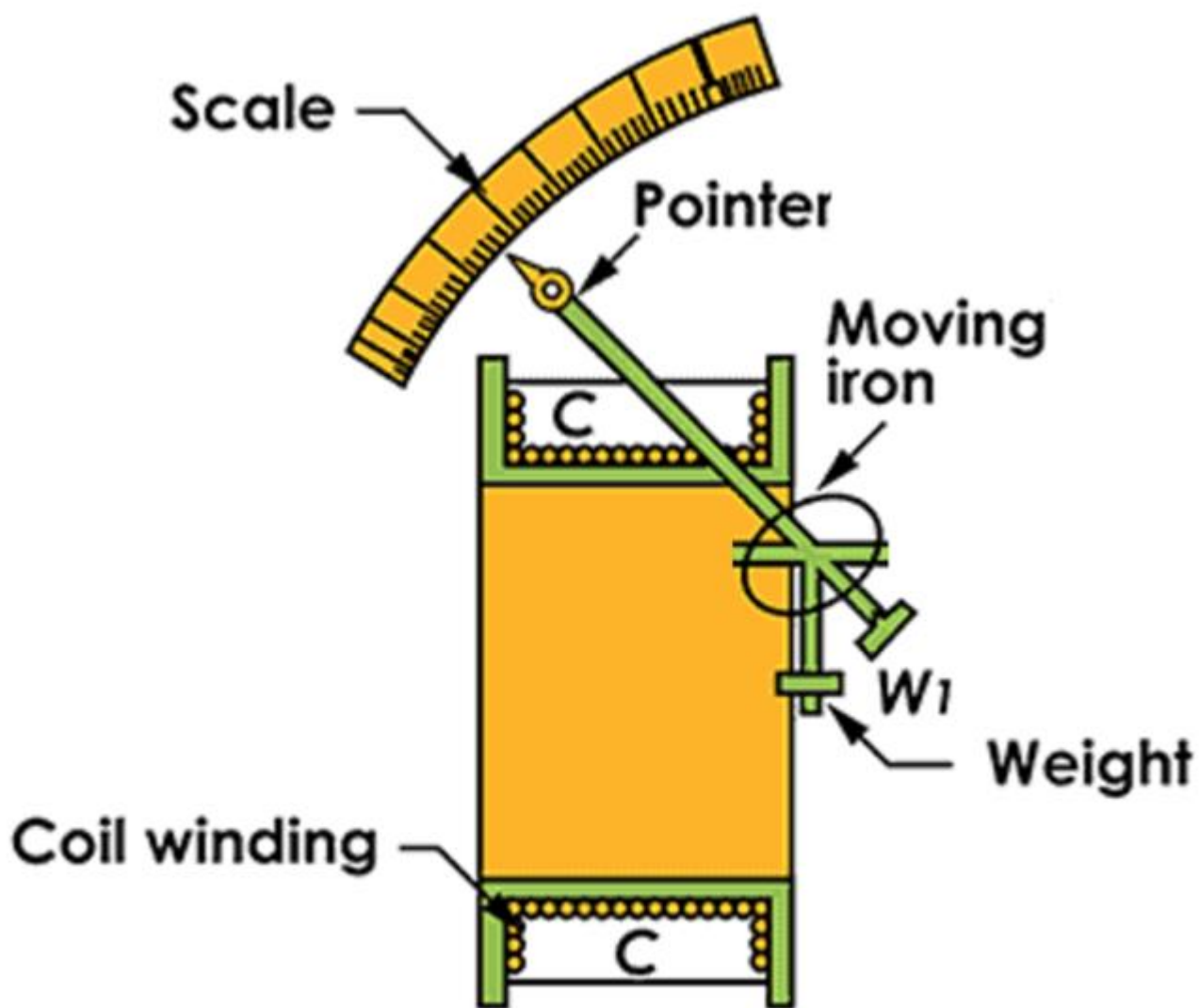
Hlavní součásti soustavy elektromagnetické jsou cívka a železné jádro. Do cívky pouštíme měřený proud. Tím se z ní stává elektromagnet, který do sebe vtahuje železné jádro (**Obrázek 10**). Čím větší proud, tím větší silou je jádro vtahováno do cívky, tím více se vychýlí ručka, která může být s jádrem spojena.



Obrázek 10: Princip elektromagnetické soustavy – vtahování železného jádra do cívky



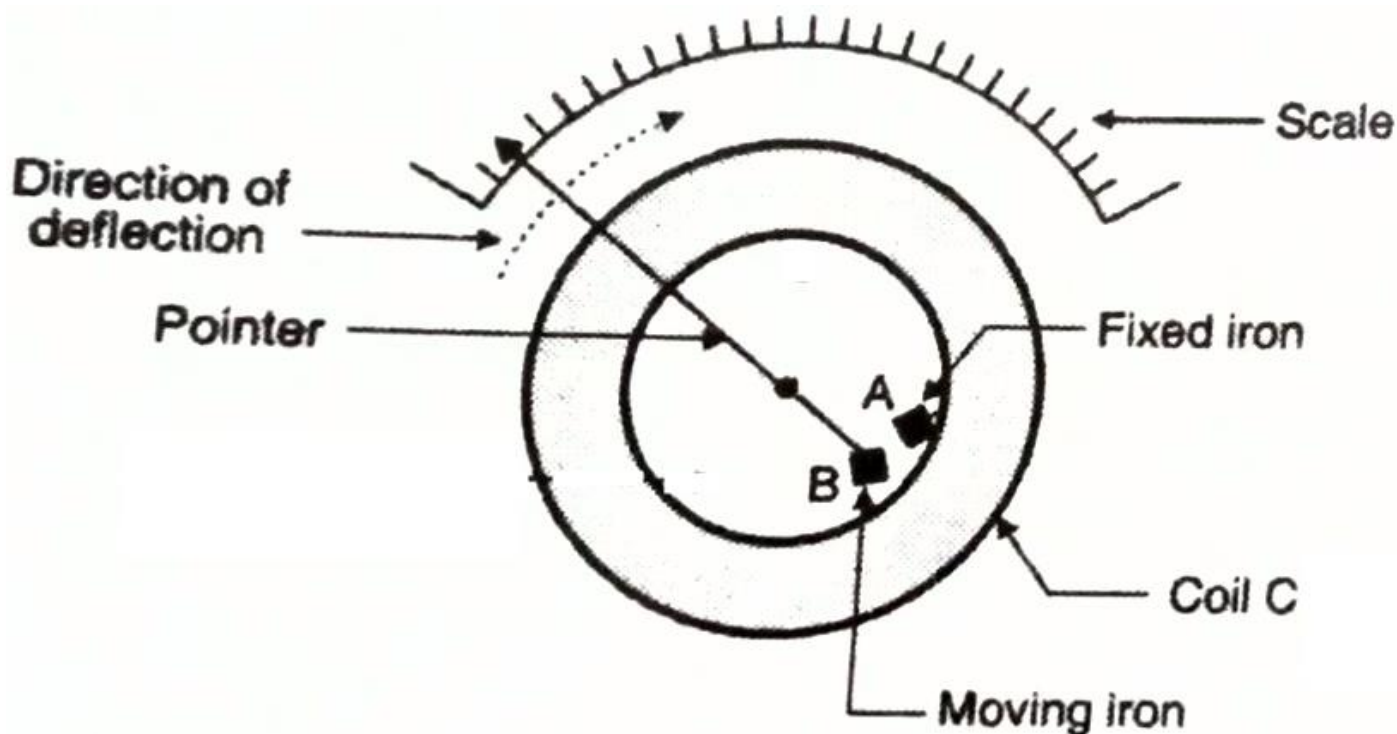
Obrázek 11: Zkoušečka „vadaska“ využívající principu vtahování jádra do cívky. Zde ani není ručka, velikost napětí odhadujeme podle pohybu jádra v průhledném okénku.



Attraction Type Moving Iron

Obrázek 12: Soustava elektromagnetická (založená na přitahování jádra)

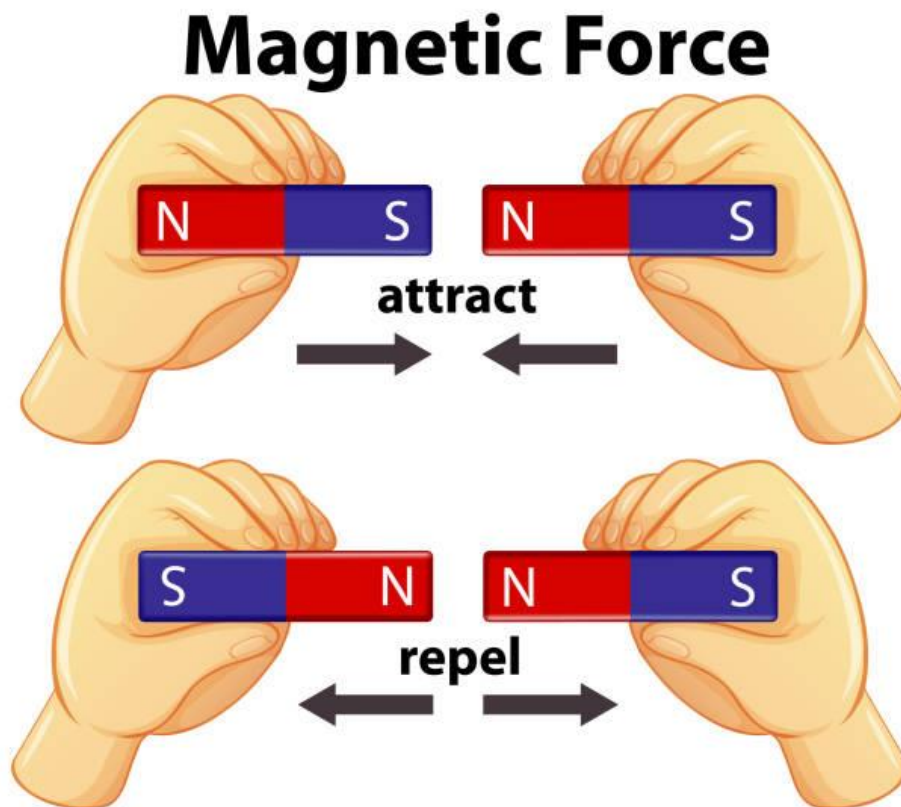
Obrázek 12, Obrázek 11, Obrázek 12 ukazují variantu soustavy, ve které je jádro přitahováno do cívky. Obvyklejší je varianta, která využívá vzájemného odpuzování stejnojmenných pólů magnetu (**Obrázek 13**):



Obrázek 13: Soustava elektromagnetická (založená na vzájemném odpuzování dvou jader)

U této varianty jsou do cívky vložena dvě železná jádra: pevné (Fixed iron) a pohyblivé (Moving iron). Pustíme-li do cívky proud, obě jádra se zmagnetují ve stejném smyslu, tj. obě budou mít sever na stejné straně, jih na druhé straně, a budou se tedy odpuzovat.

Podobně by se chovaly dva pevné magnety (Obrázek 14):



Obrázek 14: Rozdílné póly se přitahují (nahore), stejnojmenné se odpuzují (dole)

5.3.2 Využití

Soustava je robustní, odolná otřesům. Proto se hodí pro těžké podmínky, např. zmíněná „vadaska“ pro práci v terénu.

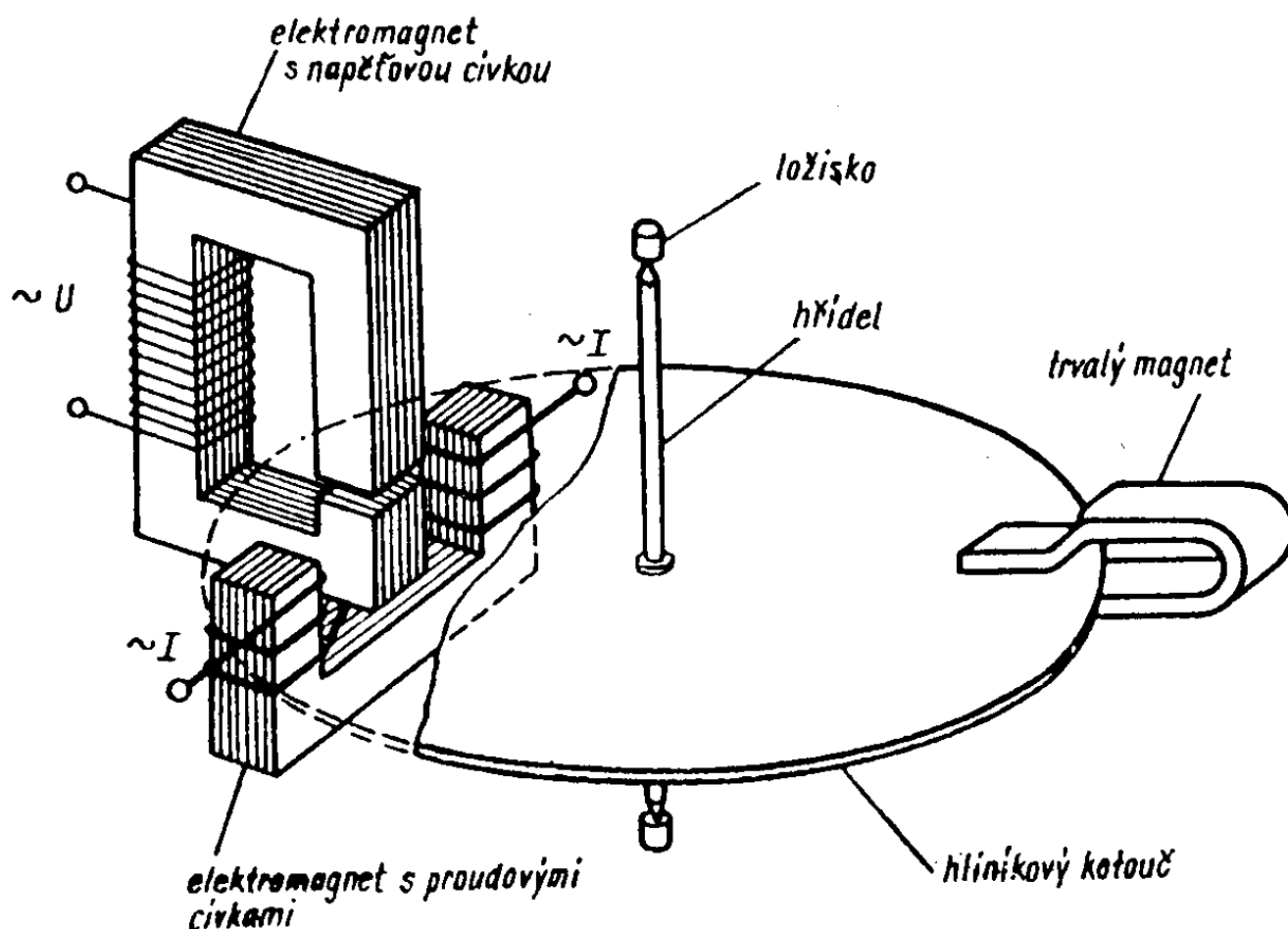
Hodí se pro měření stejnosměrných i střídavých proudů a napětí. Jádru je totiž do cívky vtahováno stejnosměrným i střídavým magnetickým polem. Podobně u soustavy se vzájemným odpuzováním jader jsou obě jádra magnetizována vždy současně, tj. odpuzují se ve stejnosměrném i střídavém magnetickém poli.

5.4 Soustava indukční

5.4.1 Princip

Pracuje na podobném principu jako asynchronní motor s kotvou nakrátko.

Dvě cívky vytvářejí točivé magnetické pole. Toto pole do hliníkového kotouče indukuje tzv. vířivé proudy. Tyto proudy kolem sebe vytvoří magnetické pole, které se strká s polem cívek. Cívky jsou pevné, kotouč je volně otočný, proto se pohne kotouč (přestože je hliníkový, tj. nemagnetický).



Obrázek 15: Soustava indukční (elektroměr)

Máme-li měřit spotřebu elektrické energie, musíme měřit elektrický výkon a ten vynásobit dobou, po kterou byl výkon odebírán.

Soustava má dvě cívky. Ty se používají pro měření proudu (cívka proudová) a napětí (cívka napěťová). Cívka proudová se zapojí do série s měřeným objektem (např. domem). Musí vydržet celý měřený proud, proto je z tlustého drátu a má málo závitů.

Cívka napěťová se zapojí paralelně k měřenému objektu, tj. přímo na napětí sítě. Musí mít malý odběr, proto podobně jako voltmetr musí mít velký odpor. Proto má mnoho závitů tenkým drátem.

Proudová cívka má málo závitů, proto má malou indukčnost. Napěťová cívka má mnoho závitů, proto má velkou indukčnost. Napěťová cívka se proto chová velmi „cívkově“, zatímco cívka proudová se chová spíše jen jako drát. Proto v napěťové cívce vzniká posun jejího proudu proti napětí 90° , zatímco v proudové cívce žádný posun nevzniká. Magnetická pole obou cívek jsou proto vůči sobě posunutá o 90° . Výsledné složené magnetické pole proto jakoby rotuje mezi cívkami a skrz hliníkový kotouček. Indukované vířivé proudy v kotoučku vyvolají magnetické pole, které se odstrčí od pole cívek – a kotouček se roztočí.

Otáčky kotoučku se počítají mechanickým počítadlem (jako bývala počítadla kilometrů ve starých autech). Podobně jako u soustavy elektrodynamické (wattmetr) i tento přístroj dělá součin napětí a proudu.

Když v domě zapneme elektrické topení, sporák, pračku, tak přes proudovou cívku teče velký proud, napěťová je připojená stále, součin napětí a proudu je velký, kotouček se točí rychle. Počítadlo spojené s kotoučkem počítá otáčky – počítá spotřebu.

Když v domě všechno vypneme a odjedeme na dovolenou, napěťová cívka je sice stále připojená na napětí, ale přes proudovou nic neteče. Součin napětí a proudu je nulový, kotouček se nepohne, počítadlo nic nezapočítá.

Trvalý magnet slouží k jemnému, přesně definovanému brzdění kotoučku. Pokud se kotouček pohybuje, magnetické pole trvalého magnetu do něj indukuje vířivé proudy, ty kolem sebe vytvářejí magnetické pole, které se „lepí“ na pole magnetu, a tím je kotouček brzděn. Je brzděn tím víc, čím rychleji se točí. Regulací síly trvalého magnetu můžeme regulovat „citlivost“ elektroměru.

Když se elektroměr netočí, kotouček se za chvíli zastaví barevnou značkou proti průhlednému okénku. Díky tomu můžeme snadno zkontrolovat, že elektroměr opravdu stojí. Je to zajištěno železnou pecičkou, zalisovanou v kotoučku. V klidu si magnet pecičku vždy přitáhne a nastaví tak kotouček do „nulové“ polohy.

5.4.2 Využití

Soustava se používá v elektroměrech k měření spotřeby elektrické energie.

Protože funkce je založená na indukování vířivých proudů střídavým magnetickým polem, může tato soustava měřit jen v obvodech střídavého proudu.

6. Měření základních elektrických veličin

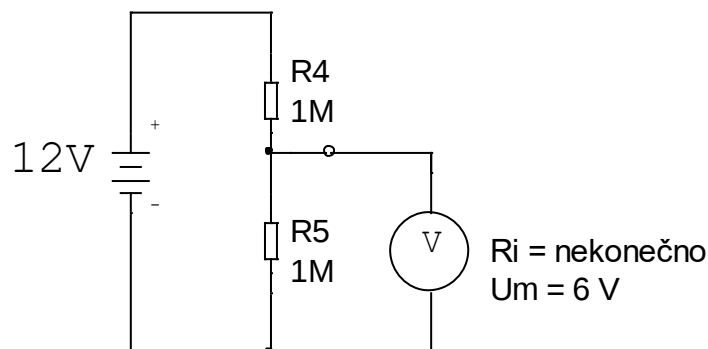
6.1 Měření napětí

6.1.1 Zapojení voltmetru

Napětí měříme voltmetrem. Voltmetr připojujeme paralelně k objektu, na kterém chceme napětí změřit.

Abychom měřený objekt nezatěžovali, musí mít voltmetr co největší vnitřní odpor. Jinak bychom dostali zkreslené výsledky, protože naměřená hodnota by byla menší o úbytek na vnitřním odporu měřeného objektu.

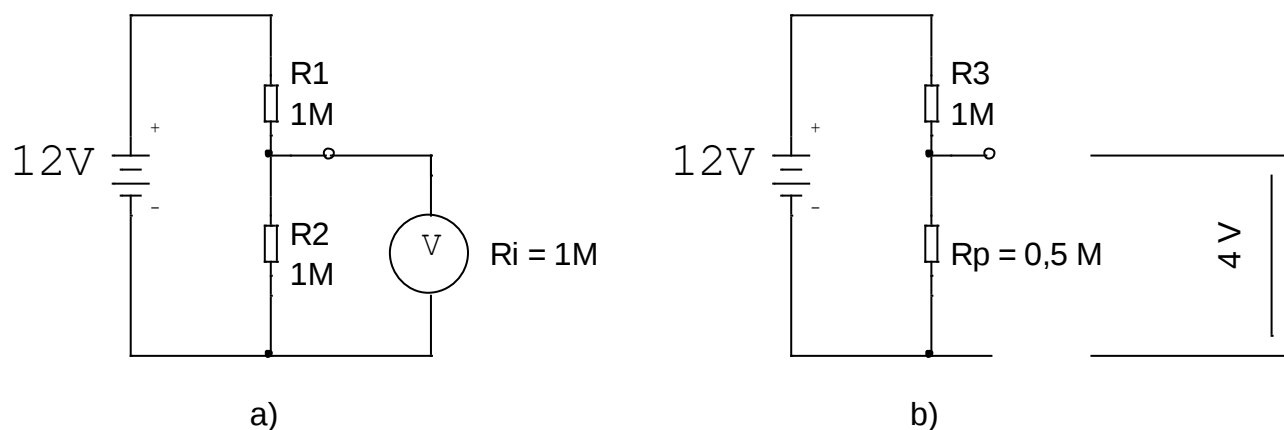
Příklad



Obrázek 16: Měření napětí na odporovém děliči kvalitním voltmetrem

Při měření napětí na odporovém děliči, složeném ze dvou stejných odporů (**Obrázek 16**), bychom očekávali, že na výstupu děliče bude polovina napětí vstupního, tj. 6 V. Budeme-li měřit kvalitním voltmetrem, opravdu naměříme 6 V.

Bude-li ale vnitřní odpor voltmetru nedostatečný (**Obrázek 17a**), naměříme napětí podstatně menší.



Obrázek 17: Měření napětí na odporovém děliči nekvalitním voltmetrem; a) připojení voltmetru, b) náhradní schéma

Paralelní kombinace vnitřního odporu voltmetru $R_i = 1 \text{ M}$ s odporem $R_2 = 1 \text{ M}$ tvoří odpor $R_p = 0,5 \text{ M}$. Jak je vidět na náhradním schématu (**Obrázek 17b**), naměřené napětí bude jen 4 V.

Závěr

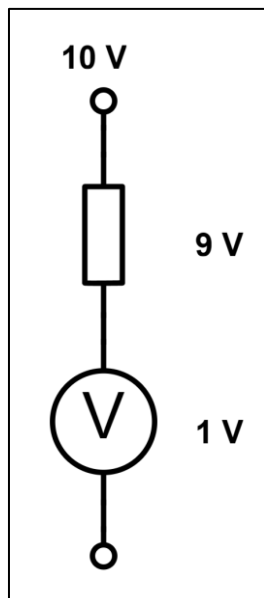
Voltmetr zapojujeme paralelně k měřenému objektu. Vnitřní odpor voltmetru musí být co největší, ideálně nekonečný.

6.1.2 Zvětšení rozsahu voltmetru

Potřebujeme-li měřit větší napětí, než na které je určený náš voltmetr, můžeme rozsah napětí voltmetru zvětšit. Rozsah voltmetru zvětšíme rezistorem, který zapojíme do série s voltmetrem. Tento rezistor nazýváme předřadný rezistor – předřadník.

Příklad:

Máme voltmetr, který má rozsah $U_v = 1 \text{ V}$, a potřebujeme měřit napětí $U_m = 10 \text{ V}$. Použijeme následující zapojení (Obrázek 18):



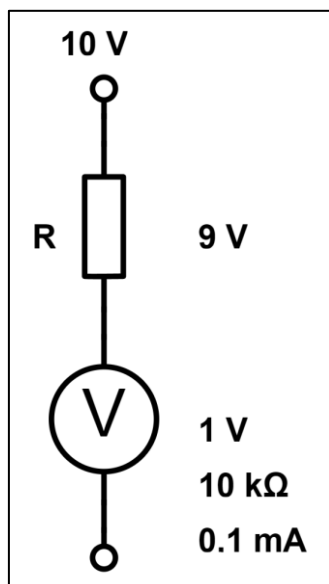
Obrázek 18: Zapojení předřadného rezistoru – předřadníku

Nebudeme shánět žádné vzorečky. Jsou sice k dispozici, ale pak bychom je stejně zapomněli, a třeba bychom jim ani nerozuměli. Použijeme to, co známe: Kirchhoffův zákon o napětích a Ohmův zákon.

Měřené napětí $U_m = 10 \text{ V}$ se musí rozdělit mezi původní voltmetr a předřadník R . Napětí $U_v = 1 \text{ V}$ je na původním voltmetru. Zbývajících $U_R = 9 \text{ V}$ musí spotřebovat předřadník R .

Abychom mohli použít Ohmův zákon a zjistit odpor předřadníku R , potřebujeme znát odpor voltmetru R_v . Tento odpor možná je napsaný na štítku voltmetru (spíše ne), nebo jej změříme, nejjednodušeji ohmmetrem.

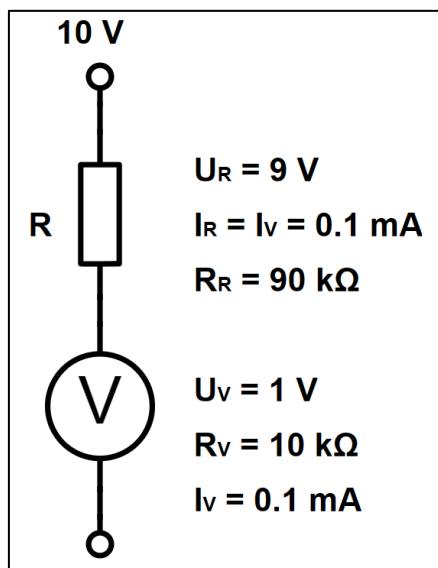
Zjistili jsme, že odpor voltmetru je $R_v = 10 \text{ k}\Omega$.



Obrázek 19: Zjistili jsme odpor voltmetru a proud, který jím teče při plné výchylce.

Napětí na předřadníku R je $U_R = 9 \text{ V}$. Abychom mohli spočítat jeho odpor, potřebujeme znát proud, který jím poteče. Předřadník je zapojený v sérii s voltmetrem, jeho proud tedy bude stejný jako proud voltmetru. A proud voltmetru je

$$I_v = \frac{U_v}{R_v} = \frac{1 \text{ V}}{10 \text{ k}\Omega} = 0,1 \text{ mA}$$



Obrázek 20: Pomocí Ohmova zákona jsme spočítali odpor předřadníku.

Proud předřadníku je

$$I_R = I_V = 0,1 \text{ mA}$$

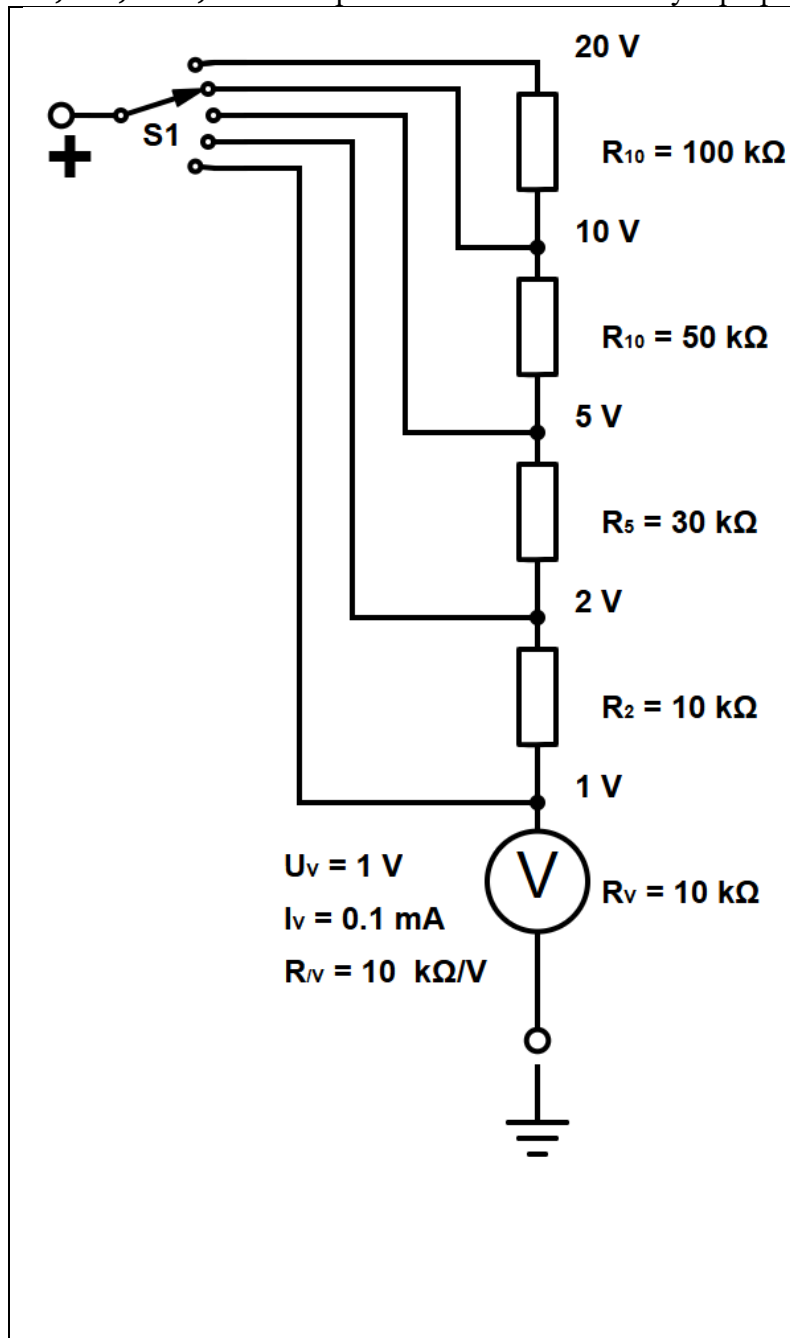
Odpor předřadníku je

$$R_R = \frac{U_R}{I_R} = \frac{9\text{V}}{0,1\text{mA}} = 90 \text{ k}\Omega$$

6.1.3 Přepínání rozsahů voltmetru

Příklad

S ručkovým měřidlem s parametry $U_V = 1 \text{ V}$, $R_V = 10 \text{ k}\Omega$, $I_V = 0,1 \text{ mA}$ navrhnete voltmetr s rozsahy 1 V , 2 V , 5 V , 10 V , 20 V . Přepínání rozsahů řešte otočným přepínačem.



Obrázek 21: Přepínání rozsahů voltmetru

Při tomto výpočtu použijeme užitečný parametr, který se často používá při hodnocení voltmetrů, takzvaný odpor na volt. Např. pro náš zadaný přístroj tento odpor na volt je

$$R_{/V} = \frac{R_V}{U_V} = \frac{10 \text{ k}\Omega}{1 \text{ V}} = 10 \text{ k}\Omega/\text{V}$$

Tento parametr říká, že při zvětšování rozsahu voltmetru na každý přidaný volt rozsahu se o tuto hodnotu zvětší celkový odpor voltmetru. Např. pro náš zadaný přístroj bude pro rozsah 20 V celkový odpor voltmetru

$$R_{C20} = 20 \text{ V} * 10 \frac{\text{k}\Omega}{\text{V}} = 200 \text{ k}\Omega$$

Spočítejme takto odpory jednotlivých rezistorů ve schématu vlevo.

Celkový odpor pro rozsah 2 V bude

$$R_{C2} = 2 \text{ V} * 10 \frac{\text{k}\Omega}{\text{V}} = 20 \text{ k}\Omega$$

Z tohoto odporu už část máme v odporu R_V . Proto

$$R_2 = R_{C2} - R_V = 20 \text{ k}\Omega - 10 \text{ k}\Omega = 10 \text{ k}\Omega$$

$$R_5 = R_{C5} - R_V - R_2 = 50 \text{ k}\Omega - 10 \text{ k}\Omega - 10 \text{ k}\Omega = 30 \text{ k}\Omega$$

$$R_{10} = R_{C10} - R_V - R_2 - R_5 = 100 \text{ k}\Omega - 10 \text{ k}\Omega - 10 \text{ k}\Omega - 30 \text{ k}\Omega = 50 \text{ k}\Omega$$

$$R_{20} = R_{C20} - R_V - R_2 - R_5 - R_{10} = 200 \text{ k}\Omega - 10 \text{ k}\Omega - 10 \text{ k}\Omega - 30 \text{ k}\Omega - 50 \text{ k}\Omega = 100 \text{ k}\Omega$$

6.2 Měření proudu

6.2.1 Zapojení ampérmetru

Proud měříme ampérmetrem. Ampérmetr zapojujeme do série s objektem, jehož proud chceme změřit. Můžeme si to představit tak, že chceme-li změřit proud drátem, který vede proud do spotřebiče, musíme ten drát přerušit, a to přerušení spojit ampérmetrem.

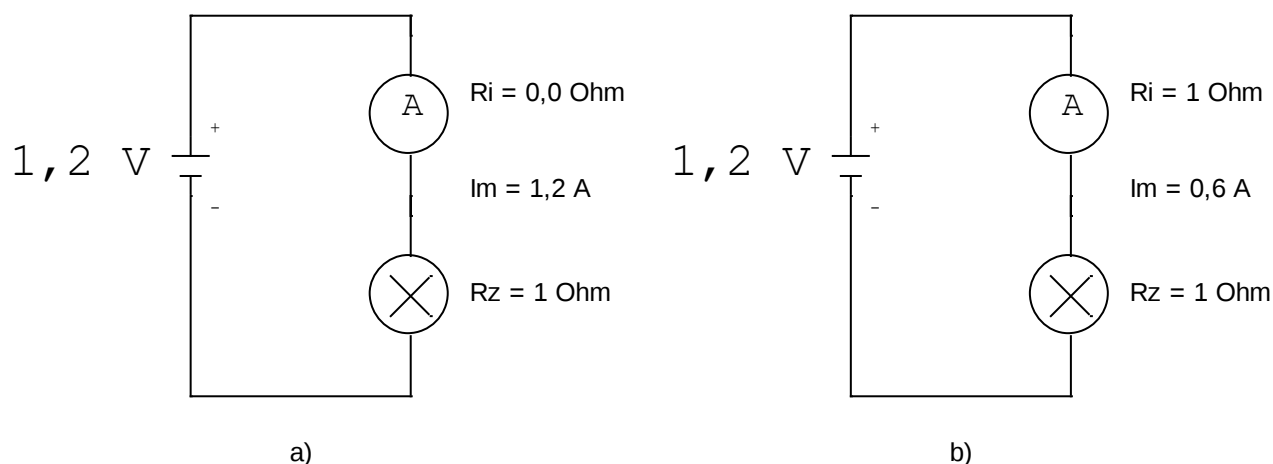
Ampérmetr musí mít co nejmenší vnitřní odpor, aby neomezoval proud tekoucí obvodem.

Příklad

Měříme proud v obvodu napájeném z článku o malém napětí 1,2 V. Odpor spotřebiče je 1 Ω , takže obvodem teče proud 1,2 A.

Je-li ampérmetr kvalitní, má zanedbatelný odpor, ideálně 0,0 Ω (**Obrázek 22a**), spotřebičem teče při měření stejný proud, jako by tekł bez ampérmetru, a naměříme tedy správnou hodnotu 1,2 A.

Obrázek 22b ukazuje obvod s nekvalitním ampérmetrem, který má příliš velký vnitřní odpor, konkrétně stejný jako odpor spotřebiče, tj. 1 Ω . Při měření je tedy proud poloviční proti obvodu bez ampérmetru a změřená hodnota 0,6 A je proto chybná.



Obrázek 22: Měření proudu v obvodu s malým napětím a velkým proudem; a) kvalitním ampérmetrem, b) nekvalitním ampérmetrem

Závěr

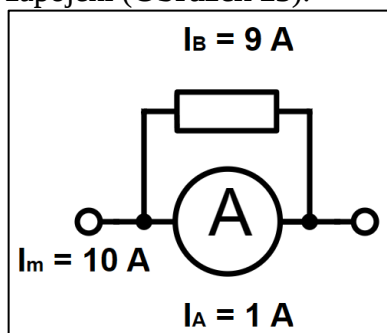
Ampérmetr zapojujeme do série s měřeným objektem. Ampérmetr má mít vnitřní odpor co nejmenší, ideálně nulový.

6.2.2 Zvětšení rozsahu ampérmetru

Potřebujeme-li měřit větší proud, než na který je určený náš ampérmetr, můžeme rozsah proudu ampérmetru zvětšit. Rozsah ampérmetru zvětšíme rezistorem, který zapojíme paralelně k ampérmetru. Tento rezistor nazýváme bočník.

Příklad:

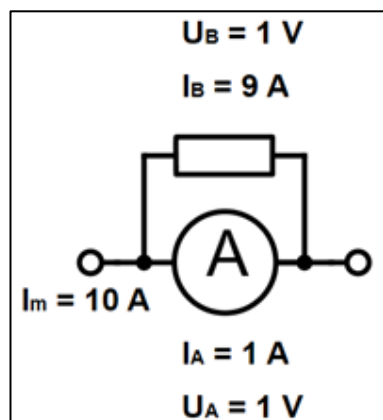
Máme ampérmetr, který má rozsah $I_A = 1$ A, a potřebujeme měřit proud $I_m = 10$ A. Použijeme následující zapojení (Obrázek 23):



Obrázek 23: Zapojení bočníku

Nebudeme shánět žádné vzorečky. Jsou sice k dispozici, ale pak bychom je stejně zapomněli, a třeba bychom jim ani nerozuměli. Použijeme to, co známe: Kirchhoffův zákon o proudech a Ohmův zákon.

Měřený proud $I_m = 10$ A se musí rozdělit mezi původní ampérmetr a bočník R. Proud $I_A = 1$ A teče původním ampérmetrem. Zbývajících $I_R = 9$ A musí protékat bočníkem R.

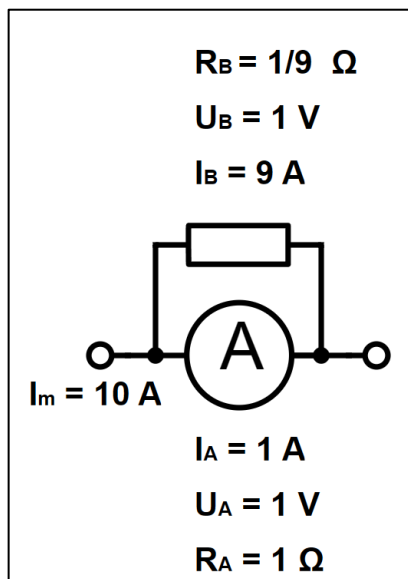


Obrázek 24: Změřili jsme napětí, které je na ampérmetru při plné výchylce. Je stejné jako bude napětí na bočníku.

Abychom mohli vypočítat odpor bočníku R_B , potřebujeme znát proud bočníkem a napětí na něm. Proud bočníkem už známe, je $I_B = 9$ A. Napětí na bočníku je stejné jako napětí na ampérmetru, protože jsou spojené paralelně. Napětí na ampérmetru při plné výchylce je možná napsané na jeho štítku. Ale asi ne.

Snadno je změříme tak, že nastavíme proud ampérmetrem na plnou výchylku, tj. 1 A, a pak změříme napěťový úbytek na ampérmetru.

Při plné výchylce ampérmetru, tj. při proudu $I_A = 1$ A, jsme na ampérmetru změřili napěťový úbytek $U_A = 1$ V. Stejně napětí $U_B = 1$ V je při plné výchylce na bočníku.



Obrázek 25: Pomocí Ohmova zákona jsme spočítali odpor bočníku.

Odpor bočníku je

$$R_B = \frac{U_B}{I_B} = \frac{1\text{V}}{9\text{A}} = 1/9 \, \Omega$$

Můžeme také uvažovat takto: Při stejném napětí teče bočníkem devětkrát větší proud než ampérmetrem. Odpor bočníku tedy musí být devětkrát menší než odpor ampérmetru.

Odpor ampérmetru je:

$$R_A = \frac{U_A}{I_A} = \frac{1\text{V}}{1\text{A}} = 1 \, \Omega$$

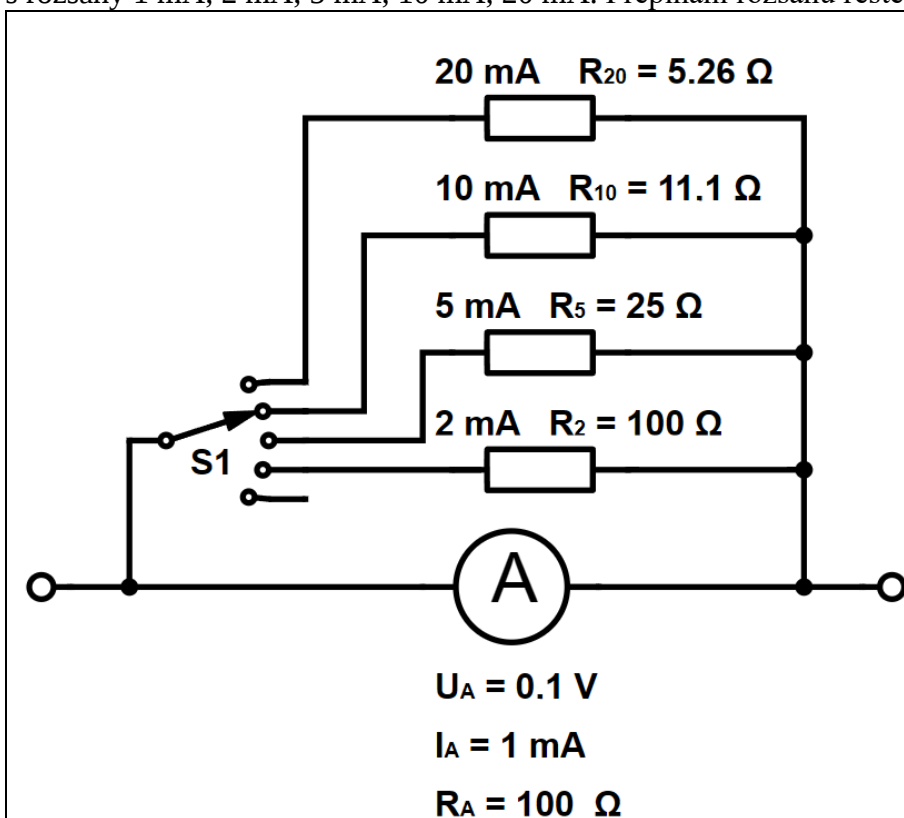
Odpor bočníku bude devětkrát menší:

$$R_B = \frac{R_A}{9} = \frac{1\Omega}{9} = 1/9 \, \Omega$$

6.2.3 Přepínání rozsahů ampérmetru

Příklad

S ručkovým měřidlem s parametry $U_A = 0,1 \, \text{V}$, $R_A = 100 \, \Omega$, $I_A = 1 \, \text{mA}$ navrhnete miliampérmetr s rozsahy 1 mA, 2 mA, 5 mA, 10 mA, 20 mA. Přepínání rozsahů řešte otočným přepínačem.



Obrázek 26: Přepínání rozsahů ampérmetru

Při výpočtu použijeme Ohmův zákon a tuto úvahu: Při plné výchylce na každém rozsahu v každém případě teče 1 mA měřidlem. Proto bočníkem teče o tento 1 mA méně. Např. na rozsahu 10 mA teče bočníkem R_{10} $10 \, \text{mA} - 1 \, \text{mA} = 9 \, \text{mA}$.

$$R_2 = \frac{0.1\text{V}}{0.001\text{A}} = 100\Omega$$

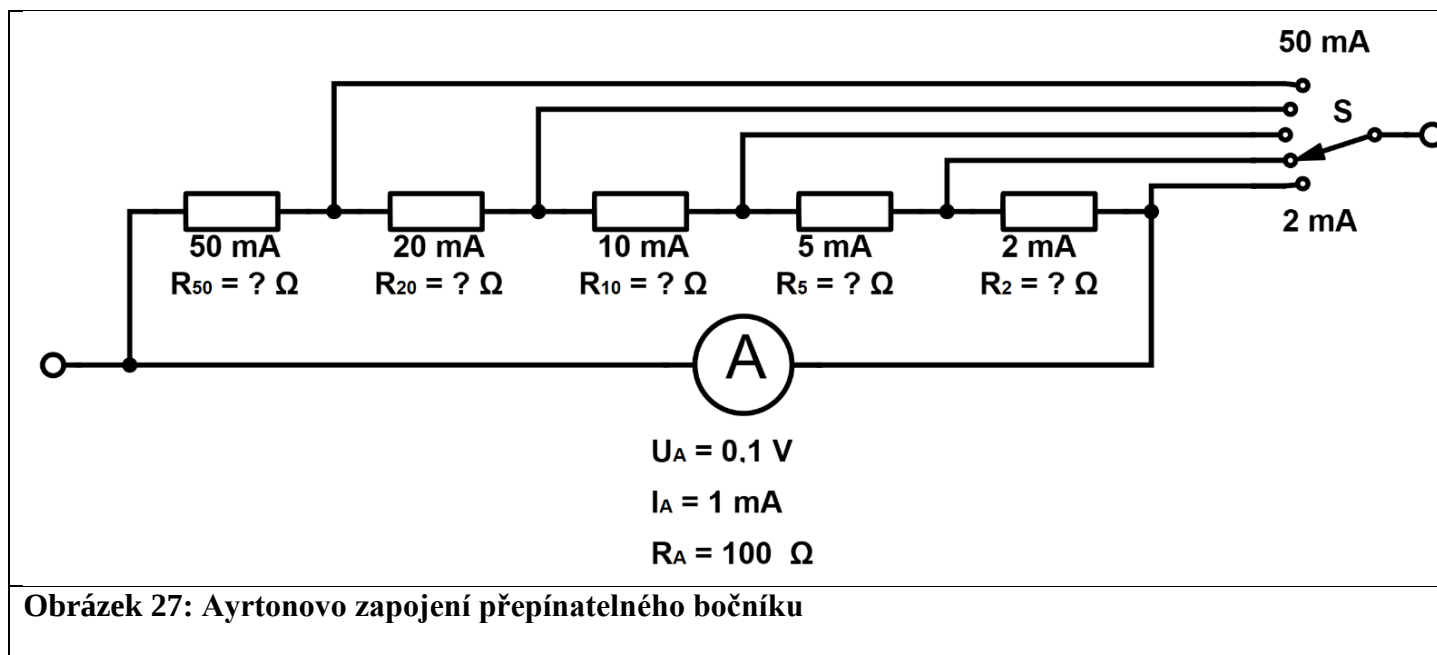
$$R_5 = \frac{0.1\text{V}}{0.004\text{A}} = 25\Omega$$

$$R_{10} = \frac{0.1\text{V}}{0.009\text{A}} = 11,1\Omega$$

$$R_{20} = \frac{0.1\text{V}}{0.0019\text{A}} = 5,26\Omega$$

Popsané přepínání bočníků (Obrázek 26) je jednoduché, snadno se počítá, ale je velmi nebezpečné pro měřicí přístroj. Když při přepínání rozsahů se pohyblivý kontakt přepínače na okamžik nedotýká žádného pevného kontaktu, je na ten okamžik přerušeny nejen přepínač, ale i celá „boční“ cesta, a celý měřený proud projde měřidlem a může je snadno zničit.

Proto se skoro výhradně používá tzv. Ayrtonovo zapojení přepínaného bočníku (**Obrázek 27**).



Toto zapojení má tyto nevýhody:

- Není možno dosáhnout původní proudové citlivosti dané měřidlem**, citlivost bude vždy menší. Např. v naší ukázce (**Obrázek 27**) je maximální citlivost (tj. minimální proud potřebný na plnou výchylku) 2 mA, nikoliv původní 1 mA. Na všech rozsazích, i na tom nejcitlivějším, je totiž vždy k původnímu měřidlu připojený bočník.
- Napět'ový úbytek na vyšších proudových rozsazích bude vždy větší** než úbytek na původním měřidle. Např. v naší ukázce (**Obrázek 27**) na rozsahu 50 mA bude úbytek skoro dvojnásobný, tj. skoro 0,2 V. Na vyšších proudových rozsazích bude totiž vždy v sérii s měřidlem pravá část bočníku. Např. na rozsahu 50 mA jsou v sérii s měřidlem rezistory R20, R10, R5, R2 a ty zhoršují citlivost měřidla.

Tyto nevýhody jsou však vyváženy podstatnou výhodou: Měřidlo není ohroženo nadměrným proudem při chvilkovém přerušení kontaktů přepínače.

Výpočet odporů jednotlivých rezistorů pro Ayrtonův bočník je velmi komplikovaný. Např. v naší ukázce (**Obrázek 27**) by výpočet vedl na pět rovnic o pěti neznámých. Do toho jsem se zatím nepouštěl. Ani jsem nenašel žádný online kalkulátor, který by to uměl. Nezvládla to ani free verze AI. Po mnoha marných pokusech mě odkázala na placenou verzi. Máte-li řešení, prosím, nabídněte.

6.3 Měřicí transformátory

Pro měření napětí a proudu v soustavách s vysokým napětím se používají měřicí transformátory.

Při měření zajišťují

- bezpečnost
- převod veličiny na rozumnou snadno měřitelnou hodnotu
- přenos veličiny na velkou vzdálenost

Požadavky na měřicí transformátory:

- Bezpečnost: Musí bezpečně oddělit primární a sekundární část.
- Přesnost
- Přetížitelnost: Musí odolat trvalému i dočasnému přetížení.

Pro transformátory obecně platí tyto vztahy:

$\frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}$	Rovnice 1: Vztahy mezi počty závitů, napětími a proudy transformátoru
---	--

Z těchto vztahů plyne:

Výstupní napětí U_2 je **přímo** úměrné počtu sekundárních závitů N_2 . To je použito u měřicího transformátoru napětí: Jeho sekundární cívka má malý počet závitů, aby jeho výstupní napětí bylo malé.

Výstupní proud I_2 je **nepřímo** úměrný počtu sekundárních závitů N_2 . To je použito u měřicího transformátoru proudu: Jeho sekundární cívka má velký počet závitů, aby jeho výstupní proud byl malý.

Příklad:

Měříme velmi nebezpečné napětí 22 kV venku na vstupu do rozvodny (**Obrázek 29, Obrázek 32**), obvyčejný měřicí přístroj na napětí 100 V je umístěný 350 m daleko ve velíně.

Bezpečně jsme oddělili místo, ve kterém se měří, od místa, kde je umístěn měřicí přístroj.

Převedli jsme obrovské napětí 22 kV na „rozumnou“ hodnotu 100 V. Neměříme speciálním drahým přístrojem na 22 kV, ale obvyčejným levným přístrojem s rozsahem 100 V. Přenesli jsme měřené napětí z místa, kde prší a mrzne a je nebezpečno, do tepla a bezpečí velína.

6.3.1 Měřicí transformátor napětí

Jeho úkolem je převést velké měřené napětí na malé dobře měřitelné napětí do bezpečného prostředí, např. do velína.

Primární cívka má mnoho závitů, sekundární cívka málo závitů, aby se velké napětí převádělo na nižší. Mezi oběma cívkami je kvalitní izolace, která chrání další obvody před vysokým napětím.

Sekundární napětí je pevné, stabilní („tvrdé“). Z toho plyne, že sekundární strana se nesmí zatížit příliš velkým proudem, protože by se transformátor poškodil. Proto také je sekundární strana jištěná pojistkou. Transformátor napětí snáší (na rozdíl od transformátoru proudu, viz dále) provoz naprázdno, tj. bez zatížení.

Měřicí voltmetr musí splňovat obvyklý požadavek – velký vnitřní odpor.

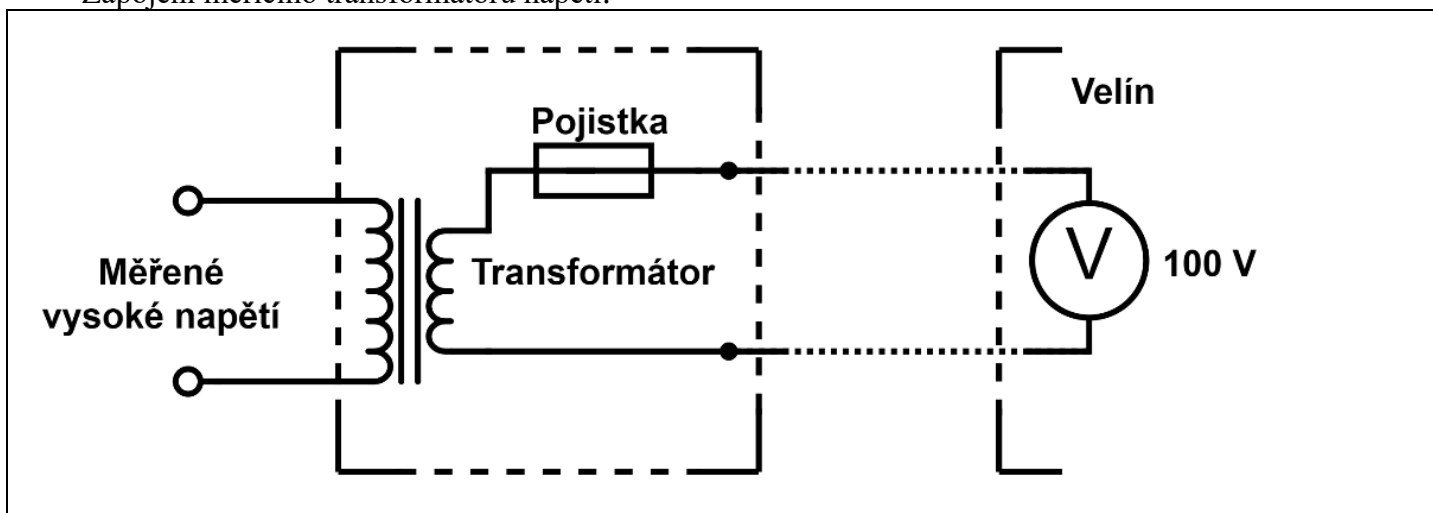


Obrázek 28: Měřicí transformátor napětí firmy Artech

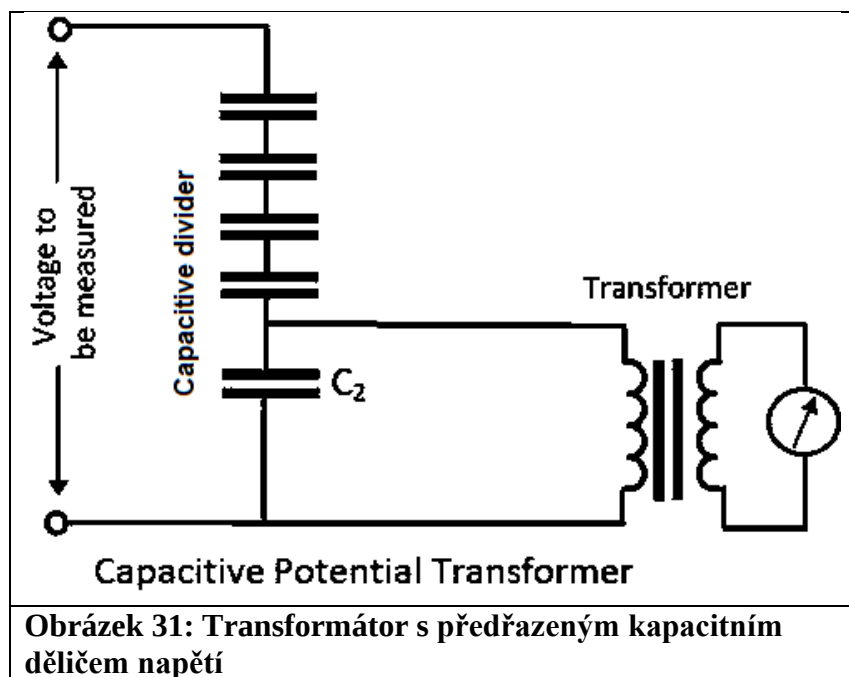


Obrázek 29: Příklad instalace měřicích transformátorů napětí firmy Artech

Zapojení měřicího transformátoru napětí:



Obrázek 30: Zapojení měřicího transformátoru napětí



Při měření velmi vysokých napětí by bylo obtížné udělat transformátor přímo na toto napětí, protože by musel mít ohromný počet primárních závitů. Proto se pro vysoké napětí před transformátor dává kapacitní dělič napětí (Obrázek 31).

6.3.2 Měřicí transformátor proudu

Jeho úkolem je převést měřený velký proud na straně vysokého napětí na malý dobře měřitelný proud na bezpečné sekundární straně.

Primární cívka má obvykle pouze jeden nebo několik málo závitů, sekundární cívka má hodně závitů, aby se velký proud převáděl na nižší. Mezi oběma cívkami je kvalitní izolace, která chrání další obvody před vysokým napětím.

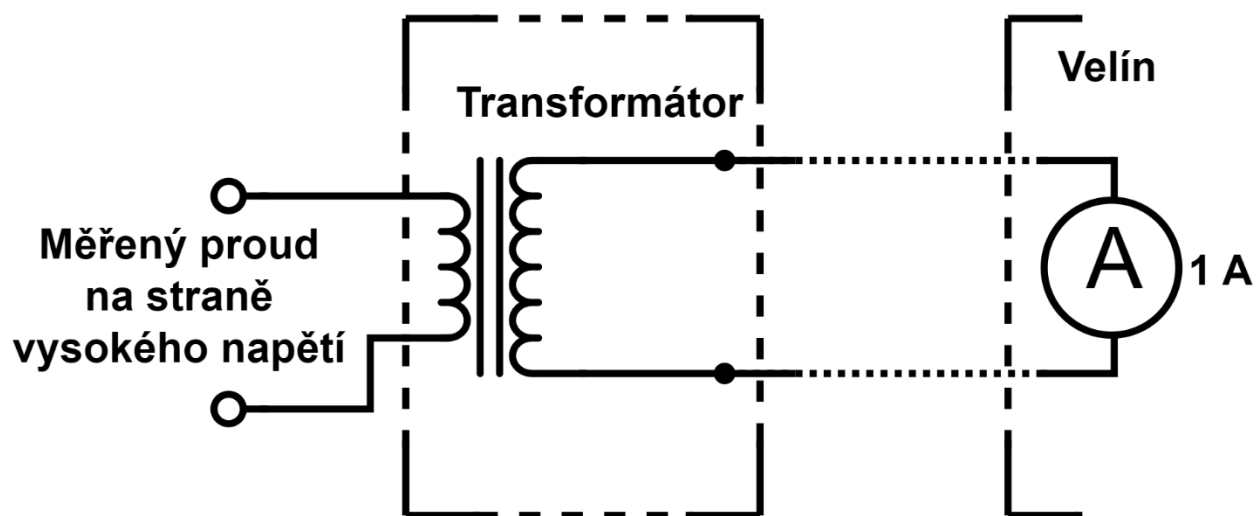
Sekundární napětí je měkké, při provozu naprázdno by bylo velmi velké (kvůli velkému počtu sekundárních závitů). Z toho plyne, že sekundární strana se nesmí provozovat naprázdno, protože indukované velké napětí by poškodilo transformátor nebo jiné zařízení. Proto sekundární strana, není-li zatížena ampérmetrem, musí být zkratovaná.

Měřicí ampérmetr musí splňovat obvyklý požadavek – malý vnitřní odpor.



Obrázek 32: Příklad instalace měřicích transformátorů proudu firmy Arteche

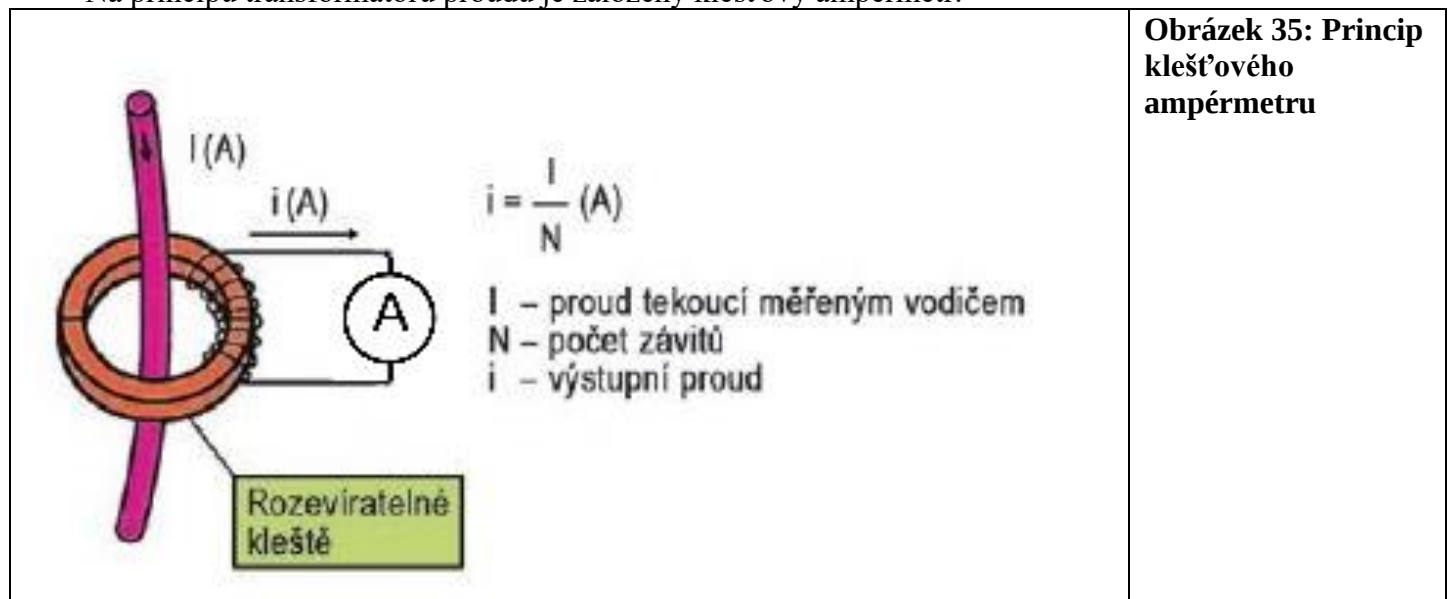
Obrázek 33: Měřicí transformátor proudu firmy Arteche



Obrázek 34: Zapojení měřicího transformátoru proudu

Klešťový ampérmetr

Na principu transformátoru proudu je založený klešťový ampérmetr:



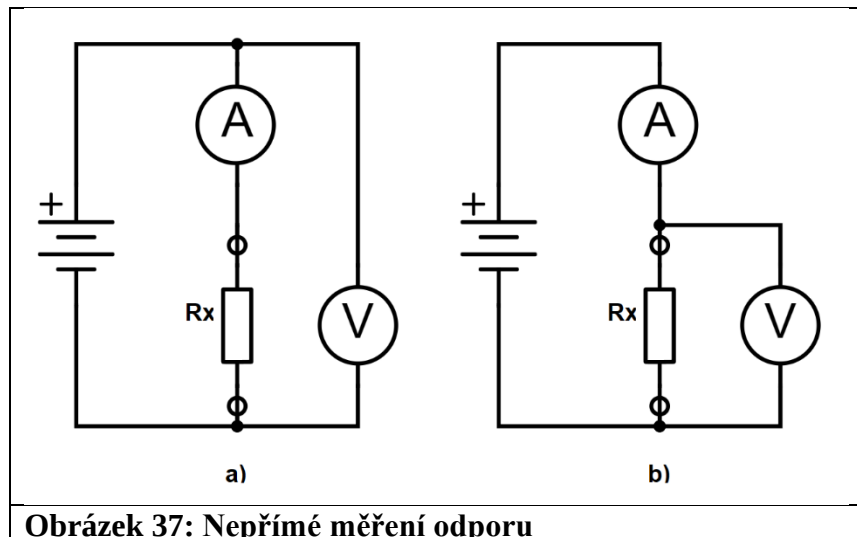
V klešťovém ampérmetru má primární vinutí měřicího transformátoru jediný závit, představovaný měřeným vodičem. Rozevírací čelisti tvoří magnetické jádro. Uvnitř přístroje je na jádru navinuté sekundární vinutí, na které je připojený ampérmetr. V našem případě (Obrázek 36) je to ampérmetr digitální.

6.4 Měření odporu

Odpor měříme

- nepřímo pomocí ampérmetru a voltmetru
- přímo ohmmetrem

6.4.1 Nepřímé měření odporu



Při nepřímém měření (**Obrázek 37**) změříme proud odporem a napětí na něm, a pak podle Ohmova zákona vypočteme odpor.

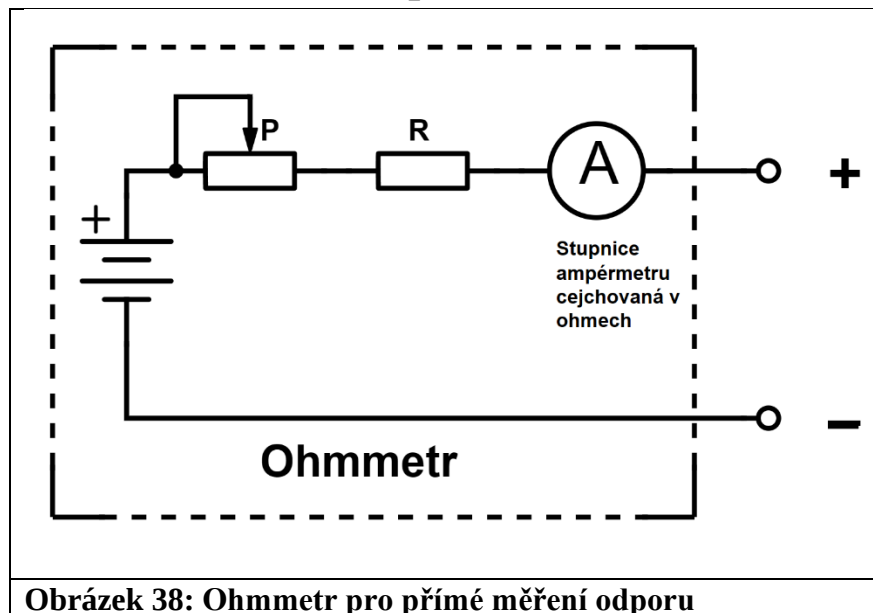
Obě zapojení jsou zatížena chybou metody.

Podle obrázku a) voltmetr ukazuje nejen napětí na měřeném odporu, ale také napětí na ampérmetru. Tato metoda je vhodnější, když měříme velké odpory při velkém měřicím napětí a malém proudu. Vzhledem k velkému napětí na zátěži je malý napěťový úbytek na ampérmetru zanedbatelný.

Podle obrázku b) ampérmetr ukazuje

nejen proud měřeným odporem, ale také proud voltmetrem. Tato metoda je vhodnější, když měříme malé odpory při malém měřicím napětí a velkém proudu. Vzhledem k velkému proudu do zátěže je pak malý proud do voltmetru zanedbatelný.

6.4.2 Přímé měření odporu



Ohmmetr sestavíme z baterie, kterou protlačujeme proud do měřeného odporu, a z ampérmetru, kterým ten proud měříme (**Obrázek 38**). Abychom mohli měřit odpory od nejmenších včetně nulového, dáme ještě do série s měřeným odporem omezovací rezistor R . Ten zabrání poškození ampérmetru nebo baterie při měření malého odporu nebo dokonce při zkratování měřicích svorek. Potenciometrem P nastavíme údaj $0,0 \Omega$ při zkratovaných měřicích svorkách.

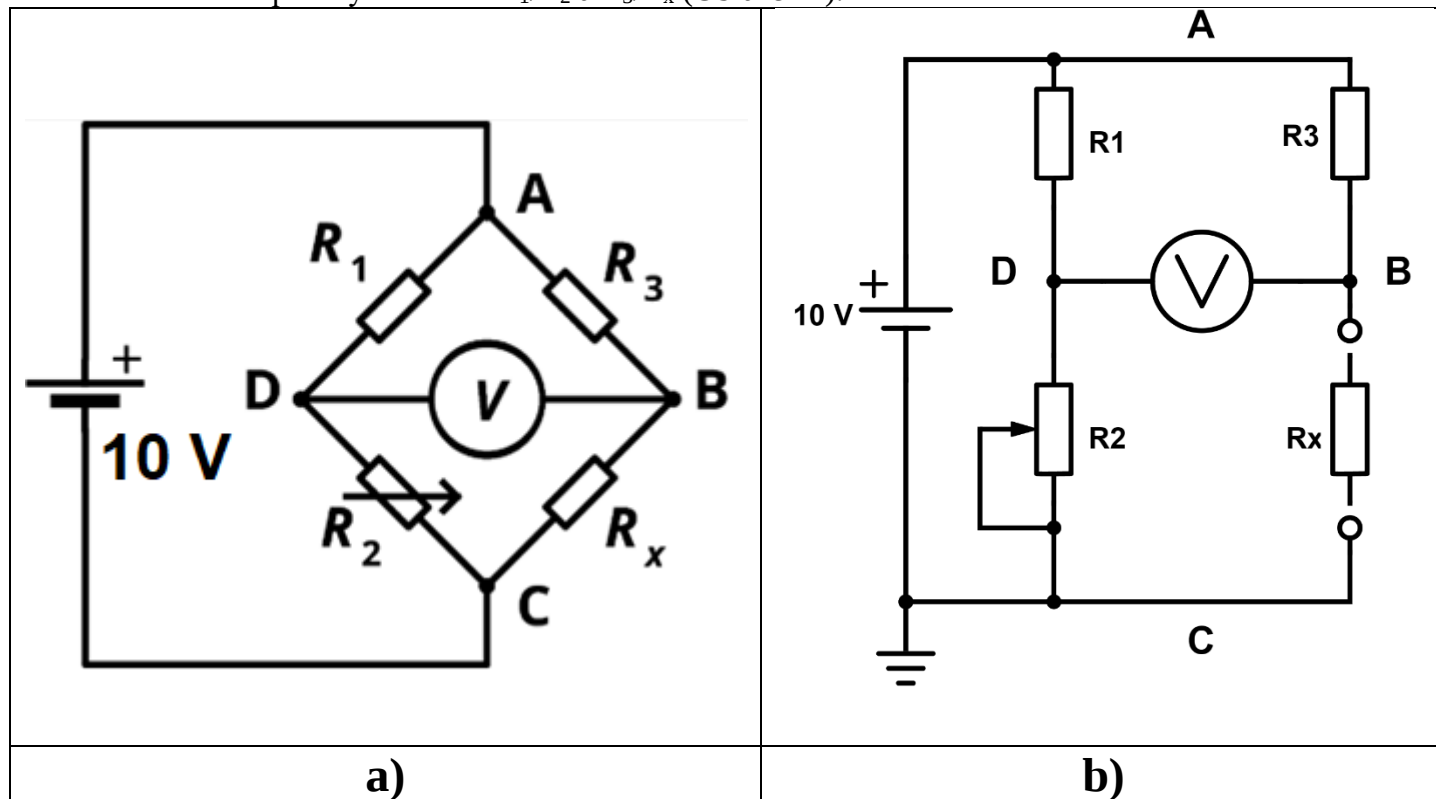
Malému měřenému odporu odpovídá velký proud, proto ohmmetry mívají nulu na pravé straně stupnice.

Označení $\pm$ u měřicích svorek umožňuje orientační měření diod a

tranzistorů: Dáme-li plus na anodu diody, mínus na katodu, dioda má vést proud, ohmmetr má ukázat malý odpor. Při obrácené polaritě dioda nemá vést, ohmmetr má ukázat nekonečný odpor.

6.4.3 Můstkové měření odporu

Metoda je založená na porovnání měřeného odporu R_x s proměnným odporem R_2 známé hodnoty. Zapojení se skládá ze dvou napěťových děličů: R_1/R_2 a R_3/R_x (Obrázek 1):



Obrázek 39: Měření odporu můstkovou metodou;

a) obvyklý způsob kreslení, b) to samé, nakreslené jako obvyklé schéma

Předpokládejme pro jednoduchost, že R_1 a R_3 jsou stejné a mají hodnotu např. $6\text{ k}\Omega$. Měřený odpor je např. $4\text{ k}\Omega$ (ale to my zatím nevíme). Jaké napětí bude v bodě B? Napětí zdroje 10 V se rozdělí v poměru odporů R_3 a R_x , tj. na 6 V nahoře, 4 V dole. V bodě B je tedy napětí 4 V . Proměnný odpor R_2 teď nastavíme tak, aby v bodě D bylo napětí rovněž 4 V . Jak to poznáme? Voltmetr ukazuje rozdíl napětí mezi body D a B. Jsou-li napětí v těchto bodech stejná, voltmetr ukáže nulu. A jsou-li napětí v bodech D a B stejná, musí být stejné i odpory R_2 a R_x . Na stupnici R_2 teď přečteme hodnotu R_x .

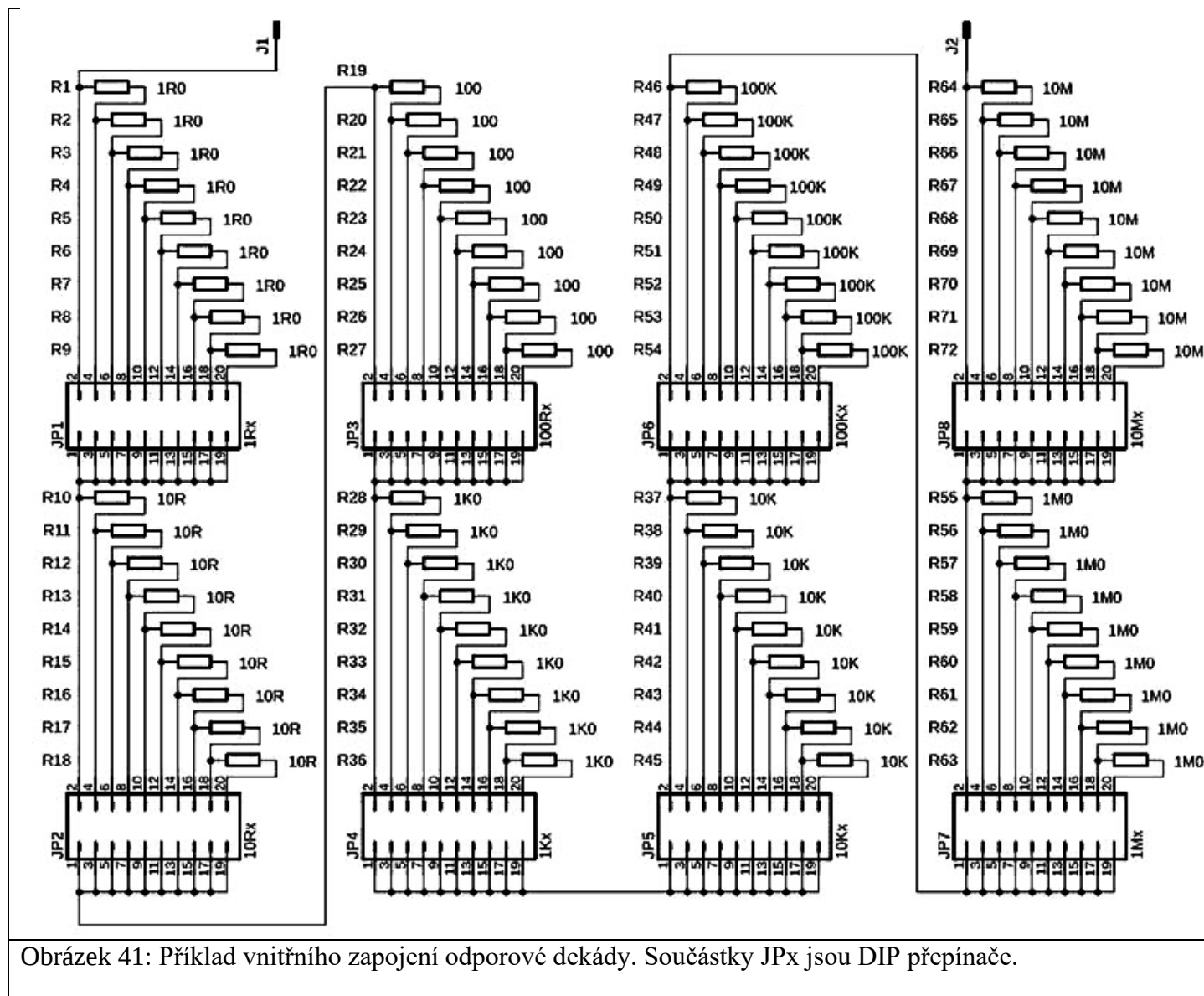
Postup při měření je tedy tento: Připojíme měřený odpor R_x . Pomocí proměnného odporu R_2 nastavíme nulové napětí na voltmetru. Přečteme nastavenou hodnotu R_2 . Ta se rovná měřené hodnotě R_x .

Voltmetry pro tyto účely se obvykle dělají s nulou uprostřed, což usnadňuje vynulování můstku. V této souvislosti se tento přístroj často nazývá galvanometr – na počest italského vědce Luigi Galavaniho, který učinil jedny z prvních objevů v oblasti elektřiny.

Jako proměnný odpor se zde používají tzv. odporové dekády. S jejich pomocí se dají snadno nastavit velmi přesné odpory (Ω).

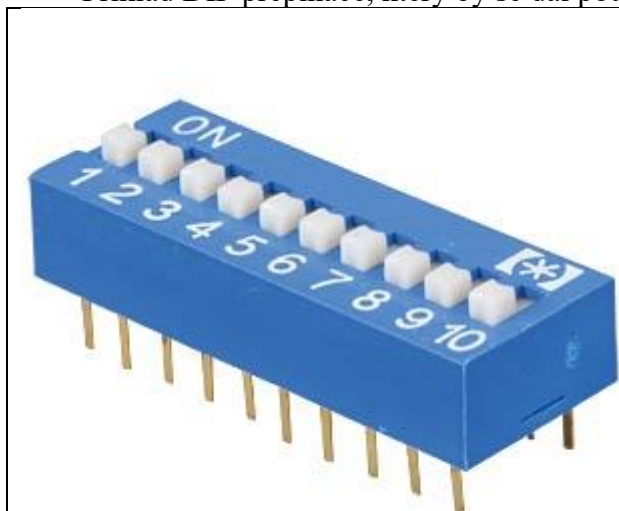


Obrázek 40: Odporová dekáda $10\text{ M}\Omega$, krok $1\text{ }\Omega$, přesnost 1 %



Obrázek 41: Příklad vnitřního zapojení odporové dekády. Součástky JPx jsou DIP přepínače.

Příklad DIP přepínače, který by se dal použít pro dekádu z předchozího obrázku:



Obrázek 42: Příklad přepínače DIP

6.4.4 Měření izolačního odporu

Izolační odpor spotřebiče je odpor mezi částmi pod napětím a vodivými částmi, přístupnými dotyku. Je to např. odpor mezi elektrickým vnitřkem pračky a jejím kovovým krytem, nebo odpor mezi elektrickým vnitřkem vrtáčky a jejím kovovým sklíčkem.

Izolační odpor brání „prosakování“ elektrického proudu z živých částí tam, kde by mohl ublížit obsluze. Je důležitou součástí ochrany proti úrazu, proto dále stručně shrneme zásady těchto ochran.

Izolační odpor se měří při napětí nejméně 500 V. Hodnota izolačního odporu nesmí být menší než 1 MΩ.

a) Ochrany před úrazem – spotřebiče třídy 1 a 2

O těchto ochránách se také mluví jako o ochránách „pro případ poruchy“. Takovou poruchou bývá např. prodření izolace. Dále popíšeme, jak jsou při takové poruše chráněny spotřebiče třídy 1 a 2.

Spotřebiče třídy 1 jsou chráněny připojením vnějších vodivých částí na ochranný vodič a samočinným odpojením spotřebiče v případě poruchy. Dojde-li např. u pračky k prodření izolace a dotyku fáze s kotrrou, nastane zkrat mezi fází a ochranným vodičem. Tím se vybaví (= vypne) jistič nebo pojistka a spotřebič se odpojí.

Spotřebiče třídy 2 jsou chráněny dvěma vrstvami izolace. Prodře-li se jedna vrstva izolace, uživatel je chráněn druhou vrstvou, což obvykle bývá nevodivý plastový kryt spotřebiče.

Obrázek 43 ukazuje připojení a ochranu různých druhů spotřebičů. V levé škrtnuté části obrázku jsou příklady zapojení v soustavě TN-C, které se v nových instalacích nesmějí používat. V pravé části obrázku jsou zapojení v soustavě TN-S, které jsou podstatně bezpečnější.

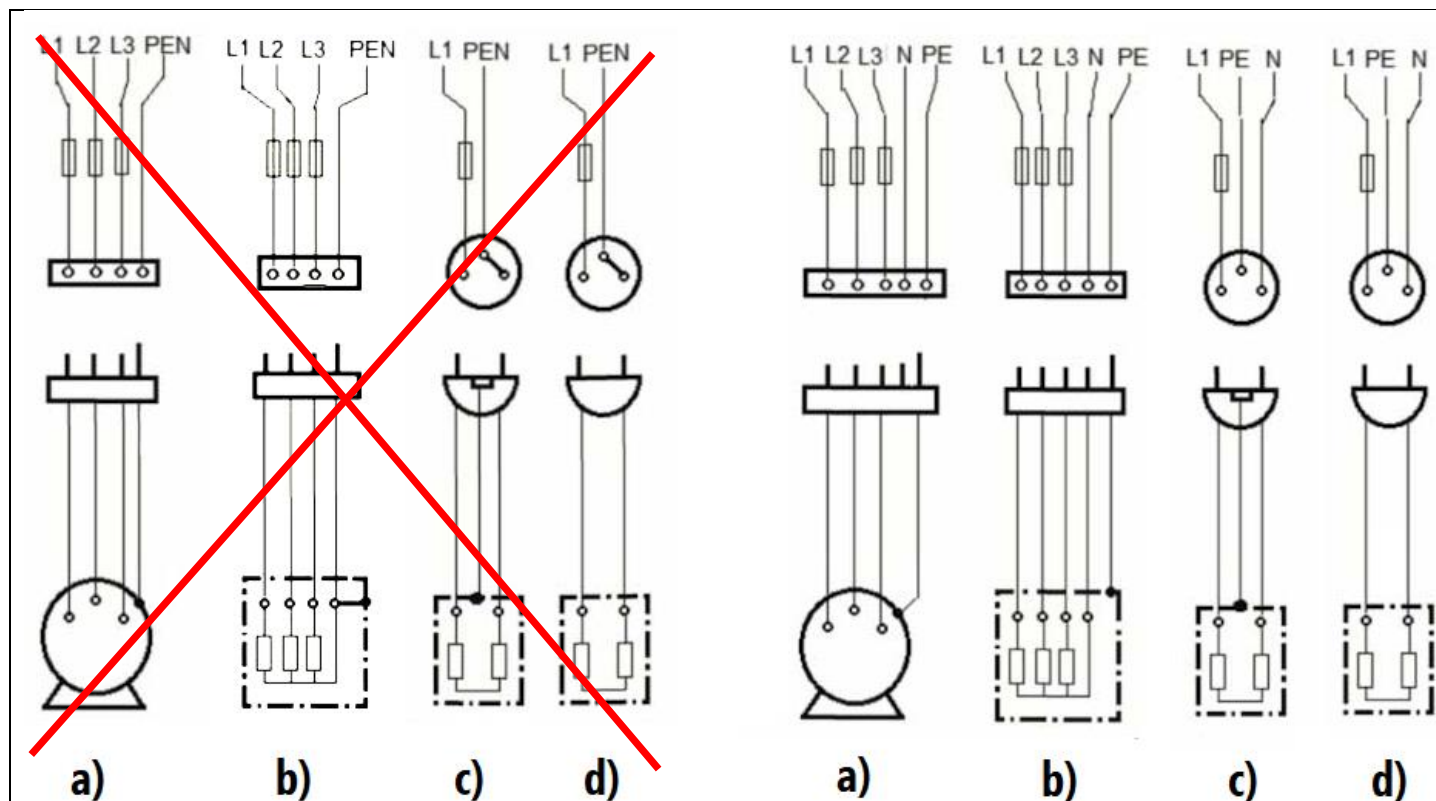
Na obrázcích a) jsou trojfázové spotřebiče, které nemají a nepotřebují nulový vodič, např. trojfázový motor.

Na obrázcích b) jsou trojfázové spotřebiče, které mají nulový vodič, např. akumulární ohřívač vody (lidově bojler).

Na obrázcích c) jsou jednofázové spotřebiče třídy 1, využívající ochranný vodič PE, např. pračka.

Na obrázcích d) jsou jednofázové spotřebiče třídy 2, které ochranný vodič PE nepoužívají, např. ruční kuchyňský mixér.

Na obrázcích a), b), c) jsou spotřebiče třídy 1, na obrázcích d) spotřebiče třídy 2.



Obrázek 43: Ochrany proti úrazu v případě poruchy;

a) trojfázový spotřebič bez nulového vodiče,

b) trojfázový spotřebič s nulovým vodičem,

c) jednofázový spotřebič, třída 1,

d) jednofázový spotřebič, třída 2

b) Měřiče izolačního odporu

Izolační odpor se měří přístrojem zvaným megohmmetr, přesněji měřič izolačního odporu (dále měřič).



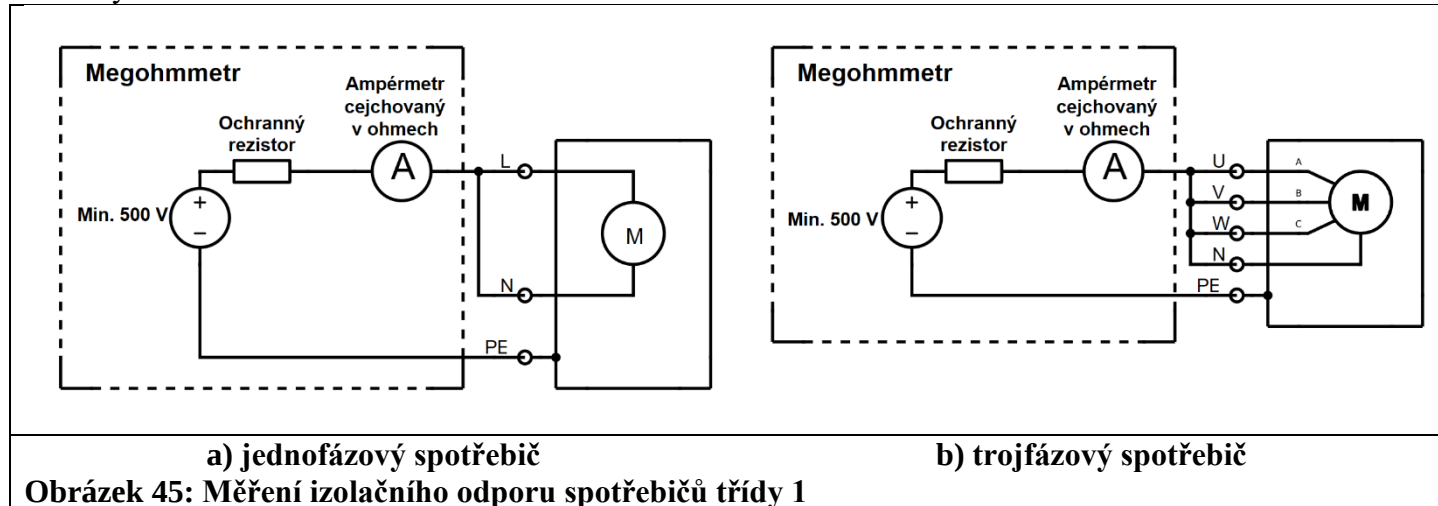
Obrázek 44: Megohmmetr = měřič izolačního odporu Fluke 1507

c) Měření izolačního odporu spotřebičů třídy 1

Měřič se zapojí mezi spojené pracovní vodiče spotřebiče a přípojně místo PE vodiče.

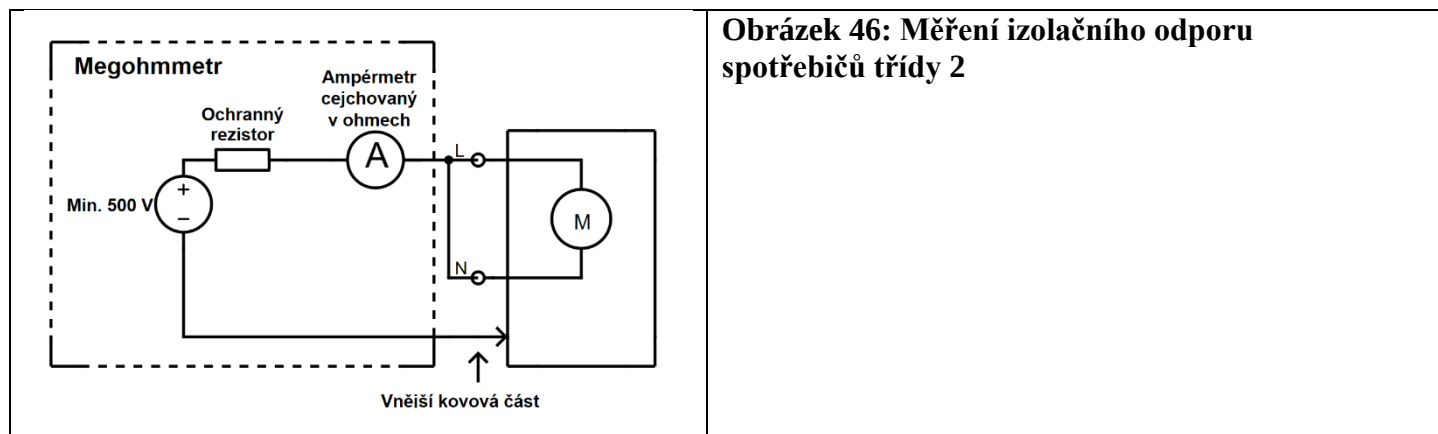
Při měření izolačního odporu jednofázového spotřebiče, např. pračky, připojíme jeden vstup měřiče na spojené kolíky vidlice, tj. na fázi (L) a nulový vodič (N). Druhý vstup měřiče zapojíme do dutinky na vidlici, tj. na ochranný vodič PE.

Při měření izolačního odporu trojfázového spotřebiče, např. cirkulárky, připojíme jeden vstup měřiče na spojené pracovní vodiče, tj. všechny fáze (U, V, W) a nulový vodič (N). Druhý vstup měřiče zapojíme na ochranný vodič PE.



d) Měření izolačního odporu spotřebičů třídy 2

Měřič se zapojí mezi spojené pracovní vodiče spotřebiče a kovový díl přístupný zvenku, např. skříňdlo vrtačky.



6.4.5 Měření zemního odporu

Pojem **zemní odpor** označuje elektrický odpor mezi zemnicem (například kovovou elektrodou v zemi) a okolní zemí. Vyjadřuje, jak dobře zemnicí systém odvádí elektrický proud do země.

Měření zemního odporu je důležité hlavně z bezpečnostních důvodů. Správně provedené uzemnění chrání lidi a zařízení před nebezpečným napětím.

Zemní odpor je velmi důležitý např. u **hromosvodu**, protože při zásahu bleskem musí být proud bezpečně odveden do země. Pokud by byl zemní odpor příliš vysoký, bleskový proud by se nedostal snadno do země a mohl by způsobit škody nad zemí, např. zapálit dům.

a) Měřiče zemního odporu

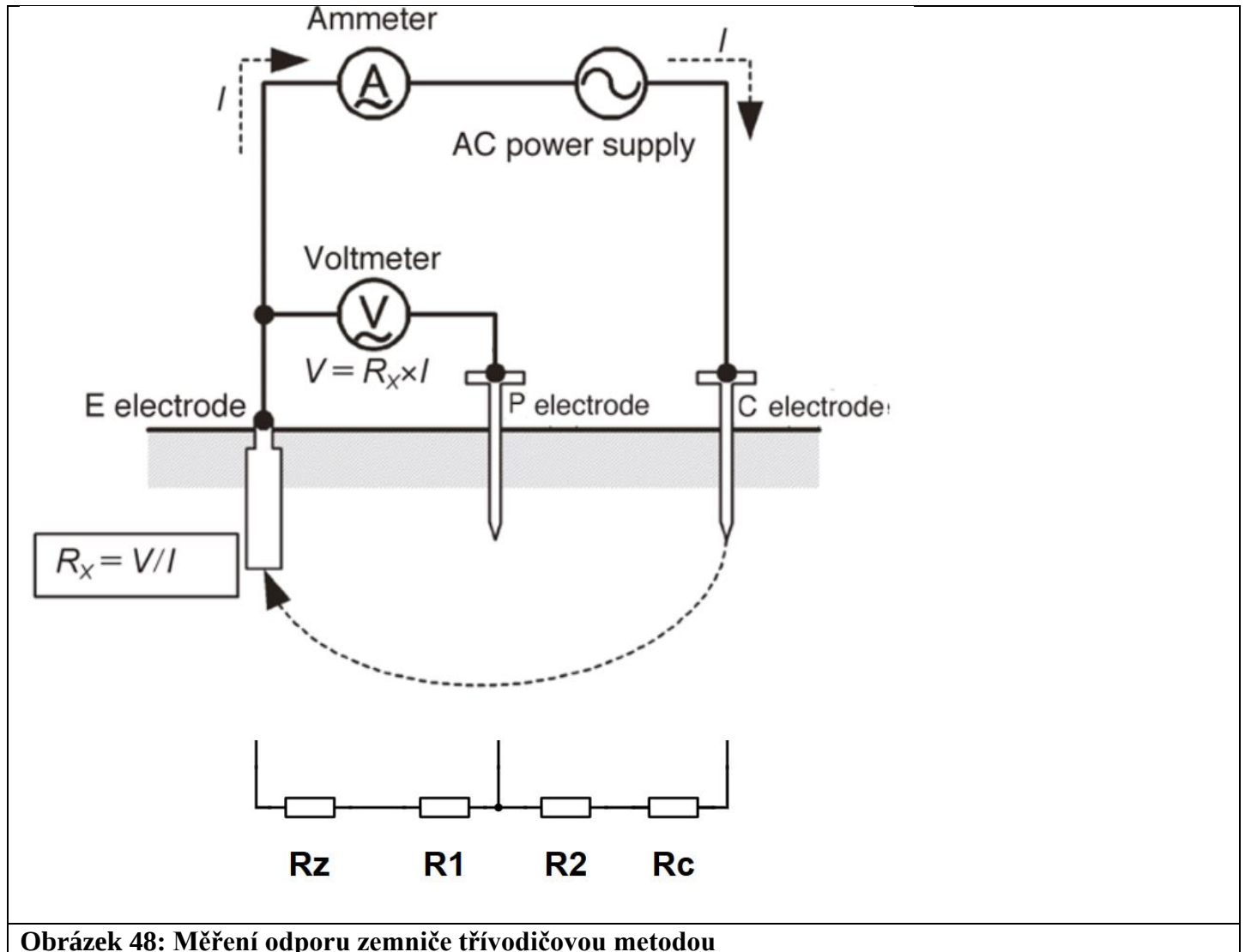
Zemní odpor se měří přístrojem měřič zemního odporu (dále měřič).



Obrázek 47: Měřič
zemního odporu
Fluke 1625

b) Měření zemního odporu třívodičovou metodou

Odpor zemniče vůči zemi nelze měřit přímo, protože k tomu zemniči do země není přístup. Proto se používají různé nepřímé metody. Z nich nejjednodušší je třívodičová metoda (Wennerova) (**Obrázek 48**):



Obrázek 48: Měření odporu zemniče třívodičovou metodou

V zemi máme tři elektrody:

- měřený zemnič (E = Earth = zemnič)
- napěťovou elektrodu (P = Potential = napětí)
- proudovou elektrodu (C = Current = proud)

Zdroj střídavého napětí vnucuje do země proud přes elektrody **E** a **C** (přes **P** žádný proud neteče, na ní je jen voltmetr). Proud, který zemí poteče, je dán napětím zdroje a součtem všech odporů, které proud musí v zemi překonat:

- **R_z** – přechodový odpor mezi zemí a elektrodou **E**
- **R₁** – odpor země mezi elektrodami **P** a **E**
- **R₂** – odpor země mezi elektrodami **C** a **P**
- **R_c** – přechodový odpor mezi elektrodou **C** a zemí

Přechodové odpory mezi zemí a elektrodami (**R_z**, **R_c**) jsou mnohem větší, než odpory masy země mezi elektrodami (**R₁**, **R₂**). Odpory **R_c** a **R₂** nás nezajímají, protože voltmetrem měříme napětí jen na **R_z** a **R₁**.

Chceme pomocí Ohmova zákona spočítat odpor **R_z**. Známe přesně proud, který přes něj teče. Napětí na něm ale neznáme přesně, protože voltmetr měří součet napětí na **R_z** a **R₁**. Ale víme, že odpor **R₁** je proti **R_z** velmi malý. Proto jej ve výpočtu můžeme zanedbat a odpor **R_z** s malou chybou spočítat takto:

$$R_z \doteq \frac{U_{AC}}{I} \quad 1$$

Zdroj napětí musí být střídavý, protože stejnosměrný proud by způsobil tzv. polarizaci elektrod. Při stejnosměrném proudu se rozkladem zemní vlhkosti (= elektrolyzou) kolem elektrod vytvářejí bublinky rozložených plynů, které znemožní kontakt elektrod se zemí.

Pro měření se používá jiný kmitočet než kmitočet sítě (např. 128 Hz nebo 147 Hz), protože v zemi mohou být bludné proudy z různých jiných zdrojů, které by zkreslovaly měření.

6.5 Měření kapacity

6.5.1 Kapacitní reaktance

Kapacitní reaktance vyjadřuje, jak se kondenzátor brání průchodu střídavého proudu. Podobně jako odpor se udává v ohmech [Ω].

$$X_c = \frac{1}{\omega C} \quad [\Omega]$$

kde ω je takzvaná úhlová rychlost:

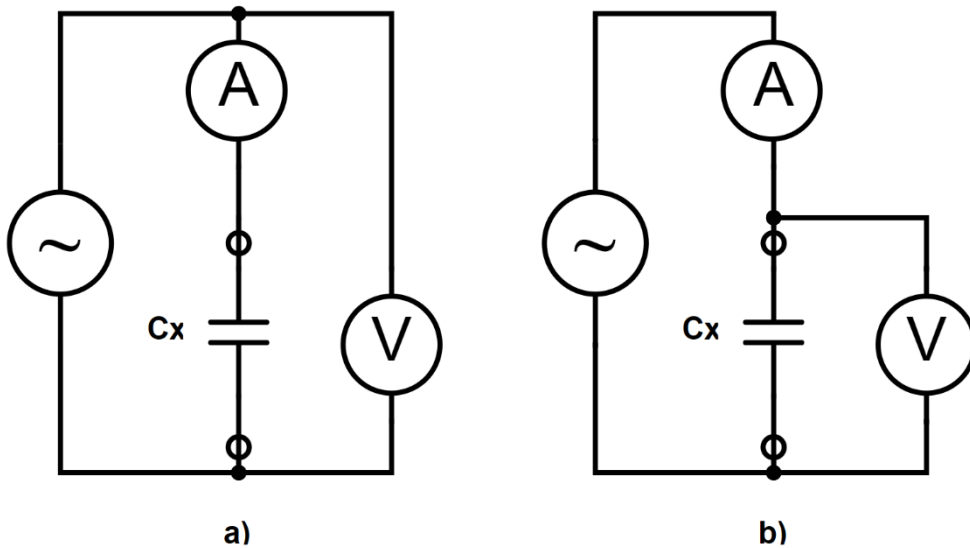
$$\omega = 2\pi f$$

$$X_c = \frac{1}{2\pi f * C} \quad [\Omega]$$

Ze vzorce vidíme, že kapacitní reaktance je tím menší, čím je větší kmitočet **f** a čím je větší kapacita **C**. Čím je větší kmitočet **f** a čím je větší kapacita **C**, tím ochotněji kondenzátor propouští střídavý proud.

¹ Znak $\doteq$ zde znamená "rovná se přibližně".

6.5.2 Nepřímé měření kapacity



Obrázek 49: Nepřímé měření kapacity

Pro nepřímé měření kapacity (**Obrázek 49**) použijeme podobná zapojení jako pro nepřímé měření odporu. Ze změřeného napětí U a proudu I vypočteme kapacitní reaktanci X_c :

$$X_c = \frac{U}{I} [\Omega]$$

Přes kapacitní reaktanci můžeme z napětí a proudu vypočítat kapacitu:

$$\frac{U}{I} = \frac{1}{\omega C_x} [\Omega]$$

$$C_x = \frac{I}{\omega U} [F]$$

$$C_x = \frac{I}{2\pi f U} [F]$$

Metodu dle obrázku a) zvolíme pro měření při velkém napětí, metodu b) pro měření při velkém proudu – podobně jako při měření odporů.

Příklad:

Naměřili jsme hodnoty:

- Střídavé napětí $U = 15 \text{ V}$
- Střídavý proud $I = 0.03 \text{ A}$
- Frekvence $f = 50 \text{ Hz}$

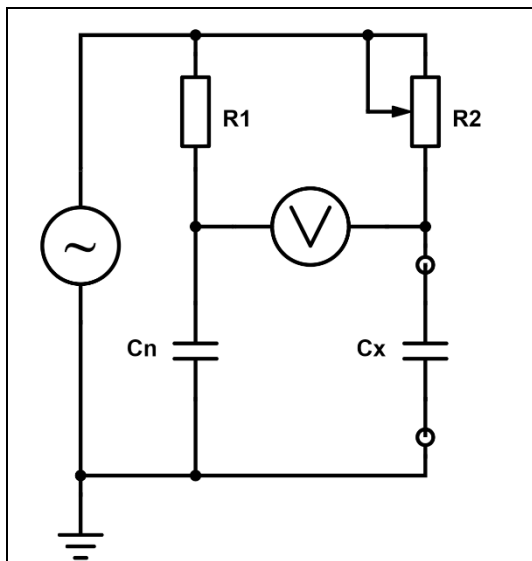
Použijeme vzorec:

$$C_x = \frac{I}{2\pi f U} [F]$$

Dosadíme do vzorce:

$$C_x = \frac{0,03}{2 * \pi * 50 * 15} = 6,37 * 10^{-6} \text{ F} = 6,37 \mu\text{F}$$

6.5.3 Měření kapacity můstkovou metodou



Obrázek 50: Měření kapacity můstkovou metodou

Při měření kapacity můstkovou metodou (**Obrázek 50**) vytvoříme jeden napěťový dělič z normálového kondenzátoru C_n známé hodnoty a známého rezistoru R_1 . Druhý dělič vytvoříme z měřeného kondenzátoru C_x a proměnného odporu R_2 . Oba dělice napájíme ze zdroje střídavého napětí.

Regulací proměnného odporu R_2 nastavíme na měřeném kondenzátoru C_x stejné napětí, jako je na normálovém kondenzátoru C_n . Že jsou obě napětí stejná, poznáme z toho, že voltmetr ukazuje nulový rozdíl napětí.

Napětí v dělicích se rozdělilo v poměru odporů a kapacitních reaktancí:

$$\frac{R_1}{\frac{1}{\omega C_n}} = \frac{R_2}{\frac{1}{\omega C_x}}$$

Úpravou této rovnice dostaneme:

$$\frac{R_1}{\frac{1}{C_n}} = \frac{R_2}{\frac{1}{C_x}}$$

$$C_n R_1 = C_x R_2$$

$$C_x = C_n \frac{R_1}{R_2}$$

Poslední rovnice říká, že neznámou kapacitu můžeme určit ze dvou hodnot známých (C_n , R_1) a jedné hodnoty proměnné (R_2). Stupnice proměnného rezistoru R_2 proto může být ocejchována v hodnotách kapacity měřeného kondenzátoru.

Ve skutečnosti je měření můstkovou metodou složitější. Skutečné kondenzátory mají totiž ztráty, způsobené např. svodem dielektrika. Abychom mohli můstek vyvážit a voltmetr ukazoval nulové napětí, musí mít můstek ještě další ovládací prvky, kterými vyvážíme vliv ztrát v kondenzátorech. Pomocí takového můstku pak můžeme určit i ztráty měřeného kondenzátoru.

6.6 Měření indukčnosti

6.6.1 Induktivní reaktance

Induktivní reaktance vyjadřuje, jak se cívka brání průchodu střídavého proudu. Podobně jako odpor se udává v ohmech $[\Omega]$.

$$X_L = \omega L [\Omega]$$

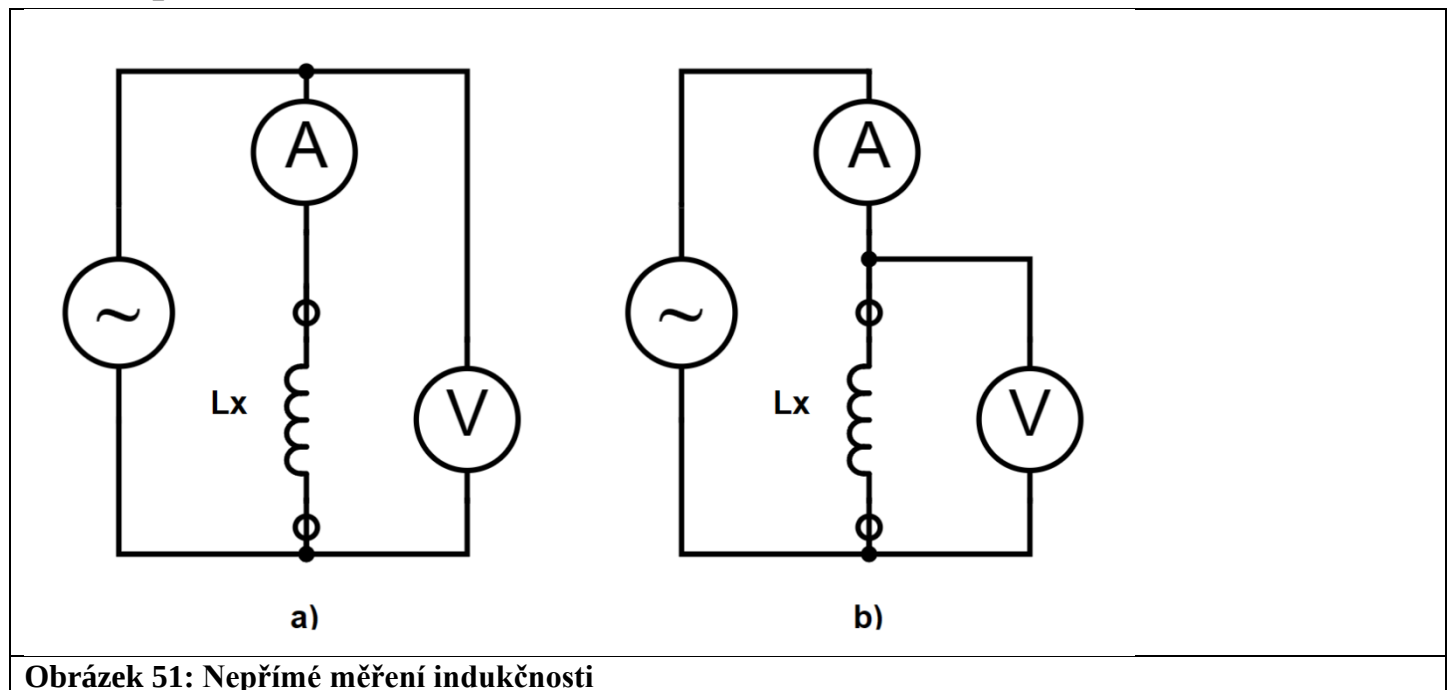
kde ω je takzvaná úhlová rychlost:

$$\omega = 2\pi f$$

$$X_L = 2\pi f L [\Omega]$$

Ze vzorce vidíme, že induktivní reaktance je tím větší, čím je větší kmitočet f a čím je větší indukčnost L . Čím je větší kmitočet f a čím je větší indukčnost L , tím víc se cívka brání střídavému proudu.

6.6.2 Nepřímé měření indukčnosti



Obrázek 51: Nepřímé měření indukčnosti

Pro nepřímé měření indukčnosti (**Obrázek 51**) použijeme podobná zapojení jako pro nepřímé měření odporu. Metodu dle obrázku **a)** zvolíme pro měření při velkém napětí, metodu **b)** pro měření při velkém proudu – podobně jako při měření odporů.

Indukčnost vypočteme ze změřeného napětí a proudu:

$$X_L = \omega L_x \text{ } [\Omega]$$

$$X_L = \frac{U}{I} \text{ } [\Omega]$$

$$\omega L_x = \frac{U}{I}$$

$$L_x = \frac{U}{\omega I} \text{ } [H]$$

$$L_x = \frac{U}{2\pi f I} \text{ } [H]$$

Příklad:

Naměřili jsme hodnoty:

- Střídavé napětí $U = 24 \text{ V}$
- Střídavý proud $I = 0.2 \text{ A}$
- Frekvence $f = 50 \text{ Hz}$

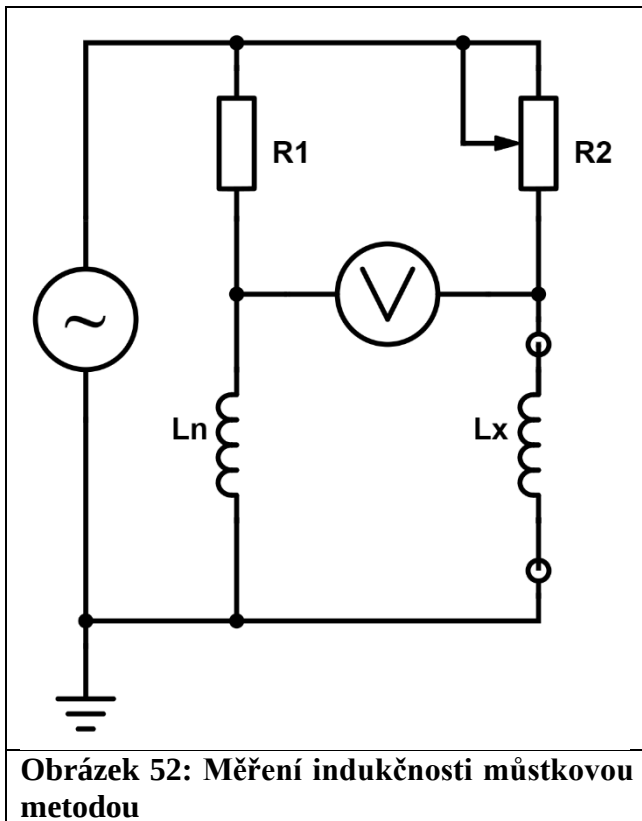
Použijeme vzorec:

$$L_x = \frac{U}{2\pi f I} \text{ } [H]$$

Dosadíme do vzorce:

$$L_x = \frac{24}{2\pi * 50 * 0,2} = 0,382 \text{ H}$$

6.6.3 Měření indukčnosti můstkovou metodou



Obrázek 52: Měření indukčnosti můstkovou metodou

Při měření indukčnosti můstkovou metodou (**Obrázek 52**) vytvoříme jeden napěťový dělič z normálové cívky L_n známé hodnoty a známého rezistoru R_1 . Druhý dělič vytvoříme z měřené cívky L_x a proměnného odporu R_2 . Oba děliče napájíme ze zdroje střídavého napětí.

Regulací proměnného odporu R_2 nastavíme na měřené cívce L_x stejné napětí, jako je na normálové cívce L_n . Že jsou obě napětí stejná, poznáme z toho, že voltmetr ukazuje nulový rozdíl napětí.

Napětí v děličích se rozdělilo v poměru odporů a induktivních reaktancí:

$$\frac{R_1}{\omega L_n} = \frac{R_2}{\omega L_x}$$

Úpravou této rovnice dostaneme:

$$R_1 \omega L_x = R_2 \omega L_n$$

$$L_x = L_n \frac{R_2}{R_1}$$

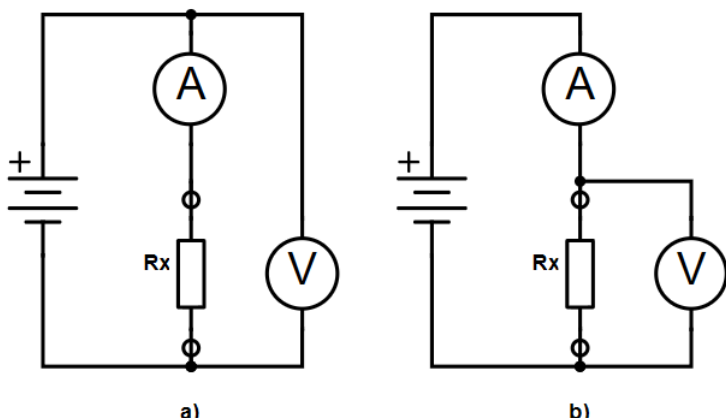
I cívky mají ztráty, způsobené např. ohmickým odporem drátu. Proto musí mít můstek ještě další ovládací prvky, kterými vyvážíme vliv ztrát. Pomocí takového můstku pak můžeme určit i ztráty měřené cívky, vyjádřené např. hodnotou jejího sériového odporu.

6.7 Měření výkonu

Elektrický výkon je možno, podobně jako odpor, měřit přímo a nepřímo. Zapojení pro nepřímé měření jsou totožná se zapojeními pro nepřímé měření odporu.

6.7.1 Nepřímé měření výkonu

Pro nepřímé měření výkonu se používá stejné zapojení jako pro nepřímé měření odporu. Následující výklad bude společný pro nepřímé (**Obrázek 53**) i přímé (**Obrázek 54**, **Obrázek 55**) měření výkonu.



Obrázek 53: Nepřímé měření výkonu

Na obrázcích **a)** se napětí měří voltmetrem nebo napěťovou cívkou „před“ ampérmetrem nebo proudovou cívkou. To znamená, že změřené napětí obsahuje jak napětí na zátěži (to je dobře), tak napětí na ampérmetru nebo proudové cívce (to je špatně).

Na obrázcích **b)** ampérmetr nebo proudová cívka měří jak proud zátěží (to je dobře), tak proud voltmetrem nebo napěťovou cívkou (to je špatně).

Měření je tedy v každém případě zatíženo chybou metody. Tuto chybu lze vypočítat a měřenou hodnotu korigovat.

Zapojení podle obrázků **a)** se hodí spíše pro měření výkonu při velkých napětích a malých proudech, protože při velkém napětí na zátěži je malý úbytek na ampérmetru zanedbatelný.

Zapojení podle obrázků **b)** se hodí spíše pro měření při malých napětích a velkých proudech, protože při velkém proudu do zátěže je malý proud do voltmetru zanedbatelný.

Nepřímé měření výkonu je vhodné ve stejnosměrných obvodech. Ve střídavých obvodech se hodí jen pro odporovou zátěž. U zátěží induktivních (např. elektromotory) nebo kapacitních dává hodnotu zdánlivého výkonu, nikoliv činného, o který nám obvykle jde. Nebere totiž v úvahu fázový posun mezi napětím a proudem.

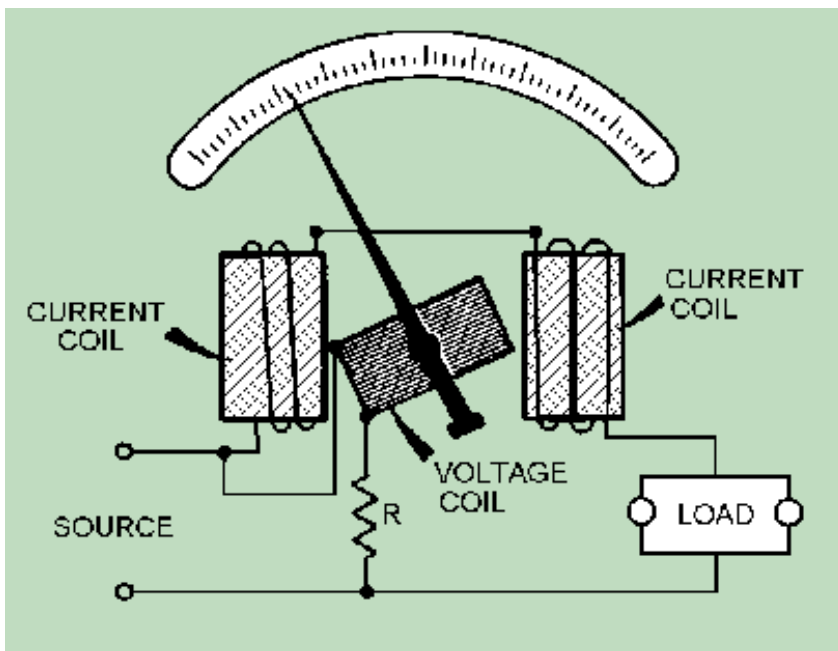
Přímé měření pomocí wattmetru správně dává hodnoty činného výkonu pro všechny druhy zátěže a proudu

6.7.2 Přímé měření výkonu

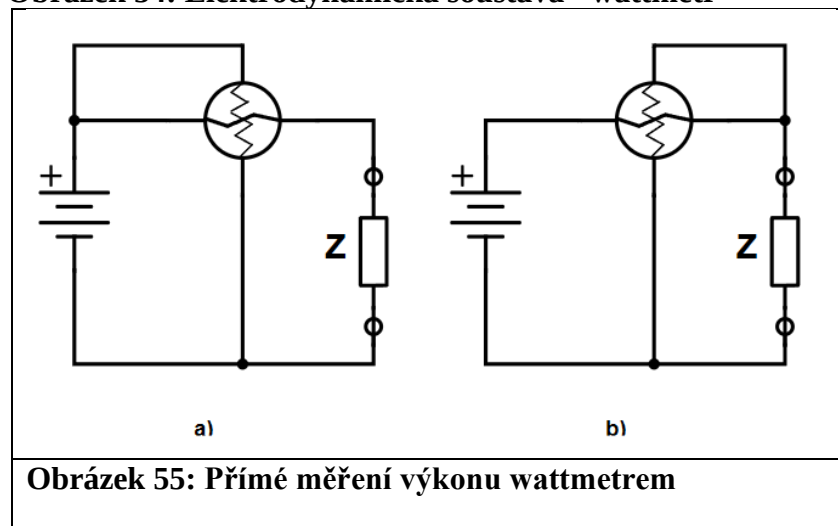
Pro přímé měření výkonu se používá speciální měřicí přístroj – wattmetr. Ten obvykle využívá měřicí soustavu elektrodynamickou.

Wattmetr má dvě cívky – proudovou a napěťovou. Proudová cívka má malý počet závitů tlustého drátu, v obrázcích se značí obvykle tlustou čarou. Napěťová cívka má velký počet závitů tenkého drátu a značí se tenkou čarou.

Proudová cívka je pevná, nepohyblivá. Uvnitř proudové cívky se v jejím magnetickém poli otáčí pohyblivá napěťová cívka.



Obrázek 54: Elektrodynamická soustava - wattmetr



Obrázek 55: Přímé měření výkonu wattmetrem

Magnetické pole proudové cívky závisí na proudu, který protéká spotřebičem. Magnetické pole napěťové cívky závisí na napětí. Na vzájemném působení obou polí záleží, jak daleko se pohyblivá cívka vychýlí. Kdyby proud zátěží byl nulový, magnetické pole proudové cívky by bylo nulové a napěťová cívka by neměla proč se vychýlit. Podobně, kdyby napětí bylo nulové, magnetické pole napěťové cívky by bylo nulové a pohyblivá cívka by se nevychýlila, i kdyby zátěží tekla proud. Jestliže tedy výchylka wattmetru je nulová, je-li proud nebo napětí nulové, znamená to, že výchylka wattmetru závisí na součinu obou veličin – proudu a napětí. Wattmetr tedy pracuje podle známého vzorce

$$P = U \cdot I$$

Wattmetr je možno zapojit dvěma způsoby (**Obrázek 55**). Oba způsoby byly popsány výše v kapitole o nepřímém měření výkonu.

Podrobnější výklad o principu wattmetru viz kapitola „Soustava elektrodynamická“.

7. Měření polovodičových součástek

7.1 Měření diod

7.1.1 Orientační kontrola diod

Diodu můžeme zkontrolovat pomocí ohmmetru. Připojíme-li diodu na ohmmetr v propustném směru, naměříme u dobré diody mnohem menší odpor, než v nepropustném směru.

Odpor zobrazený v propustném směru může být překvapivě velký, např. 100 k Ω . Je to proto, elektronické že ohmmetry se snaží měřit odpor při malém napětí, aby bylo možno měřit odpor rezistorů zapojených v obvodu, aniž by měření bylo příliš ovlivněno polovodičovými součástkami kolem. Při malém napětí se totiž polovodičové přechody neotevrou (viz dále charakteristiky diod) a neteče do nich proud, který by ovlivňoval měření odporu rezistoru.

Proto se také příliš neotevře ani polovodičový přechod naší měřené diody, teče do ní malý proud a na základě tohoto malého proudu ohmmetr oznámí velký naměřený odpor.

7.1.2 Měření voltampérových charakteristik diod

7.2 Měření tranzistorů

7.2.1 Orientační kontrola tranzistorů

7.2.2 Měření voltampérových charakteristik tranzistorů

8. Digitální osciloskop

Digitální osciloskop je zařízení, které umožňuje uložit elektrický signál do paměti a z této paměti ho pak zobrazovat.

8.1 Výhody paměťového zobrazení

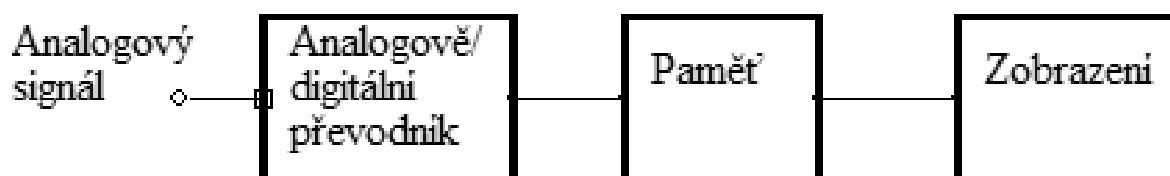
Uložíme-li zobrazovaný signál do paměti, získáme tyto výhody:

- Obraz na obrazovce lze zastavit (zmrazit) a pak studovat libovolně dlouho. Trvání obrazu není omezeno dosvitem obrazovky.
- Obraz lze z paměti přenést do jiného zařízení, např. počítače, tiskárny, modemu.
- Obraz lze zpracovávat např. zprůměrnováním, časovou nebo napětíovou lupou, Fourierovou transformací¹.
- Je možno zobrazit nejen to, co následovalo po okamžiku spuštění, ale i to, co mu předcházelo. To je výhodné pro zobrazení jednorázových dějů.
- Je možno zobrazovat i pomalé děje, např. EKG.

8.2 Princip

Vzorky signálu se převádějí na čísla, která se zapisují do číslicové paměti, např. RAM. Z paměti se pak vzorky vybírají v tom rytmu, který je potřebný pro zobrazení. Zápis do paměti a výběry z ní mohou být na sobě nezávislé. To umožňuje transformaci času tak, že zápis je rychlejší než čtení nebo obráceně.² Např. perioda signálu o kmitočtu 1 Hz může být zobrazována časovou základnou, která má periodu 5 ms.

8.3 Blokové schéma



Obrázek 56: Blokové schéma paměťového zobrazení

Analogově – digitální převodník (ADP) převádí vzorky vstupního analogového signálu na čísla. Ta se ukládají do paměti. Z paměti se potom čísla vybírají a zobrazí se na obrazovce obdobně jako na monitoru počítače.

8.4 Způsoby obnovování obrazu

Křivku na obrazovce je nutno obnovovat podle toho, jak se mění zobrazovaný signál. Křivku je možno obnovovat

- jednorázově
- plynule

¹ The FFT (fast Fourier transform) math function mathematically converts a time-domain waveform into its frequency components. It is very useful for analyzing the input signal on oscilloscope.

² Podobně funguje funkce „Timeshift“ u DVD rekordérů: Během nahrávání pořadu je možno sledovat záznam v jiném místě, a to i zrychleně nebo zpomaleně.

a) Jednorázové obnovování křivky

Jednorázově obnovujeme křivku u jednorázových dějů, které proběhnou jen jednou, nebo u krátkých dějů, které mají dlouhou periodu opakování. Jednorázově se obnovují také signály velmi rychlé, které není možno obnovovat plynule.

Zobrazujeme-li rychlé signály, není možné obraz obnovovat při každé změně signálu. Např. zobrazujeme-li signál s kmitočtem 1 MHz (tj. s periodou 1 μ s), není možné s každou periodou signálu přepsat celý obsah paměti a znovu zobrazit na obrazovce. Za 1 μ s by nebylo možné to stihnout a ani to není potřeba. Lidské oko by stejně tak rychlé změny nestačilo sledovat.

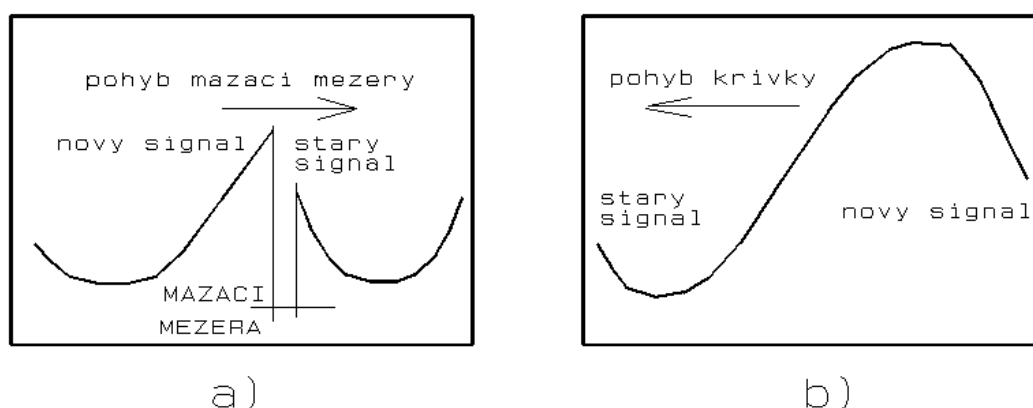
Jednorázově se obraz obnovuje

- automaticky
 - pravidelně po určitém čase
 - při výskytu očekávaného děje
- ručně, stiskem tlačítka

b) Plynulé obnovování křivky

Pomalé signály, například EKG¹, je možno obnovovat plynule. Přitom jsou dvě možnosti:

- přepisovací mezera
- plovoucí obraz



Obrázek 57: Způsoby obnovování obrazu. a) přepisovací mezera, b) plovoucí obraz

Přepisovací mezera se pohybuje po stojící křivce zleva doprava. Svým pravým okrajem maže starou křivku, levým okrajem kreslí novou.

Při plovoucím obrazu se celá křivka pohybuje zprava doleva. Nejstarší body se vlevo umazávají, zatímco vpravo se kreslí nové.

Oba způsoby mají svoje výhody i nevýhody, svoje zastánce i odpůrce a jsou přibližně stejně rozšířené i stejně technicky náročné. Některé přístroje mají možnost obou druhů zobrazení.

8.5 Rozlišovací schopnost

Rozlišovací schopnost je schopnost zobrazovat (= rozlišit) malé detaily. Můžeme ji vyjádřit např. minimální zobrazitelnou vzdáleností nebo počtem zobrazovaných řádků a sloupců, např. pixel = 0,28 mm nebo 1024 x 768.

¹ EKG = elektrokardiogram, záznam elektrické aktivity srdce

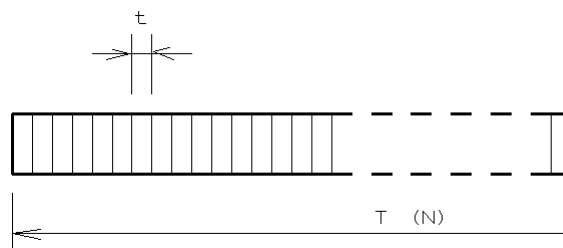
Každý způsob zobrazení má svoje omezení. U klasické fotografie je rozlišovací schopnost omezena velikostí zrna filmu a/nebo papíru, u osciloskopu průměrem paprsku a šumem, u tisku jemností papíru a velikostí bodů, ze kterých je obraz skládán¹.

U paměťového zobrazení je rozlišovací schopnost omezena nejen vlastnostmi zobrazovače, ale i způsobem převodu a ukládání signálu.

Před uložením do paměti musí být signál kvantován² časově a amplitudově. Z tohoto kvantování pak vyplývá dosažitelné vodorovné a svislé rozlišení. Kvantování způsobuje tzv. kvantizační zkreslení, které se při zpracování zvukových signálů projevuje jako charakteristický šum.

8.5.1 Vodorovné rozlišení

Každá paměť má omezený počet míst a můžeme do ní uložit jen odpovídající počet vzorků signálu. Musíme se rozhodnout, jak dlouhý úsek signálu chceme zaznamenat a z toho pak vyplyne časová vzdálenost mezi vzorky (vzorkovací perioda). Nebo naopak si zadáme, jak rychle se má vzorkovat a z toho vyplyne délka zaznamenaného úseku. Chceme-li zaznamenat velmi dlouhý úsek signálu, musíme se smířit s tím, že časová vzdálenost mezi vzorky bude dlouhá. Detaily a změny mezi vzorky pak nemohou být zaznamenány. Naopak,



Obrázek 58: Vztah kapacity paměti a vodorovného rozlišení

zvolíme-li velmi rychlé vzorkování, dostaneme podrobné informace (tj. velké rozlišení), ale jen pro krátký úsek signálu (Obrázek 58).

Mezi délkou zaznamenaného úseku, vzorkovací periodou a počtem míst v paměti je tento vztah:

$$T = N * t = N * 1/f$$

kde

T ... celková délka zaznamenaného úseku

t ... vzorkovací perioda

N ... počet míst v paměti, počet vzorků

Příklady:

a) Signál EKG je vzorkován kmitočtem 200 Hz, tj. odebrá se 200 vzorků za sekundu. Každý vzorek má 8 bitů. Kolik bajtů zabírá v paměti záznam 30 sekund signálu?

Do paměti je nutno uložit $200 * 30 * 8 = 48\,000$ bitů, tj. $48\,000 / 8 = 6\,000$ bajtů.

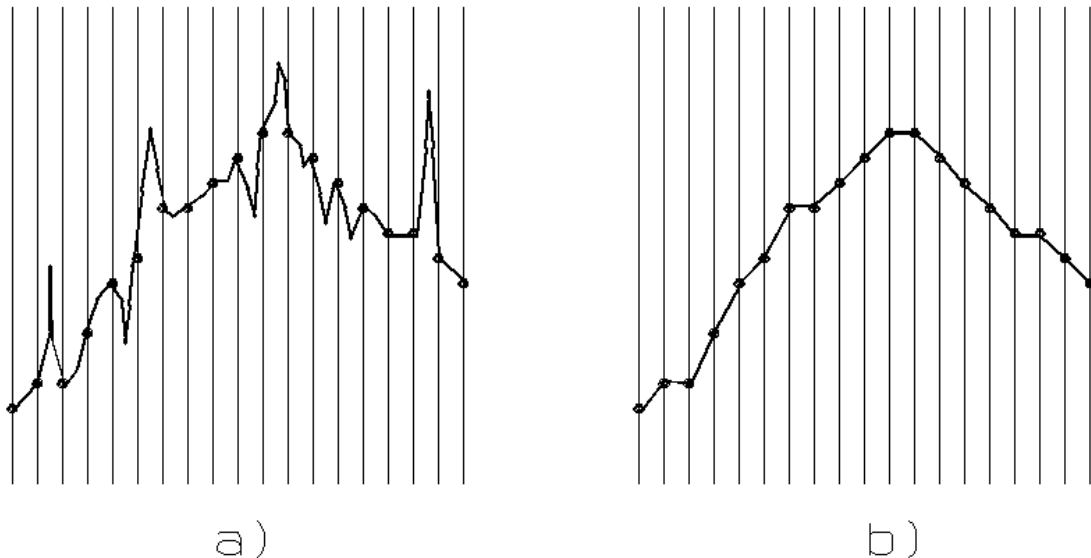
b) Stereofonní zvuk byl zaznamenáván dvoukanálově vzorkovacím kmitočtem 44,1 kHz po dobu 56 sekund. Každý vzorek v každém kanále má 16 bitů. Kolik místa v paměti záznam zabírá?

V paměti je $44\,100 * 56 * 16 * 2 = 7\,902\,720$ bitů, tj. $7\,902\,720 / 8 = 987\,840$ bajtů.

¹ Podívejte se lupou na obrázek v novinách: Skládá se z bodů.

² Kvantování znamená rozdělení na malé úseky.

Pokud vzorkovací perioda není dostatečně malá (tj. vzorkovací kmitočet dostatečně velký), dojde při vzorkování ke značné ztrátě informace a v záznamu budou chybět vysoké kmitočty (Obrázek 59):



Obrázek 59: Rychlý signál se zákmity - a) původní signál, b) signál po vzorkování a rekonstrukci

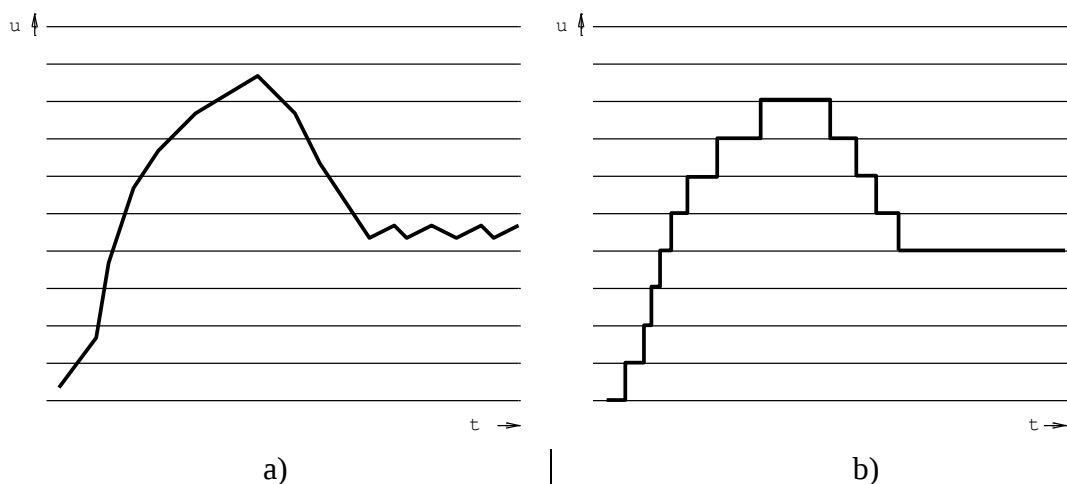
8.5.2 Svislé rozlišení

Velikosti jednotlivých vzorků vyjadřujeme čísly, která ukládáme do paměti. Nejúspornější vyjádření umožňují binární celá čísla. Počet úrovní amplitudy, které můžeme rozlišit, dostaneme, když základ 2 umocníme počtem bitů, které jsou k dispozici. Použijeme-li pro vyjádření velikosti signálu např. osmibitové číslo, pak počet rozlišitelných úrovní je

$$2^8 = 256$$

Úrovně číslováme od 0, proto jejich rozsah v uvedeném příkladu je 0 až 255.

Ty velikosti signálu, které leží mezi úrovněmi, už nelze rozlišit. Proto např. signálu o velikosti 98.63 musíme přiřadit číslo 98, stejně jako signálu o velikosti 98.99 nebo 98.01.



Obrázek 60: Ztráta informace napěťovým (svislým) kvantováním – a) původní signál, b) signál po rekonstrukci

Čím více bitů použijeme pro vyjádření velikosti signálu, tím lepšího svislého rozlišení můžeme dosáhnout. Se zvětšováním počtu bitů mírně stoupají nároky na paměť, prudce stoupají nároky na AD převodník. Vícebitové převodníky jsou podstatně dražší a pomalejší.

8.6 Komerční paměťový osciloskop Voltcraft DSO-2154

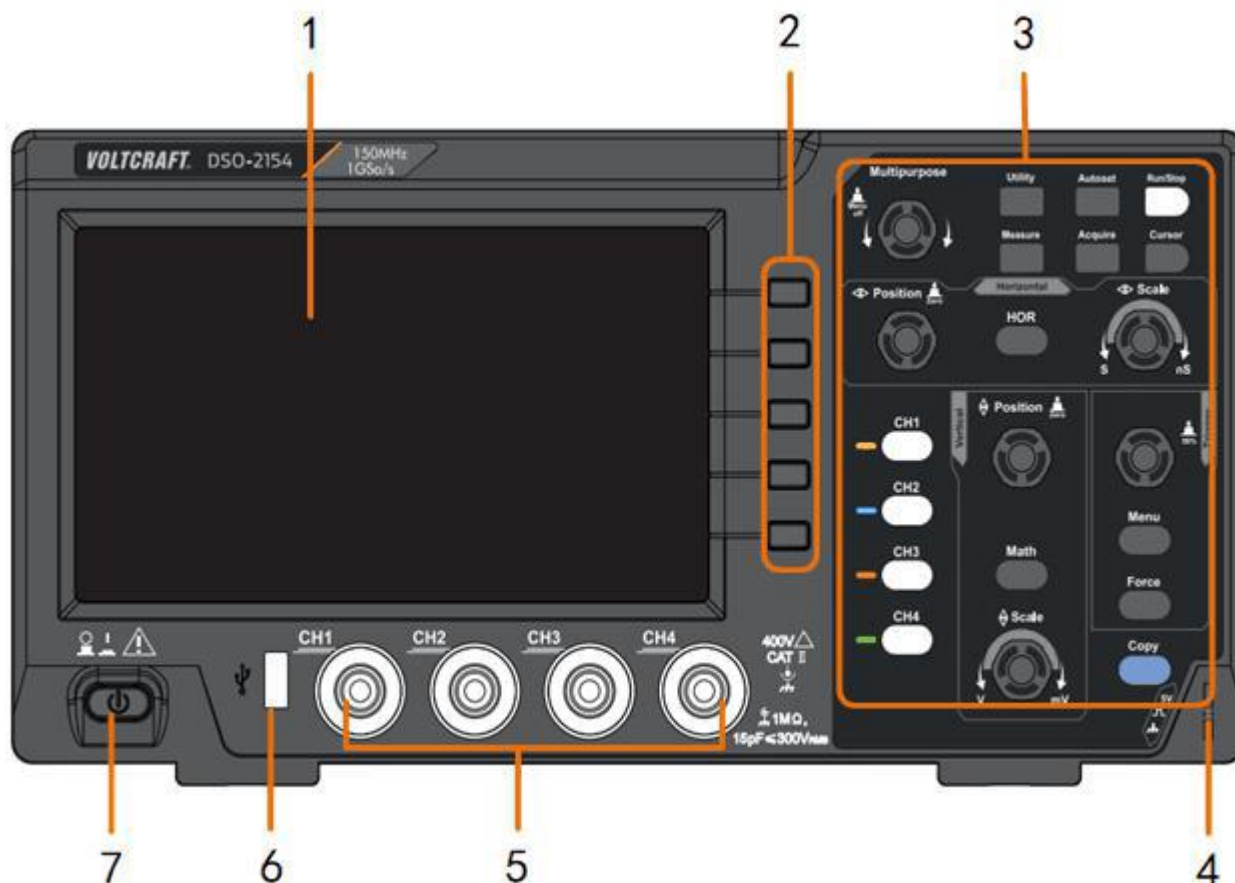
8.6.1 Základní údaje

Model Number	DSO-2154
Manufacturer	Voltcraft
Number of Channels	4
Sensitivity Range	5 mV/d – 5V/d
Bandwidth (3 dB)	150 MHz
Vertical Resolution	8 bits
Display Resolution	800 (Horizontal) × 480 (Vertical) Pixels
Sample Rate	1 GS/s
Scanning speed (S/div)	2 ns/div – 1000 s/div, step by 1 – 2 - 5
Trigger Edges	Rising, Falling
Line Voltage Range	100 - 240 VACRMS, CAT II
Line Frequency	50/60 Hz
Power Consumption	< 15 W

8.6.2 Vlastnosti

a) Ovládání

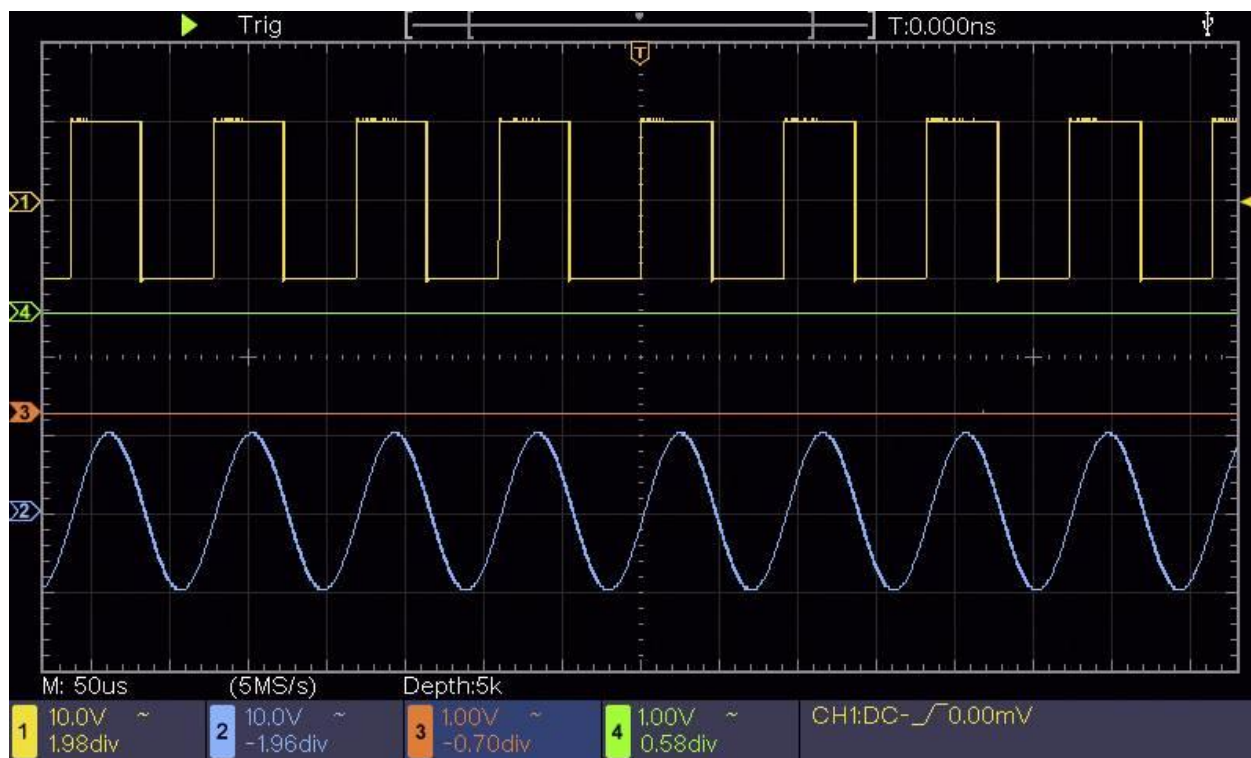
- programovatelné klávesy
- automatické měření času a kmitočtu
- automatické nastavení citlivosti a časové základny
- uložení nastavení ovládacích prvků do paměti
- měření napětí a času pomocí kurzorů



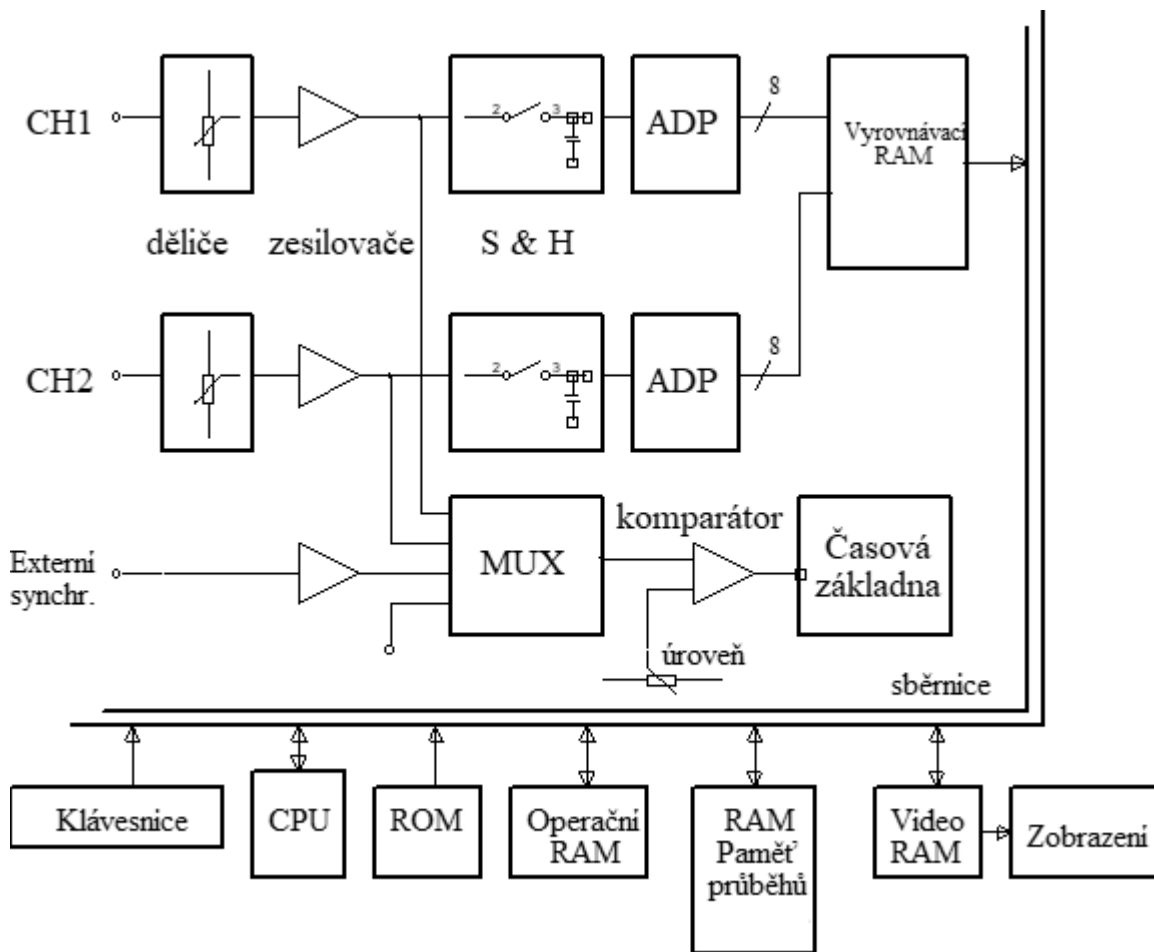
1. Display area
2. Menu selection buttons
3. Control (button and knob) area
4. Probe Compensation: Measurement signal (5V/1kHz) output.
5. Signal Input Channels
6. USB Host port
7. Power on/off

b) Displej

- 4 kanály
- hodnoty citlivosti, časové základny
- nastavení voleb pro spouštění
- popis programovatelných kláves (softkeys)
- výsledky měření
- kurzory



8.6.3 Blokové schéma



Obrázek 61: Blokové schéma Voltcraft DSO-2154

Obrázek 61 ukazuje pro jednoduchost jen zapojení prvního a druhého kanálu. Zapojení třetího a čtvrtého kanálu je identické.

Signály prvního až čtvrtého kanálu procházejí přes děliče a zesilovače do obvodů Sample & Hold („odeber vzorek a drž ho“). Tyto obvody ve velmi krátké době odeberou analogový vzorek signálu a drží jeho hodnotu na svém výstupu po celou dobu, po kterou ADP převádí analogový signál na číslicový. Stabilní hodnota napětí na vstup ADP po celou dobu převodu je nutná pro přesný převod. Dále jsou obvody S&H nutné pro náhodné vzorkování periodických signálů, které umožňuje odebrat dostatečný počet vzorků na periodu i pro velmi rychlé vstupní signály.

Vzorky z ADP jsou ukládány do vyrovnávací RAM. Ta slouží pro přechodné uložení vzorků do doby, než se vypočítá, zda uložený signál splňuje podmínky pro synchronizaci. Z vyrovnávací RAM se vzorky přepisují do paměti průběhů.

Spouštěcí signál se vybírá multiplexerem MUX a přivádí se do komparátoru, kde se porovnává s nastavenou spouštěcí úrovní. Signál z komparátoru je použit pro synchronizaci časové základny.

Veškerá činnost osciloskopu je přes sběrnici řízena mikroprocesorem (CPU). Ten pro svoji činnost potřebuje ROM s programem a operační RAM. CPU snímá povel z klávesnice a dalších ovládacích prvků. Podle nich ovládá všechny parametry osciloskopu (např. citlivost a časovou základnu) a řídí výpisy na obrazovku.

9. Čítače

Čítač je

- elektronická součástka, která slouží k
 - čítání impulsů
 - dělení kmitočtu
- elektronické zařízení, které slouží k měření
 - kmitočtu
 - periody

Dále se budeme zabývat čítačem jako zařízením.

9.1 Princip měření kmitočtu a periody

Měřením kmitočtu nebo periody zjišťujeme tutéž vlastnost signálu, protože kmitočet a perioda jsou vázány vztahem

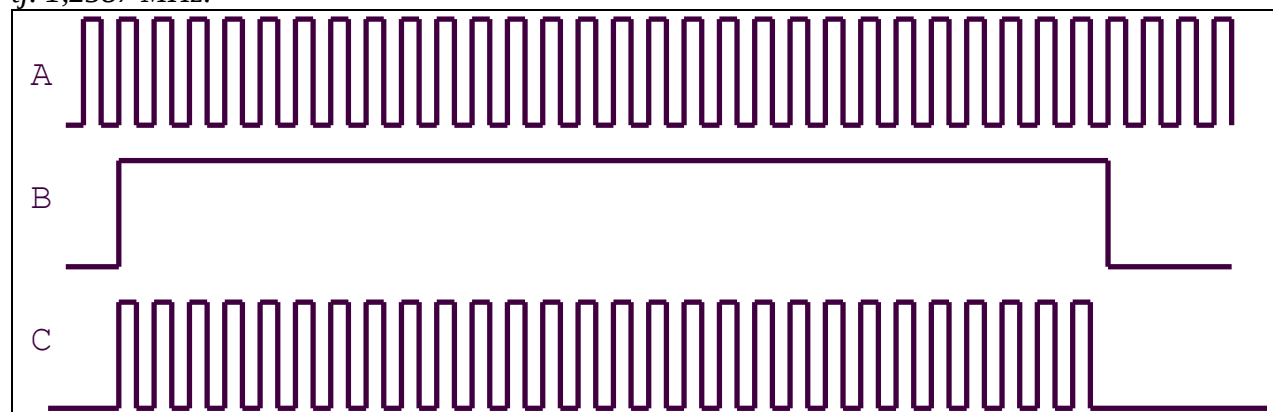
$$f = \frac{1}{T}$$

Při měření kmitočtu i periody musíme mít k dispozici tzv. hodinový signál s přesným kmitočtem, se kterým můžeme měřený signál porovnávat.

Při měření kmitočtu zkoušíme, kolik period signálu se vejde do jednotky času (např. do jedné sekundy). Tím zjistíme přímo kmitočet, periodu snadno dopočítáme. Hodí se pro rychlé signály, při kterých takto za rozumný čas napočítáme velký počet impulsů měřeného signálu a tím získáme dostatečné rozlišení. Hodinový signál má tedy při tomto měření podstatně menší kmitočet než signál měřený. (**Obrázek 62**)

Příklad:

Měříme signál o kmitočtu 1,2587 MHz (tj. 1 258 700 kmitů za sekundu). Hodinový signál pustíme pomalu tak, aby dával kladné impulsy dlouhé 1 s. Po dobu této jedné sekundy pouštíme měřený signál do čítače (součástky). Čítač za 1 s napočítá 1 258 700 impulsů. Jaký je kmitočet? 1 258 700 kmitů za sekundu, tj. 1,2587 MHz.



Obrázek 62: Měření kmitočtu signálu

A – měřený signál

B – hodinový signál, použitý ke hradlování měřeného signálu

C – měřený signál po průchodu hradlem. Počet prošlých impulsů odpovídá změřenému kmitočtu.

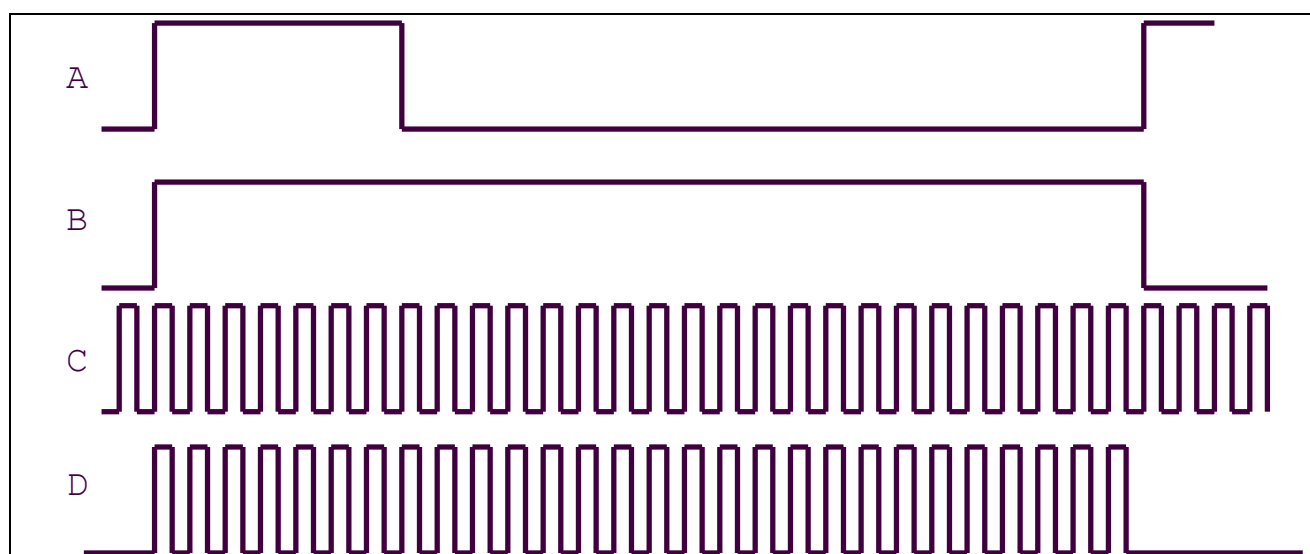
Při měření periody zkoušíme, kolik period hodinového signálu se vejde do jedné periody měřeného signálu. Tím zjistíme délku periody, kmitočet snadno dopočítáme. Hodí se pro pomalé signály s dlouhou periodou, při kterých takto za rozumný čas napočítáme velký počet impulsů hodinového signálu a tím získáme

dostatečné rozlišení. Hodinový signál má tedy při tomto měření podstatně větší kmitočet než signál měřený. (Obrázek 63)

Příklad:

Měříme signál o kmitočtu 0,8 Hz. Jedna perioda tedy trvá více než 1 sekundu, přesně 1,25 s. Měřený signál necháme projít děličem dvěma, tím získáme kladné impulzy o délce periody signálu, tj. 1,25 s. Použijeme hodinový signál o kmitočtu 1 MHz, tj. s délkou periody 1 mikrosekunda. Po dobu jedné periody měřeného signálu (1,25 s) pouštíme hodinový signál s periodou 1 μs do čítače (součástky). Čítač za tu dobu napočítá 1 250 000 mikrosekundových impulzů. Změřili jsme, že délka měřené periody je 1 250 000 μs, tj. 1,25 s. Má-li přístroj zobrazit kmitočet, provede jednoduchou matematickou operaci:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{1,25} = 0,8 \text{ Hz}$$



Obrázek 63: Měření periody signálu

A – měřený signál

B – měřený signál po průchodu děličem dvěma. Délka kladného impulsu je rovna délce periody měřeného signálu. Tento impuls použijeme pro hradlování hodinového signálu.

C – hodinový signál

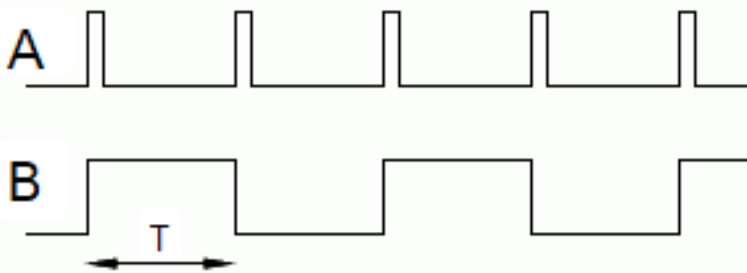
D – hodinový signál po průchodu součinným hradlem. Počet prošlých impulsů odpovídá změřené délce periody.

9.2 Blokové schéma čítače

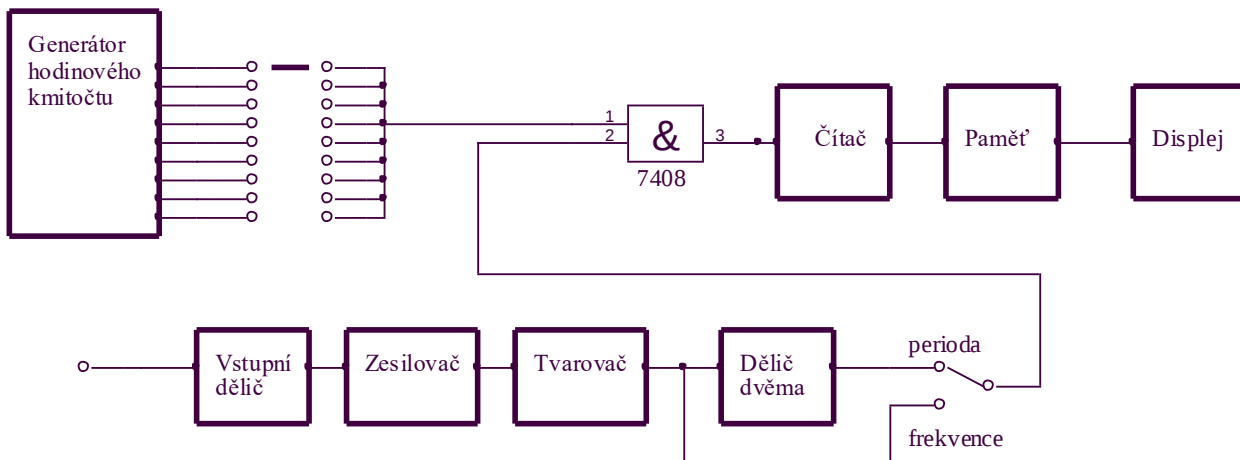
Generátor hodinového kmitočtu dodává sadu kmitočtů, které jsou potřebné k porovnávání s měřeným signálem. Dodává rychlé kmitočty pro měření periody signálu, pomalé pro měření kmitočtu signálu.

Vstupní dělič, zesilovač a tvarovač vyrobí ze vstupního signálu průběh s logickými úrovněmi. Vstupní dělič umožní zmenšit signály, které by byly pro zpracování příliš velké. Zesilovač zesílí signály malé. Tvarovač vyrobí ze vstupního signálu, ať má jakýkoliv průběh, signál obdélníkový se správnými logickými úrovněmi. Např. signál sinusový by se nehodil pro zpracování logickými obvody čítače. Proto se musí vytvarovat na obdélníkový a dostat správné logické úrovně.

Dělič dvěma při měření periody vyrábí obdélníkové impulsy vhodné k ovládání hradla, které mají délku rovnou periodě měřeného signálu.



Obrázek 64: Úprava signálu pro měření periody. Žádný z intervalů v signálu A nemá délku periody T – ani impuls v úrovni H, ani impuls v úrovni L. V signálu B po průchodu děličem dvěma má délku periody původního signálu jak impuls H, tak L.



Obrázek 65: Blokové schéma čítače

Hradlo propouští počítané impulsy do čítače: Při měření periody je rychlý hodinový signál hradlován měřeným signálem. Při měření kmitočtu je rychlý měřený signál hradlován pomalým signálem hodin.

Čítač po skončení měřicího cyklu obsahuje číslo, vyjadřující periodu nebo kmitočet měřeného signálu.

Po skončení každého měřicího cyklu se obsah čítače přepíše do paměti, aby údaj na displeji nebyl rušen změnami stavu čítače během měření.

Displej bývá na bázi tekutých krystalů nebo LED.

10. Zkreslení

Zkreslení je změna signálu, která nastává při průchodu signálu zařízením, např. zesilovačem. Tato změna je někdy nežádoucí, např. zkreslení v nízkofrekvenčních zesilovačích. Jinde, např. v boosterech pro elektrofonickou kytaru, je zkreslení zaváděno záměrně. Zkreslení vznikající omezením šířky pásma může být nežádoucí v širokopásmovém zesilovači, a naopak je žádoucí např. ve frekvenčních filtrech.

10.1 Teorie signálů

Každý nesinusový periodický signál se skládá z mnoha dílčích sinusových signálů o různých kmitočtech.

Základní sinusová složka má kmitočet stejný jako nesinusový signál. Další složky mají kmitočet dvojnásobný, trojnásobný, ... atd. Kmitočty, které jsou k sobě v poměru celých čísel (např. 1:2, 1:3) spolu ladí, tj. jsou-li zahrány současně, „netahají za uši“. Jsou tedy spolu v harmonii, proto se nazývají harmonické.

Budeme-li zkoumat hotový nesinusový signál a zjišťovat, na jaké harmonické sinusové složky jej můžeme rozložit, půjde o harmonickou analýzu. Výsledkem takové analýzy bude spektrum kmitočtů, proto se jí také říká spektrální analýza. O té bude řeč dále. Analýzu využijeme např. při měření zkreslení: Zjistíme, jaké nové složky a jak velké se přidaly k původně sinusovému (nezkreslenému) signálu.

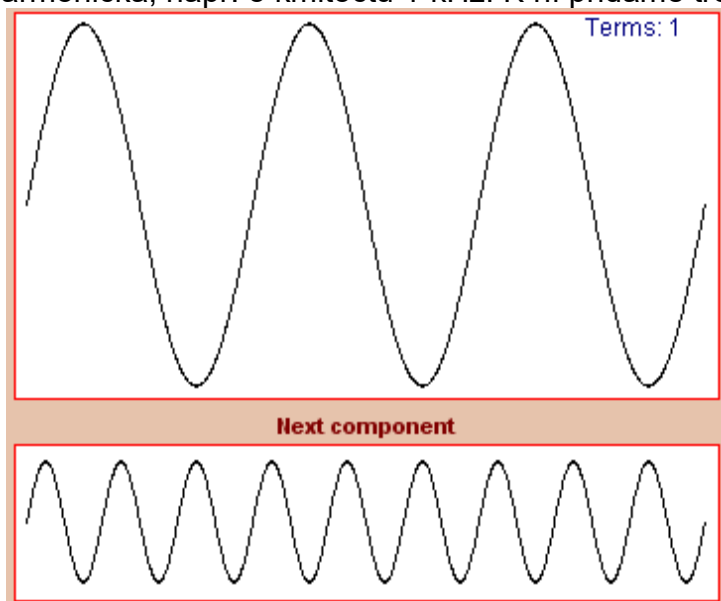
Budeme-li skládat harmonické sinusové signály tak, abychom dostali nový signál s určitým nesinusovým průběhem, půjde o harmonickou syntézu. To využijeme např. v elektronických hudebních nástrojích.

Příklad syntézy obdélníkového signálu skládáním z harmonických sinusových signálů je na následujících obrázcích. Všimněte si, že obdélníkový průběh obsahuje jen tzv. liché harmonické: Přidáváme složky o kmitočtu trojnásobném, pětinasobném, ... atd. Pilový průběh by např. obsahoval jen sudé harmonické. To plyne ze zvláštní „matematicky čisté“ povahy těchto průběhů. Jinak většina běžných signálů obsahuje liché i sudé harmonické.

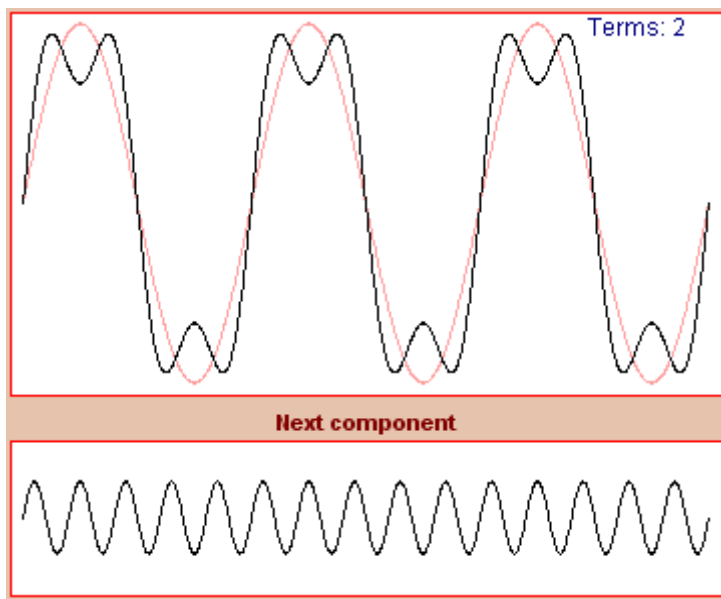
O vlnění, základních a vyšších harmonických viz

<https://www.youtube.com/watch?v=1Hqm0dYKUx4>

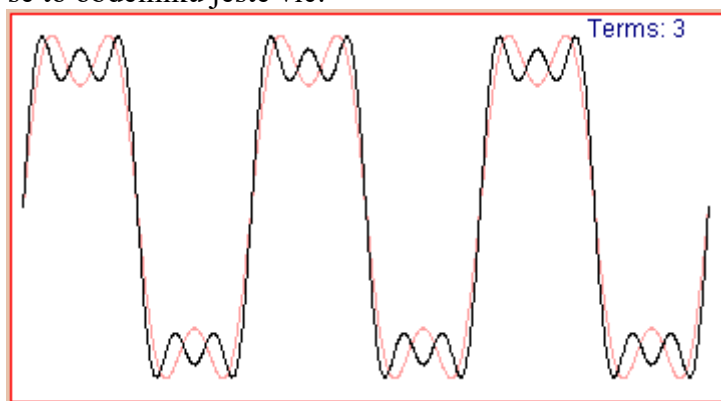
Základní harmonická, např. o kmitočtu 1 kHz. K ní přidáme třetí harmonickou o kmitočtu 3 kHz:



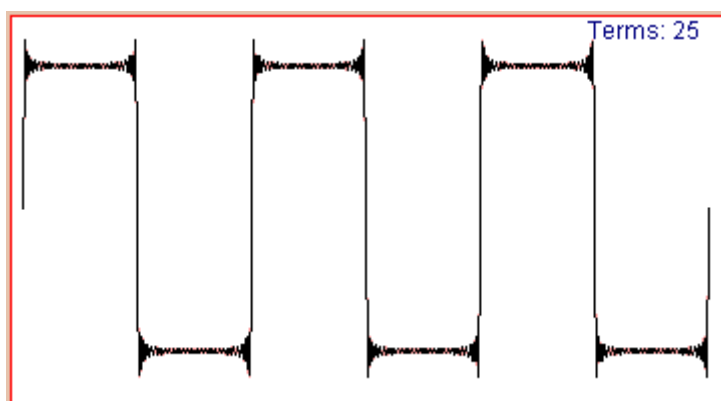
Dostaneme průběh, který se už docela podobá obdélníku. Přidáme k němu pátou harmonickou o kmitočtu 5 kHz ...



... a podobá se to obdélníku ještě víc:



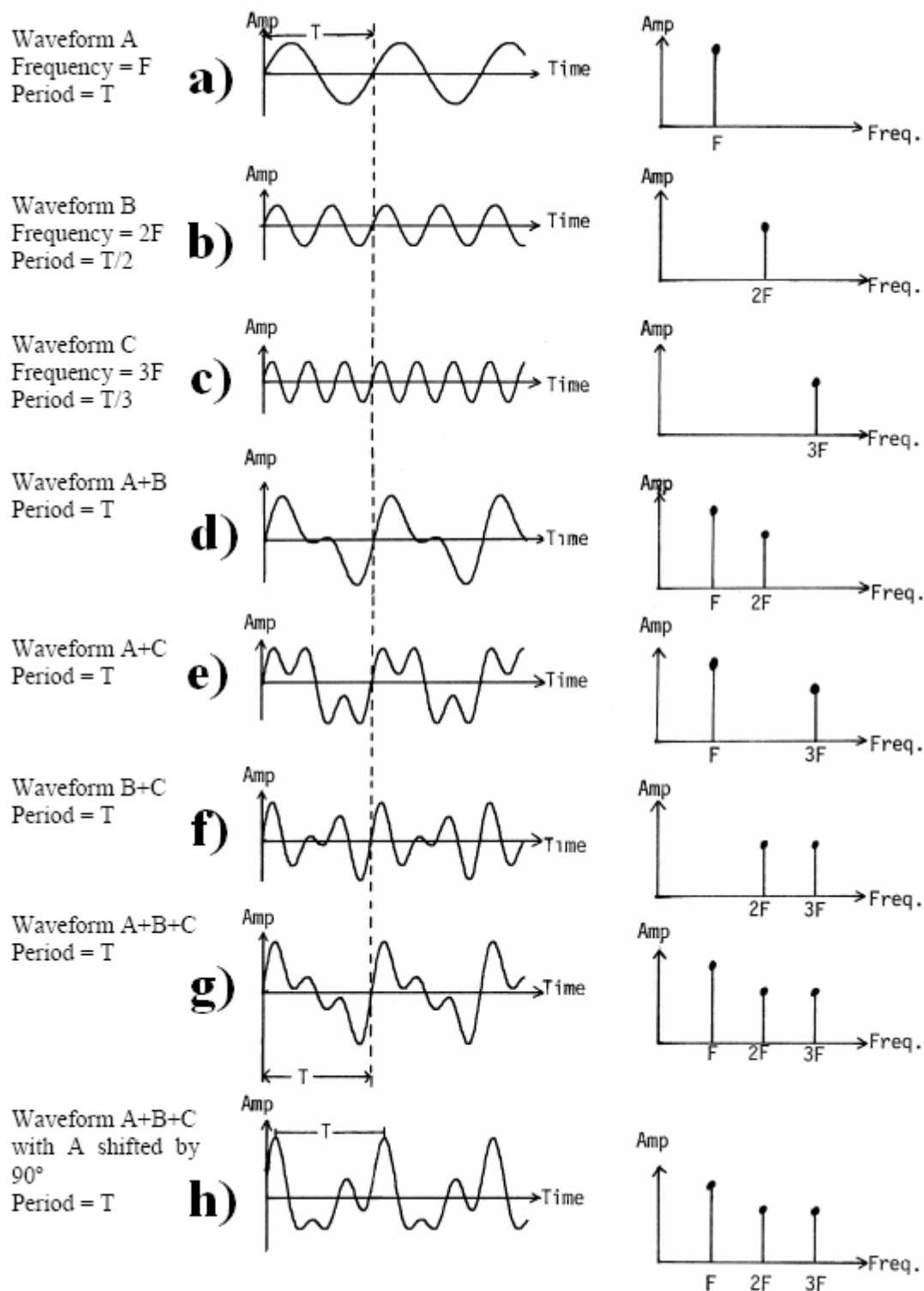
Po pětadvaceti takových krocích už máme skoro čistý obdélník:



Obrázek 66: Syntéza obdélníkového průběhu z harmonických sinusových signálů

Obrázky byly převzaty z http://www.chem.uoa.gr:80/applets/AppletFourier/Appl_Fourier2.html. Podívejte se tam, jsou tam skládky různých dalších nesinusových průběhů.

Na dalším obrázku (**Obrázek 67**) je ukázka skládání harmonických signálů s kmitočtem základním, dvojnásobným (druhá harmonická) a trojnásobným (třetí harmonická). V pravé části obrázku jsou odpovídající výstupy ze spektrálního analyzátoru (bude vysvětlen později).



Obrázek 67: Harmonická syntéza: skládání signálu se základním kmitočtem s jeho vyššími harmonickými

Na obrázcích g) a h) je vidět, že při skládání signálů velmi záleží na jejich fázi: V obrázku h) je signál A posunut o 90° proti obrázku g). Přitom výsledky spektrální analýzy vpravo jsou pro oba průběhy stejné.

10.2 Spektrální analýza

10.2.1 Spektrum

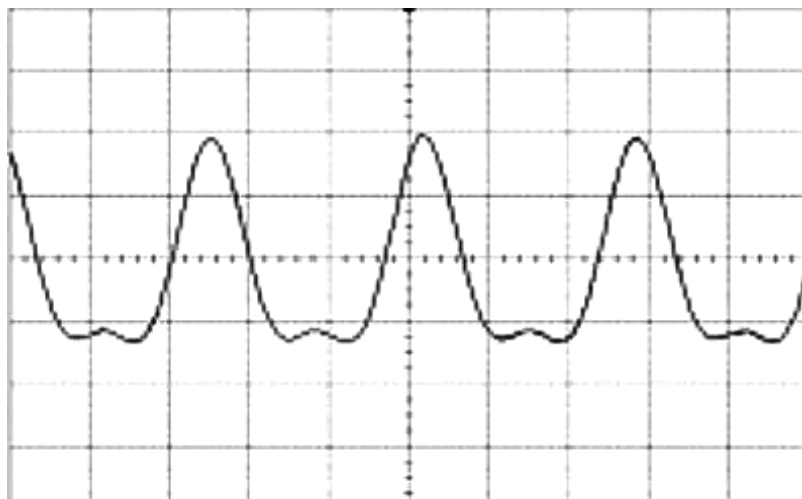


Obrázek 68: Duha představuje spektrum viditelných barev

Spektrum je uspořádaná množina příbuzných věcí, jevů, veličin, ... které zaujímají určitý rozsah hodnot a nabývají všech možných hodnot v tomto rozsahu.

Např. „viditelné spektrum“ označuje množinu všech barev světla ve viditelném rozsahu, tj. od červené po fialovou barvu (**Obrázek 68**).

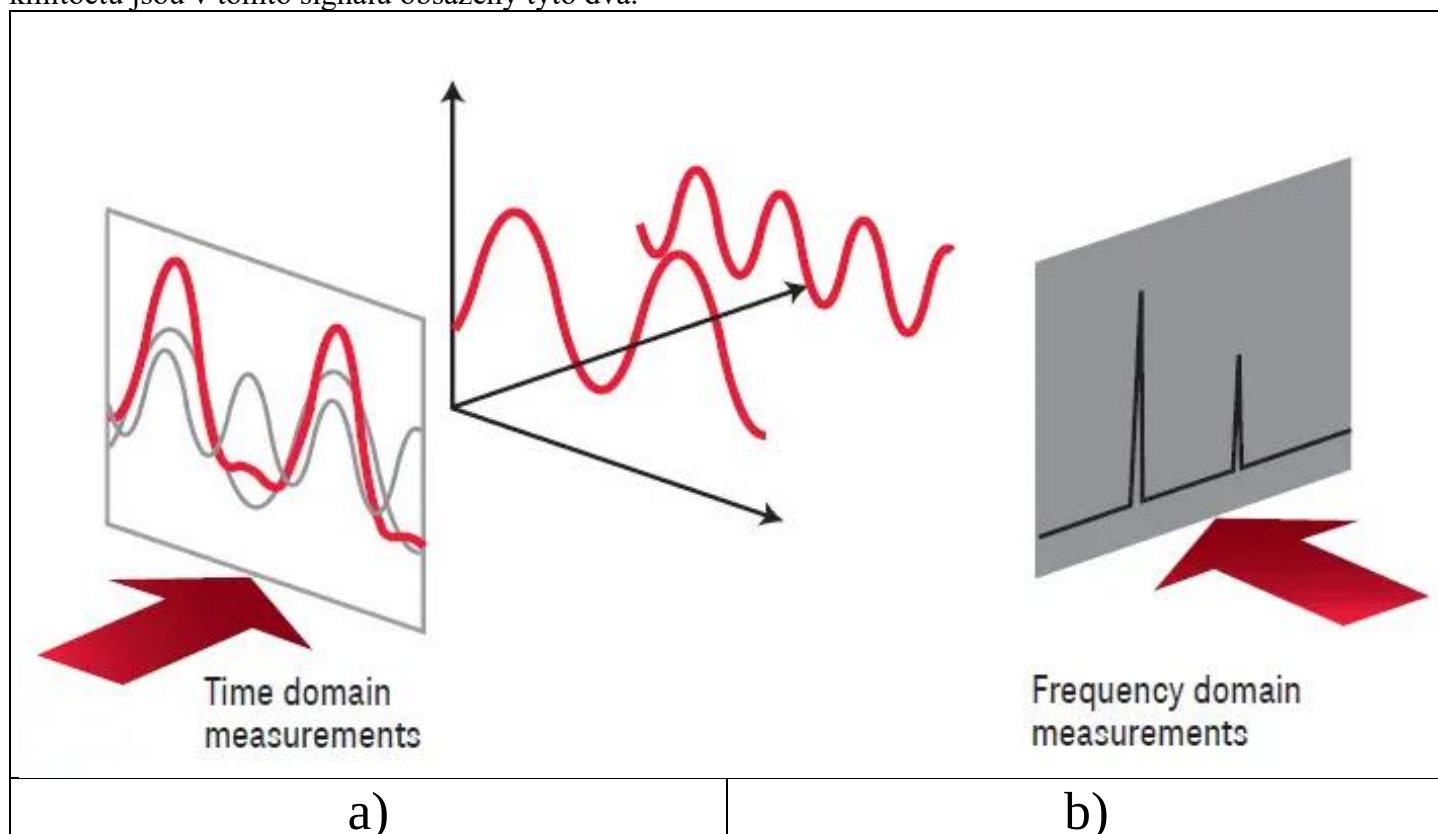
Světlo je elektromagnetické vlnění s určitým kmitočtem. Proto můžeme od světelného spektra snadno přejít k definici „kmitočtového spektra“: Kmitočtové spektrum je množina všech možných kmitočtů v určitém rozsahu.



Obrázek 69: Nesinusový periodický signál

Obrázek 69 ukazuje časový průběh periodického signálu, který není sinusový. Proto kromě základní harmonické složky bude obsahovat také vyšší harmonické složky.

Na dalším obrázku (**Obrázek 70**) je vidět, že se předchozí signál skládá ze dvou sinusových signálů. V části **a)** je vidět jejich skládání. V části **b)** je výstup ze spektrálního analyzátoru, kde na vodorovné ose je kmitočet, na svislé ose výkon příslušné kmitočtové složky. Zobrazený výstup spektrálního analyzátoru říká, že signál obsahuje dvě kmitočtové složky, z nichž první, vyšší, má o něco větší výkon než druhá, nižší. Ze spektra všech možných kmitočtů jsou v tomto signálu obsaženy tyto dva.



Obrázek 70: Způsoby zobrazení signálu

a) jako závislost napětí na čase; b) jako závislost výkonu na kmitočtu

10.2.2 Spektrální analyzátor

Spektrální analyzátor je přístroj, který zkoumá kmitočtové vlastnosti signálu, tj. zjišťuje, ze kterých kmitočtových složek se signál skládá. Výsledek zobrazí v podobě grafu, kde na vodorovné ose je kmitočet, na svislé ose výkon příslušné kmitočtové složky.

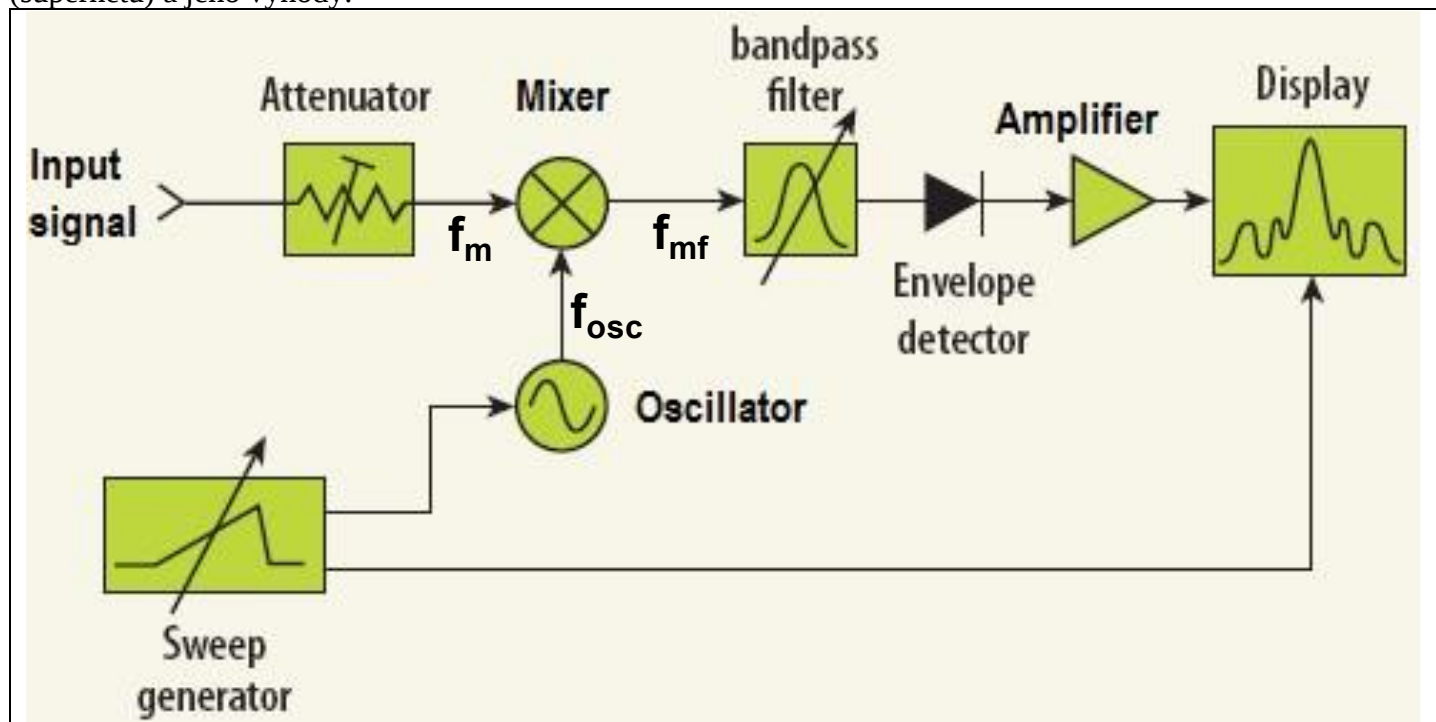
Spektrální analyzátor tvoří svůj výstup na obrazovce podobně jako osciloskop. Paprsek je vychylován rovnoměrně zleva doprava. Tím u osciloskopu vytváří časovou, u spektrálního analyzátoru kmitočtovou osu. Vychýlení paprsku směrem nahoru znázorňuje velikost zobrazované veličiny – u osciloskopu okamžité napětí, u spektrálního analyzátoru výkon kmitočtových složek.

Rovnoměrný pohyb paprsku zleva doprava znázorňuje kmitočtovou osu, takže vlevo jsou zobrazeny nízké kmitočty, vpravo vysoké. Zároveň jsou během tohoto pohybu měřeny kmitočtové složky signálu a podle změřených výkonů je paprsek vychylován nahoru.

Spektrální analyzátor (**Obrázek 71**) pracuje na podobném principu jako rozhlasový přijímač s nepřímým laděním – superhet. Obsahuje podobné hlavní bloky: oscilátor, směšovač, mezifrekvenční zesilovač a filtr, demodulátor.

Jako rozhlasový přijímač při přeladování vyhledává kmitočty vysílačů, tak podobně spektrální analyzátor při přeladování vyhledává kmitočty ve vstupním signálu. Na obrazovce pak zobrazuje jejich sílu.

V dalším výkladu budeme předpokládat, že čtenář zná princip přijímače s nepřímým laděním (superhetu) a jeho výhody.



Obrázek 71: Blokové schéma spektrálního analyzátoru

Na blokovém schématu (**Obrázek 71**) je zjednodušené zapojení spektrálního analyzátoru.

Funkce: Na vstup se přivádí periodický signál, který se má analyzovat. Oscilátor se pomocí generátoru pily přeladuje přes celé zkoumané kmitočtové pásmo. Ve směšovači se signál oscilátoru o kmitočtu f_{osc} smísí s měřeným signálem a vznikne mezifrekvenční signál s rozdílovým kmitočtem f_{mf} :

$$f_{mf} = f_m - f_{osc}$$

Mezifrekvenční signál vznikne jen pro ty kmitočty f_m , které jsou ve vstupním signálu obsaženy. Nebo jinak – mezifrekvenční kmitočet vznikne jen při takových kmitočtech oscilátoru, pro které se ve vstupním signálu najde vhodný kmitočet f_m , pro který platí uvedený vzorec. Těmto kmitočtům odpovídají určitá napětí pily a určité vodorovné polohy paprsku na obrazovce. V těchto místech se na obrazovce objeví svislé čárky, jejichž výška odpovídá síle příslušné kmitočtové složky.

Spektrální analyzátor by měl mít co nejlepší rozlišení na kmitočtové ose. Toto rozlišení závisí na šířce pásma mezifrekvenčního filtru. Čím větší šířka pásma, tím horší rozlišení. Kdyby měl mezifrekvenční filtr šířku pásma např. 10 kHz, představovalo by těchto 10 kHz nejistotu údaje na kmitočtové ose. Obrázek s jemnými detaily nemůžeme nakreslit tužkou s tlustým hrotem. Šířka pásma mezifrekvenčního filtru představuje právě šířku hrotu tužky, kterou kreslíme obraz na obrazovce.

Proto se výrobci snaží o co nejmenší šířku pásma mezifrekvenčního filtru. Tato dosažitelná šířka pásma vychází jako nějaké „rozumné“ procento ze zpracovávaných kmitočtů. Je-li kmitočet měřeného signálu f_m a kmitočet oscilátoru f_{osc} velký, musí být přiměřeně velký i jejich rozdíl – mezifrekvenční kmitočet f_{mf} . A „rozumným“ procentem z velkého mezifrekvenčního kmitočtu bude příliš velká šířka pásma a špatné rozlišení.

Řešením je přidat do blokového schématu další směšovače a další mezifrekvenční filtry, které budou pracovat na menších a menších kmitočtech, a proto jejich šířka pásma bude menší a menší. Nebude to velký konstrukční problém, protože tyto další stupně už nebudou přeladitelné, ale budou pracovat na konstantních kmitočtech.

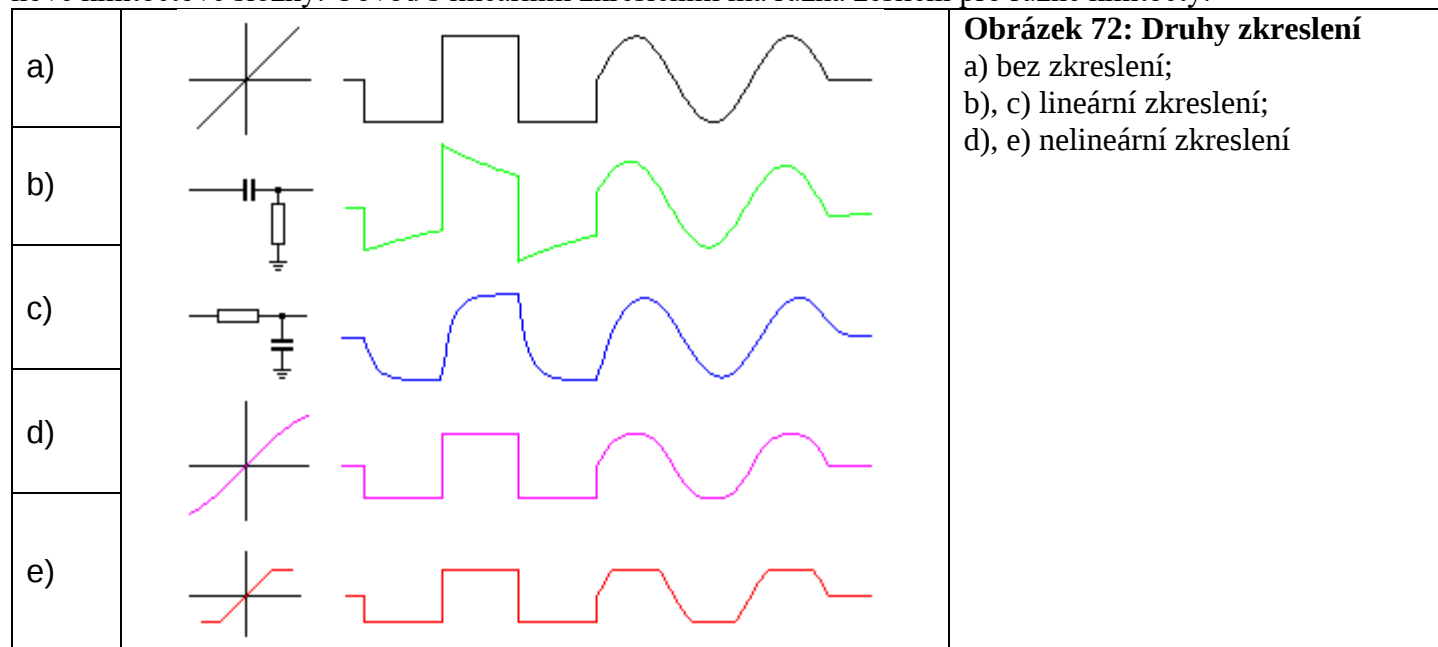
A proč je spektrální analyzátor v kapitole o zkreslení? Protože slouží i k analýze zkreslených / nezkraslených signálů. Pustíme-li do spektrálního analyzátoru čistě sinusový signál, uvidíme na jeho obrazovce jedinou svislou čáru, odpovídající základní (a jediné) harmonické složce signálu. Pustíme-li do něj tentýž signál, zkreslený po průchodu nekvalitním zesilovačem, uvidíme na obrazovce vysokou čáru základní harmonické a pak v pravidelných odstupech menší čárky vyšších harmonických, které představují zkreslení signálu.

10.3 Druhy zkreslení

Zkreslení rozdělujeme podle toho, zda v signálu vytváří nové kmitočtové složky nebo ne, na nelineární a lineární.

Nelineární zkreslení mění tvar každého signálu a přidává do něj kmitočtové složky, které v něm nebyly. Obvod s nelineárním zkreslením má různá zesílení pro různé velikosti signálů.

Lineární zkreslení nemění tvar sinusového signálu, ale mění tvar ostatních signálů. Nepřidává do signálu nové kmitočtové složky. Obvod s lineárním zkreslením má různá zesílení pro různé kmitočty.



Příklady obou druhů zkreslení ukazuje obrázek (**Obrázek 72**).

Na obrázku a) je původní signál, který budeme pouštět do obvodů na následujících obrázcích.

Na obrázcích b), c) jsou obvody s lineárním zkreslením.

Derivační obvod na obrázku b) nepřenáší dobře nízké kmitočty, proto u obdélkového signálu nejsou dobře přeneseny vodorovné úseky, kdy se signál nemění (tj. má v tu chvíli „nulový kmitočet“).

Integrační obvod na obrázku c) nepřenáší dobře vysoké kmitočty, proto u obdélníkového signálu nejsou dobře přeneseny strmé úseky, kdy se signál mění velmi rychle (tj. má v tu chvíli „vysoký kmitočet“).

Na obrázcích d), e) jsou obvody s nelineárním zkreslením.

Obvod na obrázku d) má menší zesílení pro větší signály, tj. signál s malým napětím zesílí více, signál s velkým napětím zesílí méně. Proto „sinusovka“ ve výsledném signálu už není sinusová, vrcholy vln jsou moc zaoblené. Obdélníkový signál sice nezměnil svůj tvar, ale byl také postižen: Měl být zesílen více.

Obvod na obrázku e) je krajním případem předchozího: Signály „větší než něco“ nejsou zesíleny vůbec. Tak se chovají např. zesilovače s operačními zesilovači. Díky silné zpětné vazbě mají přesně stejné zesílení pro všechna napětí, ale nejsou schopny dát na svém výstupu větší napětí, než je jejich napájecí napětí. Co je nad to, oříznou.

Tabulka 1 (níže) uvádí přehledně vlastnosti jednotlivých druhů zkreslení.

Parametr	Nelineární (harmonické)	Lineární
Zesílení pro různé kmitočty	stejně	různé
Zesílení pro různá napětí	různé	stejně
Přidává vyšší harmonické	ano	ne
Mění tvar sinusového signálu	ano	ne
Mění tvar nesinusového signálu	ano	ano

Tabulka 1: Druhy zkreslení

10.3.1 Nelineární (harmonické) zkreslení

Nelineární zkreslení změní tvar čistě sinusového signálu tak, že výsledný signál už není sinusový. Protože do výsledného signálu přidává nové harmonické složky, říká se mu také harmonické zkreslení.

Čistě sinusový signál obsahuje pouze základní harmonickou sinusovou složku. Neobsahuje druhou, třetí, ... , žádnou další harmonickou.

Necháme-li takový čistě sinusový signál projít zesilovačem, zkreslí se. Toto zkreslení vzniká tím, že zesílení zesilovače není pro všechny velikosti signálu stejné. Dobře to je vidět na zkreslení sinusového signálu limitací (**Obrázek 73**). Menší sinusovka na obrázku ještě není zkreslená (aspoň ne viditelně), větší už je zkreslená. Velká napětí už totiž zesilovač nemůže zesílit, protože na svém výstupu nemůže dávat větší napětí, než je jeho napájecí napětí.

Zkreslený signál na výstupu zesilovače už nebude čistě sinusový. Objeví se v něm druhá, třetí, ... , a další harmonické složky. Rozdíl mezi nezkrasleným a zkresleným signálem bude tedy v těchto „přidaných“ harmonických složkách. Čím víc zesilovač zkresluje, tím víc vyšších harmonických složek k signálu přidává.

Protože toto zkreslení vzniká přidáním vyšších harmonických složek, říká se mu harmonické zkreslení.

Zkreslení signálu určíme podle vzorce

$d = \frac{\sqrt{u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2 + \dots}}{\sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2 + \dots}}$	Vzorec 1: Určení harmonického zkreslení pomocí vyšších harmonických
---	--

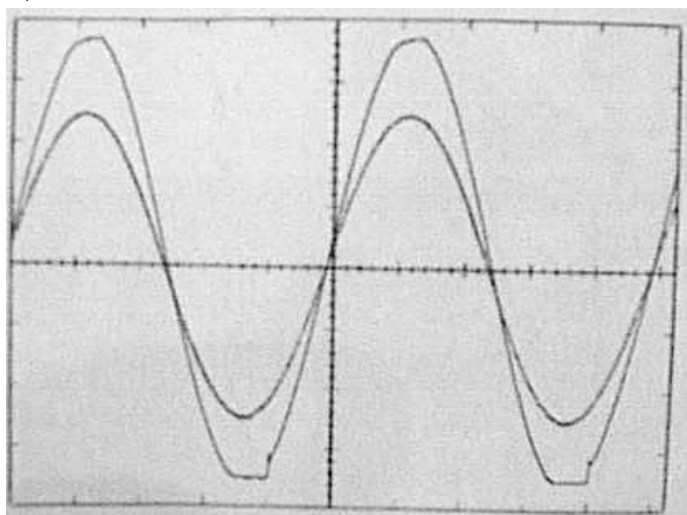
u_1 je napětí první (základní, původní) harmonické složky, $u_2, u_3, \dots$ jsou napětí vyšších (přidaných) harmonických. Symbol d je z anglického slova distortion = zkreslení.

Ve vzorci nahoře jsou jen přidané harmonické, dole jsou všechny. Nahoře je jen to, co v signálu přibýlo kvůli zkreslení, dole je celý zkreslený signál. Kdyby signál nebyl zkreslený, nahoře by nebyly žádné přidané harmonické složky. Napětí $u_2, u_3, \dots$ by byla nulová a v čitateli zlomku (nahore) by byla nula. A zkreslení by vyšlo nulové.

Mocniny a odmocniny jsou ve vzorci proto, že zjišťujeme poměr mezi efektivními hodnotami signálu tak, aby výsledek nebyl závislý na kmitočtech a vzájemných fázových posunech jednotlivých složek.

Změřit zkreslení bude znamenat zjistit rozdíl mezi signálem původním a zkresleným, tj. zjistit, co v signálu přibýlo přidáním nových harmonických.

a) Limitace

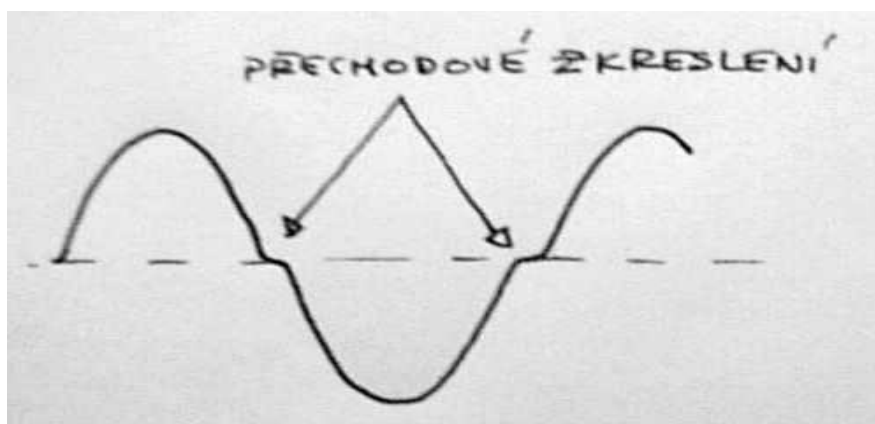


Obrázek 73: Zkreslení sinusového signálu omezením (limitací)

Limitace neboli omezování signálu je zvláštním případem nelineárního zkreslení.

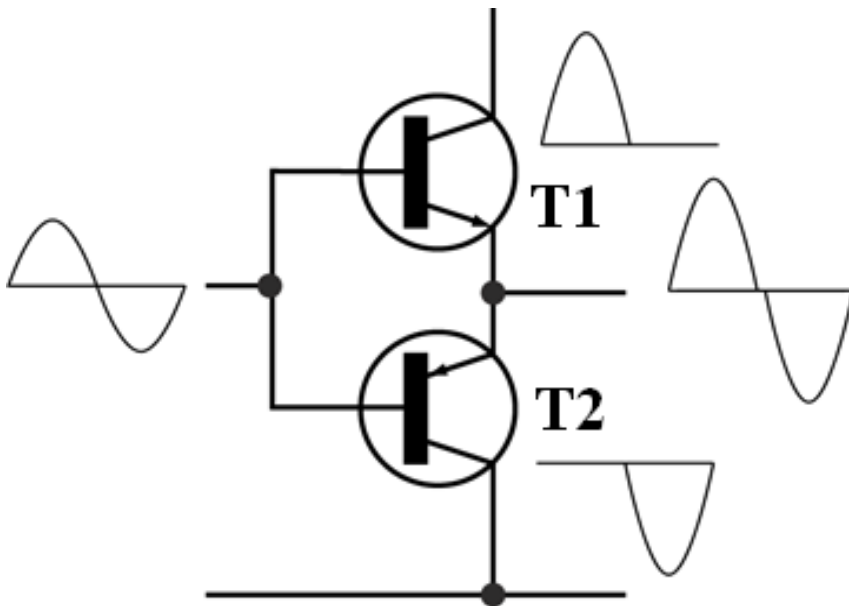
Na obrázku (**Obrázek 73**) vidíme dva průběhy na výstupu zesilovače. Menší sinusovka byla zesílena správně, bez zkreslení. Na větší sinusovku už zesilovač nemá, její nejvyšší a nejnižší vrcholky nezesílil, oříznul je.

b) Přechodové zkreslení

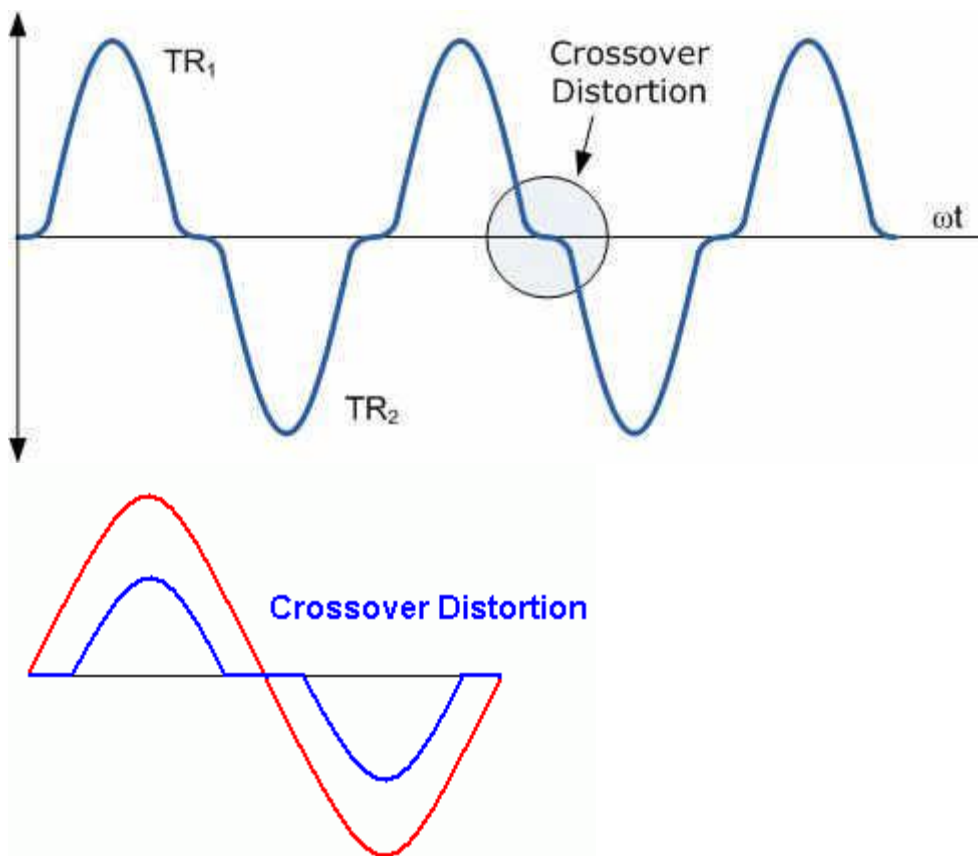


Obrázek 74: Přechodové zkreslení

Přechodové zkreslení je dalším zvláštním případem nelineárního zkreslení.



Obrázek 75: Zesilovač třídy B a vznik přechodového zkreslení



Přechodové zkreslení vzniká např. v zesilovačích třídy B (**Obrázek 75**). Kladnou půlvlnu signálu má přenést NPN tranzistor T1. Jeho přechod báze – emitor (= dioda) ale pro malé signály do +0,7 V bude nevodivý, proto je tranzistor nepřenese. Podobně tranzistor T2 a malé záporné signály do -0,7 V. Signály v rozmezí $\pm 0,7$ V proto na výstup zesilovače neprojdou.

V obrázku je drobná chybička: Amplituda výstupního signálu tam je větší, než amplituda vstupního, přestože by měla být stejná (kdyby nebylo přechodového zkreslení) nebo o 0,7 V menší (se zkreslením).

c) Intermodulační zkreslení

Intermodulační zkreslení je dalším zvláštním případem nelineárního zkreslení. Vzniká, když se v zařízení, které zkresluje, setkají dva signály o různých kmitočtech. Potom vznikají další nové signály s novými kmitočty, především součtovým a rozdílovým. Protože např. hudba obsahuje velké množství nejrozličnějších kmitočtů, může při její reprodukci k tomuto zkreslení docházet.

Ve směšovači rozhlasového přijímače je vytváření rozdílového kmitočtu žádoucí.

Ale pokud má intermodulační zkreslení např. nízkofrekvenční zesilovač, je to velmi nežádoucí. Vznikají pak produkty o kmitočtech velmi nepříjemných a neodstranitelných. Tyto kmitočty, součtové, rozdílové i jiné, nejsou totiž s původními kmitočty harmonické, a proto působí velmi rušivě.

10.3.2 Lineární zkreslení

Obvod s lineárním zkreslením přenáší některé kmitočty více, jiné méně. Některé případy lineárního zkreslení byly uvedeny výše (Obrázek 72 b), c)).

Příklady

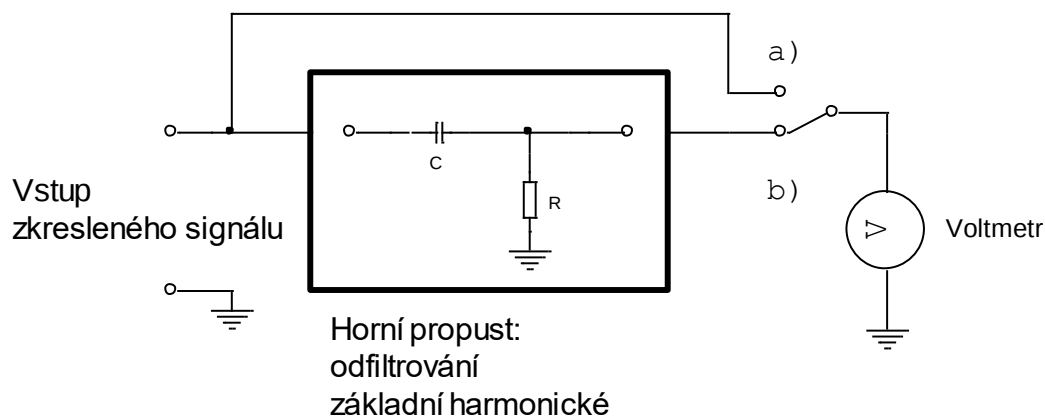
Nízkofrekvenční zesilovač přenáší kmitočty např. od 20 Hz do 20 kHz. To znamená, že kmitočty od 20 Hz do 20 kHz zesiluje dobře, ostatní zesiluje méně nebo skoro vůbec. Má tedy lineární zkreslení. Má-li zesilovač uvedený kmitočtový rozsah, jeho lineární zkreslení nevadí. Naopak, dokonce je žádoucí, aby zesilovač nezesiloval kmitočty, které člověk stejně nemůže slyšet. Kdyby ale zesilovač měl kmitočtový rozsah od 500 Hz do 8 kHz, pak by jeho lineární zkreslení vadilo, protože by tento zesilovač nepřenášel basy (pod 500 Hz), ani výšky (nad 8 kHz).

Všechny kmitočtové filtry, např. dolní propusti, horní propusti, pásmové propusti jsou záměrně navrhovány tak, aby měly lineární zkreslení. Např. dolní propust má kmitočty pod svým mezním kmitočtem propustit, nad ním zadržet.

10.4 Měření nelineárního zkreslení

Máme-li měřit nelineární zkreslení podle výše uvedeného vzorce (Vzorec 1 na straně 77 nahoře), potřebujeme mít k dispozici úplný měřený zkreslený signál (ve vzorci je ve jmenovateli, tj. dole) a obsah vyšších harmonických, které tvoří vlastní zkreslení (ve vzorci je v čitateli, tj. nahoře).

K tomu poslouží následující zapojení (Obrázek 76):



Obrázek 76: Zapojení pro měření zkreslení – a) efektivní hodnota úplného signálu, b) efektivní hodnota vyšších harmonických

Na vstup vlevo připojíme signál, jehož zkreslení chceme měřit, např. z výstupu nf zesilovače. Na voltmetru odečteme v poloze a) efektivní hodnotu úplného měřeného zkresleného signálu, v poloze b) efektivní hodnotu obsahu vyšších harmonických, tj. to, čím je signál zkreslen.

Derivační RC článek nakreslený uvnitř filtru jen naznačuje, že se jedná o horní propust. Ta musí být samozřejmě řešena kvalitnějším a složitějším obvodem, aby se základní harmonická odfiltrovala opravdu dokonale.

Tato metoda vyžaduje kvalitní zdroj nezkresleného sinusového signálu, kterým budeme měřené zařízení (např. zesilovač) napájet. Kdyby už tento signál byl zkreslený, jeho zkreslení by se přičetlo ke zkreslení měřeného zařízení a výsledek měření by nebyl přesný.

Zkreslení zdroje signálu můžeme částečně kompenzovat tak, že jeho zkreslení změříme zvlášť a odečteme od hodnoty, kterou jsme naměřili na výstupu měřeného zařízení.

11. Oscilátory pro měřicí techniku

Požadavky na generátory signálu v měřicí technice

- přeladitelnost v širokém rozsahu
- stabilita kmitočtu
- přesnost kmitočtu
- snadné a jednoznačné nastavení kmitočtu
- minimální zkreslení
- rozmanitost výstupních průběhů (sinus, obdélník, trojúhelník, pila)
- stabilita amplitudy

Většina generátorů nemusí splňovat všechny uvedené požadavky najednou, např. generátory pro radiokomunikační měření nepotřebují jiný tvar výstupního signálu než sinusový.

Požadavky na generátory jsou často protichůdné, např. přeladitelnost v širokém rozsahu a stabilita kmitočtu, a přesto je nutné je splnit. K tomu slouží techniky popsané v následujících kapitolách.

11.1 Napětím řízené oscilátory

U většiny dále probíraných témat budeme potřebovat tzv. napětím řízený oscilátor (anglicky VCO = Voltage Controlled Oscillator). To je oscilátor, jehož kmitočet je možno ovládat napětím.

Na nižších kmitočtech, např. akustických, se k tomu účelu využívají oscilátory, jejichž základem je integrátor.

Na vyšších kmitočtech, např. radiových, se využívají varikapy.

11.1.1 Varikap¹



Obrázek 77: Schématická značka varikapu

Varikap je součástka s proměnnou kapacitou, kterou je možno řídit napětím.

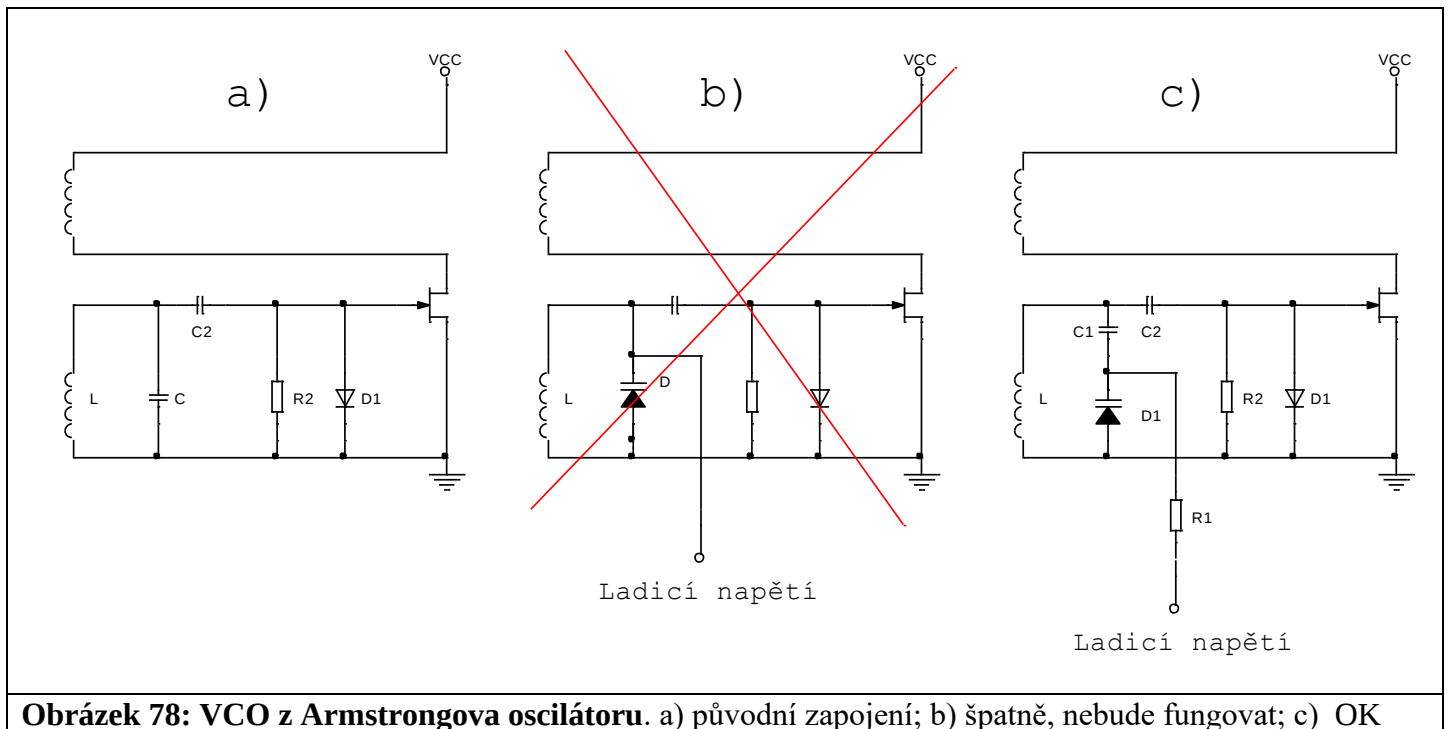
Schématická značka varikapu (**Obrázek 77**) připomíná značku diody. A také značku kondenzátoru. Dobře vystihuje podstatu varikapu: Varikap je dioda, u které záměrně využíváme vlastnost, která je u diody jinak nežádoucí – kapacitu.

Dioda v závěrném směru má kapacitu tím menší, čím větší napětí na diodu připojíme. Úplně laicky si můžeme představit přechod P-N v závěrném směru jako dvě elektrody, které se přiloženému napětí brání tím, že se od sebe vzdalují. A tím, že se od sebe vzdalují, klesá jejich vzájemná kapacita.

Velikostí napětí tedy můžeme řídit kapacitu diody. Toho se využívá v rozhlasových a televizních přijímačích, vysílačích a mnoha jiných zařízeních, kde se varikapy využívají tam, kde se dříve využívaly otočné ladící kondenzátory. Také se toho využívá v oscilátorech řízených napětím.

¹ Anglicky varicap = **v**ariable **c**apacitance diode = dioda s proměnnou kapacitou

11.1.2 Příklad napětím řízeného oscilátoru



Obrázek 78: VCO z Armstrongova oscilátoru. a) původní zapojení; b) špatně, nebude fungovat; c) OK

Pokud v Armstrongově oscilátoru (**Obrázek 78**) pouze nahradíme kondenzátor C varikapem, na který přivedeme ladící napětí, nebude to fungovat (prostřední část obrázku – b)).

Zdroj ladícího napětí bude cívkou L zkratovaný k zemi. Proto musíme ladící napětí oddělit od země přidáním kondenzátorem C1. Kapacita C1 musí být tak velká, aby C1 představoval pro kmitočet oscilátoru zkrat. Musí být mnohem větší než kapacita varikapu, aby C1 neměl vliv na naladěný kmitočet.

Zdroj ladícího napětí představuje zkrat pro signál oscilátoru. Oscilátor by nemohl kmitat, byl by ladícím napětím krutě tlumen. Proto ladící napětí přivedeme přes přidání rezistoru R1. Ten může mít hodně velký odpor, a přesto nezpůsobí úbytek ladícího napětí. Bod mezi varikapem a C1 má totiž proti zemi obrovský stejnosměrný odpor: varikap je v závěrném směru, kondenzátor C1 stejnosměrný proud nepustí. Velký odpor rezistoru R1 dobře oddělí zdroj ladícího napětí od oscilátoru, a oscilátor nebude zdrojem ladícího napětí tlumen.

11.2 Napět'ová a kmitočtová syntéza

Při ovládání rozhlasového nebo televizního přijímače obvykle řešíme tyto úkoly:

- naladění stanice laděním přijímače nahoru - dolů
- uložení naladěné stanice do paměti předvoleb
- přepnutí na stanici uloženou v paměti předvoleb

Uvedené funkce je možno řešit těmito způsoby:

- mechanické ovládací prvky
- napět'ová syntéza
- kmitočtová syntéza

Mechanické ovládací prvky jsou překonané, nebudeme je probírat.

Napěťová a kmitočtová syntéza využívají k přeladování napětím řízený oscilátor (VCO = Voltage Controlled Oscillator). Pro ovládání přijímače je nutné

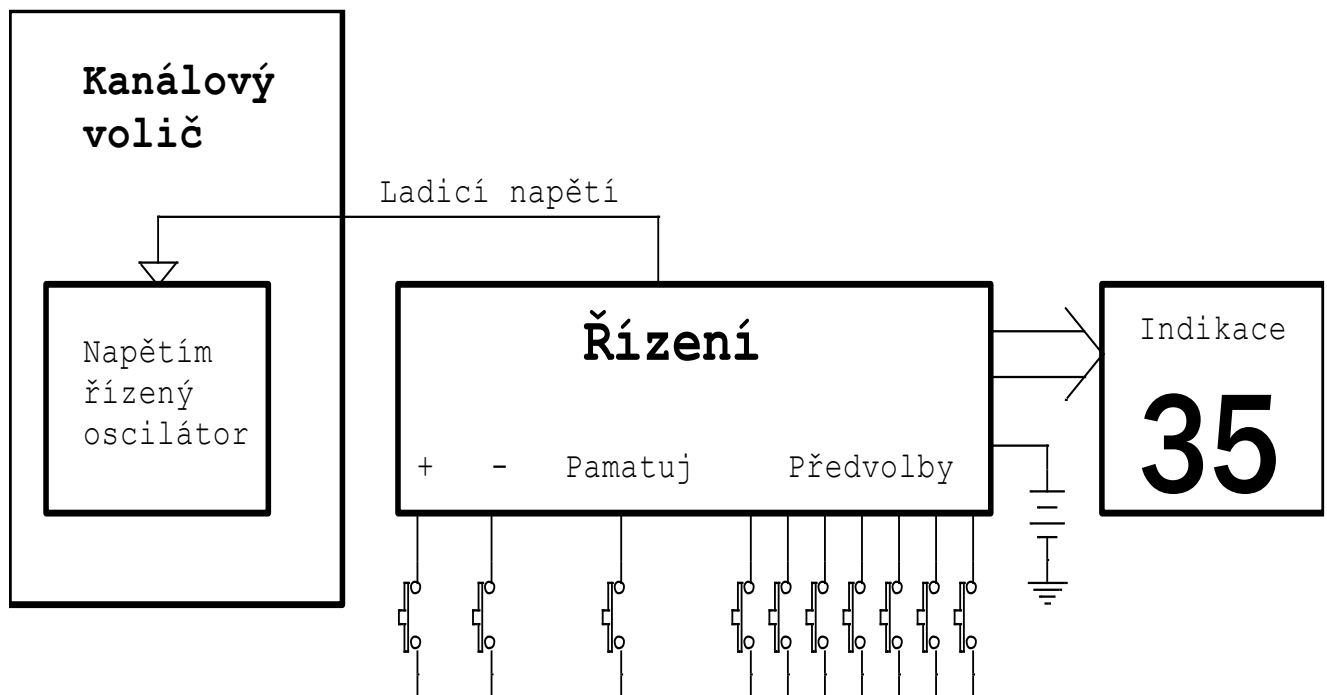
- generovat napětí pro ladění VCO
- ukládat informaci o kmitočtu předvolených stanic do paměti
- vybírat informaci o kmitočtu předvolených stanic z paměti

Napěťová syntéza ukládá do paměti a vybírá z ní informaci o kmitočtu jen nepřímo. Neukládá totiž přímo hodnotu kmitočtu, ale pouze hodnotu napětí, které bylo k naladění kmitočtu zapotřebí. Proto při příštím naladění téže stanice není zaručen stejný kmitočet.

Kmitočtová syntéza ukládá do paměti a vybírá z ní přímo hodnotu kmitočtu, a na tuto hodnotu se opravdu naladí. Proto je při každém dalším naladění téže stanice vždy zaručen správný kmitočet.

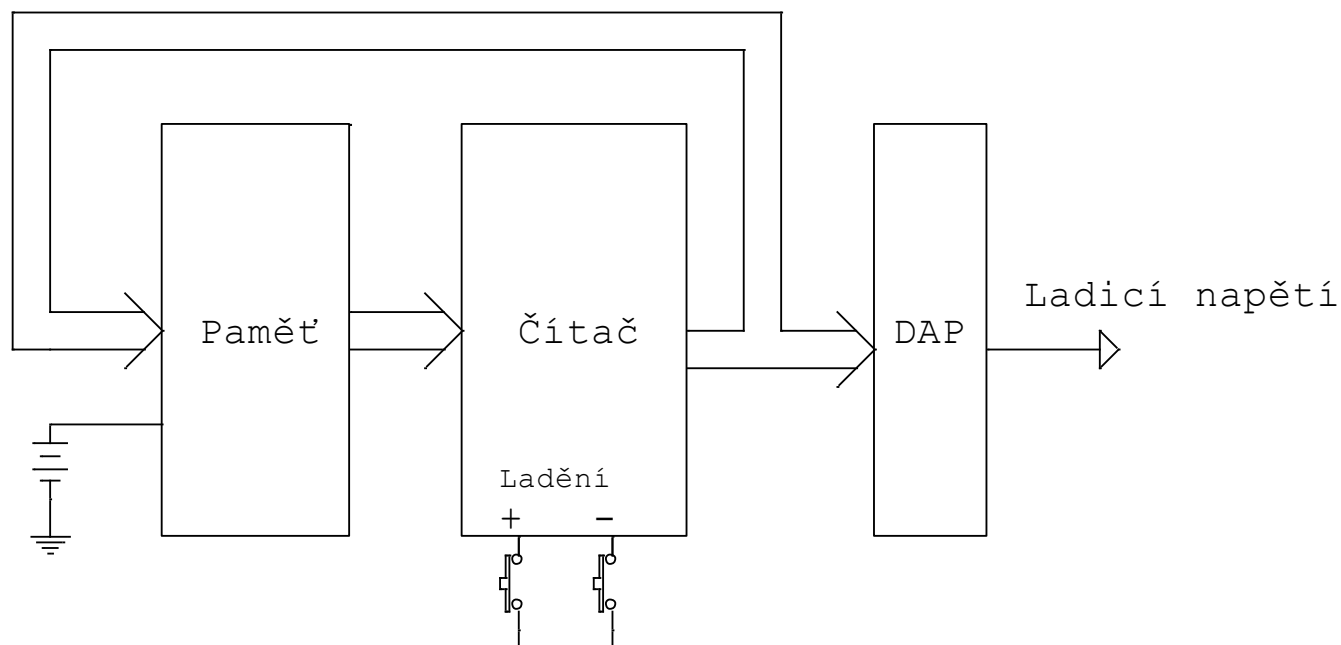
11.2.1 Napěťová syntéza

Obrázek 79 ukazuje obvody, které s pomocí napěťové syntézy umožňují základní funkce spojené s laděním televizoru.



Obrázek 79: Příklad využití napěťové syntézy v televizním přijímači

Kanálový volič umožňuje ladění televizoru. Jeho přeladování je ovládáno ladicím napětím. Blok „Indikace“ zajišťuje např. zobrazení naladěného kanálu a jeho funkce pro další výklad není důležitá.



Obrázek 80: Podrobnější blokové schéma bloku „Řízení“ pro napěťovou syntézu

V bloku „Řízení“ (Obrázek 80) jsou obvody, které dokážou měnit ladící napětí nahoru – dolů. Dále tam jsou obvody, které umožňují uložit nastavené ladící napětí do paměti předvoleb.

Zapamatovat si přímo napětí by bylo problematické. Jednodušší je zapamatovat si číslo, které příslušnému napětí odpovídá. Při ladění se mění hodnota čítače (při ladění nahoru se hodnota čítače zvyšuje, při ladění dolů snižuje). Na výstupy čítače je připojen digitálně – analogový převodník (DAP), na jehož výstupu je k dispozici ladící napětí. Chceme-li naladěnou stanici uložit do předvolby, uložíme do paměti příslušnou hodnotu čítače. Když potom chceme předvolbu využít a naladit stanici v ní uloženou, vybereme z paměti příslušné číslo a na toto číslo nastavíme čítač. Na výstupu DAP se objeví hodnota ladícího napětí, odpovídající žádané stanici.

Ovládací prvky pro ovládání předvoleb nejsou na obrázku nakresleny.

Paměť je zálohována baterií, aby se uložené stanice nevymazaly při vypnutí napájení.

Napěťová syntéza byla velkým pokrokem proti mechanickému ladění a mechanickým předvolbám, používaným předtím.

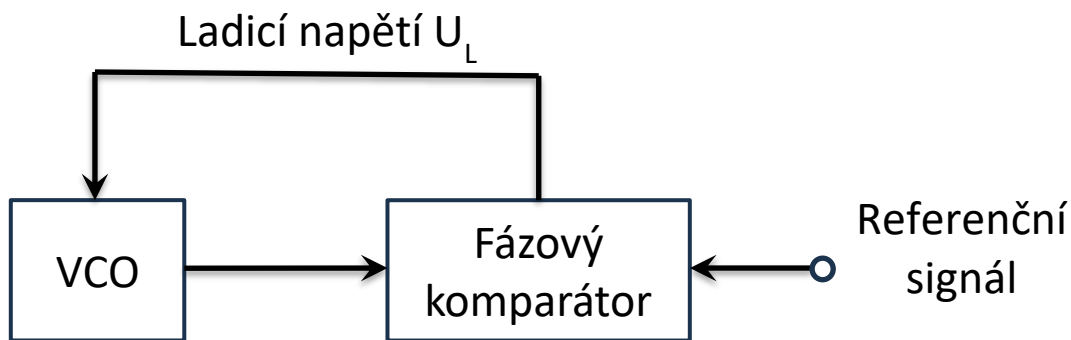
Ale má velké nevýhody: Při změně podmínek (napájecí napětí, teplota, čas, ...) se změní vlastnosti součástí. Napětím řízený oscilátor při stejném ladícím napětí vyrábí jiný kmitočet, DAP při stejném čísle na vstupu dává jiné napětí na výstupu. Výsledkem je, že stanice, včera přesně naladěná a uložená do paměti, dnes je rozladěná.

Proto systém ladění s napěťovou syntézou musí být doplněn obvodem, který automaticky doladí stanici na správný kmitočet. Tento obvod se nazývá automatické doladění kmitočtu = ADK¹. Výrobci přijímačů tyto obvody uvádějí jako důkaz předností svých přijímačů. Jenže pokud přijímač musí mít automatické doladění kmitočtu, znamená to především to, že nemá dokonalejší systém ladění, zvaný kmitočtová syntéza, popsany dále.

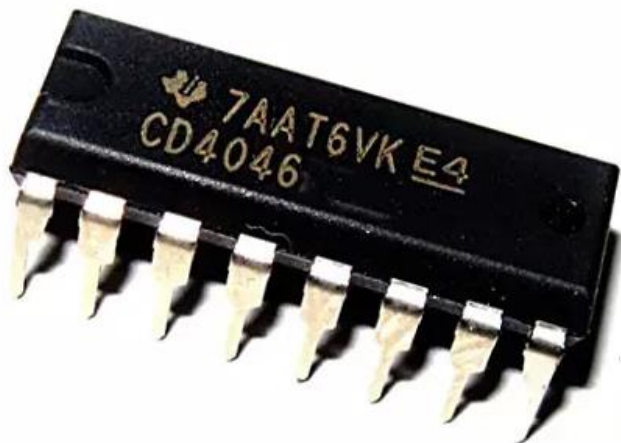
11.2.2 Fázový závěs

Fázový závěs se anglicky nazývá Phase-Locked Loop, PLL, český překlad doslova uzavřená fázová smyčka. Je to systém, který pomocí fázového komparátoru (tj. porovnávače fáze) dorovná fázi a tím i kmitočet napětím řízeného oscilátoru (Voltage Controlled Oscillator - VCO) tak, aby se shodovaly s fází a kmitočtem referenčního signálu. Jinými slovy to znamená, že fázový komparátor ladícím napětím U_L doladí VCO tak, aby jeho kmitočet byl stejný jako kmitočet referenčního signálu.

¹ Anglicky AFC = Automatic Frequency Control nebo AFT = Automatic Fine Tuning



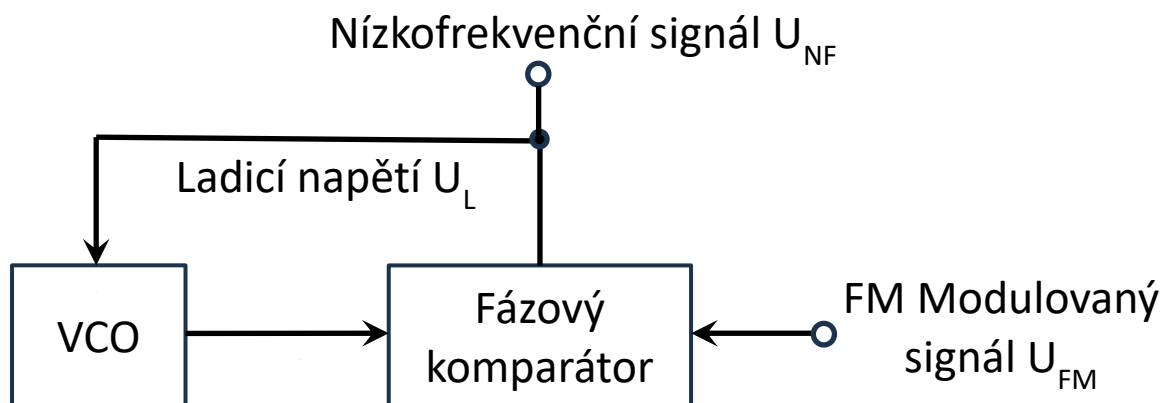
Obrázek 81: Princip fázového závěsu



Obrázek 82: Příklad integrovaného fázového závěsu – CD4046

Demodulátor FM

Princip fázového závěsu (PLL) se používá pro demodulaci kmitočtově modulovaného signálu FM (Obrázek 83):



Obrázek 83: Demodulátor FM na principu PLL

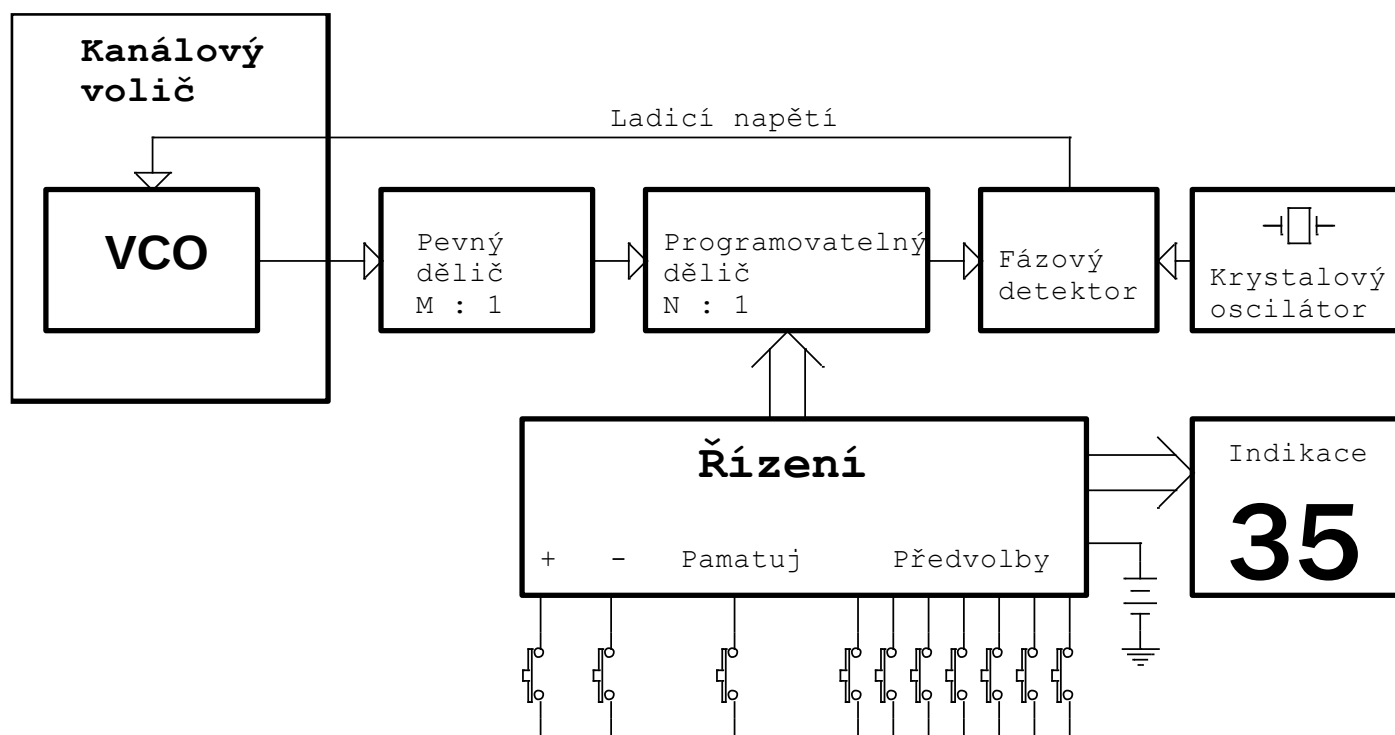
Víme, že fázový závěs je schopný naladit VCO na stejný kmitočet, jaký přichází zprava do fázového komparátoru. Budeme-li tedy zprava přivádět do fázového komparátoru signál s proměnným kmitočtem, tj. kmitočtově modulovaný, VCO se bude stále doladovat tak, aby jeho kmitočet byl stejný jako ten zprava. Ladicí napětí U_L se musí stále měnit tak, aby oba kmitočty byly shodné. U_L se tedy mění v rytmu toho signálu, kterým je signál U_{FM} modulován, tj. v rytmu signálu nízkofrekvenčního. Na výstupu fázového komparátoru je tedy demodulovaný nízkofrekvenční signál U_{NF} .

11.2.3 Kmitočtová syntéza

Princip fázového závěsu je využit také pro tzv. kmitočtovou syntézu.

Kmitočtová syntéza odstraňuje nedostatky napěťové syntézy. **Obrázek 84** ukazuje obvody, které s pomocí kmitočtové syntézy umožňují základní funkce spojené s laděním televizoru.

Funkce bloku „Řízení“ (**Obrázek 85**) je podobná jako u napěťové syntézy. Hlavní rozdíl je v tom, že do paměti se neukládá číslo, odpovídající napětí, ale číslo, odpovídající přímo kmitočtu. O tomto bloku bude ještě řeč později.



Obrázek 84: Příklad využití kmitočtové syntézy v televizním přijímači

Fázový detektor porovnává kmitočty na svých dvou vstupech: zprava z krystalového oscilátoru, zleva z programovatelného děliče. Na výstupu fázového detektoru je napětí, odpovídající rozdílu obou kmitočtů. Toto napětí je přivedeno na napětím řízený oscilátor (VCO). Ten je tímto napětím doladován tak, aby oba kmitočty na vstupech fázového detektoru byly stejné.

Signál z VCO přichází na fázový detektor přes dva děliče kmitočtu: pevný dělič dělí kmitočet číslem M, programovatelný dělič dělí číslem N.

Aby oba kmitočty na vstupech fázového detektoru byly stejné, musí proto VCO vyrábět kmitočet M-krát N-krát vyšší, než je kmitočet krystalového oscilátoru. Bude platit

$$f_{VCO} = M * N * f_{osc}$$

Bude-li např. $f_{osc} = 1\text{ kHz}$, $M = 100$, $N = 1000$, pak kmitočet VCO bude

$$f_{VCO} = 100 * 1000 * 1\text{ kHz} = 100\,000\text{ kHz} = 100\text{ MHz}$$

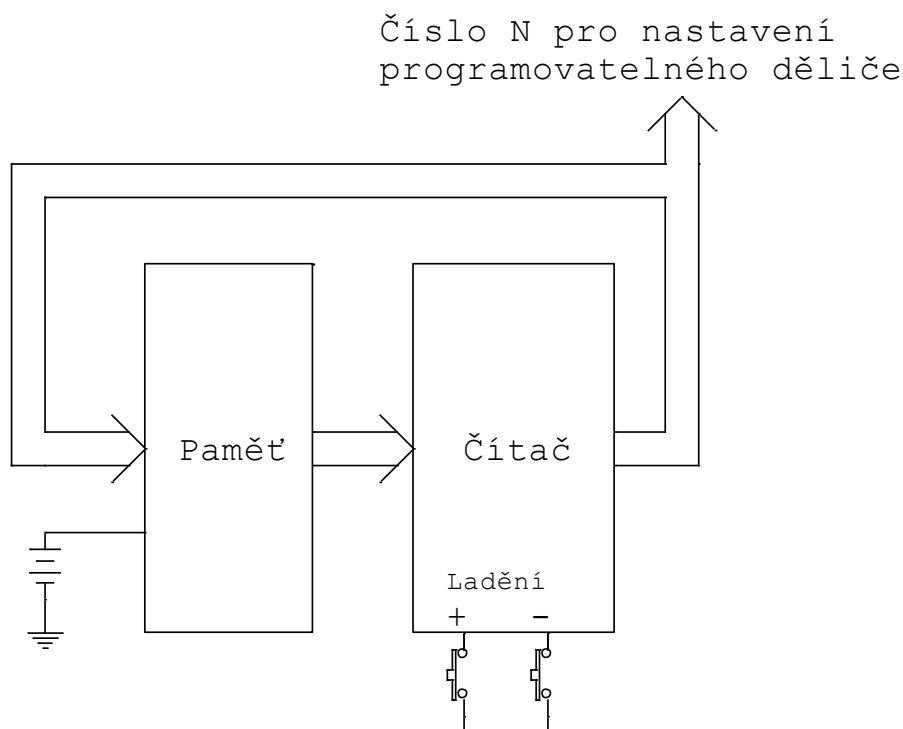
Tento kmitočet je závislý na kmitočtu krystalového oscilátoru, který je stabilní a přesný. Proto bude stabilní a přesný i kmitočet f_{vco} .

Dělicí poměr programovatelného děliče je roven číslu, které mu přivádíme z bloku „Řízení“. Když toto číslo změním z 1000 na 1001, kmitočet f_{vco} se změní na

$$f_{vco} = 100 * 1001 * 1 \text{ kHz} = 100\,100 \text{ kHz} = 100,1 \text{ MHz}$$

Tento kmitočet je opět stabilní a přesný, protože je odvozen od krystalového oscilátoru, ale přitom jsme jej právě přeladili o 100 kHz! Spojili jsme tedy dva zcela protichůdné požadavky: stabilita a přesnost vs. přeladitelnost.

Ladění a předvolby budou spočívat ve změnách čísla N nahoru – dolů při ladění nahoru – dolů a v ukládání čísel N, odpovídajících předvoleným stanicím.



Obrázek 85: Podrobnější blokové schéma bloku „Řízení“ pro kmitočtovou syntézu

Blok „Řízení“ (Obrázek 85) bude dokonce jednodušší, než v případě napětové syntézy: Ušetříme digitálně-analogový převodník.

Pevný dělič bývá potřebný proto, že programovatelný dělič, jehož činnost je složitější, by nestíhal dělit přímo vysoký kmitočet VCO.

Součinu $M * f_{osc}$ říkáme krok systému. Je to nejmenší hodnota, o kterou je možno přeladit oscilátor VCO.

$$f_{krok} = M * f_{osc}$$

V uvedeném příkladu bude krok systému

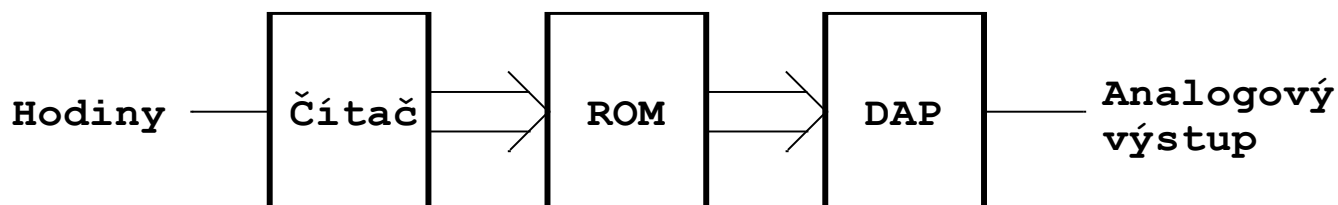
$$f_{krok} = 100 * 1 \text{ kHz} = 100 \text{ kHz}$$

Čím větší budou hodnoty M a f_{osc} , tím bude přeladování hrubší, což může být nevýhoda. Většinou to ale není velký problém, protože můžeme zvolit takové hodnoty M, N a kmitočtu krystalového oscilátoru, které pro daný účel vyhoví.

Protože kmitočtová syntéza zaručuje vždy přesné naladění požadovaného kmitočtu, nepotřebuje žádné automatické doladování kmitočtu (AFC = ADK), a je proto mnohem dokonalejší než napěťová syntéza.

11.3 Digitální generování signálů libovolného průběhu

Libovolné analogové průběhy je možno generovat pomocí číslicových obvodů. Je to metoda vhodná pro generování speciálních signálů (např. simulace EKG – viz dále) a velmi pomalých signálů.



Obrázek 86: Digitální generování signálů libovolného průběhu

Průběhy signálů, které se mají generovat, jsou uloženy v paměti ROM v podobě posloupností čísel. Tato čísla vyjadřují hodnoty napětí, kterých má signál postupně nabývat. Signály se z paměti vybírají a přehrávají podobně jako při syntéze zvuků hudebních nástrojů metodou Wave Table (viz předmět TVP).

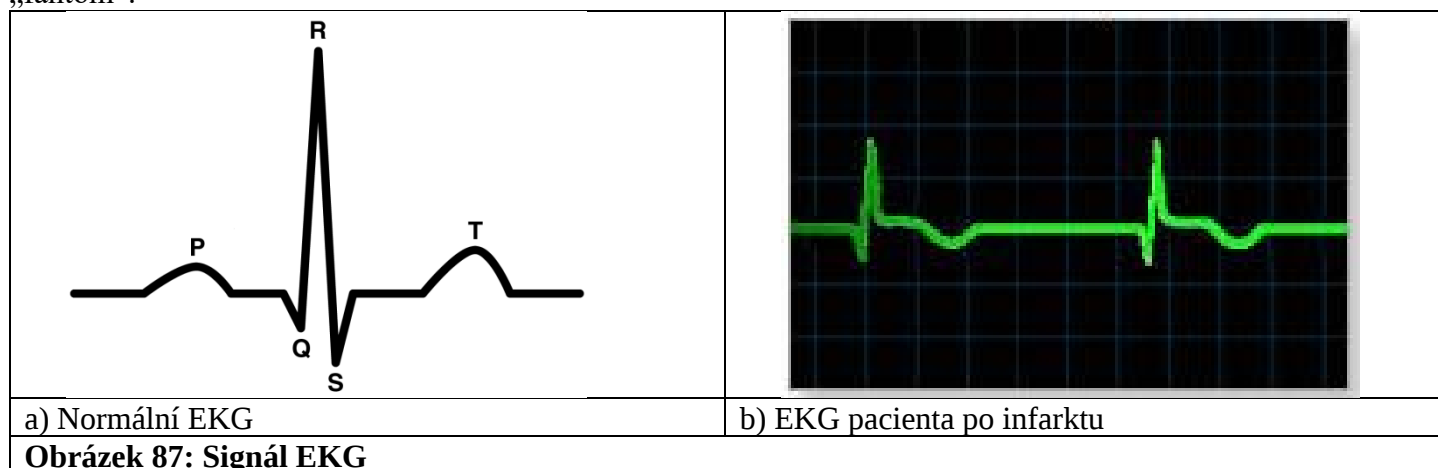
V paměti může být uloženo více průběhů, a z nich je potom možno volit pomocí adresových vstupů paměti ROM (v obrázku není nakresleno).

Generátor může být součástí jiného zařízení, např. počítače. Pak mohou připravené průběhy být uloženy na disku a vybraný průběh se přehrává z paměti RAM.

11.3.1 Příklady

Umělý pacient (simulátor signálu EKG)

Při vývoji, testování a předvádění přístrojů pro zpracování a zobrazení EKG¹ je nutné mít k dispozici signál EKG, ale není praktické získávat tento signál jen z člověka. Lepší je mít k dispozici přístroj, který takový signál vyrábí. Takový přístroj se nazývá „umělý pacient“, nebo odborně „simulátor signálu EKG“, nebo také „fantom“.



Obrázek 87 ukazuje příklady signálu EKG. Na obrázku a) je normální signál s vyznačením hlavních částí, zvaných vlny. Na obrázku b) je signál člověka, který nedávno utrpěl infarkt myokardu. Na první pohled vidíme výrazný rozdíl: Vlna T je invertovaná.

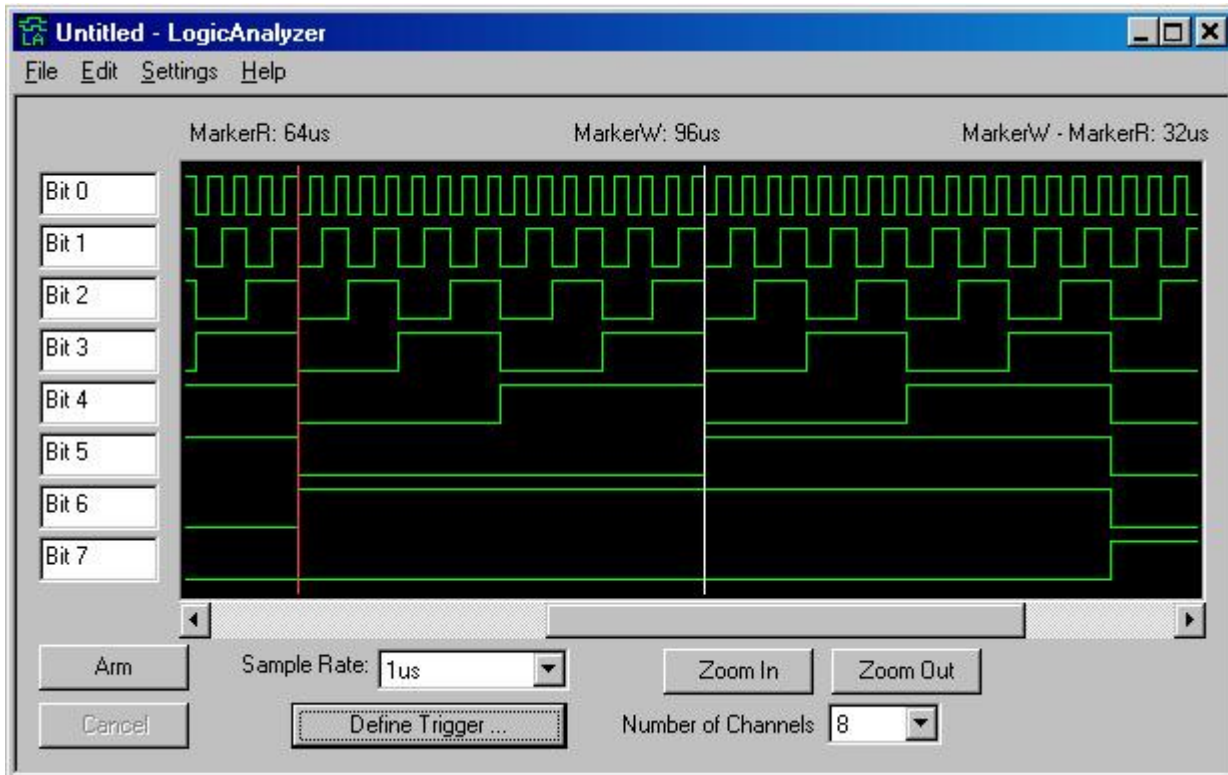
Takových signálů, „zdravých i nemocných“, si do paměti můžeme připravit více a pomocí přepínání adres z nich můžeme volit.

¹ EKG = ElektroKardioGram = záznam elektrické aktivity srdce

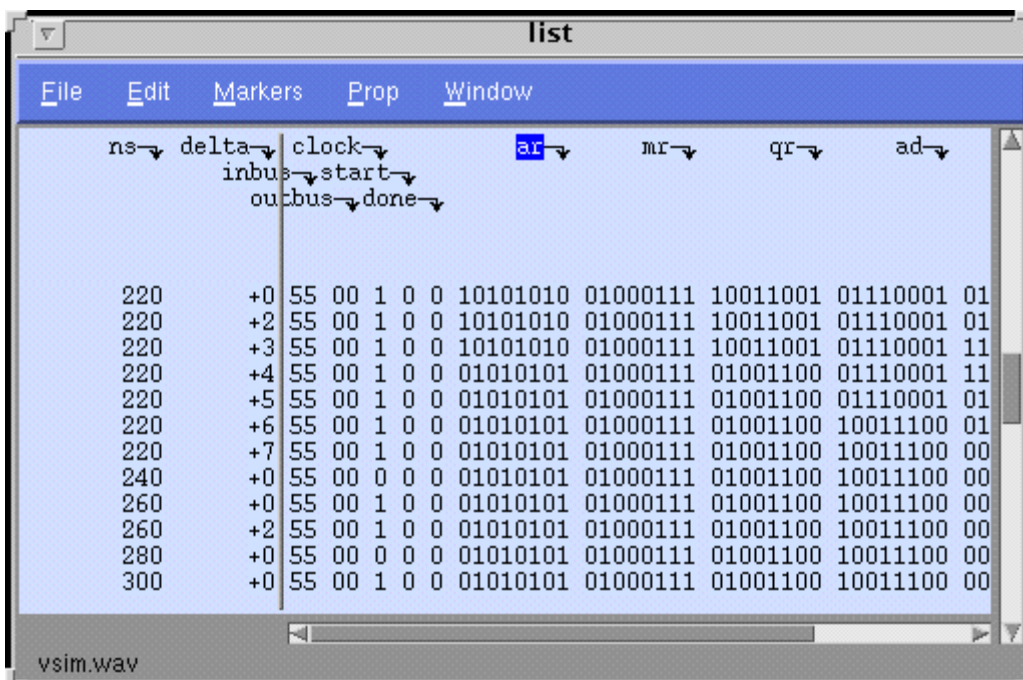
12. Logické analyzátory

Logický analyzátor je přístroj, který slouží k zobrazení mnoha logických signálů najednou. Nerozlišuje ani nezobrazuje skutečné napětové průběhy signálů, ale jen jejich logické hodnoty. Logické hodnoty signálů mohou být zobrazeny graficky nebo numericky – v podobě sledu nul a jedniček.

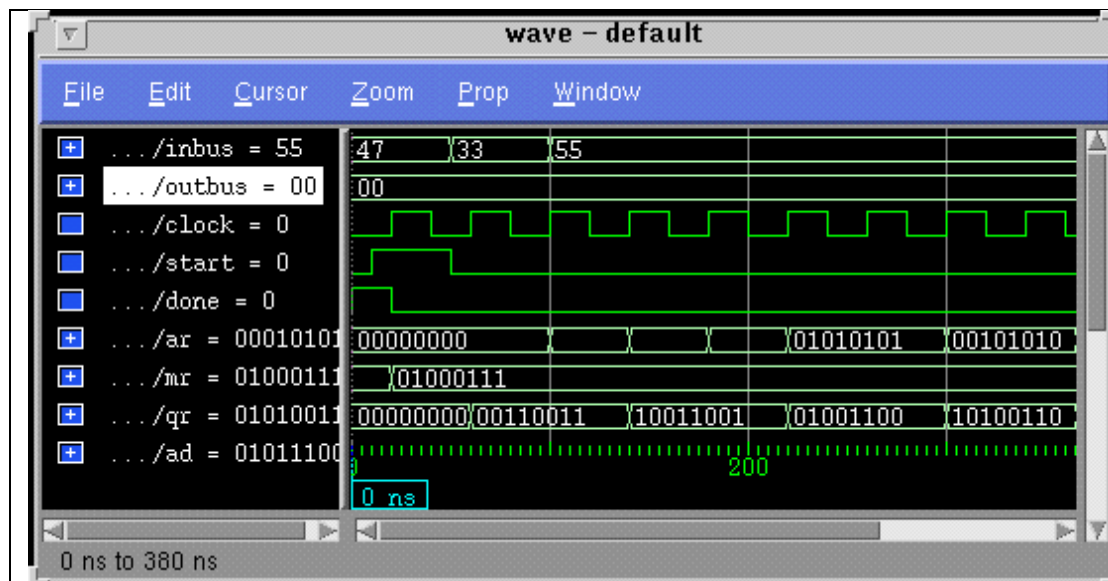
12.1 Možnosti zobrazení logickými analyzátory



Obrázek 88: Obrazovka logického analyzátoru – zobrazení osmi signálů v grafické podobě



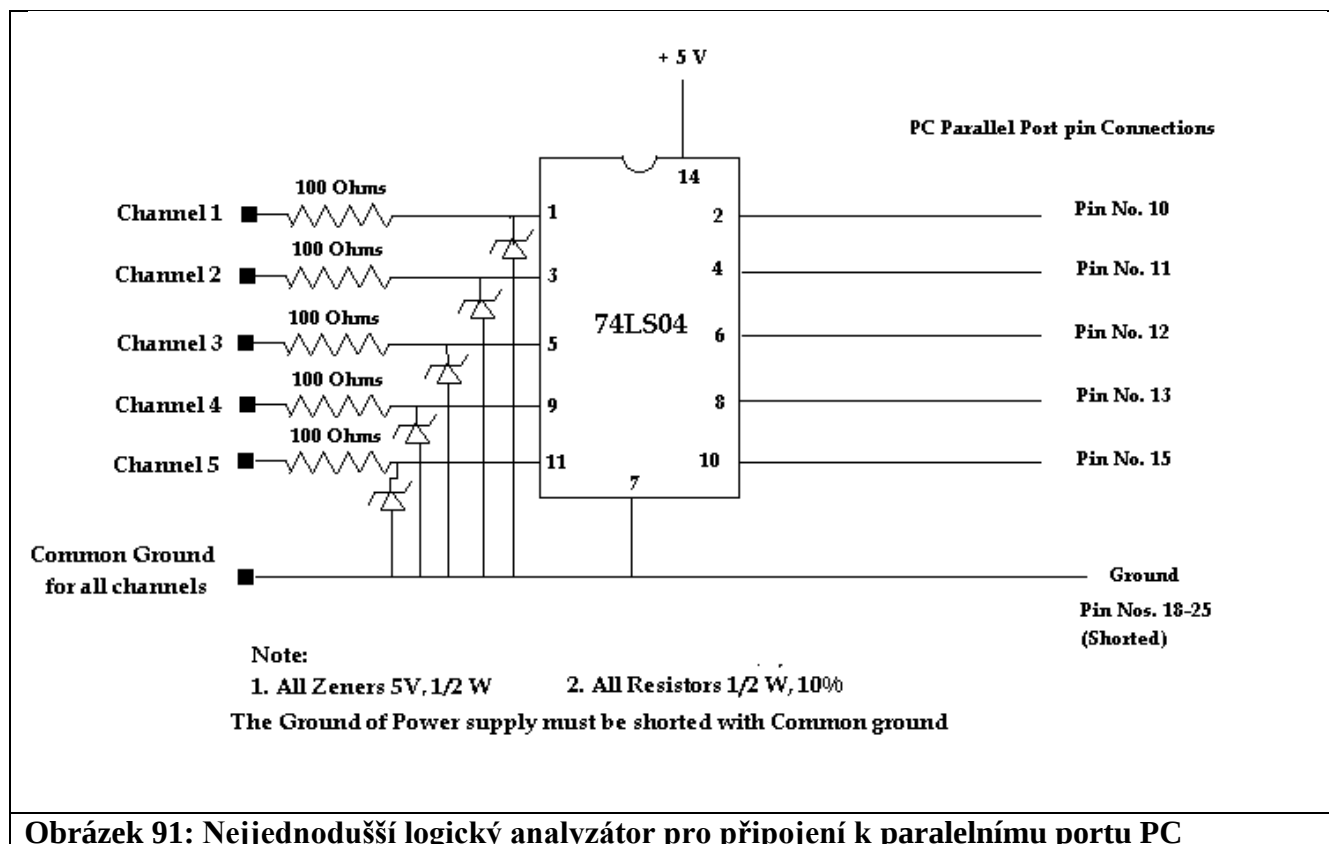
Obrázek 89: Zobrazení signálů jako sledu nul a jedniček



Obrázek 90: Kombinace grafické a číselné podoby zobrazení

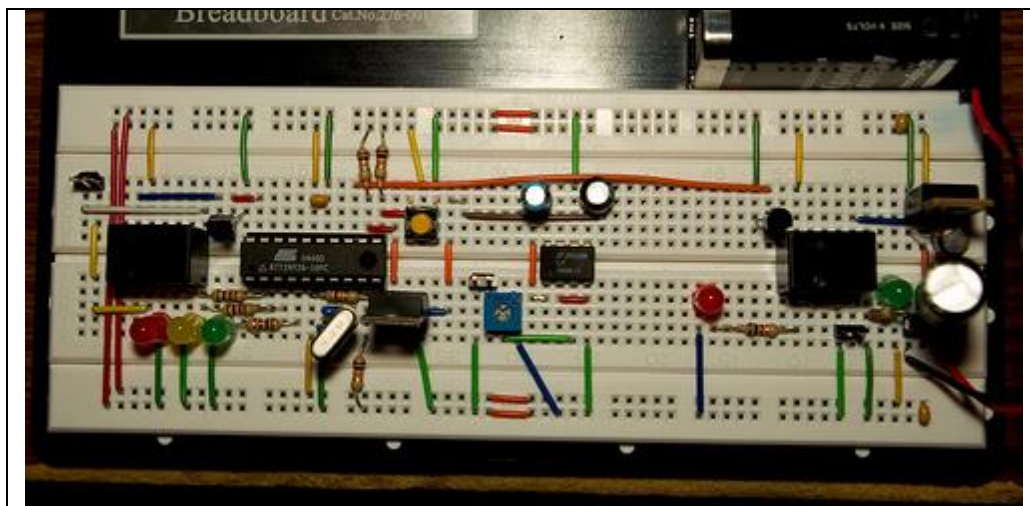
12.2 Provedení logických analyzátorů

Logické analyzátoři se dělají v nejrůznějších provedeních – od kompaktních¹ přístrojů až po stavebnice, od profesionálních drahých provedení až po amatérské konstrukce.



Obrázek 91: Nejjednodušší logický analyzátor pro připojení k paralelnímu portu PC

¹ Kompaktní přístroj = přístroj, který má všechny části v jedné skříni, ze které nic nečouhá. Stolní počítač např. kompaktní není, protože se skládá z několika dílů. Tablet kompaktní je.



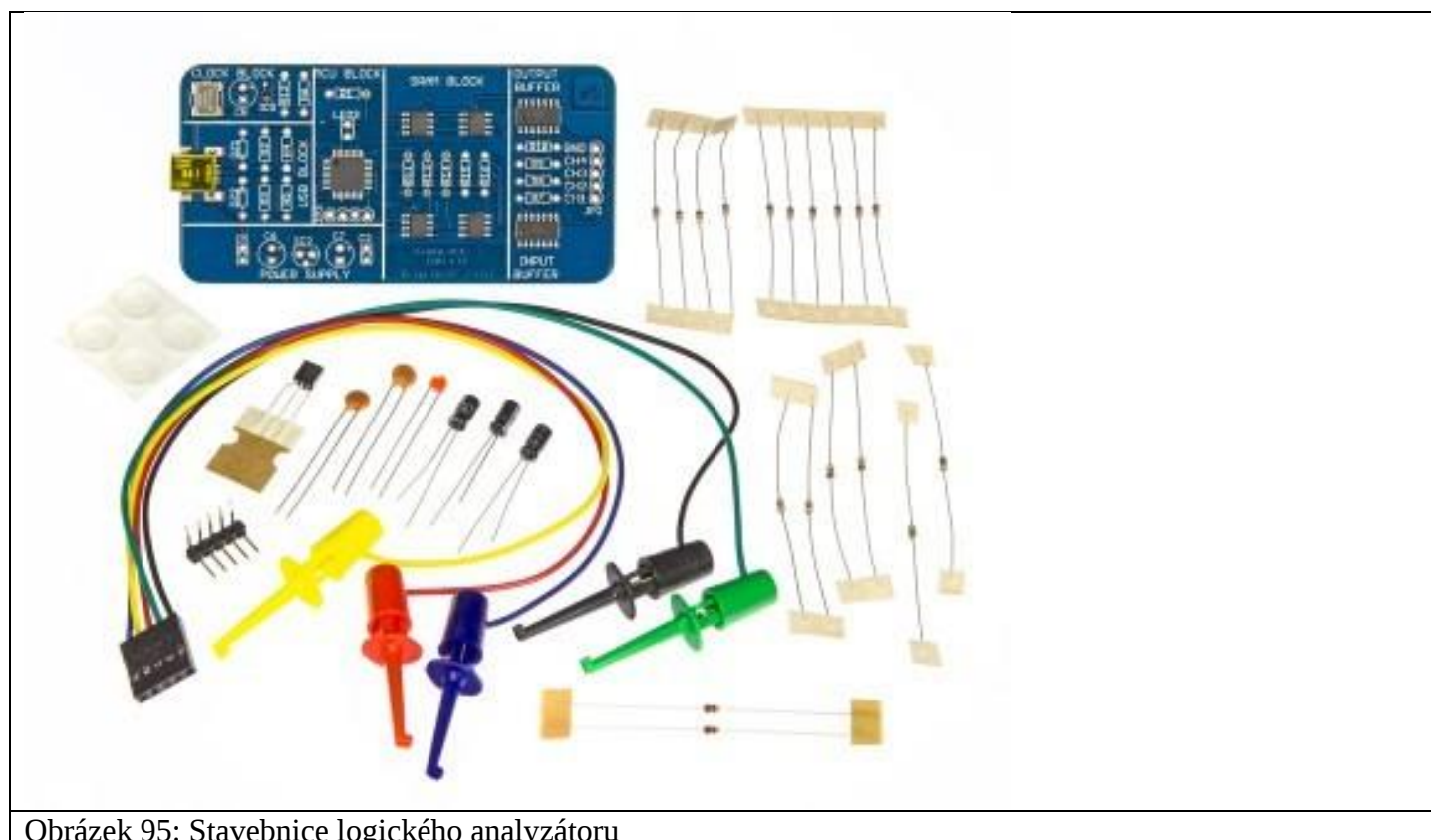
Obrázek 92: Logický analyzátor „na prkénku“



Obrázek 93: Logický analyzátor jako zařízení USB (cena v březnu 2023 300 Kč)



Obrázek 94: Kompaktní čtyřkanalový logický analyzátor. Zabudovaná baterie, 100 Msa/s. Cena v březnu 2023 2400 Kč



Obrázek 95: Stavebnice logického analyzátoru

12.3 Snímací sondy

Signály, které chceme zobrazit, musíme z měřeného zařízení nějak snímat. Přitom nesmíme měřené zařízení zatížit, ovlivnit. Snímací sondy proto musí mít velký vstupní odpor a malou kapacitu. Při velkém počtu snímaných kanálů je důležité, aby manipulace se sondami byla co nejsnadnější.

Od analyzátoru obvykle vede k měřenému zařízení jeden kabel, který končí v krabičce, ve které jsou umístěny zesilovače, snímající jednotlivé kanály. Od každého zesilovače vede z krabičky k měřenému zařízení krátký samostatný kablík. Takové uspořádání má minimální kapacitu jednotlivých snímačů (**Obrázek 96**).

Kablíky pro jednotlivé kanály bývají zakončeny miniaturními krokodýlky, patentními háčky, hroty, dutinkami. Speciální klipsny usnadňují snímání z integrovaných obvodů s mnoha vývody (**Obrázek 97**).



Obrázek 96: Šestnáctikanálová snímací sonda logického analyzátoru



Obrázek 97: Klipsna k nasazení na integrovaný obvod s mnoha vývody

12.4 Možnosti spouštění

Obraz na obrazovce představuje nějaký děj, který v měřeném obvodu proběhnul v minulosti. Aby jej analyzátor mohl zobrazit, musí

- začít nahrávat
- zjistit, že nastalo to, na co nejvíc čekáme
- ještě chvíli nahrávat
- nahrávání zastavit
- výsledek zobrazit

Začátek nahrávání může určit třeba uživatel: zmáčkne tlačítko – teď. Nebo může být nahrávání startováno pravidelně automaticky.

Nejdůležitější ale je definování a zjištění okamžiku, který nás v obvodu nejvíc zajímá. Především ten chceme vidět na obrazovce. Tomuto okamžiku se říká „okamžik spuštění“ (anglicky „trigger“).

Zajímá-li nás např., co se v obvodu děje po výskytu vzestupné hrany v kanálu D3, naprogramujeme analyzátor tak, aby zastavil nahrávání po výskytu této hrany.

Zajímá-li nás reakce měřeného obvodu při výskytu určité kombinace nul a jedniček, naprogramujeme analyzátor tak, aby čekal na tuto kombinaci, a po jejím výskytu nahrávání ukončil. Bude-li osmikanálový analyzátor naprogramován takto

D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
0	0	X	X	1	1	0	0

bude čekat na stav, kdy bude nula v kanálech D7, D6, D1, D0 a zároveň jednička v kanálech D3, D2, přičemž stavy v kanálech D5, D4 mu budou lhostejné.

Složitější podmínky pro okamžik spuštění mohou např. definovat, na kolik výskytů dané kombinace nul a jedniček se má čekat nebo jak dlouho má daná kombinace trvat. Je možno definovat dokonce posloupnost několika kombinací.

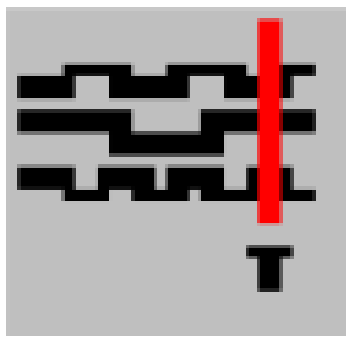
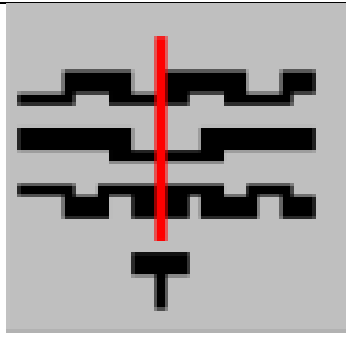
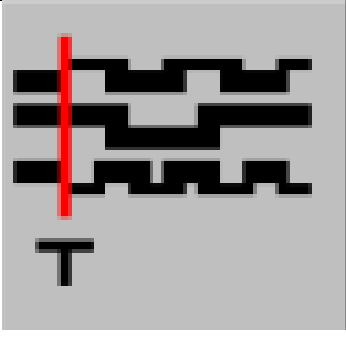
12.5 Možnosti zobrazení okamžiku spuštění

Okamžik spuštění, třeba výskyt zvolené kombinace nul a jedniček, chceme vidět na obrazovce. Můžeme si zvolit, že se zobrazí např. na začátku obrazovky, uprostřed, nebo na konci obrazovky.

Zobrazíme-li okamžik spuštění na konci obrazovky, vidíme na obrazovce především to, co tomuto okamžiku předcházelo. Tomuto způsobu zobrazení se říká „pre-trigger“.

Zobrazíme-li okamžik spuštění na začátku obrazovky, vidíme na obrazovce především to, co po tomto okamžiku následovalo. Tomuto způsobu zobrazení se říká „post-trigger“.

Jednotlivé možnosti ukazuje následující tabulka (**Tabulka 2**):

Obrazovka	Režim zobrazení	Zobrazuje
	Pre-trigger	Co bylo před
	Center	Co bylo kolem
	Post-trigger	Co bylo potom
Tabulka 2: Možnosti zobrazení okamžiku spuštění		