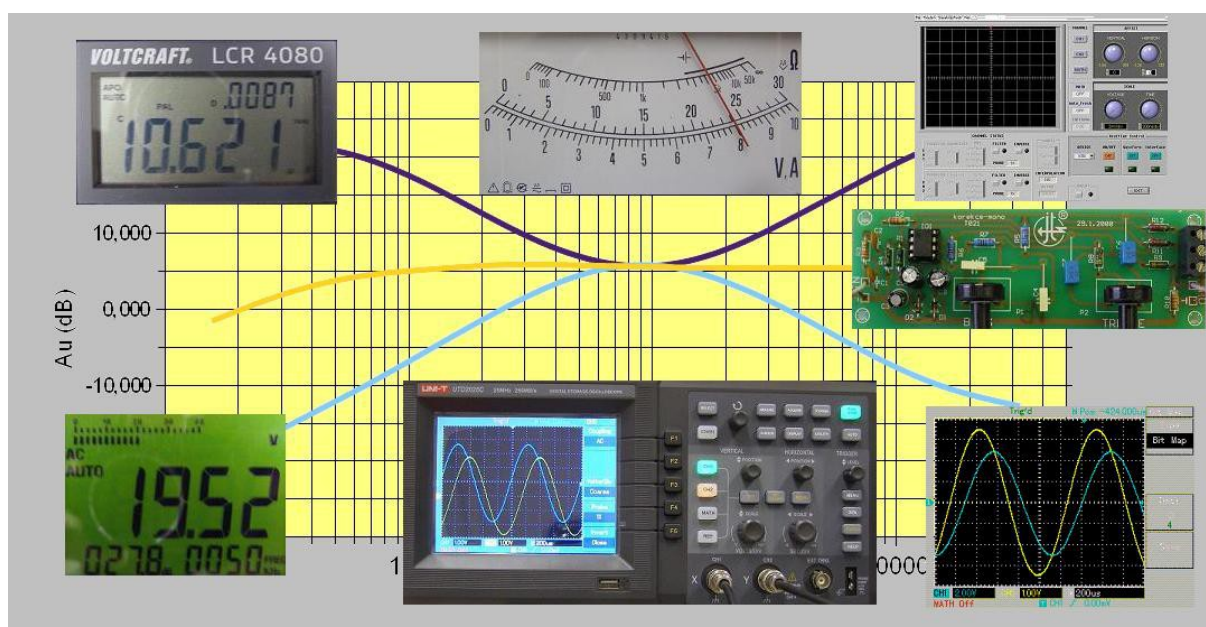


Praktické úlohy měření v elektronice a automatizaci

Milan Kulháněk



Praktické úlohy měření v elektronice a automatizaci

Milan Kulhánek

Poděkování:

Úvodem bych chtěl poděkovat panu Ing. Aleši Voborníkovi, Ph.D. z katedry měření Elektrotechnické fakulty ZČU v Plzni za obětavou pomoc a cenné připomínky při realizaci této publikace. Díky jeho obětavosti byly „vychytány“ různé překlepy a nedostatky.

OBSAH

1.	Slovník základních pojmů - výběr	3
2.	Soustava SI a etalony elektrických jednotek	5
2.2.	Dělení etalonů	6
3.	Způsoby elektrického měření	10
3.1.	Principy elektrického měření	11
4.	Nejistoty elektrického měření	15
4.1.	Dělení nejistot	15
4.2.	Chyby při měření analogovými přístroji	17
4.3.	Chyby při měření digitálními přístroji	23
4.4.	Chyby nepřímých měření	30
5.	Analogové měřicí přístroje	41
5.1.	Základní pojmy a značky	41
5.2.	Magnetoelektrická soustava	47
5.3.	Feromagnetická soustava	50
5.4.	Elektrodynamická soustava	54
5.5.	Ferodynamická soustava	56
6.	Digitální měřicí přístroje	59
6.1.	Základní údaje o digitálních přístrojích	60
6.2.	Principy měření	63
7.	Analogový osciloskop	66
8.	Digitální paměťový osciloskop (DSO)	69
9.	Ověřování rozsahů měřicích přístrojů	74
9.1.	Principy ověření rozsahů měřicích přístrojů	74
9.2.	Praktická úloha ověření rozsahu měřicího přístroje	76
10.	Úpravy rozsahů analogového měřicího přístroje	79
10.1.	Praktická úloha měření základních parametrů měřicího přístroje	80
10.2.	Analogová měřicí soustava – nastavení rozsahu voltmetru	83
10.3.	Praktická úloha nastavení rozsahu voltmetru	84
10.4.	Analogová měřicí soustava – nastavení rozsahu ampérmetru	86
10.5.	Praktická úloha nastavení rozsahu ampérmetru	87
11.	Úpravy rozsahů digitálního měřicího přístroje	89
11.1.	Praktická úloha měření základních parametrů digitálního měřidla	90
11.2.	Panelový digitální měřicí modul – nastavení rozsahu voltmetru	93
11.3.	Praktická úloha nastavení rozsahu digitálního voltmetru	94
11.4.	Panelový digitální měřicí modul – nastavení digitálního ampérmetru	96
11.5.	Praktická úloha nastavení rozsahu digitálního ampérmetru	97
12.	Měření odporu rezistorů	99
12.1.	Praktické měření elektrického odporu	100
12.1.1.	Přímé měření elektrického odporu rezistoru	100
12.1.2.	Měření elektrického odporu Ohmovo metodou	102
12.1.3.	Měření elektrického odporu porovnávací metodou	105
13.	Měření kapacity kondenzátorů	108
13.1.	Praktické měření kapacity svitkového kondenzátoru	110
13.1.1.	Přímé měření kapacity kondenzátoru	110
13.1.2.	Nepřímé měření kapacity kondenzátoru voltmetrem a ampérmetrem	112

13.1.3.	Nepřímé měření kapacity metodou 3 ampérmetrů	114
14.	Měření vlastní indukčnosti cívek	118
14.1.	Praktické měření vlastní indukčnosti vzduchové cívky	121
14.1.1.	Přímé měření indukčnosti vzduchové cívky	121
14.1.2.	Měření indukčnosti vzduchové cívky voltmetrem a ampérmetrem	122
14.2.	Praktické měření vlastní indukčnosti cívky s jádrem	126
14.2.1.	Metoda 3 voltmetrů	126
14.2.2.	Reaktanční metoda	128
15.	Měření termistorů	130
15.1.	Praktické měření charakteristiky termistorů NTC	132
15.2.	Praktické měření vlastností termistoru PTC	134
16.	Měření RC členů – dolní, horní, pásmová propust	136
16.1.	RC členy 1. řádu	136
16.2.	RC členy 2. řádu	138
16.3.	Praktické měření přenosu RC členu 1. řádu – dolní propust	141
16.4.	Praktické měření přenosu RC členu 1. řádu – horní propust	146
16.5.	Praktické měření přenosu RC členu 2. řádu – Wienův článek	149
17.	Měření korekčního předzesilovače	154
17.1.	Praktické měření korekčního předzesilovače	155
18.	Měření výkonového zesilovače	160
18.1.	Praktické měření vstupní impedance	160
18.2.	Praktické měření výstupní impedance	162
18.3.	Praktické měření jmenovitého a špičkového výkonu	163
18.4.	Praktické měření výkonové šířky pásma	165
19.	Měření diod	168
19.1.	Praktické měření diod LED	169
19.2.	Praktické měření Zenerovo diod	173
19.3.	Praktické měření transilu	175
20.	Měření tyristoru	178
20.1.	Praktické měření spínacího proudu a napětí řídicí elektrody - hradla	179
20.2.	Praktické měření stejnosměrného přídržného (vratného) proudu	181
20.3.	Praktické měření tyristoru v obvodu celovlnného usměrnění	183
21.	Dvoupásmové reproduktorové výhybky – LC filtry	186
21.1.	Charakteristické vlastnosti výhybek	188
21.2.	Praktické měření dvoupásmové výhybky 1. řádu	189
21.3.	Praktické měření dvoupásmové výhybky 2. řádu	192
22.	Elektrické měření a ochrana životního prostředí	196
22.1.	Příklady výroby elektrické (zelené) energie z obnovitelných zdrojů	196
22.2.	Baterie a akumulátory	201
22.3.	Elektroodpad	202
22.4.	Spalovna odpadů	203
22.5.	Měkké pájení z hlediska životního prostředí	206
23.	Doporučená literatura	210
24.	Kontrolní otázky	211

1. Slovník základních pojmů - výběr

Abychom se v elektrotechnice domluvili, existují pojmy, které je k tomu nutné znát. Jedná se o základní názvy a popisy činností, veličin, jednotek, pracovních postupů a vyhodnocení.

 Elektrické měření  Electrical measurement  Elektrische Messung

Obvykle rozumíme pokusné nebo výpočtové práce, kdy výsledky měřených veličin získáme pomocí měřicích přístrojů při dodržení měřicích postupů a metod. Měření je souhrn všech úkonů, které slouží ke zjištění hodnoty elektrické veličiny pomocí speciálních prostředků – měřicích přístrojů. Měření je tedy určení velikosti měřené veličiny v jejích jednotkách nebo výpočet hodnoty další veličiny ze změřených veličin jiných. Dochází tedy k převodu měřených veličin na jiné.

 Elektrická veličina  Electrical parameter  Elektrische Parameter

Velikost nebo hodnota, kterou můžeme rozlišit – určit. To znamená vyjádřit konkrétním číslem. Přímě měřená veličina je vždy hlavním cílem měření. Např: elektrické napětí, elektrický proud, odpor, výkon atd.

 Elektrická jednotka  Electric unit  Elektroeinheit

Symbol, který se používá k označení hodnoty konkrétní elektrické veličiny. Hodnoty – velikosti jednotek jsou přesně definovány mezinárodními normami. Např: volt, ampér, ohm, watt atd.

 Měřicí prostředek  Mean of measurement  Messmittel

Všechna zařízení určená k elektrickému měření.

 Měřicí přístroj  Measuring device  Messgerät

Měřicí prostředek, kterým získáme údaj o velikosti měřené veličiny (údaj na displeji, údaj ze stupnice, z obrazovky atd.). Vyrábí se analogové a digitální.

 Měřicí převodník  Measuring transducer  Messumformer

Měřicí prostředek, který slouží k převedení jedné veličiny na jinou nebo na jinou hodnotu měřené veličiny. Např: měřicí transformátor, usměrňovač, bočník, předřadník, zesilovač, termoelektrický článek, termistor apod.

 Etalon (normál)  Standard  Musterstück (Etalons)

Velmi přesný měřicí prostředek, který přesně definuje hodnotu elektrické jednotky. Slouží k porovnávacímu měření. Nesmí měnit svou hodnotu v závislosti na času.

 Multimetr  Multimeter  Multimeter

Univerzální měřicí přístroj určený k měření ustálených elektrických veličin (napětí, proud, odpor ...).

 Analogový údaj  Analog data  Analogangabe

Údaj odečtený ze stupnice nebo obrazovky analogového měřicího přístroje. Změnu analogového údaje vnímáme spojitě – plynule.

 Digitální údaj  Digital data  Digitalangabe

Údaj odečtený z displeje digitálního měřicího přístroje. Je snadno rozlišitelný, ale při změně hodnoty mění svoji hodnotu skokově.

 Spotřeba přístroje  Self-consumption of device  Gerätsverbrauch

Příkon přístroje, který ovlivňuje měřenou veličinu.

 Měřicí rozsah  Measuring range  Messumfang

Vyjadřuje rozmezí měřených hodnot při zachování udané přesnosti přístroje.

 Měřicí konstanta  Measuring constant  Messkonstante

Číslo, kterým násobíme dílky výchylky analogového přístroje. Odvozuje se od rozsahu přístroje a z počtu dílků stupnice.

 Přetížitelnost  Overload capacity  Überlastung des Messgerät

Tímto pojmem rozumíme velikost přetížení měřicího přístroje.

 Vstupní impedance  Input impedance  Eingangsimpedanz

Jedná se o impedanci vstupního děliče multimetru nebo osciloskopu.

 Přesnost  Device accuracy  Genauigkeit des Messgeräts

Parametry daného měřicího přístroje, které udává výrobce.

 Vstupní vazba  Input coupling  Eingangskopplung

Jedná se možnost volby způsobu zpracování vstupního napětí osciloskopu.

 Chyba měření  Measurement error  Messfehler

Vyjádření odchylky naměřené hodnoty podle přesnosti přístroje.

 Elektrické napětí  Electrical voltage  Elektrische Spannung

Základní elektrická veličina, která udává rozdíl potenciálů mezi měřenými body elektrického obvodu.

 Elektrický proud  Electrical voltage  Elektrischer Strom

Udává množství tekoucích elektronů mezi dvěma póly elektrického obvodu.

 Elektrický odpor  Electrical resistance  Elektrischer Widerstand

Jedná se o vlastnost materiálu vést elektrický proud.

2. Soustava SI a etalony elektrických jednotek

Základní fyzikální jednotky, které v současné době používáme, jsou od roku 1960 uvedeny v mezinárodní soustavě SI. Tato soustava uvádí 7 hlavních fyzikálních jednotek, které nemění své vlastnosti v závislosti na času. Definice jednotek se vyvíjí, jak vlivem stále modernější techniky dochází ke stále přesnějšímu určení hodnot. V praktickém životě „běžného“ elektrikáře se však v podstatě nic nemění.

2.1. Soustava SI

metr – značka m – původně byla délka 1m definována jako 1/10 000 000 čtvrtiny zemského poledníku. Nyní je 1m určen jako délka dráhy, kterou uběhne světlo ve vakuu za 1/299 792 458 sekundy.

kilogram – značka kg – jednotka je určena 1 dm³ destilované vody o teplotě 4°C.

sekunda – značka s – původně byla jednotka určena jako 1/84 400 délky středního slunečního dne. Nyní se sekunda odvozuje od period záření, které prochází atomem cesia 133.

ampér – značka A – dříve byla velikost proudu 1 A určena pomocí tzv. proudové váhy, která pracovala na principu vylučování stříbra ze stříbrného oxidu / sekundu. V současné době se proud 1 A uvažuje jako stálý elektrický proud 2 rovnoběžnými přímými, nekonečně dlouhými, vodiči ve vakuu, v přesné vzdálenosti od sebe, které na sebe působí definovanou silou.

kelvin – značka °K – je určený jako 1/273,16 termodynamické teploty trojného bodu vody

mol – značka mol- definováno jako látkové množství soustavy – podle počtu atomů v přesně určeném množství uhlíku 12.

kandela – značka cd – určena jako svítivost zdroje, které vydává v daném směru přesně určené monochromatické záření.

Kromě těchto jednotek jsou ještě definovány další i neelektrické. Pro elektrotechniku jsou definovány ještě jednotky volt, ohm, farad, henry.

Aby bylo možné v praxi provádět kontrolní měření a jednotky posuzovat, jsou hodnoty vybraných jednotek uchovávány a definovány pomocí tzv. etalonů – normálů.

Etalony jsou velice přesné měřicí prostředky, které dané jednotky realizují. Etalon, nebo-li normál, musí konkrétní jednotku uchovat nezávisle na času a kdykoliv ji musí opět realizovat pro potřeby měření.

Etalony mohou existovat jako přesné elektrické zařízení (předmět), přesný měřicí přístroj i jako definice (software).

2.2. Dělení etalonů

Nejpřesnější – **mezinárodní – primární etalony** jsou uloženy v Mezinárodním úřadu pro míry a váhy v Paříži. Obecně lze říci, že jsou to etalony s nejvyšší dosažitelnou přesností.

Od primárních etalonů se určují **etalony sekundární**. Ty se dále dělí na 3 stupně – neboli 3 řády:

Nejpřesnější jsou **normály řádu 0**. Jsou to tzv. Státní etalony a u nás jsou uloženy v Praze.

Následují **etalony řádu 1**. Jsou to ověřovací normály a používají se pro kontrolu laboratorních přístrojů.

Jako poslední jsou **etalony řádu 2**. Jsou to hlavní normály měrových středisek. Měrová střediska pracují jako ověřovací pracoviště pro kontrolu měřicí techniky pracovníků v elektrotechnice. Bývají v každém regionu a každý elektrotechnik, který měřicí přístroje pro svou odbornou praxi používá, je povinen ze zákona v pravidelných lhůtách předkládat svoje přístroje ke kontrole.

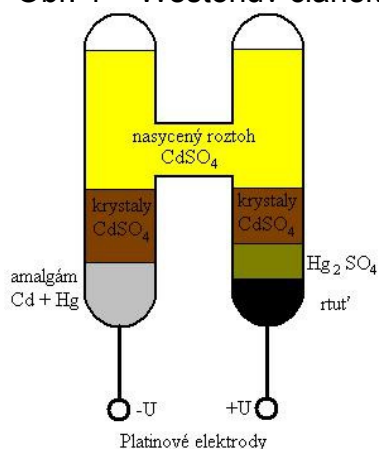
2.3. Etalony elektrických jednotek

Normály jednotky elektrického proudu

O laboratorních etalonech vyšších řádů jsme se již zmínili. Je nutné podotknout, že tyto etalony se v dílenské praxi realizovat nedají. Pro přesné měření lze použít přesný měřicí přístroj nebo velikost proudu definovat pomocí normálů jednotek elektrického napětí a odporu podle Ohmova zákona výpočtem.

Normály jednotky elektrického napětí

Obr. 1 – Westonův článek



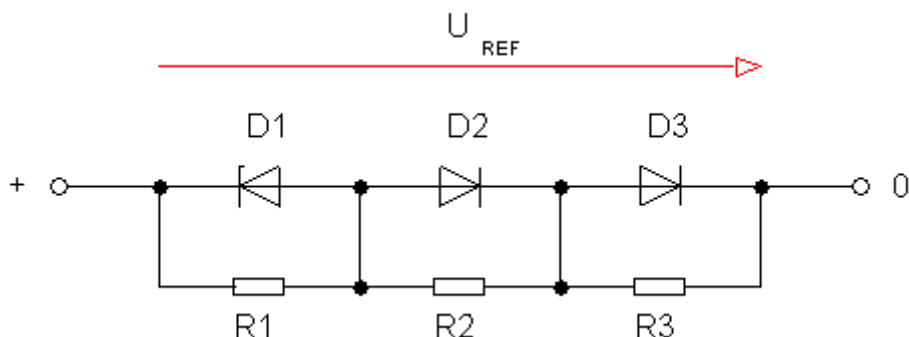
Tyto normály již realizovat lze. V laboratorních podmínkách lze použít Westonův článek. Má hodnotu napětí blíže hodnotě 1 V než článek Voltův a je tedy přesnější.

Napětí Westonova článu je 1,01865 V, při 20 °C. Je náchylný na poškození, nesmí se naklánět, musí mít stabilní polohu. Pro přesné měření, je-li delší dobu nepoužívaný, se musí kontrolovat – kalibrovat.

Tento článek nemůže poskytovat do obvodu velký proud. Jedná se o zlomky μA .

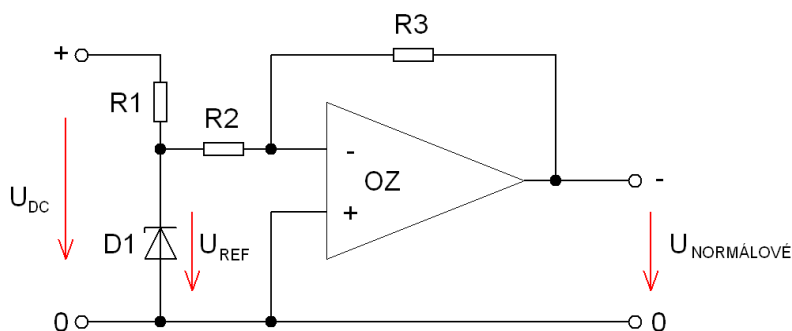
V současné době se používají pro definici jednotek napětí teplotně kompenzované Zenerovy diody.

Obr. 2 - Princip teplotní kompenzace Zenerovy diody



Základem je Zenerova dioda D1. Diody D2 a D3, spolu s rezistory R1, R2 a R3 zajišťují co nejmenší závislost na oteplení.

Použití těchto obvodů je univerzální. Dají se zapojovat do děličů napětí a tím je možné pro potřeby měření nastavit libovolné napětí. Zvláště s využitím integrovaných obvodů – operačních zesilovačů.



Obr. 3 – Zdroj normálového napětí s OZ

Uvedený obvod musí být napájen stabilizovaným, dobře vyfiltrovaným stejnosměrným napětím. Operační zesilovač je v invertujícím zapojení. Jeho napájecí napětí není v tomto schéma pro přehlednost principu zakresleno. Běžně se ve výkresech neuvádí, protože zapojení je vždy stejné. Teplotně kompenzovaná Zenerova dioda určuje hodnotu řídicího – referenčního – napětí. Rezistor R1 omezuje proud Zenerovo diodou – určuje její pracovní bod. Dioda se během měření nesmí oteplovat. Rezistory R2 a R3 určují napěťové zesílení operačního zesilovače.

Výstupní normálové napětí se vypočítá:

$$U_{\text{NORM}} = - U_{\text{REF}} \cdot \frac{R3}{R2}$$

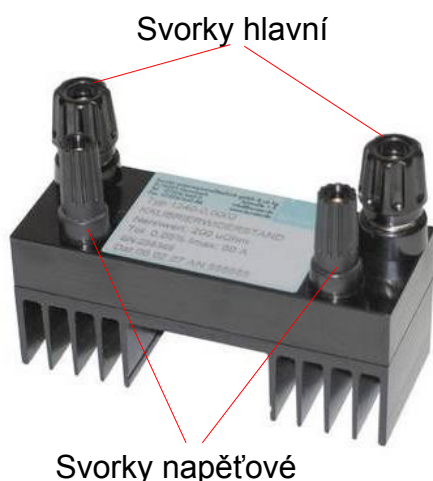
Jsou-li rezistory R2 a R3 přesné odporové normály, je výstupní napětí také normálové. Místo těchto rezistorů mohou být zapojeny v obvodu přesné odporové dekády.

Normály jednotky elektrického odporu

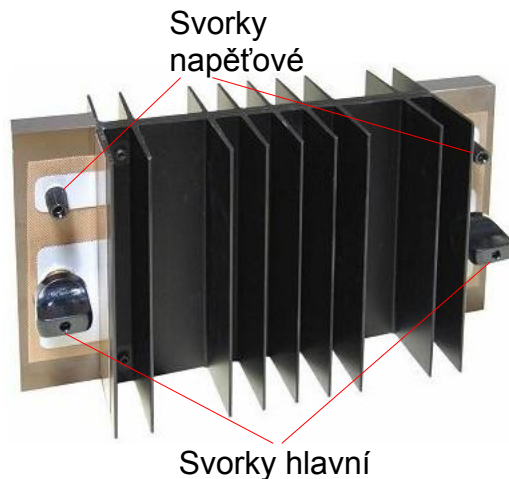
Jedná se vlastně o velmi přesné druhy rezistorů. Rozlišujeme normály na stejnosměrný a střídavý proud. Tyto rezistory nesmí měnit odpor v závislosti na času, musí mít malou závislost na oteplení. U normálů v obvodech střídavého proudu se navíc vyžaduje nulová indukčnost a kapacita. Pro běžná přesná měření se vyrábí etalony s přesností 0,01 %.

Materiál pro výrobu odporových etalonů musí být speciálně upravený. Nejvhodnější jsou slitiny. Např. Nikelin.

Obr. 4 – Etalon elektrického odporu



Obr. 5 – Etalon elektrického odporu



Oba normály elektrického odporu jsou provedené pro větší proudy. Přesné rezistory jsou opatřeny kvůli dobrému odvodu tepla chladičem. Hlavní svorky jsou určeny pro připojení rezistoru do měřeného obvodu. Musí být provedené tak, aby nevznikal žádný přechodový odpor. Ten by velmi podstatně znehodnotil přesnost měření. Na napěťové svorky se připojuje měřicí přístroj.

Obr. 6 - Odporový normál pro měření v obvodu střídavého napětí .



Tyto normály jsou rovněž navinuté odporovým vodičem. Aby se zamezilo vzniku

nežádoucí indukčnosti, která je při vyšších frekvencích podstatná, užívá se tzv. **bifilární vinutí**. Rezistor je navinutý tak, že sousedními vodiči vždy protéká opačný proud a tak se magnetická pole navzájem ruší. Připojovací konektory umožňují použití stíněných vodičů. I u těchto rezistorů jsou krajní svorky hlavní, pro připojení do obvodu a na prostřední – napěťové – se připojují měřicí přístroje.

Normály jednotek kapacity

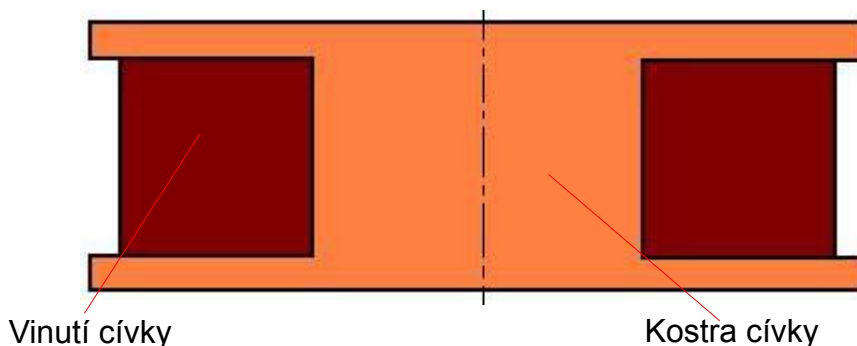
Tyto etalony se používají s plynným nebo pevným dielektrikem. Pro kapacity do 100 nF se používají deskové vzduchové kondenzátory. Základ tvoří pevné desky, do mezer mezi nimi se zasouvají desky otočné. Počet desek a jejich velikost jsou odvozené od dané kapacity. Pro větší kapacity se používají kondenzátory slídové (přesnost do 1%), pro vyšší kmitočty kondenzátory keramické.

Normály jednotek indukčnosti

Primární etalon představuje jednovrstvá cívka, která je navinutá na kostře z mramoru nebo skla. Do kostry je vybroušená drážka pro uložení vodiče.

Jako sekundární etalon se používá vícevrstvá vzduchová cívka, která je navinutá na válcové kostře z izolantu. Aby délka drátu a tím i jeho elektrický odpor byly co nejmenší, používá se tento tvar.

Obr. 7 – Etalon indukčnosti



Přesnost těchto etalonů je do 0,02 %.

3. Způsoby elektrického měření

Z praktického hlediska rozlišujeme způsoby měření podle možností, jak odečítat nebo zjistit hodnotu měřené veličiny a jakým způsobem tuto hodnotu udává použitý měřicí přístroj.

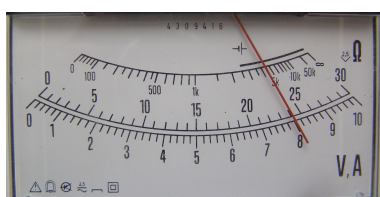
V naprosté většině měření použijeme **metodu přímou**. Jedná se o způsob, kdy hodnotu měřené veličiny odečítáme **přímo** ze stupnice nebo displeje měřicího přístroje v obvodu. Tento způsob je samozřejmě pro obsluhu nejsnazší. Není třeba chybějící údaje dopočítávat. Stačí vhodný, správně nastavený, měřicí přístroj správně zapojit do obvodu a pak už „jenom“ měřit.

Jestliže nelze požadovanou veličinu změřit přímo, musíme použít **metodu nepřímou**. V tomto případě si odvodíme výslednou hodnotu většinou pomocí výpočtu. **Nelze tedy pro požadovaný úkol měřicí přístroj pro přímé měření zapojit rovnou do obvodu**. Je proto nutné si odvodit, které veličiny můžeme v dané konstrukci změřit přímo. Při měření nepřímou metodou je důležitá správná volba měřicích přístrojů, protože výpočtem požadované veličiny se také zhoršuje přesnost měření – vzrůstá chyba. V praxi se většinou jedná o nepřímé měření proudů zapájenými součástkami, různé využití voltampérové metody, měření ztrátových výkonů na součástkách atd.

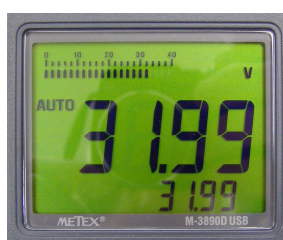
Další způsob měření rozlišujeme podle toho, jakým způsobem měří měřicí přístroj. Jestliže hodnota měřené veličiny je zobrazována na displeji digitálního přístroje nebo ji zjišťujeme z výchylky ručky analogového přístroje, mluvíme o **výchylové metodě**. Jedná se nejpoužívanější způsob odečtu měřených hodnot. Na tomto principu pracuje naprostá většina vyráběných měřicích přístrojů.

Obr. 8 - Příklady výchylových přístrojů

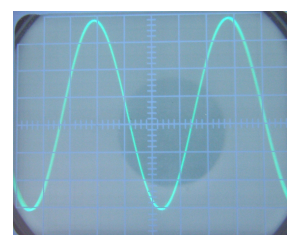
Analogový



Digitální



Osciloskop



U některých speciálních měřicích přístrojů se využívá způsob, kdy měřicí přístroj má „0“ uprostřed. Jedná se o **metodu nulovou**. Tento způsob měření se používá hlavně tam, kde se části měřených obvodů tzv. „vyvažují“. Např. při vyvažování měřicích můstků pomocí normálových odporových dekád. Požadovaná hodnota se pak odečítá z číselníků dekád a ne ze stupnice měřicího přístroje. Ten zobrazuje „0“.

V praxi samozřejmě tyto metody kombinujeme. Nejčastěji měříme **přímou**, **výchylovou** metodou. Jestliže nelze tento způsob použít, měříme **nepřímou**,

výchylkovou metodou.

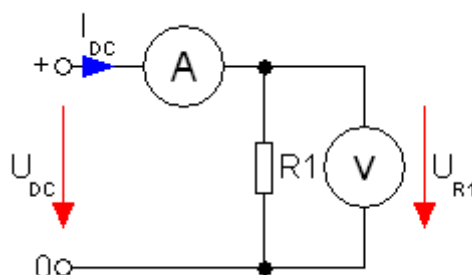
Při využití měřicích můstků používáme **nulovou** metodu.

3.1. Principy nepřímých měření

1) Voltampérová metoda

Jedná o způsob, kde využíváme pro výpočet konečné veličiny Ohmův zákon. Přímou metodou měříme napětí a proud. Další, požadované, veličiny dopočítáme.

Obr. 9 - Měření odporu rezistoru, měření výkonové ztráty na rezistoru.

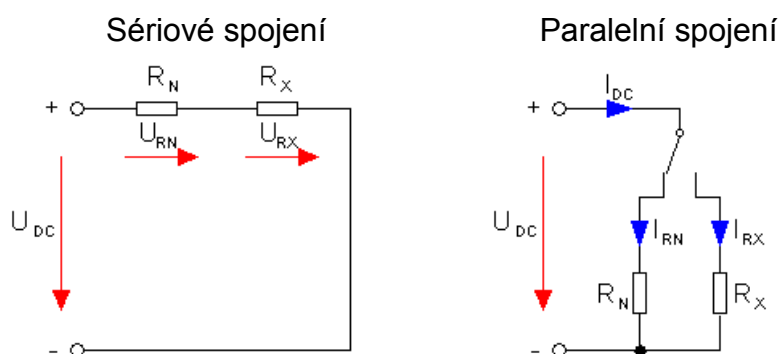


Použijeme výpočty: např. $P_{R1} = U_{R1} \cdot I_{DC}$ $R1 = \frac{U_{R1}}{I_{DC}}$

2) Srovnávací metoda

Lze využít pro přesné měření odporu rezistoru. Např. pro měření odporů, kde nelze využít běžné multimetry. Pro měření potřebujeme jeden měřicí přístroj a přesně změřený, normálový, rezistor. Můžeme využít zapojení sériové nebo paralelní.

Obr. 10 - Schéma měřicích obvodů srovnávací metody



Při sériovém spojení normálového rezistoru R_N a neznámého rezistoru R_X teče oběma rezistory stejný proud. Podle Ohmova zákona vznikají na rezistorech (podle schéma obvodu) úbytky napětí.

$$\text{Rovnice pro proud: } I = \frac{U_{RN}}{R_N} = \frac{U_{RX}}{R_X}$$

Neznámý tedy rezistor určíme podle vztahu:

$$R_X = R_N \cdot \frac{U_{RX}}{U_{RN}}$$

Protože vyhodnocujeme napětí, kvůli spotřebě voltmetrů je obvod vhodný pro měření malých R .

Při paralelním spojení normálového rezistoru R_N a neznámého rezistoru R_X je na obou rezistorech stejné napětí U_{DC} . Měříme tedy postupně proudy oběma rezistory při konstantním napětí. Rezistorem R_N teče proud I_{RN} a rezistorem R_X teče proud I_{RX} . Pomocí přepínače přepínáme obě větve pro ampérmetr I_{DC} .

Protože podle Ohmova zákona platí:

$$U_{DC} = I_{RN} \cdot R_N = I_{RX} \cdot R_X$$

bude neznámý rezistor R_X :

$$R_X = R_N \cdot \frac{I_{RN}}{I_{RX}}$$

Protože zde bereme v úvahu proudy, kvůli spotřebě ampérmetrů je obvod vhodný pro měření velkých R .

3) Substituční metoda (náhradní)

Uvedeme si rovněž příklad na měření odporu rezistoru. Při tomto způsobu měření je neznámá součástka přesně nahrazena součástkou známou, o stejné hodnotě.

Obr. 11 - Schéma měřicích obvodů substituční metody

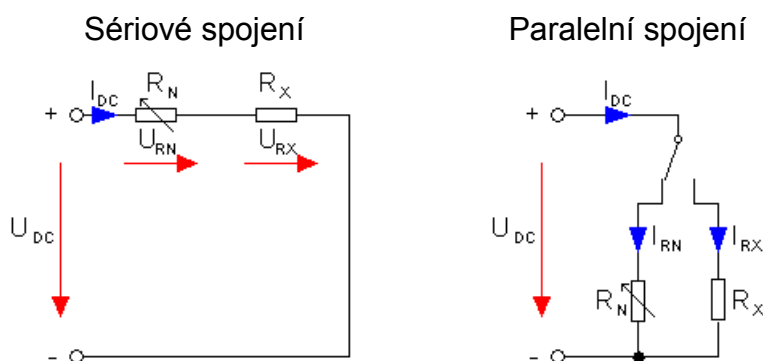


Schéma obou obvodů je podobné jako u srovnávacích způsobů měření. Jen s tím rozdílem, že normálové rezistory R_N jsou v obou případech nahrazené normálovými odporovými dekádami. Na jejich přesnosti závisí přesnost celého měření.

U sériového spojení proud I_{DC} vytváří na obou rezistorech úbytky napětí. Změnou odporu dekády nastavíme na rezistoru R_N stejný úbytek napětí jako na rezistoru R_X . Nastane tedy stav, kdy bude platit:

$$U_{RN} = U_{RX}$$

Protože obvodem teče jeden proud a obě napětí jsou stejná, jsou stejné i oba rezistory.

Bude tak platit, že: $R_N = R_X$

Hodnotu neznámého rezistoru si rovnou přečteme z odporové dekády.

Při paralelním spojení opět počítáme s proudy v obou paralelních větvích obvodu. Normálový rezistor R_N i zde tvoří odporová dekáda. Obvod je napájený napětím U_{DC} . Pomocí dekády R_N nastavíme v obou větvích stejný proud. Bude tedy platit, že:

$$I_{RN} = I_{RX}$$

Protože napájecí napětí je konstantní, budou stejné i hodnoty rezistorů:

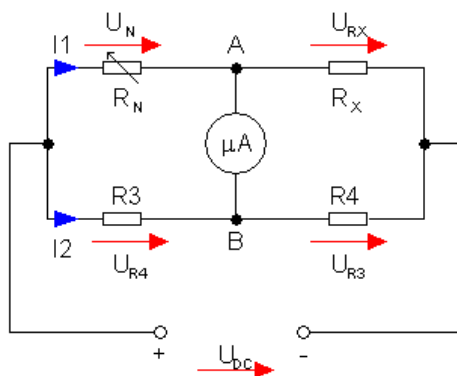
$$R_N = R_X$$

I v tomto případě si velikost neznámého rezistoru přečteme ze stupnice dekády.

4) Můstková metoda (nulová)

Uvedme si opět princip měření odporu. Při tomto způsobu se využívá „nulového“ vyvážení dvou větví odporového můstku. Je-li napětí v měřených vrcholech můstku nulové, jsou i proudy v obou větvích stejné a tím jsou i odpory v daných poměrech. Máme-li 3 rezistory známe, lze dopočítat odpor neznámý. Tento způsob měření je náročnější a používá se např. pro kalibraci (ověřování) rozsahů laboratorních přístrojů. Pro tato měření existuje několik typů měřicích můstků.

Obr. 12 - Zapojení Wheatstoneova můstku



V tomto obvodu je jako normálový rezistor R_N použita normálová odporová dekáda. Rezistory R_3 a R_4 jsou odporové normály. Rezistor R_X představuje neznámý odpor. Na pozici μA je zapojený mikroampérmetr s nulou uprostřed. Při vyvážení můstku musí být mezi body A a B nulové napětí. Pak musí platit:

$$R_1 \cdot I_1 = R_3 \cdot I_2 \text{ a zároveň } R_2 \cdot I_1 = R_4 \cdot I_2$$

Po úpravě:

$$R_X = R_N \cdot \frac{R_4}{R_3}$$

Jiné typy můstků existují pro měření kapacit i indukčností.

4. Nejistoty měření

Nejistota (chyba) měření je takový souhrn nepřesností, ke kterým při měření dochází. Podle chyby vyhodnocujeme přesnost měření. V praxi naprosto přesné měření neexistuje. Každé měření je určitým způsobem chybné. Přesnost měření ovlivňuje mnoho příčin. Např. přesnost přístrojů, použité metody a postupy měření, vnější vlivy na pracovištích, chyby obsluhy apod. Nejistota měření nám tedy prakticky stanovuje meze, ve kterých se naměřené nebo vypočtené hodnoty mohou pohybovat.

Postup měření volíme podle požadavků na výsledek, podle možností pracoviště – přesnosti přístrojů. Přesná laboratorní měření jsou náročná na techniku a čas. Dílenská měření bývají méně náročná, většinou se nepoužívají velmi přesné přístroje.

Pro každé měření lze odhadnout nutnou přesnost. Podle toho je potom nutno zvolit vhodnou měřicí techniku a metodu měření.

4.1. Dělení

Nejistoty při měření dělíme:

a) podle místa vzniku – čím jsou způsobené

Chyby metody	Chyby přístrojů	Chyby obsluhy
Základní příčinou je odběr energie z měřeného obvodu měřicími přístroji. Dále to může být různé zjednodušení výpočtů a zapojení. Tyto chyby lze obvykle vypočítat a provést korekci (opravu) výsledku.	Jsou důsledkem nedokonalostí měřících přístrojů. Jsou to dovolené chyby přístrojů, dané třídou přesnosti - výrobcem. V podstatě je můžeme pouze ověřit pravidelnou kalibrací. Při měření je musíme brát v úvahu.	Zejména chybné zapojení obvodu, nesprávná volba metody, špatné čtení hodnot, chybné výpočty. Největší chybou bývá nevhodně zjednodušená představa o funkci měřeného obvodu. Ta vede k použití nevhodné metody, přístrojů a zpracování výsledků.

b) podle charakteru

Soustavné chyby (systematické)	Nahodilé chyby	Hrubé chyby – omyly
Tyto chyby se vyskytují pravidelně. Jsou způsobené použitou metodou, přesností přístrojů, obsluhou. Často se stále opakují, zkreslují stejně výsledek měření. Obvykle lze provést opravu – korekci – výsledku.	Tyto chyby se vyskytují nepravidelně, nepředvídaně. Správnost měření ověřujeme opakováním. Obvykle provádíme více měření a z výsledků vypočítáme průměr. Ten se většinou nejvíce přibližuje správné hodnotě.	Jsou chyby, které zásadně ovlivňují výsledek. Těchto chyb se většinou dopouštíme pod vlivem nepozornosti, únavy, špatnými podmínkami na pracovišti. Většinou je snadno poznáme, velmi se liší od předpokládaných výsledků. Musíme chybu odstranit a měření je nutné opakovat.

4.2. Chyby při měření analogovými přístroji

Tyto chyby vznikají nedokonalostí měřicích přístrojů. Při opakovaném měření jsou stejné. Jsou ovlivněné kvalitou měřicího systému.

Absolutní chyba: rozdíl mezi naměřenou a skutečnou hodnotou. Protože skutečnou hodnotu nelze nikdy přesně zjistit, můžeme za ni považovat hodnotu vypočtenou (teoretickou, předpokládanou) nebo hodnotu naměřenou přesnějším přístrojem.

Značí se Δ a přidává se index uvažované veličiny, a vyjadřuje se v příslušných jednotkách uvedené veličiny.

Například:

absolutní chyba hodnoty napětí: Δ_U [V, mV, μ V]

absolutní chyba hodnoty proudu: Δ_I [A, mA, μ A]

Příklad výpočtu: $\Delta_U = (\text{naměřená hodnota} - \text{skutečná hodnota})$

Relativní chyba: absolutní chyba , která je vyjádřena v %. V podstatě určuje kolik procent zvoleného rozsahu přístroje vykazuje absolutní chyba.

Značí se δ a může se přidat index uvažované veličiny, jednotky. Např. δ_U [%], δ_A [%]

Příklad výpočtu:

$$\delta_v = \frac{(\text{naměřená} - \text{skutečná hodnota})}{\text{naměřená hodnota}} \cdot 100 = \frac{\Delta_U}{\text{naměřená hodnota}} \cdot 100$$

Výrobce nám udává většinou relativní chybu největšího měřicího rozsahu. Tento údaj se nazývá třída přesnosti měřicího přístroje a bývá udáván na stupnici.

Lze ji odvodit:

$$\delta = \frac{(\text{naměřená} - \text{skutečná hodnota})}{\text{hodnota uvažovaného rozsahu}} \cdot 100 = \frac{\Delta_U}{\text{hodnota rozsahu}} \cdot 100$$

Podle uvedené třídy přesnosti lze naopak určit pro konkrétní rozsah absolutní chybu. **Ta je pak v celém rozsahu stejná.**

Vezměme například přístroj PU 500 (METRA Blansko). Na stupnici si přečteme, že třída přesnosti je 2,5. To znamená, že pro rozsahy přístroje platí hodnoty relativní chyby $\delta = + / - 2,5 \%$.

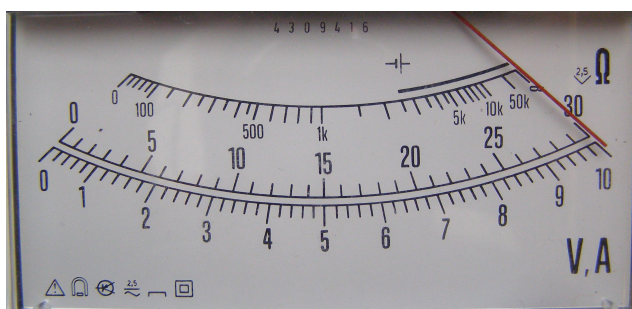
$$\text{Hodnota absolutní chyby pro napěťový rozsah : } \Delta_U = \frac{\text{zvolený rozsah}}{100} \cdot \delta$$

$$\text{Hodnota absolutní chyby pro proudový rozsah : } \Delta_I = \frac{\text{zvolený rozsah}}{100} \cdot \delta$$

Stejným způsobem postupujeme pro další rozsahy.

Při menší výchylce se relativní chyba zvětšuje. Uvedme si příklad:

Měřicí přístroj PU 500. Třída přesnosti 2,5. Hodnota posuzovaného napětí: $U = 1 \text{ V}$



Obr. 13 – PU 500 rozsah 1V

Při rozsahu 1 V volíme stupnici 10 dílků. Výchylka je 10 dílků. Pak tedy:

$$U = \frac{\text{rozsah přístroje}}{\text{počet dílků stupnice}} \cdot \text{počet dílků výchylky} = \frac{1}{10} \cdot 10 = 1 \text{ V}$$

Absolutní chyba:

$$\Delta_U = \frac{\delta_U \cdot \text{rozsah}}{100} = \frac{2,5 \cdot 1}{100} = + / - 0,025 \text{ V} = + / - 25 \text{ mV}$$

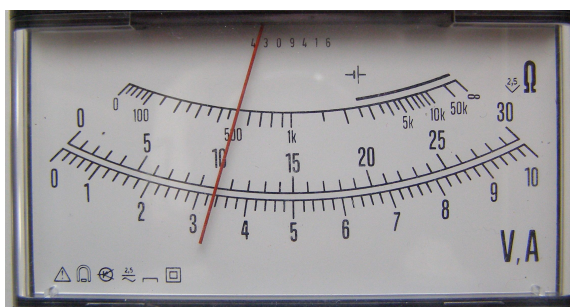
Relativní chyba údaje:

$$\delta = \frac{\Delta_U}{\text{naměřená hodnota}} \cdot 100 = \frac{0,025}{1} \cdot 100 = + / - 2,5 \%$$

Relativní chyba údaje v tomto případě je stejná jako relativní chyba rozsahu pro celý rozsah: $\delta = 2,5 \%$

Pro stejnou hodnotu měřeného napětí zvolíme rozsah 3V. Pro tento rozsah volíme stupnici 30 dílků.

Obr. 14 – PU 500 rozsah 3V



Výpočet měřené hodnoty:

$$U = \frac{\text{rozsah přístroje}}{\text{počet dílků stupnice}} \cdot \text{počet dílků výchylky} = \frac{3}{30} \cdot 10 = 1 \text{ V}$$

Absolutní chyba:

$$\Delta_U = \frac{\delta_U \cdot \text{rozsah}}{100} = \frac{2,5 \cdot 3}{100} = + / - 0,075 \text{ V} = + / - 75 \text{ mV}$$

Relativní chyba údaje:

$$\delta = \frac{\Delta_U}{\text{naměřená hodnota}} \cdot 100 = \frac{0,075}{1} \cdot 100 = + / - 7,5 \%$$

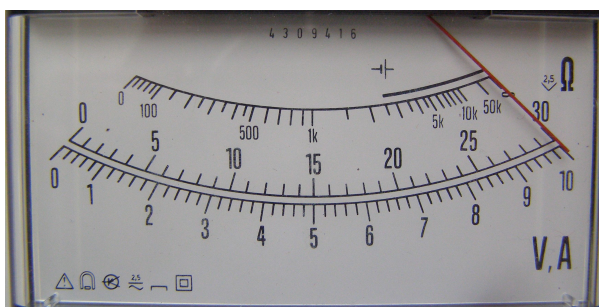
Relativní chyba údaje se velmi zvětšila. Při menší výchylce ručky se nepřesnost měření zvětšuje.

Další příklad:

Měřicí přístroj PU 500. Třída přesnosti 2,5. Rozsah 10 V. Volba stupnice – 10 dílků.

1)

Obr. 15 – PU 500 rozsah 10 V



Výpočet měřené hodnoty:

$$U = \frac{\text{rozsah přístroje}}{\text{počet dílků stupnice}} \cdot \text{počet dílků výchylky} = \frac{10}{10} \cdot 10 = \mathbf{10\ V}$$

Absolutní chyba:

$$\Delta_U = \frac{\delta_U \cdot \text{rozsah}}{100} = \frac{2,5 \cdot 10}{100} = + / - 0,25\ \text{V} = + / - \mathbf{250\ mV}$$

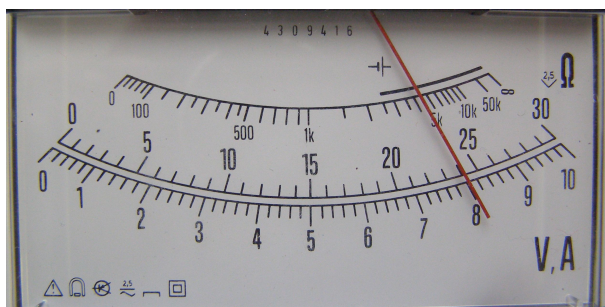
Relativní chyba údaje:

$$\delta = \frac{\Delta_U}{\text{naměřená hodnota}} \cdot 100 = \frac{0,25}{10} \cdot 100 = \mathbf{+/-\ 2,5\ \%}$$

Při plné výchylce relativní chyba odpovídá třídě měřicího přístroje.

2)

Obr. 16 – PU 500 rozsah 10 V



Výpočet měřené hodnoty:

$$U = \frac{\text{rozsah přístroje}}{\text{počet dílků stupnice}} \cdot \text{počet dílků výchylky} = \frac{10}{10} \cdot 8 = \mathbf{8\ V}$$

Absolutní chyba:

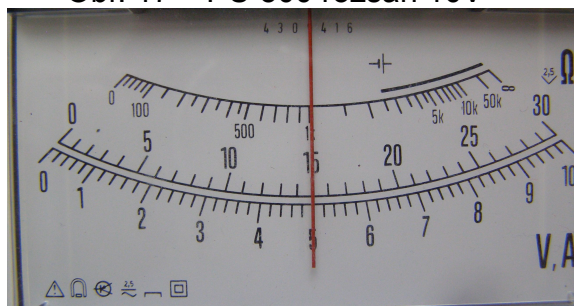
$$\Delta_U = \frac{\delta_U \cdot \text{rozsah}}{100} = \frac{2,5 \cdot 10}{100} = + / - 0,25\ \text{V} = + / - \mathbf{250\ mV}$$

Relativní chyba údaje:

$$\delta = \frac{\Delta_U}{\text{naměřená hodnota}} \cdot 100 = \frac{0,25}{8} \cdot 100 = \mathbf{+/-\ 3,125\ \%}$$

3)

Obr. 17 – PU 500 rozsah 10V



Výpočet měřené hodnoty:

$$U = \frac{\text{rozsah přístroje}}{\text{počet dílků stupnice}} \cdot \text{počet dílků výchylky} = \frac{10}{10} \cdot 5 = 5 \text{ V}$$

Absolutní chyba:

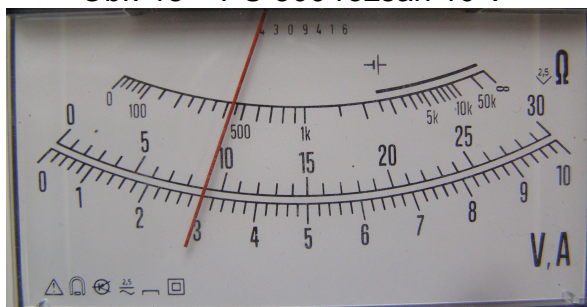
$$\Delta_U = \frac{\delta_U \cdot \text{rozsah}}{100} = \frac{2,5 \cdot 10}{100} = + / - 0,25 \text{ V} = \pm 250 \text{ mV}$$

Relativní chyba údaje:

$$\delta = \frac{\Delta_U}{\text{naměřená hodnota}} \cdot 100 = \frac{0,25}{5} \cdot 100 = \pm 5 \%$$

4)

Obr. 18 – PU 500 rozsah 10 V



Výpočet měřené hodnoty:

$$U = \frac{\text{rozsah přístroje}}{\text{počet dílků stupnice}} \cdot \text{počet dílků výchylky} = \frac{10}{10} \cdot 3 = 3 \text{ V}$$

Absolutní chyba:

$$\Delta_U = \frac{\delta_U \cdot \text{rozsah}}{100} = \frac{2,5 \cdot 10}{100} = + / - 0,25 \text{ V} = \text{+/- 250 mV}$$

Relativní chyba údaje:

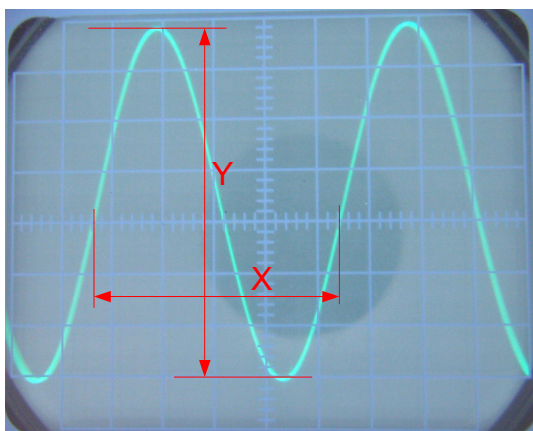
$$\delta = \frac{\Delta_U}{\text{naměřená hodnota}} \cdot 100 = \frac{0,25}{3} \cdot 100 = \text{+/- 8,33 \%}$$

Z uvedených příkladů je jasné, že čím bude menší měřená hodnota – menší výchylka na stupnici – tím větší bude relativní chyba měření. Při měření analogovým přístrojem tedy musíme volit takový rozsah, aby výchylka byla co největší. Ideální by bylo, aby se pohybovala ve druhé polovině stupnice. Výrobci kvalitnějších přístrojů s tímto stavem počítají a rozsahy se přibližně o 1/3 až 1/2 polovinu překrývají. Při malých výchylkách je měření tak nepřesné, že nemá žádný smysl.

Obdobným způsobem postupujeme i při měření analogovým osciloskopem. Výrobce nám udává relativní chybu na 1 dílek rastru. Údaj platí pro vodorovnou výchylku – rozsahy časové základny a i pro svislou výchylku – rozsahy napětí. Tento údaj můžeme považovat za obdobu třídy přesnosti osciloskopu a je udáván v dokumentaci přístroje. Podle uvedené třídy přesnosti lze naopak určit pro konkrétní rozsah času nebo napětí absolutní chybu.

Vezměme například analogový jednopaprskový osciloskop CQ5010B. Výrobce udává maximální chybu pro rozsahy času a napětí 3 % / dílek rastru. To znamená, že pro rozsahy přístroje platí hodnoty relativní chyby $\delta = + / - 3 \% / \text{dílek}$.

Příklad určení chyby:



Obr. 19 – analogový osciloskop

Rozsahy přístroje:

časová základna: 0,2 ms / dílek

napětí: 0,2 V / dílek

Konkrétní hodnoty času a napětí nejsou pro výpočet chyby důležité, soustředíme se na počet dílků rastru, které sinusovka v obou rozměrech „obsazuje“.

Vodorovná stopa – x = 5 dílků

Svislá stopa y = 7 dílků

Hodnota absolutní chyby pro uvedený rozsah časové základny:

$$\Delta_T = \frac{\text{zvolený rozsah / dílek}}{100} \cdot \delta = \frac{0,2}{100} \cdot 3 = 0,006 \text{ ms} = \pm 6 \mu\text{s}$$

Protože výchylka v ose x = 5 dílků, pak celková absolutní chyba pro toto měření je:

$$\Sigma \Delta_T = \Delta_T \cdot 5 = 6 \cdot 5 = \pm 30 \mu\text{s}$$

Z pohledu zvoleného rozsahu chyba nepřekračuje 1/5 (malý dílek) rastru.

Hodnota absolutní chyby pro použitý rozsah napětí:

$$\Delta_U = \frac{\text{zvolený rozsah / dílek}}{100} \cdot \delta = \frac{0,2}{100} \cdot 3 = 0,006 \text{ V} = \pm 6 \text{ mV}$$

Protože výchylka v ose y = 7 dílků, pak celková absolutní chyba pro toto měření je:

$$\Sigma \Delta_U = \Delta_U \cdot 6 = 6 \cdot 7 = \pm 42 \text{ mV}$$

Z pohledu použitého rozsahu chyba odpovídá přibližně 1/5 (malému dílku) rastru.

Z uvedeného příkladu je možné usuzovat, že tento osciloskop (3 %) nepatří mezi přesné přístroje. Musíme si však uvědomit možnosti rozlišení velikosti stopy na rastru osciloskopu. Větší přesnost přístroje bychom asi nevyužili pro nemožnost jemnějšího optického dělení dílků rastru.

4.3. Chyba při měření digitálními přístroji

Jednou z nejdůležitějších částí digitálních měřicích přístrojů je převodník analog/digital (převodník A/D). Převádí měřenou analogovou veličinu na data pro displej.

V principu digitální přístroje zobrazují hodnotu měřené veličiny jako násobek hodnoty referenční (řídící, základní). V tomto případě převodník přímo srovnává hodnotu měřené veličiny s normálovou veličinou. Normálové veličiny jsou odstupňované do většinou dekadických násobků vstupními odporovými děliči. Ty musí být tak přesně nastavené, aby nezhoršovaly přesnost převodníku.

Vzhledem k běžně vyšší přesnosti digitálních přístrojů je vhodné rozdělit chybu na dvě části. Chybu úměrnou měřené veličině a na chybu od celého rozsahu odpovídající chybě analogového přístroje.

Základní chyba při měření digitálními přístroji se skládá z:

a) chyby v % měřené hodnoty (relativní chyby) - δ_1

$$\delta_1 = \frac{\text{absolutní chyba } \Delta}{\text{naměřená hodnota}} \cdot 100$$

b) chyby v % rozsahu, nebo v digitech nejméně významné číslice displeje - δ_2

$$\delta_2 = \frac{\text{absolutní chyba } \Delta}{\text{hodnota rozsahu}} \cdot 100$$

Výsledná absolutní chyba je pak daná součtem (např. pro rozsah napětí):

$$\Delta_u = \frac{\text{naměřená hodnota}}{100} \cdot \delta_1 + \frac{\text{hodnota rozsahu}}{100} \cdot \delta_2$$

Výsledná relativní chyba v % je pak:

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 \cdot \frac{\text{hodnota rozsahu}}{\text{naměřená hodnota}}$$

U digitálních přístrojů se přímo nevyjadřuje třída přesnosti. Především to není tak jednoduché a také rozsahy digitálních přístrojů většinou nemají přesnost stejnou. Výrobci těchto přístrojů udávají přesnost pro skupiny rozsahů, které se většinou liší pro různé veličiny. Obecně lze konstatovat, že měření stejnosměrných veličin bývá přesnější než měření veličin střídavých. Je to dané tím, že se střídavé hodnoty je nutné složitěji upravit pro vstup převodníku.

Relativní chyba, která udává přesnost digitálních přístrojů, se skládá ze dvou hodnot:

a) **chyba čtení naměřené hodnoty (reading)**. Proto se v průvodní dokumentaci multimetrů udává zkratkou **rdg**. Tato chyba je v celém rozsahu konstantní. Značí se δ_1 a udává se v %.

b) **druhou část chyby - δ_2 - mohou udávat údaje:**

1) počet digitů posledního místa (nejméně významné číslice) displeje – tento údaj bývá udáván jako součet k chybě **rdg**. Pro celkový výpočet chyby je nutné jej přepočítat na údaj v %. Tato verze bývá u výrobců častější.

$$\delta_2 = \frac{\text{udany počet digitů posledního místa displeje}}{\text{celkový počet (maximální) digitů displeje}} \cdot 100$$

2) chyba z měřicího rozsahu (full scale). Tento údaj se uvádí většinou pod zkratkou f.s. nebo FS. Je uváděný přímo v %. V prospektech běžných multimetrů se tato možnost vyskytuje sporadicky.

Celková relativní chyba v % je tedy:

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 \cdot \frac{\text{rozsah přístroje}}{\text{naměřená hodnota}}$$

Pro příklad si uveďme údaje běžného multimetru, např. M890G, rozsahy pro měření stejnosměrného napětí. Protože tento multimetr má uvedené rozsahy v dekadických násobcích 2, jedná se o tzv. 3 ½ místný displej s max. hodnotou 1999 digitů, respektive 2000.

Tabulka 1 – Údaje výrobce M890G DC napětí

rozsah	chyba	rozlišení
200 mV	+/- 0,5 % of rdg +/- 1 digit	100 µV
2 V		1 mV
20 V		10 mV
200 V		100 mV
1000 V	+/- 0,8 % of rdg +/- 2 digit	1 V

Pro celý rozsah, např. 20 V, tedy platí:

$$\delta = \delta_1 + \frac{\text{údaj digitů posledního místa displeje}}{\text{celkem (maximální) digitů displeje}} \cdot 100 = 0,5 + \frac{1}{2000} \cdot 100 = \text{+/- 0,55 \%}$$

Celková relativní chyba pro konkrétní naměřené napětí (např. 15 V a rozsah 20 V) je tedy:

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 \cdot \frac{\text{hodnota rozsahu}}{\text{naměřená hodnota}} = 0,5 + 0,05 \cdot \frac{20}{15} = \text{+/- 0,57 \%}$$

Pro celý rozsah, např. 1000 V, tedy platí:

$$\delta = \delta_1 + \frac{\text{údaj digitů posledního místa displeje}}{\text{celkem (maximální) digitů displeje}} \cdot 100 = 0,8 + \frac{2}{2000} \cdot 100 = \text{+/- 0,9 \%}$$

Celková relativní chyba pro konkrétní naměřené napětí (např. opět 15 V a rozsah 1000 V):

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 \cdot \frac{\text{hodnota rozsahu}}{\text{naměřená hodnota}} = 0,8 + 0,1 \cdot \frac{1000}{15} = \pm 7,47 \%$$

Praktický příklad:

Obr. 20 – rozsah 20 V



Na uvedeném multimetru na rozsahu 20 V bylo naměřeno napětí $U_{DC} = 1,78 \text{ V}$.

Podle tabulky přesnosti zjistíme a spočítáme:

$$\delta_1 = \pm 0,5 \%$$

$$\delta_2 = \frac{\text{počet digitů posledního místa displeje}}{\text{maximální počet digitů}} \cdot 100 =$$

$$= \frac{1}{1999} \cdot 100 = \pm 0,05 \%$$

Celková relativní chyba rozsahu:

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 = 0,5 + 0,05 = \pm 0,55 \%$$

Pro naměřenou hodnotu je relativní chyba tedy:

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 \cdot \frac{\text{hodnota rozsahu}}{\text{naměřená hodnota}} = 0,5 + 0,05 \cdot \frac{20}{1,78} = \pm 1,06 \%$$

Výsledná absolutní chyba:

$$\Delta_U = \frac{\text{naměřená hodnota}}{100} \cdot \delta_1 + \frac{\text{hodnota rozsahu}}{100} \cdot \delta_2 =$$

$$= \frac{1,78}{100} \cdot 0,5 + \frac{20}{100} \cdot 0,05 = 0,0089 + 0,01 = \pm 18,9 \text{ mV}$$

Z výsledku je vidět, že v tomto případě je chyba podstatně větší. Je tudíž evidentní, že rozsah nebyl zvolený pro toto napětí správně a proto nebylo možné efektivně využít přesnost měřicího přístroje. Na displeji si rovněž můžeme, **či spíše musíme**, všimnout, že 1. číslice není obsazená. To znamená, že pro měření tohoto napětí je multimetr přepnutý na zbytečně vysoký rozsah. Ideální stav je, jestliže jsou místa displeje využité všechny. To samozřejmě vždy není možné, z příčin výše

uvedených. **V tomto konkrétním případě jsme se ale jako obsluha velké chyby dopustili.**

Pro opakované měření tedy zvolíme rozsah 2 V.

Obr. 21 – rozsah 2 V



Na uvedeném multimetru na rozsahu 2 V bylo naměřeno napětí $U_{DC} = 1,778 \text{ V}$.

Podle tabulky přesnosti zjistíme a spočítáme:

$$\delta_1 = \pm 0,5 \%$$

$$\delta_2 = \frac{\text{počet digitů posledního místa displeje}}{\text{maximální počet digitů}} \cdot 100 =$$

$$= \frac{1}{1999} \cdot 100 = \pm 0,05 \%$$

Celková relativní chyba rozsahu:

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 = 0,5 + 0,05 = \pm 0,55 \%$$

Relativní chyba pro tento rozsah je stejná jako v předešlém měření.

Ale pro naměřenou hodnotu je relativní chyba:

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 \cdot \frac{\text{hodnota rozsahu}}{\text{naměřená hodnota}} = 0,5 + 0,05 \cdot \frac{2}{1,778} = \pm 0,556 \%$$

Výsledná absolutní chyba:

$$\Delta_U = \frac{\text{naměřená hodnota}}{100} \cdot \delta_1 + \frac{\text{hodnota rozsahu}}{100} \cdot \delta_2 =$$

$$= \frac{1,778}{100} \cdot 0,5 + \frac{2}{100} \cdot 0,05 = 0,0089 + 0,001 = \pm 9,9 \text{ mV}$$

Uvedené příklady jsou důkazem, že vhodná volba měřicího rozsahu je pro přesné měření velmi důležitá. Displej multimetru je ideálně obsazený. Tímto způsobem postupujeme při měření kterékoli veličiny měřicím přístrojem podobného typu. Tyto přístroje mají rozsahy pevně nastavené a vhodnou volbu musí provést obsluha.

Jestliže máme k dispozici multimetr, který vhodný rozsah volí automaticky, je měření pohodlnější. Samozřejmě, nikde není záruka, že bude také přesnější. Vše závisí na parametrech použitého měřicího přístroje.

Pro další příklad můžeme uvést měření stejnosměrného napětí multimetrem CM 2703. Jedná se o modernější měřicí přístroj než-li předchozí M890G. Tento přístroj je již vybavený automatickou volbou rozsahů. Displej je 3 ¾ místný, tzn. maximální hodnota 3999. Proto jsou měřicí rozsahy nastaveny v dekadických násobcích hodnoty 4.

Tabulka 2 – Údaje výrobce CM 2703 DC napětí

rozsah	chyba	rozlišení
400 mV	+/- 0,8 % of rdg + 2 digit	100 µV
4 V	+/- 0,8 % of rdg + 3 digit	1 mV
40 V		10 mV
400 V		100 mV
600 V		1 V

Celková relativní chyba pro celý rozsah, např. 400 V, tedy bude:

$$\delta = \delta_1 + \frac{\text{údaj digitů posledního místa displeje}}{\text{celkem (maximálně) digitů displeje}} \cdot 100 = 0,8 + \frac{3}{3999} \cdot 100 = \pm 0,875 \%$$

Celková relativní chyba pro konkrétní naměřené napětí (např. 100 V) na tomto rozsahu vypočítáme:

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 \cdot \frac{\text{hodnota rozsahu}}{\text{naměřená hodnota}} = 0,8 + 0,075 \cdot \frac{400}{100} = \pm 1,1 \%$$

Obr. 22 – rozsah 40 V



Praktický příklad:

S tímto multimetrem jsme naměřili hodnotu $U_{DC} = 8,68 \text{ V}$. Měřicí rozsah si přístroj našel sám, ale podle tabulky přesnosti lze poznat, že je nastavený rozsah 40 V.

Podle tabulky přesnosti zjistíme a spočítáme:

$$\delta_1 = \pm 0,8 \%$$

$$\begin{aligned} \delta_2 &= \frac{\text{počet digitů posledního místa displeje}}{\text{maximální počet digitů}} \cdot 100 = \\ &= \frac{3}{3999} \cdot 100 = \pm 0,075 \% \end{aligned}$$

Celková relativní chyba rozsahu:

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 = 0,8 + 0,075 = \pm 0,875 \%$$

Pro naměřenou hodnotu je relativní chyba:

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 \cdot \frac{\text{hodnota rozsahu}}{\text{naměřená hodnota}} = 0,8 + 0,075 \cdot \frac{40}{8,68} = \pm 1,146 \%$$

Výsledná absolutní chyba:

$$\begin{aligned} \Delta_U &= \frac{\text{naměřená hodnota}}{100} \cdot \delta_1 + \frac{\text{hodnota rozsahu}}{100} \cdot \delta_2 = \\ &= \frac{8,68}{100} \cdot 0,8 + \frac{40}{100} \cdot 0,075 = 0,694 + 0,03 = \pm 724 \text{ mV} \end{aligned}$$

Naměřené napětí je přibližně ve ¼ výchyly. Chyba je, vzhledem k hodnotě, celkem značná.

Uveďme si ještě jeden příklad, kdy naměřené napětí je vyšší.

Obr. 23 – rozsah 40 V Nyní jsme naměřili hodnotu $U_{DC} = 30,43 \text{ V}$. Měřicí rozsah je stejný.



Údaje pro určení možné chyby je stejný:

$$\delta_1 = \pm 0,8 \%$$

$$\begin{aligned} \delta_2 &= \frac{\text{počet digitů posledního místa displeje}}{\text{maximální počet digitů}} \cdot 100 = \\ &= \frac{3}{3999} \cdot 100 = \pm 0,075 \% \end{aligned}$$

Celková relativní chyba rozsahu:

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 = 0,8 + 0,075 = \pm 0,875 \%$$

Chyba přístroje pro tento rozsah je totožná s chybou v předešlém příkladu. Pro tuto naměřenou hodnotu je však měření přesnější:

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 \cdot \frac{\text{hodnota rozsahu}}{\text{naměřená hodnota}} = 0,8 + 0,075 \cdot \frac{40}{30,43} = \pm 0,899 \%$$

Výslednou absolutní chybu určíme stejným postupem:

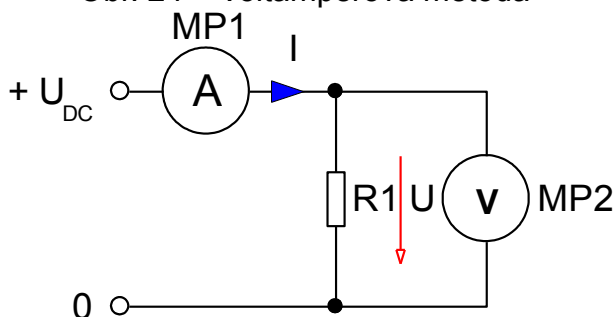
$$\begin{aligned} \Delta_U &= \frac{\text{naměřená hodnota}}{100} \cdot \delta_1 + \frac{\text{hodnota rozsahu}}{100} \cdot \delta_2 = \\ &= \frac{30,43}{100} \cdot 0,8 + \frac{40}{100} \cdot 0,075 = 0,243 + 0,03 = \pm 273 \text{ mV} \end{aligned}$$

Všeobecně tedy platí, že více využitý rozsah je vždy přesnější a že prakticky neexistuje bezchybné měření.

4.4. Chyba nepřímých měření

Dosud uvedené chyby se týkaly vyhodnocení přímého měření. To znamená, že se vyčíslují meze odchylek naměřených hodnot konkrétními měřicími přístroji. V praxi se běžně stává, že nelze určitou elektrickou veličinu změřit přímo. Většinou proto, že dostupné měřicí přístroje požadované měření neumožňují, tzn. nemají potřebné rozsahy. Je tedy nutné hodnotu požadované veličiny dopočítat z údajů, které přímým měřením lze získat. Nejčastěji dochází ke stavu, že ze dvou přímo měřených veličin dopočítáme třetí.

Obr. 24 – Voltampérová metoda



Příklad 1: použití voltampérové metody pro výpočet výkonové ztráty na rezistoru. Přímým měřením zjistíme hodnotu napětí U a proudu I .

Vypočteme hodnotu výkonu:
 $P = U \cdot I$

Výslednou chybu odvodíme z chyb přímo změřených veličin. Protože obě veličiny jsou udány ve svých jednotkách, nelze jednoduše sečíst absolutní chyby. V tomto případě sečteme relativní chyby naměřených hodnot. Postup při výpočtu si můžeme ukázat na uvedeném obvodu. Jako přístroje MP1 a MP2 jsou zapojené běžné multimetry DMM 3800. Byly naměřeny hodnoty: $I = 125,4 \text{ mA}$, $U = 15,56 \text{ V}$.

Výpočet : $P = U \cdot I = 15,56 \cdot 0,1254 = 1,95 \text{ W}$

Tabulka 3 – Údaje výrobce DMM 3800 DC napětí

rozsah	chyba	rozlišení
200 mV	± 0,5 % of rdg ± 1 digit	100 μV
2 V		1 mV
20 V		10 mV
200 V		100 mV
1000 V		1 V

Tabulka 4 – Údaje výrobce DMM 3800 DC proud

rozsah	chyba	rozlišení
200 μA	± 0,5 % of rdg ± 1 digit	0,1 μA
2 mA		1 μA
20 mA		10 μA
200 mA	± 1,2 % of rdg ± 1 digit	100 μA
2 A	± 2 % of rdg ± 5digit	1 mA

Vypočteme relativní chyby měření napětí a proudu:

Chyba ampérmetru MP1:

$$\delta_1 = \pm 1,2 \%$$

$$\delta_2 = \frac{\text{udaný počet digitů posledního místa displeje}}{\text{celkový počet (maximální) digitů displeje}} \cdot 100 = \frac{1}{2000} \cdot 100 = \pm 0,05 \%$$

to je pro rozsah $\delta = \delta_1 + \delta_2 = 1,2 + 0,05 = \pm 1,25 \%$

Celková relativní chyba proudu I v %:

$$\delta_A = \delta_1 + \delta_2 \cdot \frac{\text{rozsah přístroje}}{\text{naměřená hodnota}} = 1,2 + 0,05 \cdot \frac{200}{125,4} = \pm 1,28 \%$$

Chyba voltmetru MP2:

$$\delta_1 = 0,5 \%$$

$$\delta_2 = \frac{\text{udaný počet digitů posledního místa displeje}}{\text{celkový počet (maximální) digitů displeje}} \cdot 100 = \frac{1}{2000} \cdot 100 = \pm 0,05 \%$$

to je pro rozsah $\delta = \delta_1 + \delta_2 = 0,5 + 0,55 = \pm 0,55 \%$

Celková relativní chyba napětí U v %:

$$\delta_v = \delta_1 + \delta_2 \cdot \frac{\text{rozsah přístroje}}{\text{naměřená hodnota}} = 0,5 + 0,05 \cdot \frac{20}{15,56} = \pm 0,56 \%$$

Celková relativní chyba pro výkon:

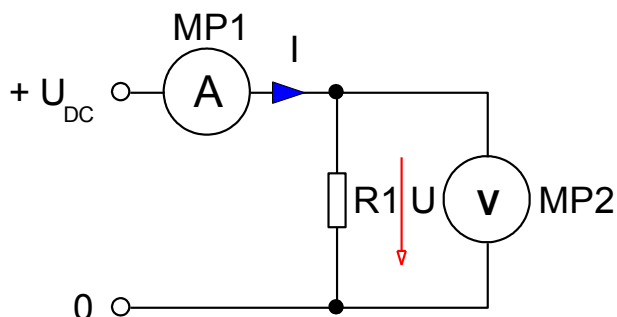
$$\delta_p = \delta_A + \delta_v = 1,28 + 0,56 = \pm 1,84 \%$$

pro vypočtený výkon lze ještě odvodit **absolutní chybu Δ_p** :

$$\Delta_p = \frac{P}{100} \cdot \delta_p = \frac{1,95}{100} \cdot 1,84 = \pm 35,9 \text{ mW}$$

Příklad 2: použití voltampérové metody pro výpočet odporu rezistoru.

Obr. 25 – Voltampérová metoda



Pro tento příklad můžeme použít stejný obvod. Přímým měřením jsme zjistili hodnoty proudu I a napětí U.

Výsledný odpor rezistoru pak vypočítáme podle Ohmova zákona:

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

Výslednou chybu opět odvodíme z chyb přímo změřených veličin.

I v tomto případě sečteme relativní chyby naměřených hodnot. Jako přístroje MP1 a MP2 jsme nyní použili multimetry M 890 G.

Naměřené hodnoty: $I = 18,5 \text{ mA}$, $U = 19,6 \text{ V}$.

$$\text{Vypočteme odpor} - R = \frac{U}{I} = \frac{19,6}{0,0185} = 1054 \Omega$$

Tabulka 5 – Údaje výrobce M890G DC napětí

rozsah	chyba	rozlišení
200 mV	+/- 0,5 % of rdg +/- 1 digit	100 μ V
2 V		1 mV
20 V		10 mV
200 V		100 mV
1000 V		1 V

Tabulka 6 – Údaje výrobce M890G DC proud

rozsah	chyba	rozlišení
200 μ A	+/- 0,8 % of rdg +/- 1 digit	0,1 μ A
2 mA		1 μ A
20 mA		10 μ A
200 mA	+/- 1,2 % of rdg +/- 3 digit	100 μ A

Vypočteme relativní chyby měření proudu a napětí:

Chyba ampérmetru MP1:

$$\delta_1 = 0,8 \%$$

$$\delta_2 = \frac{\text{udaný počet digitů posledního místa displeje}}{\text{celkový počet (maximální) digitů displeje}} \cdot 100 = \frac{1}{2000} \cdot 100 = \pm 0,05 \%$$

$$\text{to je pro rozsah } \delta = \delta_1 + \delta_2 = 0,8 + 0,05 = \pm 0,85 \%$$

Celková relativní chyba proudu I v %:

$$\delta_A = \delta_1 + \delta_2 \cdot \frac{\text{rozsah přístroje}}{\text{naměřená hodnota}} = 0,8 + 0,05 \cdot \frac{20}{18,5} = \pm 0,854 \%$$

Chyba voltmetru MP2:

$$\delta_1 = 0,5 \%$$

$$\delta_2 = \frac{\text{udaný počet digitů posledního místa displeje}}{\text{celkový počet (maximální) digitů displeje}} \cdot 100 = \frac{1}{2000} \cdot 100 = \pm 0,05 \%$$

$$\text{to je pro rozsah } \delta = \delta_1 + \delta_2 = 0,5 + 0,05 = \pm 0,55 \%$$

Celková relativní chyba napětí U v %:

$$\delta_V = \delta_1 + \delta_2 \cdot \frac{\text{rozsah přístroje}}{\text{naměřená hodnota}} = 0,5 + 0,05 \cdot \frac{20}{19,6} = \pm 0,551 \%$$

Celková relativní chyba pro výkon:

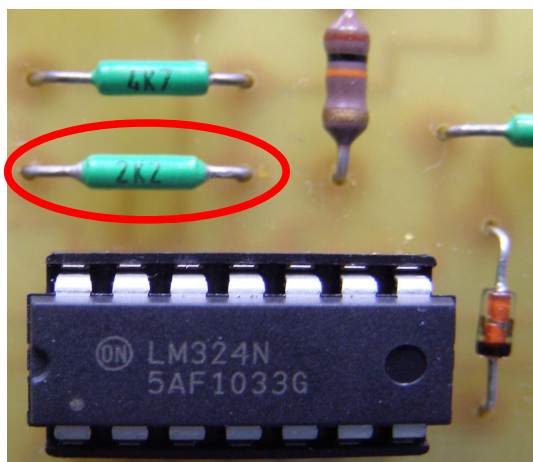
$$\delta_R = \delta_A + \delta_V = 0,854 + 0,551 = \pm 1,405 \%$$

pro vypočtený odpor rezistoru můžeme odvodit **absolutní chybu Δ_R** :

$$\Delta_R = \frac{R}{100} \cdot \delta_R = \frac{1054}{100} \cdot 1,405 = \pm 14,81 \Omega$$

Příklad 3: Použití voltampérové metody pro výpočet proudu.

Obr. 26 – Deska plošného spoje



Tento způsob používáme, jestliže je rezistor zapájený v obvodu. Přímě změříme hodnotu napětí U. Hodnotu odporu rezistoru přečteme na tělísku součástky. Výsledný proud vypočítáme podle Ohmova zákona:

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

Chybu proudu vyčíslíme z chyby přímo změřeného napětí a údaje výrobce rezistoru.

Na vybraném rezistoru jsme změřili napětí multimetrem M890G.

Naměřená hodnota je: U = 12,55 V.

Na rezistoru přečteme hodnotu odporu: R = 2200 Ω .

Ze zjištěných hodnot již můžeme vypočítat velikost proudu, který rezistorem protéká:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{12,55}{2200} = 5,70 \text{ mA}$$

Chybu použitého multimetru pro měření stejnosměrného napětí již známe:

$$\delta_1 = \pm 0,5 \%$$

$$\delta_2 = \frac{\text{udaný počet digitů posledního místa displeje}}{\text{celkový počet (maximální) digitů displeje}} \cdot 100 = \frac{1}{2000} \cdot 100 = \pm 0,05 \%$$

to je pro tento rozsah $\delta = \delta_1 + \delta_2 = 0,5 + 0,05 = \pm 0,55 \%$

Celková relativní chyba naměřeného napětí U v %:

$$\delta_v = \delta_1 + \delta_2 \cdot \frac{\text{rozsah přístroje}}{\text{naměřená hodnota}} = 0,5 + 0,05 \cdot \frac{20}{12,55} = \pm 0,58 \%$$

Pro měřený rezistor výrobce udává relativní chybu: $\delta_R = 5 \%$

Z těchto údajů již můžeme vyjádřit **relativní chybu vypočítaného proudu**:

$$\delta_I = \delta_v + \delta_R = 0,58 + 5 = \pm 5,58 \%$$

Nakonec vypočítáme ještě **absolutní chybu proudu**:

$$\Delta_I = \frac{I}{100} \cdot \delta_I = \frac{5,70}{100} \cdot 5,58 = \pm 0,32 \text{ mA}$$

Jestliže získáme výslednou veličinu výpočtem měření dvou veličin jiných a ve vzorci je mocnina, je postup stejný, jen se relativní chyba příslušné veličiny násobí mocnitelem. Jestliže je ve vzorci odmocnina, je nutné převést odmocnitele na mocnitele a rovněž násobit hodnotu relativní chyby konkrétní veličiny.

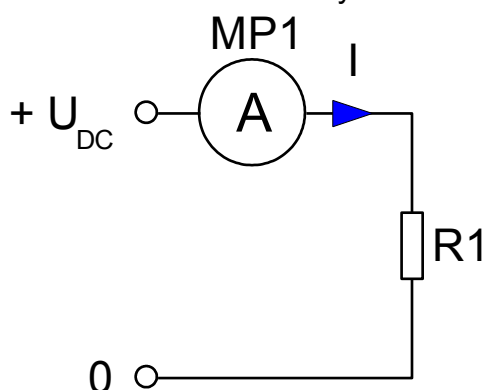
Např. je-li: $P = R \cdot I^2 \Rightarrow \delta_P = \pm \delta_R + 2 \cdot \delta_I \text{ (%)}$

nebo:

$$I = \sqrt{\frac{P}{R}} \Rightarrow \delta_I = \pm \frac{1}{2} \cdot (\delta_P + \delta_R) \text{ (%)}$$

Příklad 4: Výpočet výkonové ztráty na rezistoru:

Obr. 27 – Měření výkonu



Použijme stejné hodnoty jako v 1. příkladu:

Tentokrát měříme proud ($I = 125,4 \text{ mA}$), který teče známým rezistorem ($R = 124 \Omega$).

Výkon rezistoru v obvodu je:

$$P = R \cdot I^2 = 124 \cdot 0,1254^2 = 1,95 \text{ W}$$

Měřicí přístroje: pro měření odporu i proudu byly opět použity multimetry DMM 3900.

Tabulka 7 – Údaje výrobce DMM 3900 DC proud

rozsah	chyba	rozlišení
200 μA	+/- 0,5 % of rdg +/- 1 digit	0,1 μA
2 mA		1 μA
20 mA		10 μA
200 mA	+/- 1,2 % of rdg +/- 1 digit	100 μA
2 A	+/- 2 % of rdg +/- 5digit	1 mA

Tabulka 8 – Údaje výrobce DMM 3900 Odpor

rozsah	chyba	rozlišení
200 Ω	+/- 0,5 % of rdg +/- 3 digit	0,1 Ω
2 k Ω	+/- 0,5 % of rdg +/- 1 digit	1 Ω
20 k Ω		10 Ω
200 k Ω		100 Ω
2 M Ω		1 k Ω
20 M Ω	+/- 10 % of rdg +/- 2dgt	10 k Ω

Vypočteme nyní relativní chyby měření proudu a odporu:

Chyba ampérmetru MP1 je pro tento rozsah:

$$\delta_1 = 1,2 \%$$

$$\delta_2 = \frac{\text{udaný počet digitů posledního místa displeje}}{\text{celkový počet (maximální) digitů displeje}} \cdot 100 = \frac{1}{2000} \cdot 100 = \pm 0,05 \%$$

to je celkem $\delta = \delta_1 + \delta_2 = 1,2 + 0,05 = \pm 1,25 \%$

Celková relativní chyba proudu v tomto obvodu - I v %:

$$\delta_A = \delta_1 + \delta_2 \cdot \frac{\text{rozsah přístroje}}{\text{naměřená hodnota}} = 1,2 + 0,05 \cdot \frac{200}{125,4} = \pm 1,28 \%$$

Chyba multimetru na odporovém rozsahu:

$$\delta_1 = \pm 0,5 \%$$

$$\delta_2 = \frac{\text{udaný počet digitů posledního místa displeje}}{\text{celkový počet (maximální) digitů displeje}} \cdot 100 = \frac{3}{2000} \cdot 100 = \pm 0,15 \%$$

celkem tedy $\delta = \delta_1 + \delta_2 = 0,5 + 0,15 = \pm 0,65 \%$

Celková relativní chyba odporu rezistoru R v %:

$$\delta_V = \delta_1 + \delta_2 \cdot \frac{\text{rozsah přístroje}}{\text{naměřená hodnota}} = 0,5 + 0,15 \cdot \frac{200}{124} = \pm 0,74 \%$$

Celková relativní chyba pro výkon v tomto obvodu – protože vzorec obsahuje u jedné veličiny 2 mocninu, násobíme tuto relativní chybu dvěma a sečteme:

$$\delta_P = \delta_R + (2 \cdot \delta_I) = 0,74 + (2 \cdot 1,28) = \pm 3,3 \%$$

pro vypočtený výkon určíme **absolutní chybu Δ_P** :

$$\Delta_P = \frac{P}{100} \cdot \delta_P = \frac{1,95}{100} \cdot 3,3 = \pm 64,35 \text{ mW}$$

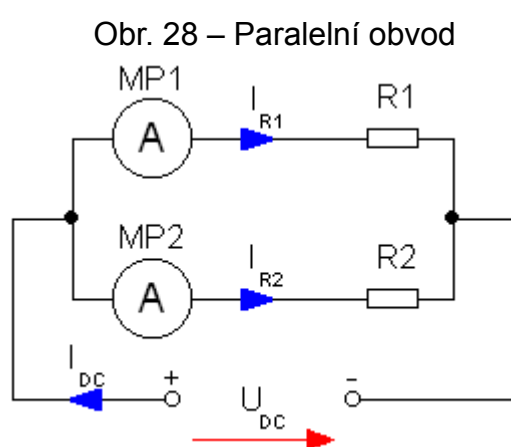
Z tohoto příkladu je patrné, mocnina celkovou relativní chybu podstatně zvětšuje.

Další případ nastává, jestliže vyhodnocujeme přesnost měření jedné veličiny více přístroji. Při tomto měření vyhodnocujeme absolutní chyby všech přístrojů a výslednou chybu tvoří jejich součet. Tím se samozřejmě celková chyba měření zvyšuje.

Uvedme si příklad:

V obvodu stejnosměrného proudu jsou zapojené 2 rezistory paralelně. V obou větvích obvodu měříme proud. Na pozici MP1 je analogový přístroj PU 500, kterým měříme proud I_{R1} a na pozici MP2 je digitální multimetr CM 2703, který měří proud I_{R2} .

Podle Kirchhoffova zákona je výsledný proud I jejich součet:



$$I_{DC} = I_{R1} + I_{R2}$$

Výsledky měření:

$$I_{R1} = 85 \text{ mA}, I_{R2} = 150 \text{ mA}$$

Celkový proud:

$$I_{DC} = I_{R1} + I_{R2} = 85 + 150 = 235 \text{ mA}$$

Při určení celkové absolutní chyby měření postupujeme:

Pro přístroj MP1 PU 500 výrobce udává třídu 2,5, to znamená relativní chybu $\delta = \pm 2,5 \%$. Naměřili jsme hodnotu proudu 85 mA. Určíme absolutní chybu pro tuto hodnotu. Přístroj byl nastavený na rozsah 100 mA.

$$\Delta I = \frac{\delta_U \cdot \text{rozsah}}{100} = \frac{2,5 \cdot 100}{100} = \pm 2,5 \text{ mA}$$

U přístroje MP2 - CM 2703 – byl pro dané měření předvolený rozsah 400 mA.

Tabulka 9 – Údaje výrobce CM 2703 DC proud

rozsah	chyba	rozlišení
400 μA	$\pm 1 \%$ of rdg + 2 digit	0,1 μA
4 mA		1 μA
40 mA		10 μA
400 mA		0,1 mA
10 A	$\pm 1,2 \%$ of rdg + 5 digit	10 mA

Po přepočítání tedy:

$$\delta_1 = \pm 1 \%$$

$$\delta_2 = \frac{\text{chyba (digit)}}{\text{počet digitů displeje}} \cdot 100 = \frac{2}{3999} \cdot 100 = \pm 0,05 \%$$

Absolutní chyba pro tento proud (150 mA) tedy bude:

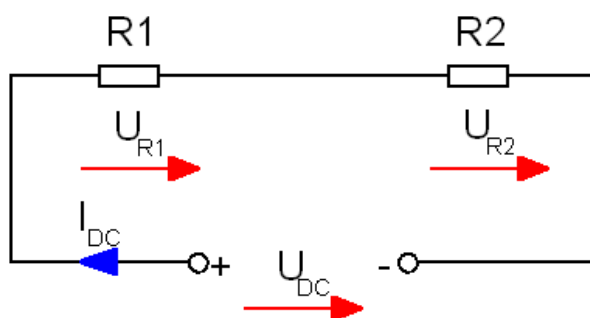
$$\Delta_I = \frac{\text{naměřená hodnota}}{100} \cdot \delta_1 + \frac{\text{hodnota rozsahu}}{100} \cdot \delta_2 =$$
$$= \frac{150}{100} \cdot 1 + \frac{400}{100} \cdot 0,05 = 1,5 + 0,2 = \pm 1,7 \text{ mA}$$

Pro celkový proud $I = 235 \text{ mA}$ je tedy **celková absolutní chyba** součtem chyb obou měření:

$$\Sigma \Delta_I = \Delta_{IR1} + \Delta_{IR2} = 2,5 + 1,7 = \pm 4,2 \text{ mA}$$

Další situace může nastat, jestliže výslednou hodnotu získáme odečtem. Pro názornost si vyhodnotíme měření napětí.

Obr. 29 – Seriový obvod



V obvodu jsou zapojené 2 rezistory do série. Podle Kirchhoffova zákona se celkové napětí rovná jejich součtu úbytků napětí na jednotlivých rezistorech.

$$U_{DC} = U_{R1} + U_{R2}$$

Pro náš příklad použijeme výpočet chyby napětí na rezistoru R1. Ke svorkám zdroje, napětí U_{DC} , byl připojený analogový multimetr PU 500, napětí U_{R2} bylo měřeno digitálním multimetrem CM 2703.

Naměřené hodnoty: $U_{DC} = 10 \text{ V}$, $U_{R2} = 6 \text{ V}$

Napětí U_{R1} tedy bude: $U_{R1} = U_{DC} - U_{R2} = 10 - 6 = 4 \text{ V}$

Postup při určení celkové absolutní chyby:

U přístroje PU 500 je udána třída 2,5, to znamená $\delta = \pm 2,5 \%$ pro všechny rozsahy. Přístroj byl přepnutý na rozsah 10 V.

Absolutní chyba má hodnotu:

$$\Delta_{UDC} = \frac{\delta_U \cdot \text{rozsah}}{100} = \frac{2,5 \cdot 10}{100} = \pm 0,25 \text{ V} = 250 \text{ mV}$$

Přístroj MP2 - CM 2703 – byl pro měřené napětí předvolený rozsah 40 V.

Tabulka 10 – Údaje výrobce CM 2703 DC napětí

rozsah	chyba	rozlišení
400 mV	$\pm 0,8 \%$ of rdg + 2 digit	100 μV
4 V	$\pm 0,8 \%$ of rdg + 3 digit	1 mV
40 V		10 mV
400 V		100 mV
600 V		1 V

Po přepočítání:

$$\delta_1 = \pm 0,8 \%$$

$$\delta_2 = \frac{\text{chyba (digit)}}{\text{počet digitů displeje}} \cdot 100 = \frac{3}{3999} \cdot 100 = \pm 0,075 \%$$

Absolutní chyba pro toto napětí (6V) tedy je :

$$\begin{aligned} \Delta_{UR2} &= \frac{\text{naměřená hodnota}}{100} \cdot \delta_1 + \frac{\text{hodnota rozsahu}}{100} \cdot \delta_2 = \\ &= \frac{6}{100} \cdot 0,8 + \frac{40}{100} \cdot 0,075 = 0,048 + 0,03 = 0,078 \text{ V} = \pm 78 \text{ mV} \end{aligned}$$

Pro výsledné napětí, $U_{R1} = 4 \text{ V}$, musíme vzít v úvahu **celkovou absolutní chybu**:

$$\Sigma \Delta_{UR1} = \Delta_{UDC} + \Delta_{UR2} = 250 + 78 = \pm 328 \text{ mV}$$

5. Analogové měřicí přístroje

Tyto přístroje jsou sice v současné době na ústupu, nicméně se ještě několik typů používá. Zmíníme se tedy o těch nejdůležitějších.

Současné analogové měřicí přístroje pracují na principu využití magnetických a dynamických účinků elektrického proudu. Hlavní částí je elektromechanický systém (soustava), který převádí elektrickou veličinu na mechanickou výchylku – analogový údaj. Tento údaj na číselnou hodnotu už musíme převést sami jako obsluha.

Měřicí systém těchto přístrojů se skládá z pevné a otočné části, na které je připevněná ručka. Údaj z polohy ručky se odečítá ze stupnice. Stupnice je většinou rozdělená na hlavní a pomocné dílky. Pohyblivá část soustavy je uložena buď v hrotových ložiskách (kamenech) nebo na napjatých páscích (vláknech). Elektromagnetické síly procházejícího proudu způsobují otáčení pohyblivé části. Aby došlo k ustálení výchylky, je třeba ještě další síla – direktivní, která působí proti a zároveň vrací ručku do nulové polohy. K tomu slouží spirálové pružiny nebo napjaté pásky. Současně přivádí proud do cívky. Měřicí systém musí být vybavený mechanismem k nastavování nulové polohy ručky. Aby byla výchylka „stálá“ a nekmitala, je nutné ještě zabudovat do přístroje systém tlumení, brzdění, pohybu ručky.

5.1. Základní pojmy a značky

Vlastní spotřeba přístroje – při měření analogovým přístrojem se část měřené veličiny využije na vychýlení pohyblivé části s ručkou. Tato část pak v odečítané měřené hodnotě „chybí“. Tím vzniká chyba měření, která může ovlivnit přesný výsledek měření a musíme s ní počítat – provést korekci chyby.

Přetížitelnost přístroje – je to násobek jmenovité hodnoty veličiny, pro kterou je přístroj vyrobený. Běžný přístroj musí bez poškození snést 120 % přetížení – to je přetížitelnost 1,2. Větší překročení maximálních hodnot již může přístroj trvale poškodit.

Konstanta měřicího přístroje – rozsahu – je to podíl měřicího rozsahu a počtu dílků stupnice. Základní údaj pro odečet měřené hodnoty.

V principu:

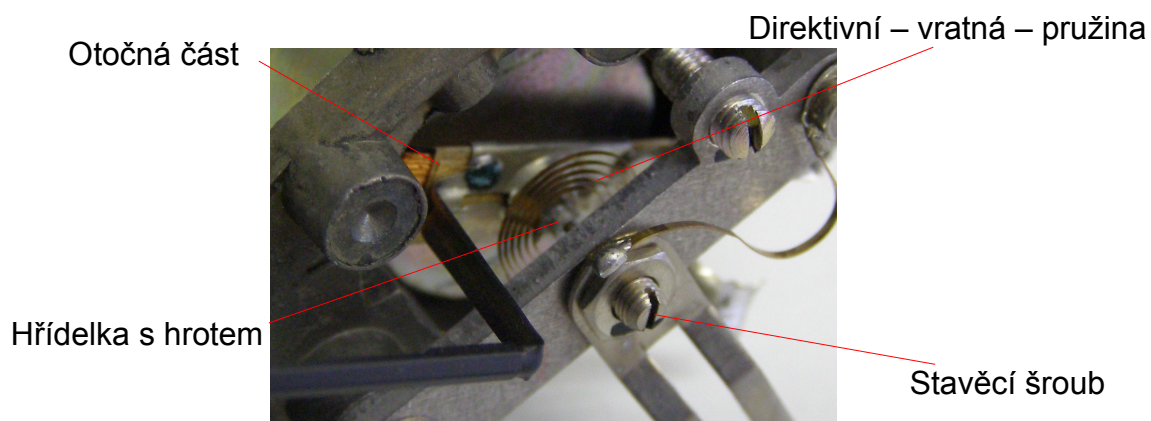
$$\text{konstanta} = \frac{\text{rozsah přístroje}}{\text{počet dílků stupnice}} \quad (\text{výsledek je bezrozměrné číslo})$$

Citlivost měřicího přístroje – převrácená hodnota konstanty. Udává počet dílků stupnice na danou jednotku měřené veličiny. Pro běžné měření se většinou neužívá.

Uložení otočné části – musí „zařídít“ jemné, okamžité, natočení pohyblivé části měřicího systému. Tření musí být minimální, aby k natáčení nebyly potřeba velké síly.

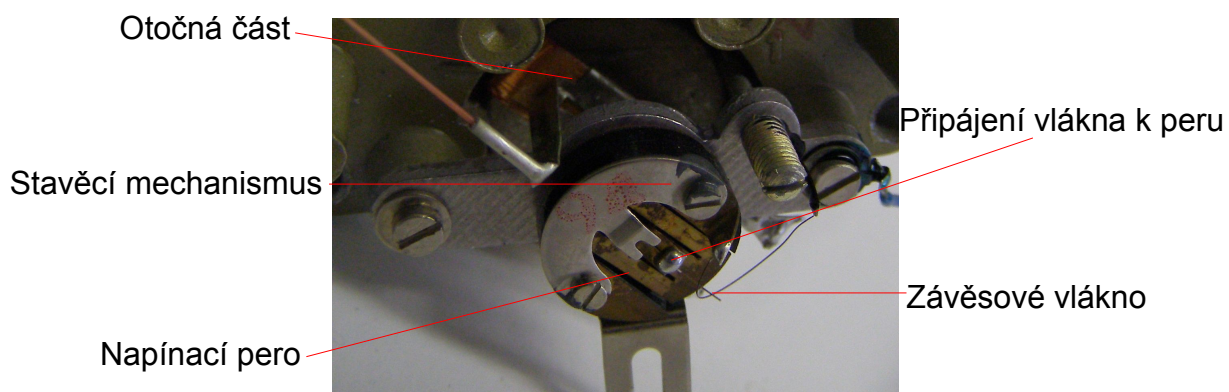
Uložení pomocí hrotového ložiska – ložiskových kamenů. Otočná část je upevněná na osičce s mírně zakulacenými hroty. Ty dosedají do dolíků pevné části ložiska. Pro seřízení jsou opatřené stavěcím šroubem.

Obr. 30 - Způsob hrotového uložení



Ložisko musí být dobře seřízené, musí mít „lehký“ chod a nesmí se „viklat“. Samozřejmě v celém systému nesmí být žádné nečistoty.

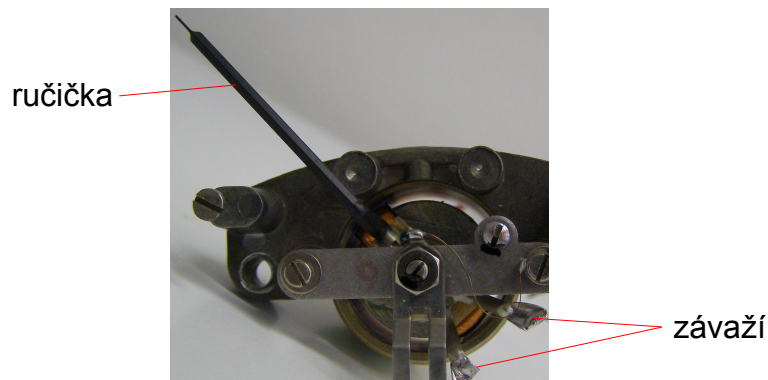
Obr. 31 - Způsob závěsového uložení



U obou způsobů uchycení otočného mechanismu je způsob na zadní straně měřicího přístroje stejný, jen se nepoužívají stavicí šrouby. Uchycení je pevné.

Ukazatel měřené hodnoty – u přístrojů vyráběných v současné době je to ručička (ručka). Má nožový nebo nitkový tvar. Je vyrobena z tenkého hliníku nebo skelného vlákna. Může být i plastová.

Obr. 31 – Systém ručičky



Ručka je připevněna k pohyblivé části měřicího přístroje. Musí být precizně vyvážená. K tomuto účelu má 2 závaží – u běžných přístrojů kapky pájky Sn – Pb. Vyvážení bývá vázáno na danou polohu přístroje při měření – ležatou nebo stojatou.

Měřicí poloha – poloha, kterou musí přístroj při měření zaujímat a při které výrobce garantuje uváděnou přesnost. Bývají dvě: ležatá a stojatá. Může být i šikmá. Tento údaj bývá zobrazený na stupnici přístroje jako značka. Ze značek je význam dobře poznat a nebývá nutné další vysvětlení.



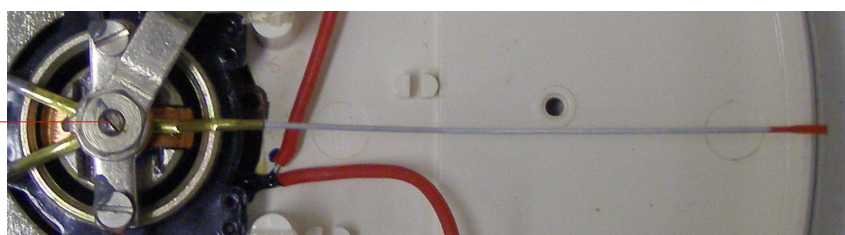
Obr. 32 – Příklady značek pracovní polohy

Tlumení otočného ústrojí – způsobuje „zklidnění“ polohy ručky v dané výchylce v co možná nejkratším čase. Kdyby nebyla ručka tlumená, při každé změně výchylky by následovalo „komíhání“ kolem konečné polohy. V současné době se používá hlavně tlumení magnetické. Je to dané hlavně typem vyráběné soustavy. Může být i tlumení vzduchové.

Magnetické tlumení současných běžných přístrojů, které mají pohyblivou cívku, je prováděné tak, že cívka je navinutá na hliníkovém rámečku. V rámečku při otáčení v magnetickém poli vznikají vířivé proudy, které působí vždy proti směru pohybu výchylky.

Obr. 33 – Systém otočné cívky

Hrotové ložisko
se stavěcím
šroubem

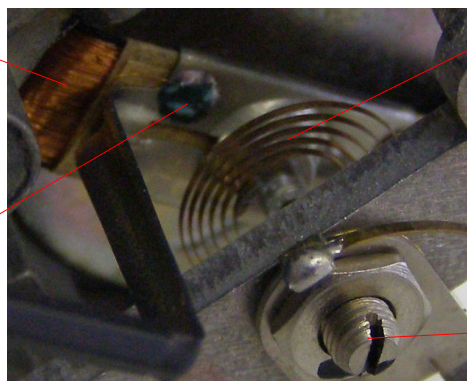


Obr. 34 – Detail systému s mag. tlumením

Cívka navinutá na izolovaném
hliníkovém rámečku

Direktivní spirálová pružina

Detail připevnění ručky

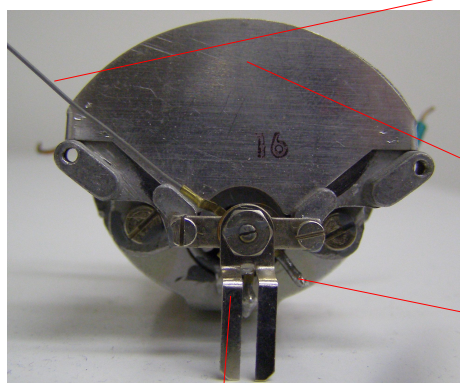


Hrotové ložisko
se stavěcím
šroubem

Vzduchové tlumení kmitání pohyblivé části měřicího přístroje je provedené křídélkem, které je spojené s ručkou. Křídélko je vyrobené z tenkého hliníkového plechu – musí mít velmi malou hmotnost. Křídélko je těsně uzavřené ve vzduchové komůrce s malou štěrbinou, aby odpor vzduchu byl co největší. Natáčením ručky se natáčí i křídélko v komůrce a vzduch klade pohybu odpor. Při velmi malé hmotnosti ručky vzniká velmi účinný „tlumící“ efekt. Tento způsob tlumení je používán u přístrojů, které nemají pohyblivou cívku.

Obr. 35 - Vzduchová komůrka uzavřená

Obr. 36 - Vzduchová komůrka otevřená



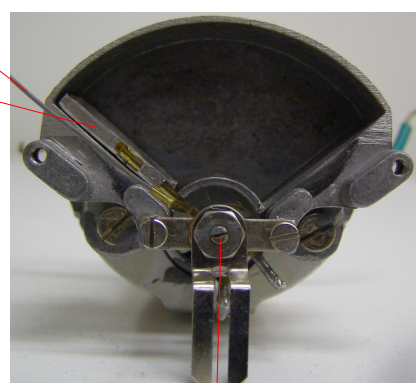
Ručka

Křídélko

Víčko

Závaží

Stavěcí mechanismus
nulové polohy ručky

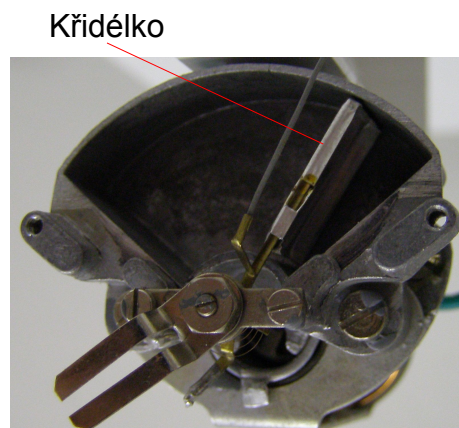


Hrotové ložisko se stavěcím
šroubem

Obr. 37 - Uzavřená vzduchová komůrka



Obr. 38 - Otevřená vzduchová komůrka



Třída přesnosti – je daná výrobcem a určuje přesnost měření (míru nejistoty) konkrétního přístroje. Na stupnici se uvádí číslem. Někdy spolu se symbolem pro měření stejnosměrných, střídavých nebo obojích veličin. Analogové měřicí přístroje, které jsou v současné době v nabídce elektronických obchodů, jsou většinou vyráběné ve třídě 1 – 1,5 - 2,5 – 5 a jsou určeny pro běžný provoz.

Například:

Měřicí přístroj je ve třídě 2,5 a je určen pro měření stejnosměrných veličin: $\underline{\underline{2,5}}$

Měřicí přístroj je ve třídě 2,5 a je určen pro měření střídavých veličin: $\underline{\sim} 2,5$

Mohou být také značky obojí.

Měřicí přístroj je ve třídě 2,5 a je určen pro měření stejnosměrných veličin:
CLASS 2,5

Izolační pevnost – je daná výrobcem a udává hodnotu maximálního napětí, kterému mohou být vystaveny živé části přístroje proti pouzdru. Značí se 5-cípou hvězdičkou a číslo uvnitř udává hodnotu napětí v kV.



Obr. 39 – Značení izolační pevnosti

Podle uvedených značek jsou přístroje odolné do hodnoty zkušebního napětí 1 kV, respektive 4 kV.

Měřicí soustava – udává typ měřicího přístroje, typ jeho měřicího systému. Na přístroji by měla příslušná soustava udána značkou. Dnešní některé dostupné přístroje již značku nemají. Příslušnou soustavu již musíme eventuálně určit sami. Oproti dřívější době dnes můžeme hovořit o 3 měřicích soustavách. Magnetoelektrické, která je běžně v prodeji, feromagnetické (elektromagnetické) a elektrodynamické (ferodynamické). Poslední 2 uvedené soustavy sice běžně v prodejnách elektroniky nejsou, ale jsou stále vyráběné, hlavně jako panelové přístroje.

Rušivé vlivy měření – jedná se o stavy a příčiny, které ovlivňují přesnost měření, někdy i zásadním způsobem.

Mechanické vlivy – největší hrozbou je tření otočného mechanismu přístroje. V hrotových ložiskách ho nikdy úplně odstranit. Lze jej zmírnit vyšším tahem spirálových pružin, ale za cenu menší citlivosti přístroje. K pohybu ručky je třeba větší síla a tím je samozřejmě větší i spotřeba přístroje. Ideální je uložit otočný mechanismus na závěsná vlákna. Nepříznivě působí při měření také otřesy pracovního místa (motorová vozidla). Pro tyto účely se konstruují přístroje s vyšší odolností a menší přesností. Při natáčení přístroje v ruce si můžeme všimnout, že se poloha ručky trochu mění. Proto se doporučuje dodržet pracovní polohu danou výrobcem.

Vliv oteplení – většina elektrických materiálů mění svůj odpor v závislosti na oteplení. Proto je třeba používat materiály, které závislost na teplotě mají co nejmenší. Jedná se hlavně o rezistory pro nastavení měřicích rozsahů. Rovněž průměr vodičů navinutých cívek musí odpovídat procházejícímu proudu.

Vliv vnějšího magnetického pole – u elektromechanických měřicích přístrojů je nutné tuto hrozbu co nejvíce zamezit. Protože tyto přístroje měří na principu elektromagnetické výchylky, obecně platí, že je zásadně umísťujeme mimo vliv vnějších elektromagnetů. Jestliže není jiná možnost, používají se měřicí systémy zastíněné ocelovým plechem.

5.2. Magnetoelektrická soustava

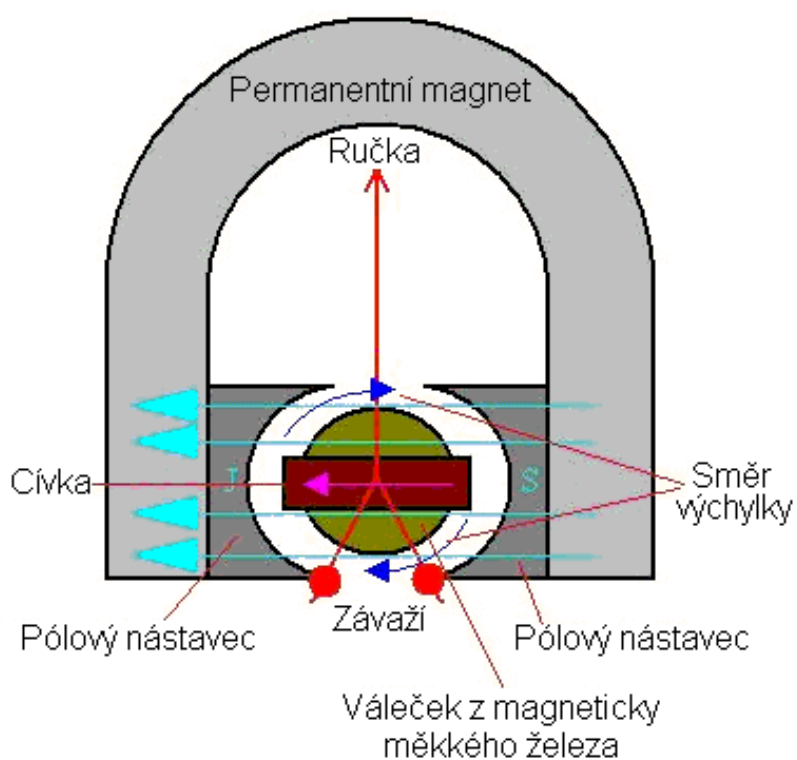
Je to nejrozšířenější analogová měřicí soustava. V současné době už jediná v nabídce elektrotechnických obchodů a tudíž běžně dostupná. Také se můžeme použít označení „s otočnou cívkou“ nebo Deprez.

Obr. 40 - Všeobecná značka magnetoelektrické soustavy



Tato soustava využívá magnetického pole permanentního magnetu, ve kterém se otáčí cívka, spojená s ručkou. Cívkou protéká měřený stejnosměrný proud a tím vzniká vlastní magnetické pole cívky. Lineární výchylka tedy vzniká vzájemným působením magnetických polí magnetu a cívky.

Obr. 41 - Princip soustavy

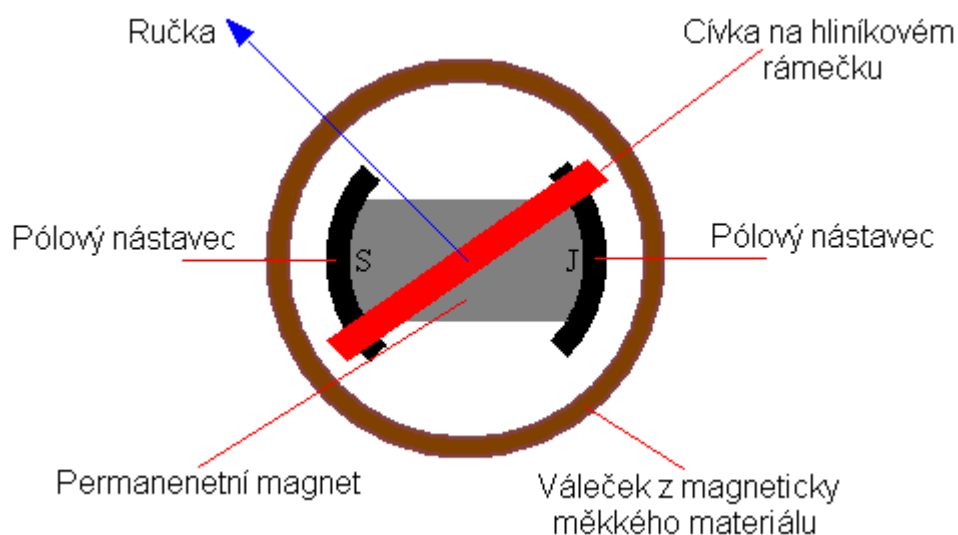


Cívka je obvykle navinutá na hliníkovém rámečku. Přívod proudu do cívky je proveden přes direktivní (vratné) pružiny nebo závěsnými vlákny. Tlumení je magnetické. Hliníkový rámeček tvoří závit nakrátko. Pohybem cívky se v rámečku indukuje napětí opačného směru a tím způsobí „brzdící“ sílu.

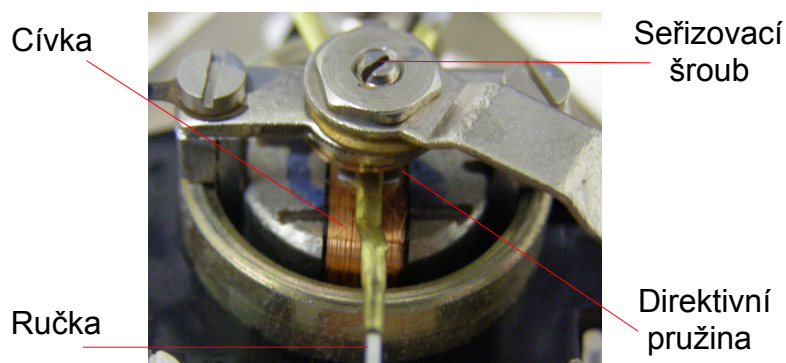
Magnetoelektrická soustava rozlišuje polaritu měřeného napětí nebo proudu. Na to je nutné při měření dávat velký pozor, protože opačná výchylka, tzv. „za roh“, může způsobit poškození mechanismu.

Ve skutečných přístrojích má mechanismus složení jiné. Dnes se využívá tzv. vnitřní malý magnet z kvalitního materiálu, kolem kterého se otáčí cívka. Uložení cívky je buď v hrotových ložiskách s direktivními pružinami nebo na závěsových vláknech. U běžných panelových přístrojů převažuje hrotové uložení. Tlumení je magnetické, indukovanými vířivými proudy v hliníkovém rámečku cívky.

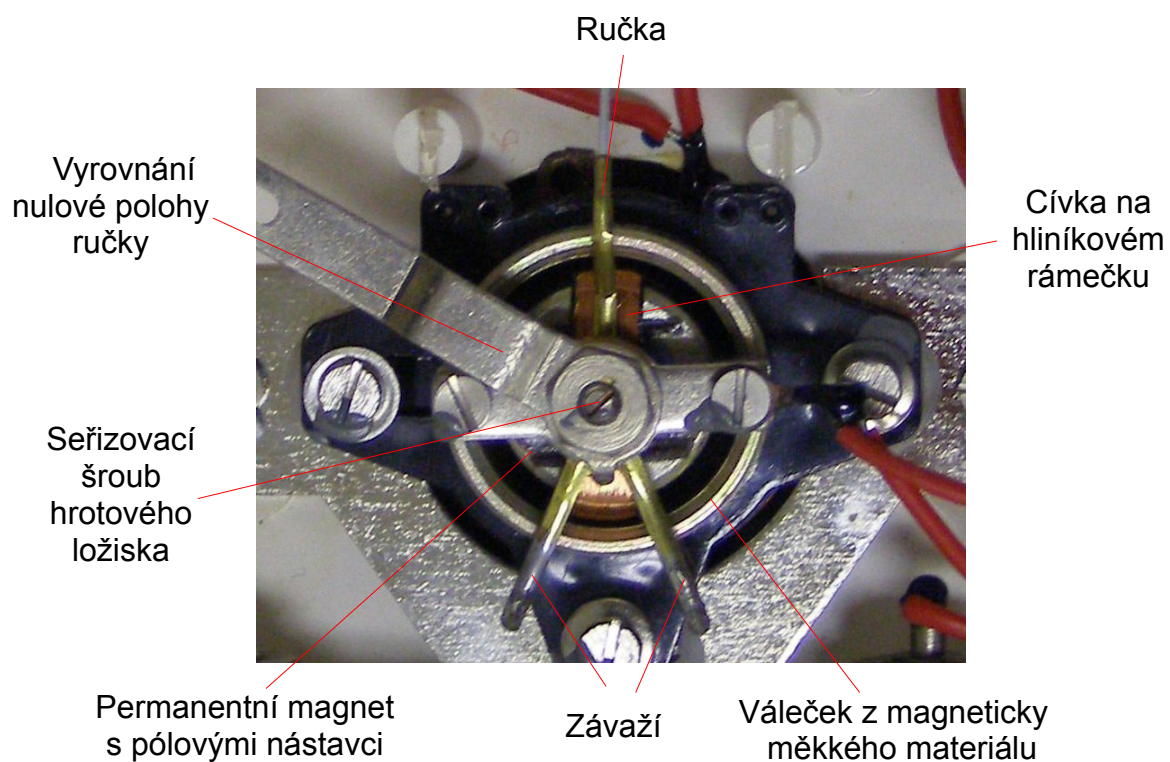
Obr. 42 - Princip provedení magnetoelektrické soustavy



Obr. 43 - Detail magnetoelektrického systému

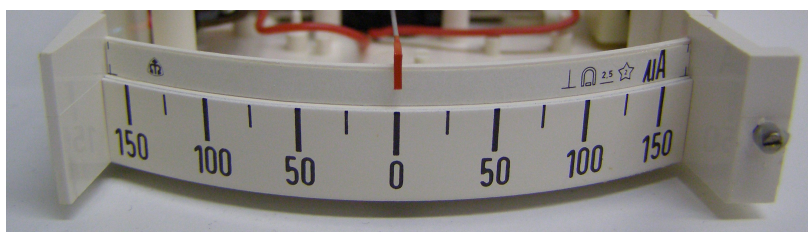


Obr. 44 - Příklad skutečného provedení magnetoelektrické soustavy

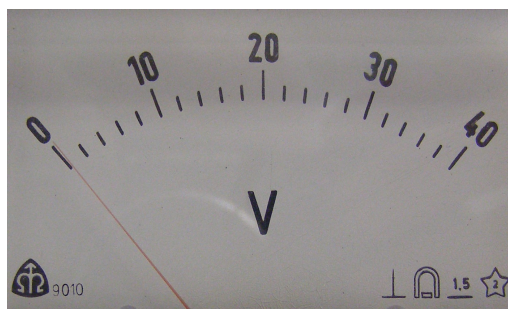


Obr. 45 - Příklady lineární stupnice magnetoelektrické soustavy

s „0“ uprostřed



„klasická“ lineární stupnice



5.3. Feromagnetická soustava

Tato soustava již není v současné době běžně v prodeji. Je ale v katalogové nabídce výrobců, např. Metra Blansko, takže ji lze objednat. Otázkou zůstává cena, která bude samozřejmě vyšší, než u magnetoelektrických přístrojů, vyráběných ve velkých sériích. Může ale nastat situace, že je v určité konstrukci při poruše nejvýhodnější náhrada totožným měřicím přístrojem. Je to soustava, která využívá vzájemného působení magnetického pole cívky, která je pevná a pohyblivé části z feromagnetického materiálu. Z tohoto pohledu je také tato soustava nazývána elektromagnetická.

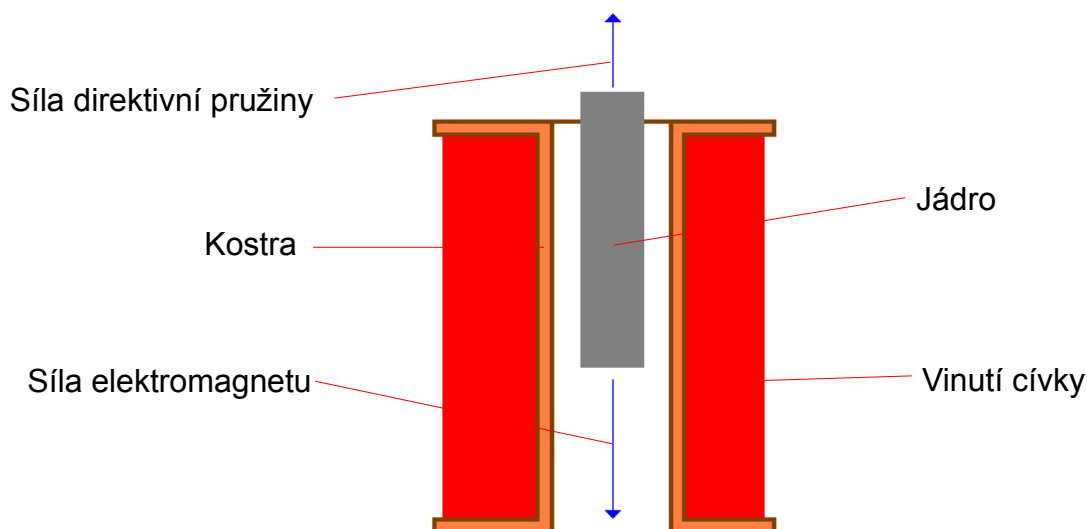
Obr. 46 - Všeobecná značka feromagnetické (elektromagnetické) soustavy



Feromagnetická soustava může měřit proud stejnosměrný i střídavý, efektivní hodnotu (pro stejnosměrné měření je proto výhodnější používat soustavu magnetoelektrickou). Výchylka ale lineární není. Na začátku stupnice jsou dílky hustší a tím i odečet měřené hodnoty méně ideální. Tyto přístroje mají velkou odolnost proti mechanickému poškození, snáze snášejí přetížení (až 50x) - proud se přivádí přímo do cívky – vodič má odpovídající průřez.

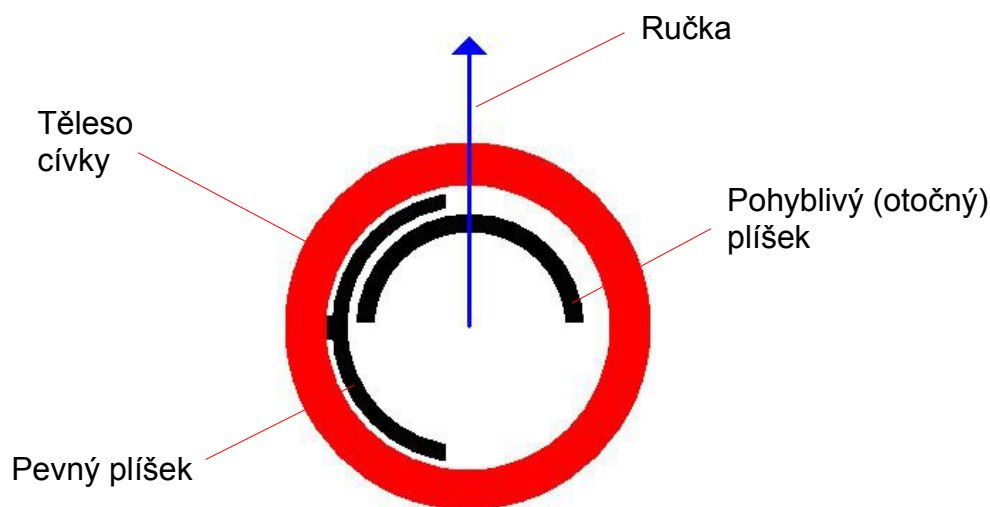
Na uvedeném jednoduchém principu pracují např. analogové zkoušečky napětí, s kterými se můžeme v praxi setkat. Při průchodu proudem cívkou vzniká magnetické pole, které vtahuje jádro do dutiny kostry. Tím vzniká výchylka. Tento systém se ale v měřicích přístrojích neužívá.

Obr. 47 - Princip feromagnetické soustavy

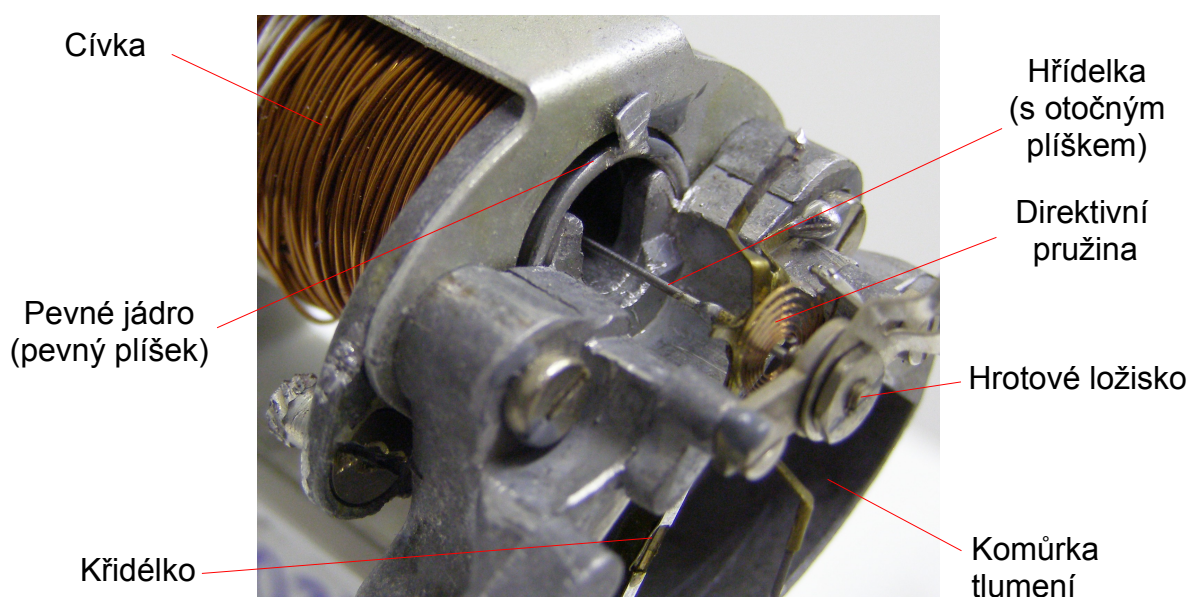


Pro měřicí přístroje feromagnetické soustavy se využívá vzájemného pohybu zmagnetovaných plíšků z magneticky měkkého železa, které jsou vloženy do magnetického pole pevné cívky. Jeden plíšek je uložený pevně, druhý otočně a je spojený s ručkou. Při průchodu proudu cívkou se oba plíšky „zmagnetují“ současně a tím se začnou od sebe odpuzovat. Tak vzniká výchylka. Vratnou polohu zajišťují direktivní spirálové pružiny. Při vyrovnaní síly magnetického pole cívky a síly pružin se výchylka ustálí. Protože pracují s velmi slabým magnetickým polem, je třeba u přesnějších přístrojů mechanismus odstínit. Tlumení chvění ručky se používá vzduchové.

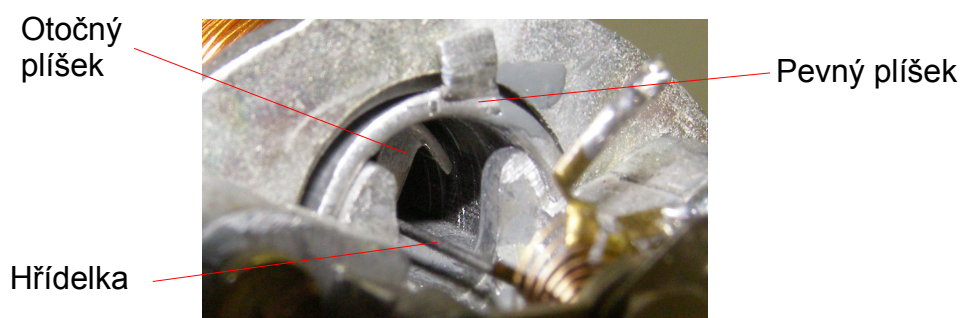
Obr. 48 - Princip mechanismu feromagnetického přístroje



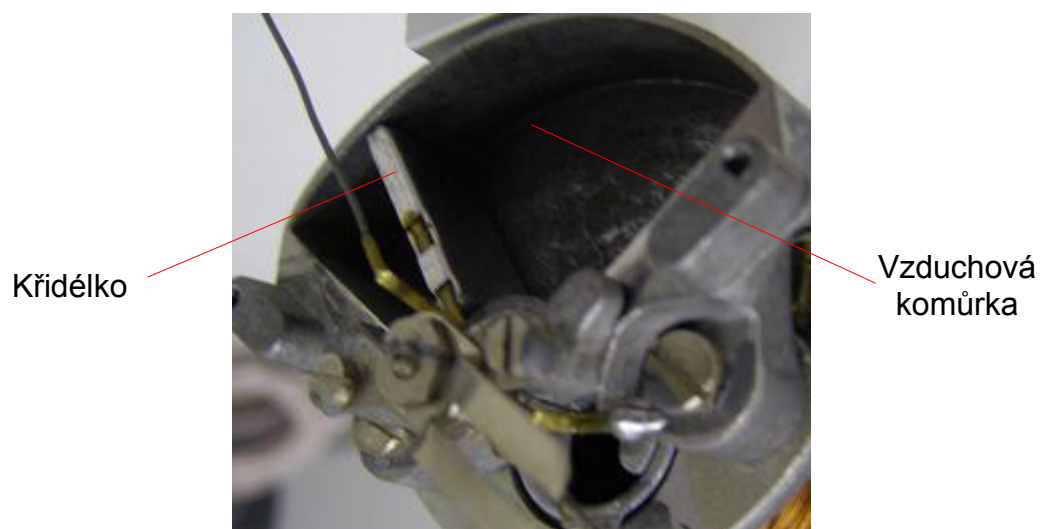
Obr. 49 - Praktické provedení feromagnetické soustavy



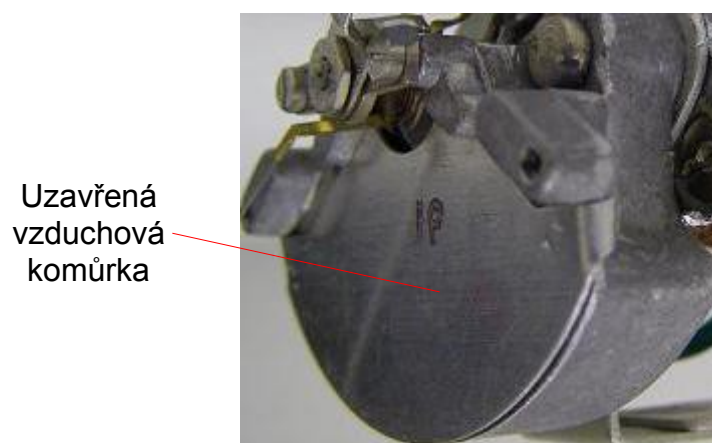
Obr. 50 - Detail otočného mechanismu



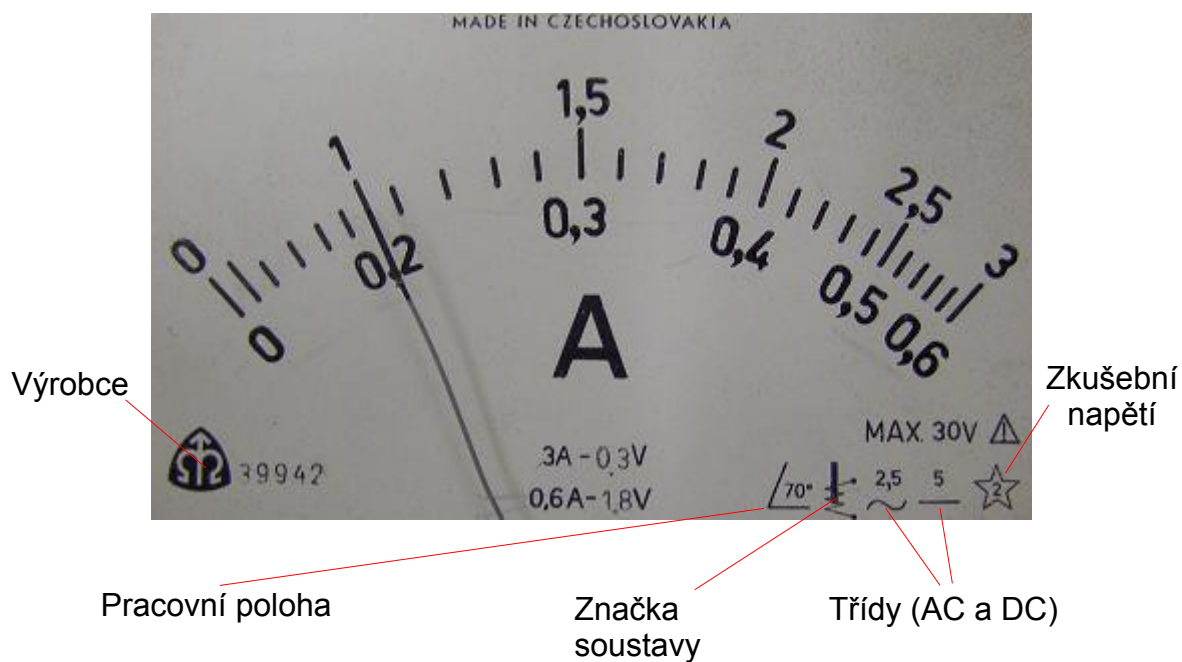
Obr. 51- Princip vzduchového tlumení u feromagnetické soustavy



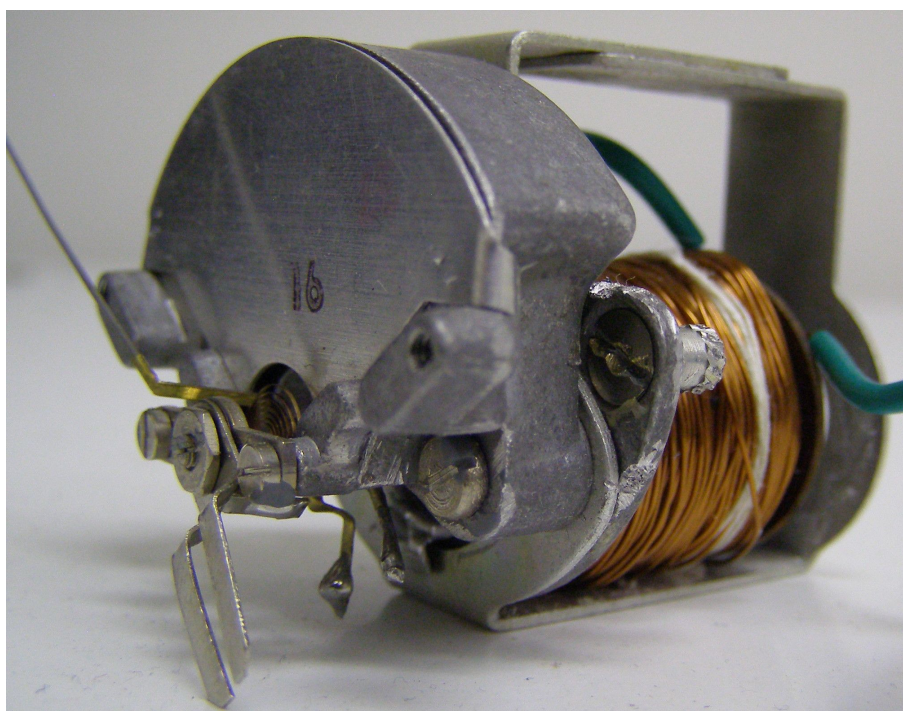
Obr. 52 - Detail komůrky



Obr. 53 - Příklad stupnice feromagnetické soustavy
(nelinearita je patrná)



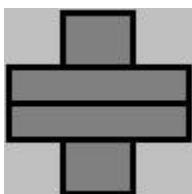
Obr. 54 - Feromagnetická soustava bez stupnice



5.4. Elektrodynamická soustava

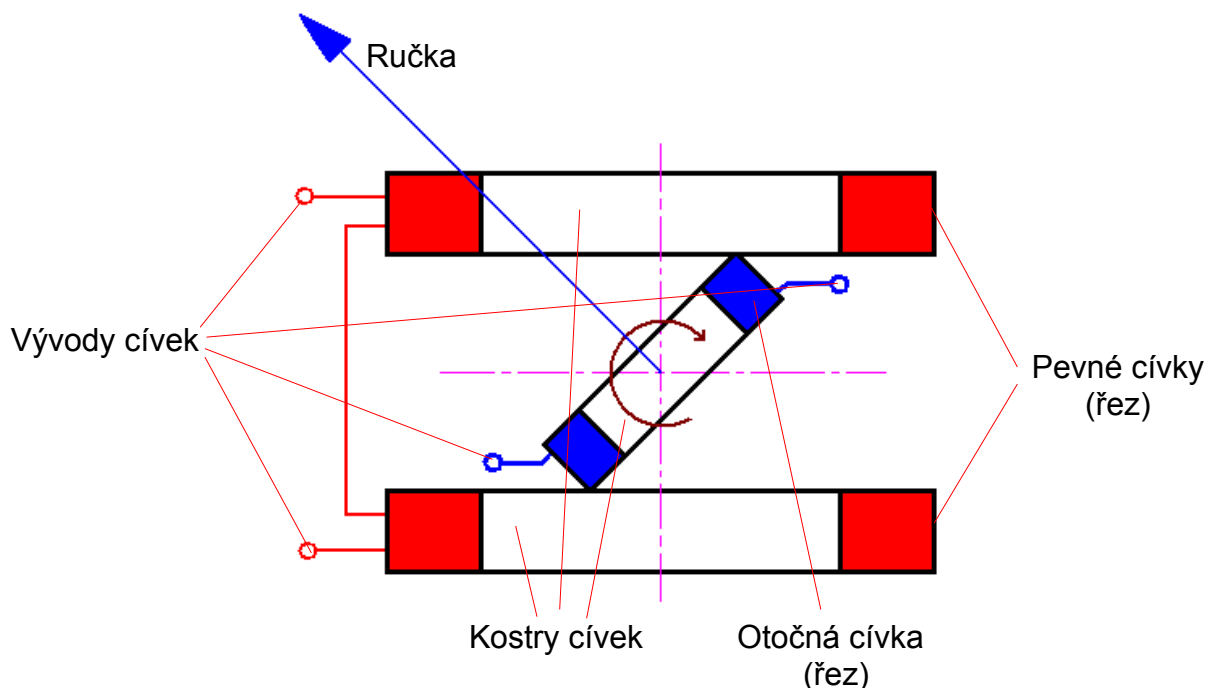
V současné době je přece jen využívána méně. V elektrotechnických obchodech běžně v nabídce nebývá. Nyní se používá hlavně pro měření výkonů, činných i jalových, tzn. jako wattmetry.

Obr. 55 - Všeobecná značka elektrodynamické soustavy

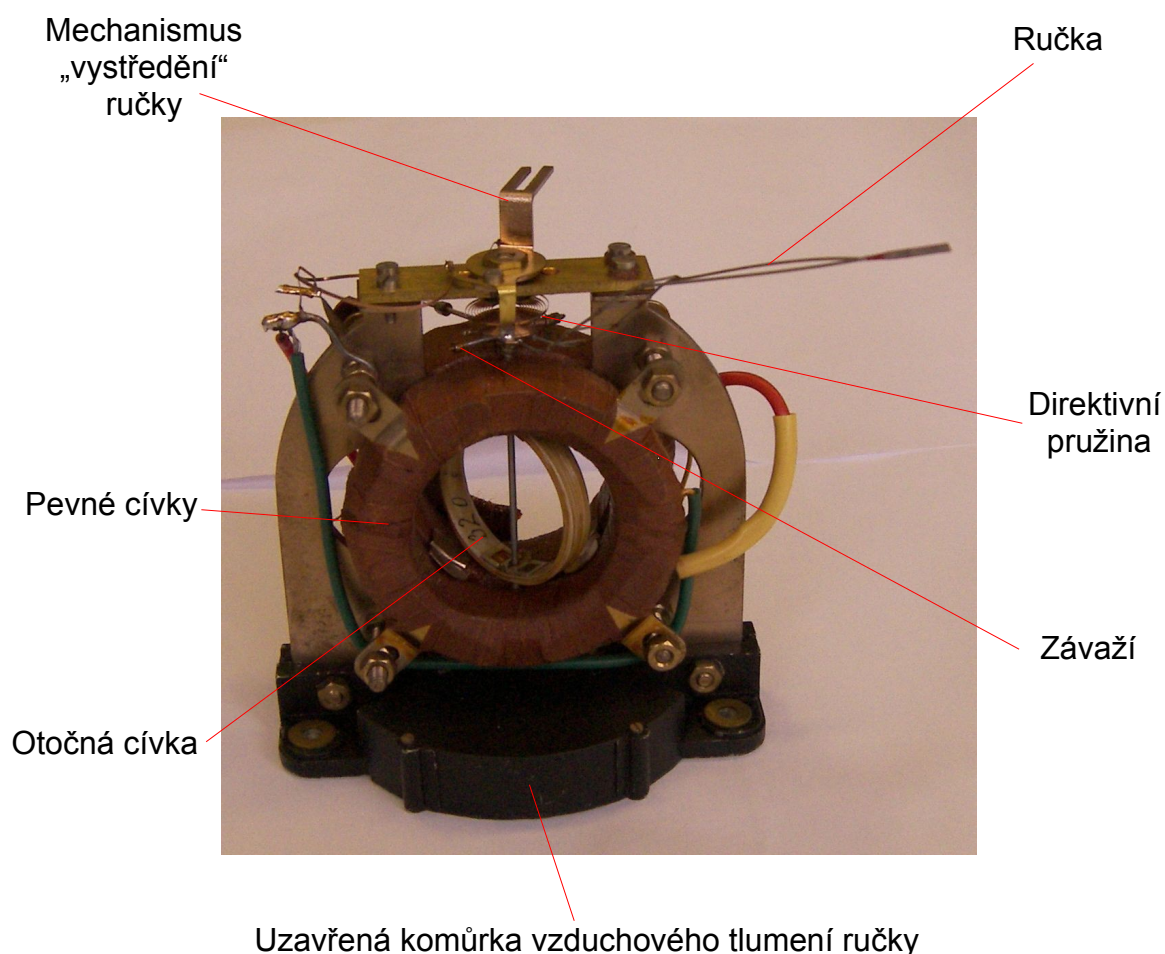


Tato měřicí soustava využívá rovněž magnetické pole, ale nikoli permanentního magnetu. Ten v této soustavě použitý není. Tento systém obsahuje cívky dvě. Jednu pevnou a v ní otočnou druhou cívku. První cívka má vyšší počet závitů, navinutých slabším vodičem – napěťová, druhá cívka má méně závitů vinutých silnějším vodičem – proudová. Pevná cívka bývá rozdělena na dvě poloviny. Cívky jsou navinuté na kostrách. Proud protéká oběma cívkami současně a tím vzniklá magnetická pole na sebe vzájemně působí. Tak vzniká výchylka úměrná součinu proudů procházejících cívkami. Wattmetr bude mít výchylku lineární, protože výkon je úměrný součinu napětí a proudu. Voltmetr a ampérmetr budou mít výchylku nelineární.

Obr. 56 - Princip soustavy

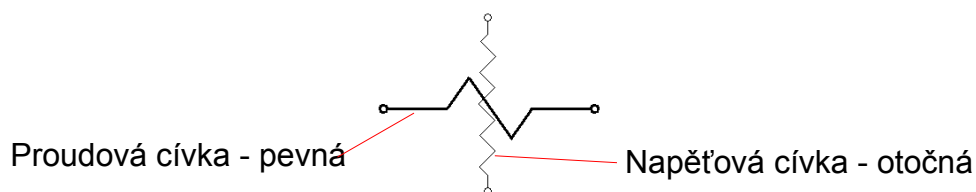


Obr. 57 - Elektrodynamický systém



Tato soustava má velmi slabé magnetické pole a tak je velmi náchylná na rušení vnějšími vlivy. Tento vliv se odstraňuje „stíněním“ soustavy. Celý systém se uzavře do pouzdra z magneticky měkkého železa. Tlumení se používá vzduchové, křídélkem v uzavřené komůrce. Otočná cívka je uložena na hřídeli, v ložiskách. Přívod proudu je provedený direktivními pružinami. Pevná cívka má přívody vlastní – zvlášť. Elektrodynamická soustava měří stejnosměrné i střídavé veličiny.

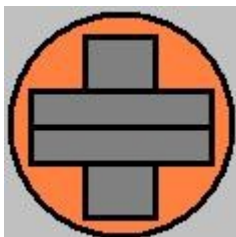
Obr. 58 - Schéma soustavy



5.5. Ferodynamická soustava

V současné době se s tímto systémem vyrábí panelové wattmetry. Pracuje na stejném principu jako soustava elektrodynamická. Na rozdíl od elektrodynamické má tato soustava magnetický obvod. Na pólovém nástavci je umístěny pevná cívka a otočná cívka se pohybuje ve štěrbině magnetického obvodu. Magnetická indukce je vyšší a tím je větší i síla, která působí na otočný mechanismus. Tlumení je magnetické.

Obr. 59 - Všeobecná značka ferodynamické soustavy



Symbol cívek je stejný jako u elektrodynamické soustavy, jen je zdůrazněno železné jádro vnějším kruhem.

Obr. 60 - Příklad stupnic ferodynamických soustav

U voltmetru nebo ampérmetru je nelinearita zřejmá, pro přesné měření je nutné použít takový rozsah, aby výchylka se pohybovala cca od 1/5 – 4/5 stupnice.



Pracovní
poloha

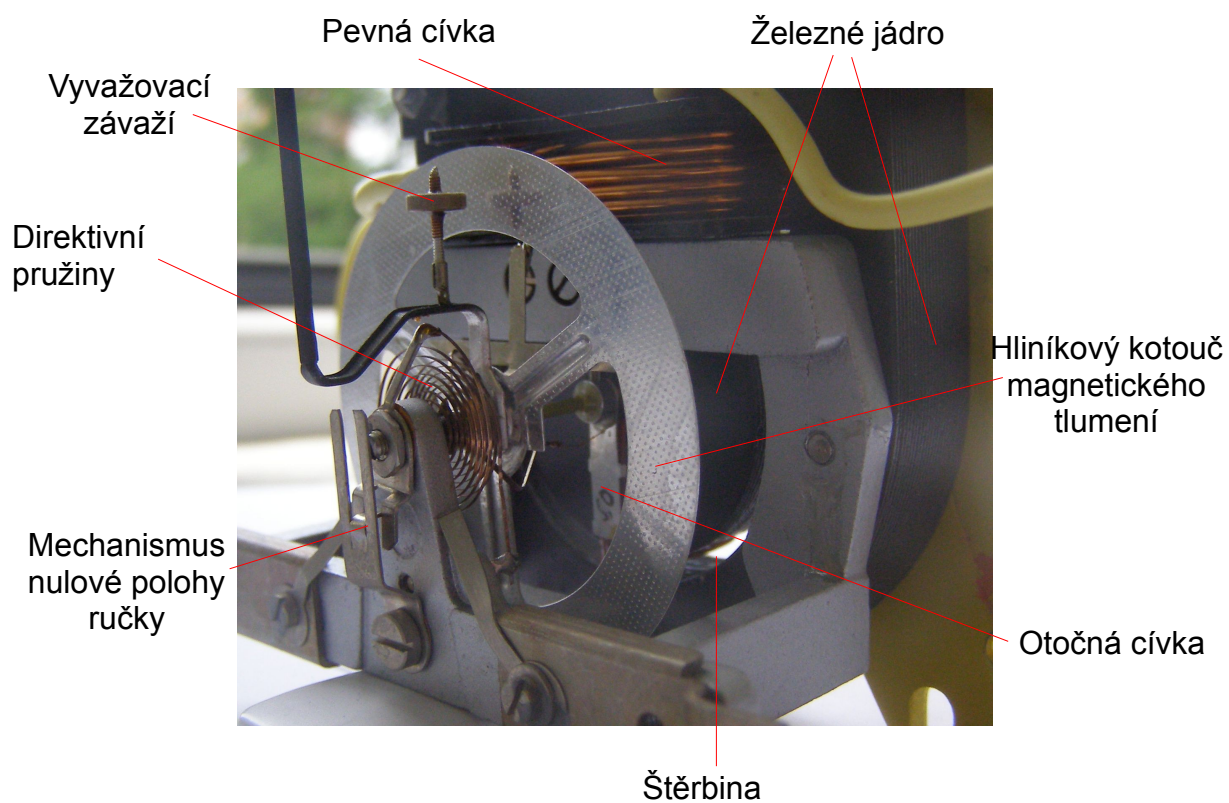
Značka soustavy
feromagnetická

Třída přesnosti
Pro stejnosměrné i
střídavé měření

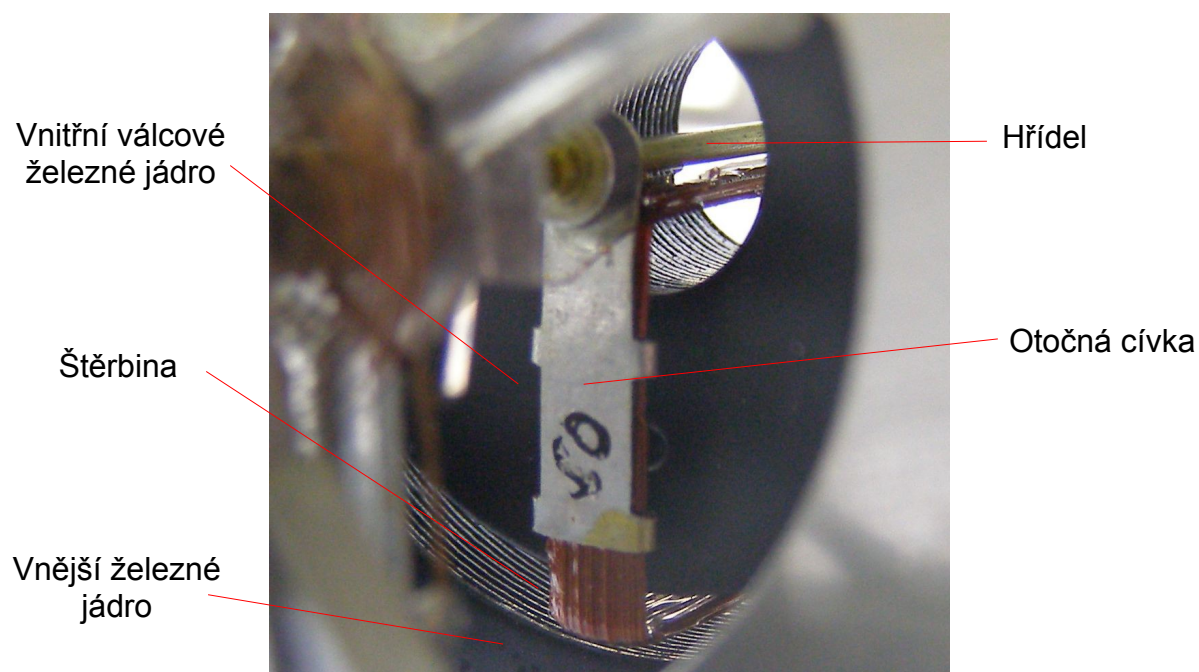
Ferodynamické wattmetry mají stupnici lineární
(princip značek na stupnici je stejný)



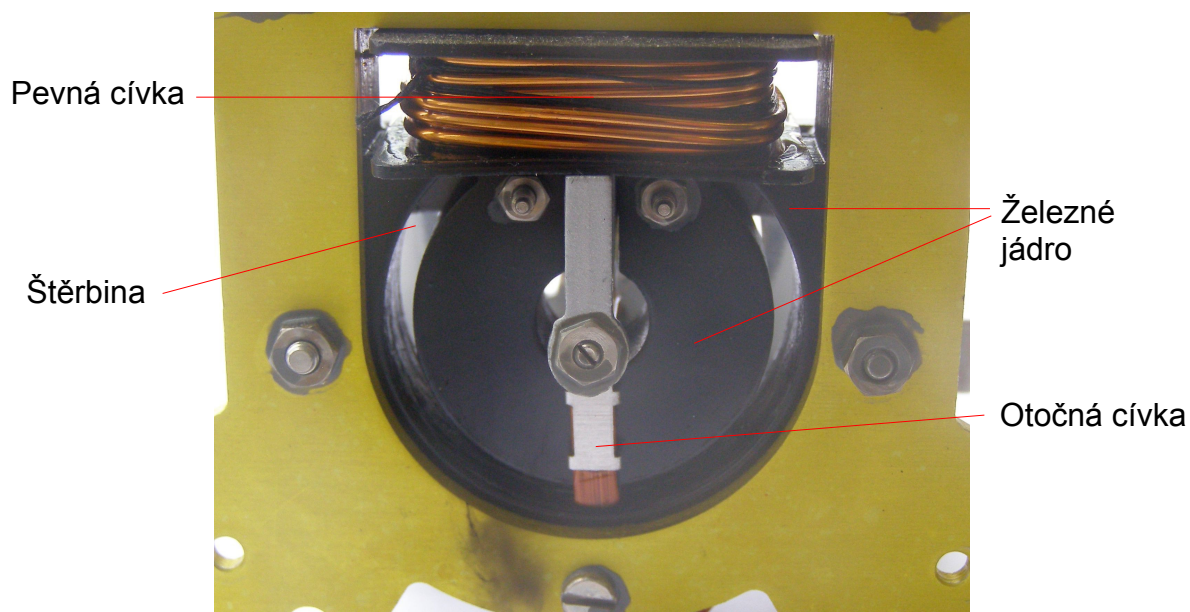
Obr. 61 - Ferodynamický systém



Obr. 62 - Detail otočné části



Obr. 63 - Detail systému soustavy



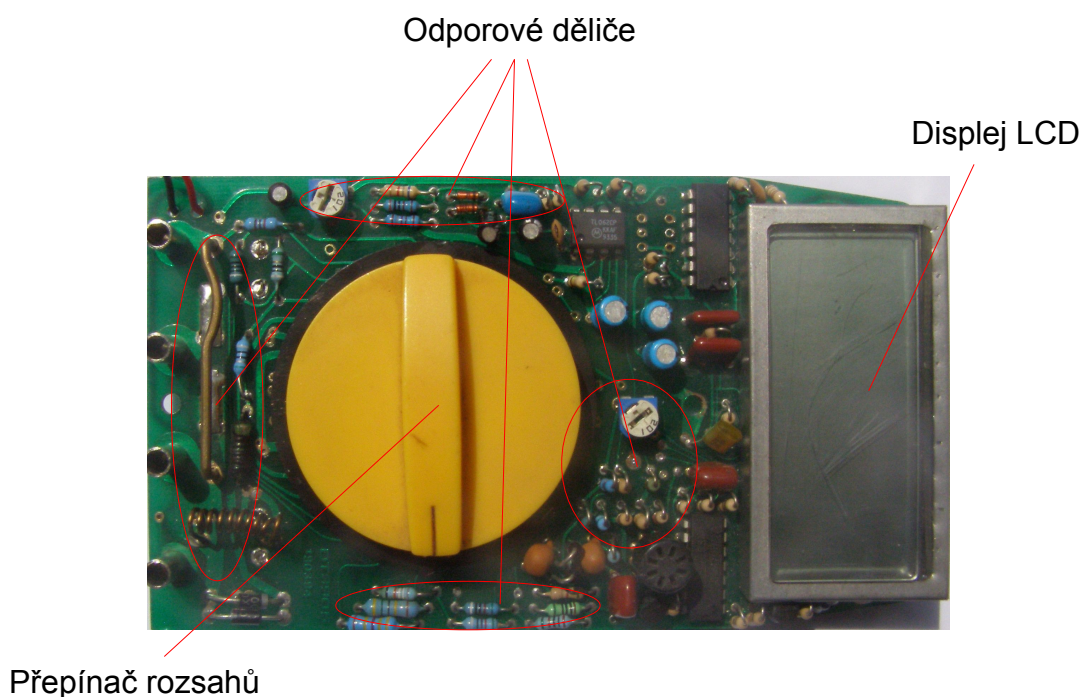
V současné době je tato soustava ve výrobní nabídce analogových přístrojů pro měření výkonu – wattmetry. Pevná cívka – proudová – je navinutá silnějším vodičem a má pevné připojení k přívodním svorkám. Otočná cívka – napěťová – je navinutá slabým vodičem, má více závitů a k přístrojovým svorkám je připojená přes direktivní pružiny.

6. Digitální měřicí přístroje

V současné době mají rozhodující význam v oblasti elektrického měření. Naměřený údaj je zobrazovaný jako dekadické číslo na displeji, který může být z kapalných krystalů – LCD nebo ze sedmisegmentových LED. Nejvíce používané jsou číslicové – digitální – multimetry, osciloskopy a čítače. Možnosti zpracování údajů jsou mnohem širší než u analogových přístrojů. Digitální přístroje mohou být vybaveny doplňkovými funkcemi, např. pamětí minimální nebo maximální hodnoty, propojení s počítačem atd.

Digitální multimetry se vyrábí pro běžné dílenské měření, které mají srovnatelnou nebo vyšší přesnost než analogové přístroje. Většinou okolo 1 %. Pro možnost sledování spojitě výchylky jsou kvalitnější multimetry vybavené sloupcovým ukazatelem – bargrafem. Pro přesné laboratorní měření se vyrábí kvalitní stolní digitální měřicí přístroje. Této kvalitě samozřejmě odpovídá i cena, až do desítek tisíc korun.

Vlastnosti digitálních měřicích přístrojů jsou v podstatě určeny přesností použitých součástek a kvalitou základního číslicového voltmetru, který měří stejnosměrné napětí. Ostatní měřené veličiny musí být na stejnosměrné napětí převedené.



Obr. 64 - Příklad konstrukce digitálního multimetru
(převodník je umístěn pod displejem)

6.1. Základní údaje o digitálních přístrojích

Počet zobrazovaných míst na displeji – jedna za základních vlastností měřicího přístroje. Po zapnutí snadno rozpoznatelná. Displeje většinou zobrazují naměřenou hodnotu, jednotku, určují řád. Mohou mít různý počet míst – digitů. Starší přístroje mívaly 3 – místný displej. Tyto přístroje se už nevyrábějí. Nejčastější jsou displeje 3 a $\frac{1}{2}$ místné nebo 3 a $\frac{3}{4}$ místné. Obecně lze konstatovat, že čím je přístroj přesnější a dokonalejší, má vyšší počet zobrazovaných míst. Přesné laboratorní přístroje mohou mít až 8 a $\frac{1}{2}$ místný displej. 3 a $\frac{1}{2}$ místa znamená, že přístroj má rozsahy například 0,2V, 2V, 20V t.j. nejvyšší měřené napětí na rozsahu 2V je 1,999V. 3 a $\frac{3}{4}$ místný má rozsahy například 0,4V, 4V, 40V 400V, to představuje max. hodnotu napětí na displeji např. 399,9V.

Obr. 65 - Příklad displeje LCD



Obr. 66 - Příklad displeje LED

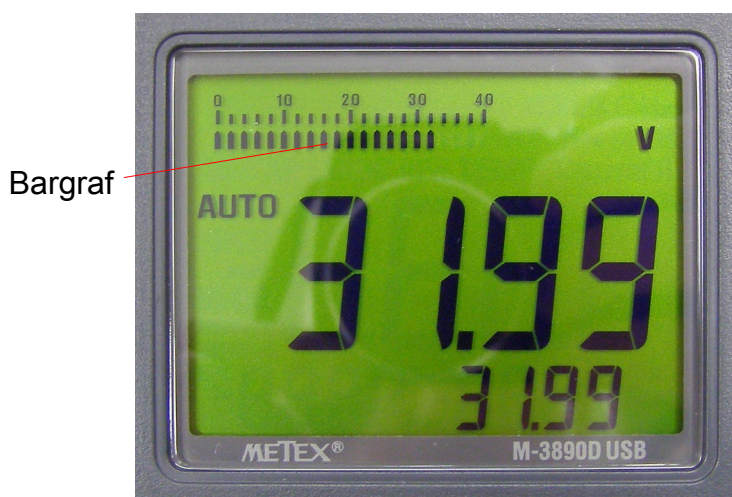


Obr. 67 - Příklad displeje 3 a $\frac{1}{2}$



(Rozsah 20 V, maximální hodnota napětí je 19,99 V)

Obr. 68 - Příklad displeje 3 a $\frac{3}{4}$



Rozsah 40 V, maximální hodnota napětí je 39,99 V.

Vstupní rozsahy – běžné dílenské multimetry mají pro každou měřenou veličinu několik rozsahů. Ty jsou voleny tak, aby jejich hodnoty odpovídaly dekadickým násobkům základního rozsahu. Jiné hodnoty rozsahu nejsou možné! Obvykle jsou volené hodnoty od minimální po maximální možnou měřenou hodnotu. Pro stejnosměrné napětí např. 200 mV, 2 V, 20 V, 200 V a 1000 V. Poslední rozsah musí být samozřejmě spočítaný na hodnotu 2000 V, ale toto napětí nelze prakticky přeměřit. Přístroje jsou konstruovány do hodnoty 1000 V, rozsah je 2 kV, ale z bezpečnostních důvodů je možné používat přístroj pouze do 1 kV.

Překročení rozsahu – údaj na displeji, jestliže měřená veličina má vyšší hodnotu než zvolený rozsah. Displej v tomto případě zobrazuje většinou **1** nebo **OL**.

Přesnost – tuto hodnotu udává výrobce. U běžných dílenských multimetrů se pohybuje od 0,5 % do 2 až 3 %. Pro stejnosměrné veličiny je téměř vždy přesnost vyšší. Na rozdíl od analogových přístrojů, kde třída přesnosti zahrnuje většinou všechny rozsahy, u digitálních multimetrů výrobci určují konkrétní přesnost pro každou skupinu rozsahů. Tyto údaje se většinou od sebe liší. Pro nás, jako uživatele, je to výhodnější, protože se lépe využívá vlastností přístroje. Pravda je, že nás to nutí počítat chybu měření většinou víckrát. Údaje o přesnosti jsou v příbalovém prospektu ve formě tabulek.

Časová stálost – doba, po kterou by si přístroj měl udržet svoje vlastnosti. Nejméně to musí být záruční doba přístroje, tzn. minimálně 2 roky. V manuálu je uveden kalibrační interval, obvykle 1 rok.

Rozlišení – vyjadřuje hodnotu nejmenší změny, kterou může měřicí přístroj zobrazit. Je to změna o 1 digit na posledním místě displeje. Tento údaj závisí na zvoleném rozsahu. Např. multimetr na rozsahu 200 mV (199,9 mV) má rozlišení 0,1 mV, tj. 100 μ V.

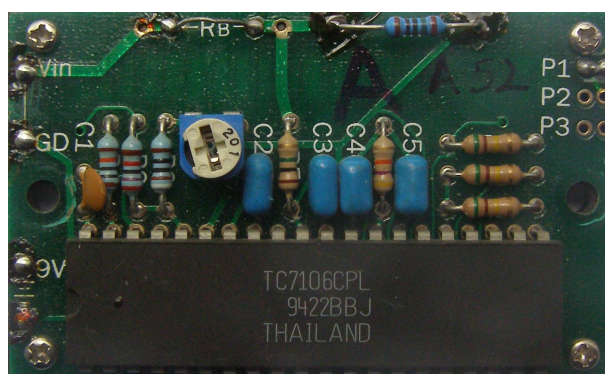
Rozlišení je často vyšší, než udávaná přesnost přístroje. Nikdy se nemůžeme spoléhat, že přístroj z vysokým rozlišením měřené veličiny je automaticky přesnější. Je vždy nutné před použitím přístroje se dobře seznámit s technickými údaji výrobce.

Citlivost – je daná nejmenší možnou měřenou hodnotou na daném rozsahu. Obecně se odvozuje od rozlišovací schopnosti měřicího přístroje.

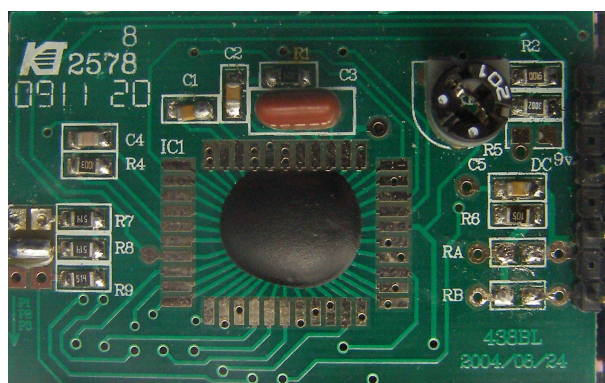
Vstupní impedance – týká se rozsahů pro měření napětí. Jedná se o impedanci vstupního odporového děliče. U naprosté většiny digitálních multimetrů jde o hodnotu 10 MΩ. Pro ostatní rozsahy jiných veličin tyto hodnoty nemají smysl. Vstupní impedance je stejná na všech napěťových rozsazích. Na proudových rozsazích vzniká na multimetru napěťový úbytek asi 0,2 V na rozsah.

Analogově – číslicový převodník – jinak také převodník A/D – nejdůležitější součástka digitálních přístrojů. Je to takové „srdíčko“ přístroje. Určuje základní rozsah měřicího přístroje vždy pouze pro stejnosměrné napětí. Ostatní veličiny musí být na toto napětí předem převedeny.

Obr. 69 - Příklad desky „klasického“ převodníku pro 3 a 1/2 místný displej



Obr. - 70 Příklad desky moderního převodníku pro 3 a 1/2 místný displej



U převodníku je důležitá rychlost měření. U dílenských multimetrů bývá minimálně 3 měření/sekundu.

Frekvenční pásmo – je důležité pro měření střídavých veličin. Údaj výrobce o rozsahu frekvence měřených veličin. Mimo tyto kmitočty je měření nepřesné. Např. 40 – 400 Hz.

Programovatelnost – důležité pro možnost užití multimetrů v měřicích systémech. Tuto vlastnost běžné multimetry nemají. Kvalitnější přístroje jsou opatřené seriovým portem (USB) pro spojení s počítači.

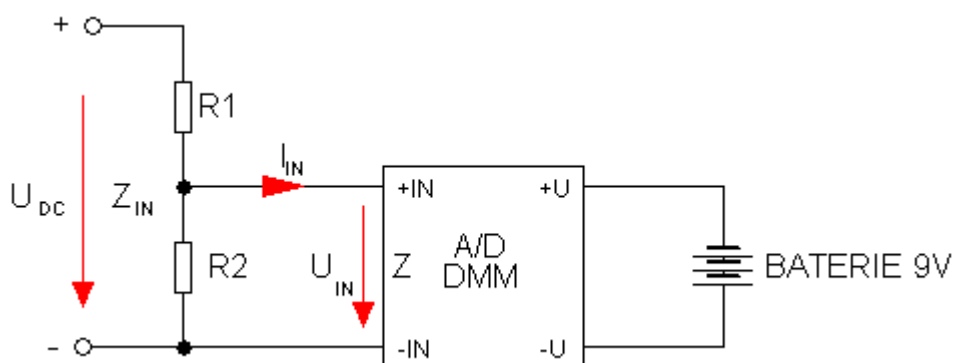
Autokalibrace – digitální měřicí přístroj je schopný samočinné korekce změn vstupních parametrů.

Samočinný diagnostický test – u přístroje ve spojení s počítačem a s vhodným softwarem je možné provést kontrolu přesnosti.

Pro měření střídavých veličin je nutný údaj, jakým způsobem přístroj převádí střídavé veličiny na stejnosměrné napětí. Zda displej zobrazuje **efektivní hodnotu měřené veličiny (RMS)**. Ve skutečnosti může měřit **efektivní nebo střední** hodnotu.

6.2. Principy měření

1) Elektrické napětí

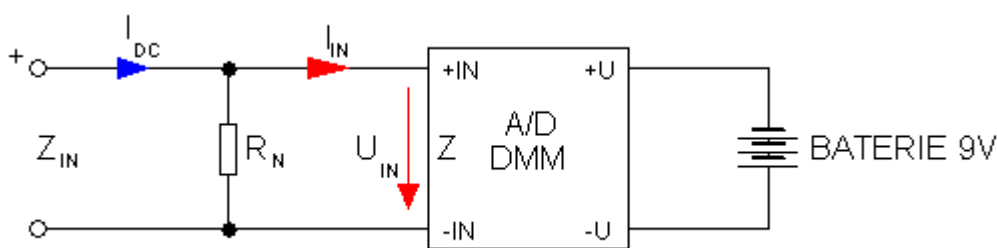


Obr. 71 – Princip měření napětí

Digitální měřicí modul (DMM) se vyznačuje vysokou vstupní impedancí Z . Výrobci uvádí většinou $Z > 100 \text{ M}\Omega$. Do modulu tedy neteče téměř žádný proud I_{IN} . Celková vstupní impedance ($R1 + R2$) je tedy upravena na $10 \text{ M}\Omega$. Pro tuto hodnotu je navržen vstupní dělič napětí. Napětí U_{IN} je dané základními parametry použitého převodníku, většinou 200 mV nebo 400 mV.

Poměr děliče: $U_{DC} : U_{IN} = (R1 + R2) : R2$

2) Elektrický proud



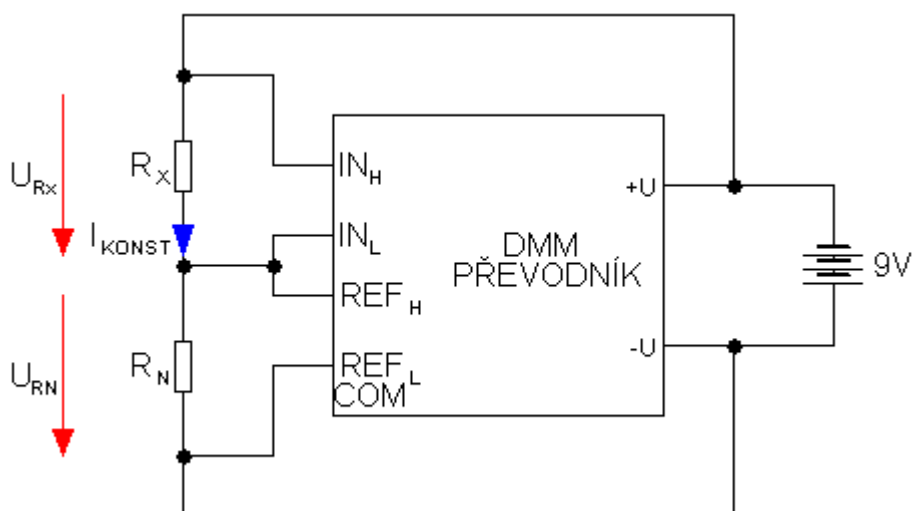
Obr. 72 – Princip měření proudu

Měřený proud I_{DC} protéká normálovým rezistorem R_N a vytváří na něm úbytek napětí. Rezistor R_N musí mít přesnou, jednotkovou hodnotu. V tom případě bude číselná hodnota napětí na displeji převodníku odpovídat velikosti měřeného proudu.

3) Měření odporu

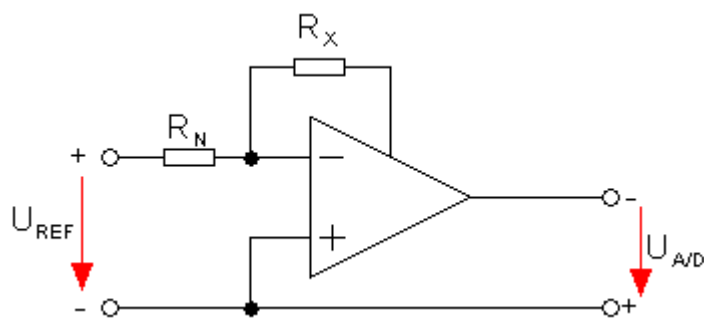
Měření odporu umožňují všechny vyráběné multimetry. Tyto rozsahy patří mezi běžné vybavení. Při tomto měření je nutné hodnotu odporu převést na hodnotu napětí, kterou může A/D převodník zobrazit na displeji. Pro běžné multimetry je možné použít princip srovnání úbytků napětí, které vzniknou na neznámém a normálovém rezistoru při konstantním, definovaném, proudu nebo lineárním převodem odporu na napětí.

Obr. 73 - Zjednodušený princip srovnávací metody



Rezistory - neznámým R_X a normálovým R_N protéká stejný proud $I_{KONSTANTNÍ}$. Vzniklé úbytky napětí U_{RX} a U_{RN} slouží pro výpočet velikosti odporu.

Obr. 74. - Zjednodušený princip převodu odporu na napětí



Tato měřicí metody pracuje na principu Ohmova zákona. Normálový rezistor je realizovaný jako přesný dělič jednotkových odporů. Je možné i přepínat zdroj referenčního napětí U_{REF} .

Vycházíme ze vztahu:

$$U_{A/D} = \frac{R_X}{R_N} \cdot - U_{REF}$$

V tomto případě tedy multimetr měří vlastně napětí, které číselnou hodnotou odpovídá hodnotě odporu měřeného rezistoru.

4) Měření kapacity

Měření kapacity umožňují jen některé multimetry. Jedná se většinou o měření kapacity nepolarizovaných kondenzátorů. Buďto je kondenzátor je nabíjený ze zdroje konstantního proudu na určenou hodnotu a měří se čas nabíjení nebo obráceně - nabíjí se po konstantní dobu a pak se změří dosažené napětí.

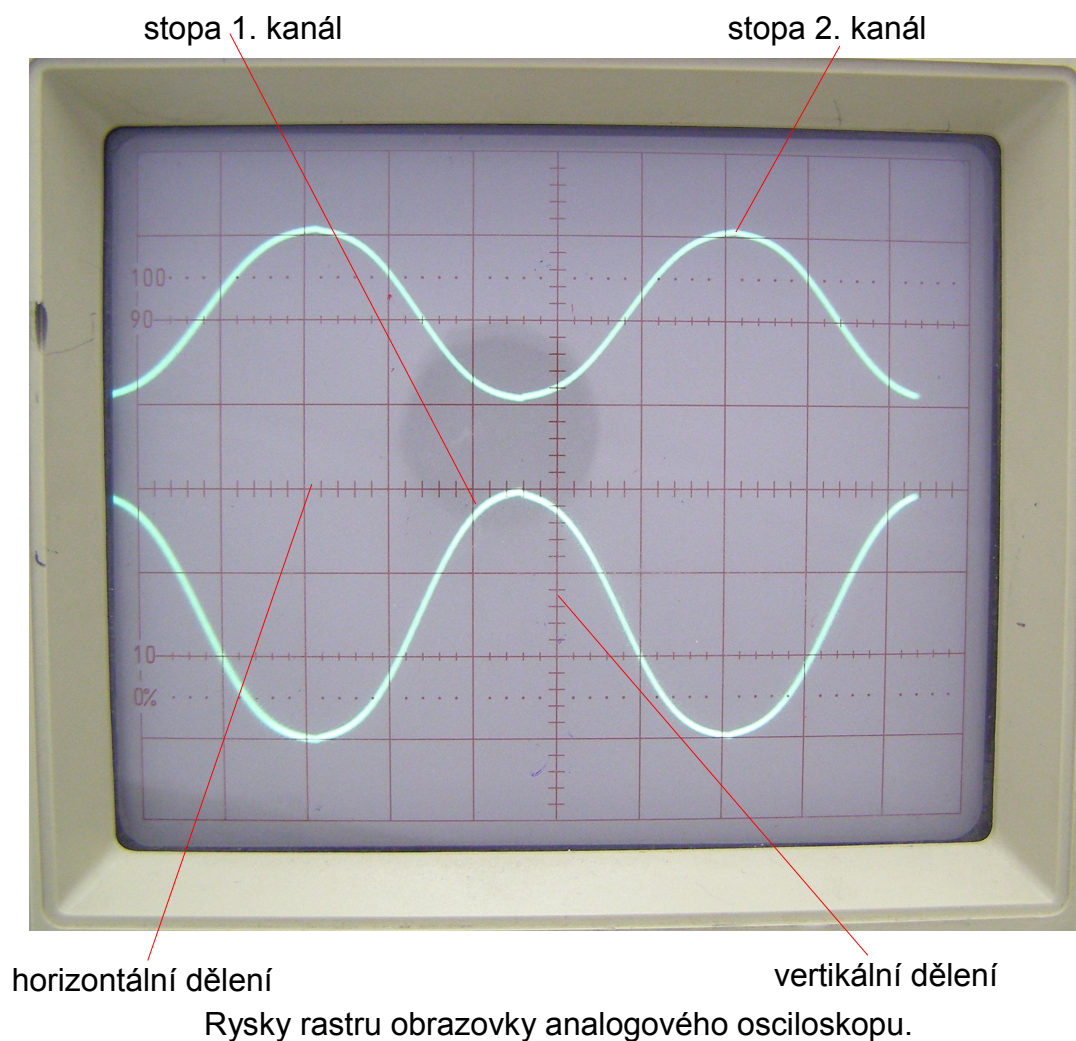
V nových multimetrech je toto měření součástí převodníku - pracuje v režimu jednoduché integrace.

7. Analogový osciloskop

Osciloskop můžeme charakterizovat jako měřicí přístroj, který měřené napětí také zobrazuje jako stopu na stínítku obrazovky. Osciloskop zapojujeme do měřicího obvodu jako voltmetr. Takže jeho vstup musí mít také velký vstupní odpor. V praxi se většinou jedná o hodnotu $1\text{ M}\Omega$. Vstupní kapacita musí být co nejmenší, většinou bývá kolem 20 pF . Pro měření napětí na vysokých kmitočtech je důležitá kompenzace vstupního děliče.

Pro odečítání měřených hodnot (napětí a času) jsou vstupní děliče (napěťový a časová základna) kalibrované. Hodnoty jsou udány v hodnotě/dílek. V podstatě se jedná o měřicí konstantu pro daný rozsah. Stupnici zde představuje stínítko obrazovky, které je rozděleno čtvercovým rastrem na dílky. Analogové osciloskopy mívají 8 – 10 dílků vodorovně a 6 -8 dílků svisle.

Obr. 75 - Příklad osciloskopické obrazovky



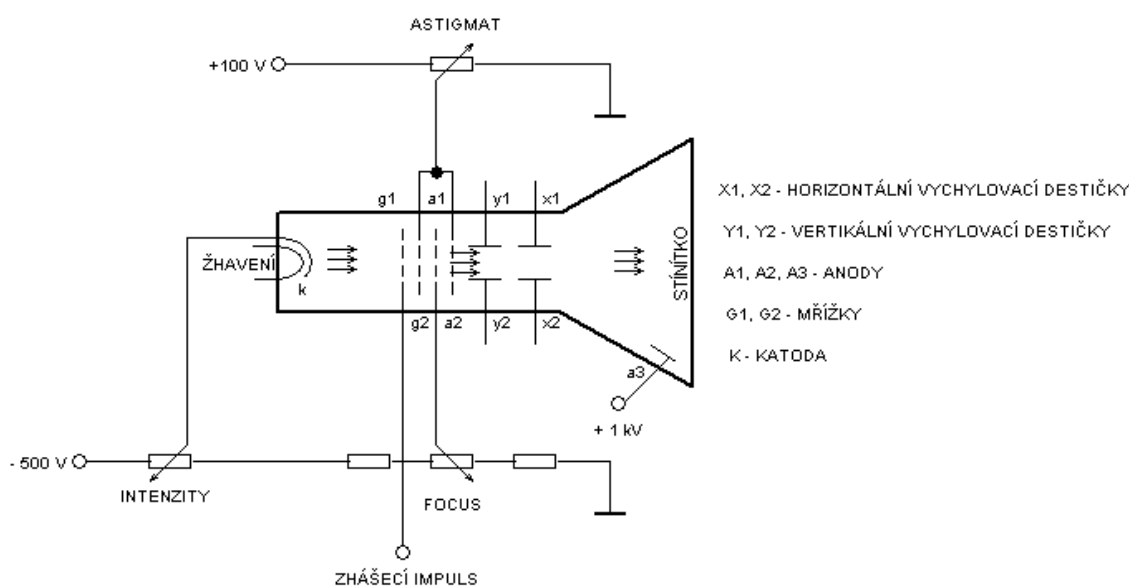
Obrazovky analogových osciloskopů se od obrazovek televizních podstatně liší. Hlavní rozdíl je ve způsobu vychylování paprsku. U televizních obrazovek je vychylování elektromagnetické. Tento princip je daleko účinnější, ale je omezený kmitočtovým rozsahem. Kdyby osciloskopy tento způsob používaly, nemohly by měřit napětí o vysokých kmitočtech. Projevovaly by se negativně velké indukčnosti vychylovacích cívek. U analogových osciloskopů se tedy používá vychylování paprsku elektrostatické. Nevýhodou je malý vychylovací úhel. Proto osciloskopické obrazovky větších rozměrů jsou delší a zvětšují rozměry celého přístroje.

Obrazovky jsou vzduchoprázdné, letící elektrony na žádné částice nemohou narážet a měnit směr. Stínítko tvoří vrstva luminoforu, která náraz elektronu přemění na světelný záblesk. Tyto vrstvy mají u současných osciloskopů nazelenalou nebo namodralou barvu. Vrstva luminoforu, zrovna jako katoda, není nevyčerpatelná. Životnost je omezená. Proto je nutné, jestliže není přístroj v měřicím režimu, snižovat jas .

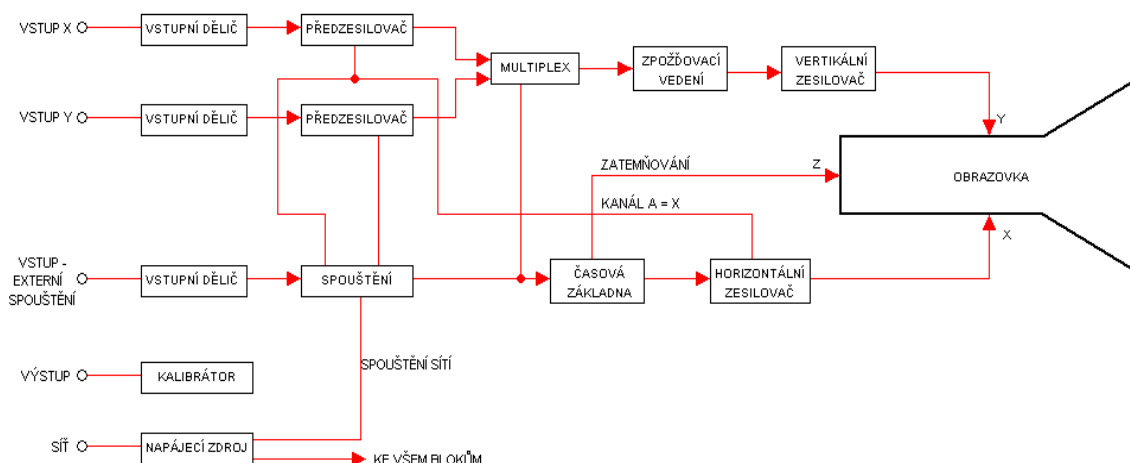
Osciloskopy většinou využíváme v režimu YT, to je pozorování a měření časového průběhu napětí nebo v režimu XY, to je vzájemné pozorování dvou vstupních signálů s vypnutou časovou základnou.

Obrazovka v podstatě pracuje na principu elektronky. Svazek elektronů vzniká na žhavící elektrodě – katodě. Dále letí sestavou mřížek a urychlovacích anod, které ho formují a ztenčují (ASTIGMAT), zaostřují (FOCUS), zjasňují (INTENZITY) a urychlují. Vychylovací destičky slouží pro vychylování paprsku svisle a vodorovně, aby tvořil požadovanou stopu po dopadu na stínítko. Zhášecí impuls je přiváděn pro zhasnutí stopy při návratu paprsku do výchozího bodu.

Obr. 76 - Orientační schéma obrazovky analogového osciloskopu.



Obr. 77 - Blokové schéma analogového dvoukanálového osciloskopu



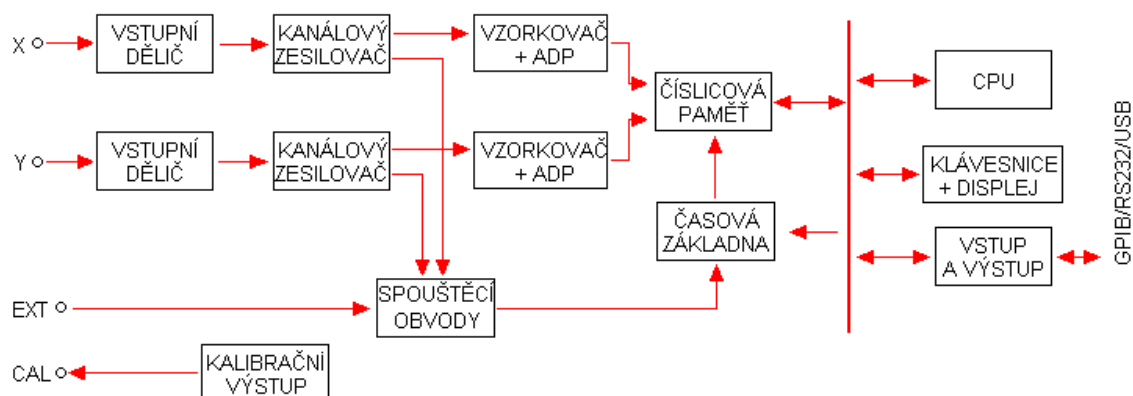
- 1) Vstupy X, Y – analogové vstupy pro přívod měřeného napětí. Impedance = $1\text{M}\Omega$, 15 – 30 pF. **Pozor na napětové omezení. (Zpravidla 400 V_{PP})**
- 2) Vstupní vazba – může být stejnosměrná – měřené napětí je přiváděno přímo na vstupní dělič nebo střídavá – do série ke vstupu je zapojený kondenzátor pro zamezení průchodu stejnosměrným proudům. Na vstupní dělič tedy prochází pouze střídavé napětí.
- 3) Vstup externí spouštění – při vypnutém vnitřním generátoru impulsů (spouštění) slouží k přívodu vnějšího spouštěcího kmitočtu.
- 4) Vstupní děliče – kalibrované děliče napětí – rozsahy napětové a rozsah časové základny.
- 5) Předzesilovače – vstupní zesilovače.
- 6) Multiplex – obvod, který oba měřené napětové vstupy střídavě přepíná pro zobrazení na obrazovce. Kmitočet přepínání je tak vysoký, že na stínítku běží 2 stopy současně - kanály se střídají s přeběhy ČZ (rychlé běhy ČZ) nebo se stroboskopicky přepínají během běhu ČZ.
- 7) Spouštění – synchronizace kmitočtu měřeného napětí s kmitočtem vnitřního generátoru impulsů – časové základny.
- 8) Vertikální zesilovač – zesilovač svislé výchylky.
- 9) Horizontální zesilovač – zesilovač vodorovné výchylky.
- 10) Zatemňování – zhasínání stopy při návratu do výchozího bodu.
- 11) Kalibrátor – zdroj normálového obdélníkového napětí o přesně definované hodnotě a kmitočtu. Obvykle 1 V_{PP} a 1 kHz .

- 12) Zpoždovací vedení - kompenzuje zpoždění startu časové základny, takže můžeme vidět vstupní signál v okamžiku spuštění.

8. Digitální paměťové osciloskopy (DSO)

Oproti analogovým osciloskopům digitální paměťové osciloskopy nezobrazují snímaný děj nebo jev na obrazovku okamžitě, ale se zpožděním. Tyto přístroje tedy umí tento děj uložit do vnitřní paměti, kdykoli ho vyvolat a zobrazovat jej po libovolně dlouhou dobu. Další velké plus je možnost komunikace s počítačem, řízení a zpracování hodnot počítačem a ukládání dat např. na USB disk. Běžné přístroje jsou 2 – kanálové (2 vstupy – X, Y), kvalitnější jsou i 4 – kanálové (4 vstupy). Tyto výhody samozřejmě vůbec neznamenají, že tyto osciloskopy jsou „automaticky“ přesnější než analogové přístroje.

Obr. 78 - Blokové schéma digitálního paměťového osciloskopu



- 1) Vstupy X, Y, přívod měřeného napětí. Vstupní impedance je stejná jako u analogových přístrojů - 1MΩ, 15 – 30 pF. **Maximální mezivrcholové napětí, přivedené přes sondu 10:1, nesmí přesáhnout 400 V. To znamená, že síťové napětí se přímo na vstup osciloskopu připojit nesmí!!** Nesmíme zapomenout, že v síti je napětí 230 V v efektivní hodnotě. Na vstupu osciloskopu by v tomto případě bylo tedy mezivrcholové (špičkové) napětí **$U_{pp} = 230 \cdot \sqrt{2} \cdot 2 = 650 \text{ V!!}$**

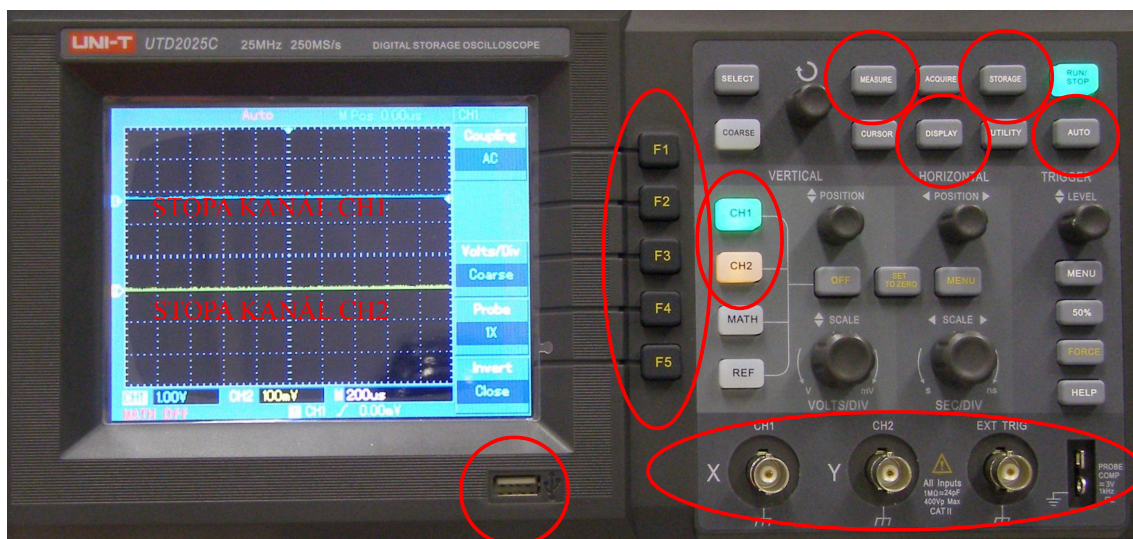
Vstupní vazba se volí obvyklým způsobem – tlačítkem F1.

- 2) Vstupní děliče – kalibrované děliče napětí – úprava vstupního napětí – VOLTS/DIV.
- 3) Kanálový zesilovač – zesílení vstupního napětí na úroveň, vhodnou pro další zpracování.
- 4) Spouštěcí obvody – vnitřní nebo vnější spouštění časové základny.
- 5) Časová základna – kalibrovaná volba rozsahů času – SEC/DIV.

- 6) Vzorkovač a - A/D převodník – převedení analogového signálu na digitální. Rychlost převodu se udává jako rychlost vzorkování, většinou v milionech vzorků/sekundu.
- 7) Číslicová paměť – ukládání měřeného děje pro zpracování mikroprocesorem.
- 8) CPU – mikroprocesor – digitální zpracování měřeného signálu.
- 9) Vstup a výstup – ukládání dat a spojení s počítačem.
- 10) Klávesnice – volba funkcí – ovládací menu.
- 11) Displej – obrazovka. Obvyklé rastrové dělení pro analogový odečet hodnot času a napětí.
- 12) Kalibrační výstup – zdroj kalibrovaného výstupního napětí. Jedná se o přesné napětí symetrického obdélníkového průběhu. Slouží ke kompenzaci sondy.

Pro připojení osciloskopu k měřeným obvodům je přístroj vybavený osciloskopickou sondou. Jedná se o běžné příslušenství a je třeba používat sondy, které patří k přístroji. Sonda obsahuje odporový dělič 1:1 a 1:10. Pro přesné měření je nutné provést impedanční přizpůsobení – kompenzaci - pro vstupy konkrétního osciloskopu. Pro toto měření využíváme výstup kalibračního napětí. Na sondě přepneme dělič na 10:1 a kompenzaci provedeme kapacitním trimrem tak, aby zobrazovaný průběh byl přesně obdélníkový.

Obr. 79 - Příklad čelního panelu „běžného“ digitálního osciloskopu



Orientační popis některých spínačů čelního panelu:

Displej - „klasické“ dělení rastru, v dolní části doplňkové zobrazení rozsahu V/dílek a Time/dílek, v pravém sloupku jsou symboly zapnutých funkcí v menu.

USB konektor – možnost připojení USB flash disku pro kopírování a ukládání průběhů na obrazovce.

F1 – F5 – tlačítka pro volbu funkcí ve zvoleném menu.

CH1, CH2 – tlačítka pro spínání ovládání obou kanálů. Tlačítkem OFF je možné zvolený kanál na displeji vypnout a opět zapnout.

Measure – tlačítko pro zapnutí funkcí pro numerické měření hodnot zobrazených průběhů.

Displej – tlačítko pro zapnutí funkcí pro nastavení displeje.

Storage – zapnutí funkce pro zálohování měřeného děje.

Auto (autoscale) – asi „nejdůležitější“ a nejpoužívanější tlačítko. Po sepnutí se osciloskop automaticky pokusí nastavit na přivedený signál.

RUN/STOP – tlačítko pro zastavení a opětné spuštění měření děje na displeji. Používáme pro snazší prohlédnutí měřených stop.

Tyto uvedené a ostatní předvolby je možné dále rozšířit a ovládat tlačítky F1 – F5, podle postupně zobrazovaných symbolů v pravém sloupku displeje.

BNC konektory CH1 a CH2 – vstupní konektory pro připojení měřicích kabelů – osciloskopických sond.

BNC konektor EXT TRIG – vstup pro připojení vnějšího (externího) spouštění časové základny. Vnitřní časová základna běží, ale je synchronizována na externí signál přivedený na EXT TRIG.

PROBE COMP konektor – výstup pravoúhlého kalibračního signálu.

VOLTS/DIV – ruční volba rozsahů vstupních napěťových děličů. Jednotlivé kanály je třeba předvolit tlačítky CH1 a CH2.

SEC/DIV - ruční volba rozsahu časové základny.

Position – posuv stop svisle a vodorovně.

LEVEL – spouštění („zastavení děje“). Úroveň spuštění časové základny.

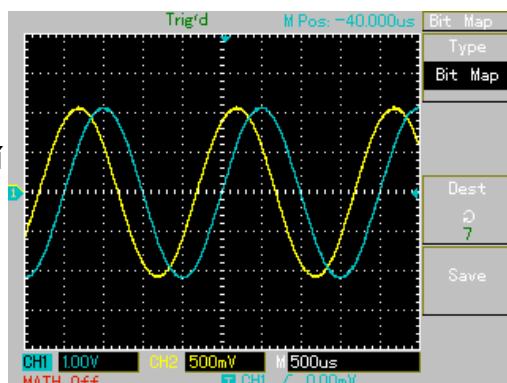
Na zadním panelu je umístěn další USB konektor pro spojení osciloskopu s počítačem.

Digitální osciloskop má velmi mnoho funkcí a jeho ovládání je nutné „zažít“. Je třeba podrobně prostudovat ovládací návod a potom trpělivě vyzkoušet požadované

funkce. Měření s těmito přístroji umožňuje získat pohodlněji větší objem informací o měřeném stavu v obvodu. Oproti analogovému přístroji brzy zjistíme, že stopa není plynulá, hladká, ale že je vyobrazená z „obdélníčků“ - vektorů. Ve většině případů to nevadí. Tento jev je možné částečně odstranit průměrováním průběhu.

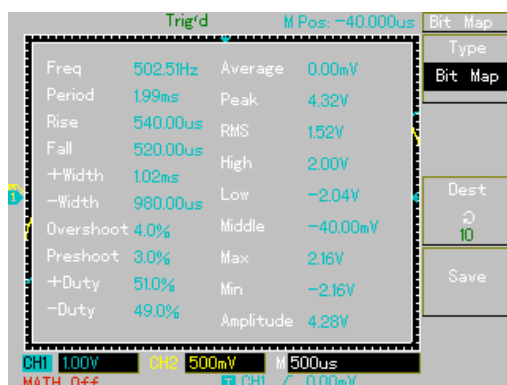
Následující obrázky jsou příkladem zkopírování dějů a naměřených hodnot na USB Flash disk.

Obr. 80 - Příklad měření v režimu XT

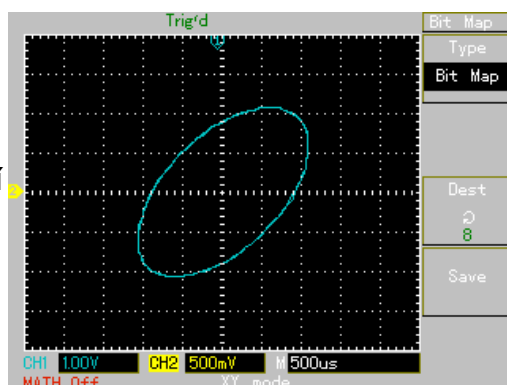


„Klasické“ zobrazení měřených napětí obou kanálů. Na vodorovné ose (x) měříme čas periody, na svislé ose (y) měříme napětí. Rozsahy děličůDIV jsou uvedeny na spodní části displeje, takže je možné „analogicky“ odečíst hodnoty z rastru obrazovky. Kanál (vstup) CH1 je vykreslený modře, kanál (vstup) CH2 je žlutý.

Obr. 81 - Příklad numerického měření - kanál CH1

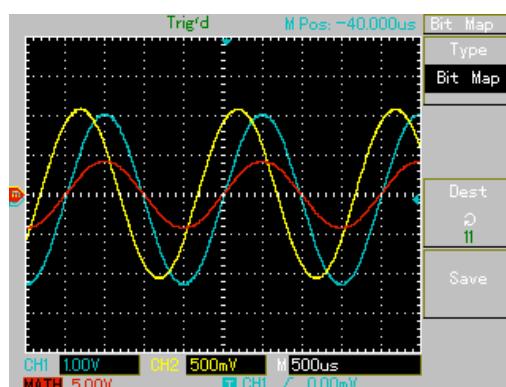


Obr. 82 - Příklad měření v režimu XY

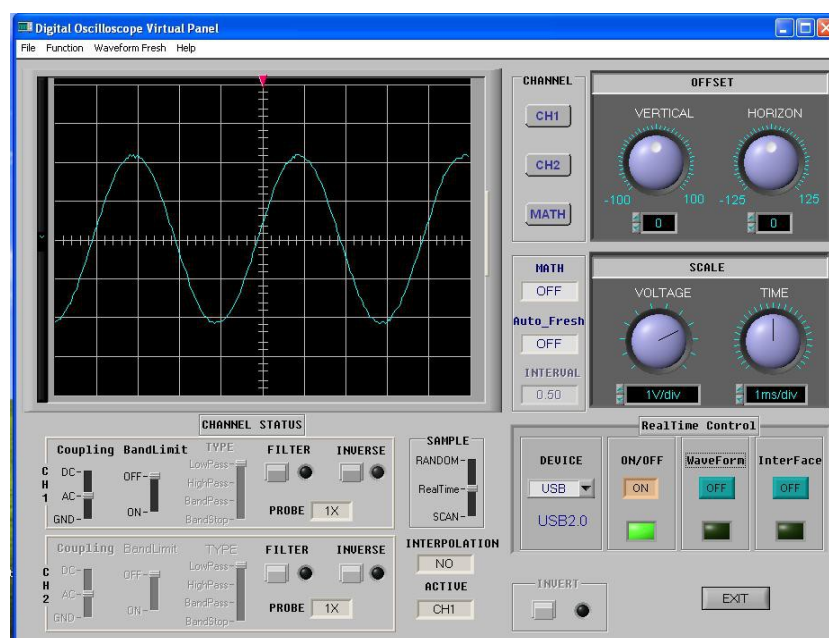


V tomto režimu je vypnutá časová základna. Obě osy se ovládají voliči VOLTS/DIV. Toto měření se používá pro odečtení fázového posunu obou stop.

Obr. 83 - Příklad využití funkce „MATH“



Obr. 84 - Příklad propojení osciloskopu s počítačem



9. Ověřování rozsahů měřicích přístrojů

Jedná se o činnost, při které zjišťujeme, zda konkrétní měřicí přístroj stále splňuje podmínky přesnosti dané výrobcem. Podle **metrologického řádu** by se měřicí přístroje ve výrobě měly ověřovat minimálně jednou za dva roky. Je-li přístroj využíván stále, může být požadavek na kontrolu ještě častější – každoroční.

Pro kontrolní měření se používají přesné – normálové – laboratorní přístroje. Přesnost těchto přístrojů by měla být alespoň 4x lepší než je přesnost kontrolovaného přístroje.

Měření se musí provádět na speciálních pracovištích – **v kalibračních střediskách**. Tyto pracoviště musí být pro tyto účely vybavené přístroji a zařízením, které odpovídají svou přesností **etalonům 2. řádu**. Na pracovišti musí být konstantní teplota, vlhkost, měření nesmí být ovlivňované jakýmkoli vnějšími vlivy (otřesy, vnější magnetické pole atd.).

Ověřovací měření se musí provést minimálně v šesti bodech rozsahu. Přístroje musí být zahřáté na provozní teplotu. Kontrolní měření provádíme vzestupně a sestupně. Na měřeném přístroji přesně nastavujeme hodnotu veličiny a na normálovém přístroji zaznamenáváme skutečnou, přesnou, hodnotu. Rozdílem těchto hodnot vypočítáme **absolutní chybu**.

Absolutní chyba – Δ = naměřená hodnota – skutečná (normálová) hodnota.

Jestliže převrátíme polaritu absolutní chyby, vypočítáme **korekci (opravu)**. Absolutní chyba a korekce tedy mají opačnou polaritu.

Korekce = - Δ

Hodnotu korekce lze také přepočítat na %.

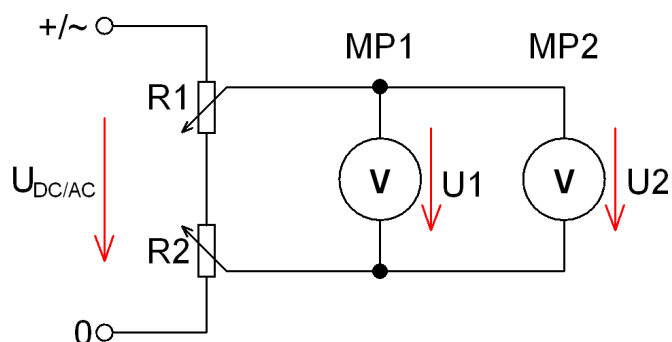
Korekci vypočítáme pro jednotlivé body měření a zaneseme do grafu. Jednotlivé body spojíme čarou a tím vznikne tzv. **korekční křivka**. Na grafu pak vyznačíme největší hodnotu korekce a porovnáme s přesností přístroje.

Relativní chyba pak bude:
$$\delta = \frac{-\Delta_{\text{MAX}}}{\text{Rozsah}} \cdot 100 \text{ (\% , jednotka)}$$

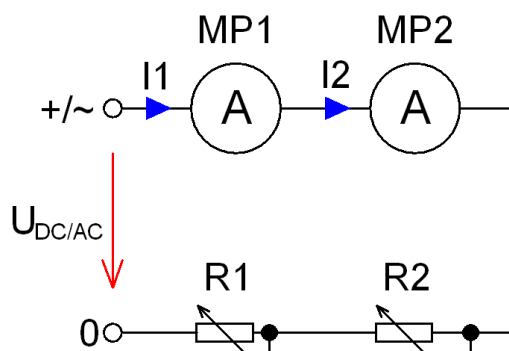
9.1. Principy ověření měřicích přístrojů

Podmínkou je kvalitní napájecí zdroj. Napětí musí být stabilní a nesmí kolísat. Regulační potenciometry musí být dimenzované na odpovídající výkonovou ztrátu. Pro jemnější regulaci je výhodné použít různé hodnoty odporu, např. R2 má odpor 10 x nižší než R1. V obou obvodech je přístroj MP1 normálový a přístroj MP2 ověřovaný.

Obr. 85 - Princip ověření rozsahu voltmetru



Obr. 86 - Princip ověření rozsahu ampérmetru

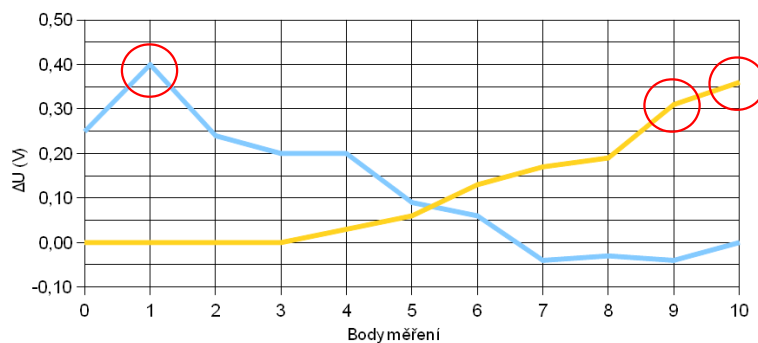


Tabulka 11 - Příklad ověření rozsahu voltmetru

MĚŘENÍ	U1 [V]	U2 [V]	-ΔU [V]	U1 [V]	U2 [V]	-ΔU [V]
0	0	0	0,00	10	10	0,25
1	1	1	0,00	9	9,40	0,40
2	2	2	0,00	8	8,24	0,24
3	3	3	0,00	7	7,20	0,20
4	4	4,03	0,03	6	6,20	0,20
5	5	5,06	0,06	5	5,09	0,09
6	6	6,13	0,13	4	4,06	0,06
7	7	7,17	0,17	3	2,96	-0,04
8	8	8,19	0,19	2	1,97	-0,03
9	9	9,31	0,31	1	0,96	-0,04
10	10	10,36	0,36	0	0	0

Červeně vyznačená pole – překročené max. odchylky.

Obr. 87 - Příklad grafu kalibrační křivky:

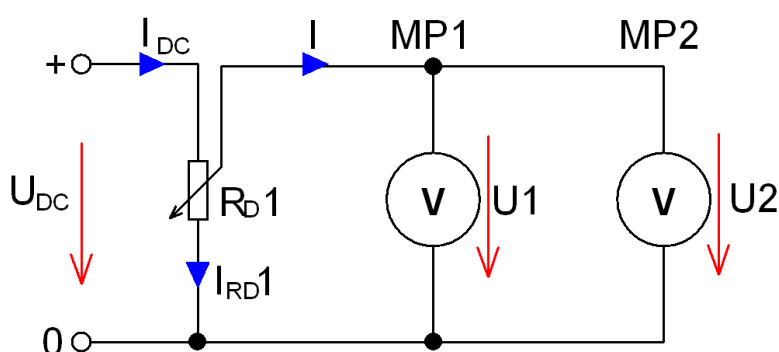


9.2. Praktická úloha- princip ověření rozsahu měřicího přístroje

Cíl měření: Na 2 měřicích přístrojích PU 500 ověřte rozsah pro měření stejnosměrného napětí, např. 3 V. Rovnoměrně rozložte měřené body stupnice, v tomto případě 7 (á 0,5 V). Výsledky měření zapište do tabulky. Sestrojte korekční křivky pro měřené rozsahy obou přístrojů. Na křivkách vyznačte největší korekce a porovnejte s třídou přesnosti přístroje. V závěru vyhodnoťte výsledky měření.

Schéma zapojení obvodu:

Obr. 88 – Zkušební obvod



Měřicí prostředky: Zdroj U_{DC} , potenciometr R_{D1} - 2k2/2W, MP1 – PU 500, MP2 – CM 2703 (uvažovaný jako normálový), spojovací materiál.

Postup měření:

- 1) Výběr přístrojů, výpočet chyby.
- 2) Podmínky pro použití potenciometru.
- 3) Zapojení obvodu.
- 4) Postupné měření a zápis do tabulek.
- 5) Výpočet korekcí.
- 6) Konstrukce grafů.
- 7) Vyhodnocení výsledků měření z hlediska cíle.

Vzorce a výpočty:

Analogový přístroj (PU 500) - třída přesnosti – 2,5.

Relativní chyba - $\delta = 2,5 \%$.

Pro rozsah 3V bude absolutní chyba – $\Delta U_{3V} = \frac{3}{100} \cdot 2,5 = 0,075 \text{ V} = \pm 75 \text{ mV}$.

U digitálního přístroje (CM 2703) pro tuto úlohu musíme předpokládat normálovou přesnost.

Absolutní chyba měření $\Delta U = \text{nastavená hodnota} - \text{skutečná (přesná)} = U1 - U2$
korekce chyby měření $-\Delta U = - (U1 - U2)$ - opačná hodnota absolutní chyby

Tabulka 12 - Podmínky pro použití potenciometru 2k2 / 2 W

R (Ω)	P (W)	I _{DC} (A)	U _{DCMAX} (V)	I _{RD1} (A)	I (A)
2200	2	0,030	24	0,011	0,019

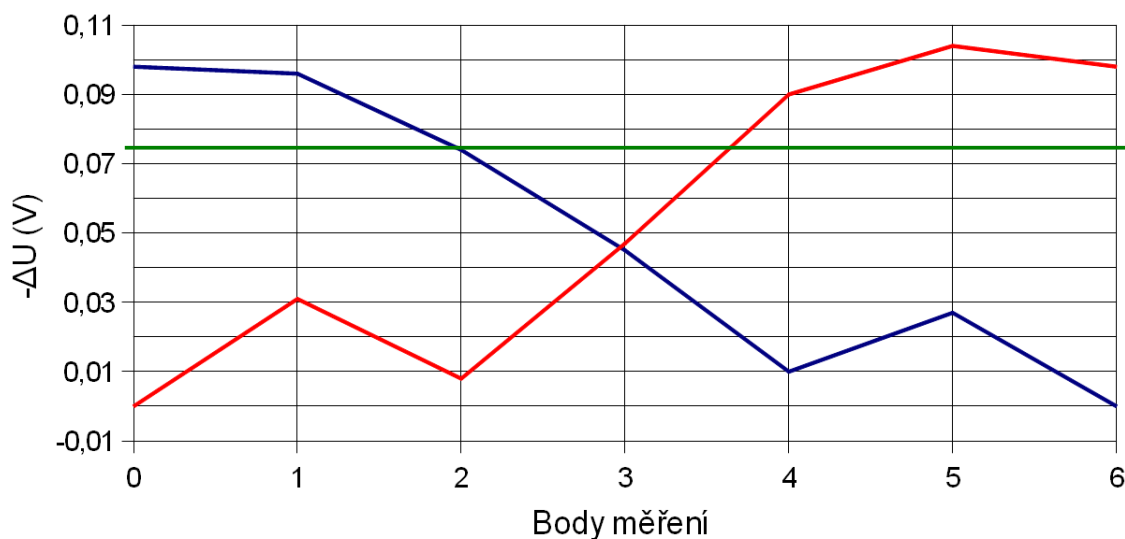
Z tabulky je patrné, že pro měřicí obvod můžeme počítat z proudem $I < 19 \text{ mA}$. A to je dostačující, protože spotřeby obou voltmetrů lze zanedbat.

Tabulky měření a grafy:

Tabulka 13 - měření 1.

MĚŘENÍ	VZESTUPNĚ			SESTUPNĚ		
	U1 [V]	U2 [V]	- ΔU [V]	U1 [V]	U2 [V]	- ΔU [V]
0	0,0	0,000	0,000	3,0	3,098	0,098
1	0,5	0,531	0,031	2,5	2,596	0,096
2	1,0	1,008	0,008	2,0	2,074	0,074
3	1,5	1,547	0,047	1,5	1,545	0,045
4	2,0	2,090	0,090	1,0	1,010	0,010
5	2,5	2,604	0,104	0,5	0,527	0,027
6	3,0	3,098	0,098	0,0	0,000	0,000

Obr. 89 - graf korekčních křivek měření 1.

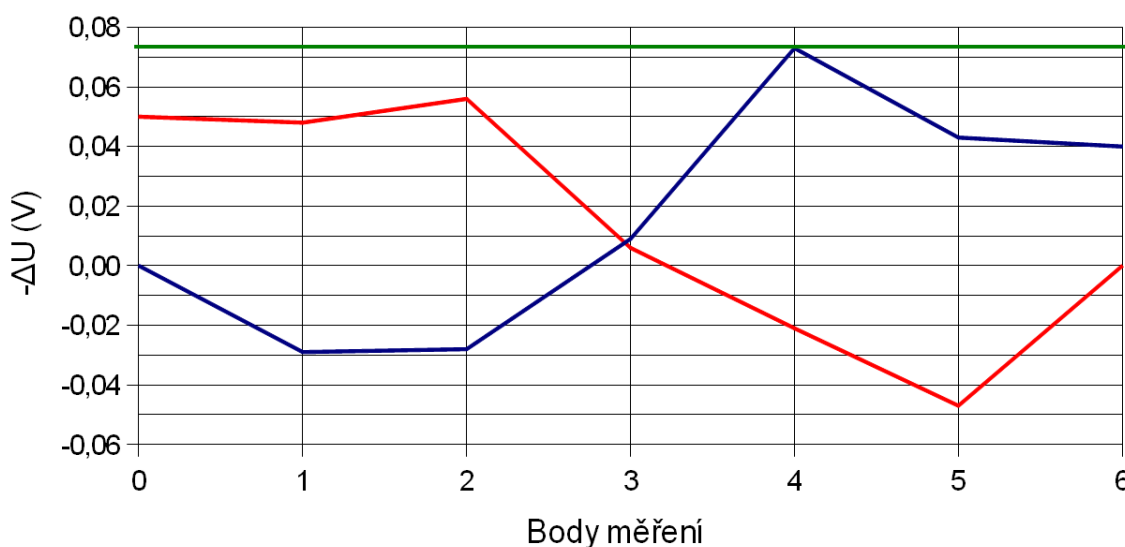


Vezmeme-li v úvahu maximální hodnoty korekce pro tento rozsah, je zřejmé, že v několika bodech měření jsou vyšší hodnoty, než daných $\pm 75 \text{ mV}$. V tabulce jsou tyto hodnoty zvýrazněné červenými poli. Při obou měření se chyba zvětšuje v druhé polovině výchylky. Z toho lze usoudit, že měřicí systém přístroje je v pořádku a že bude možné tento rozsah seřídit.

Tabulka 14 - měření 2.

VZESTUPNĚ				SESTUPNĚ		
MĚŘENÍ	U1 [V]	U2 [V]	-ΔU [V]	U1 [V]	U2 [V]	-ΔU [V]
0	0,0	0,000	0,000	3,0	3,050	0,050
1	0,5	0,471	-0,029	2,5	2,548	0,048
2	1,0	0,972	-0,028	2,0	2,056	0,056
3	1,5	1,509	0,009	1,5	1,506	0,006
4	2,0	2,073	0,073	1,0	0,979	-0,021
5	2,5	2,543	0,043	0,5	0,453	-0,047
6	3,0	3,040	0,040	0,0	0,000	0,000

Obr. 90 - graf korekčních křivek měření 2.



U tohoto přístroje můžeme konstatovat, že vypočítané korekce nejsou větší, než dovolená odchylka ± 75 mV.

Bezpečnost práce: Řídíme se zásadami bezpečného měření v laboratorní učebně.

Závěr:

Podle zadání bylo provedeno ověření rozsahu 3 VDC u dvou analogových přístrojů PU 500. Po vyhodnocení obou tabulek a grafů bylo zjištěno, že u přístroje č.1 jsou povolené hodnoty korekcí překročené a tudíž tento přístroj nesplňuje parametry třídy přesnosti udané výrobcem. Druhý přístroj odpovídá uvedeným hodnotám.

Na pozici MP2 – normálového (přesného) přístroje byl pro toto principiální měření použit digitální multimetr CM 2703. Jeho chyba je proto nezapočítaná.

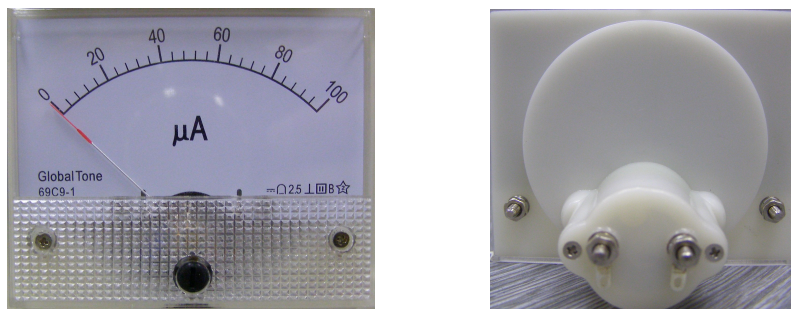
10. Úpravy rozsahů analogového měřicího přístroje

V současné době je možné běžně koupit z analogových měřicích přístrojů pouze magnetoelektrický systém. Uvedenou měřicí soustavu můžeme prakticky použít pro libovolné měření stejnosměrného napětí a proudu, po úpravě i pro střídavé veličiny.

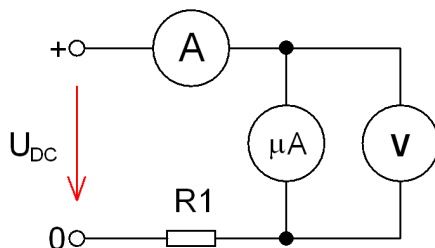
Technické údaje o systému, který chceme použít, by měl vždy udat výrobce. Většinou jsou ale data pro vlastní nastavení neúplná a je nutné provést vlastní měření. Pro nastavení potřebných rozsahů musíme znát hodnoty napětí a proudu při plné výchylce měřicí soustavy a vnitřní odpor. Zjišťujeme tedy napětí U_0 , proud I_0 a vnitřní odpor R_i (vnitřní impedanci Z_i).

Pro měření zmíněných hodnot lze použít volt-ampérovou metodu nebo metodu poloviční výchylky. Měřicí moduly se většinou dodávají se základním rozsahem v řádech μA .

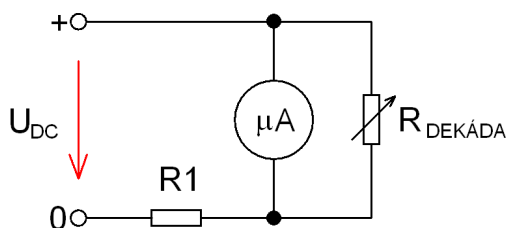
Obr. 91 - Měřicí soustava $100 \mu A$



Obr. 92 - Měření volt-ampérovou metodou



Obr. 93 - Měření metodou poloviční výchylky

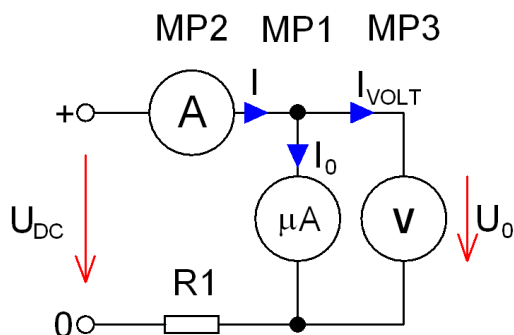


Rezistor R_1 je nutné odvodit podle předpokládané hodnoty proudu při plné výchylce. Je vhodné ho nahradit odporovou dekádou a postupně odpor během měření upravit.

10.1. Praktická úloha – měření základních vlastností měřicí soustavy

Cíl měření: Přeměřte základní vlastnosti samostatné měřicí soustavy. Použijte voltampérovou metodu a metodu poloviční výchylky. Porovnejte obě metody z hlediska dosažené přesnosti.

Obr. 94 - Schéma zapojení obvodu – volt-ampérová metoda



Měřicí prostředky: Zdroj U_{DC} , MP1 – Měřicí modul Global Tone, MP2 a MP3 – Metex M-3890D, rezistor $R1 = 100 \text{ k}\Omega$, spojovací materiál.

Postup měření:

- 1) Výběr přístrojů, výpočet chyby.
- 2) Výpočet rezistoru $R1$.
- 3) Zapojení obvodu.
- 4) Měření napětí U_0 a proudu I_0 .
- 5) Výpočet vnitřní impedance Z_i .

Vzorce a výpočty:

Měřicí modul Global Tone - třída přesnosti – 2,5.
Relativní chyba - $\delta = 2,5 \%$.

Pro předpokládaný rozsah $100 \text{ }\mu\text{A}$ uvažujeme absolutní chybu:

$$\Delta I_{100\mu A} = \frac{100}{100} \cdot 2,5 = 2,5 \text{ }\mu\text{A}$$

U digitálních přístrojů (Metex M-3890D) výrobce udává pro oba rozsahy hodnotu $0,8 \%$ +/- 2 digits.

$$\text{To znamená: } \delta 1 = 0,8 \%, \quad \delta 2 = \frac{2}{4000} \cdot 100 = 0,05 \%$$

$$R1 = \frac{U_{DC}}{I_0} = \frac{10 \text{ V}}{100 \text{ }\mu\text{A}} = 100 \text{ k}\Omega, \text{ stačí minimální výkon – } 0,5 \text{ W}$$

Měření:

Obr. 95 - proud $I_0 = 101,8 \mu\text{A}$



Obr. 96 - napětí $U_0 = 444 \text{ mV}$



Korekce spotřeby voltmetru: $I_{\text{VOLT}} = \frac{0,444}{10 \text{ M}\Omega} = 44,4 \text{ nA}$ (můžeme zanedbat)

Výpočet vnitřního odporu měřicí soustavy: $R_i = \frac{U_0}{I_0} = \frac{0,444}{0,001018} = 4361,5 \Omega$

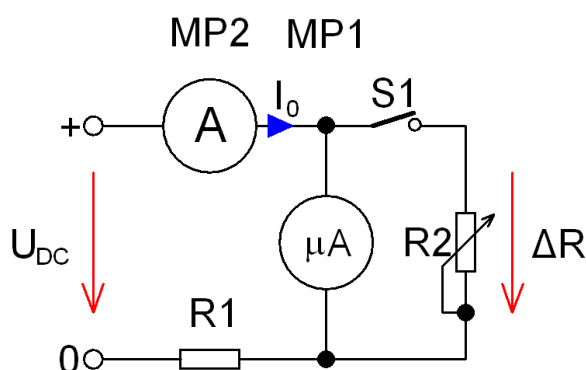
Zápis hodnot (při plné výchylce):

$$I_0 = 101,8 \mu\text{A}$$

$$U_0 = 444 \text{ mV}$$

$$R_i = 4361,5 \Omega$$

Obr. 97 - Schéma zapojení obvodu – metoda poloviční výchylky



Měřicí prostředky: Zdroj U_{DC} , MP1 – Měřicí modul Global Tone, MP2 – Metex M-3890D, rezistor $R_1 = 100 \text{ k}\Omega$, S_1 – vypínač, R_2 – odporová dekáda, spojovací materiál.

Postup měření:

- 1) Výběr přístrojů, výpočet chyby.
- 2) Výpočet rezistoru R1.
- 3) Zapojení obvodu.
- 4) Měření proudu I_0 , plná výchylka, S1 vypnutý.
- 5) Nastavení poloviční výchylky změnou R2, S1 zapnutý.
- 6) Odečet hodnoty impedance Z_1 - dekáda.

Vzorce a výpočty:

Měřicí modul Global Tone - třída přesnosti – 2,5.

Relativní chyba - $\delta = 2,5 \%$.

Odvození hodnoty R1: (jako v předchozím případě)

$$R1 = \frac{U_{DC}}{I_0} = \frac{10 \text{ V}}{100 \mu\text{A}} = 100 \text{ k}\Omega, \text{ stačí minimální výkon – } 0,5 \text{ W}$$

Měření:

1) Při plné výchylce

Obr. 98 - proud I_0

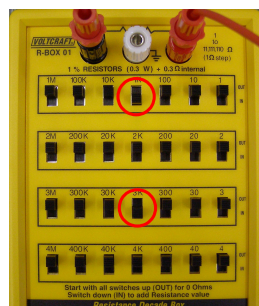


Obr. 99 - modul



2) Při poloviční výchylce

Obr. 100 - dekáda



Obr. 101 - modul



Zápis hodnot (při poloviční výchylce) - Z dekády odečteno: $Z_1 = 4 \text{ k}\Omega$.

Jemnější změna odporu (v řádech 10^1 nebo $10^2 \Omega$) se na výchylce neprojevila.

Při přesnějším přístroji vyjde chyba metody poloviční výchylky lépe než VA metoda.

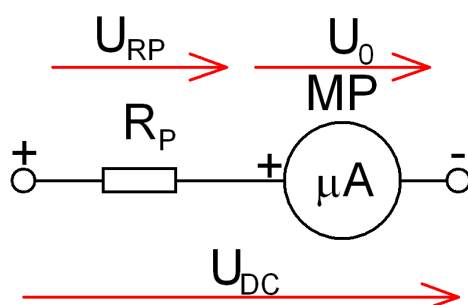
10.2. Analogová měřicí soustava – nastavení rozsahu voltmetru

Tato konstrukce vychází z Kirchhoffova zákona o součtu úbytků napětí v sériovém obvodu. Tímto obvodem protéká proud, který vytváří úbytky napětí na všech součástkách.

Můžeme citovat: „**Součet úbytků napětí na spotřebičích v sériovém obvodu se rovná napětí napájecího zdroje**“.

Sestavu voltmetru tvoří analogová měřicí soustava MP, většinou magnetoelektrická a předřadný rezistor R_P (předřadník), oboje zapojené do série. Měřené napětí U_{DC} se tak rozdělí na dvě hodnoty: úbytek napětí na modulu U_0 a úbytek napětí na předřadníku U_{RP} .

Obr. 102 - Princip analogového voltmetru



Hodnota předřadníku je kritická a ovlivňuje přesnost sestavy zásadním způsobem. Předřadný rezistor nebo kombinace několika rezistorů se dimenzuje podle proudu I_0 a třídy přesnosti měřicí soustavy. Protože v současné praxi má proud I_0 většinou hodnotu $100 \mu A$, vyhovují rezistory s minimální výkonovou ztrátou. Podstatnější je materiál použitých rezistorů. Musí být teplotně stabilní, s maximální dlouhodobou stálostí odporu. Používáme rezistory s kovovou odporovou vrstvou.

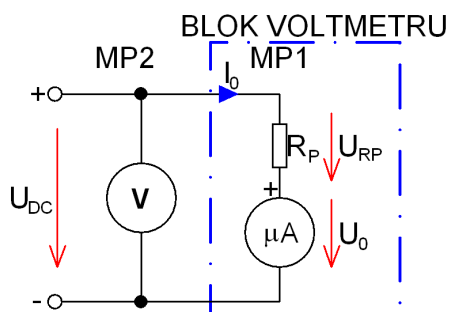
Pro kontrolní měření se používá přesnější přístroj, alespoň 4x, kvůli splnění podmínek kalibrace měřicího přístroje. Rovněž napájecí obvodu je nutné zajistit kvalitním stabilizovaným zdrojem. Pro jemnější regulaci zkušebního napětí je možné zapojit potenciometr jako dělič napětí.

Přesnost nastavení rozsahu voltmetru vychází vždy s třídy přesnosti použité měřicí soustavy. Jestliže nestačí 1 rezistor, pak je nutné sestavu předřadníku složit. Nejpresnější, ale i nejpracnější je sestava z max. 3 rezistorů, které jsou buď v sérii nebo v sérioparalelní kombinaci. Při dostupnosti 0,5 % rezistorů s kovovou vrstvou v řadě E 192 bude většinou stačit jeden. Pro velmi kvalitní přístroje jsou přesné předřadníky navinuté na cívky odporovým vodičem. Sestava předřadníku v případě montáže do pouzdra měřicí soustavy musí být umístěna velmi pevně. Nesmí dojít k uvolnění. Kalibraci nastaveného rozsahu provádíme minimálně v 6 bodech výchylky, vzestupně a sestupně. Korekce nikdy nesmí přesáhnout hodnotu dané absolutní chyby.

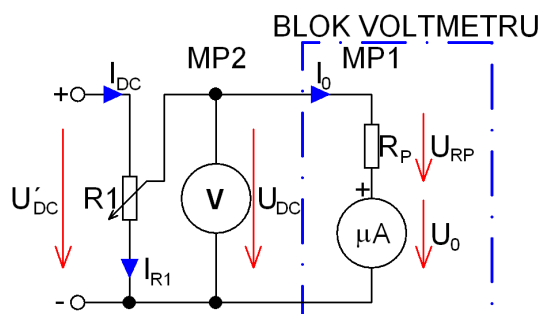
10.3. Praktické měření – nastavení rozsahu voltmetru

Zadání: Analogovou měřicí soustavu upravte pro rozsah 25 V_{DC}. Proveďte měření korekci a sestrojte korekční křivky. Vyhodnoťte přesnost měření.

Schéma zapojení obvodu:



Obr. 103 - Přímé napájení



Obr. 104 - Princip jemné regulace napětí

Měřicí prostředky: MP1 – měřicí soustava Global Tone 69C9-1 (0,4 V, 100 μA, 2,5 %), MP2 – Metex M-3890D, potenciometr R1 – 2k2/2 W, rezistor R_P – předřadník, stabilizovaný zdroj U_{DC} 0- 30 V, spojovací materiál.

Vzorce a výpočty:

$$\text{Výpočet předřadníku: } R_P = \frac{U_{DC} - U_0}{I_0} = \frac{25 - 0,4}{0,0001} = 246\,000\,\Omega$$

Pro předřadník byla vybraná sériová kombinace rezistorů: 220 kΩ + 10 kΩ = 230 kΩ.

Po přeměření: R_P = 244,9 kΩ.

Rozdíl vůči výpočtu: ΔR = 1,1 kΩ, méně než 1 % vypočteného odporu předřadníku.

Pro přímé napájení potenciometr nebyl zapojený. V případě použití je nutné spočítat max. proud I_{DC} a posoudit, zde je možné uvažovaný potenciometr použít.

$$I_{DC\,MAX} = \sqrt{\frac{P}{R}} = \sqrt{\frac{2}{2200}} = 30\,\text{mA}$$

$$\text{Pro uvažovaný zdroj } U_{DC} \text{ platí: } I_{R1} = \frac{U_{DC\,MAX}}{R} = \frac{30}{2200} = 14\,\text{mA}$$

Pro proud I₀ je možná hodnota až I_{DC MAX} – I_{R1} = 30 - 14 = 16 mA.

Hodnota výstupního proudu je dostatečná.

Výpočet korekce – ΔU = - (U_{MP1} – U_{MP2})

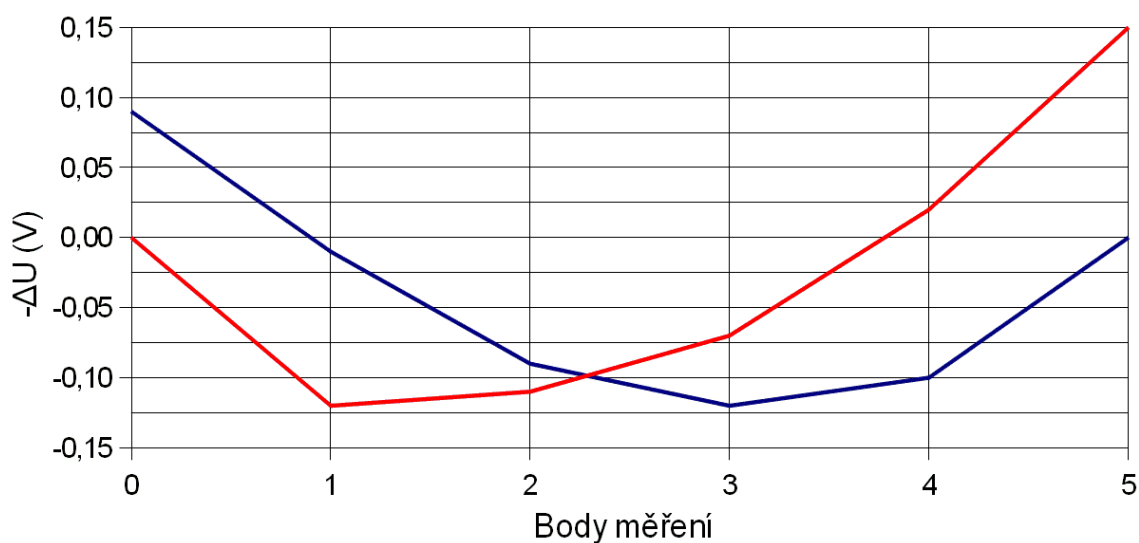
Absolutní chyba MP1 – rozsah 25 V: $\Delta U = \frac{\text{Rozsah}}{100} \cdot \delta = \frac{25}{100} \cdot 2,5 = \pm 625 \text{ mV}$

Měření:

Tabulka 15 - měření korekcí

MĚŘENÍ	VZESTUPNĚ			SESTUPNĚ		
	U1 [V]	U2 [V]	-ΔU [V]	U1 [V]	U2 [V]	-ΔU [V]
0	0	0	0	25	25,09	0,09
1	5	4,88	-0,12	20	19,99	-0,01
2	10	9,89	-0,11	15	14,91	-0,09
3	15	14,93	-0,07	10	9,88	-0,12
4	20	20,02	0,02	5	4,90	-0,10
5	25	25,15	0,15	0	0	0

Obr. 105 - Graf



Bezpečnost práce: Dodržovat zásady a normy bezpečné práce v laboratoři.

Závěr: Nastavený rozsah parametrů výrobce a zadání vyhovuje.

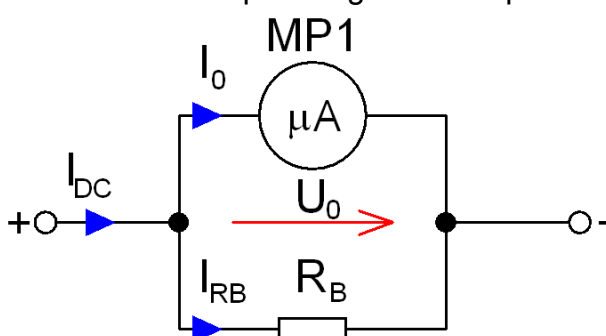
10.4. Analogová měřicí soustava – nastavení rozsahu ampérmetru

Tato konstrukce vychází z Kirchhoffova zákona o dělení proudů v paralelním obvodu. Celkový proud se v uzlech dělí do obou větví podle hodnot odporu.

Citujeme: „**Součet proudů do uzlu přitékající se rovná součtu proudů z uzlu odtékající.**“

Ampérmetr je sestavený z analogové magnetoelektrické soustavy a paralelního rezistoru – bočnicku R_B . Měřený proud I_{DC} se rozdělí na proud tekoucí bočníkem – I_{RB} a proud, který prochází měřicí soustavou MP1 – I_0 . V uzlech soustavy je napětí U_0 .

Obr. 106 - Princip analogového ampérmetru



Podobně jako u voltmetru samozřejmě zásadně záleží na přesnosti hodnoty bočnicku R_B . Závisí na něm spolu s přesností měřicí soustavy celková chyba ampérmetru. Bočník se musí pečlivě dimenzovat na velikost měřeného proudu I_{RB} . Důležitý je materiál použitých rezistorů. Musí být stabilní i při vyšších teplotách. Pro menší proudy vyhoví rezistory s metaloxidovou odporovou vrstvou, pro větší proudy se používá odporový drát nebo pásek z konstantanu či manganinu. Konstantan je slitina niklu a mědi s velmi malým teplotním součinitelem odporu.

Jako pro každé kontrolní měření i pro tuto úlohu se používá přesnější přístroj, alespoň 4x, kvůli splnění podmínek kalibrace měřicího přístroje. Pro naše ověřovací měření se tato podmínka plní pro měření ampérmetru obtížně. Běžné multimetry totiž potřebnou přesnost proudových rozsahů většinou nemají. Pro ověření principu ampérmetru to ale stačí. Napájení obvodu je nutné zajistit kvalitním stabilizovaným zdrojem, výstupní napětí nesmí kolísat v důsledku většího proudového odběru. Proměnný odpor, který můžeme použít pro jemnější regulaci zkušebního proudu, musí být vždy dostatečně dimenzovaný na hodnotu měřeného proudu. V praxi se používají posuvné výkonové rezistory – reostaty.

Obr. 107 - Ukázky bočníků

$I = 1A$



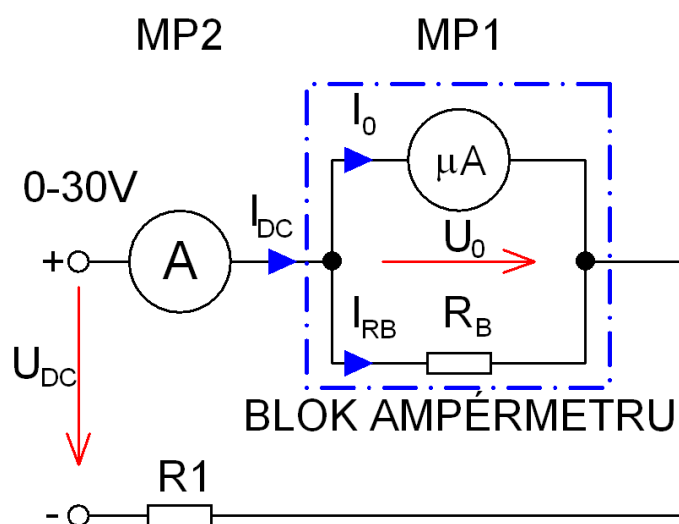
$I = 10A$



10.5. Praktické měření – nastavení rozsahu ampérmetru

Zadání: Analogovou – magnetoelektrickou - měřicí soustavu upravte pro proudový rozsah $I_{DC} = 250 \text{ mA}$. Proveďte měření korekcí a sestrojte korekční křivky. Vyhodnoťte přesnost měření.

Obr. 108 - Schéma zapojení obvodu:



Měřicí prostředky: MP1 – měřicí soustava Global Tone 69C9-1 (0,4 V, 100 μA , 2,5 %), MP2 – Metex M-3890D, rezistor R_B – bočník, zatěžovací výkonový rezistor R_1 – 82 Ω /10 W, stabilizovaný zdroj U_{DC} 0- 30 V, spojovací materiál.

Vzorce a výpočty:

$$\text{Výpočet bočníku: } R_B = \frac{U_0}{I_{DC} - I_0} = \frac{0,4}{0,25 - 0,0001} = 1,60 \, \Omega$$

$$\text{Výkonová ztráta: } P_{RB} = R_B \cdot I_{DC}^2 = 1,6 \cdot 0,25^2 = 0,1 \text{ W}$$

Pro sestavu bočníku byla vybrána paralelní sestava 3 ks rezistorů 4,7 Ω /0,5 W.

$$\text{Výpočet zatěžovacího rezistoru: } R_1 = \frac{U_{DC}}{I_{DC}} = \frac{20}{0,25} = 80 \, \Omega$$

$$\text{Výkonová ztráta: } P_{R1} = R_1 \cdot I_{DC}^2 = 80 \cdot 0,25^2 = 5 \text{ W}$$

Z odporové řady vybereme 82 Ω /10 W.

Výpočet korekce – $\Delta I = - (I_{MP1} - I_{MP2})$

Absolutní chyba MP1:

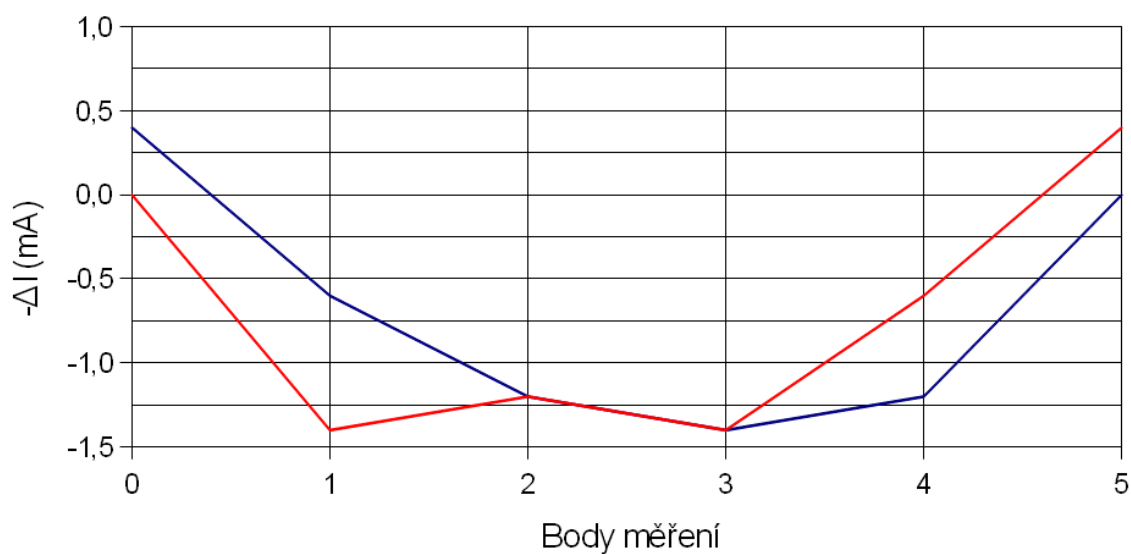
$$\text{– rozsah 250 mA: } \Delta I = \frac{\text{Rozsah}}{100} \cdot \delta = \frac{250}{100} \cdot 2,5 = \pm 6,25 \text{ mA}$$

Měření:

Tabulka 16 - měření korekcí

	VZESTUPNĚ			SESTUPNĚ		
MĚŘENÍ	I1 [mA]	I2 [mA]	-ΔI [mA]	I1 [mA]	I2 [mA]	-ΔI [mA]
0	0	0	0	250	250,40	0,40
1	50	48,60	-1,40	200	199,40	-0,60
2	100	98,80	-1,20	150	148,80	-1,20
3	150	148,60	-1,40	100	98,60	-1,40
4	200	199,40	-0,60	50	48,80	-1,20
5	250	250,40	0,40	0	0	0

Obr. 109 - Grafy



Bezpečnost práce: Dodržovat zásady a normy bezpečné práce v laboratoři.

Závěr: Nastavený rozsah parametrů výrobce a zadání vyhovuje.

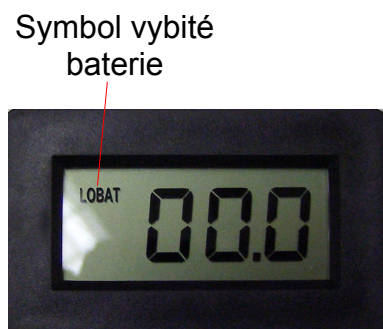
11. Úpravy rozsahů digitálního měřicího přístroje

Pro měření elektrických veličin se v současné době, téměř výhradně, používají měřicí přístroje s analogově - digitálním převodníkem – soustavy DMM – s 3 a 1/2 místným displejem. Tyto přístroje nahrazují analogové měřicí soustavy. Odečet elektrické veličiny s displeje je samozřejmě pohodlnější. Nastavení digitálního modulu se pro stejnosměrné měření provádí podobným způsobem. I u těchto modulů je nutná úprava pro měření střídavých veličin.

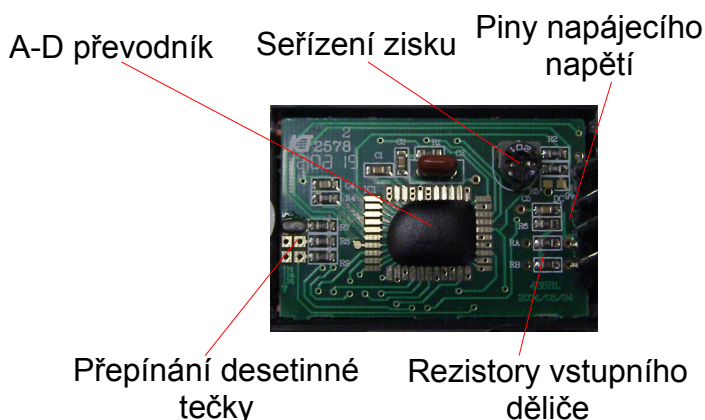
Technické parametry systému vždy udává výrobce příbalovém letáčku. U dostupných DMM se jedná o napětí základního rozsahu – $U_0 = 200 \text{ mV}$. Další údaj je o velikosti vnitřního – vstupního – odporu (impedance). Zpravidla je udáván údaj $Z_i > 100 \text{ M}\Omega$. Proto proud I_0 , tekoucí do měřicího modulu, je minimální. Přesnost modulu bývá do 0,5 %.

Pro kontrolu je možné provést vlastní kontrolní měření, např. při poloviční výchylce systému (100 mV). Ověřujeme tedy základní napětí 200 mV. Přesnější přístroj se v praxi obstará obtížně, většina multimetrů dosahuje chyby do 1 %. Pro tento účel ale vyhoví.

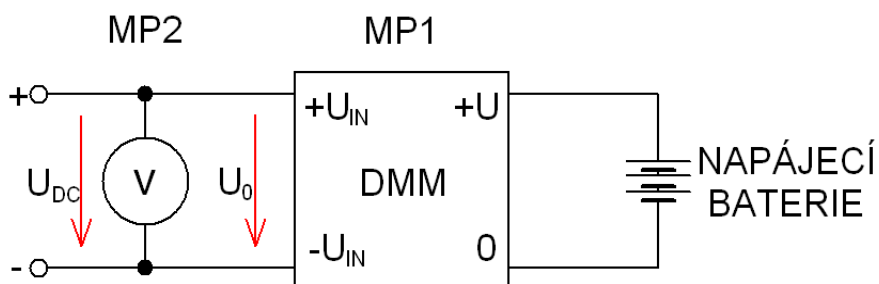
Obr. 110 - čelní panel DMM



Obr. 111 - zadní strana DMM



Obr. 112 - Ověření napětí U_0



Obr. 113 - Přepínání desetinné tečky



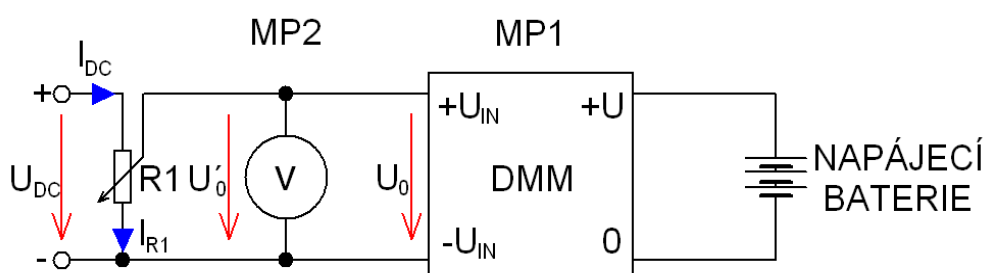
11.1. Praktická úloha – princip přeměření parametrů digitálního měřidla

Cíl měření: Přeměřte hodnotu základního napětí U_0 digitálního 3 ½ místného měřidla. Podle naměřených parametrů seřadte zisk.

Postup měření:

- 1) Výběr přístrojů, výpočet chyby.
- 2) Ověření zatížení rezistoru R1.
- 3) Zapojení obvodu.
- 4) Postupné přeměření hodnot U_0 - tabulka.
- 5) Výpočet korekce.
- 6) Výpočet absolutní chyby digitálního měřidla M850G.
- 7) Zápis do tabulky, graf korekcí.
- 8) Vyhodnocení.

Obr. 114 - Schéma zapojení obvodu



Měřicí prostředky: Měřicí přístroje – MP1 – panelové 3 ½ místné měřidlo G850M, MP2 – multimetr Mastech MY-64, potenciometr 2k2/2 W, baterie 9 V, zdroj U_{DC} , spojovací materiál.

Výrobce u panelového DMM udává chybu 0,5 % + 1 digit na základním rozsahu 200 mV, vstupní impedanci $Z_I > 100 \text{ M}\Omega$. Pro kontrolní měření je tedy obtížné najít vhodný přístroj. Pro informativní měření byl vybrán multimetr Mastech MY-64, který na rozsahu 200 mV má chybu 0,5 % + 1 digit. Je tedy alespoň na stejné úrovni.

Měření: (při poloviční hodnotě)

Obr. 115 - MP1 - G850M



$$U_0 = 100 \text{ mV}$$

Obr. 116 - MP2 -Mastech MY-64



$$U'_0 = 100,2 \text{ mV}$$

Vzorce, výpočty:

MP1 - Měřicí modul G850M: udáno 0,5 % + 1, to je:

$$\delta_1 = 0,5 \%, \delta_2 = \frac{1}{2000} \cdot 100 = 0,05 \%$$

Absolutní chyba naměřené hodnoty MP1:

$$\Delta U_0 = \frac{\text{Hodnota}}{100} \cdot \delta_1 + \frac{\text{Rozsah}}{100} \cdot \delta_2$$

Výpočet korekce: - ($U_0 - U'_0$)

Tabulka:

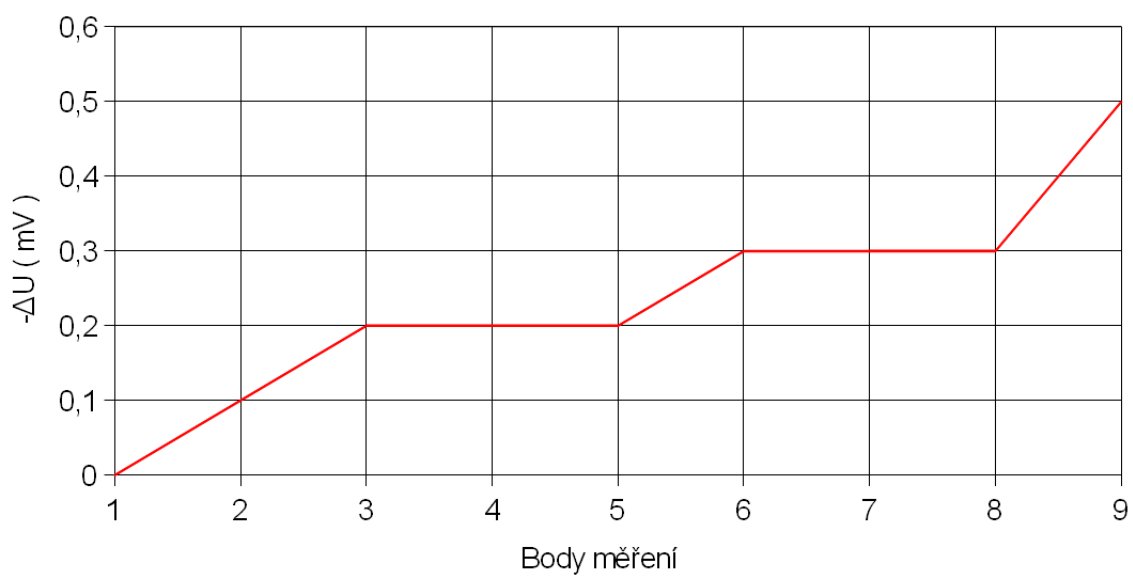
Tabulka 17 - ověření základního rozsahu 200 mV

Měření		1	2	3	4	5	6	7	8	9
G850M	U_0 (mV)	0	25	50	75	100	125	150	175	199
MY-64	U'_0 (mV)	0	25,1	50,2	75,2	100,2	125,3	150,3	175,3	199,5
korekce	$-\Delta U$ (mV)	0	0,1	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,5

ΔU_0 MP1 (mV)	0	0,225	0,35	0,475	0,6	0,725	0,85	0,975	1,095
-------------------------	---	-------	------	-------	-----	-------	------	-------	-------

Graf:

Obr. 117 - Korekční křivka



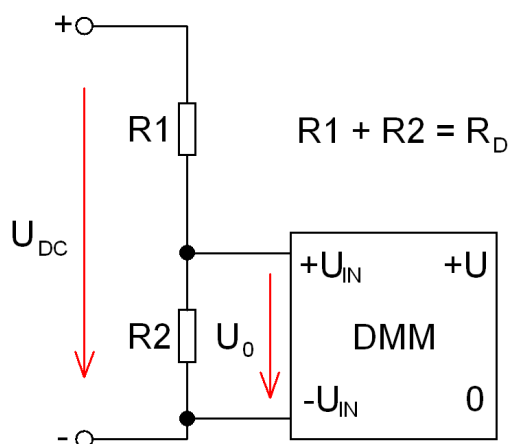
Závěr: Naměřené hodnoty odpovídají parametrům výrobce. Hodnoty korekcí nejsou vyšší, než absolutní chyby jednotlivých napětí. Zisk není třeba upravovat.

11.2. Panelový digitální měřicí modul – nastavení rozsahu voltmetru

Pro tuto konstrukci je nutné využít vstupní dělič napětí, s konstantním celkovým odporem. V praxi se používá hodnota 10 M Ω . Je to nutné, protože vnitřní odpor samotného modulu je velmi velký. Proto nejde využít sériové zapojení předřadného rezistoru a měřidla, podobně jako u analogového přístroje.

Tento voltmetr tvoří vstupní dělič R1 + R2 a digitální měřicí panelový 3 ½ místný modul s nezávislým napájením. Odpor děliče R_D je v současné praxi nastavený na hodnotu **10 M Ω** a napětí modulu U₀ = **200 mV**. Měřené napětí U_{DC} se tak rozdělí podle poměru odporového děliče na dvě hodnoty. Úbytek napětí na rezistoru R1 – pro modul U₀ a úbytek napětí na rezistoru R1.

Obr. 118 - Princip digitálního voltmetru



Pro návrh platí: $U_{DC} : U_0 = R_D : R2$

Při volbě rozsahů je důležité dodržet pravidlo, že hodnoty napětí musí dekadické násobky základního napětí U₀ (2V, 20V, 200V atd.).

Hodnoty rezistorů R1 a R2 musí být vybrané s požadovanou přesností. Určují spolu s měřicím modulem přesnost celé sestavy. Navíc se obtížněji skládají, protože hodnoty mohou být např. 9M9, 9M99 atd. Většinou se podaří pečlivý a trpělivý výběr z běžných 5% rezistorů s kovovou vrstvou z odporové řady 1, (10M, 1M, 100k atd.). Proud děličem má velmi malou hodnotu a tak stačí rezistory s minimální výkonovou ztrátou.

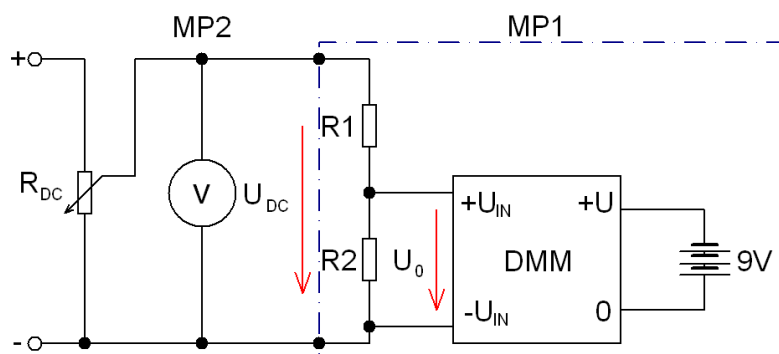
Pro kontrolní měření se většinou v běžné dílně musí použít přístroj podobné kvality. Napájení obvodu musí být provedenou kvalitním stabilizovaným zdrojem. Lze použít potenciometr jako jemný dělič napětí.

Ověření nastaveného rozsahu výrobci doporučují při poloviční výchylce. Případnou odchylku lze upravit opravou zisku příslušným trimrem. Kvalitnější kontrolu nastaveného rozsahu provádíme v 10 bodech výchylky. Korekce nikdy nesmí přesáhnout hodnotu dané absolutní chybou měřené hodnoty.

11.3. Praktické měření – nastavení rozsahu digitálního voltmetru

Zadání: Panelové digitální 3 ½ místné měřidlo nastavte na rozsah $U_{DC} = 20 V_{DC}$. Dodržte přesnost do 1 % + 1 dig. Proveďte měření korekcí a sestrojte korekční křivku. Vyhodnoťte přesnost měření.

Obr. 119 - Schéma zapojení obvodu



Měřicí prostředky: MP1 – panelové 3 ½ místné měřidlo G850M (0,5 % +1), baterie 9 V, MP2 – Metex M-3890D (0,8 % + 2) , potenciometr R1 – 2k2/2 W, rezistory děliče R1 a R2, stabilizovaný zdroj U_{DC} 0 – 30 V, spojovací materiál.

Poznámka: protože MP2 Metex má podobnou přesnost – použijeme jej pouze pro vyzkoušení principu.

Vzorce a výpočty:

Výpočet děliče: Vycházíme z vnitřního odporu voltmetru $R_i = 10 M\Omega$ a základního napětí MP1 $U_0 = 200 mV$.

Poměr děliče: $U_{DC} : U_0 = (R1 + R2) : R2 = 20 : 0,2 = 10\,000\,000 : R2$

$$\text{Rezistor } R2 = \frac{0,2 \cdot 10\,000\,000}{20} = 100\,000 \, \Omega = 100 \, k\Omega$$

$$\text{Rezistor } R1 = (R1 + R2) - R2 = 10\,000\,000 - 100\,000 = 9\,900\,000 \, \Omega = 9,9 \, M\Omega$$

Oba rezistory byly vybrány měřením z rezistorů 100 k Ω a 10 M Ω , s chybou do 1 %.

Bylo zapojeno přímé napájení ze zdroje. Potenciometr byl v tomto případě vynechán, vyhovuje přímá regulace napětí zdroje.

Výpočet korekce – $\Delta U = - (U_{MP1} - U_{MP2})$

Odvození přesnosti MP1 a MP2:

$$\text{Chyba čtení} - \delta_1, \text{ chyba z rozsahu} - \delta_2 = \frac{\text{chyba digitů}}{\text{celkem digitů}} \cdot 100 \, (\text{vše v \%})$$

Absolutní chyba naměřené hodnoty MP1 a MP2:

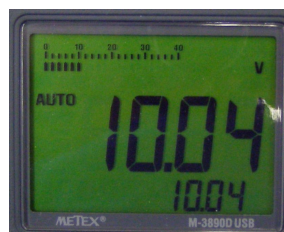
$$\Delta U = \frac{\text{Hodnota}}{100} \cdot \delta_1 + \frac{\text{Rozsah}}{100} \cdot \delta_2$$

Měření: Kontrolní nastavení při poloviční hodnotě – 10 V

Obr. 120 - modul MP1



Obr. 121 - M-3890D

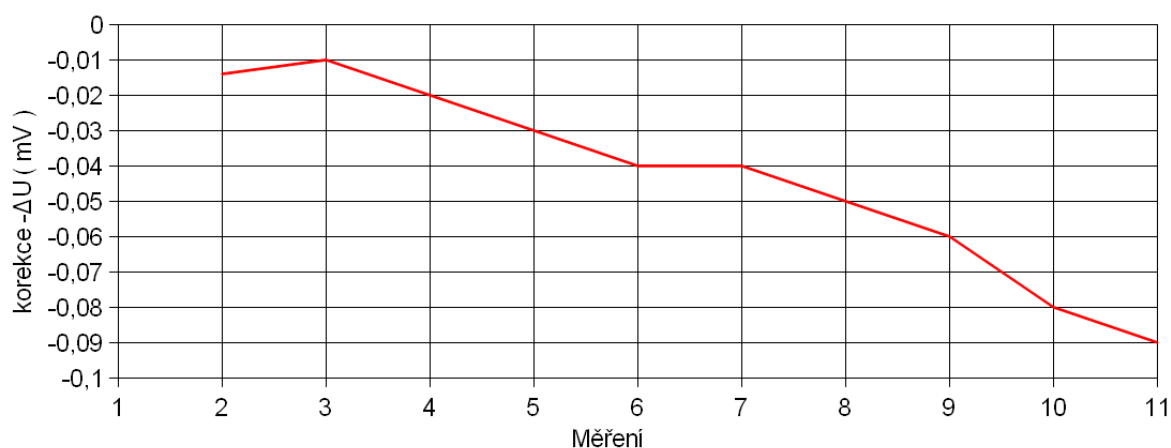


Naměřeno: $U_{MP1} = 10 \text{ V}$, $U_{MP2} = 10,04 \text{ V}$, protože odchylka není vyšší než 1 %, není nutná oprava zisku.

Tabulka 18 - ověření rozsahu 20 V

Měření		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
G850M	$U_{DC} \text{ (V)}$	0	1,98	3,96	6,02	7,97	10	12,05	13,96	15,95	18,00	19,90
M3890G	$U_{DC} \text{ (V)}$	0	1,994	3,97	6,04	8	10,04	12,09	14,01	16,01	18,08	19,99
korekce	$-\Delta U \text{ (V)}$	0	-0,014	-0,01	-0,02	-0,03	-0,04	-0,04	-0,05	-0,06	-0,08	-0,09
Absolutní chyba naměřené hodnoty:												
$\Delta U \text{ MP1 (V)}$		0	0,0199	0,0298	0,0401	0,0499	0,06	0,0703	0,0798	0,0898	0,1	0,1095

Obr. 122 - korekční křivka



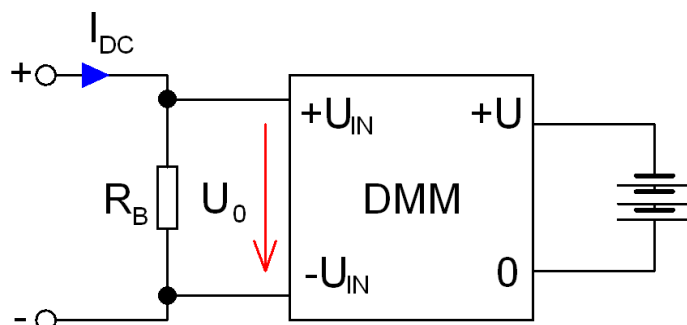
Bezpečnost práce: Dodržovat zásady a normy bezpečné práce v laboratoři.

Závěr: Nastavený rozsah parametrů výrobce a zadání vyhovuje.

11.4. Panelový digitální měřicí modul – nastavení rozsahu ampérmetru

Digitální měřicí modul obvykle pracuje jako voltmetr a má tedy velmi velký vnitřní odpor. Výrobci uvádějí hodnoty nad 100 M Ω . Modul proto využívá úbytek napětí U_0 na rezistoru R_B – bočníku – Ohmův zákon. Proud I_0 , tekoucí do modulu se zanedbává.

Obr. 123 - Princip digitálního ampérmetru



Stejně jako u analogového ampérmetru velmi záleží na přesnosti hodnoty bočníku R_B . I zde na něm závisí přesnost celé měřicí soustavy ampérmetru. Bočník se musí pečlivě nastavit na daný odpor R_B a dimenzovat na velikost měřeného proudu I_{DC} . Neméně důležitý je i materiál na bočníky. Musí být stabilní i při vyšších odporových ztrátách – při vyšších teplotách. Pro menší proudy vyhoví rezistory s kovovou odporovou vrstvou - metaloxidové, pro větší proudy se používá konstantan nebo manganin.

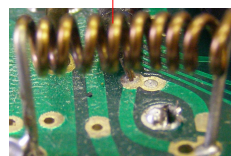
Pro kontrolní měření je nutné použít přesnější přístroj, pro splnění podmínek kalibrace. I zde se pro ověření principu nastavení digitálního modulu jako ampérmetru musíme spokojit s běžným multimetrem. Běžné multimetry na proudových rozsazích totiž potřebnou přesnost nemívají. Pro naše ověření principu ampérmetru to ale stačí. Napájení obvodu je nutné zajistit kvalitním stabilizovaným zdrojem, výstupní napětí nesmí kolísat v důsledku většího proudového odběru. Zatěžovací rezistor musí být dimenzovaný na dostatečný výkon a být, pokud možno, teplotně stálý.

Obr. 124 - Ukázky bočníků multimetrů

Pro rozsah 20 A



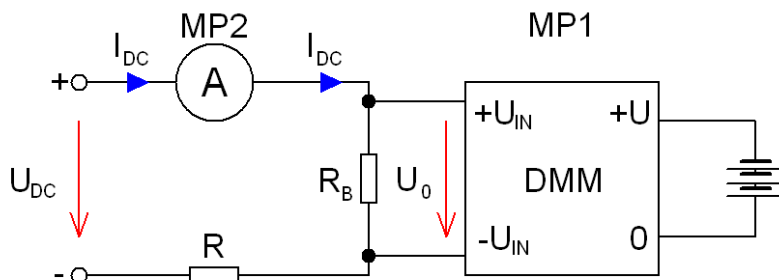
Pro rozsah 2 A



11.5. Praktické měření – nastavení rozsahu digitálního ampérmetru

Zadání: Panelové digitální 3 ½ místné měřidlo nastavte na rozsah $I_{DC} = 200 \text{ mA}$. Dodržte přesnost do 1 % + 1 dig. Proveďte měření korekcí a sestrojte korekční křivku. Vyhodnoťte přesnost měření.

Obr. 125 - Schéma zapojení obvodu



Měřicí prostředky: MP1 – panelové 3 ½ místné měřidlo G850M (0,5 % +1), baterie 9 V, MP2 – Metex M-3890D (1,2 % + 2), rezistor R_B , rezistor $R \ 82 \ \Omega/6 \text{ W}$, stabilizovaný zdroj $U_{DC} \ 0-30 \text{ V}$, spojovací materiál.

Upozornění: MP2 Metex má podobnou přesnost a proto jej použijeme pouze pro vyzkoušení principu.

Vzorce a výpočty:

Výpočet rezistoru R_B – bočníku (modul DMM – $U_0 = 200 \text{ mV}$, $R_i > 100 \text{ M}\Omega$):

$$R_B = \frac{U_0}{I_{DC}} = \frac{200 \text{ mV}}{200 \text{ mA}} = 1 \ \Omega \quad P_{RB} = R_B \cdot I_{DC}^2 = 1 \cdot 0,2^2 = 0,04 \text{ W}$$

Bočník byl vybrán pečlivým měřením z rezistorů $1 \text{ R}/0,5 \text{ W}$.

Výpočet rezistoru R :

(napětí U_{DC} volíme podle možnosti zdroje, cca v $\frac{1}{2} U_{DC}$ zdroje – 15 V)

$$R = \frac{U_{DC}}{I_{DC}} = \frac{15}{0,2} = 75 \ \Omega \quad \text{Vybereme z řady výkonových rezistorů – } 82 \text{ R}/6 \text{ W}$$

Výpočet korekce – $\Delta I = - (I_{MP1} - I_{MP2})$

Odvození přesnosti MP1 a MP2:

$$\text{Chyba čtení – } \delta 1, \text{ chyba z rozsahu – } \delta 2 = \frac{\text{chyba digitů}}{\text{celkem digitů}} \cdot 100 \text{ (vše v \%)}$$

Absolutní chyba naměřené hodnoty MP1 nebo MP2:

$$\Delta I = \frac{\text{Hodnota}}{100} \cdot \delta 1 + \frac{\text{Rozsah}}{100} \cdot \delta 2$$

Měření: Kontrolní nastavení při poloviční hodnotě – 100 mA

Obr. 126 - modul MP1



Obr. 127 - M-3890D

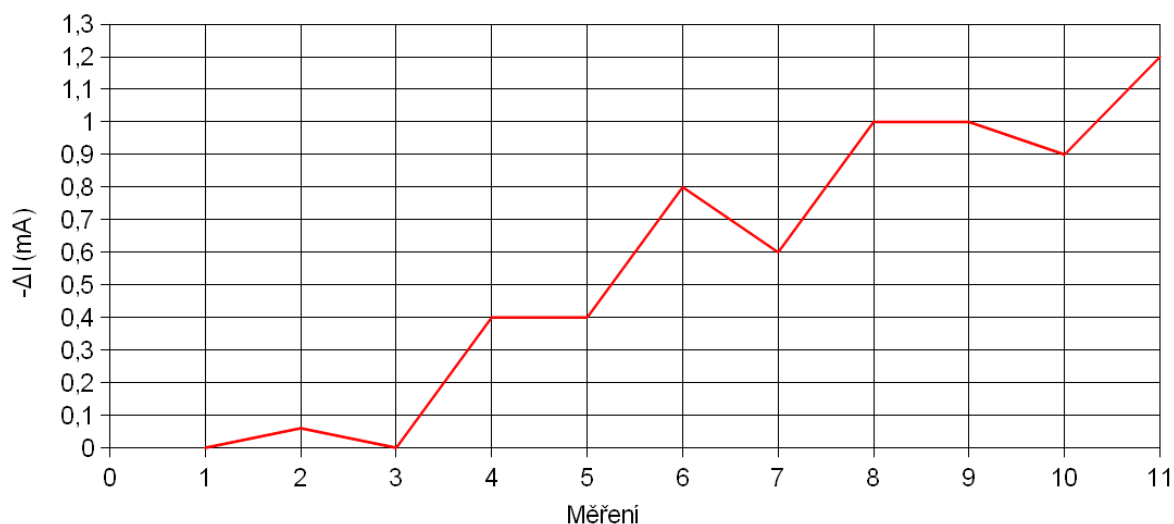


Naměřeno: $I_{MP1} = 100 \text{ mA}$, $I_{MP2} = 99,2 \text{ mA}$ (max. hodnota 99,4 mA), odchylka je menší než 1% a proto není nutná úprava zisku.

Tabulka 19 - ověření rozsahu 200 mA

Měření		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
G850M	$I_{DC} \text{ (mA)}$	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180,00	199,00
M3890G	$I_{DC} \text{ (mA)}$	0	19,94	40	59,6	79,6	99,2	119,4	139	159	179,1	197,8
korekce	$-\Delta I \text{ (mA)}$	0	0,06	0	0,4	0,4	0,8	0,6	1	1	0,9	1,2
Absolutní chyba naměřené hodnoty:												
$\Delta I_{MP1} \text{ (mA)}$		0	0,21	0,41	0,61	0,81	1,01	1,21	1,41	1,61	1,81	2

Obr. 128 - Graf měření korekcí rozsahu 200 mA



Bezpečnost práce: Dodržovat zásady a normy bezpečné práce v laboratoři.

Závěr: Nastavený rozsah parametrů výrobce a zadání vyhovuje.

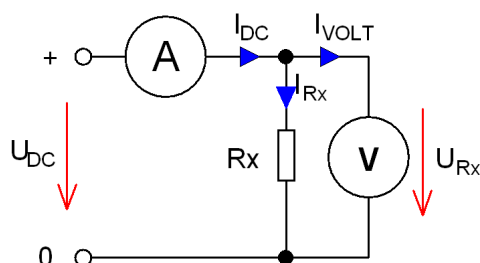
12. Měření odporu rezistorů

Elektrický odpor představuje jednu ze základních vlastností elektrotechnických obvodů, přístrojů a součástek. Rozlišujeme například odpor rezistorů, odpor polovodičových přechodů, vodičů, spotřebičů, izolace apod.

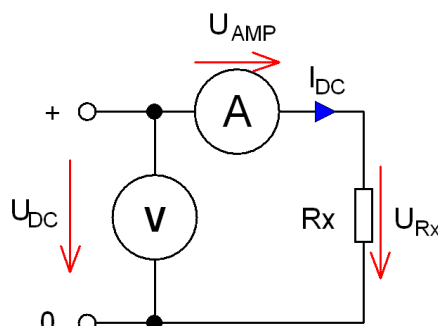
Elektrický odpor rozdělujeme podle velikosti na 3 hlavní skupiny:

- 1) odpory malé – jedná se o součástky s hodnotou odporu do $1\ \Omega$, respektive do $10\ \Omega$. Tyto hodnoty se přímo měřicími přístroji v praxi měří obtížně. Běžně dostupné multimetry jsou vybavené většinou nedostatečně citlivým rozsahem a odpor je změřený se značnou chybou. Při přímém měření těchto hodnot je nutné brát v úvahu i odpor měřicích kablíků. Musí být co nejkratší, nejvhodnější je připojení součástky přímo do zdírek měřicího přístroje. Velmi malé hodnoty je vhodné měřit Ohmovo metodou v zapojení pro malé odpory.
- 2) odpory střední – tato skupina zahrnuje odpory v hodnotách od $10\ \Omega$ do $1\ \text{M}\Omega$. Pro měření těchto hodnot je většina multimetrů vyhovující.
- 3) odpory velké – hodnoty nad $1\ \text{M}\Omega$. Multimetry mají většinou rozsah do $20\ \text{M}\Omega$. Vyšší hodnoty už je tedy nutné měřit nepřímou - Ohmovo metodou v zapojení pro velké odpory.

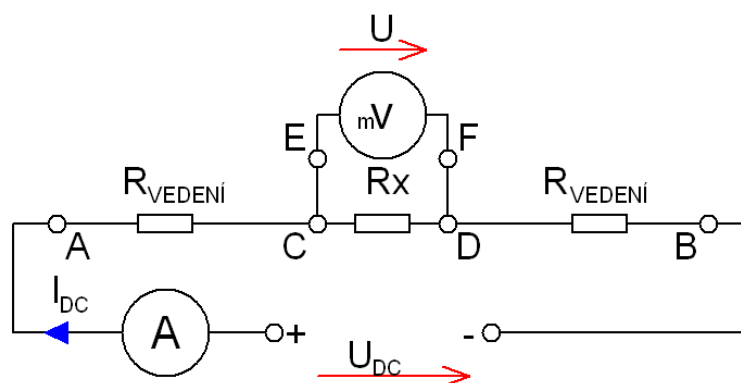
Obr. 129 - Ohmova metoda pro malé R
(Korekce spotřeby V)



Obr. 130 - Ohmova metoda pro velké R
(Korekce spotřeby A)



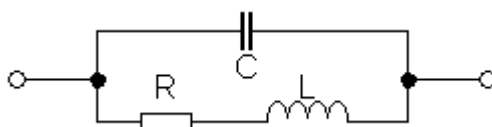
Obr. 131 - Ohmova metoda pro velmi malé R



Použijeme čtyřvodičové zapojení. Dva vodiče proudové a dva vodiče napěťové. Rezistor je zapojený mezi svorky E a F. Přechodový odpor svorek a odpor proudových vodičů je vyrovnaný vysokým vnitřním odporem milivoltmetru, který je připojený do napěťových svorek E a F.

Hodnoty odporů pak vypočítáme podle Ohmova zákona.

Obr. 132 - Náhradní schéma rezistoru



Z hlediska způsobu výroby rezistorů nelze předpokládat, že součástka představuje čistě ohmický odpor. Odporová vrstva je nanesená na nosné tělísko ve tvaru závitů nebo odpor tvoří navinutý odporový drát. Projevuje se tedy kromě činného odporu i indukčnost a kapacita závitů mezi sebou. Proto při měření malých a velkých odporů výsledek ovlivňuje mnoho rušivých vlivů. Zvláště značná je závislost na oteplení.

Pro měření je nutné použít pouze stejnosměrný proud. Multimetry mají svůj zdroj proudu, pro nepřímé měření je nutné použít stabilizovaný zdroj.

Pro měření odporu z hlediska zobrazení hodnoty používáme nejčastěji metodu výchylky. Při přímém i nepřímém měření. Pro nepřímé měření se nejčastěji používá voltampérová Ohmova metoda. Lze použít metodu porovnávací nebo substituční. Způsob nulové výchylky se používá u měřicích můstků.

Pro každé měření je nutné pro vyjádření přesnosti vyhodnotit chybu měření. Vycházíme z použité metody a údajů výrobců použitých přístrojů.

12.1. Praktická úloha měření elektrického odporu

Cíl měření: Přeměřte odpor daného rezistoru přímou a nepřímou metodou. Pro nepřímé měření použijte metody Ohmovu a porovnávací. Nepřímé měření Ohmovou metodou proveďte pro vyloučení náhodné chyby minimálně v 6 hodnotách. Vyhodnoťte všechna měření z hlediska dosažené přesnosti.

12.1.1. Přímé měření elektrického odporu rezistoru

Postup měření:

- 1) Výběr přístrojů pro přímé měření
- 2) Přímé měření odporu rezistoru, zápis do tabulky – přímé měření.
- 3) Vyjádření chyby naměřených hodnot.

Měřicí prostředky: Pro přímé měření multimetry Metex M-3890D, Mastech MY-64, DMM CM 2703 a Voltcraft LCR 4080, rezistor – TR 236 6R8/J (6 W, 5 %).

Vzorce:

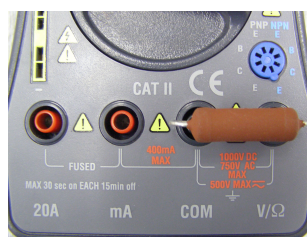
Výpočet relativní chyby měřicích přístrojů podle údajů výrobce:

$$\delta_1 = \text{chyba čtení (\%)}, \quad \delta_2 = \frac{\text{počet digitů chyby}}{\text{počet digitů displeje}} \cdot 100 \text{ (\%)}$$

Absolutní chyba naměřené hodnoty – přímé měření:

$$\Delta R = \frac{\text{naměřená hodnota}}{100} \cdot \delta_1 + \frac{\text{rozsah}}{100} \cdot \delta_2 \text{ (\Omega)}$$

Obr. 133 - Zapojení rezistoru pro přímé měření



Rezistor je připojený přímo do svorek měřicího přístroje. Není potom třeba kompenzace odporu měřicích kablíků. Je-li přístroj k tomu vybavený, je možné kompenzaci tohoto odporu provést.

Tabulka 20 - Naměřené hodnoty a nejistoty měření

Přístroj	Rozsah	R (Ω)	Údaj výrobce	δ ₁ (%)	δ ₂ (%)	ΔR (Ω)
M-3890 D	400	6,7	0,8 % + 4	0,8	0,1	0,454
CM 2703	400	6,7	1 % + 2	1	0,05	0,267
MY 64	200	6,9	0,8 % + 3	0,8	0,15	0,355
LCR 4080	20	6,676	1,2 % + 8	1,2	0,04	0,088

V tabulce jsou vyhodnocené jednotlivá měření podle parametrů výrobců a výše uvedených vzorců.

Přístroje M-3890D, CM 2703 a MY 64 napájí měřený rezistor stejnosměrným proudem.

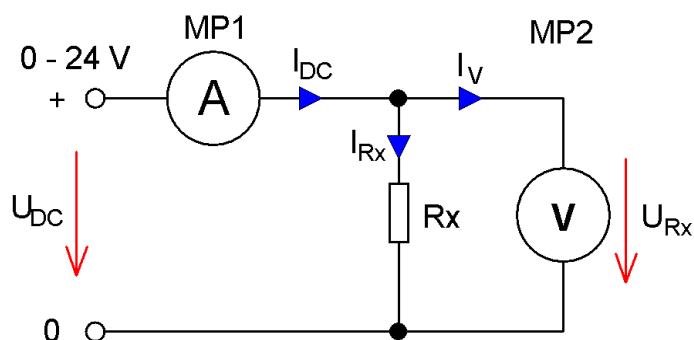
Měřič LCR 4080 používá testovací kmitočty 120 Hz a 1 kHz. Naměřená hodnota je v obou případech stejná. Pro vyhodnocení měření je vypočítaná absolutní chyba každého měření.

Můžeme tedy zapsat (seřadit z hlediska chyby měření):

- 1) LCR 4080 – $R = 6,676 \, \Omega$ $\pm 0,09 \, \Omega$
- 2) CM 2703 – $R = 6,7 \, \Omega$ $\pm 0,27 \, \Omega$
- 3) MY 64 – $R = 6,9 \, \Omega$ $\pm 0,36 \, \Omega$
- 4) M-3890D – $R = 6,7 \, \Omega$ $\pm 0,45 \, \Omega$

12.1.2. Měření elektrického odporu rezistoru Ohmovo metodou

Obr. 134 - Schéma zapojení obvodu Ohmovy metody



Měřicí prostředky: MP1 – CM 2703, MP2 – Metex M-3890D, zdroj stabilizovaného napětí U_{DC} , měřený rezistor R_x , spojovací materiál.

Postup měření:

- 1) Zapojení měřicího obvodu.
- 2) Měření Ohmovo metodou, zápis do tabulky.
- 3) Korekce spotřeby měřících přístrojů – posoudit, zda lze zanedbat.
- 4) Výpočet hodnoty odporu.
- 5) Stanovení chyby měření touto metodou.

Vzorce:

Korekce spotřeby voltmetru MP2: $I_{RX} = I_{DC} - I_{VOLT}$ $(I_{VOLT} = \frac{U_{R1}}{10 \, M\Omega})$

Výpočet relativní chyby multimerů podle údajů výrobce:

$$\delta_1 = \text{chyba čtení (\%)}, \quad \delta_2 = \frac{\text{počet digitů chyby}}{\text{počet digitů displeje}} \cdot 100 \, (\%)$$

Výpočet relativní chyby naměřených hodnot:

$$\delta U_{DC}, \delta I_{DC} = \delta 1 + \delta 2 \cdot \frac{\text{Rozsah}}{\text{Naměřená hodnota}} \quad (\%)$$

Celková relativní chyba Ohmovy metody pro R_x - $\delta R_x = \delta U_{DC} + \delta I_{DC} \quad (\%)$

Absolutní chyba hodnoty – nepřímé měření:

$$\Delta R_x = \frac{R_x \text{ (vypočtené)}}{100} \cdot \delta R_x$$

$$\text{Ohmův zákon} - R_x = \frac{U_{DC}}{I_{RX}}$$

Aritmetický průměr: součet hodnot / počet hodnot

Tabulky naměřených hodnot:

Tabulka 21 - Měření Ohmovou metodou

Měření	$U_{DC} \text{ (V)}$	$I_{DC} \text{ (mA)}$	$I_{VOLT} \text{ (mA)}$	$I_{R_x} \text{ (mA)}$	$R \text{ (}\Omega\text{)}$
1	2,557	385	0,0000	385	6,64
2	2,295	345,5	0,0000	345,5	6,64
3	2,031	305,7	0,0000	305,7	6,64
4	1,566	235,7	0,0000	235,7	6,64
5	1,209	181,9	0,0000	181,9	6,65
6	0,729	109,6	0,0000	109,6	6,65
7	0,3795	56,8	0,0000	56,8	6,68
8	0,2294	34,1	0,0000	34,1	6,73
Průměr:					6,66

Poslední 2 řádky se od průměru liší. Pro korekci nahodilé chyby byly kvůli větší odchylce zrušené. Průměr R je spočítaný ze zbylých 6 měření a to je dostatečné.

Tabulka 22 - Měření Ohmovou metodou – upravené měření

Měření	U_{DC} (V)	I_{DC} (mA)	I_{VOLT} (mA)	I_{RX} (mA)	R (Ω)
1	2,557	385	0,0003	385	6,64
2	2,295	345,5	0,0002	345,5	6,64
3	2,031	305,7	0,0002	305,7	6,64
4	1,566	235,7	0,0002	235,7	6,64
5	1,209	181,9	0,0001	181,9	6,65
6	0,729	109,6	0,0001	109,6	6,65
				Průměr:	6,64

Měřený rezistor má hodnotu odporu - $R_x = 6,64 \Omega$.

Vlastní spotřeba přístrojů: v tomto případě lze zanedbat. Proud voltmetru je podstatně menší. Z tabulky je vidět, že měření neovlivňuje podstatným způsobem.

$$I_{VOLT} = \frac{U_{DC}}{10 \text{ M}\Omega} = \frac{1,56}{10 \text{ M}\Omega} = 156 \text{ nA}$$

Stanovení chyby měření:

Pro výpočet chyby V-A metody jsme vybrali 4. řádek – je totožný s průměrem R a předpokládáme největší chybu pro nejméně využitý rozsah přístrojů.

Tabulky relativních chyb Ohmovy metody:

Tabulka 23 - Měření U_{DC} a I_{DC}

Přístroj	parametry	$\delta 1$ (%)	$\delta 2$ (%)	U_{DC} (V)	δU_{DC} (%)
M-3890D	0,8%+2	0,8	0,05	1,566	0,93
Přístroj	parametry	$\delta 1$ (%)	$\delta 2$ (%)	I_{DC} (mA)	δI_{DC} (%)
CM 2703	1%+2	1	0,05	235,7	1,08

Relativní chyba napětí $U_{DC} = 1,566 \text{ V}$ - $\delta U_{DC} = 0,93 \%$

Relativní chyba napětí $I_{DC} = 235,7 \text{ mA}$ - $\delta I_{DC} = 1,08 \%$

Tabulka 24 - Výpočet chyby měření R Ohmovou metodou

δU_{DC} (%)	δI_{DC} (%)	$\Sigma \delta R$ (%)	R (Ω)	$\Sigma \Delta R$ (Ω)
0,93	1,08	2,01	6,64	0,13

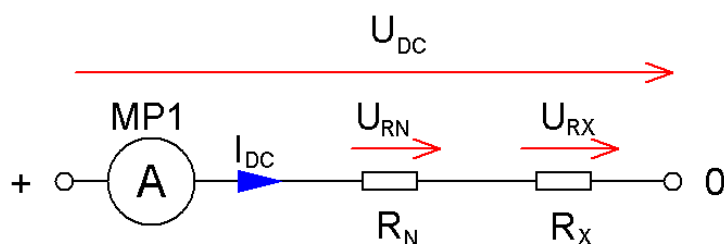
Relativní chyba odporu R_x $\Sigma \delta R = \delta U_{DC} + \delta I_{DC} = 0,93 + 1,08 = 2,01 \%$

$$\text{Absolutní chyba odporu } R_X \quad \Delta R_X = \frac{R_X}{100} \cdot \delta R = \frac{6,64}{100} \cdot 2,01 = 0,13 \, \Omega$$

Můžeme tedy zapsat – nepřímá – Ohmova - metoda: $R_X = 6,64 \, \Omega \pm 0,13 \, \Omega$.

12.1.3. Měření elektrického odporu rezistoru porovnávací metodou

Obr. 135 - Schéma zapojení obvodu



Měřicí prostředky: Pro přímé i nepřímé měření odporu použijeme MP1 multimetr CM 2703, MP2 - Metex M-3890D, zdroj stabilizovaného U_{DC} , měřený rezistor R_X , odporovou dekádu R_N , spojovací materiál.

Postup měření:

- 1) Zapojení obvodu pro měření srovnávací metodou.
- 2) Měření nepřímou metodou, zápis, výpočty.
- 3) Vyhodnocení vlastní spotřeby měřicích přístrojů, možné zanedbání.
- 4) Výpočet hodnoty měřeného odporu.
- 5) Vyjádření chyby porovnávací metody.

Vzorce:

Korekce spotřeby voltmetru MP2: $I_{RX} = I_{DC} - I_{VOLT}$ $(I_{VOLT} = \frac{U_{R1}}{10 \, M\Omega})$

Výpočet relativní chyby multimetrů podle výrobce:

$$\delta_1 = \text{údaj výrobce } (\%), \quad \delta_2 = \frac{\text{počet digitů chyby}}{\text{počet digitů displeje}} \cdot 100 \, (\%),$$

Relativní chyba naměřené hodnoty :

$$\delta_v = \delta_1 + \delta_2 \cdot \frac{\text{Rozsah}}{\text{Měřená hodnota}} \quad (\%),$$

Absolutní chyba hodnoty – srovnávací metoda: $\Delta R_x = \frac{R_x}{100} \cdot \Sigma \delta R_x \quad (\Omega)$

Srovnávací metoda: $R_x = \frac{R_N \cdot U_{RX}}{U_{RN}} \quad (\Omega, V)$

Tabulka 25 - Hodnoty porovnávací metody

Přístroj	parametry	$\delta_1 \quad (\%)$	$\delta_2 \quad (\%)$	Rozsah (V)	$U_{RX} \quad (V)$	$\delta U_{RX} \quad (\%)$	$\Delta U_{RX} \quad (V)$
M-3890D	0,8%+2	0,8	0,05	4	1,063	0,99	0,0105
Přístroj	parametry	$\delta_1 \quad (\%)$	$\delta_2 \quad (\%)$	Rozsah (V)	$U_{RN} \quad (V)$	$\delta U_{RN} \quad (\%)$	$\Delta U_{RN} \quad (V)$
M-3890D	0,8%+2	0,8	0,05	4	1,633	0,92	0,0151
Dekáda	parametry	$\delta \quad (\%)$	$R_N \quad (\Omega)$	$\delta R_N \quad (\%)$	$\Delta R_N \quad (\Omega)$		
Voltcraft	0,5%/0,3W	0,5	10	0,5	0,05		

Proud $I_{DC} = 159,1 \text{ mA}$ (Pozor, nesmí dojít k přetížení dekády a rezistoru)

Na rezistoru R_x bylo naměřeno napětí $U_x = 1,063 \text{ V}$.

Výpočet hodnoty měřeného rezistoru:

$$R_x = \frac{R_N \cdot U_{RX}}{U_{RN}} = \frac{10 \cdot 1,063}{1,633} = 6,51 \quad \Omega$$

Vlastní spotřeba přístrojů: v tomto případě lze zanedbat. Proud do voltmetrů je o několik řádů menší a měření neovlivňuje podstatným způsobem.

$$I_{VOLT} = \frac{U_{RN}}{10 \text{ M}\Omega} = \frac{1,633}{10 \text{ M}\Omega} = 163,3 \text{ nA}$$

$$I_{VOLT} = \frac{U_{RX}}{10 \text{ M}\Omega} = \frac{1,063}{10 \text{ M}\Omega} = 106,3 \text{ nA}$$

Chyba měření porovnávací metodou (vycházíme z hodnot v tabulce)

Relativní chyba rezistoru R_N - $\delta R_N = 0,5 \%$

Relativní chyba napětí U_{RN} - $\delta U_{RN} = 0,92 \%$

Relativní chyba napětí U_{RX} - $\delta U_{RX} = 0,99 \%$

Relativní chyba rezistoru - $\delta R_X = \delta R_N + \delta U_{RN} + \delta U_{RX} = 0,5 + 0,92 + 0,99 = 2,41 \%$

Absolutní chyba pro hodnotu rezistoru R_X :

$$\Delta R_X = \frac{R_X}{100} \cdot \delta_{RX} = \frac{6,51}{100} \cdot 2,41 = 0,16 \Omega.$$

Můžeme tedy zapsat – nepřímá – porovnávací - metoda: $R_X = 6,51 \Omega \pm 0,16 \Omega$.

Bezpečnost práce: podle zásad pro dílnu elektrického měření

Závěr:

Podle zadání bylo provedeno přímé měření odporu rezistoru uvedenými přístroji a nepřímé měření odporu rezistoru Ohmovo a porovnávací metodou.

Byly změřené hodnoty s vyjádřenou chybou:

LCR 4080	$R = 6,676 \Omega$	$\pm 0,09 \Omega$
CM 2703	$R = 6,7 \Omega$	$\pm 0,27 \Omega$
MY 64	$R = 6,9 \Omega$	$\pm 0,36 \Omega$
M-3890D	$R = 6,7 \Omega$	$\pm 0,45 \Omega$
Ohmova metoda	$R = 6,64 \Omega$	$\pm 0,13 \Omega$
Porovnávací metoda	$R = 6,51 \Omega$	$\pm 0,16 \Omega$

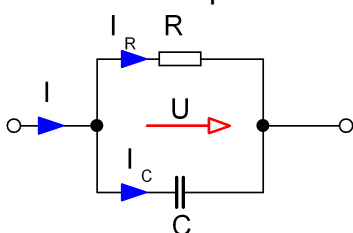
Závěrem můžeme konstatovat, že přímá metoda je samozřejmě snadnější. Při použití vhodných speciálních měřičů LCR i přesnější. Běžné multimetry, jak je vidět, se pro přesné měření, zvláště malých hodnot rezistorů, příliš nehodí. Mají poměrně velkou odchylku. Nepřímé metody, Ohmova i porovnávací, jsou přesnější než použité univerzální multimetry, ale více náročné na pečlivost a pracnost.

13. Měření kapacity kondenzátorů

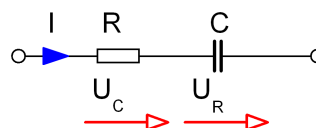
Kondenzátor v obvodu se nechová úplně ideálně. To znamená, že nikdy nepředstavuje pouze kapacitu. Vždy se budou projevovat vlivy ztrát v dielektriku, svodových proudů a odpor elektrod. V obvodu střídavého napětí je ideální kondenzátor příčinou, že proud předbíhá napětí o 90° . Právě zmíněné ztráty způsobují, že je tento posun menší o tzv. **ztrátový úhel - δ** . Ztráta se vyjadřuje jako tangens – **$\tan \delta$** .

Náhradní schéma kondenzátoru

Obr. 136 – paralelní



Obr. 137 - sériové



Přímé měření

Je vždy nutné vybrat nejvhodnější měřicí přístroj. Měření kapacity „umí“ většina multimetrů. Digitální multimetry měří kapacitu na principu měření doby nabíjení kondenzátoru. Kvalitu kondenzátoru nevyhodnotí.

Pro měření skutečné kapacity je nutné použít měřiče LCR. Tyto přístroje mají volbu testovacích kmitočtů. Pro svitkové kondenzátory vyšší, pro elektrolytické kondenzátory vyšších kapacit nižší.

Vždy dobře prostudujeme návody výrobců a dodržujeme doporučené postupy.

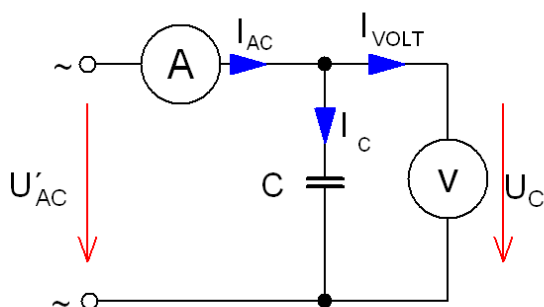
Důležité – kondenzátor musí být prokazatelně vybitý! (Zkratujeme vývody)

Nepřímé měření

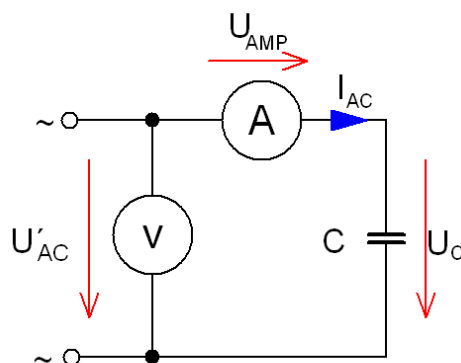
Principy měření kapacity voltmetrem a ampérmetrem (reaktanční metoda)

Tyto měření neuvažují ztráty v kondenzátoru a proto je vhodné je použít pouze pro měření kondenzátorů s kvalitním dielektrikem (např. foliových), s nízkými ztrátami.

Obr. 138 V-A metoda pro měření vyšších kapacit



Obr. 139 V-A metoda pro měření nižších kapacit



Korekce spotřeby voltmetru:

$$I_C = I_{AC} - I_{VOLT}$$

Korekce úbytku na ampérmetru:

$$U_C = U_{AC} - U_{AMP}$$

Výpočet kapacitní reaktance:

$$X_C = \frac{U_{AC}}{I_C}$$

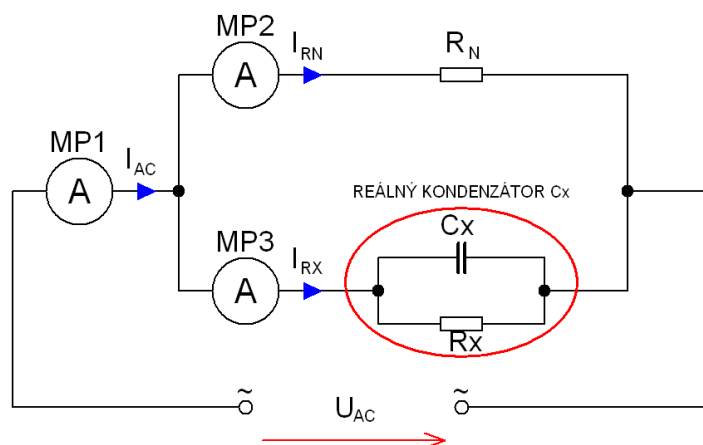
$$X_C = \frac{U_C}{I_{AC}}$$

Výpočet kapacity:
$$C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot X_C}$$

Principy měření kapacity metodou 3 ampérmetrů

Pro toto měření potřebujeme zapojení spolu s měřeným kondenzátorem 3 ampérmetry a normálový rezistor R_N . Tímto způsobem můžeme určit kromě kapacity kondenzátoru i svodový odpor a tím i kvalitu kondenzátoru – ztráty v dielektriku.

Obr. 140 - Metoda 3 ampérmetrů



Obvod připojíme ke zdroji střídavého napětí, změříme napětí U_{AC} a kmitočet f . Zapišeme všechny proudy, I_{AC} , I_{RN} a I_{RX} . Je vhodné volit pro normálový rezistor R_N takovou hodnotu, aby proudy I_{RX} a I_{RN} se příliš nelišily. Při použití odporové dekády by to neměl být problém.

Příklad výpočtu:

Je nutné zjistit fázový posuv mezi napětím na kondenzátoru a proudem, který kondenzátorem prochází.

$$\cos \varphi = \frac{I_{AC}^2 - I_{RX}^2 - I_{RN}^2}{2 \cdot I_{RN} \cdot I_{RX}}$$

z toho pak: $\varphi =$

Potom tedy:

$$\text{Kapacita kondenzátoru } C_X = \frac{I_{RX} \cdot \sin \varphi}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot U_{AC}}$$

$$\text{Svodový odpor } R_X = \frac{U_{AC}}{I_{RX} \cdot \cos \varphi}$$

13.1. Praktická úloha měření kapacity svitkového kondenzátoru

Cíl měření: Přeměřte kapacitu daného kondenzátoru. Použijte přímé měření kapacity vhodnými přístroji, nepřímé měření voltmetrem a ampérmetrem a metodou 3 ampérmetrů. Pro vyloučení náhodné chyby proveďte u V-A metody odečty při více úrovních napětí a proudu. Vyhodnoťte všechna měření z hlediska přesnosti použitých přístrojů.

13.1.1. Přímé měření kapacity kondenzátoru

Postup měření:

- 1) Výběr přístrojů pro přímé měření kapacity.
- 2) Přímé měření kapacity kondenzátoru, alespoň 2 přístroji, zápis hodnot do tabulky – přímé měření.
- 3) Vyjádření chyb obou měření (vyhodnotit z hlediska parametrů přístrojů).

Měřicí prostředky: Digitální multimetr Metex M-3890D, LCR měřič Voltcraft 4080, svitkový kondenzátor 10 $\mu\text{F}/63 \text{ V}_{\text{DC}}$, připojovací kablíky.

Vzorce:

Výpočet relativní chyby měřicích přístrojů podle údajů výrobce:

$$\delta_1 = \text{chyba čtení (\%)}, \quad \delta_2 = \frac{\text{počet digitů chyby}}{\text{počet digitů displeje}} \cdot 100 \text{ (\%)}$$

Absolutní chyba naměřené hodnoty kapacity – přímé měření:

$$\Delta C = \frac{\text{naměřená hodnota}}{100} \cdot \delta_1 + \frac{\text{rozsah}}{100} \cdot \delta_2 \text{ (F, } \mu\text{F, nF)}$$

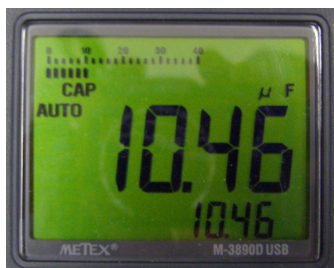
Obr. 141 - Zapojení kondenzátoru



Svitkový kondenzátor je připojený měřicími kablíky. Jsou krátké, jejich kapacita je zanedbatelná.

Obr. 142 - displeje použitých přístrojů

Metex M-3890D
(3 ¾ displej)



Voltcraft LCR 4080
(4 ½ displej)



Tabulka 26 - Naměřené hodnoty a chyby měření

Přístroje	C (μF)	Přesnost	δ1 (%)	δ2 (%)	ΔC (μF)
Metex M 3890D	10,46	3%+5dig	3	0,125	0,364
Voltcraft LCR 4080	10,621	0,7%+3dig	0,7	0,015	0,077

V tabulce jsou uvedené výsledky měření určeného kondenzátoru. U každého měření je vypočítaná absolutní chyba ΔC .

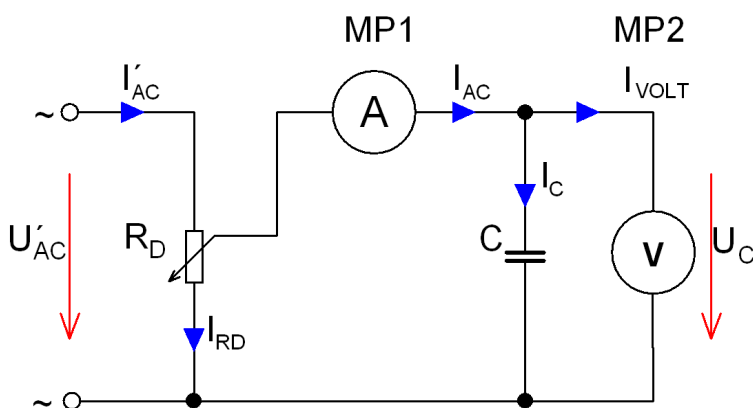
Měřič LCR 4080 měřil při testovací frekvenci 1 kHz. U DMM Metex tento údaj v parametrech výrobce nelze zjistit.

Můžeme zaznamenat naměřené hodnoty C (seřadit podle zjištěné chyby):

- 1) LCR 4080 - C = 10,62 μF +/- 0,077 μF
- 2) M-3890D - C = 10,46 μF +/- 0,364 μF

13.1.2. Nepřímé měření kapacity kondenzátoru voltmetrem a ampérmetrem

Obr. 143 - Schema zapojení obvodu



Měřicí prostředky: MP1 a MP2 – Metex M-3890D, zdroj napětí $U'_{AC} = 24\text{ V}$, měřený kondenzátor C , potenciometr $R_D = 50\text{ R}/25\text{ W}$, spojovací materiál.

Postup měření:

1. Zapojení měřicího obvodu – nepřímé měření.
2. Měření nepřímou metodou, zápis do tabulky – nepřímé měření.
3. Korekce spotřeby měřicích přístrojů – posoudit, zda lze zanedbat.
4. Výpočet kapacity.
5. Výpočet chyby nepřímé metody.
6. Vyhodnocení měření z hlediska zadání.

Vzorce:

Jestliže použijeme pro nastavení měřicího napětí potenciometr, je nutné vypočítat max. proud, který pak lze pro obvod použít. Nesmí dojít k přetížení a zničení součástky. Výrobce u potenciometru udává odpor a výkonovou ztrátu.

$$\text{Maximální proud potenciometrem: } I'_{AC} = \sqrt{\frac{P}{R}}$$

$$\text{Podle napětí v obvodu pak stanovíme: } I_{ACMAX} = \frac{U_{AC}}{R}$$

$$\text{Korekce spotřeby voltmetru MP2: } I_C = I_{AC} - I_{VOLT} \quad (I_{VOLT} = \frac{U_{AC}}{10\text{ M}\Omega})$$

Výpočet relativní chyby multimerů podle údajů výrobce:

$$\delta_1 = \text{chyba čtení (\%)}, \quad \delta_2 = \frac{\text{počet digitů chyby}}{\text{počet digitů displeje}} \cdot 100 \text{ (\%)}$$

Výpočet relativní chyby hodnoty:

$$\delta_{V,A} = \delta_1 + \delta_2 \cdot \frac{\text{Rozsah}}{\text{Hodnota}}$$

Celková relativní chyba V-A metody: $\delta_{V-A} = \delta_A + \delta_V$

Absolutní chyba hodnoty – nepřímé měření:

$$\Delta C = \frac{C \text{ (vypočtené)}}{100} \cdot \delta_{V-A}$$

$$\text{Ohmův zákon} - X_C = \frac{U_{AC}}{I_C}$$

Aritmetický průměr: součet hodnot / počet hodnot

Tabulka 27 – Podmínka pro zatížení potenciometru

R (Ω)	P (W)	I' _{ACMAX} (A)	I _{RDMAX} (A)	I _{CMAX} (A)
50	25	0,707	0,48	0,227

Z uvedené tabulky je určeno, že s daným potenciometrem může být pro tyto podmínky měřicí proud I_{ACMAX} do 227 mA.

Tabulka 28 – Výsledky měření nepřímou metodou

U _C (V)	I _{AC} (mA)	I _{VOLT} (mA)	I _C (mA)	X _C (Ω)	C (μF)
13,36	44,8	0,001	44,799	298,22	10,679
10,79	36,2	0,001	36,199	298,07	10,684
7,41	24,82	0,001	24,819	298,56	10,667
4,72	15,86	0,000	15,860	297,60	10,701
1,181	3,968	0,000	3,968	297,63	10,700
Průměry:				298,02	10,686

Pro vyhodnocení je použitý 2. řádek – téměř totožný s průměrem C.

Tabulka 29 - Nejistoty měření nepřímé metody

Přístroje	Přesnost	$\delta 1$ (%)	$\delta 2$ (%)	Hodnota	$\Sigma \delta$ (%)
$U_{AC}(V)$ Metex M3890D	1%+3dg	1	0,075	10,79	1,278
$I_C(mA)$ Metex M3890D	1,5%+5dg	1,5	0,125	36,199	1,638
Chyba V-A metody	$X_C (\Omega)$	$\Sigma \delta U_C$ (%)	$\Sigma \delta I_C$ (%)	$\Sigma \delta X_C$ (%)	$\Delta C (\mu F)$
	298,07	1,278	1,638	2,916	0,312

Vyhodnocení spotřeby voltmetru MP2 (podle tabulky měření):

$$I_{VOLT} = \frac{U_{AC}}{10 \text{ M}\Omega} = \frac{10,79}{10 \text{ M}\Omega} = 1,08 \mu A$$

$$I_C = I_{AC} - I_{VOLT} = 36,2 - 0,0011 = 36,2 \text{ mA}$$

Z výpočtu je vidět, že spotřebu voltmetru v tomto případě můžeme zanedbat.

Můžeme zapsat:

Vypočtená kapacita kondenzátoru: $C = 10,69 \mu F$

Relativní chyba U_{AC} - $\delta U_{AC} = 1,278 \%$

Relativní chyba I_{AC} - $\delta I_{AC} = 1,638 \%$

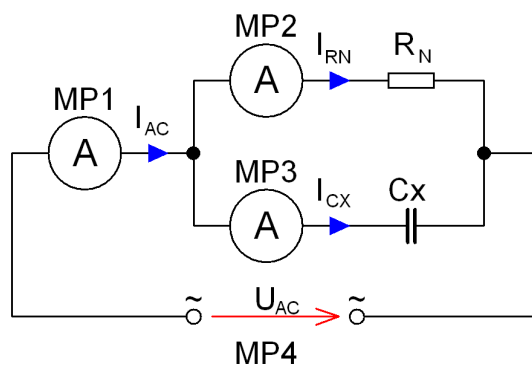
Relativní chyba X_C - $\delta X_C = \delta U_{AC} + \delta I_{AC} = 1,278 + 1,638 = 2,916 \%$

Relativní chyba δC – stejná jako u δX_C , použili jsme kmitočty sítě a ten lze považovat ve vzorci jako normálový.

$$\text{Absolutní chyba } C - \Delta C = \frac{C}{100} \cdot \delta C = \frac{10,69}{100} \cdot 2,916 = 0,312 \mu F$$

13.1.3. Nepřímé měření kapacity metodou 3 ampérmetrů

Obr. 144 - Schéma zapojení obvodu



Měřicí prostředky: MP1, MP2, MP3, MP4 – Metex M-3890D, zdroj napětí U_{AC} , svitkový kondenzátor C_X , odporová dekáda R_N , spojovací kablíky.

Postup měření:

1. Zapojení měřicího obvodu – metody 3 ampérmetrů.
2. Vlastní měření, zápis do tabulky.
3. Výpočet $\cos \varphi$ a odvození φ .
4. Určení $\sin \varphi$.
5. Výpočet kapacity C_X .
6. Výpočet svodového odporu R_X .
7. Výpočet chyby nepřímé metody.
8. Vyhodnocení měření z hlediska zadání.

Měření:

Tabulka 30 - Naměřené hodnoty a nejistoty měření:

Přístroj	Typ	Veličina	Přesnost	δ_1 (%)	δ_2 (%)	Naměřeno	$\Sigma \delta$ (%)	$\Delta I, U$ (mA, V)
MP1	M-3890D	I_{AC} (mA)	1,5% + 5	1,5	0,125	96,8	2,02	1,95
MP2	M-3890D	I_{RN} (mA)	1,5% + 5	1,5	0,125	67,4	2,24	1,51
MP3	M-3890D	I_{CX} (mA)	1,5% + 5	1,5	0,125	66,4	2,25	1,50
MP4	M-3890D	U_{AC} (V)	1% + 3	1	0,075	20,98	1,14	0,24

Rezistor $R_N = 300 \Omega / 0,5\%$

Vzorce, výpočty:

$$\cos \varphi = \frac{I_{AC}^2 - I_{CX}^2 - I_{RN}^2}{2 \cdot I_{RN} \cdot I_{CX}} = \frac{96,8^2 - 66,4^2 - 67,4^2}{2 \cdot 67,4 \cdot 66,4} = 0,045$$

$$\varphi = 87,32^\circ$$

$$\sin \varphi = 0,999$$

$$C_X = \frac{I_{CX} \cdot \sin \varphi}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot U_{AC}} = \frac{0,0664 \cdot 0,999}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 20,98} = 10,06 \cdot 10^{-6} \text{ F} = 10,6 \mu\text{F}$$

$$R_X = \frac{U_{AC}}{I_{CX} \cdot \cos \varphi} = \frac{20,98}{0,064 \cdot 0,045} = 7284,72 \Omega$$

Podle parametrů výrobce multimetru určíme:

$$\delta_1 = \text{chyba čtení (\%)}, \quad \delta_2 = \frac{\text{počet digitů chyby}}{\text{počet digitů displeje}} \cdot 100 \text{ (\%)}$$

Relativní chyba naměřených hodnot:

$$\delta_{V,A} = \delta_1 + \delta_2 \cdot \frac{\text{Rozsah}}{\text{Hodnota}}$$

Celková relativní chyba metody 3 ampérmetrů:

$$\text{Pro } C_X - \delta C_X = \delta I_{CX} + \delta U_{AC} = 2,25 + 1,14 = 3,39 \%$$

$$\text{Pro } R_X - \delta R_X = \delta U_{AC} + \delta I_{CX} = 1,14 + 2,25 = 3,39 \%$$

Absolutní chyba hodnoty C_X – metody 3 ampérmetrů:

$$\Delta C = \frac{C_X}{100} \cdot \delta C_X = \frac{10,06}{100} \cdot 3,39 = \pm 0,34 \mu F$$

U této metody tedy zapíšeme:

Vypočtená kapacita kondenzátoru: $C = 10,06 \mu F$

Hodnota svodového odporu kondenzátoru: $R = 7284,72 \Omega$

Relativní chyba U_{AC} - $\delta U_{AC} = 1,14 \%$

Relativní chyba I_{AC} - $\delta I_{CX} = 2,25 \%$

Relativní chyba C_X - $\delta C_X = 3,39 \%$

Absolutní chyba C_X - $\Delta C_X = \pm 0,34 \mu F$

Bezpečnost práce – podle zásad pro dílnu elektrického měření

Závěr

Podle zadání měření bylo provedeno přímé změření kapacity svitkového kondenzátoru měřičem LCR a digitálním multimetrem Metex. Byla vyhodnocena přesnost měření těmito přístroji. Nepřímé měření kapacity bylo provedeno V-A metodou a metodou 3 ampérmetrů běžnými multimetry Metex. I v těchto případech byla vyhodnocená přesnost měření. Rozdíl v přesnosti použitých přístrojů je zřejmý. Digitální multimetr Metex zastupuje běžně dostupné přístroje s 3 ½ a 3 ¾ displejem. Měřič LCR 4080 s 4 ½ místným displejem zřetelně umožňuje poměrně přesné měření v dostatečném spektru rozsahů.

LCR 4080	$C = 10,621 \mu F \pm 0,08 \mu F$
Ohmova metoda	$C = 10,69 \mu F \pm 0,31 \mu F$
Metoda 3 ampérmetrů	$C = 10,06 \mu F \pm 0,34 \mu F$
M-3890D	$C = 10,46 \mu F \pm 0,36 \mu F$

Z vyhodnocených výsledků je vidět, že „klasický“ multimetr se pro přesné měření kapacity nehodí. Přístroj se dopouští příliš velké chyby. Podle hodnoty absolutní chyby lze vidět, že odchylka je poměrně velká. Výsledek měření je tedy jen informativní. Naproti tomu vyhodnocení měření přístrojem LCR 4080 vykazuje minimální odchylku a proto má měření vyšší úroveň a výsledky jsou přesnější.

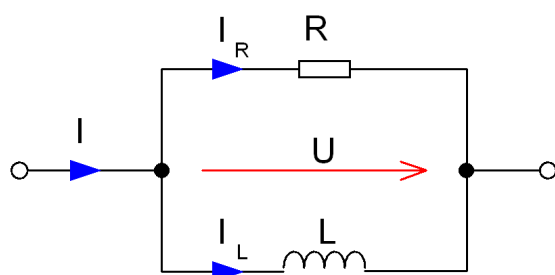
Po vyhodnocení výsledků měření lze konstatovat, že nepřímé metody jsou nepochybně pracnější. Jsou však přesnější než přímé měření kapacity běžným multimetrem. Speciální měřicí přístroje pro měření RLC veličin s vícemístným displejem jsou podle dosažených výsledků nejvhodnější. U použitého přístroje LCR 4080 je zřejmé, že je pro tato měření nejlepší.

Jestliže posoudíme výsledky přímého a nepřímého měření, můžeme konstatovat, že speciální měřicí přístroje LCR jsou pro tato měření nejvhodnější. Nepřímá V-A metoda většinou této přesnosti nedosahuje a navíc nebere v úvahu ztráty v kondenzátoru. Metoda 3 ampérmetrů naproti tomu je schopná ztráty v dielektriku změřit. Výsledky jsou tedy kvalitnější, než přímé měření běžnými multimetry. Klasické multimetry jsou většinou vhodné pouze pro informativní přeměření hodnot součástek.

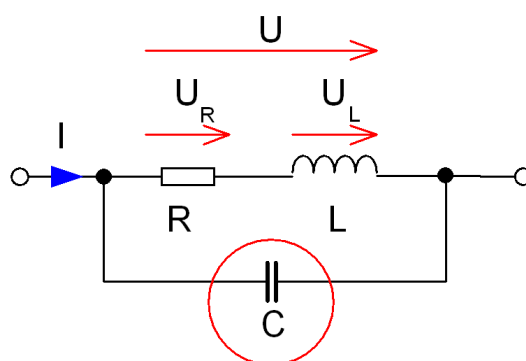
14. Měření vlastní indukčnosti cívek

I v tomto případě se nejedná o ideální součástku, která se bude v elektrickém obvodu chovat zcela jednoznačně. Indukčnost cívky je vlastnost, že se v jejích závitěch může indukovat elektrické napětí. U ideální cívky by bylo možné zanedbat parazitní kapacitu mezi vrstvami a závity, odpor vodiče. Proto v praxi používáme tzv. náhradní schema, kde je počítáno s těmito vedlejšími vlivy.

Obr. 145 - Náhradní schéma cívky
- paralelní



Obr. 146 - Náhradní schéma cívky
- sériové



Kapacitu v cívce je možné u nízkých kmitočtů zanedbat. Proto je znázorněn kondenzátor v kroužku.

Indukčnost je konstantní pouze u vzduchové cívky – je daná počtem závitů a rozměry cívky. U cívek s jádrem indukčnost závisí i na materiálu jádra a budícím proudem. Tato závislost je nelineární.

Přímé měření

Volba přístrojů pro přímé měření indukčností je omezená. Většina běžně dostupných multimetrů toto měření neumožňuje. Je nutné používat speciální měřiče LCR, které jsou na trhu. Tyto přístroje mají většinou bateriové napájení i možnost napájení ze sítě. Vždy se řídíme pokyny výrobce – volba měřicího kmitočtu, využití možností měřicího přístroje. Rovněž je vhodné při malých hodnotách indukčností vykompenzovat vliv měřicích kablíků. Je nutné cívku vhodně umístit na pracovním stole. Železné předměty nesmí být v blízkosti cívky.

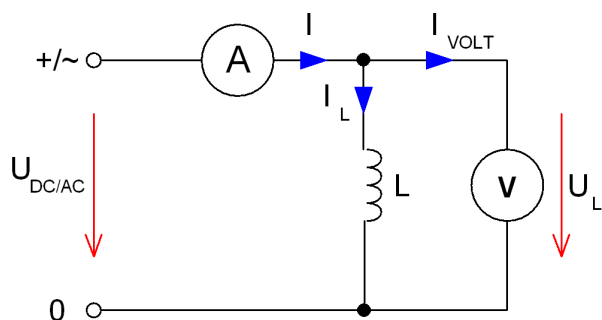
Nepřímé měření

Měření indukčnosti vzduchové cívky reaktanční metodou

I pro měření indukčnosti vzduchových cívek se využívá měření napětí a proudu v obvodu. Pro měření cívek s jádrem se tato metoda kvůli velkým ztrátám nehodí. Pomocí stejnosměrného proudu změříme odpor cívky, při zapojení cívky na

střídavé napětí zjistíme impedanci cívky. Z těchto veličin pak dopočítáme vlastní indukčnost měřené cívky. Jako u odporů a kapacit rozdělujeme tuto metodu na měření velkých a malých indukčností kvůli kompenzaci spotřeby měřicích přístrojů.

Obr. 147 - V-A metoda pro měření nižších indukčností



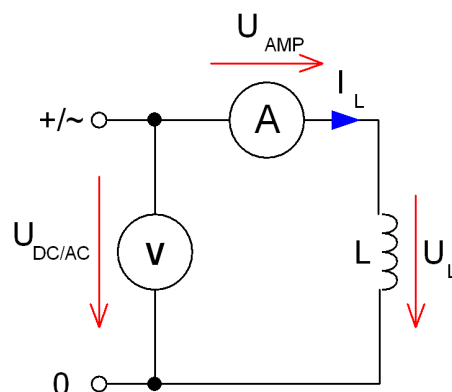
Korekce spotřeby voltmetru:

$$I_L = I - I_{VOLT}$$

Měření U_{DC} – výpočet R

$$R = \frac{U_{LDC}}{I_{LDC}}$$

Obr. 148 - V-A metoda pro měření vyšších indukčností



Korekce úbytku na ampérmetru:

$$U_L = U_{DC/AC} - U_{AMP}$$

Měření U_{AC} – výpočet Z

$$Z = \frac{U_{LAC}}{I_{LAC}}$$

Výpočet indukční reaktance:

$$X_L = \sqrt{Z^2 - R^2}$$

Výpočet indukčnosti:

$$L = \frac{X_L}{2 \cdot \pi \cdot f}$$

Měření indukčnosti cívky s jádrem – wattmetrem

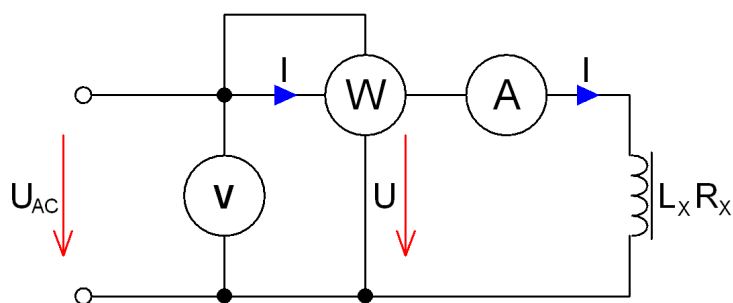
Pro měření cívek s jádrem použijeme zapojení obvodu pro měření výkonu spotřebiče. Wattmetrem určíme ztrátový odpor cívky $R_X = P / I^2$.

I zde můžeme použít vztahy:

$$X_L = \sqrt{Z^2 - R_X^2}$$

$$\text{to je: } 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_X = \sqrt{Z^2 - R_X^2}$$

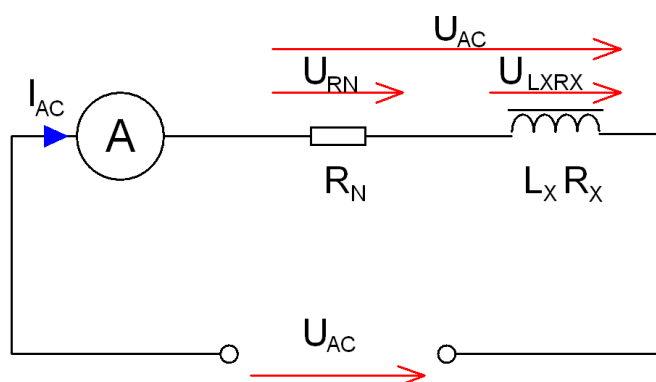
Obr. 149 - Schéma zapojení obvodu



Výpočet indukčnosti
$$L_X = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f} \cdot \sqrt{\frac{U^2}{I^2} - \frac{P^2}{I^4}}$$

Měření indukčnosti cívky s jádrem – třemi voltmetry

Obr. 150 - Schéma zapojení obvodu



K měření použijeme zdroj střídavého napětí, změříme proud I_{AC} a kmitočet f . Zapišeme všechny napětí, U_{AC} , U_{RN} a U_{LXRX} . Pro normálový rezistor R_N je vhodné volit hodnotu, aby se napětí U_{LXRX} a U_{RN} příliš nelišily.

Příklad výpočtu:

Je nutné zjistit fázový posuv mezi napětím na kondenzátoru a proudem, který kondenzátorem prochází.

$$\cos \varphi = \frac{U_{AC}^2 - U_{LXRX}^2 - U_{RN}^2}{2 \cdot U_{RN} \cdot U_{LXRX}}$$

z toho pak: $\varphi =$

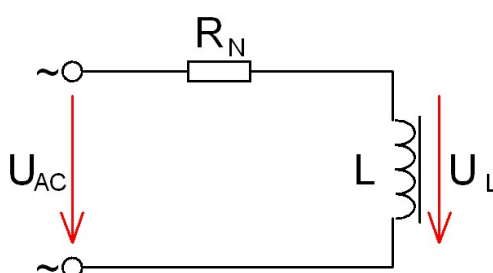
Následovně:

$$\text{Indukčnost cívky } L_X = \frac{U_{LXR} \cdot \sin \varphi}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot I_{AC}}$$

$$\text{Ohmický odpor cívky } R_X = \frac{U_{LXR} \cdot \cos \varphi}{I_{AC}}$$

Měření indukčnosti cívky s jádrem – reaktanční metodou

Obr. 151 - Schéma zapojení obvodu



K měření potřebujeme zdroj střídavého napětí o známém kmitočtu. Změříme napětí, U_{AC} a U_L . Použijeme normálový rezistor R_N o známé hodnotě.

Postup výpočtu:

$$L = \frac{R_N}{\omega} \cdot \frac{U_L}{\sqrt{U_{AC}^2 - U_L^2}} = \frac{R_N}{2 \cdot \pi \cdot f} \cdot \frac{U_L}{\sqrt{U_{AC}^2 - U_L^2}}$$

14.1. Praktická úloha měření vlastní indukčnosti vzduchové cívky

Cíl měření: Změřte indukčnost vzduchové cívky. Použijte přímou a nepřímou – voltampérovou – metodu. Přímé měření proveďte více přístroji. Nepřímé měření proveďte v několika hodnotách napětí a proudu pro vyloučení náhodné chyby. Vyhodnoťte obě měření z hlediska přesnosti použitých přístrojů.

14.1.1. Přímé měření indukčnosti vzduchové cívky

Postup měření:

- 1) Změření indukčnosti vzduchové cívky přímou metodou alespoň 2 přístroji, zápis hodnot do tabulky – přímé měření.
- 2) Vyjádření chyby obou hodnot (odvodit od parametrů přístrojů).
- 3) Vyhodnocení měření z hlediska zadání.

Vzorce:

Výpočet relativní chyby multimerů podle údajů výrobce:

$$\delta_1 = \text{chyba čtení (\%)}, \quad \delta_2 = \frac{\text{počet digitů chyby}}{\text{počet digitů displeje}} \cdot 100 \text{ (\%)}$$

Absolutní chyba hodnoty – přímé měření:

$$\Delta L = \frac{\text{naměřená hodnota}}{100} \cdot \delta_1 + \frac{\text{rozsah}}{100} \cdot \delta_2$$

Měřicí prostředky: LC měřič Mastech MY 6243 a LCR měřič Voltcraft LCR 4080, připojovací kablíky.

Měřenou cívku připojíme k přístrojům měřicími kablíky. Vliv jejich indukčnosti na výslednou hodnotu je zanedbatelný.

Tabulka 31 - Přímé měření

přístroj	parametry	L (mH)	δ1 (%)	δ2 (%)	ΔL (mH)
MY6243	2% +1	6,07	2	0,05	0,1314
LCR4080	1,2% +5	5,956	1,2	0,025	0,0765

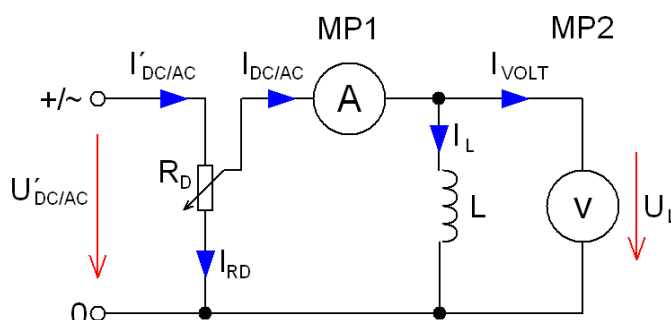
MY 6243 pracuje s 3 ½ místným displejem a testovací frekvencí 900 Hz, měřič LCR 4080 s 4 ½ místným a měření bylo provedeno kmitočtem 1 kHz.

Výsledky přímého měření:

- 1) LCR 4080 - L = 5,956 mH +/- 76,5 nH
- 2) MY 6243 - L = 6,07 mH +/- 131,4 nH

14.1.2. Měření indukčnosti vzduchové cívky voltmetrem a ampérmetrem

Obr. 152 - Schéma obvodu V-A metody



Měřicí prostředky: MP1 a MP2 – Metex-3890D, zdroj napětí $U'_{DC/AC} = 24 \text{ V}$, měřená cívka L , potenciometr $R_D - 50 \text{ R}/25 \text{ W}$, spojovací materiál.

Postup měření:

1. Zapojení měřicího obvodu podle schéma zapojení.
2. Měření stejnosměrným proudem – zápis do tabulky.
3. Měření střídavým proudem – zápis do tabulky.
4. Posoudit korekci spotřeby měřících přístrojů, zda lze zanedbat.
5. Výpočet indukčnosti cívky.
6. Výpočet chyby nepřímé metody.
7. Vyhodnocení měření z hlediska zadání.

Vzorce:

Maximální proud potenciometru: $I = \sqrt{\frac{P}{R}}$

Podle napětí v obvodu pak stanovíme: $I_{MAX} = \frac{U_{AC}}{R}$

Korekce spotřeby voltmetru MP2: $I_L = I_{DC/AC} - I_{VOLT}$ ($I_{VOLT} = \frac{U_{DC/AC}}{10 \text{ M}\Omega}$)

Výpočet relativní chyby multimerů podle údajů výrobce:

$\delta_1 = \text{chyba čtení (\%)}$, $\delta_2 = \frac{\text{počet digitů chyby}}{\text{počet digitů displeje}} \cdot 100 \text{ (\%)}$

Relativní chyba naměřené hodnoty: $\delta_{V,A} = \delta_1 + \delta_2 \cdot \frac{\text{Rozsah}}{\text{Hodnota}}$

Celková relativní chyba V-A metody: $\delta_{V-A} = \delta_A + \delta_V$

Absolutní chyba hodnoty – nepřímé měření:

$\Delta L = \frac{L \text{ (vypočtená)}}{100} \cdot \delta_{V-A}$

Ohmův zákon – $R, Z = \frac{U_L}{I_L}$

$$\text{Indukční reaktance } X_L = \sqrt{Z^2 - R^2}$$

$$\text{Výpočet indukčnosti } L = \frac{X_L}{2 \cdot \pi \cdot f}$$

Aritmetický průměr: součet hodnot / počet hodnot

Tabulka 32 - Podmínky pro potenciometr

R (Ω)	P (W)	I _{DC/ACMAX} (A)	I _{RDMAX} (A)	I _{DC/ACMAX} (A)
50	25	0,707	0,48	0,227

Měřicí proud nesmí překročit hodnotu 227 mA.

Měření:

Tabulka 33 – V-A metoda
- měření odporu R

U _{DC} (V)	I _{DC} (A)	I _V (A)	I _L (A)	R (Ω)
0,852	0,2186	0,000000	0,2186	3,898
0,702	0,1798	0,000000	0,1798	3,904
0,568	0,1452	0,000000	0,1452	3,912
0,428	0,1094	0,000000	0,1094	3,912
0,287	0,0734	0,000000	0,0734	3,910
0,135	0,0346	0,000000	0,0346	3,902
Průměr				3,906

Tabulka 34 – V-A metoda
- měření impedance Z

U _{AC} (V)	I _{AC} (A)	I _V (A)	I _L (A)	Z (Ω)
0,912	0,2092	0,000000	0,2092	4,359
0,759	0,1743	0,000000	0,1743	4,355
0,609	0,1398	0,000000	0,1398	4,356
0,487	0,1116	0,000000	0,1116	4,364
0,341	0,0778	0,000000	0,0778	4,383
0,154	0,0357	0,000000	0,0357	4,314
Průměr				4,355

Spotřebu měřicích přístrojů lze na základě výsledků v tabulce zanedbat.

Pro vyhodnocení chyby jsou vybrány 2. řádky v tabulkách – nejbližší k průměrům.

Tabulka 35 - Výpočet indukční reaktance a indukčnosti

indukční reaktance X_L (Ω)	1,926
indukčnost L (mH)	6,134

Indukčnost cívky je pomocí nepřímé metody je L = 6,134 mH.

Tabulka 36 - Vyhodnocení chyby měření odporu R

Měření	Přístroje	Přesnost	δ1 (%)	δ2 (%)	Hodnota	Σδ (%)
U _{DC} (V)	METEX M3890D	0,8%+2dg	0,8	0,05	0,702	1,085
I _{DC} (A)	METEX M3890D	1,2%+2dg	1,2	0,05	0,1798	1,311
Chyba V-A metody R		R (Ω)	ΣδU _L (%)	ΣδI _L (%)	ΣδR (%)	
		4,355	1,085	1,311	2,396	

Tabulka 37 - Vyhodnocení chyby měření impedance Z

Měření	Přístroje	Přesnost	$\delta 1$ (%)	$\delta 2$ (%)	Hodnota	$\Sigma \delta$ (%)
U_{AC} (V)	METEX M3890D	1%+3dg	1	0,075	0,759	1,395
I_{AC} (A)	METEX M3890D	1,5%+5dg	1,5	0,125	0,1743	1,787
Chyba V-A metody Z		Z (Ω)	$\Sigma \delta U_L$ (%)	$\Sigma \delta I_L$ (%)	$\Sigma \delta Z$ (%)	
		4,355	1,395	1,787	3,182	

Vyhodnocení chyby X_L

Výpočet celkové relativní chyby indukční reaktance provádíme stejným způsobem, jako výpočet samotné hodnoty. Protože vzorec obsahuje mocniny a odmocninu, je nutné to zahrnout do výpočtu.

$$\delta X_L = \frac{1}{2} \cdot (\Sigma \Delta Z \cdot 2 + \Sigma \Delta R \cdot 2) = \frac{1}{2} \cdot (3,182 \cdot 2 + 2,396 \cdot 2) = \frac{1}{2} \cdot (6,36 + 4,79) = 5,58 \%$$

Vyhodnocení chyby L

Pro výpočet relativní chyby indukčnosti bereme hodnotu stejnou jako u indukční reaktance. Ve výpočtu indukčnosti již další měřené veličiny nepoužíváme a kmitočet sítě můžeme uvažovat jako normálový.

Píšeme tedy: $\delta L = \delta X_L = 5,58 \%$

Pro indukčnost bude tedy platit:

$$\Delta L = \frac{\text{vypočtená } L}{100} \cdot \delta X_L = \frac{6,134}{100} \cdot 5,58 = 0,34 \text{ mH}$$

Můžeme tedy zapsat: $L = 6,134 \text{ mH} \pm 340 \text{ nH}$

Bezpečnost práce - zásady pro bezpečné měření ve školní laboratoři.

Závěr

Podle zadání byla změřena indukčnost vzduchové cívky přímou a nepřímou metodou. Pro přímé měření byly použity LCR měřiče, pro nepřímé měření běžné multimetry. Byla vyhodnocená přesnost měření podle parametrů použitých přístrojů.

LCR 4080	$L = 5,956 \text{ mH} \pm 76,5 \text{ nH}$
MY-6243	$L = 6,07 \text{ mH} \pm 131,4 \text{ nH}$
Ohmova metoda	$L = 6,134 \text{ mH} \pm 340 \text{ nH}$

Vyhodnocení měření přístrojem LCR 4080 vykazuje minimální odchylku a proto toto měření hodnotíme jako nejpresnější. Přímé měření druhým přístrojem

vykazuje sice chybu větší, ale i v tomto případě můžeme konstatovat, že výsledek je vyhovující.

Po vyhodnocení výsledků měření V-A metodou můžeme konstatovat, že tato metoda je bezpochyby nejpracnější. Při použití běžných multimetrů je i nejméně přesná. Měření je poměrně složité a chyba se postupnými výpočty navyšuje.

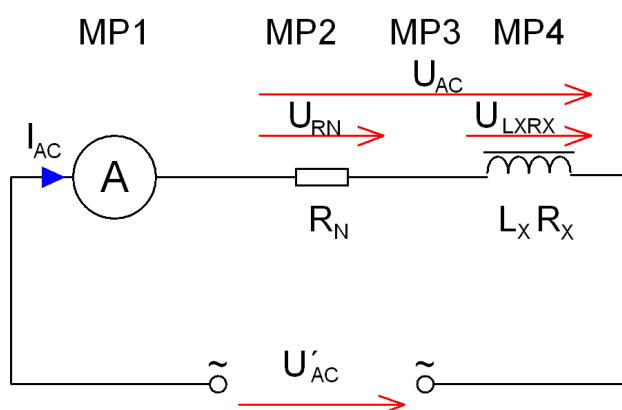
Podle výsledků přímého a nepřímého měření indukčnosti můžeme hodnotit, že speciální měřicí přístroje LCR jsou pro tato měření nejvhodnější. V-A metoda této přesnosti nedosahuje. Klasické multimetry proto nejsou vhodné pro měření náročné na přesnost.

14.2. Praktické úlohy měření vlastní indukčnosti cívky s jádrem

14.2.1. Metodou 3 voltmetrů

Cíl měření: Změřte indukčnost cívky s jádrem zadanou metodou. Vyhodnoťte přesnost měření.

Obr. 153 - Schéma měřicího obvodu



Měřicí prostředky: MP1 – CM 2703, MP2, MP3, MP4 – Metex M-3890D, dekáda Voltcraft, tlumivka s jádrem AT 40-A, zdroj U_{AC} , propojovací kablíky.

Postup měření:

1. Zapojení měřicího obvodu podle schéma.
2. Nastavení odporu dekády.
3. Měření střídavým proudem – zápis do tabulky.
4. Postupný výpočet indukčnosti cívky.
5. Výpočet chyby metody.
6. Vyhodnocení měření z hlediska zadání.

Měření:

Tabulka 38 - Naměřené a vypočtené hodnoty

Přístroj	Typ	Veličina	Přesnost	δ_1 (%)	δ_2 (%)	Naměřeno	$\Sigma\delta$ (%)	$\Delta I, U$ (mA, V)
MP1	CM 2703	I_{AC} (mA)	1,2% + 5	1,2	0,125	41,1	2,42	0,99
MP2	M-3890D	U_{RN} (V)	1,3% + 3	1,3	0,075	12,45	1,54	0,19
MP3	M-3890D	U_{AC} (V)	1,3% + 3	1,3	0,075	21,65	1,44	0,31
MP4	M-3890D	U_{LXR} (V)	1,3% + 3	1,3	0,075	15,78	1,49	0,24
DEKÁDA VOLTcraft		R_N (Ω)	0,5%			300		

Vzorce a výpočty:

Stanovení relativní chyby multimerů z parametrů výrobce:

$$\delta_1 = \text{chyba čtení (\%)}, \quad \delta_2 = \frac{\text{počet digitů chyby}}{\text{počet digitů displeje}} \cdot 100 \text{ (\%)}$$

$$\text{Relativní chyba naměřené hodnoty: } \delta = \delta_1 + \delta_2 \cdot \frac{\text{Rozsah}}{\text{Hodnota}}$$

$$\text{Absolutní chyba hodnoty – nepřímé měření: } \Delta L = \frac{L_x}{100} \cdot \delta$$

Výpočet indukčnosti měřené cívky:

$$\cos \varphi = \frac{U_{AC}^2 - U_{LXR}^2 - U_{RN}^2}{2 \cdot U_{RN} \cdot U_{LXR}} = \frac{21,65^2 - 15,78^2 - 12,45^2}{2 \cdot 12,45 \cdot 15,78} = 0,165$$

$$\varphi = 80,52^\circ \quad \text{a} \quad \text{tak} \quad \sin \varphi = 0,986$$

$$L_x = \frac{U_{LXR} \cdot \sin \varphi}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot I_{AC}} = \frac{15,78 \cdot 0,986}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,0411} = 1,205 = 1,21 \text{ H}$$

$$R_x = \frac{U_{LXR} \cdot \cos \varphi}{I_{AC}} = \frac{15,78 \cdot 0,165}{0,0411} = 0,65 \Omega$$

Odvození chyby měření L_x :

$$\delta L_x = \delta U_{LXR} + \delta I_{AC} = 1,49 + 2,42 = 2,91 \% \quad \Delta L_x = \frac{L_x}{100} \cdot \delta L_x = \frac{1,21}{100} \cdot 2,91 = 35,21 \text{ mH}$$

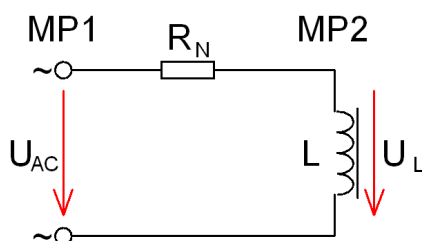
Zápis výsledků měření této metody:

indukčnost $L_x = 1,21 \text{ H} \pm 35,21 \text{ mH}$ odpor cívky $R_x = 0,65 \Omega$

14.2.2. Reaktanční metodou

Cíl měření: Provedte měření indukčnosti cívky s jádrem touto metodou. Vyhodnoťte přesnost měření.

Obr. 154 - Schéma měřicího obvodu



Měřicí prostředky: MP1, MP2 – Metex M-3890D, dekáda Voltcraft, tlumivka s jádrem AT 40-A, zdroj U_{AC} , propojovací kablíky.

Postup měření:

1. Zapojení měřicího obvodu podle schéma.
2. Nastavení odporu dekády.
3. Měření napětí U_{AC} a U_L – zápis do tabulky.
4. Výpočet indukčnosti cívky a chyby metody.
5. Zhodnocení měření z hlediska zadání.

Měření:

Tabulka 39 - Naměřené a vypočtené hodnoty

Přístroj	Typ	Veličina	Přesnost	δ_1 (%)	δ_2 (%)	Naměřeno	$\Sigma\delta$ (%)	$\Delta U, R$ (V, Ω)
MP1	M-3890D	U_{AC} (V)	1,3% + 3	1,3	0,075	21,67	1,44	0,31
MP2	M-3890D	U_L (V)	1,3% + 3	1,3	0,075	15,84	1,49	0,24
DEKÁDA VOLTcraft		R_N (Ω)	0,5%			300	0,5	1,5

Vzorce a výpočty:

Stanovení relativní chyby multimerů z parametrů výrobce:

$$\delta_1 = \text{chyba čtení (\%)}, \quad \delta_2 = \frac{\text{počet digitů chyby}}{\text{počet digitů displeje}} \cdot 100 \text{ (\%)}$$

$$\text{Relativní chyba naměřené hodnoty: } \delta = \delta_1 + \delta_2 \cdot \frac{\text{Rozsah}}{\text{Hodnota}}$$

$$\text{Absolutní chyba hodnoty – nepřímé měření: } \Delta L = \frac{L_x}{100} \cdot \delta$$

Výpočet indukčnosti:

$$L = \frac{R_N}{\omega} \cdot \frac{U_L}{\sqrt{U_{AC}^2 - U_L^2}} = \frac{300}{2 \cdot \pi \cdot 50} \cdot \frac{15,84}{\sqrt{21,67^2 - 15,84^2}} = 1,023 \text{ H}$$

Nejistota měření: (vycházíme ze vzorce výpočtu indukčnosti)

$$\begin{aligned} \delta L &= \delta L R_N + [\delta U_L + \frac{1}{2} \cdot (2 \cdot \delta U_{AC} + 2 \cdot \delta U_L)] = \\ &= 0,5 + [1,49 + \frac{1}{2} \cdot (2 \cdot 1,44 + 2 \cdot 1,49)] = 4,92 \% \end{aligned}$$

Výpočet odchylky hodnoty L_x :

$$\Delta L_x = \frac{L_x}{100} \cdot \delta L_x = \frac{1,023}{100} \cdot 4,92 = 50,33 \text{ mH}$$

Zápis výsledků měření této metody:

indukčnost $L_x = 1,023 \text{ H} \pm 50,33 \text{ mH}$

Bezpečnost práce - zásady pro bezpečné měření ve školní laboratoři.

Závěr

Podle zadání bylo provedeno měření vlastní indukčnosti cívky se železným jádrem – zářivkové tlumivky dvěma metodami. Pro měření byly použity běžné multimetry a odporová dekáda. Byla vyhodnocena přesnost měření podle parametrů použitých přístrojů.

Metoda 3 voltmetrů $L = 1,21 \text{ H} \pm 35,21 \text{ mH}$

Reaktanční metoda $L = 1,02 \text{ H} \pm 50,33 \text{ mH}$

Z pohledu výsledků se může zdát, že obě metody jsou srovnatelné. Metoda 3 voltmetrů ale umožňuje zjištění skutečné indukčnosti.

15. Měření termistorů

Termistory můžeme charakterizovat jako polovodičové součástky bez přechodu PN, jako teplotně závislé polovodičové rezistory. Vlastnosti termistorů se odvozují od druhů materiálů, ze kterých jsou vyrobené.

Rozlišujeme dva druhy termistorů:

- 1) Se záporným teplotním koeficientem – označují se NTC - při zvyšování teploty se elektrický odpor součástky snižuje.
- 2) S kladným teplotním koeficientem – označují se PTC - při rostoucí teplotě se zvyšuje i elektrický odpor součástky.

Těchto základních vlastností se využívá při použití v elektrických obvodech.

Termistory NTC

Jak už bylo zmíněno, zmenšují hodnotu vnitřního odporu při stoupající teplotě. Tato změna není lineární, ale má u typů těchto termistorů podobný průběh. Změna odporu je v souvislosti se změnou teploty poměrně velká.

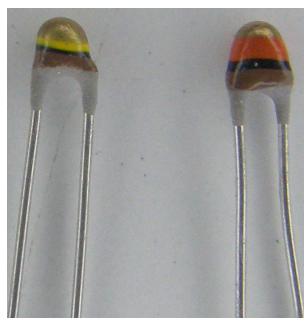
Tyto termistory jsou vyráběné z kysličníků kovů (mangan, kobalt, měď, titan, železo, nikl). Jsou používány směsi z těchto oxidů a složením směsí se určují vlastnosti těchto součástek. Provozní teploty mohou být od -200°C do 1000°C .

Výkonové zatížení termistorů je nízké, mohou pracovat jen v oblasti malých proudů. Je vždy třeba prostudovat parametry konkrétní součástky dané výrobcem. Jmenovitý odpor termistoru je většinou vztažen k teplotě 25°C .

Podle provedení rozlišujeme dva druhy termistorů NTC:

- 1) Perličkové – tělísko má tvar perličky, drátové vývody jsou radiální nebo axiální.

Obr. 155 - Perličkové termistory



- 2) S metalizovaným kontakty – mohou mít tvar tyčky, disku, terčíku, podložky.

Obr. 156 - Termistor



Povrch vývodů termistorů může být obtížněji pájitelný. Často se používají lisované spojky.

Termistory NTC se nejčastěji používají v obvodech pro snímání teploty pomocí změny odporu, V-A charakteristiky. Např. termostaty, spínání chlazení, topení, teplotní kompenzace součástek, apod.

Termistory PTC

Jsou to teplotně závislé keramické rezistory. Jak již bylo uvedeno, odpor roste spolu s teplotou. Jsou užívané pro velký nárůst odporu v určitém teplotním rozsahu.

Rozlišujeme dva druhy termistorů PTC:

- 1) Teplotně závislé křemíkové rezistory – silistory. Jsou používány k teplotní kompenzaci polovodičových součástek a sestav v obvodech. Mají téměř lineární kladnou charakteristiku.
- 2) Klasické termistory PTC. Jsou vyráběné ze sloučenin barya, olova a stroncia. Přísady jsou manganin, tantal, křemík. Zpočátku mají malý záporný koeficient, posléze velký kladný teplotní koeficient. Na konci charakteristiky se mění opět teplotní závislost na zápornou. V obvodech se využívá druhá část charakteristiky – velká kladná závislost odporu na teplotě.

Termistory PTC se používají jako čidla pro měření teplot uvnitř vinutí elektrických strojů – kontrola činnosti zařízení, polovodičové proudové pojistky pro proudy do několika A, čidla úrovně kapalin. K měření teploty se tyto termistory nepoužívají.

Obr. 157 - Pojistka PTC



Důležité parametry termistorů

Jmenovitý odpor – jak bylo zmíněno, udává se při teplotě 25°C.

Maximální zatížitelnost – nejvyšší dovolená hodnota příkonu při teplotě 25°C.

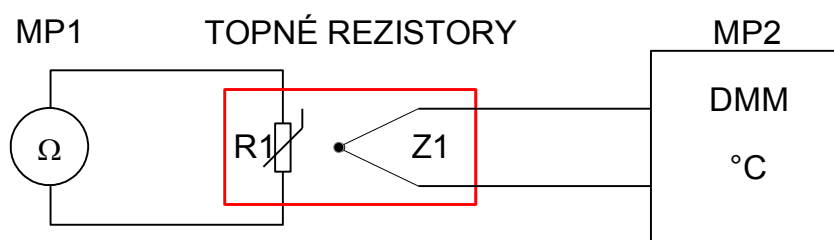
Teplotní časová konstanta – zjednodušeně řečeno - doba, kterou termistor potřebuje vyrovnání vlastní vnitřní teploty s teplotou okolí.

Maximální provozní teplota – nejvyšší teplota, při které může být termistor použitý, při které je ještě zaručená stabilita parametrů.

15.1. Praktické měření charakteristiky termistorů NTC

Zadání: Provedte měření závislosti odporu termistorů NTC na změně oteplení v teplotním rozsahu 0°C – 130°C. Nastavujte postupně hodnotu teploty a odečítejte odpor. Změřené hodnoty запиšte do tabulky. Vytvořte grafy změřených charakteristik.

Obr. 158 - Schema zapojení obvodu



1) Měřicí prostředky: R1 - Tyčkový termistor s metalizovanými kontakty, Z1 – termočlánek, sestava topných rezistorů, MP1 – Ohmmetr Metex M-3890D, MP2 – teploměr Metex M-3890D, zdroj U_{DC} pro topení, spojovací materiál.

Postup měření:

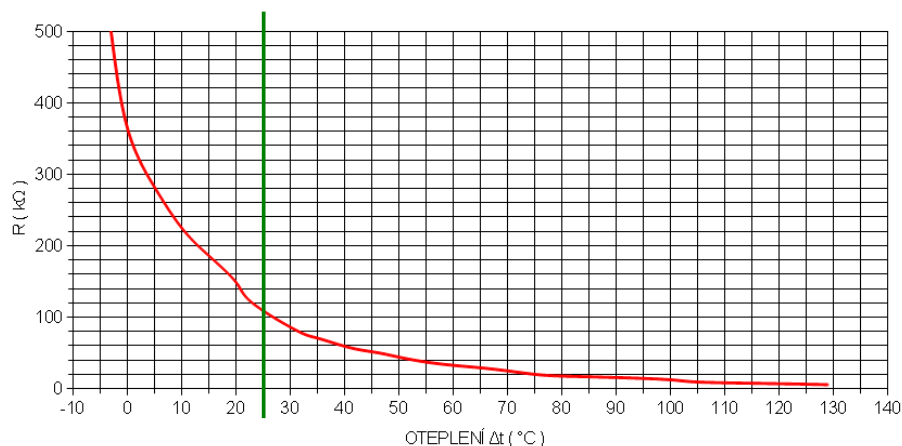
- 1) Výběr přístrojů.
- 2) Sestavení obvodu.
- 3) Postupné nastavování teplot, měření odporu a zápis hodnot.
- 4) Graf.
- 5) Posouzení naměřených hodnot s údaji výrobce.

Tabulka a graf:

Tabulka 40 - Naměřené hodnoty

Teplota ($^{\circ}\text{C}$)	-3	0	5	10	15	20	23	31	35	41	46	51	58	67	75	83	97	103	109	120	129
R (k Ω)	500,00	365,00	282,00	225,00	186,00	149,00	120,00	82,00	70,70	57,30	50,40	42,50	34,20	27,60	20,00	16,97	13,70	10,24	8,31	6,89	5,47

Obr. 159 - Graf



Bezpečnost práce: Během měření dát pozor na spálení o horké součástky.

Závěr: U měřené součástky pro teplotu $25^{\circ}C$ byl odvozený odpor $105 k\Omega$.

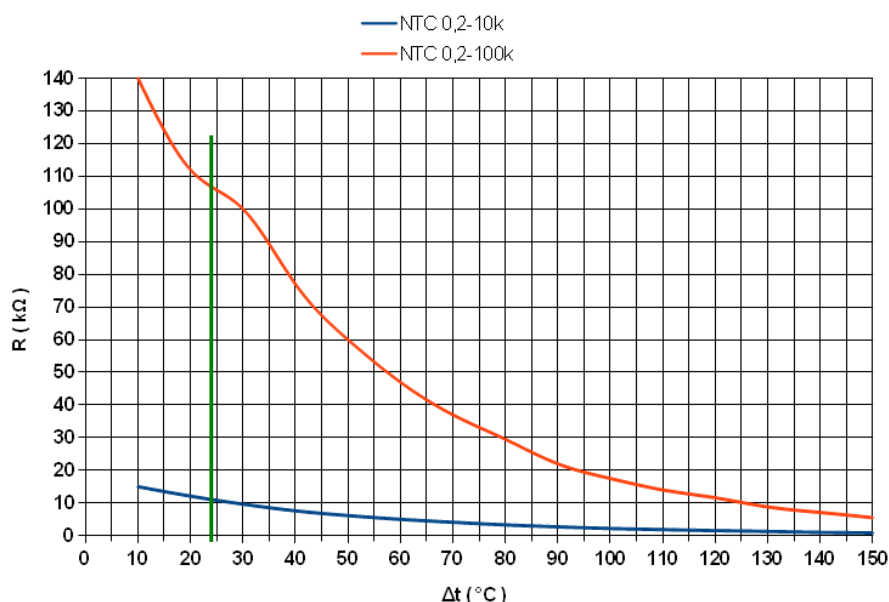
2) Měřicí prostředky: Perličkové termistory, ostatní stejné jako u předchozí úlohy.

Tabulka a graf:

Tabulka 41 - Naměřené hodnoty

	Δt ($^{\circ}C$)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
NTC 0,2-10k	R ($k\Omega$)	15	12,1	9,65	7,6	6,15	5	4,1	3,3	2,7	2,2	1,85	1,55	1,29	1,01	0,85
NTC 0,2-100k	R ($k\Omega$)	140	112	100	77	60	47	37	29,5	22	17,5	14	11,6	8,8	7,1	5,5

Obr. 160 - Graf



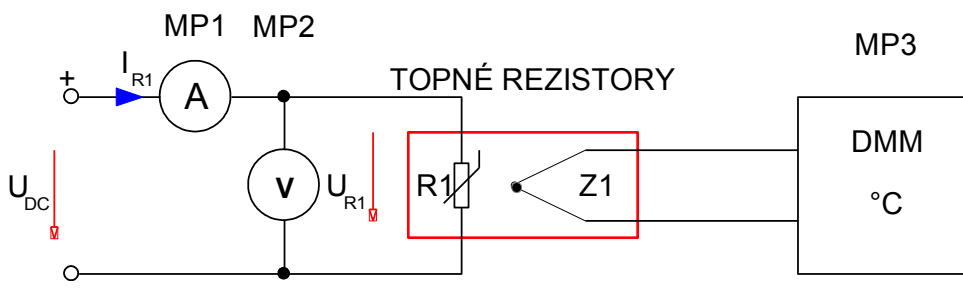
Závěr: U měřených součástek při teplotě $25^{\circ}C$ byl odvozený odpor:

U termistoru NTC 0,2-10k se jedná o hodnotu: $10 k\Omega$, u NTC 0,2-100k o hodnotu: $105 k\Omega$. Podle katalogových údajů naměřené hodnoty jsou v toleranci výrobce.

15.2. Praktické měření vlastností termistoru PTC

Zadání: Provedte měření vztahu odporu a proudu termistoru PTC, zapojeného jako proudová pojistka. Postupně zvyšujte proud termistorem a odečítejte hodnoty odporu, napětí a teploty. Zachyťte stav zlomu, kdy odpor prudce stoupne a omezí proud obvodem. Změřené hodnoty zapisujte do tabulky. Vytvořte grafy měřených jevů.

Obr. 161 - Schema zkušebního obvodu



Měřicí prostředky: R1 – Termistor PTC - , Z1 – termočlánek, sestava topných rezistorů, MP1 – Ohmmetr Metex M-3890D, MP2 – teploměr Metex M-3890D, zdroj U_{DC} pro topení, spojovací materiál.

Postup měření:

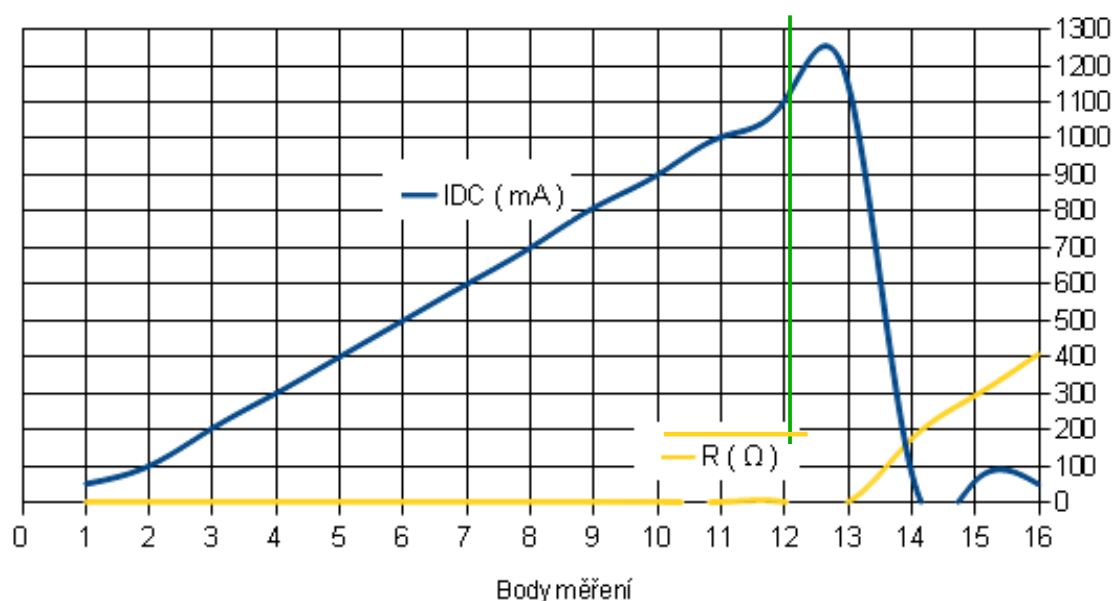
1. Výběr vhodných přístrojů z hlediska požadavků zadání.
2. Zapojení měřicího obvodu.
3. Postupné nastavování proudu, měření napětí a teploty, zápis hodnot.
4. Dopočítání odporu.
5. Graf závislosti odporu a teploty na proudu.
6. Posouzení naměřených hodnot s údaji výrobce.

Tabulka a graf:

Tabulka 42 - Naměřené hodnoty

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
I_{R1} (mA)	50	100	204	300	400	500	600	700	810	900	1004	1104	1150	81	58	49
U_{R1} (V)	0,04	0,08	0,17	0,25	0,34	0,44	0,54	0,65	0,67	0,76	0,884	1,014	1,2	14,1	17	20
R (Ω)	0,8	0,84	0,81	0,84	0,85	0,87	0,9	0,93	0,83	0,85	0,881	0,919	1,044	174	293	408
Δt ($^{\circ}\text{C}$)	23	23	24	25	27	28	31	33	38	42	47	54	61	87	95	96

Obr. 162 - Graf - závislost odporu na proudu



Závěr: Při postupném zvyšování proudu pojistkou se její odpor prakticky nemění a zůstává na nízké hodnotě. Pojistka v obvodu představuje minimální odpor. Při dosažení jmenovité hodnoty se odpor skokem zvýší a dojde k prudkému omezení proudu. Obvodem pak protéká minimální proud. Pro správné využití pojistky je nutné dodržet hodnoty výrobce.

Pozor: Nedojde k přerušení obvodu!! Po snížení teploty se hodnoty vrátí do původního stavu!

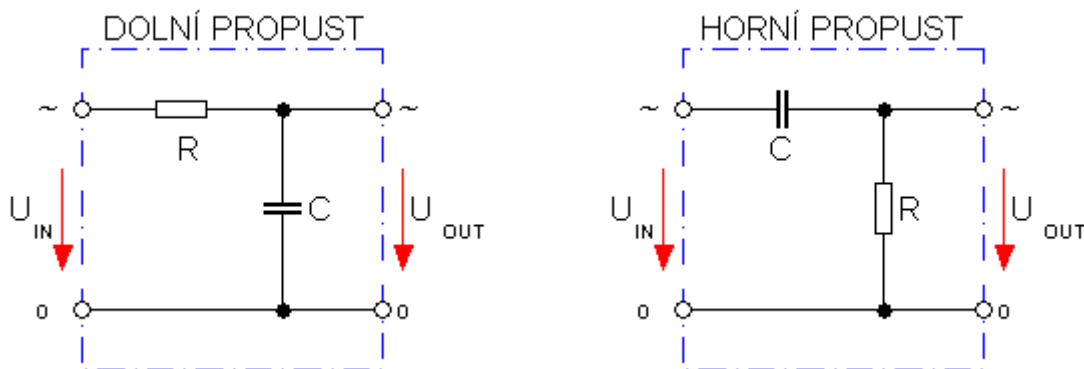
16. Měření RC členů – dolní, horní, pásmová propust

Mezi nejjednodušší RC členy patří tzv. poločlánky, které jsou složeny pouze ze 2 součástek, rezistoru a kondenzátoru. Proto je nazýváme členy RC. Protože kmitočtově závislá je pouze **jedna** součástka (kondenzátor) a na výstupu se mění napětí vždy o 20 dB / dekádu, jedná se o členy „**1. řádu**“. Vždy je jedna ze součástek zapojená v sérii (v cestě signálu) a druhá paralelně k výstupu členu. Složitější členy obsahují rezistorů a kondenzátorů několik, např. Wienův článek, T článek, Π článek, aj. Pokud člen obsahuje 2 kondenzátory a 2 rezistory, jedná se již o člen 2. řádu.

Mezi poločlánky patří **dolní propust** - propouští stejnosměrný proud a nižší kmitočty, vyšší zadržuje a **horní propust**, která stejnosměrné napětí a nižší kmitočty zadržuje, propouští naopak kmitočty vyšší. Určující kmitočet propustí je tzv. **kmitočet mezní**.

16.1. RC členy 1. řádu

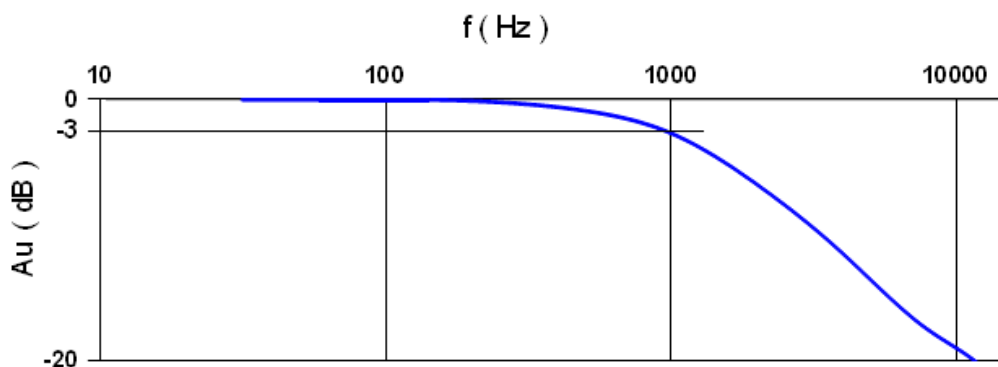
Obr. 163 - Schéma zapojení propustí 1. řádu



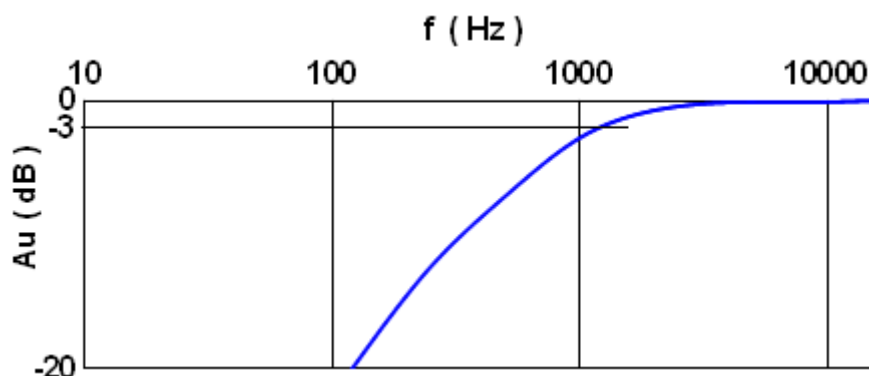
Charakteristické vlastnosti těchto propustí:

Oba obvody můžeme chápat jako čtyřpól nebo dvojbran. Vstupní strana - napětí proti zemi a rovněž tak strana výstupní.

Obr. 164 - Příklad přenosové charakteristiky dolní propusti



Obr. 165 - Příklad přenosové charakteristiky horní propusti



Mezní kmitočet - je to frekvence, při kterém dojde k poklesu přenosu o **3 dB**. Značí se většinou f_M , jinak též f_D , f_0 f_C . To znamená, že v tomto okamžiku na výstupu propusti je napětí $(1/\sqrt{2})$ x menší, než vstupní. Nebo jinak, klesne na 0,707 napětí vstupního.

Při mezním kmitočtu tedy platí:

$$U_{OUT} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot U_{IN} \quad \text{nebo} \quad U_{OUT} = 0,707 \cdot U_{IN}$$

Od hodnoty f_M (zisk - $A_u = -3\text{dB}$) se přenos mění se strmostí -20 dB/dekádu.

Vztah pro určení mezního kmitočtu pro danou propust:

$$f_M = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C}$$

U dolní propusti se výstupní napětí pozdívá za vstupním $\rightarrow \varphi = 0^\circ$ až -90° .

Při kmitočtu o dekádu nižším ($f_M/10$) je výstupní a vstupní napětí ve fázi $\rightarrow \varphi = 0^\circ$.

Při mezním kmitočtu se výstupní napětí zpozdí za vstupním o $45^\circ \rightarrow (\varphi = -45^\circ)$.

Při kmitočtu o dekádu vyšším ($f_M \cdot 10$) se zpoždění zvyšuje na $90^\circ \rightarrow \varphi = -90^\circ$.

U horní propusti výstupní napětí předbíhá vstupní $\rightarrow \varphi = 90^\circ$ až 0° .

Při kmitočtu o dekádu nižším ($f_M/10$) výstupní napětí předbíhá vstupní o 90°

$\rightarrow \varphi = 90^\circ$.

Při mezním kmitočtu výstupní napětí předbíhá vstupní o $45^\circ \rightarrow (\varphi = 45^\circ)$.

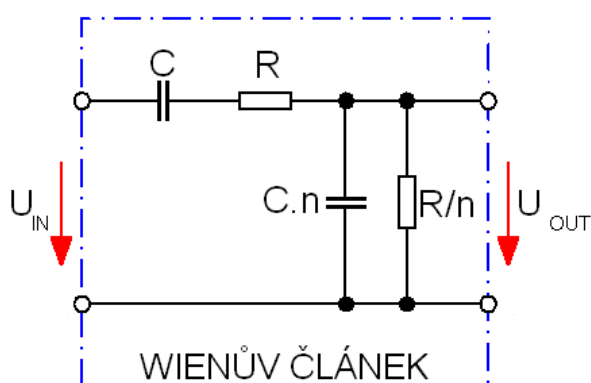
Při kmitočtu o dekádu vyšším ($f_M \cdot 10$) je výstupní napětí se vstupním ve fázi

$\rightarrow \varphi = 0^\circ$.

16.2. RC členy 2. řádu – Wienův článek

Tento článek patří mezi složitější RC členy. Je složený ze 2 rezistorů a 2 kondenzátorů. Tento článek ve své podstatě vzniká složením dolní a horní propusti a tedy i v tomto případě dochází ke změně výstupního napětí o 20 dB / dekádu. Prakticky tedy tvoří pásmovou propust RC.

Obr. 166 - Schéma zapojení



Jestliže n -násobek je roven 1 ($n = 1$), oba rezistory mají stejný odpor a kondenzátory stejnou kapacitu. Tento stav se považuje za neoptimálnější. Oproti jednoduchým RC členům dochází při mezním kmitočtu k většímu poklesu zisku - cca na $1/3$ vstupního napětí, tj. $A_U = -9,5$ dB. Fázový posun je v tomto okamžiku 0° . Šířku pásma „B“ určuje pokles zisku o -3 dB. Dále se přenos zmenšuje o -20 dB/dekádu. Body, které vyznačují přenos $A_U = -3$ dB, určují šířku pásma filtru B. Úpravu přenosu lze provést změnou hodnot označených součástek n -násobkem. Lze zmenšit pokles zisku při mezním kmitočtu, ovšem za cenu rozšíření pásma filtru. Zúžení pásma je zase "zapláceno" vysokým úbytkem zisku.

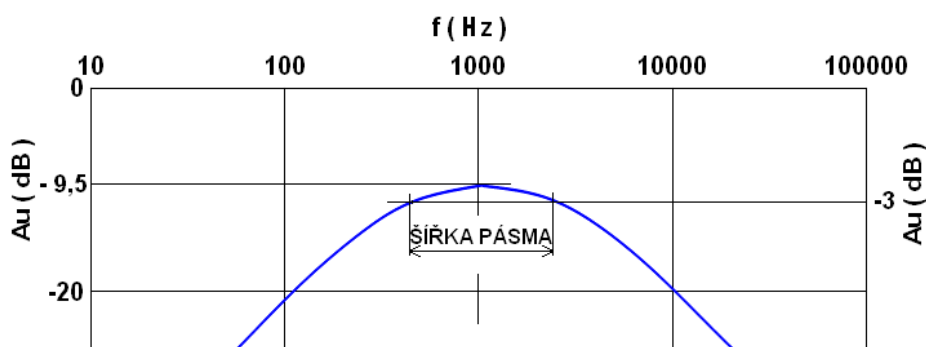
Vztah pro určení mezního kmitočtu pro danou propust je stejný:

$$f_M = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C}$$

Výpočet šířky pásma: $B = (2 + n - 1) \cdot f_M$

Pro kmitočty nižší než f_M se Wienův článek projevuje jako horní propust - výstupní napětí předbíhá vstupní. Se zvyšováním kmitočtu se fázový posun se zmenšuje a blíží se k 0° . V této fázi má úhel φ kladnou hodnotu (až 90°). Při mezním kmitočtu je výstup a vstup ve fázi ($\varphi = 0^\circ$). Při kmitočtech vyšších než f_M se článek chová jako dolní propust - výstupní napětí se za vstupním zpožďuje. Při dalším zvyšování kmitočtu se fázový posun zvětšuje. V této fázi bude mít úhel φ zápornou hodnotu - (až -90°).

Obr. 167 - Příklad přenosové charakteristiky Wienova članku



Vlastnosti členů:

Strmost je dalším určujícím údajem. Jak už bylo řečeno, vyjadřuje se v dB/dekádu nebo v dB/oktávu. To znamená změnu přenosu n_f napětí za příslušnou propustí. Posuzuje se od hodnoty přenosu -3 dB. Od této velikosti zisku výstupní napětí z příslušné propusti musí klesat nebo růst v souladu s určenou strmostí.

Přenos – u RC členů se jedná o poměr napětí na výstupu členu oproti vstupu. Protože dochází k útlumu, má zápornou hodnotu. Vyjadřuje se značkou **A** a protože v naprosté většině případů se jedná o vztahy vstupního a výstupního napětí, doplňujeme index u (**A_u**). Poměr napětí přepočítáme v **dB**.

Přenos členu: (zisk): (udává se v -dB)

$$A_u = 20 \cdot \log \frac{U_{OUT}}{U_{IN}} \quad [-dB, V, V]$$

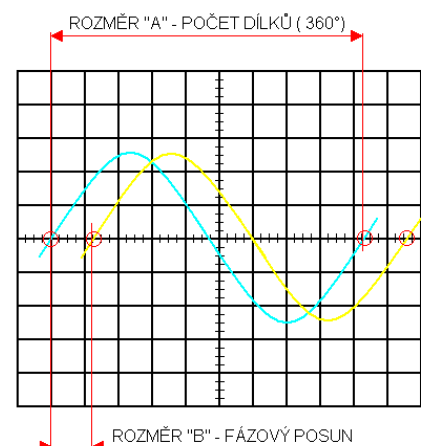
Dekáda - kmitočet 10x vyšší nebo 10x nižší, než kmitočet mezní.

Můžeme se také zmínit o **oktávě**. Uvažujeme-li kmitočet o oktávu vyšší, je dvojnásobný. Je-li o oktávu nižší, je poloviční.

Současně se změnou zisku se posouvá výstupní napětí oproti vstupnímu. Tento jev se nazývá **fázový posun** a označuje se ϕ . Udává se ve $^\circ$.

Fázový posun lze změřit nejsnáze na dvoukanálovém osciloskopu. Na stínítku vidíme průběhy obou kanálů pod sebou. Pomocí svislých rysek rastru stanovíme počet dílků (doporučují se malé) mezi vrcholy period a přepočítáme na $^\circ$. Vycházíme ze skutečnosti, že 1 perioda je 360° .

Obr. 168 - Princip měření fázového posunu v režimu X-T



Z obrazovky (LCD displeje) odečteme počet dílků sinusovky na vstupu X – hodnota A. Dále určíme o kolik dílků je posunutá sinusovka na vstupu CH2 vůči vstupu CH1 – hodnota B.

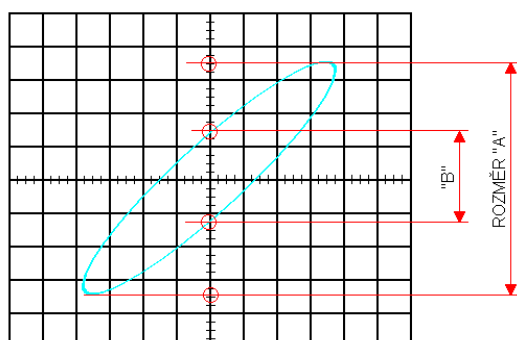
$$\text{Dopočítáme: } \varphi = \frac{360^\circ}{A} \cdot B$$

Během měření je velmi dobře možné sledovat, jak se výstup oproti vstupu posouvá. Zda se výstupní napětí opoždí za vstupním, či naopak předbíhá.

Na jednobanýlovém osciloskopu už to tak jednoduché není. Je nutné použít režim XY. Zobrazí se většinou různě velká elipsa, která přechází od téměř přímky ($\varphi = 0^\circ$) ke kruhu ($\varphi = 90^\circ$). Pro úhel $\varphi = 45^\circ$ by to měla být elipsa, pro $\varphi = 90^\circ$ kruh. Předpokládá se stejný zisk u horizontálního i vertikálního zesilovače osciloskopu. Protože tento stav je většinou nemožný, bývá kruh „zmáčknutý“. Pro odvození souřadnic obrazu to však nevadí. Přesnost měření je nejvíce ovlivněná pečlivostí pozorovatele. Elipsu je nutné přesně vystředit na rastru, zde podle osy „y“.

Pro RC členy 1. řádu musí stopa na osciloskopu stoupat šikmo doprava - (1. kvadrant) - tzn. úhel $0 - 90^\circ$.

Obr. 169 - Princip měření fázového posunu v režimu X-Y



$$\text{fázový posun} - \sin \varphi = \frac{B}{A} \Rightarrow \varphi = \arcsin \varphi$$

Při přepočtu $\sin \varphi$ na $^\circ$ je nutné respektovat postup výpočtu daný používaným kalkulátorem nebo tabulkovým editorem.

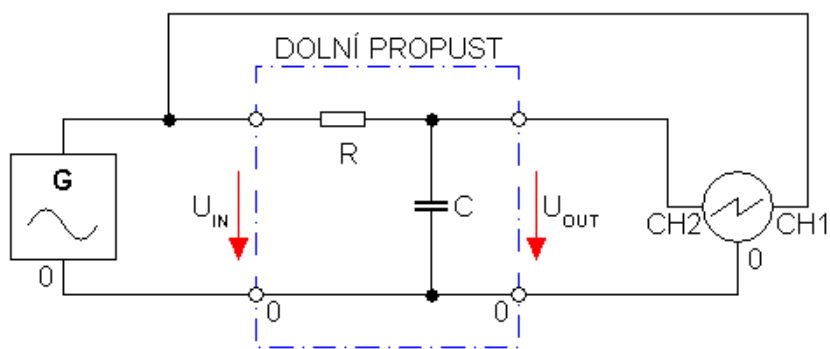
16.3. Měření přenosu RC členu 1. řádu – dolní propust

Postup měření:

- 1) zadání (cíl) úlohy
- 2) schéma zapojení obvodu
- 3) seznam použitých měřicích prostředků
- 4) měření zadaných součástek a výpočet parametrů RC členu
- 5) sestavení členu a zapojení měřicího obvodu
- 6) měření a záznam naměřených hodnot pro přenosovou a fázovou charakteristiku
- 7) sestavení grafů obou charakteristik
- 8) závěrem porovnat vypočtené a naměřené hodnoty

Cíl měření: Provedte výpočet f_M RC členu ze zadaných součástek. Změřte přenosovou a fázovou charakteristiku RC členu v kmitočtovém pásmu 20 – 30 000 Hz. Sestrojte grafy přenosové a fázové charakteristiky. Porovnejte vypočtené a naměřené hodnoty.

Obr. 170 - Schéma zapojení obvodu



Měřicí prostředky: Funkční generátor UTG9000A, osciloskop UNI-T UTD 2000, součástky RC členu, osciloskopické sondy, kabel redukce BNC/krokosvorky.

Vzorce, výpočty:

Měření: $R = 2\,198\,\Omega$, $C = 67,8\,\text{nF}$

Výpočet mezního kmitočtu:

$$f_M = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 2198 \cdot 0,0000000678} = 1080\,\text{Hz}$$

$$\text{Přenos členu } A_U = 20 \cdot \log \frac{U_{\text{OUT}}}{U_{\text{IN}}}$$

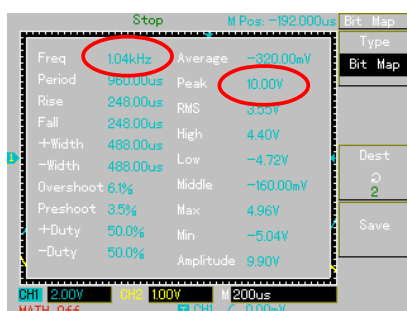
fázový posun $\varphi = \frac{360^\circ}{\text{rozměr sinusovky} - \mathbf{A} \text{ (dílky)}} \cdot \text{posun X oproti Y} - \mathbf{B} \text{ (dílky)}$

Měření:

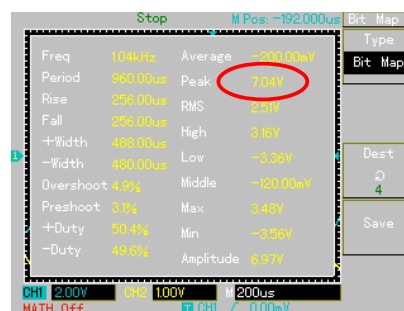
Kontrolní měření RC členu při mezním kmitočtu - f_M :

Měřený mezní kmitočet: $f_M = 1040 \text{ Hz}$

Obr. 171 - Panel vstupu CH1 – U_{IN}

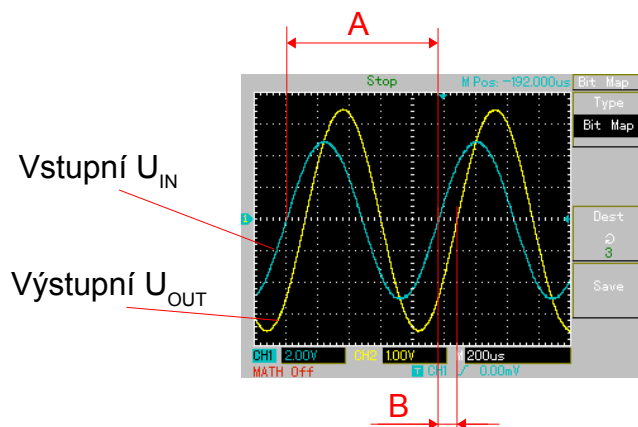


Obr. 172 - Panel vstupu CH2 – U_{OUT}



Kontrolní výpočet přenosu členu: $A_u = 20 \cdot \log \frac{U_{OUT}}{U_{IN}} = 20 \cdot \log \frac{7,04}{10} = -3,049 \text{ dB}$

Obr. 173 - Panel LCD panelu – fázový posun



Kontrolní výpočet fázového posunu $\varphi = \frac{360^\circ}{\mathbf{A} \text{ (dílky)}} \cdot \mathbf{B} \text{ (dílky)} = \frac{360^\circ}{24} \cdot -3 = -45^\circ$

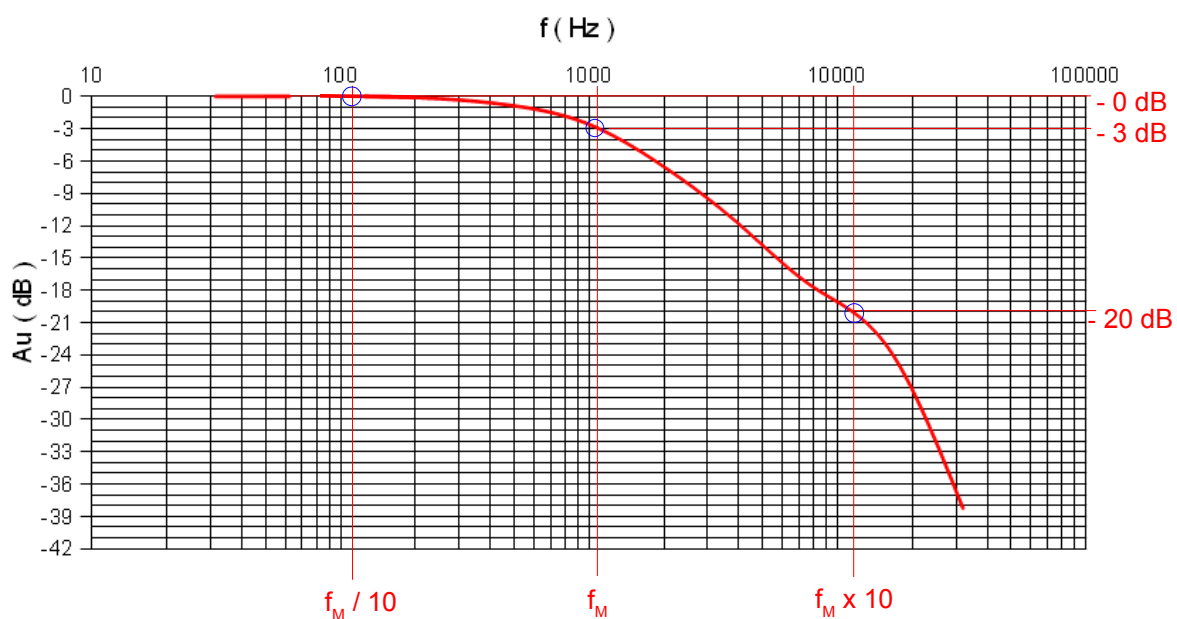
Protože napětí U_{OUT} se vůči napětí U_{IN} pozdí, je hodnota fázového posunu záporná.

Tabulka a grafy:

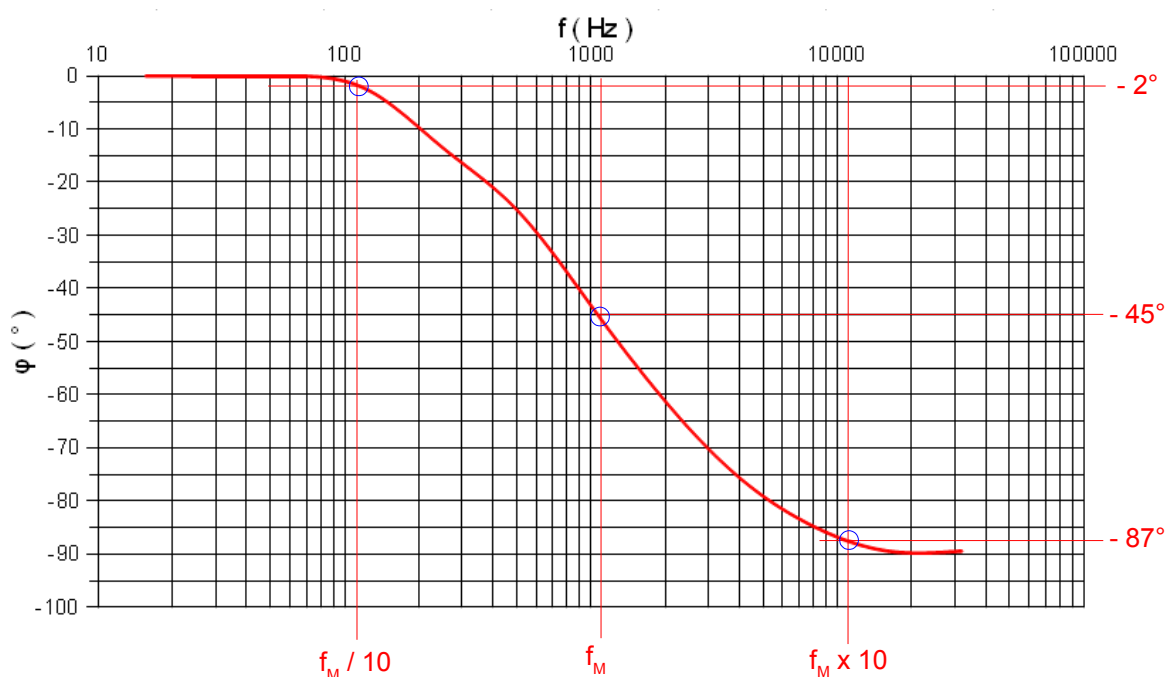
Tabulka 43 - Měření dolní propusti

f (Hz)	U_{IN} (V)	U_{OUT} (V)	A_U (dB)	A	B	φ (°)
15,600	10,000	10,000	0,000	32,000	0,000	0,000
31,250	10,000	10,000	0,000	32,000	0,000	0,000
62,500	10,000	10,000	0,000	40,000	0,250	-2,250
125,000	10,000	10,000	0,000	40,000	1,000	-9,000
250,000	10,080	9,840	-0,209	40,000	1,500	-13,500
500,000	10,080	9,120	-0,869	50,000	3,500	-25,200
1000,000	9,920	7,360	-2,593	50,000	6,000	-43,200
2000,000	9,840	4,640	-6,530	50,000	8,500	-61,200
4000,000	9,840	2,520	-11,832	25,000	5,250	-75,600
8000,000	9,840	1,280	-17,716	31,000	7,100	-82,452
16000,000	9,840	0,668	-23,364	31,000	7,500	-87,097
32000,000	9,840	0,120	-38,276	31,000	7,500	-87,097

Obr. 174 - Přenosová charakteristika



Obr. 175 - Fázová charakteristika



Bezpečnost práce při měření: (podle zásad laboratoře elektrického měření)

Závěr:

Měřením součástek bylo zjištěno: **$R = 2\,198\,\Omega$, $C = 67,8\,\text{nF}$**

Výpočet mezního kmitočtu: **1080 Hz**

V kmitočtovém pásmu bylo provedeno měření kmitočtové a fázové charakteristiky v rozsahu 15,6 – 32 000 Hz. Naměřené hodnoty byly zapsané do tabulky.

Na základě naměřených hodnot byl dopočítaný přenos, fázový posun a byly zkonstruované grafy obou funkcí. V grafech byly vyznačené hlavní rozlišovací body.

Bylo naměřeno: **$f_M = 1040\,\text{Hz}$.**

Při $f_M \rightarrow A_U = -3\,\text{dB}$.

Při $f_M/10 \rightarrow A_U = 0\,\text{dB}$.

Při $f_M \times 10 \rightarrow A_U = -20\,\text{dB}$.

Při $f_M \rightarrow \varphi = -45^\circ$.

Při $f_M/10 \rightarrow \varphi = -2^\circ$.

Při $f_M \times 10 \rightarrow \varphi = -87^\circ$.

Lze konstatovat, že naměřené hodnoty odpovídají předpokladům. Drobné nesrovnalosti můžeme zanedbat. Chyba je způsobena nezapočítaným vnitřním odporem ($50\,\Omega$) generátoru a kapacitou kabelu a vstupu osciloskopu.

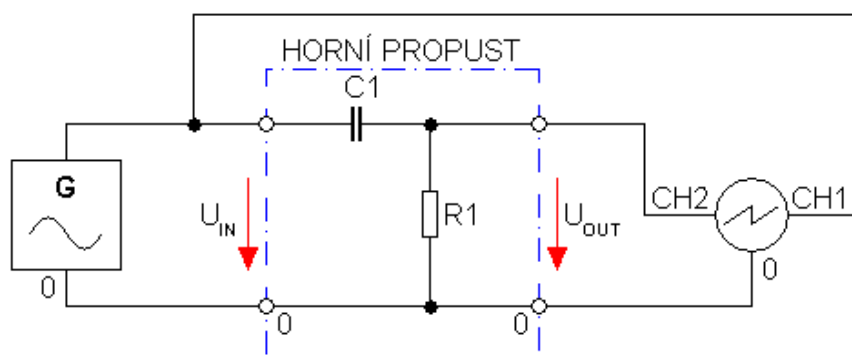
16.4. Měření přenosu RC členu 1. řádu – horní propust

Postup měření:

- 1) zadání (cíl) úlohy
- 2) schéma zapojení obvodu
- 3) seznam použitých měřicích prostředků
- 4) měření zadaných součástek a výpočet parametrů RC členu
- 5) sestavení členu a zapojení měřicího obvodu
- 6) měření a záznam naměřených hodnot pro přenosovou a fázovou charakteristiku
- 7) sestavení grafů obou charakteristik
- 8) závěrem porovnat vypočtené a naměřené hodnoty

Cíl měření: Provedte výpočet f_M RC členu – horní propusti ze zadaného rezistoru a kondenzátoru. Změřte přenosovou a fázovou charakteristiku RC členu v kmitočtovém pásmu, minimálně v rozsahu 20 – 30 000 Hz. Sestrojte grafy přenosové a fázové charakteristiky. Porovnejte vypočtené a naměřené hodnoty.

Obr. 176 - Schéma zapojení měřicího obvodu



Měřicí prostředky: Funkční generátor UTG9000A, osciloskop UNI-T UTD 2000, součástky RC členu, osciloskopické sondy, kabel redukce BNC/ krokosvorky.

Vzorce, výpočty:

Měření: $R = 2\,689\,\Omega$, $C = 67,8\,\text{nF}$

Výpočet mezního kmitočtu:

$$f_M = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 2198 \cdot 0,0000000678} = 872,97\,\text{Hz}$$

$$\text{Přenos členu } A_U = 20 \cdot \log \frac{U_{\text{OUT}}}{U_{\text{IN}}}$$

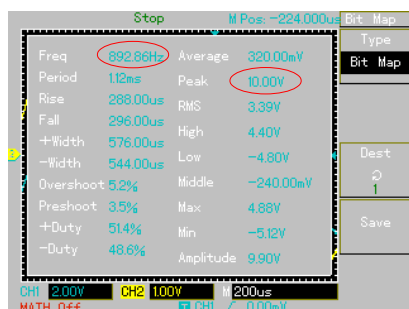
fázový posun $\varphi = \frac{360^\circ}{\text{rozměr sinusovky} - \mathbf{A} \text{ (dílky)}} \cdot \text{posun X oproti Y} - \mathbf{B} \text{ (dílky)}$

Měření:

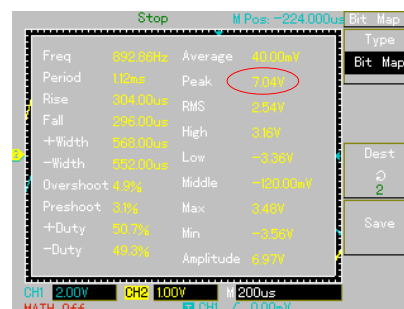
Kontrolní měření RC členu při mezním kmitočtu – f_M :

Měřený mezní kmitočet: $f_M = 892,86 \text{ Hz}$

Obr. 177 - Panel vstupu CH1 – U_{IN}

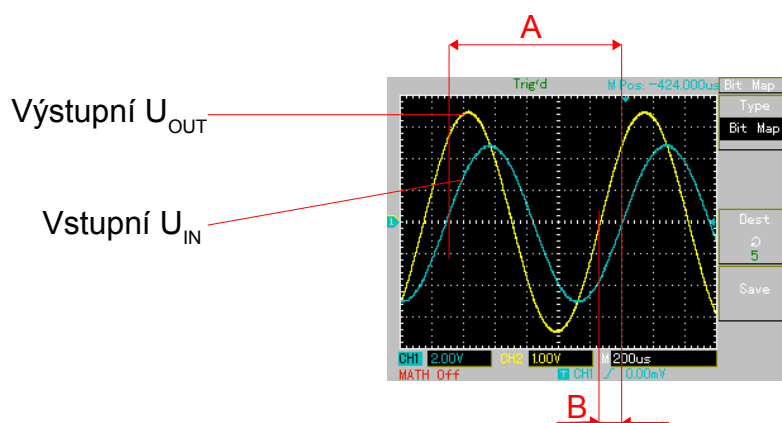


Obr. 178 - Panel vstupu CH2 – U_{OUT}



Kontrolní výpočet přenosu členu: $A_u = 20 \cdot \log \frac{U_{OUT}}{U_{IN}} = 20 \cdot \log \frac{7,04}{10} = -3,049 \text{ dB}$

Obr. 179 - Režim X-T měření fázového posuvu



Kontrolní výpočet fázového posuvu $\varphi = \frac{360^\circ}{\mathbf{A}} \cdot \mathbf{B} = \frac{360^\circ}{27,6} \cdot 3,5 = 45,7^\circ$

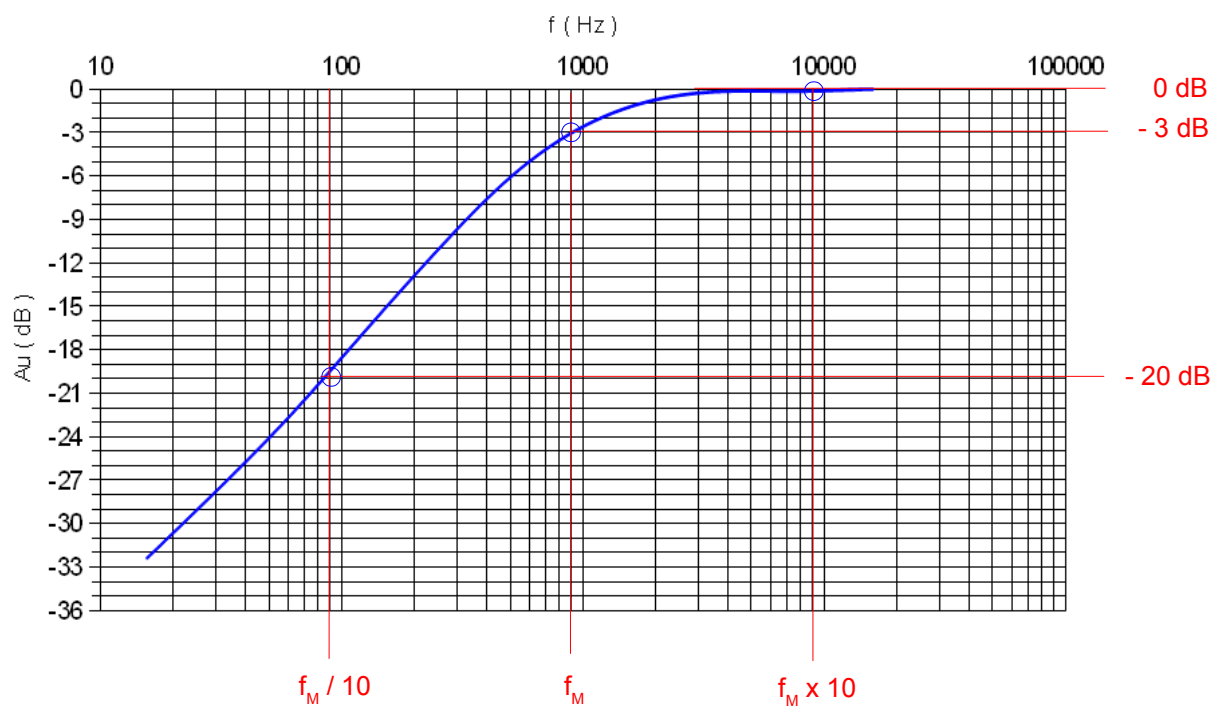
V tomto případě napětí U_{OUT} předbíhá napětí U_{IN} , proto je hodnota fázového posuvu kladná.

Tabulky a grafy:

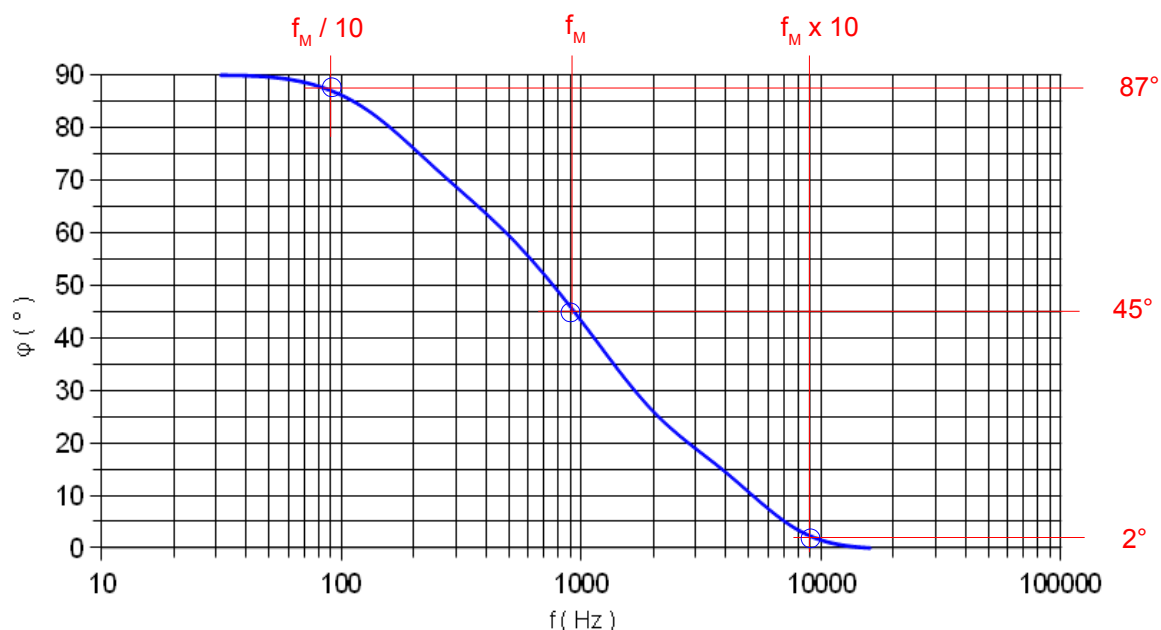
Tabulka 44 - Přenosová a fázová charakteristika

f (Hz)	U_{IN} (V)	U_{OUT} (V)	A_U (dB)	A	B	φ (°)
15,600	10,080	0,242	-32,393	32,000	8,000	90,000
31,250	10,080	0,424	-27,522	32,000	8,000	90,000
62,500	10,000	0,760	-22,384	40,000	9,900	89,100
125,000	10,000	1,460	-16,713	40,000	9,300	83,700
250,000	10,000	2,780	-11,119	40,000	8,000	72,000
500,000	10,000	4,960	-6,090	20,000	3,300	59,400
1000,000	9,920	7,360	-2,593	25,000	3,000	43,200
2000,000	9,920	9,120	-0,730	25,000	1,800	25,920
4000,000	9,840	9,680	-0,142	25,000	1,000	14,400
8000,000	9,840	9,680	-0,142	31,500	0,300	3,429
16000,000	9,840	9,840	0,000	31,500	0,000	0,000
32000,000	9,840	9,840	0,000	31,500	0,000	0,000

Obr. 180 - Přenosová charakteristika



Obr. 181 - Fázová charakteristika



Grafy odpovídají předpokladům.

Bezpečnost práce při měření: (podle zásad v elektrolaboratoři)

Závěr:

Měřením součástek bylo zjištěno: **$R = 2\,689\,\Omega$, $C = 67,8\,\text{nF}$**

Výpočet mezního kmitočtu: **872,97 Hz**

V kmitočtovém pásmu 15,6 – 32 000 Hz bylo provedeno měření kmitočtové a fázové charakteristiky. Naměřené hodnoty byly zapsané do tabulky. Na základě naměřených hodnot byl dopočítaný přenos, fázový posun a byly zkonstruované grafy obou funkcí. V grafech byly vyznačené hlavní rozlišovací body.

Bylo naměřeno: **$f_M = 892,86\,\text{Hz}$.**

Při $f_M \rightarrow A_U = -3\,\text{dB}$.

Při $f_M/10 \rightarrow A_U = 0\,\text{dB}$.

Při $f_M \times 10 \rightarrow A_U = -20\,\text{dB}$.

Při $f_M \rightarrow \varphi = 45^\circ$.

Při $f_M/10 \rightarrow \varphi = 2^\circ$.

Při $f_M \times 10 \rightarrow \varphi = 87^\circ$.

Z vypočítaných a naměřených a lze konstatovat, že naměřené hodnoty odpovídají předpokladům. Drobné nesrovnalosti můžeme zanedbat. Vstupní odpor osciloskopu je paralelně k R a ovlivňuje výsledek. Projevuje se vliv DP, kterou tvoří vnitřní odpor generátoru a zatěžovací kapacita.

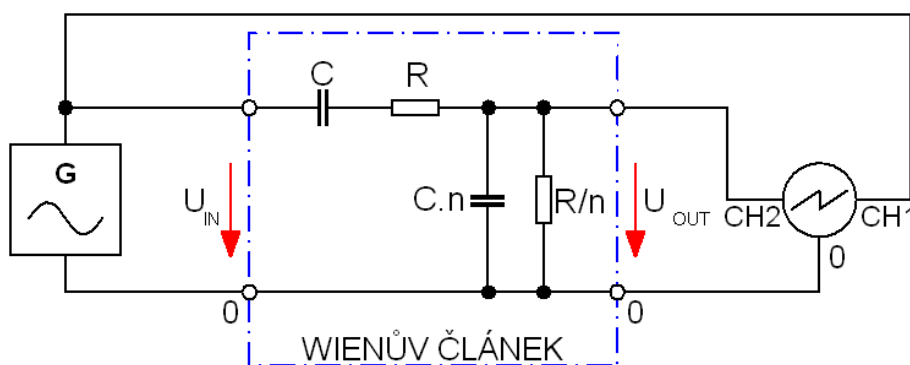
16.5. Měření přenosu RC členu 2. řádu – Wienův článek

Postup měření:

- 1) zadání (cíl) úlohy
- 2) schéma zapojení článku
- 3) použité měřicí přístroje a pomůcky
- 4) měření zadaných součástek a výpočet parametrů
- 5) sestavení obvodu
- 6) měření a záznam naměřených hodnot pro přenosovou a fázovou charakteristiku
- 7) sestavení grafů obou charakteristik
- 8) porovnání vypočtených a naměřených hodnot

Cíl měření: Provedte výpočet f_M Wienova článku ze zadaných součástek. Vypočtete šířku pásma. Změřte přenosovou a fázovou charakteristiku RC členu v kmitočtovém pásmu 20 – 30 000 Hz. Sestrojte grafy přenosové a fázové charakteristiky. Porovnejte vypočtené a naměřené hodnoty.

Obr. 182 - Schéma zapojení



Měřicí prostředky: Funkční generátor UTG9000A, osciloskop UNI-T UTD 2000, součástky pro sestavení článku, osciloskopické sondy, kabel redukce BNC/krokosvorky.

Vzorce, výpočty:

Výpočet mezního kmitočtu: $f_M = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C}$ [Hz, Ω , F] Předpoklad $A_U = -9,5$ dB

Výpočet šířky pásma: $B = (2 + n - 1) \cdot f_M$ [Hz] Ohraničené přenosem $A_U = -3$ dB

Výpočet přenosu: $A_U = 20 \cdot \log \frac{U_{IN}}{U_{OUT}}$ [dB, V, V] při f_M

fázový posun $\varphi = \frac{360^\circ}{\text{rozměr sinusovky} - \mathbf{A} \text{ (dílky)}} \cdot \text{posun X oproti Y} - \mathbf{B} \text{ (dílky)}$

Měření součástek: $R = 2\,196\,\Omega$, $C = 67,4\,\text{nF}$, $R/n = 2\,198\,\Omega$, $C \cdot n = 67,7\,\text{nF}$
Hodnoty odporů a kapacit můžeme považovat za stejné, n -násobek = 1

Předpokládané hodnoty členu:

Výpočet mezního kmitočtu:

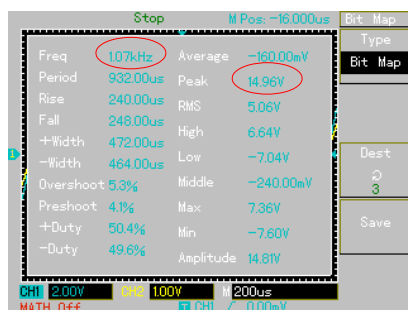
$$f_M = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 2196 \cdot 0,0000000674} = 1075\,\text{Hz}$$

Výpočet šířky pásma:

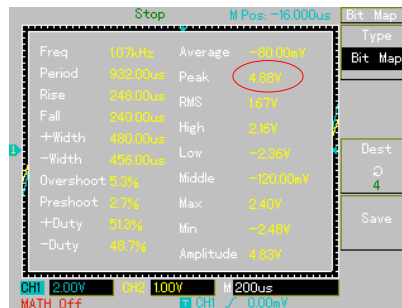
$$\mathbf{B} = (2 + n - 1) \cdot f_M = (2 + 1 - 1) \cdot 1075 = 2150\,\text{Hz}$$

Měření:

Obr. 183 - Vstupní hodnoty – CH1



Obr. 184 - Výstupní hodnoty – CH2



Mezní kmitočet – $f_M = 1070\,\text{Hz}$

Vstupní napětí – $U_{IN} = 14,96\,\text{V}$

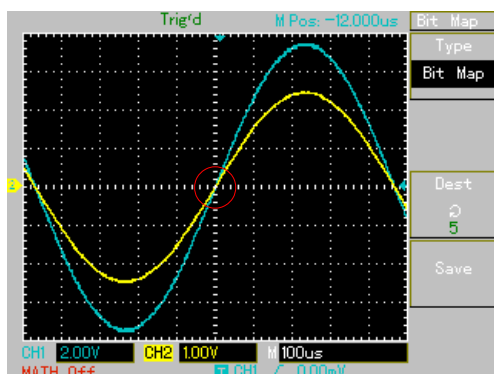
Výstupní napětí – $U_{OUT} = 4,88\,\text{V}$

Výpočet přenosu:

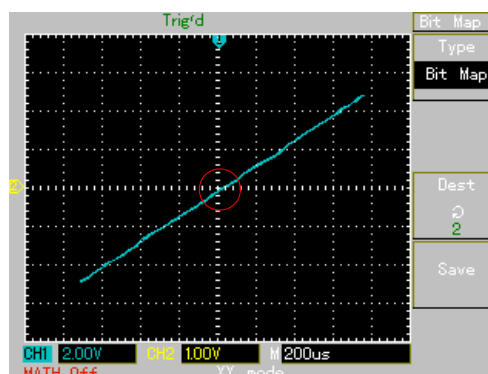
$$A_U = 20 \cdot \log \frac{U_{IN}}{U_{OUT}} = \frac{4,88}{14,96} = -9,7\,\text{dB}$$

Fázový posun při mezním kmitočtu:

Obr. 185 - Režim X – T



Obr. 186 - Režim X – Y



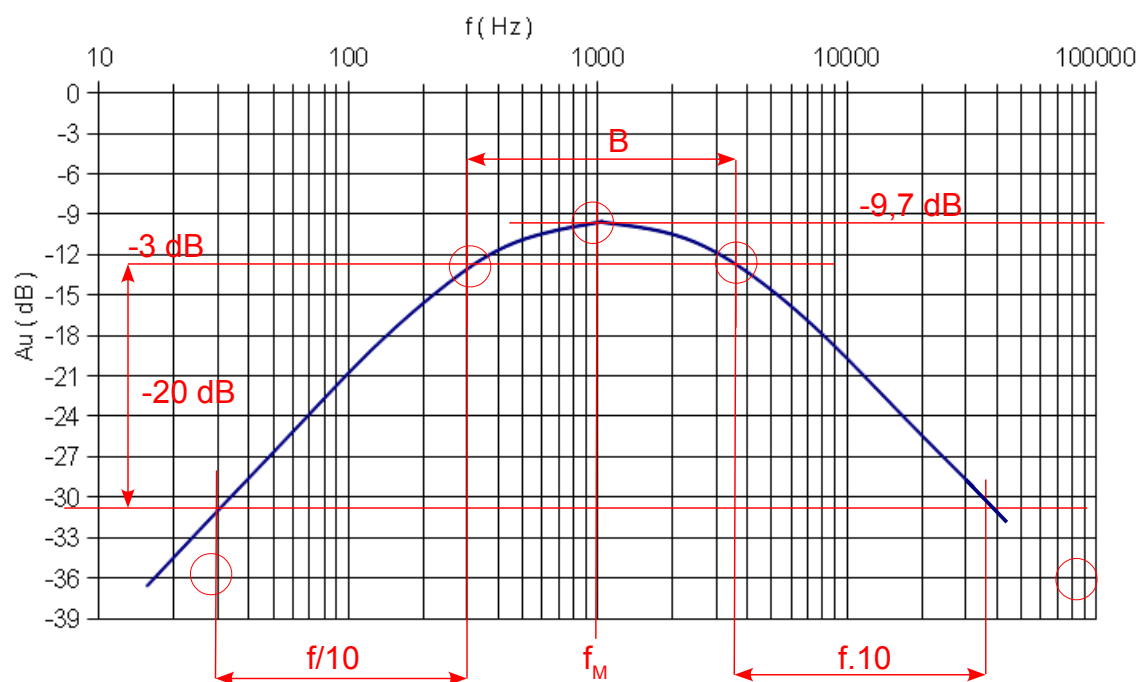
Na obou měřeních je patrné, že k posunu nedochází – $\varphi = 0^\circ$ (rozměr B = 0)

Tabulka a grafy:

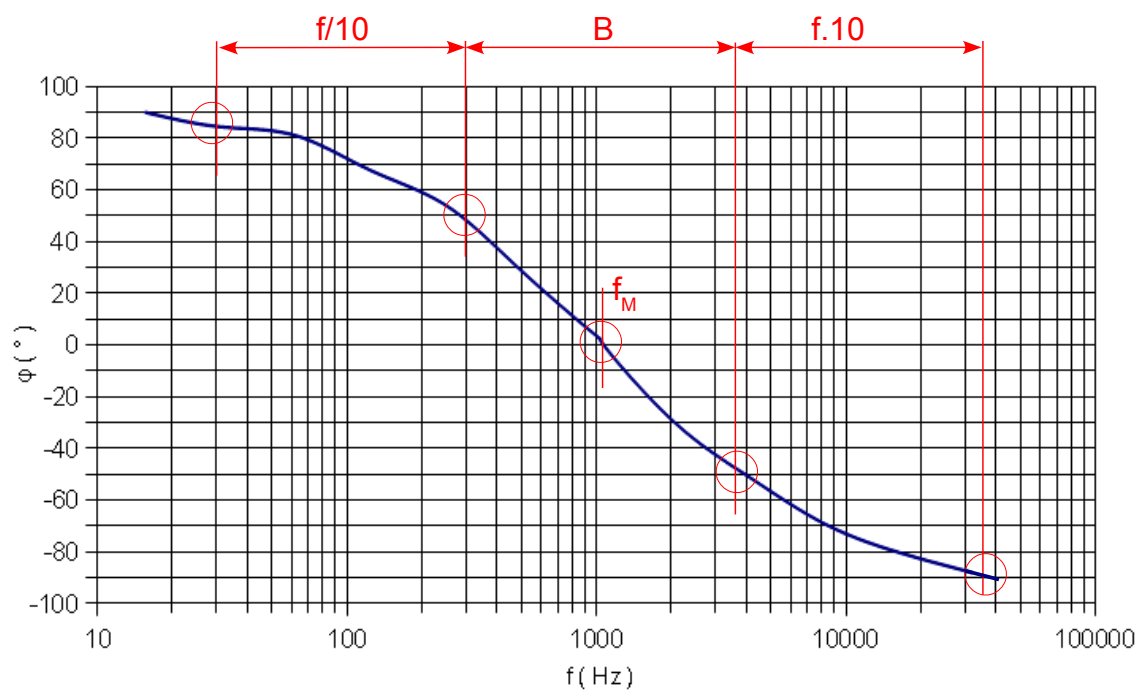
Tabulka 45 - Měření Wienova článku

f (Hz)	U_{IN} (V)	U_{OUT} (V)	A_U (dB)	A	B	φ (°)
15,6	14,96	0,222	-36,57	32	8	90,0
31,25	14,96	0,44	-30,63	32	7,5	84,4
62,5	14,96	0,864	-24,77	40	9	81,0
125	14,96	1,68	-18,99	40	7,5	67,5
250	14,96	2,94	-14,13	40	6	54,0
500	14,96	4,28	-10,87	50	4	28,8
1000	14,96	4,96	-9,59	50	0,5	3,6
1070	14,96	4,96	-9,59	50	0	0,0
2000	14,96	4,48	-10,47	25	2	-28,8
4000	14,96	3,24	-13,29	25	3,5	-50,4
8000	14,96	1,9	-17,92	31,5	6	-68,6
16000	14,96	0,992	-23,57	31,5	7	-80,0
32000	14,96	0,52	-29,18	31,5	7,7	-88,0

Obr. 187 - Graf přenosové charakteristiky



Obr. 188 - Graf fázové charakteristiky



Vyhodnocení:

Při mezním kmitočtu je úhel $\varphi = 0^\circ$. Výstupní a vstupní napětí jsou ve fázi. Při kmitočtu $f_M/10$ je $\varphi = 85^\circ$, při kmitočtu $f_M \cdot 10$ je $\varphi = -90^\circ$.

Bezpečnost práce při měření: (podle zásad elektrolaboratoře)

Závěr:

Bylo provedeno změření hodnot rezistorů a kondenzátorů. Z těchto parametrů byl vypočítán mezní kmitočet, šířka pásma a odvozený fázový posun.

Bylo provedeno měření sestaveného obvodu. Bylo zjištěno, že naměřené hodnoty odpovídají vypočteným předpokladům. Pouze šířka pásma vychází větší, než vypočtená.

Přenos klesá o -20 dB/dekádu po obou stranách pásma.

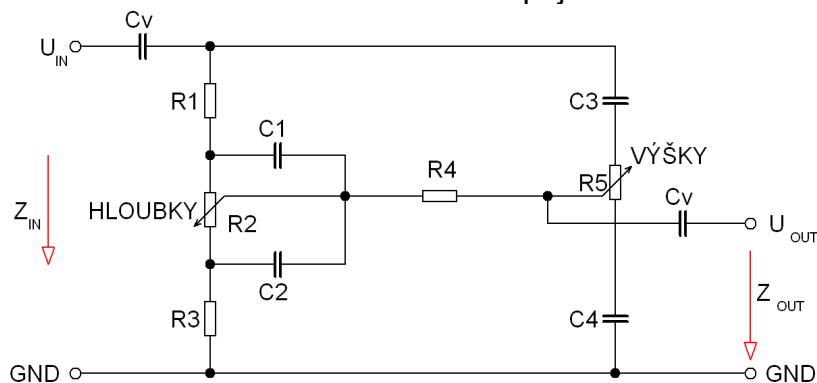
Zjištěné odchylky jsou způsobené chybami dolní a horní propusti.

17. Měření korekčního předzesilovače

Princip pasivního korektoru

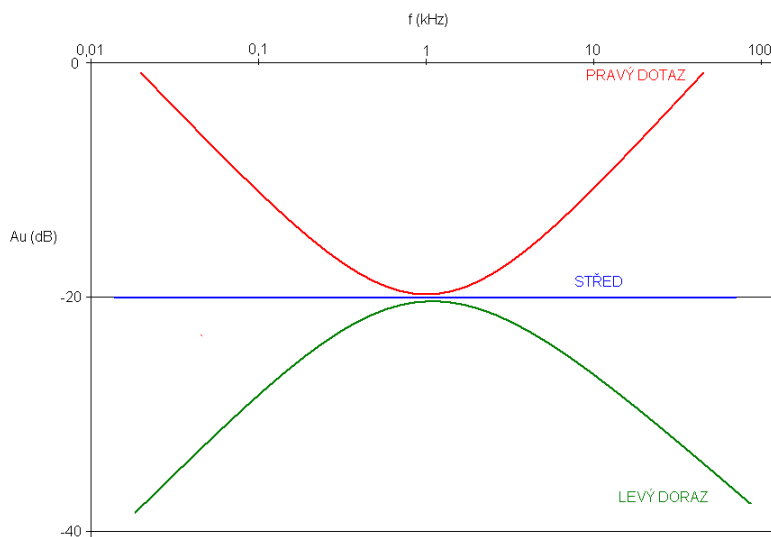
Obvod je zapojený jako čtyřpól. Propustnost nízkých kmitočtů je ovlivněna součástkami R1, R2, R3, C1 a C2. Vysoké frekvence jsou omezovány součástkami R5, C3 a C4. Pokud jsou potenciometry R2 a R7 ve středové poloze, je charakteristika přibližně vyrovnaná a dochází k poklesu přenosu o -20 dB. Pravý doraz potenciometrů způsobí, že kondenzátor C1 a rezistor R5 jsou vůči výstupu vykrácené. Tím dojde k prakticky nepatrnému potlačení hlubokých a vysokých kmitočtů. Střední kmitočty zůstanou potlačené o -20 dB. Při natočení potenciometrů na levý doraz dráhy dojde k opačnému jevu. Na středních frekvencích se přenos nemění, ale na nízkých a vysokých kmitočtech se přenos sníží o dalších -20 dB, to je na hodnotu -40 dB.

Obr. 189 - Schéma zapojení



Jako referenční součástky uvažujeme součástky R3 a C3. Ostatní lze přibližně odvodit jako jejich n-násobky.

Např.: $R1$ a $R4 = 10 \cdot R3$, dále $R2$ a $R5 = 100 \cdot R3$.
 $C1 = 22 \cdot C3$, $C2 = 220 \cdot C3$, $C4 = 15 \cdot C3$.



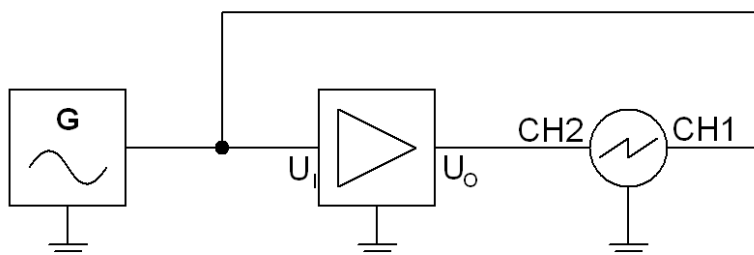
Obr. 190 -
Princip charakteristik

17.1. Měření korekčního předzesilovače

Zadání: Provedte měření přenosových a fázových charakteristik korekčního obvodu:

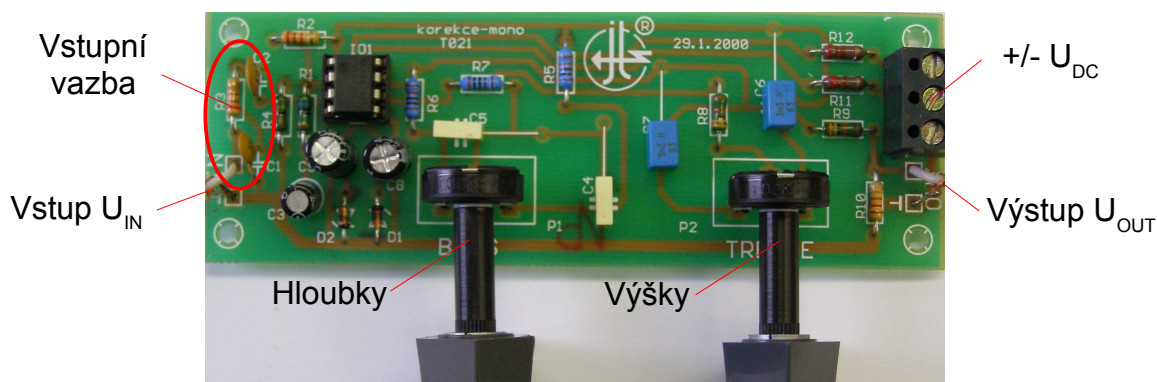
- 1) - při střední poloze potenciometrů hloubek a výšek.
- 2) - při levém dorazu potenciometrů (minimum hloubek a výšek).
- 3) - při pravém dorazu potenciometrů (maximum hloubek a výšek).

Referenční napětí volte cca v polovině U_{INMAX} pro každé měření. Nesmí dojít k limitaci měřeného napětí. Změřené hodnoty zapisujte do tabulky. Vytvořte grafy charakteristik pro všechna měření. Změřené hodnoty porovnejte s předpokladem.



Obr. 191 - Schéma zapojení měřicího obvodu

Obr. 192 - Deska korekčního zesilovače



Měřicí prostředky: Funkční generátor UTG9000A, osciloskop UNI-T UTD 2000, stavebnice korekčního zesilovače, osciloskopické sondy, kabel redukce BNC/krokosvorky, napájecí napětí $\pm 12 V_{DC}$.

Vzorce:

$$\text{Přenos} - A_U = 20 \cdot \log \frac{U_o}{U_i}$$

$$\text{fázový posun } \varphi = \frac{360^\circ}{\text{rozměr sinusovky} - \mathbf{A} \text{ (dílky)}} \cdot \text{posun X oproti Y} - \mathbf{B} \text{ (dílky)}$$

Tabulky:

Tabulka 46 – přenosové charakteristiky

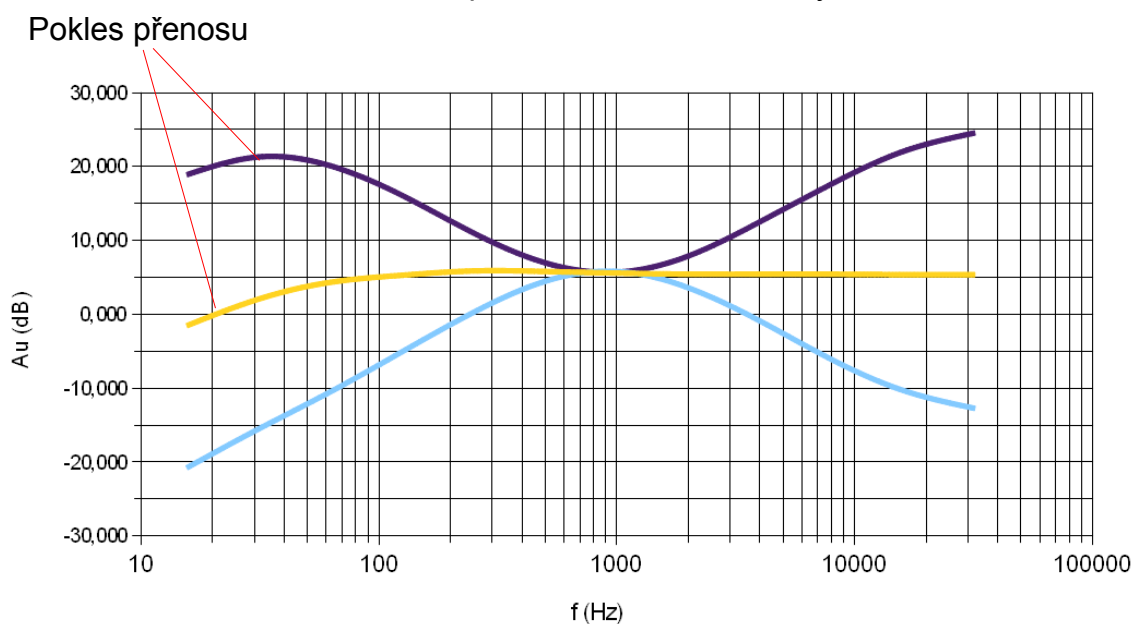
	STŘED			MINI			MAXI		
f (Hz)	U _{IN} (V)	U _{OUT} (V)	A _U (dB)	U _{IN} (V)	U _{OUT} (V)	A _U (dB)	U _{IN} (V)	U _{OUT} (V)	A _U (dB)
15,6	1,24	1,04	-1,53	1,24	0,1136	-20,76	0,776	6,84	18,90
31,25	1,26	1,6	2,07	1,25	0,21	-15,49	0,64	7,44	21,31
62,5	1,25	2,06	4,34	1,25	0,374	-10,48	0,636	6,44	20,11
125	1,25	2,3	5,30	1,24	0,692	-5,07	0,632	4,04	16,11
250	1,24	2,44	5,88	1,23	1,27	0,28	0,636	2,26	11,01
500	1,25	2,44	5,81	1,23	2,06	4,48	0,636	1,42	6,98
1000	1,24	2,36	5,59	1,22	2,38	5,80	0,632	1,22	5,71
2000	1,25	2,34	5,45	1,23	1,86	3,59	0,636	1,58	7,90
4000	1,22	2,28	5,43	1,22	1,1	-0,90	0,628	2,66	12,54
8000	1,22	2,28	5,43	1,22	0,604	-6,11	0,624	4,76	17,65
16000	1,25	2,32	5,37	1,23	0,376	-10,29	0,54	6,84	22,05
32000	1,23	2,28	5,36	1,22	0,282	-12,72	0,4	6,76	24,56

Tabulka 47 – fázové charakteristiky

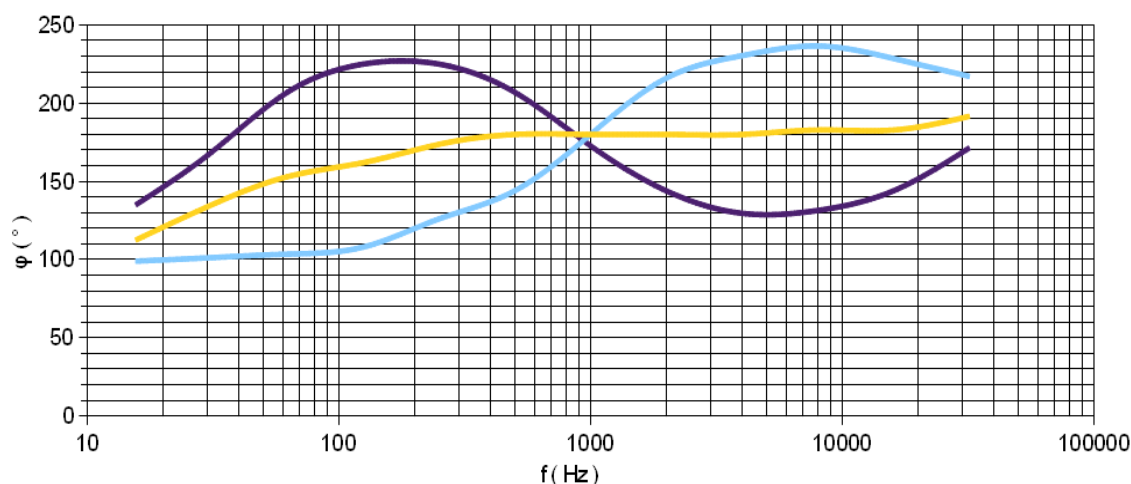
	STŘED			MINI			MAXI		
f (Hz)	A	B	φ (°)	A	B	φ (°)	A	B	φ (°)
15,6	32	10	113	32	8,8	99	32	12	135
31,25	32	12	135	32	9	101	32	15	169
62,5	40	17	153	40	11,5	104	40	23	207
125	40	18	162	40	12	108	40	25	225
250	40	19,3	174	40	14	126	40	25	225
500	20	10	180	20	8	144	20	11,5	207
1000	25	12,5	180	25	12,5	180	25	12	173
2000	25	12,5	180	25	15	216	25	10	144
4000	25	12,5	180	25	16	230	25	9	130
8000	31,5	16	183	31,5	20,7	237	31,5	11,5	131
16000	31,5	16	183	31,5	20	229	31,5	12,6	144
32000	31	16,5	192	31,5	19	217	31,5	15	171

Grafy:

Obr. 193 – přenosové charakteristiky



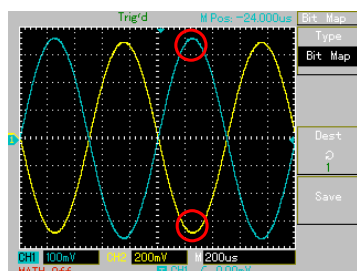
Obr. 194 – fázové charakteristiky



Obrázkové přílohy:

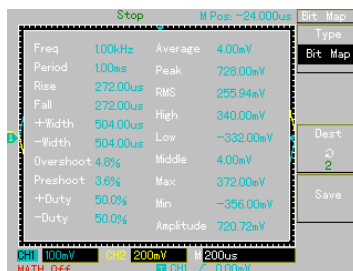
Obr. 195 - měření při $f = 1$ kHz – korekce v neutrální poloze

Fázový posun

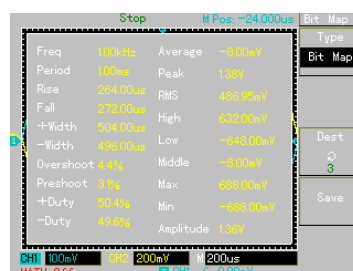


$$\varphi = 180^\circ$$

Vstupní napětí U_i



Výstupní napětí U_o

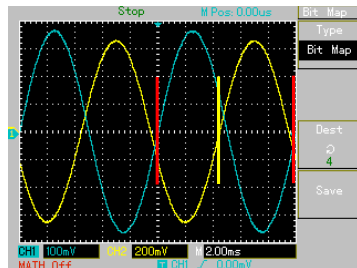


$$A_U = 20 \cdot \log \frac{U_o}{U_i} = 20 \cdot \log \frac{1,36}{0,728} = 5,43 \text{ dB}$$

Při tomto kmitočtu se natočení korekcí na minimum a maximum prakticky neprojevuje.

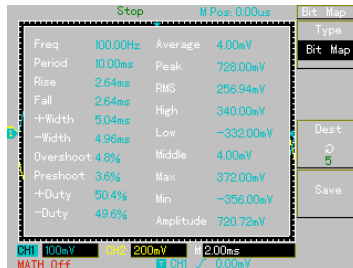
Obr. 196 - měření při $f = 100$ Hz – korekce v neutrální poloze

Fázový posun



$$\varphi = \frac{360^\circ}{A} \cdot B = \frac{360^\circ}{25} \cdot 11 = -158^\circ$$

Vstupní napětí U_i



Výstupní napětí U_o

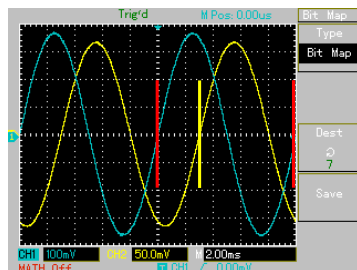


$$A_U = 20 \cdot \log \frac{U_o}{U_i} = 20 \cdot \log \frac{1,31}{0,728} = 5,1 \text{ dB}$$

Při tomto kmitočtu, při neutrální poloze, je přenos prakticky stejný jako při 1 kHz.

Obr. 197 - měření při $f = 100 \text{ Hz}$ – korekce v poloze max. útlumu – levý doraz

Fázový posun



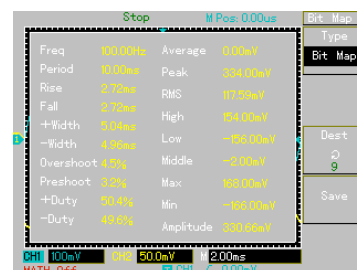
$$\varphi = \frac{360^\circ}{A} \cdot B = \frac{360^\circ}{25} \cdot 7,5 = -108^\circ$$

Vstupní napětí U_i



$$A_U = 20 \cdot \log \frac{U_o}{U_i} = 20 \cdot \log \frac{0,334}{0,728} = -6,78 \text{ dB}$$

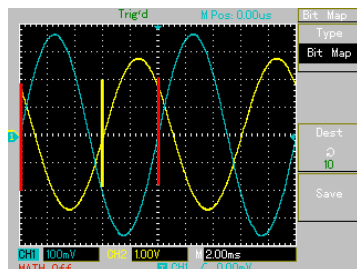
Výstupní napětí U_o



Při max. potlačení – levém dorazu – se přenos nízkých kmitočtů snižuje.

Obr. 198 - měření při $f = 100 \text{ Hz}$ – korekce v poloze max. zisk – pravý doraz

Fázový posun



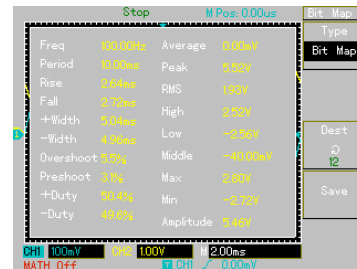
$$\varphi = \frac{360^\circ}{A} \cdot B = \frac{360^\circ}{25} \cdot 10 = 144^\circ$$

Vstupní napětí U_i



$$A_U = 20 \cdot \log \frac{U_o}{U_i} = 20 \cdot \log \frac{5,52}{0,728} = 17,6 \text{ dB}$$

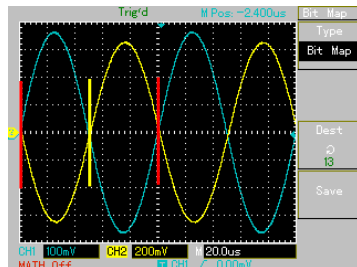
Výstupní napětí U_o



Při max. zisku – pravém dorazu – se přenos podstatně zvyšuje.

Obr. 199 - měření při $f = 10 \text{ kHz}$ – korekce v neutrální poloze

Fázový posun



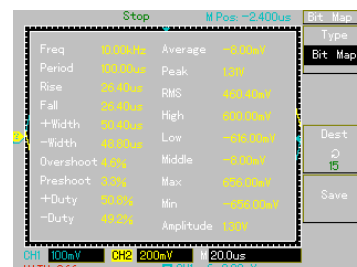
$$\varphi = \frac{360^\circ}{A} \cdot B = \frac{360^\circ}{25} \cdot 12,5 = 180^\circ$$

Vstupní napětí U_i



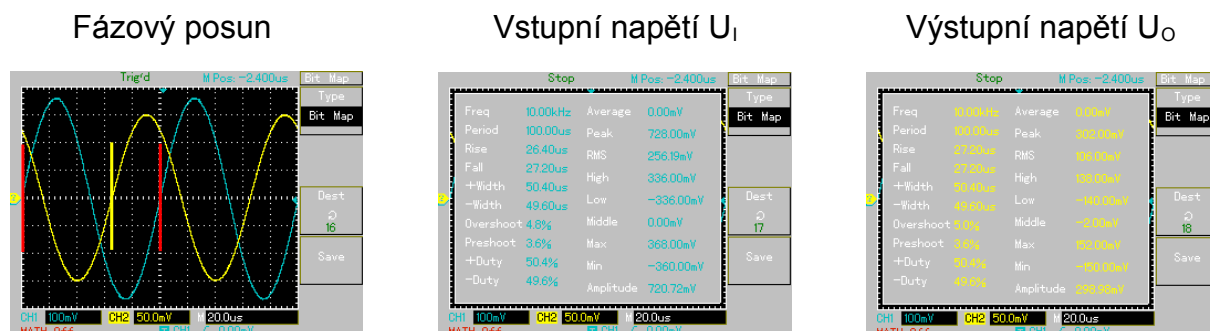
$$A_U = 20 \cdot \log \frac{U_o}{U_i} = 20 \cdot \log \frac{1,31}{0,728} = 5,1 \text{ dB}$$

Výstupní napětí U_o



Při kmitočtu 10 kHz, střední poloze, je přenos prakticky stejný jako u předešlých kmitočtů. Při těchto neutrálních polohách se korekce neprojevují změnou zisku.

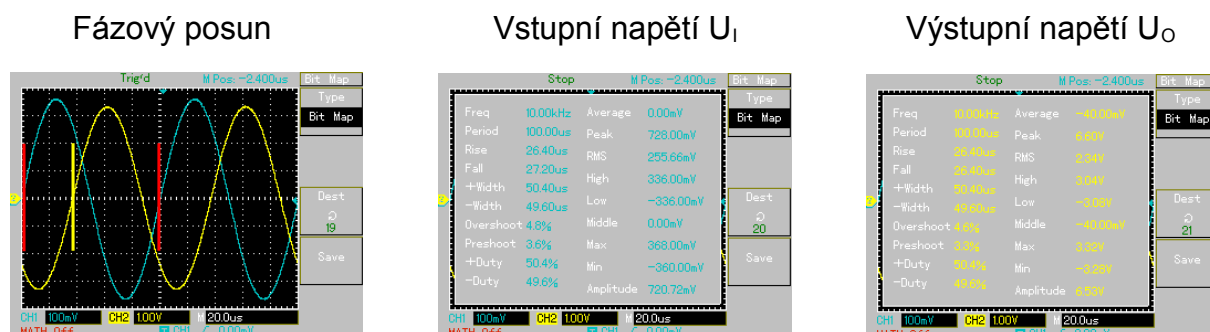
Obr. 200 - měření při $f = 10$ kHz – korekce v poloze max. útlumu – levý doraz



$$\varphi = \frac{360^\circ}{A} \cdot B = \frac{360^\circ}{25} \cdot 9 = 130^\circ \quad A_U = 20 \cdot \log \frac{U_o}{U_i} = 20 \cdot \log \frac{0,302}{0,728} = -7,6 \text{ dB}$$

Při max. potlačení – levém dorazu – se přenos vysokých kmitočtů snižuje.

Obr. 201 - měření při $f = 10$ kHz – korekce v poloze max. zisku – pravý doraz



$$\varphi = \frac{360^\circ}{A} \cdot B = \frac{360^\circ}{25} \cdot 16 = 230^\circ \quad A_U = 20 \cdot \log \frac{U_o}{U_i} = 20 \cdot \log \frac{6,60}{0,728} = 19 \text{ dB}$$

Při max. zisku – pravém dorazu – se přenos podstatně zvyšuje.

Bezpečnost práce:

Dodržet zásady bezpečné práce v laboratoři.

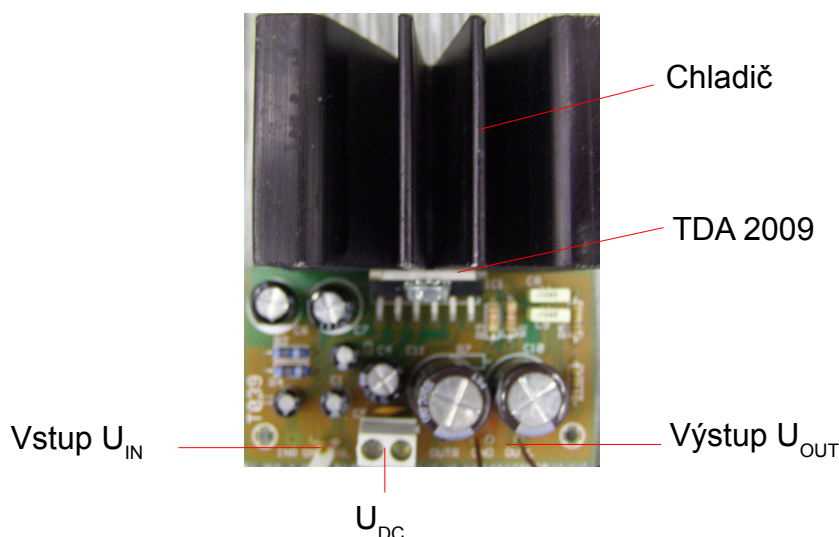
Závěr:

Pokles na nejnižších kmitočtech je zřejmě způsoben nevhodnou konstrukcí vstupních vazebních členů: R3-C1 a C2 - R4.

18. Měření výkonového zesilovače

Výkonový zesilovač je realizovaný modulem s integrovaným obvodem TDA 2009. Tento zesilovač pracuje s maximálním napájecím napětím U_{DC} do 28 V a výkonem do 2x10 W. Max. výkon v můstkovém zapojení může dosáhnout 20 W.

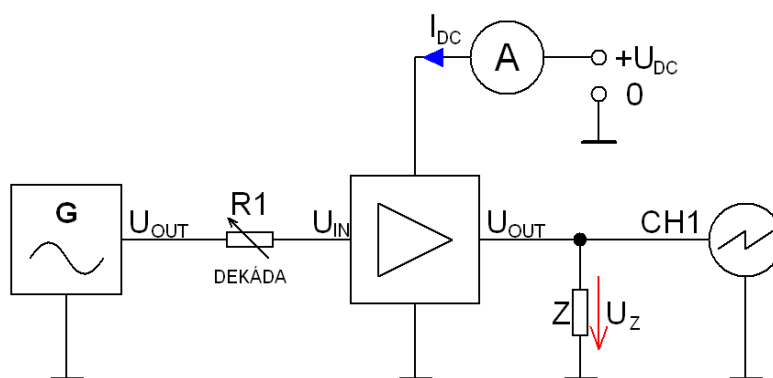
Obr. 202 - Sestava zesilovače s TDA 2009



18.1. Měření vstupní impedance

Zadání: Provedte měření vstupní impedance 1 kanálu výkonového zesilovače metodou poloviční výchylky. Provedte výpočty a zápis.

Obr. 203 - Schéma měřicího obvodu

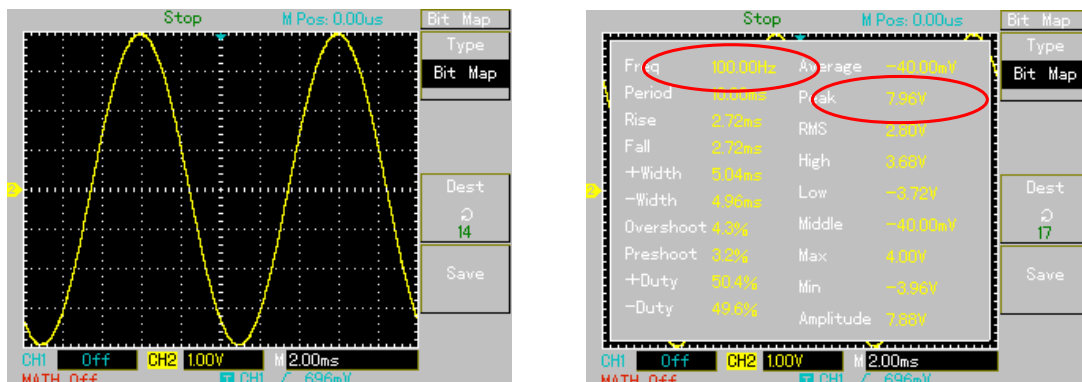


Budící napětí z funkčního generátoru je připojené přes odporovou dekádu. Zesilovač je vybuzený přibližně na polovinu max. výstupního napětí. Protože dekáda není odstíněná a hrozí rušení při vyšších kmitočtech, provedeme měření při frekvenci 100 Hz. Odpor dekády tvoří se vstupní kapacitou dolní propust, proto musíme měřit na dostatečně nízké frekvenci 100Hz. Přívod za dekádou by měl být krátký abychom tuto kapacitu zbytečně nezvyšovali.

Měřicí prostředky: Funkční generátor UTG9000A, osciloskop UNI-T UTD 2000, modul výkonového zesilovače, odporová dekáda, osciloskopické sondy, kabel redukce BNC/krokosvorky, napájecí napětí 0 – 28 V/3 A.

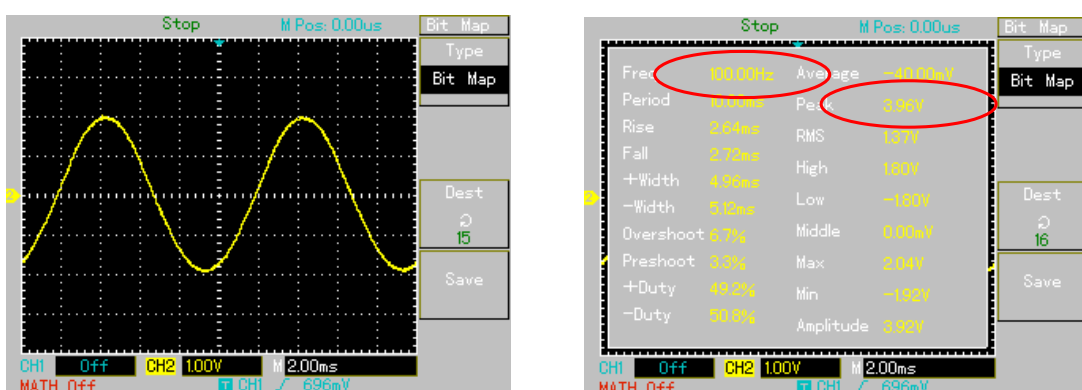
Měření:

Obr. 204 - měření při plné výchylce – vykrácená dekáda



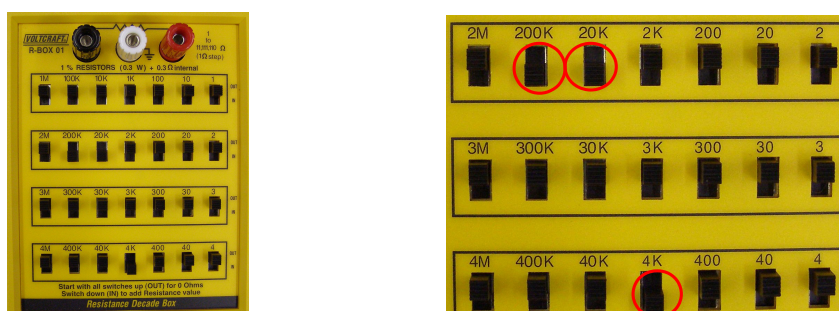
Měřené hodnoty: $U_{PP} = 7,96 \text{ V}$, $f = 100 \text{ Hz}$

Obr. 205 - Měření při poloviční výchylce – nastavená dekáda



Měřené hodnoty: $U_{PP} = 3,96 \text{ V}$, $f = 100 \text{ Hz}$

Obr. 206 - Nastavení dekády



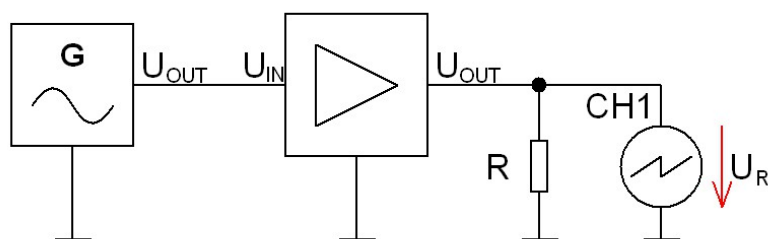
Naměřená hodnota: $R = 224 \text{ k}\Omega$

Závěr: Odpor dekády v tomto případě odpovídá vstupní impedanci zesilovače. Hodnota odpovídá údajům výrobce.

18.2. Měření výstupní impedance

Zadání: Provedte měření vnitřní impedance (výstupní) - Z_{OUT} - výkonového zesilovače. Provedte výpočty a zápis.

Obr. 207 - Schéma měřicího obvodu

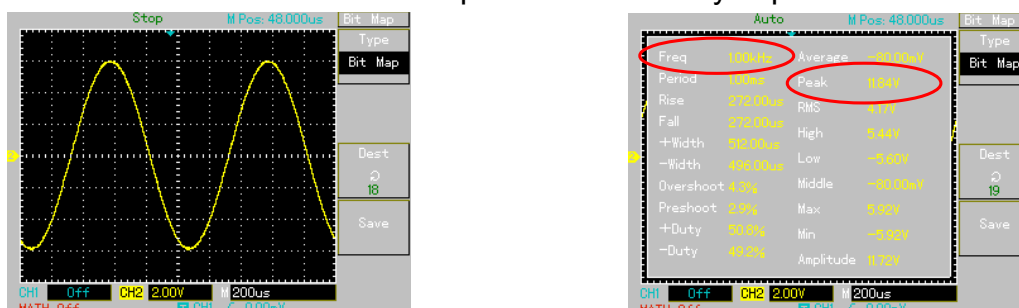


Budící napětí z funkčního generátoru nastavíme tak, aby výstupní napětí naprázdno (bez zatěžovacího rezistoru R) přibližně odpovídalo jmenovitému výkonu. Kmitočet nastavíme na 1 kHz. Změříme hodnotu U_{R1} . Pak připojíme zatěžovací rezistor o jmenovitém odporu $4\ \Omega$ a změříme hodnotu U_{R2} . Provedeme výpočet.

Měřicí prostředky: Funkční generátor UTG9000A, osciloskop UNI-T UTD 2000, modul výkonového zesilovače, rezistor $4\ \Omega/20W$, osciloskopická sonda, kabel redukce BNC/krokosvorky, zdroj U_{DC} .

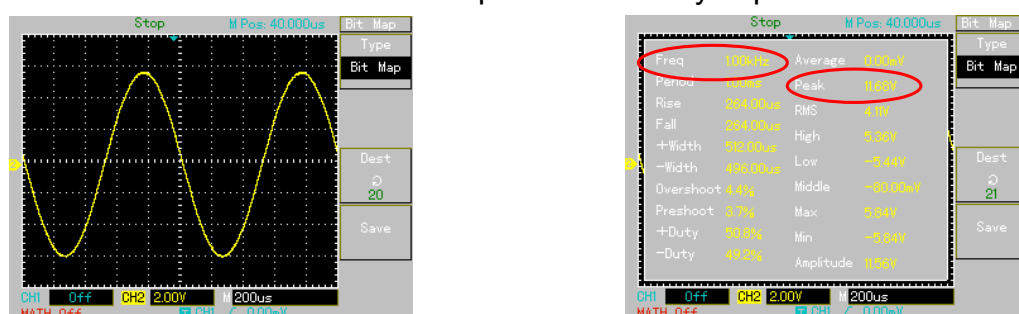
Měření:

Obr. 208 - měření při nezatíženém výstupu



Měřené hodnoty: $U_R = 11,84\ V$, $f = 1\ kHz$

Obr. 209 - měření při zatíženém výstupu



Měřené hodnoty: $U_R = 11,68\ V$, $f = 1\ kHz$

Vzorce, výpočty:

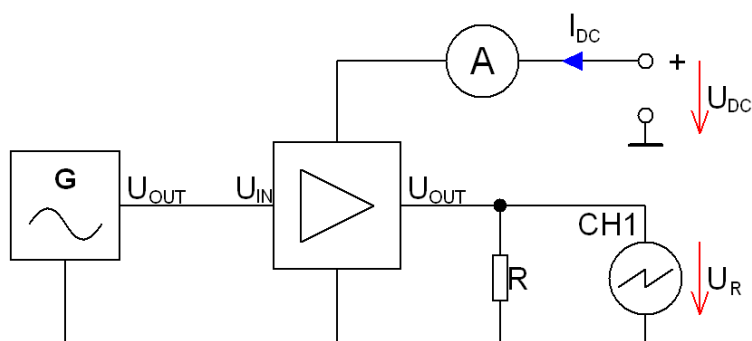
$$Z_{\text{OUT}} = \frac{U_{R1} - U_{R2}}{U_{R2}} \cdot R = \frac{11,84 - 11,68}{11,68} \cdot 4 = 0,05 \, \Omega$$

Závěr: Naměřená hodnota je podstatně menší, než jmenovitá zatěžovací impedance. Čím je výstupní impedance nižší, tím je kvalitnější reprodukce.

18.3. Měření jmenovitého a špičkového výkonu

Zadání: Provedte měření jmenovitého a špičkového výstupního výkonu. Doplňte výpočty a zápis výsledků.

Obr. 210 - Schéma zkušebního obvodu

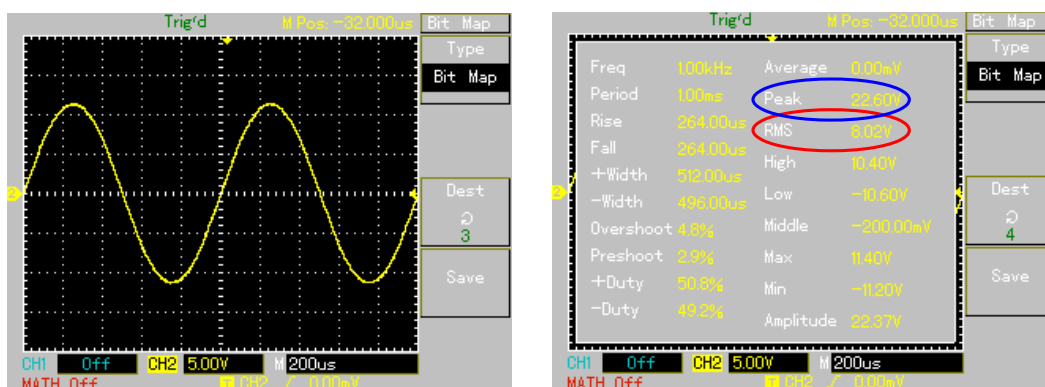


Zesilovač je zatížený jmenovitou impedancí – rezistorem R. Budící napětí z funkčního generátoru nastavíme na maximální hodnotu, při které ještě na výstupu zesilovače nedochází k limitaci.

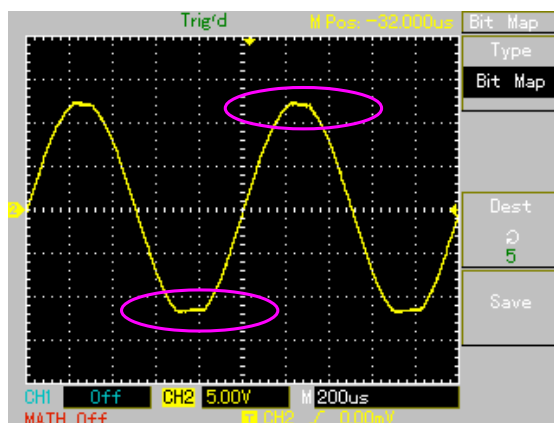
Měřicí prostředky: Generátor UTG9000A, osciloskop UNI-T UTD 2000, modul výkonového zesilovače, rezistor 4Ω/20W, osciloskopická sonda, kabel redukce BNC/krokosvorky, zdroj U_{DC} .

Měření:

Obr. 211 - měření efektivní (RMS) a špičkové U_{PP} hodnoty U_{OUT}



Obr. 212 - Limitace výstupního napětí



Tabulka 48 - Naměřené a vypočtené hodnoty

U_{DC} (V)	I_{DC} (mA)	f (Hz)	R (Ω)	U_{OUTEF} (V)	U_{OUTPP} (V)	P_{SIN} (W)	P_{PP} (W)
28	910	1000	4	8,02	22,6	16,1	127,7

Vzorce, výpočty:

Sinusový – jmenovitý – výkon:
$$P_{SIN} = \frac{U_{RMS}^2}{R} = \frac{8,02^2}{4} = 16,08 \text{ W}$$

Pozor na přetížení zesilovače!

Špičkový výkon -
$$P_{PP} = \frac{U_{PP}^2}{R} = \frac{22,6^2}{4} = 127,7 \text{ W} \text{ (Pozor! Jen pro informaci!)}$$

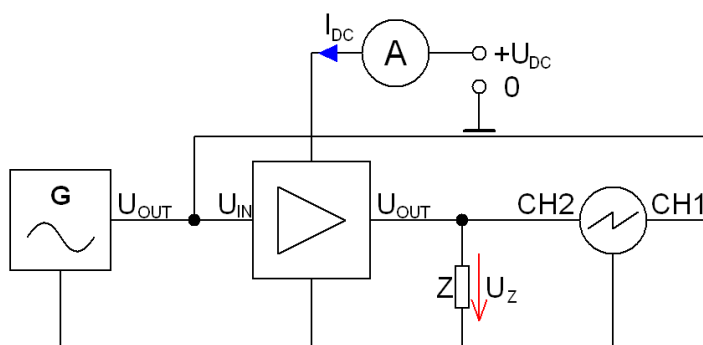
Pozor! V praxi měříme při polovičním napájecím napětí.

Závěr: Pro vyhodnocení je závazný výkon sinusový. U hodnoty špičkového výkonu je patrné, jak některé údaje mohou být velmi zavádějící.

18.4. Měření výkonové šířky pásma

Zadání: Provedte měření výkonové šířky pásma daného zesilovače, proveďte výpočty a zápis výsledků. Vyhodťte výsledky měření.

Obr. 213 - Schéma měřicího obvodu



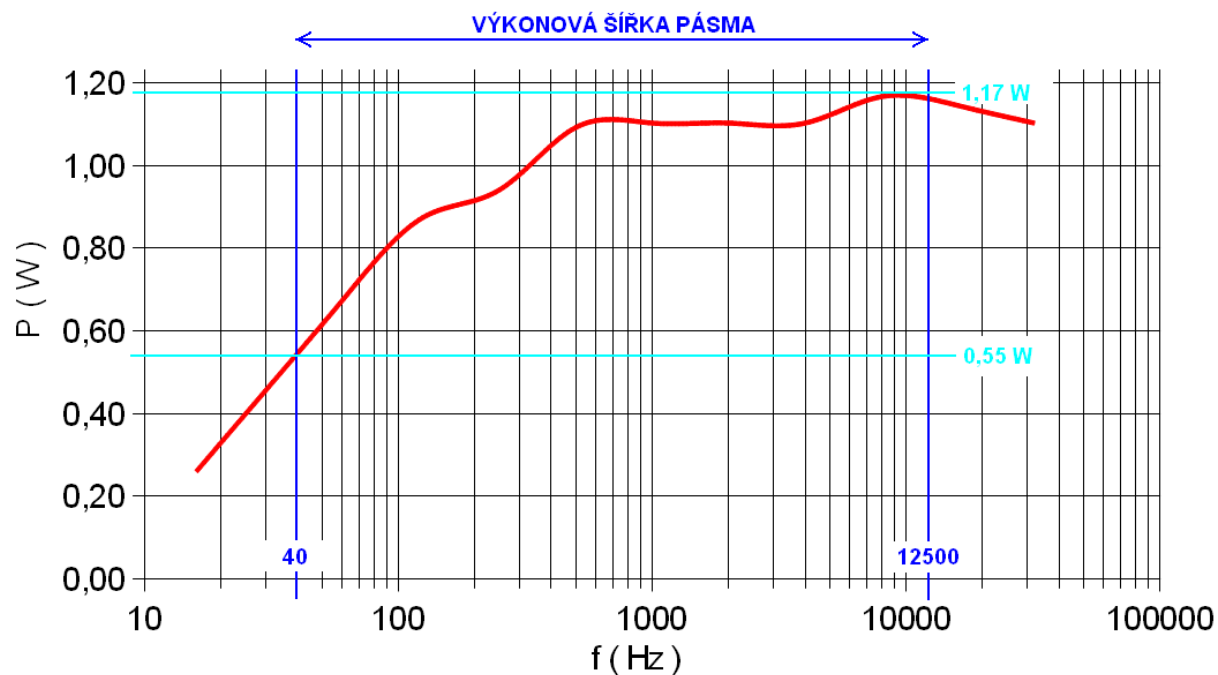
Měříme v kmitočtovém pásmu 16 – 32000 Hz. Zesilovač je zatížen jmenovitou impedancí – rezistorem R. Budící napětí z funkčního generátoru volíme nižší než maximální, nesmí docházet během měření k limitaci. Posuzujeme sinusový výkon ve frekvenčním pásmu 40 a 12500 Hz. Nesmí klesnout více, než o polovinu – tzn. o 3 dB.

Měření:

Tabulka 49 - Měření výkonové šířky pásma

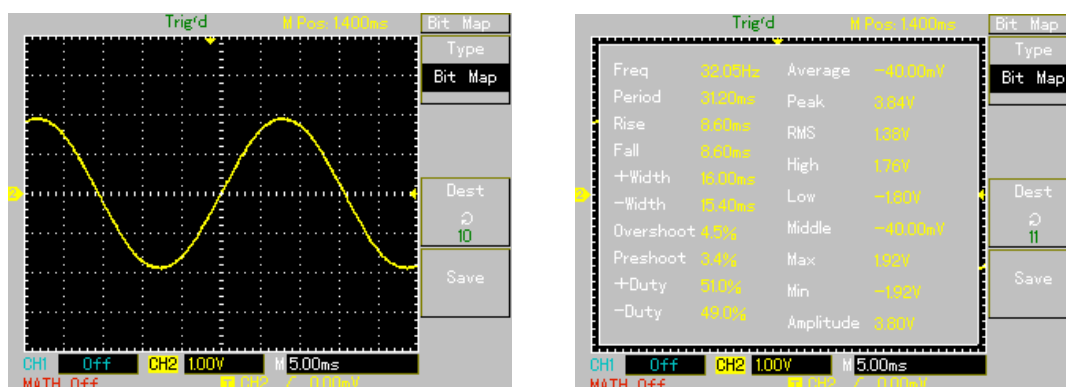
f (Hz)	U_{IN} (mV)	U_{OUT} (V_{RMS})	P (W)
16	80	1,02	0,26
32	80	1,38	0,48
63	80	1,66	0,69
125	80	1,87	0,87
250	80	1,94	0,94
500	80	2,09	1,09
1000	80	2,1	1,10
2000	80	2,1	1,10
4000	80	2,1	1,10
8000	80	2,16	1,17
16000	80	2,14	1,14
32000	80	2,1	1,10

Obr. 214 - Graf výkonové šířky pásma



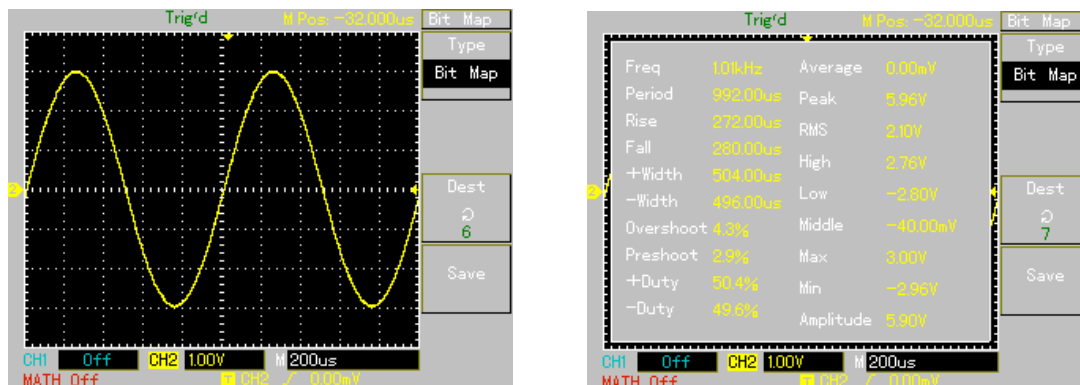
Z grafu je patrné, že podmínka pro vyrovnaný průběh výkon v požadované šířce pásma zcela splněná není. Výkon klesl o něco více, než je polovina nejvyšší hodnoty.

Obr. 215 - Měření při $f = 32$ Hz



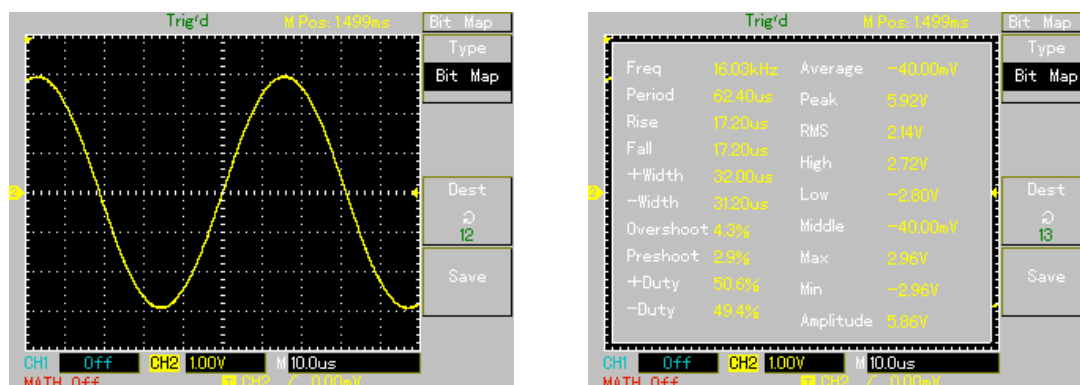
Naměřeno: $U_{EF(RMS)} = 1,38$ V

Obr. 216 - Měření při $f = 1000 \text{ Hz}$



Naměřeno: $U_{EF(RMS)} = 2,10 \text{ V}$

Obr. 217 - Měření při $f = 16000 \text{ Hz}$



Naměřeno: $U_{EF(RMS)} = 2,14 \text{ V}$

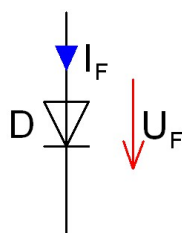
Závěr: Při měření v požadovaném pásmu nedocházelo k limitaci výstupního napětí – viz obrazovou přílohu. Porovnali jsme vypočtený sinusový a špičkový výkon. Směrem k nižším kmitočtům výkon klesá na menší, než požadovanou hodnotu. Kompenzaci této ztráty je možné provést zvýšením kapacity vstupních vazebních kondenzátorů.

19. Měření diod

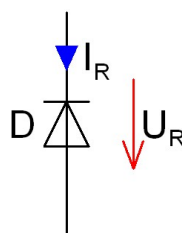
U těchto součástek většinou provádíme měření parametrů součástky kvůli ověření katalogových údajů výrobce nebo pro kontrolu správnosti funkce. Měříme v propustném nebo závěrném směru.

Obr. 218 - Všeobecné zapojení diody

Propustný směr



Závěrný směr



U diody se napětí a proud v propustném směru značí s indexem F a v závěrném směru s indexem R. Výjimku tvoří Zenerovy diody, u kterých jsou pro využití důležité hodnoty v závěrném směru. V tomto případě mají veličiny index Z. Pro správnou funkci jsou důležité i ostatní parametry, jako výkonová ztráta, oteplení a odpor přechodu P-N a jiné.

Obr. 219 - Příklady katalogových listů (diody LED)

Absolute Maximum Ratings at $T_A=25^\circ\text{C}$

Parameter	Bright Red	High Efficiency Red	Orange	Green	Yellow	Pure Orange	Pure Green	Units
Power dissipation	120	105	105	105	105	105	105	mW
DC Forward Current	25	30	30	25	30	30	25	mA
Peak Forward Current [1]	120	160	160	140	140	145	135	mA
Reverse Voltage	5	5	5	5	5	5	5	V
Operating/Storage Temperature	-40°C To +85°C							
Lead Soldering Temperature [2]	260°C For 5 Seconds							

Electrical / Optical Characteristics at $T_A=25^\circ\text{C}$

V_F	Forward Voltage	Bright Red High Efficiency Red Orange Green Yellow Pure Orange Pure Green	2.25 2.0 2.0 2.0 2.1 2.05 2.25	2.5 2.5 2.5 2.5 2.5 2.5 2.5	V	$I_F=20\text{mA}$
I_R	Reverse Current	All		10	μA	$V_R = 5\text{V}$

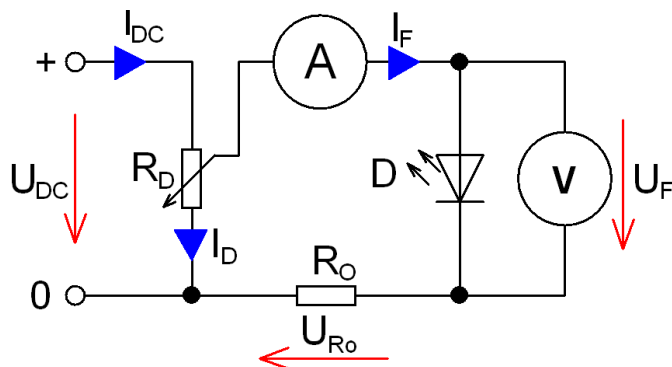
Na ukázkou uvádíme katalogové listy diod LED. Podle nich pro konkrétní součástku vždy musíme volit napájecí podmínky ve zkušebním obvodu. Nikdy nesmí dojít k přetížení a tím k možnému zničení součástky během měření.

19.1. Praktické úloha - měření diod LED

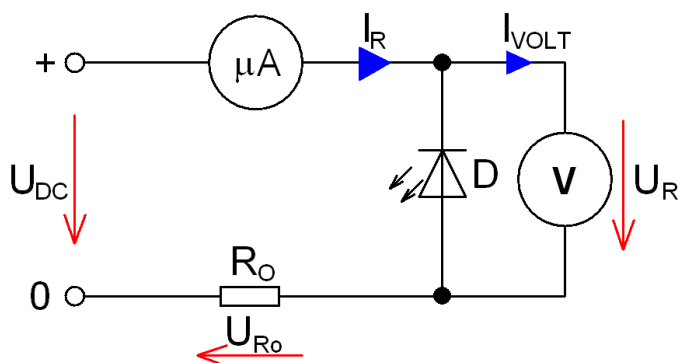
Zadání úlohy: Provedte měření charakteristiky LED diod různých barev v propustném směru a vytvořte grafy. Provedte měření vybrané diody v závěrném směru. Postupujte podle kat. Údajů použitých součástek. Vyznačte v grafu oblast pracovních bodů jednotlivých diod (od minimálních hodnot až po mezní).

Schéma zapojení obvodů:

Obr. 220 - Propustný směr



Obr. 221 - Závěrný směr



Měřicí prostředky: Zdroj U_{DC} 0 – 30V, multimetry V a A – M3890D Metex, potenciometr 50 Ω /25W, rezistor R_O , různé LED diody, spojovací materiál.

Postup měření:

Měření v propustném směru: Smyslem úlohy je co nejpodrobněji zachytit postupné otvírání přechodu PN. Tomuto požadavku je nutné podřídit sestavení obvodu, především dostatečně jemnou regulaci napětí (potenciometr R_D). Pozor na dimenzování děliče R_D – je třeba vypočítat proudové podmínky pro použitý typ. Rezistor R_O pracuje jako omezovač proudu při úplném otevření přechodu PN. Při jeho volbě vycházíme z katalogových hodnot součástky a napájecích parametrů zdroje. Podle typu měřené diody postupně zvyšujeme hodnotu U_F (např. á 100 až

200 mV) a odečítáme I_F . Při dosažení mezních hodnot součástky měření ukončíme. Naměřené údaje zapisujeme do tabulky. Vytvoříme graf závislosti proudu I_F na napětí U_F . V grafu u jednotlivých křivek vyznačíme posouzení katalogových údajů a hranice maximálního zatížení jednotlivých typů LED diod.

Měření v závěrném směru: Postupně nastavujeme napětí U_R až do dosažení katalogových údajů součástek a měříme proud I_R . Rezistor R_O v podstatě není nutný. Diodou, která je v pořádku, v závěrném směru proud téci prakticky nesmí. Je zařazen pro ochranu obvodu při proražení přechodu P-N měřené součástky. Při jeho volbě postupujeme obdobně. Při vyhodnocení je v této úloze nutné vzít v úvahu proud tekoucí do voltmetru. Oba mohou mít srovnatelnou hodnotu.

Tabulka 50 - Katalogové údaje LED diod

LED červená		LED žlutá		LED zelená		LED modrá	
Mezní hodnoty		Mezní hodnoty		Mezní hodnoty		Mezní hodnoty	
P_{TOT} (mW)	120	P_{TOT} (mW)	105	P_{TOT} (mW)	105	P_{TOT} (mW)	90
U_R (V)	5	U_R (V)	5	U_R (V)	5	U_R (V)	5
I_{FMAX} (mA)	25	I_{FMAX} (mA)	25	I_{FMAX} (mA)	30	I_{FMAX} (mA)	25
I_{FPEAK} (mA)	120	I_{FPEAK} (mA)	140	I_{FPEAK} (mA)	140	I_{FPEAK} (mA)	100
Provozní hodnoty		Provozní hodnoty		Provozní hodnoty		Provozní hodnoty	
U_F (V)	1,8-2,5	U_F (V)	2,1–2,5	U_F (V)	2-2,5	U_F (V)	3,2-3,6
I_F (mA)	20	I_F (mA)	20	I_F (mA)	20	I_F (mA)	20
U_R (V)	5	U_R (V)	5	U_R (V)	5	U_R (V)	5
I_R (μA)	0,6	I_R (μA)	0,6	I_R (μA)	0,6	I_R (μA)	30

Vzorce, výpočty:

Potenciometr R_D 50Ω/25W:

$$I_{MAX} = \sqrt{\frac{P}{R}} = \sqrt{\frac{25}{50}} = 0,707 \text{ A} = 707 \text{ mA}$$

$$I_D = \frac{U_{DC}}{R} = \frac{30}{50} = 0,6 \text{ A} = 600 \text{ mA}$$

$$I_{FMAX} = I_{MAX} - I_D = 707 - 600 = 107 \text{ mA}$$

(obě součástky jsou pro dané měření dostačující)

Rezistor R_D :

$$R_D = \frac{U_{DC}}{I_{FMAX}} = \frac{15}{0,05} = 300 \Omega$$

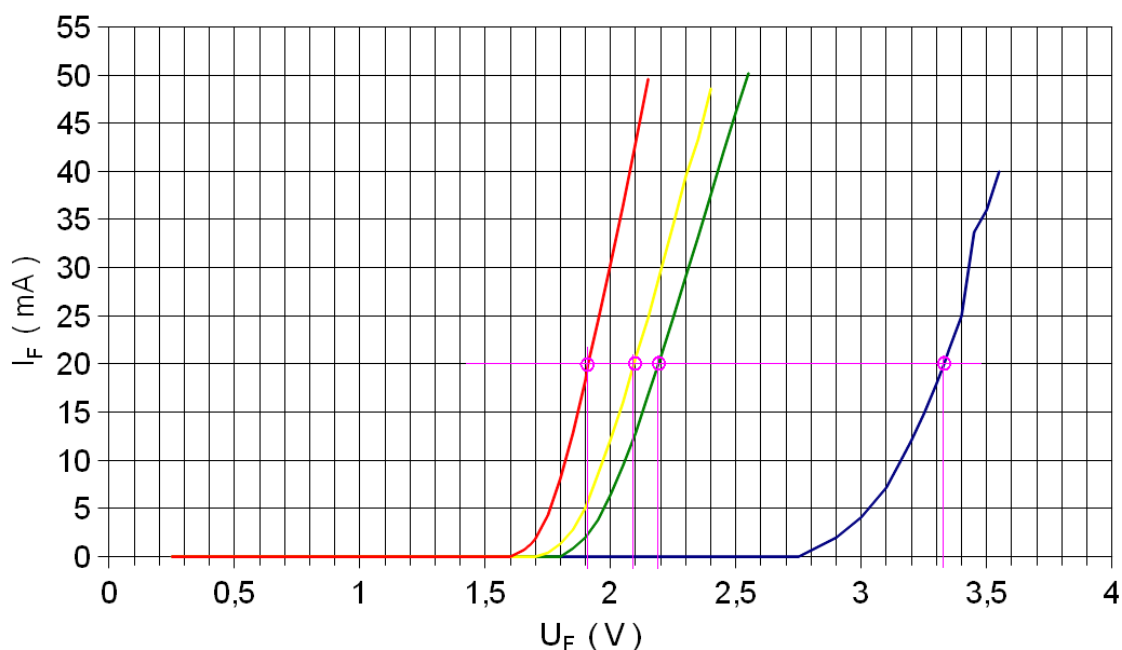
Zvolená hodnota 330 Ω/2 W

Měření:

Tabulka 51 - Měření LED diod – propustný směr

	červená	žlutá	zelená	modrá
U_F (V)	I_F (mA)	I_F (mA)	I_F (mA)	I_F (mA)
0,25	0	0	0	0
0,5	0	0	0	0
0,75	0	0	0	0
1	0	0	0	0
1,25	0	0	0	0
1,5	0	0	0	0
1,6	0	0	0	0
1,65	0,64	0	0	0
1,66	0,8	0	0	0
1,67	1,06	0	0	0
1,68	1,24	0	0	0
1,7	1,86	0	0	0
1,75	4,32	0,4	0	0
1,8	8,14	1,34	0	0
1,85	12,86	2,8	0,86	0
1,9	18,36	5,1	2	0
1,91	20			0
1,95	24,5	8,6	3,82	0
2	30,44	12,2	6,46	0
2,05	36,5	16,06	9,48	0
2,1	43	20,7	12,84	0
2,15	49,6	24,8	16,84	0
2,2		29,7	20,72	0
2,25		34,5	24,84	0
2,3		39,5	29,1	0
2,35		43,4	33,28	0
2,4		48,6	37,6	0
2,45			42	0
2,5			46,2	0
2,55			50,2	0
2,75				0
2,9				1,98
3				4,1
3,1				7,18
3,15				9,6
3,2				12,08
3,25				14,86
3,3				17,96
3,33				20
3,35				21,52
3,4				25
3,45				33,7
3,5				36
3,55				40

Obr. 222 - Grafy LED diod – propustný směr



Tabulka 52 - Měření LED diody modré – závěrný směr

U_R (V)	I_R (μA)	I_{VOLT} (μA)	$I_R - I_{VOLT}$ (μA)
0,5	0	0,05	
1	0	0,1	
1,5	0	0,15	
2	0	0,2	
2,5	0	0,25	
3	0	0,3	
3,5	0,4	0,4	0
4	0,4	0,4	0
4,5	0,45	0,45	0
5	0,6	0,5	0,1

Bezpečnost práce: Obvyklé zásady při měření v elektrolaboratoři.

Závěr: Měření v propustném směru prokázalo praktické potvrzení katalogových údajů. Naměřené a katalogové hodnoty mají určitou toleranci. U LED diod je téměř nemožné určit přesně typ a výrobce – pouzdra nejsou značené. Jednotlivé typy se přece jen poněkud vždy liší.

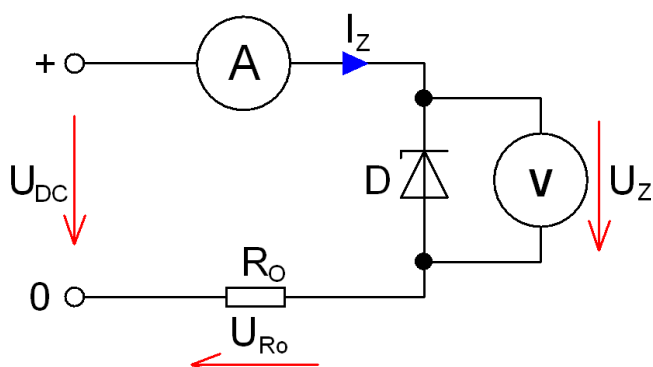
V závěrném směru, po korekci spotřeby voltmetru, byla naměřena hodnota proudu I_R velmi malá (prakticky nulová), hluboko pod údaji všech typů LED diod.

19.2. Praktické úloha - měření Zenerovo diod

Zadání úlohy: Proveďte měření charakteristiky různých typů Zenerovo diod v závěrném směru a sestrojte grafy. Porovnejte katalogové údaje měřených součástek. V grafu vyznačte oblasti pracovních bodů a maximální zatížení.

Schéma zapojení obvodů:

Obr. 223 - Schéma měřicího obvodu



Měřicí prostředky: Zdroj U_{DC} 0 – 30V, multimetry V a A – M3890D Metex, rezistor R_O , různé Zenerovy diody, spojovací materiál.

Postup měření: Pro měření Zenerovo diod používáme zapojení v závěrném směru – hlavní využití vlastností součástky. Postupně nastavujeme napětí U_Z až do dosažení stavu postupného otevírání přechodu. Do tohoto bodu předpokládáme nulový proud I_Z . Od tohoto bodu zvyšujeme napětí U_Z velmi jemně a zaznamenáváme proud I_Z . Rezistor R_O odvodíme z předpokládaného napětí U_Z , maximálního proudu I_Z a napájecího napětí. Hodnoty zapisujeme do tabulky. Z naměřených údajů vytvoříme grafy průběhů měřených diod.

Tabulka 53 - Katalogové údaje LED diod

BZX 2V7		BZX 6V2		KZ 260/16	
Mezní hodnoty		Mezní hodnoty		Mezní hodnoty	
P_{TOT} (W)	1,3	P_{TOT} (W)	1,3	P_{TOT} (W)	1,3
U_Z (V)	2,7	U_Z (V)	6,2	U_Z (V)	16
I_{ZMAX} (mA)	480	I_{ZMAX} (mA)	210	I_{ZMAX} (mA)	81
Provozní hodnoty		Provozní hodnoty		Provozní hodnoty	
U_Z (V)	2,5 – 2,9	U_Z (V)	5,8 – 6,6	U_Z (V)	15,3 – 17,1
I_Z (mA)	80	I_Z (mA)	35	I_Z (mA)	25

Vzorce, výpočty:

$$R_o = \frac{U_{DC} - U_z}{I_{ZMAX}} = \frac{20 - 16}{0,025} = 160 \, \Omega$$

Pro měření jsme vybrali rezistor 82 Ω /5W.

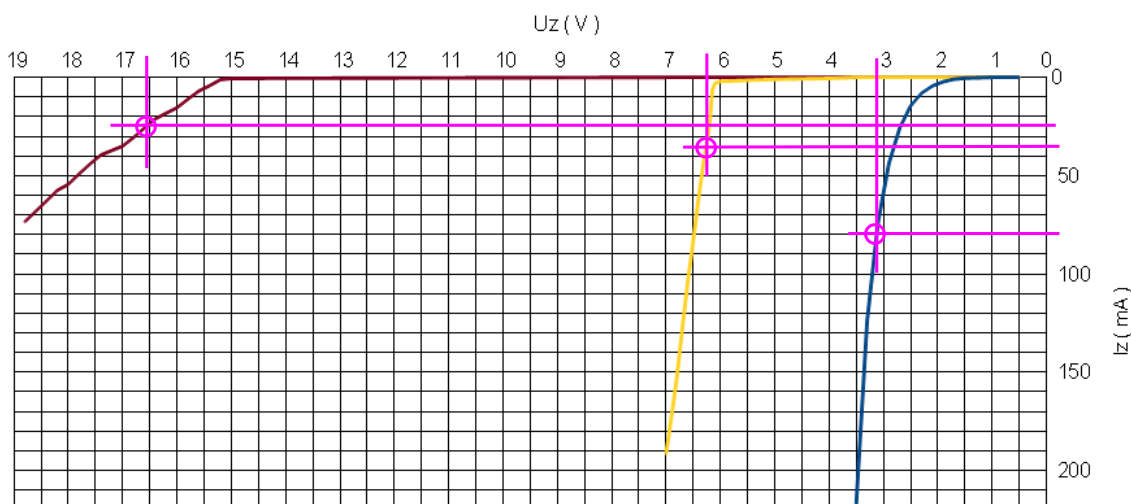
$$I_{MAX} = \sqrt{\frac{P}{R}} = \sqrt{\frac{5}{82}} = 0,247 \, A = 247 \, mA$$

Měření:

Tabulka 54 - Měření Zenerovo diod – závěrný směr

	BZX 2V7		BZX 6V2		KZ 260/16	
$U_z (V)$	$I_z (mA)$	$P (mW)$	$I_z (mA)$	$P (mW)$	$I_z (mA)$	$P (mW)$
0,5	0	0,0	0	0,0	0	0,0
1	0	0,0	0	0,0	0	0,0
1,5	0,38	0,6	0	0,0	0	0,0
1,7	0,9	1,5	0	0,0	0	0,0
1,9	2,2	4,2	0	0,0	0	0,0
2,1	4,32	9,1	0	0,0	0	0,0
2,3	8,09	18,6	0	0,0	0	0,0
2,5	14,4	36,0	0	0,0	0	0,0
2,7	25,58	69,1	0	0,0	0	0,0
2,9	43,8	127,0	0	0,0	0	0,0
3,1	73,8	228,8	0	0,0	0	0,0
3,3	123,8	408,5	0	0,0	0	0,0
3,5	217	759,5	0	0,0	0	0,0
4			0,5	2,0	0	0,0
5			1	5,0	0	0,0
6			2	12,0	0	0,0
6,1			3	18,3	0	0,0
6,15			6,54	40,2	0	0,0
6,2			24,3	150,7	0	0,0
6,3			41,5	261,5	0	0,0
6,4			60,8	389,1	0	0,0
6,5			83,4	542,1	0	0,0
6,6			103,6	683,8	0	0,0
6,7			127,4	853,6	0	0,0
6,8			152,2	1035,0	0	0,0
6,9			172,4	1189,6	0	0,0
7			191,4	1339,8	0	0,0
15					0,5	7,5
15,2					1,12	17,0
15,4					4,22	65,0
15,6					6,96	108,6
15,8					11,11	175,5
16					15,4	246,4
16,2					18,2	294,8
16,4					21,1	346,0
16,6					25,7	426,6
16,8					30,6	514,1
17					34,9	593,3
17,4					39,4	685,6
17,6					44	774,4
17,8					49	872,2
18					54,4	979,2
18,2					57,4	1044,7
18,4					62,8	1155,5
18,8					73,4	1379,9

Obr. 224 - Grafy Zenerovo diod – závěrný směr



Bezpečnost práce: Obvyklé zásady při měření v elektrolaboratoři.

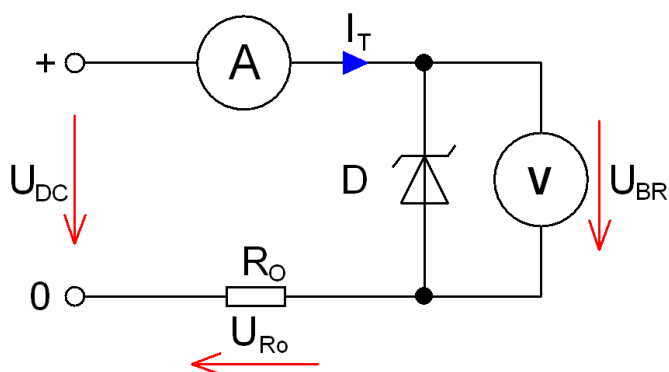
Závěr: Měření Zenerovo diod provádíme v závěrném směru, ve smyslu používání těchto součástek. Naměřené a katalogové údaje jsou měřením potvrzené u 2 typů s vyšším Zenerovo napětím. U diody 2V7 bylo zjištěné vyšší napětí U_Z při garantovaném proudu I_Z . To znamená, že tato součástka katalogovým údajům neodpovídá.

19.3. Praktické úloha - měření transilu

Zadání úlohy: Provedte měření charakteristiky jednosměrného transilu v závěrném směru a sestrojte graf. Se zjištěnými hodnotami porovnejte katalogové údaje. V grafu vyznačte oblasti pracovních bodů a maximální zatížení.

Schéma zapojení obvodů:

Obr. 225 - Schéma zkušebního obvodu



Měřicí prostředky: Zdroj U_{DC} 0 – 30V, multimetry V a A – M3890D Metex, rezistor R_O , jednosměrný transil P6KE 12, spojovací materiál.

Postup měření: Protože transil je součástka svým principem podobná Zenerovo diodě, je postup při měření V-A charakteristiky stejný. I zde zapojujeme součástku v závěrném směru. Postupně nastavujeme napětí U_{BR} až do dosažení bodu otevření přechodu. Do tohoto bodu je transil na rozdíl od Zenerovy diody zavřený. Od tohoto bodu zvyšujeme napětí U_{BR} velmi jemně a zaznamenáváme proud I_T . Rezistor R_O vypočítáme z předpokládaného napětí U_{BR} , maximálního proudu I_T a napájecího napětí U_{DC} . Hodnoty zapisujeme do tabulky. Z naměřených údajů vytvoříme graf V-A charakteristiky transilu.

Tabulka 55 - Katalogové údaje transilu

P6KE 12	
Mezní hodnoty	
P_{PPM} (W)	600
P_{TOT} (W)	5
U_{BR} (V)	12
I_{TMAX} (mA)	417
I_{FSM} (A)	100
Testovací hodnoty	
U_{BR} (V)	10,8 – 13,2
I_T (mA)	1

Vzorce, výpočty:

$$R_O = \frac{U_{DC} - U_Z}{I_{ZMAX}} = \frac{20 - 12}{0,3} = 26,6 \, \Omega$$

Pro měření jsme vybrali rezistor 47 Ω / 5W.

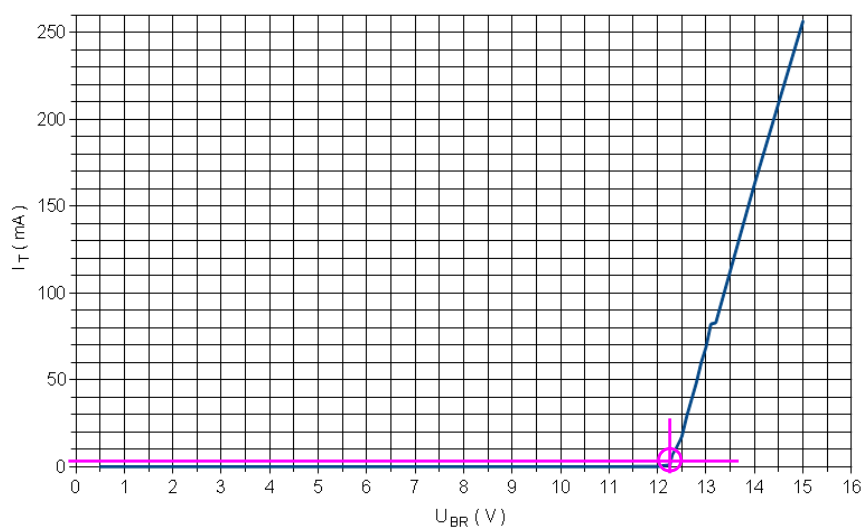
$$I_{MAX} = \sqrt{\frac{P}{R}} = \sqrt{\frac{5}{47}} = 0,326 \, A = 326 \, mA$$

Měření:

Tabulka 56 - Měření transilu

P6KE 12		
$U_{BR}(V)$	$I_T(mA)$	$P(mW)$
0,5	0	0,0
2	0	0,0
4	0	0,0
6	0	0,0
8	0	0,0
10	0	0,0
11	0	0,0
12	0,14	1,7
12,1	0,56	6,8
12,25	1	12,3
12,3	6,66	81,9
12,4	11,56	143,3
12,5	17,3	216,3
12,6	28,9	364,1
12,8	48,4	619,5
12,9	60	774,0
13	69	897,0
13,1	82,2	1076,8
13,2	82,8	1093,0
14	162,8	2279,2
15	256,6	3849,0

Obr. 226 - Graf V-A charakteristiky transilu



Bezpečnost práce: Podle zásad při měření v elektrolaboratoři.

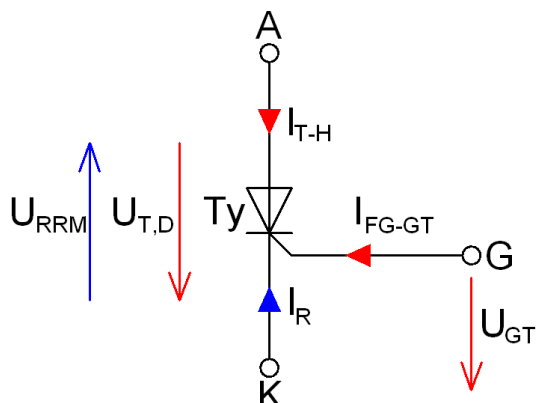
Závěr:

Z grafu jsme odečetli hodnoty podle katalogu výrobce. Můžeme konstatovat, že zjištěné testovací hodnoty odpovídají předpokladu.

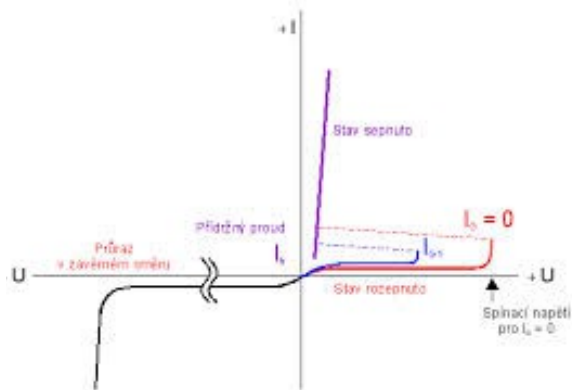
20. Měření na tyristoru

Tyristor je čtyřvrstvá bistabilní spínací součástka. Do propustného stavu se dostává, je-li na anodu „A“ přivedeno kladné napětí, na katodu „K“ zem a je-li na řídící elektrodě – hradle - „G“ proti zemi dostatečné kladné napětí. Po odpojení řídící elektrody „G“ od kladného zdroje tyristor zůstává otevřený až do přerušení proudu do anody „A“. V závěrném směru se tyristor chová jako dioda v závěrném směru. Tyristor je možno sepnout také překročením napětí U_D s nepřipojenou elektrodou „G“.

Obr. 227 - Tyristor



Obr. 228 V-A charakteristiky tyristoru



Tabulka 57 – Příklad katalogových údajů tyristoru

Katalogové údaje tyristoru	
I_{TAV} (A)	propustný proud střední
I_{FG} (mA)	propustný proud hradla stejnosměrný
U_D (V)	opakovatelné špičkové blokovací napětí
U_{RRM} (V)	opakovatelné špičkové závěrné napětí
I_H (mA)	přidržený proud vratný
I_{GT} (mA)	spínací proud hradla stejnosměrný
U_{GT} (V)	stejnoseměrné napětí hradla
U_T (V)	úbytek napětí na tyristoru – propustný směr
I_R (mA)	proud v závěrném směru
U_R (V)	závěrné napětí stejnosměrné

Měření provádíme pro ověření katalogových údajů součástky – statické parametry. To znamená např. stejnosměrné propustné napětí U_T , stejnosměrný přidržený proud vratný I_H , spínací proud hradla I_{GT} , napětí řídící elektrody U_{GT} . Dále můžeme ověřit chování součástky v obvodu, v celovlnném a půlvlnném zapojení. **Hodnoty v závěrném směru a blokovací napětí v propustném směru nelze měřit pro velmi vysoké hodnoty napětí. Jsou značně vyšší, než povolují bezpečnostními předpisy pro práci v elektrolaboratoři.**

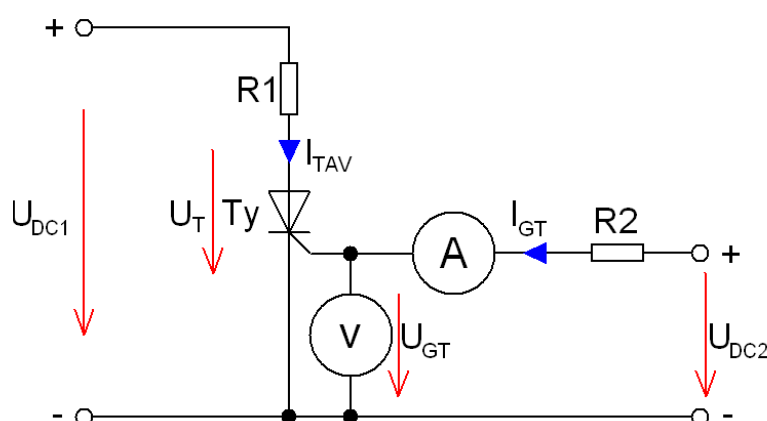
Pro praktické měření je výhodnější použít typ tyristoru s vyšším propustným proudem. Katalogové údaje mají vyšší hodnotu a snadněji se nastavují.

20.1. Praktická úloha - měření spínacího proudu a napětí řídicí elektrody - hradla

Zadání úlohy: Provedte měření spínacího proudu I_{GT} a spínacího napětí U_{GT} tyristoru při více hodnotách obou veličin. Zaznamenejte co nejpřesněji okamžik otevření tyristoru. Měřené hodnoty запиšte do tabulky. Porovnejte s katalogovými údaji.

Schéma zapojení:

Obr. 229 - Schéma zapojení obvodu



Měřicí prostředky: Zdroj U_{DC1} , U_{DC2} (0 – 30V), měření U_T , I_{TAV} , I_{GT} a U_{GT} – M3890D Metex, rezistory R1, R2, tyristor KT 708, spojovací materiál.

Postup měření: Podle katalogových údajů dopočítáme hodnoty omezovacích rezistorů R1 a R2. Zapojíme obvod podle schéma. Postupně nastavujeme proud I_{GT} a zapisujeme U_{GT} , I_{TAV} , U_T . Hodnoty zapisujeme do tabulky. Z naměřených údajů vyhodnotíme minimální spínací proud hradla.

Tabulka 58 - Katalogové údaje tyristoru

Katalogové údaje tyristoru KT 708			
I_{TAV} (A)	propustný proud střední	<15	s chlazením
I_{TAV} (A)	propustný proud střední	<3	bez chlazení
I_{FG} (mA)	propustný proud hradla stejnosměrný	<2000	
U_D (V)	opakovatelné špičkové blokovací napětí	<700	
U_{RRM} (V)	opakovatelné špičkové závěrné napětí	<700	
I_H (mA)	přidržený proud vratný	<50	
I_{GT} (mA)	spínací proud hradla stejnosměrný	<40	
U_T (V)	úbytek napětí na tyristoru – propustný směr	<1,7	
I_R (mA)	proud v závěrném směru	<3	
U_R (V)	závěrné napětí stejnosměrné	700	

Vzorce, výpočty:

$$R1 = \frac{U_{DC1}}{I_{TAV}} = \frac{25}{0,5} = 50 \, \Omega$$

Pro měření jsme vybrali rezistor 47 Ω /12 W.

$$I_{MAX} = \sqrt{\frac{P}{R}} = \sqrt{\frac{12}{47}} = 0,505 \, A = 505 \, mA$$

$$R2 = \frac{U_{DC2}}{I_{GT}} = \frac{25}{0,05} = 560 \, \Omega$$

Pro měření jsme vybrali rezistor 560 Ω /2 W.

$$I_{MAX} = \sqrt{\frac{P}{R}} = \sqrt{\frac{2}{560}} = 0,0598 \, A = 59,8 \, mA$$

Měření:

Tabulka 59 - Měření tyristoru

U_T (V)	I_T (A)	I_{GT} (mA)	U_{GT} (mV)
24,75	0	1	48,3
24,7	0	2	97,1
24,7	0	5	240
24,7	0	10	470
24,7	0	12	560
24,7	0	14	670
24,7	0	16	780
24,7	0	16,4	784
0,81	0,5	16,5	790
0,8	0,5	20	870
0,8	0,5	30	978
0,8	0,5	40	1040

Tyristor sepnul při proudu $I_{GT} = 16,5 \, mA$. Napětí $U_{GT} = 0,81 \, V$ při proudu $I_{TAV} = 0,5 \, A$.

Bezpečnost práce: Podle zásad při měření v elektrolaboratoři.

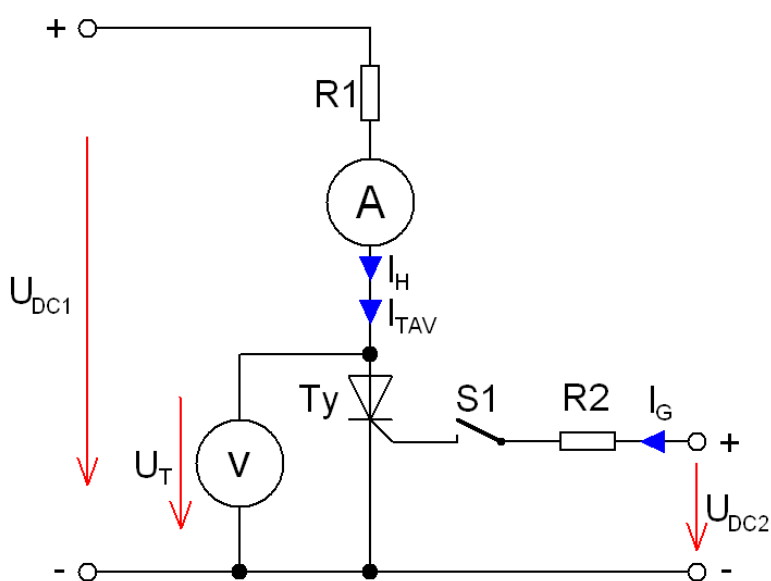
Závěr: Z tabulky jsme odečetli hodnoty minimálního spínacího proudu hradla. Srovnáním s katalogovými údaji zjistíme, že hodnoty odpovídají údajům výrobce pro tento typ tyristoru.

20.2. Praktická úloha - měření stejnosměrného přídržného (vratného) proudu

Zadání úlohy: Provedte ověření vratného přídržného proudu I_H pro daný typ tyristoru. Snižujte postupně proud I_{TAV} , měřte napětí U_T a zaznamenávejte hodnoty do tabulky. Co nejpresněji zjistěte hodnotu I_H při přechodu tyristoru do blokovacího stavu. Zjištěnou hodnotu porovnejte s katalogovým údajem.

Schéma zapojení:

Obr. 230 - Schéma zapojení obvodu



Měřicí prostředky: Zdroj U_{DC1} , U_{DC2} (0 – 30V), multimetry V a A – M3890D Metex, rezistory R1, R2, tyristor KT 708, spojovací materiál.

Postup měření: Stanovíme hodnotu rezistoru R1 pro omezení proudu I_{TAV} (pro spolehlivé sepnutí tyristoru cca 25% jmenovité hodnoty). Dopočítáme hodnotu rezistoru R2. Zapojíme obvod podle schéma. Tyristor sepneme tlačítkem S1. Postupně snižujeme proud I_{TAV} (I_H) a sledujeme U_T . Hodnoty zapisujeme do tabulky. Z naměřených údajů co nejpresněji určíme proud I_H těsně před vypnutím tyristoru.

Tabulka 60 - Katalogové údaje tyristoru

Katalogové údaje tyristoru KT 708			
I_{TAV} (A)	propustný proud střední	<3	bez chlazení
I_H (mA)	přídržný proud vratný	<50	
U_T (V)	úbytek napětí na tyristoru – propustný směr	<1,7	

Vzorce, výpočty:

$$R1 = \frac{U_{DC1}}{I_{TAV}} = \frac{25}{0,75} = 33,33 \, \Omega$$

Pro měření jsme vybrali rezistor 33 Ω /20 W.

$$I_{MAX} = \sqrt{\frac{P}{R}} = \sqrt{\frac{20}{33}} = 0,778 \, A = 778 \, mA$$

$$R2 = \frac{U_{DC2}}{I_{GT}} = \frac{25}{0,03} = 833,33 \, \Omega$$

Pro měření jsme vybrali rezistor 820 Ω /2 W.

$$I_{MAX} = \sqrt{\frac{P}{R}} = \sqrt{\frac{2}{820}} = 0,04939 \, A = 49,4 \, mA$$

Měření:

Tabulka 61 - Měření tyristoru

U_T (V)	I_H (mA)	U_T (V)	I_H (mA)	U_T (V)	I_H (mA)
0,73	250	0,949	19	1,28	13,6
0,69	100	0,971	18	1,334	13,4
0,84	50	0,998	17	1,4	13,2
0,876	30	1,037	16	1,48	13
0,893	25	1,11	15	1,6	12,8
0,933	20	1,21	14	14,23	0

Tyristor přešel do blokovacího stavu při proudu $I_H = 12,8 \, mA$.

Bezpečnost práce: Podle zásad při měření v elektrolaboratoři.

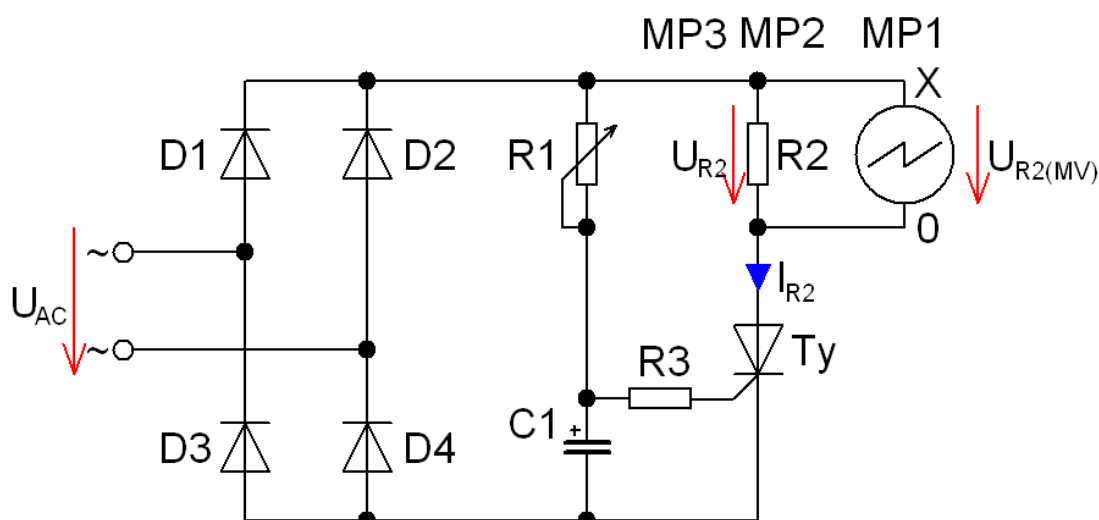
Závěr: Z tabulky parametrů pro měřený tyristor jsme zjistili velikost vratného, přídržného, proudu $I_H < 50 \, mA$. Po porovnání s naměřenou hodnotou můžeme konstatovat, že i tento parametr odpovídá údajům výrobce.

20.3. Praktická úloha – měření tyristoru v obvodu celovlnného usměrnění

Zadání úlohy: Pomocí osciloskopu ověřte princip celovlnné regulace proudu tyristorem. Měření provedte v několika (min. 4) úrovních otevření tyristoru. Provedte kontrolní měření napětí a proudu. Zapište zjištěné hodnoty a porovnejte s předpokladem.

Schéma zapojení:

Obr. 231 - Zapojení obvodu



Měřicí prostředky: MP1 – osciloskop UTD 2025C, MP2, MP3 – Metex M3890D, tyristor KT 708, diody D1-D4 1N4007, potenciometr R1 10-50 kΩ/N, zatěžovací rezistor R2 82 Ω/10 W, rezistor R3 100-500 Ω, kondenzátor C1 1-5 μF/35 V, zdroj $U_{AC} = 21$ V, osciloskopická sonda, spojovací materiál.

Postup měření: Ověříme zatížitelnost rezistoru R2. Sestavíme obvod podle schéma zapojení. Potenciometrem nastavíme postupně otevření cca 100%, 75%, 50%, 25% a 0%. Měříme napětí a proud. Zaznamenáme hodnoty. Dopočítáme výkon na R2.

Vzorce, výpočty:

Pro měření jsme na pozici R2 vybrali rezistor 82 Ω/10 W.

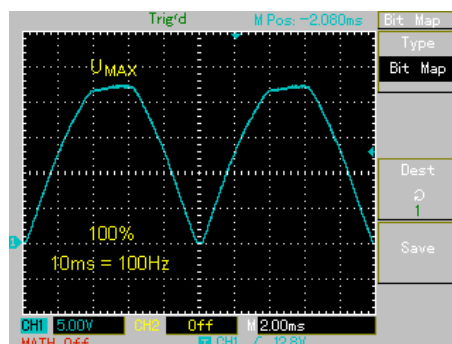
$$I_{MAX} = \sqrt{\frac{P}{R}} = \sqrt{\frac{10}{82}} = 0,349 \text{ A, to je přibližně do 350 mA.}$$

Výkon na rezistoru R2: $P_{R2} = U_{R2} \cdot I_{R2}$

Měření:

Tabulka 62 - otevření tyristoru 100%

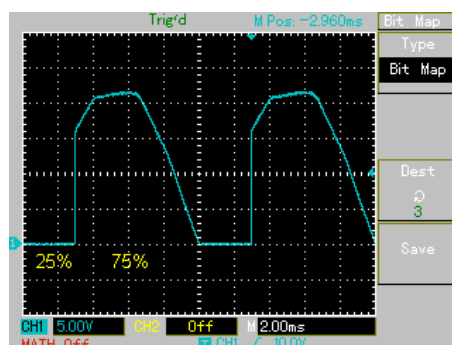
U_{R2} (V)	I_{R2} (mA)	$U_{R2(MV)}$ (V)	P_{R2} (W)
14,71	172,2	22,5	2,53



Obr. 232 - otevření tyristoru 100%

Tabulka 63 - otevření tyristoru 75%

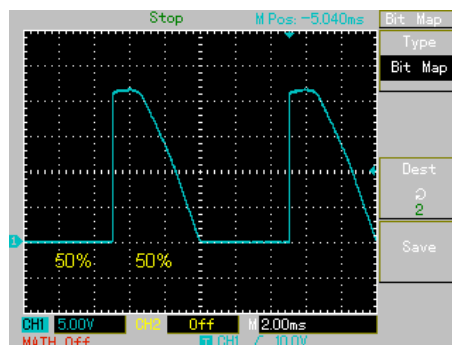
U_{R2} (V)	I_{R2} (mA)	$U_{R2(MV)}$ (V)	P_{R2} (W)
13,21	154	22,5	2,03



Obr. 233 - otevření tyristoru 75%

Tabulka 64 - otevření tyristoru 50%

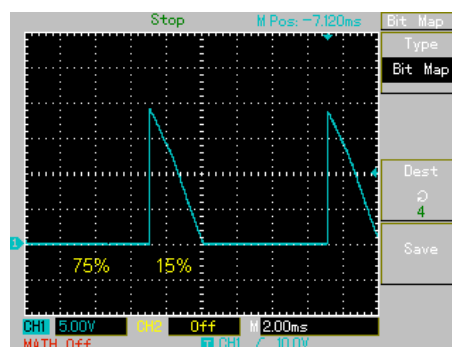
U_{R2} (V)	I_{R2} (mA)	$U_{R2(MV)}$ (V)	P_{R2} (W)
7,74	92	22,5	0,71



Obr. 234 - otevření tyristoru 50%

Tabulka 65 - otevření tyristoru 25%

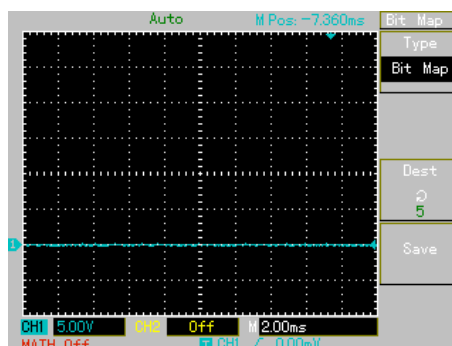
U_{R2} (V)	I_{R2} (mA)	$U_{R2(MV)}$ (V)	P_{R2} (W)
3,512	41,6	19	0,15



Obr. 235 - otevření tyristoru 25%

Tabulka 66 - otevření tyristoru 0%

U_{R2} (V)	I_{R2} (mA)	$U_{R2(MV)}$ (V)	P_{R2} (W)
0,0062	0,08	0	0,00



Obr. 236 - otevření tyristoru 0%

Bezpečnost práce: Podle zásad při měření v elektrolaboratoři.

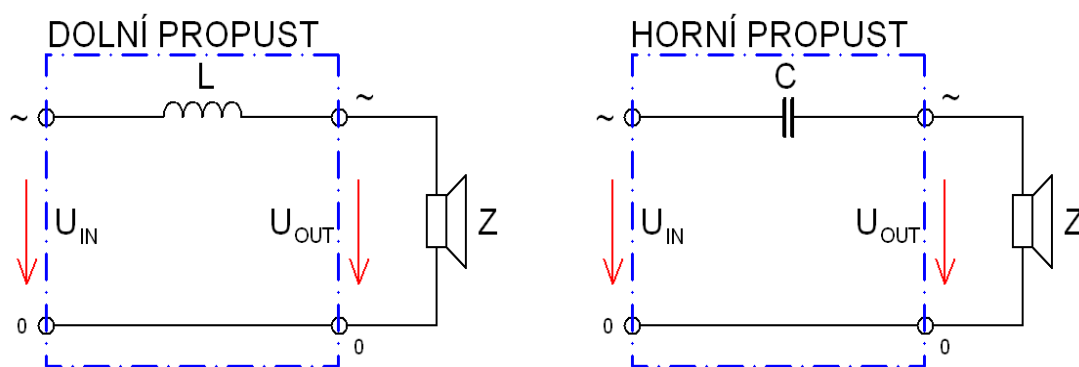
Závěr: Naměřené velikosti napětí a proudu na rezistoru R2 odpovídají předpokládaným hodnotám. Zmenšují se úměrně, na $\frac{3}{4}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$ počátečních hodnot. Na osciloskopu je zřetelně vidět, jak amplituda „ubývá“.

21. Dvoupásmové reproduktorové výhybky LC filtry

LC filtry se navrhují ručně složitými výpočty nebo pomocí speciálních programů na PC. Charakteristiky členů vyšších řádů, přenosové a fázové, mají vyšší strmost a mohou mít odlišný tvar než u RC členu. Počet L a C určuje řád filtru a tím i strmost charakteristik. **LC filtry sestavené z reálných součástek správně pracují pouze v omezeném frekvenčním rozsahu.** Tvar frekvenční charakteristiky je určen tzv. aproximací.

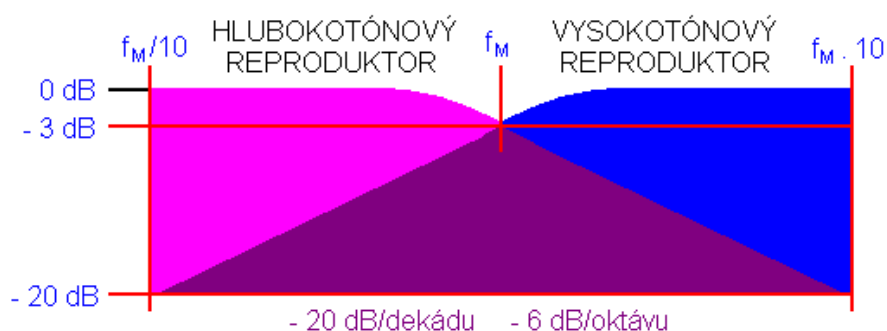
Dvoupásmové reproduktorové výhybky se zapojují pro optimální rozložení přenášeného kmitočtového pásma na dvě části. Pro hlubokotónový reproduktor se používá dolní propust, pro vysokotónový konstruujeme horní propust.

Filtry 1. řádu



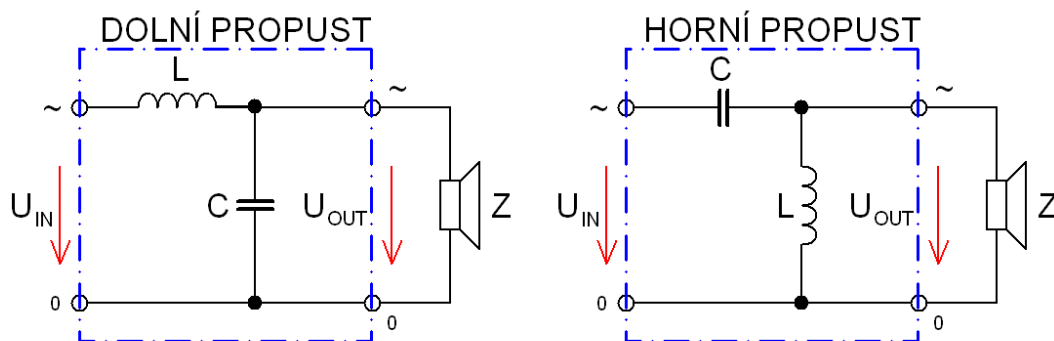
Obr. 237 - Zapojení výhybek – strmost - 20 dB/dekádu (- 6 dB/oktávu)

Tlumivka propouští nízké kmitočty a zadržuje vyšší. K tomuto filtru připojujeme hlubokotónový reproduktor. Kondenzátor naopak tlumí nízké frekvence a propouští vyšší. K tomuto členu připojujeme reproduktor vysokotónový. Obě propusti dělí mezní kmitočet. Od jeho hodnoty se přenos mění o -20 dB/dekádu. Také je možné použít údaj -6 dB/oktávu.



Obr. 238 - Princip výhybky – 20 dB/dekádu

Filtry 2. řádu



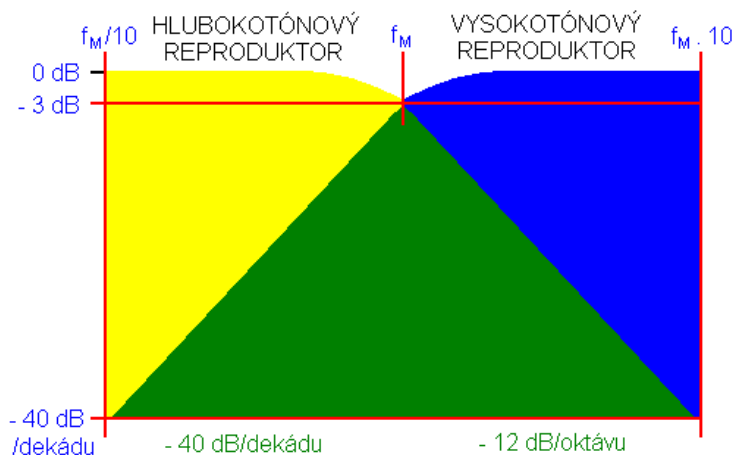
Obr. 239 - Zapojení výhybek – strmost - 40 dB/dekádu (- 12 dB/oktávu)

Filtr 2. řádu se podobá RC členu, jen rezistor je nahrazený tlumivkou. Proto články LC. Protože kmitočtově jsou závislé obě součástky, jedná se o členy „2. řádu“.

U dolní propusti pro procházející napětí tlumivka představuje nízkou hodnotu reaktance a kondenzátor naopak hodnotu vysokou. Proto jsou napětí na nízkých kmitočtech propouštěná s minimálním útlumem. Od hodnoty mezního kmitočtu se projeví klesající reaktance tlumivky, kondenzátor pro vysoké kmitočty představuje téměř zkrat. Proto se napětí s rostoucím kmitočtem na výstupu členu zmenšuje. K tomuto filtru připojujeme hlubokotónový reproduktor.

Horní propust se projevuje opačně. Kondenzátor má na nízkých kmitočtech velkou reaktanci a tlumivka nízkou. Proto na výstupu je malé napětí. Se stoupajícím kmitočtem se zmenšuje reaktance kondenzátoru a u tlumivky se tato hodnota naopak zvyšuje. Na výstupu členu napětí stoupá. K tomuto členu připojujeme reproduktor vysokotónový.

Obě propusti dělí mezní kmitočet. Od jeho hodnoty se přenos mění o -40 dB/dekádu. Také je možné použít údaj -12 dB/oktávu.



Obr. 240 - Princip výhybky – 40 dB/dekádu

21.1. Charakteristické vlastnosti výhybek

Rovněž tyto obvody chápeme jako čtyřpól nebo dvojbran. Vstupní strana - napětí proti zemi - U_{IN} a také strana výstupní – napětí vůči zemi - U_{OUT} .

Mezní kmitočet – f_M - frekvence, při kterém dojde k poklesu přenosu o **3 dB**. Podíl U_{OUT} vůči U_{IN} je tedy při tomto kmitočtu $1/\sqrt{2}$. Také udáváme jako kmitočet dělicí a určujeme ho z parametrů kmitočtového využití reproduktorů.

Při mezním kmitočtu musí platit:

$$U_{OUT} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot U_{IN} \quad \text{nebo} \quad U_{OUT} = 0,707 \cdot U_{IN}$$

Strmost – změna přenosu v - **dB/dekádu** nebo v - **dB/oktávu**. Rozlišujeme od hodnoty f_M (zisk - $A_U = -3\text{dB}$). Tvar frekvenční charakteristiky je určen tzv. aproximací.

Fázový posun – zpoždění nebo předbíhání výstupního napětí oproti vstupnímu. Značíme φ (°).

Tabulka 67 – předpokládané fázové posuny

	φ (°) při $f_M/10$	φ (°) při f_M	φ (°) při $f_M \cdot 10$
LC 1. řádu DP	0°	-45°	-90°
LC 1. řádu HP	0°	45°	90°
LC 2. řádu DP	0°	-90°	-180°
LC 2. řádu HP	0°	90°	180°

Přenos – Jedná o poměr napětí na výstupu členu oproti vstupu. Protože dochází k útlumu, má zápornou hodnotu. Vyjadřuje se značkou **A** a protože v naprosté většině případů se jedná o vztahy vstupního a výstupního napětí, doplňujeme index u (**A_U**). Poměr napětí přepočítáme v **dB**.

Přenos členu: (zisk): (udává se v -dB)

$$A_U = 20 \cdot \log \frac{U_{OUT}}{U_{IN}} \quad [\text{dB}, V, V]$$

Dekáda - kmitočet 10x vyšší nebo 10x nižší.

Oktáva - kmitočet dvojnásobný nebo poloviční.

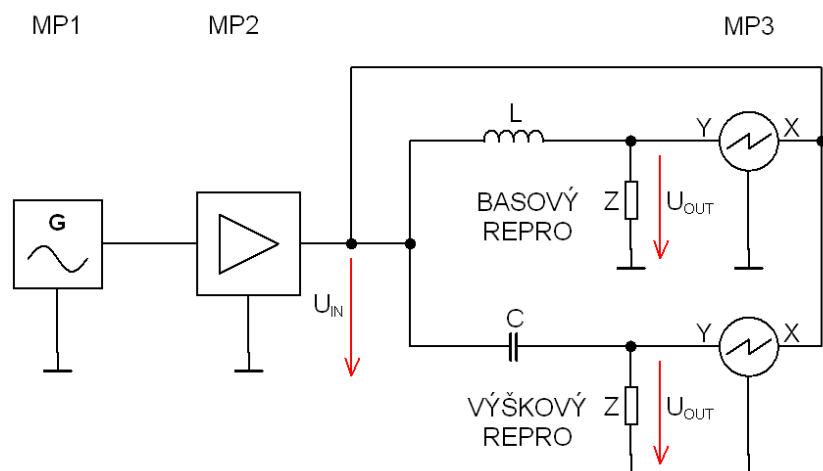
21.2. Měření dvoupásmové reprovýhybky 1. řádu

Postup měření:

- 1) zadání úlohy
- 2) schéma zapojení
- 3) měřicí prostředky
- 4) měření hodnot součástek a kontrolní výpočty
- 5) sestavení obvodu
- 6) měření a záznam hodnot pro přenosovou a fázovou charakteristiku
- 7) sestrojení grafů charakteristik
- 8) porovnání vypočtených a naměřených hodnot

Zadání: Provedte měření parametrů dvoupásmové reproduktorové výhybky 1. řádu. Ověřte hodnoty kontrolními výpočty. Změřte přenosovou a fázovou charakteristiku v kmitočtovém pásmu 15 – 32 000 Hz. Sestrojte grafy přenosové a fázové charakteristik. Vyznačte oblast kmitočtů pro basový a výškový reproduktor. Porovnejte vypočtené a naměřené hodnoty.

Obr. 241 - Schéma zapojení obvodu



Měřicí prostředky: MP1 - Funkční generátor UTG9000A, MP2 – nf zesilovač 20 W, MP3 - osciloskop UNI-T UTD 2000, tlumivka L, kondenzátor C, zatěžovací impedance Z, spojovací kablíky, osciloskopické sondy.

Měření, vzorce, výpočty:

Měření: $L = 2,429 \text{ mH}$, $C = 10,205 \text{ }\mu\text{F}$, $Z = 15,94 \text{ }\Omega$

Kontrolní výpočet mezního kmitočtu dolní propusti:

$$f_M = \frac{Z}{2 \cdot \pi \cdot L} = \frac{15,94}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,002429} = 1044,43 \text{ Hz}$$

Kontrolní výpočet mezního kmitočtu horní propusti:

$$f_M = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot Z \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 15,94 \cdot 0,000010205} = 978,4 \text{ Hz}$$

Výpočet přenosu: $A_U = 20 \cdot \log \frac{U_{OUT}}{U_{IN}}$

Výpočet fázového posunu:

$$\text{fázový posun } \varphi = \frac{360^\circ}{\text{rozměr sinusovky} - \mathbf{A} \text{ (dílky)}} \cdot \text{posun X oproti Y} - \mathbf{B} \text{ (dílky)}$$

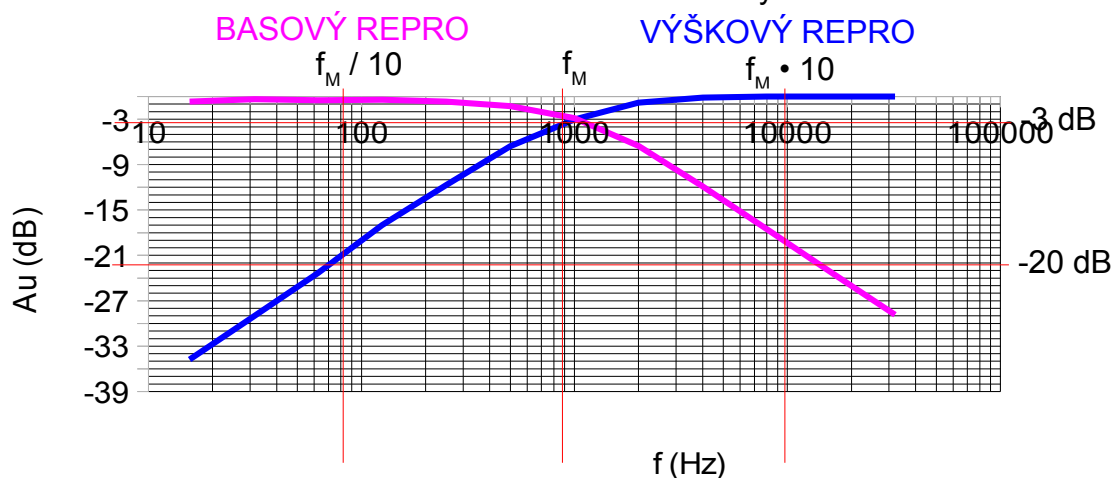
Protože se u dolní propusti výstup oproti vstupu zpožďuje, dosadíme parametr „B“ v záporné polaritě, u horní propusti necháme hodnotu „B“ kladnou.

Tabulka a grafy:

Tabulka 68 - Měření přenosové charakteristiky

f (Hz)	U _{in}	U _{out}	A _u (dB)	U _{in}	U _{out}	A _u (dB)
15,6	5,36	4,96	-0,6736623	6,45	0,12	-34,753554
31,5	7,92	7,6	-0,3582318	8,56	0,30	-28,992004
62,5	9,20	8,7	-0,4853715	9,60	0,65	-23,360473
125	9,68	9,2	-0,4417506	9,20	1,30	-16,99689
250	9,84	9,12	-0,6600052	10,00	2,60	-11,700533
500	10,00	8,64	-1,2697252	10,00	4,70	-6,5580428
1000	10,00	7,2	-2,8533501	10,00	7,07	-3,0116117
2000	10,00	4,72	-6,52116	9,92	9,04	-0,8068648
4000	9,60	2,44	-11,897628	9,60	9,44	-0,1459848
8000	8,88	1,18	-17,530619	8,80	8,80	0
16000	7,80	0,536	-23,258596	8,00	8,00	0
32000	7,36	0,266	-28,839924	7,40	7,40	0

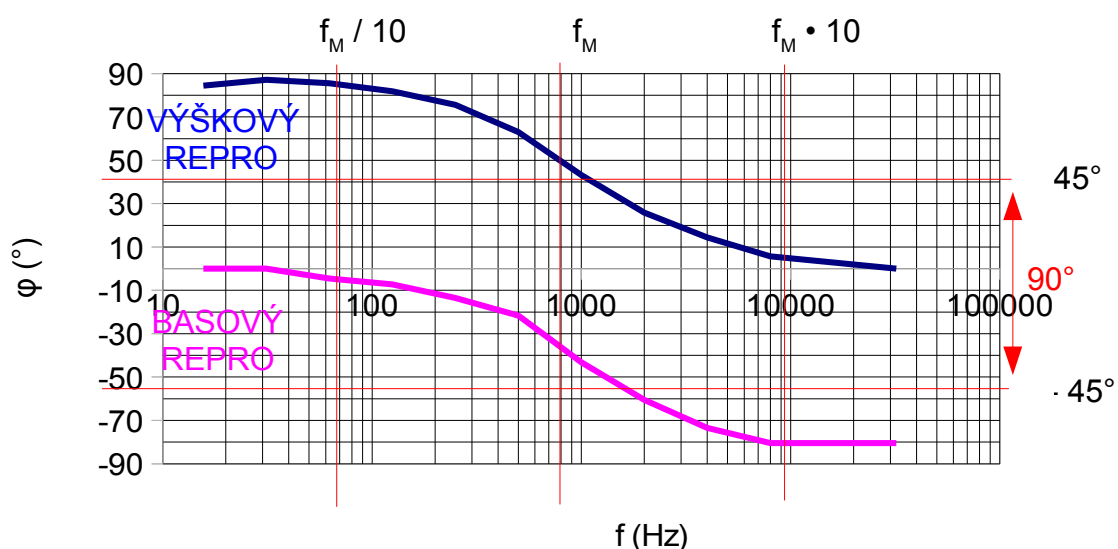
Obr. 242 - Přenosová charakteristiky



Tabulka 69 - Měření fázových charakteristik

f (Hz)	A	B	φ (°)	A	B	φ (°)
15,6	32,0	0,0	0	32,0	7,50	84,375
31,25	31,0	0,0	0	31,0	7,50	87,097
62,5	40,0	0,5	-4,5	40,0	9,50	85,500
125	40,0	0,8	-7,2	40,0	9,10	81,900
250	40,0	1,5	-13,5	40,0	8,40	75,600
500	20,0	1,2	-21,6	20,0	3,50	63,000
1000	25,0	3,0	-43,2	25,0	3,00	43,200
2000	25,0	4,2	-60,48	25,0	1,80	25,920
4000	25,0	5,1	-73,44	25,0	1,00	14,400
8000	31,3	7,0	-80,511182	31,5	0,50	5,714
16000	31,3	7,0	-80,511182	31,5	0,25	2,857
32000	31,3	7,0	-80,511182	31,5	0,00	0,000

Obr. 243 - Fázové charakteristiky



Bezpečnost práce při měření: (obvyklá podle zásad laboratoře elektrického měření).

Závěr:

V rozmezí 15 – 32 000 Hz bylo provedeno měření kmitočtové a fázové charakteristiky pro obě pásma. Naměřené hodnoty jsou zapsané v tabulkách. Na základě naměřených hodnot jsme dopočítali přenosy pro obě pásma a fázový posun. V grafech jsou vyznačené hlavní rozlišovací body.

Z výsledků lze poznat, že naměřené hodnoty přenosu přibližně odpovídají předpokladům. Odchylka hodnot fázového posunu je způsobena nezapočítanými skutečnými vstupními a výstupními impedancemi zesilovače a osciloskopu a kapacitou kabelů.

Při dělicím kmitočtu jsou reproduktory fázově posunuté o 90°. Z tohoto důvodu není fázování reproduktorů podstatné.

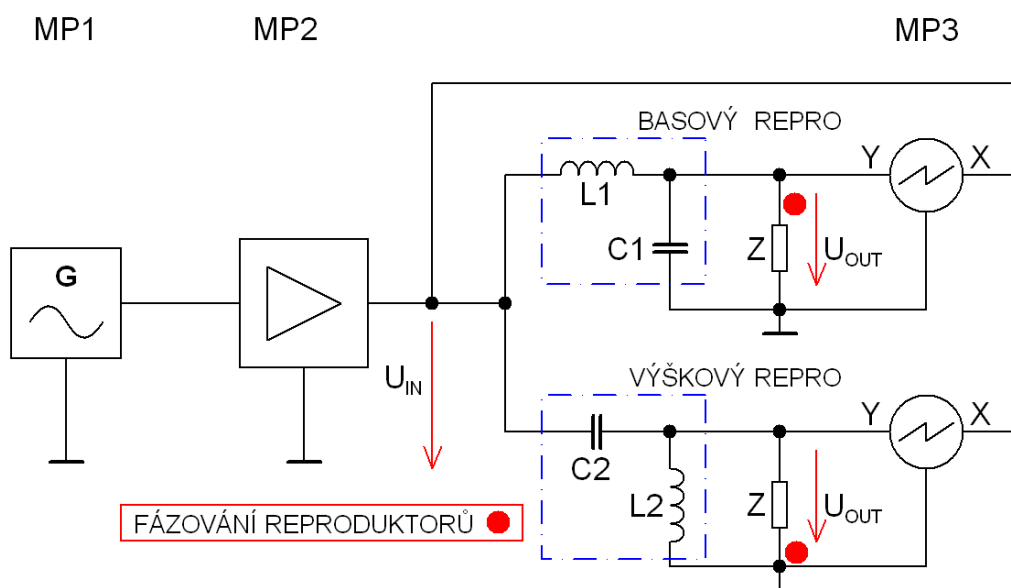
21.3. Měření dvoupásmové reproduktorové výhybky 2. řádu

Pracovní postup:

- 1) zadání úlohy
- 2) schéma zapojení
- 3) měřicí prostředky
- 4) měření hodnot součástí a kontrolní výpočty
- 5) sestavení obvodu
- 6) měření a záznam hodnot pro přenosovou a fázovou charakteristiku
- 7) sestrojení grafů charakteristik
- 8) porovnání vypočtených a naměřených hodnot

Zadání: Provedte měření parametrů dvoupásmové reproduktorové výhybky 2. řádu. Ověřte hodnoty kontrolními výpočty. Změřte přenosovou a fázovou charakteristiku v kmitočtovém pásmu 15 – 32 000 Hz. Sestrojte grafy přenosové a fázové charakteristik. Vyznačte oblast kmitočtů pro basový a výškový reproduktor. Zdůvodněte fázování reproduktorů. Porovnejte předpokládané a naměřené hodnoty.

Obr. 244 - Schéma zapojení obvodu



Měřicí prostředky: MP1 - Funkční generátor UTG9000A, MP2 – nf zesilovač 20 W, MP3 - osciloskop UNI-T UTD 2000, tlumivky L1, L2, kondenzátory C1, C2, zatěžovací impedance Z, spojovací kablíky, osciloskopické sondy.

Poznámka: Tlumivky a kondenzátory v ideálním stavu by měly mít stejnou hodnotu.
 $L1 = L2$ a $C1 = C2$

Měření, vzorce, výpočty:

Předpoklad: $L_1, L_2 = 0,6 \text{ mH}$, $C_1, C_2 = 4,7 \text{ }\mu\text{F}$, $Z = 8 \text{ }\Omega$

$\sqrt{2}$ – konstanta pro výpočet LC členu 2. řádu.

Kontrolní výpočet mezního kmitočtu pro basový repro:

$$f_M = \frac{\sqrt{2} \cdot Z}{2 \cdot \pi \cdot L} = \frac{1,414 \cdot 8}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,006} = 3001,05 \text{ Hz}$$

Kontrolní výpočet mezního kmitočtu pro výškový repro:

$$f_M = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot 2 \cdot \pi \cdot Z \cdot C} = \frac{1}{1,414 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 8 \cdot 0,0000047} = 2995,04 \text{ Hz}$$

Vztahy pro výpočet přenosu a fázového posunu jsou stejné jako u předchozí výhybky.

Předpoklad: Jedná o typ propusti s vyšší strmostí. To znamená, napětí na výstupu by se mělo měnit o 40 dB/dekádu. Nebo o 12 dB/oktávu.

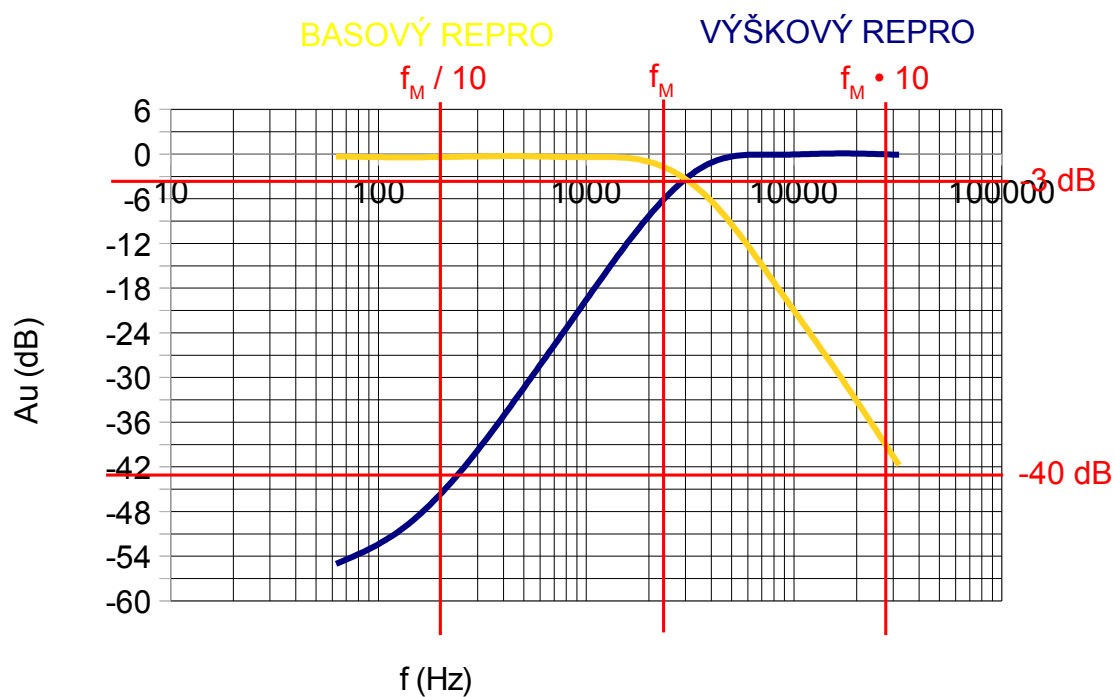
Při mezním kmitočtu dochází k posunu výstupního napětí o 90° . Oba reproduktory jsou tedy při tomto kmitočtu posunuté o 180° . **U této propusti je tedy nutné reproduktory správně fázovat** (jedna svorka bývá označena barevnou tečkou).

Tabulka a grafy:

Tabulka 70 - Měření přenosové charakteristiky

f (Hz)	U_{IN} (V)	U_{OUT} (V)	A_U (dB)	U_{IN} (V)	U_{OUT} (V)	A_U (dB)
62,5	9,04	8,72	-0,313	9,92	0,0176	-55,020
125	9,84	9,36	-0,434	10,32	0,0302	-50,673
250	10,00	9,6	-0,355	10,48	0,0784	-42,521
500	10,00	9,68	-0,282	10,48	0,282	-31,402
1000	10,16	9,68	-0,420	10,48	1,1	-19,579
2000	10,08	8,96	-1,023	10,32	3,96	-8,320
4000	10,00	4,84	-6,303	9,76	8,56	-1,140
8000	9,20	1,27	-17,200	8,96	8,88	-0,078
16000	8,24	0,288	-29,131	8	8,08	0,086
32000	7,84	0,064	-41,763	7,28	7,2	-0,096

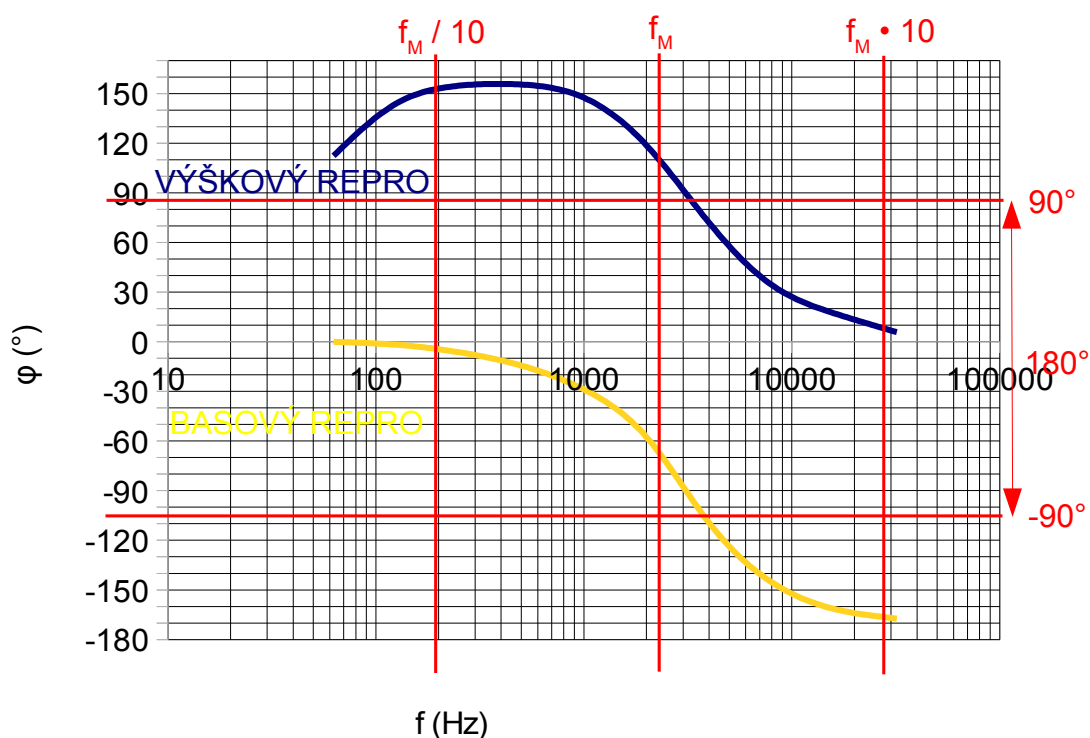
Obr. 245 - Přenosové charakteristiky



Tabulka 71 - Měření fázových charakteristik

f (Hz)	A	B	φ (°)	A	B	φ (°)
62,5	40,0	0,0	0,00	40,0	12,5	112,50
125	40,0	0,2	-1,80	40,0	16,0	144,00
250	40,0	0,7	-6,30	40,0	17,2	154,80
500	50,0	2,0	-14,40	50,0	21,6	155,52
1000	50,0	4,0	-28,80	50,0	20,5	147,60
2000	50,0	8,0	-57,60	50,0	16,5	118,80
4000	25,0	7,6	-109,44	25,0	5,0	72,00
8000	31,2	12,6	-145,38	31,4	3,0	34,39
16000	31,2	14,0	-161,54	31,4	1,5	17,20
32000	31,2	14,5	-167,31	31,2	0,5	5,77

Obr. 246 - Fázové charakteristiky



Bezpečnost práce při měření: podle zásad v elektrolaboratoři

Závěr:

Požadované charakteristiky byly změřené v rozsahu 62,5 – 32000 Hz. Pásmo bylo zúžené s ohledem na předpokládaný mezní kmitočet. Hodnoty pro oba přenosy a fázové posuny byly zapsané a dopočítané v tabulkách. Na základě vypočítaných hodnot byly sestaveny příslušné grafy. Pro názornost jsou v grafech vyznačeny hlavní parametry výhybek.

Z výsledků můžeme usoudit, že naměřené hodnoty přenosu a fázového posunu v rozmezí uvažovaných dvou dekád, ($f_M/10$ až $f_M \cdot 10$), odpovídají předpokladům.

Při dělicím kmitočtu jsou reproduktory fázově posunuté o 180° . Z tohoto důvodu je fázování reproduktorů velmi podstatné. V opačném případě by u obou reproduktorů v oblasti kolem f_M měly membrány opačný zdvih!

Ve srovnání s výhybkou 1. řádu má tato výhybka 2. řádu strmější oddělení obou pásem. V praxi ale nedá s určitostí říci, že to je vždy výhodnější. Výhybky s vyšší strmostí mají nekontrolovatelné fázové posuny a tím se může do reprodukce zanést velké zkreslení (viz graf fázových charakteristik filtrů 2. řádu). Pro reproduktorové soustavy se proto výhybky vyšších řádů většinou nepoužívají.

22. Elektrické měření a ochrana životního prostředí

Všeobecně by se dalo říci, že při elektrickém měření žádný odpad nevzniká a proto oblast životního prostředí není žádným způsobem zatěžovaná. Musíme vzít ale v úvahu spotřebu elektrické energie a tím i způsoby její výroby. V současné době většina elektrické energie je vyráběná v tepelných a jaderných elektrárnách a objektivně musíme konstatovat, že to asi ještě mnoho let tak zůstane. Měřicí přístroje jsou napájené z baterií nebo akumulátorů, jejichž výroba je rovněž ekologicky náročná. Hlavně jejich likvidace. Při různých opravách se běžně používá pájení. V současné době je požadavek na bezpodmínečné pájení bezolovnatými pájkami. Z uvedených příkladů je patrné, že v praxi je nutné opotřebené přístroje, součástky a jiné elektropříslušenství pečlivě třídit a odevzdávat na určená místa do sběrných dvorů.

22.1. Příklady výroby elektrické (zelené) energie z obnovitelných zdrojů

1) Fotovoltaické elektrárny

Jde o významný přínos pro ochranu klimatu a životního prostředí při výrobě elektrické energie. Přeměna sluneční energie na elektrickou je čistá a nevzniká při ní žádný odpad. V praxi jde o nejčistší způsob výroby elektřiny. Pro srovnání: 1 kW instalovaného výkonu fotovoltaické elektrárny ročně ušetří až 850 kg CO₂. Zdroj energie – slunce - je zdarma.

Fotony slunečního záření dopadají na přechod P-N v solárním článku a svou energií vyrážejí volné elektrony. Tyto se pomocí elektrod a vodičů jako elektrický proud odvedou přímo ke spotřebiči, případně do akumulátoru. Pro napájení běžných domácích elektrospotřebičů na střídavý proud je nutno doplnit střídač – měnič, který energii převede na střídavé napětí o velikosti a frekvenci shodné s distribuční soustavou.

Solární články v přírodě vyžadují ochranu před vlivy prostředí. Proto se umísťují mezi ochranné vrstvy, obvykle sklo a plastovou fólii. Používají se i dvě skla nebo jiné kombinace materiálů. Protože napětí jednoho článku je nízké, propojují se články sériově do větších panelů. Jeden solární panel poskytuje dostatek energie (do cca 300 W) pro napájení jednoduchých zařízení jako je rozhlasový přijímač. Pro napájení větších spotřebičů nebo v případě fotovoltaických elektráren jsou jednotlivé solární panely propojeny do větších systémů.

Negativní stránkou těchto elektráren je zábor velkých ploch zemědělské půdy (i když nedochází k jejímu znehodnocení) a estetičnost velkých ploch v krajině. Rovněž nelze podceňovat problém likvidace „vysloužilých“ panelů po cca 30 – 40

letech provozu.

Obr. 247 - Příklad „sluneční“ elektrárny v krajině



Můžeme si porovnat plochu panelů s plochou vodní nádrže. A jak celý komplex zapadá do krajiny.

2) Větrné elektrárny

Nejobvyklejším využitím jsou dnes větrné elektrárny, které využívají síly větru k roztočení vrtule (větrná turbína). K ní je pak připojen elektrický generátor. Protože v přírodě a v našich podmínkách zvláště rychlost větru značně kolísá, nedosahují větrné elektrárny po většinu doby vypočítané hodnoty generovaného výkonu.

V historii se místo převodu na elektřinu přímo konala nějaká mechanická práce. Větrný mlýn například mlel obilí, větrnými stroji se čerpala voda, lisoval olej, stloukala plst' nebo poháněly katry na pořez dřeva.

Další podstatnou hodnotou, která definuje účinnost větrného zdroje je koeficient ročního využití. Udává se jako poměr skutečně odvedeného výkonu k teoreticky možnému výkonu zdroje za rok – ideálně tedy 1. V českých podmínkách se pohybuje v mezích 0,1-0,2, pro velmi větrné lokality dosahuje teoreticky až 0,28. Statisticky je počítáno využití větrných elektráren v ČR pouze 12,71 %.

Větrné elektrárny jsou zdrojem nežádoucího hluku. Hlavní příčinou jsou aerodynamické hluky při obtékání listů vrtule, gondoly a sloupu stavby. Dále je hluk produkován mechanickými částmi konstrukce (servomotory a jejich převody, čerpadla, chladicí ventilátory měničů a mechanismů) a generátorem. V přírodě také slyšíme při silnějším větru „hukot“ stromů, sloupů elektrického vedení apod.

Další otázkou je vzhled „větrníků“ v krajině. Snaha umístit tyto elektrárny blízko obcí se pochopitelně neseťkává s velkým souhlasem.

Obr. 248 - Příklad „větrníků“ v krajině



Na uvedených příkladech jsou větrné elektrárny umístěné mimo blízkost lidských sídel.

3) Vodní elektrárny

Vodní elektrárna je výrobní elektrické energie, která přeměňuje energii vody na elektrickou energii. Obvyklý typ říční vodní elektrárny se skládá z přehradní hráze nebo jezu, tj. vodního díla, které zadržuje vodu a strojovny, obsahující vodní turbíny a alternátory. Turbíny s alternátory tvoří většinou soustrojí umístěné na společném hřídeli.

Výhody:

1. Energie vodních toků se počítá k obnovitelným zdrojům – prakticky ji nelze vyčerpat. Zároveň její provoz minimálně znečišťuje okolí.
2. Vodní elektrárny vyžadují minimální obsluhu i údržbu a lze je ovládat na dálku.
3. Malé vodní elektrárny prakticky nevytvářejí zaplavenou plochu a jsou velice levné na provoz.
4. Mohou startovat během několika sekund a dispečink je tak může používat jako špičkový zdroj k pokrytí okamžitých nároků na výrobu elektrické energie.
5. Přehradní hráz dokáže zabránit i menším povodním.
6. Přehradní jezera mohou sloužit i pro rekreační účely nebo jako zdroje pitné či užitkové vody.

Nevýhody :

1. Značná cena a čas výstavby. Zatopení velkého území.
2. Závislost na stabilním průtoku vody.
3. Přehradní hráze a jezy brání běžnému lodnímu provozu na řece, je nutno vybudovat systém plavebních komor, zdymadel.
4. Přehradní hráze a vyšší jezy brání tahu ryb, je nutno vybudovat pro ryby systém přechodů.
5. Riziko havárie.
6. Většinou je možný jen krátkodobý provoz. V praxi není možné v našich podmínkách zachytit tak velké množství protékající vody trvale.

Obr. 249 - Přehradní hráz „velké“ elektrárny



Jako malé vodní elektrárny se označují vodní elektrárny s instalovaným výkonem maximálně do 10 MW. Většinou budují v místě bývalých mlýnů a jezů.

4) Přecherpávací vodní elektrárny

Protože se elektrická energie nedá nijak skladovat, používá se potenciální energie vody k její přeměně na energii elektrickou a naopak.

Jestliže v distribuční síti je spotřeba elektrické energie minimální (tj. je jí přebytek), pracují soustrojí v opačné roli, turbíny v roli čerpadel a alternátory v roli synchronních elektromotorů. Soustrojí plní horní nádrž přecherpávací elektrárny vodou z dolní nádrže, systém spotřebovává elektrickou energii z elektrorozvodné sítě, chová se tedy jako velký spotřebič elektrické energie. Spotřebovává tak obvykle elektrickou energii vyrobenou z jiných zdrojů, v současné době se zatím stále jedná o energii získanou z provozu tepelných či jaderných elektráren. Pokud je naopak tzv. energetická špička nebo jestliže nastává požadavek na maximální odběr (tj. elektrické energie je v napájecí soustavě nedostatek), pracují naopak turbíny a alternátory v normálním režimu. Voda z horní nádrže je v tomto případě řízeně vypouštěna do dolní nádrže přes turbíny elektrárny. Akumulovaná potenciální energie vody je tím vlastně přeměňována zpět na energii elektrickou, která se tak opožděně vrací zpět do elektrorozvodné sítě.

Obr. 250 - Dlouhé stráně – dolní nádrž



Obr. 251 - Dlouhé stráně – horní nádrž



Samozřejmě se nejedná o bezztrátový provoz. Instalace těchto zdrojů se v praxi „vyplácí“ jen díky rozdílným cenám elektrické energie v různých denních intervalech.

5) Bioplynové elektrárny

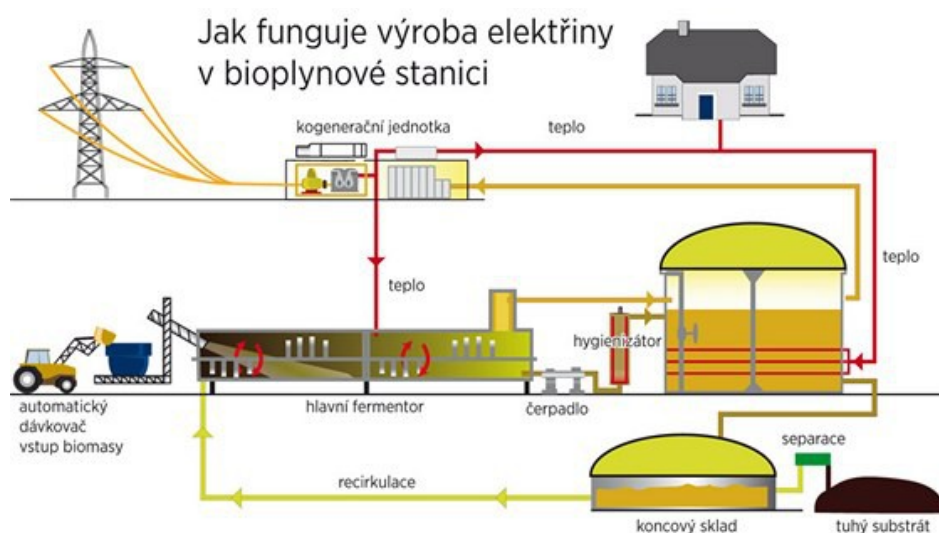
Definice: „Bioplynová elektrárna je zařízení, v němž je během fermentačního procesu z biologického materiálu vytvářen plyn, který je dále použit k pohonu spalovacího motoru spojeného s generátorem pro výrobu elektřiny. Elektřina je pak dodávána do distribuční sítě.“

I tato výroba je dotována. Je zaručená pevná výkupní cena, jako u předešlých zdrojů. V současné době jsou tyto podmínky garantované na 20 let. Je možnost i získání finanční podpory na výstavbu formou dotací státu nebo EU.

Pro plnění nádrží se používá hmota z pěstovaných zemědělských plodin (kukuřice, tráva, obilniny), z exkrementů hospodářských zvířat, popř. z bioodpadů jiného charakteru. V bioplynové stanici se zpracovávají plodiny a živočišné zbytky stabilně, po celý rok. Zemědělci možnost nového využití orné půdy vítají.

Většímu rozšíření by pomohlo napojení bioplynu na plynovod. Přínosem by také byla podpora pro výrobu tepla, nejen pro výrobu elektřiny z obnovitelných zdrojů, jak je tomu nyní.

Obr. 252 - Princip bioplynové elektrárny



22.2. Baterie a akumulátory

Baterie běžně používáme pro napájení elektrických měřicích přístrojů. Současné typy mají dlouhou životnost, která je ještě umocněná velmi nízkou spotřebou moderních multimetrů. Přesto samozřejmě časem musí dojít k vybití a výměně. Pak stojíme před problémem „kam s ní?“ Vyhodit do běžné popelnice nebo kontejneru pro komunální odpad by bylo špatné.

Obr. 253 - Běžné typy používaných baterií



Ekologická závadnost baterií a akumulátorů spočívá především v obsahu toxických látek (Hg, Zn, Cd) a proto jsou tyto odpady zařazeny mezi nebezpečné. Základním krokem pro omezení vlivu vyřazených baterií na životní prostředí je snižování obsahu toxických látek, které obsahují. Tyto snahy jsou podporovány zákony naší republiky i ve vyspělých zemích celého světa. K výraznému omezení pronikání toxických látek do životního prostředí slouží zavedení separovaného sběru, který výrazně pomůže omezit znečišťování směsného odpadu cizorodými látkami a plýtvání základními surovinami.

Zákon, který byl schválený v roce 2009, zejména rozšířil zákaz baterií a akumulátorů uváděných na trh (kromě baterií a akumulátorů s vyšším obsahem rtuti)



o přenosné baterie a akumulátory s obsahem kadmia ve stanovené koncentraci. Rovněž byly stanoveny pravidla pro sběr použitých baterií a akumulátorů, zákaz jejich spalování a povinnost konečných prodejců baterie a akumulátory odebírat. Taková místa vznikají v místech posledního prodeje. Povinnost posledních prodejců je informovat o způsobu zajištění zpětného odběru. Platí povinnost odebírat přenosné baterie v servisních místech, v průmyslu, ve sběrných dvorech a ve veřejných budovách (školy, úřady). V takových případech musí být místo zřetelně označeno nápisem „Místo zpětného odběru použitých baterií a akumulátorů“.

Obr. 254 - Sběrný kontejner

Pro vícenásobné použití lze použít nabíjecí akumulátory, převážně Ni-Mh. Mají však nižší napětí než výše uvedené „klasické“ suché baterie (1,2 V na článek). Tato vlastnost může být pro multimetry velmi nežádoucí. Přístroj tento akumulátor prakticky vyhodnotí již jako vybitý.

22.3. Elektroodpad

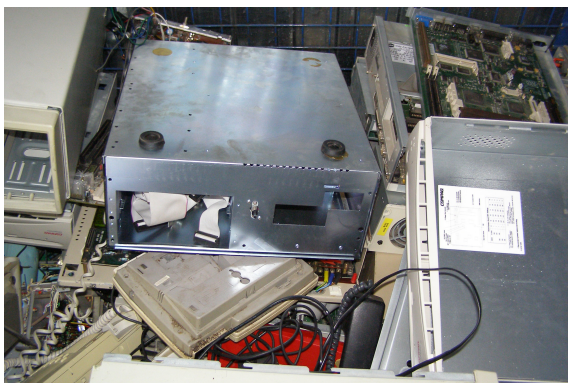
Elektroodpad je odpad ve formě elektrospotřebičů a jejich částí, elektrických a elektronických součástek. **Elektroodpad je oddělený od komunálního a směsného odpadu. Jsou stanovená zvláštní pravidla pro jeho sběr a likvidaci.** Do systému zpětného odběru elektroodpadu jsou zahrnuty jen vybrané výrobky.

Pro elektroodpad jsou tedy stanovená sběrná místa, která zajišťují provozovatelé firem pro zpětný odběr elektrozařízení ve spolupráci s jednotlivými obcemi. Mimo tato sběrná místa je možné odevzdat elektroodpad také prodejcům elektrotechnických výrobků. Účelem míst zpětného odběru je převzít elektroodpad a následně ho předat ke zpracování specializovaným firmám. Náklady na provoz sběrných míst a likvidace elektroodpadu jsou promítnuty do velkoobchodních a následně maloobchodních cen výrobků jako tzv. recyklační poplatek (PHE - příspěvek na likvidaci historických elektrospotřebičů). Recyklační poplatek se ve všech fakturách a účtech vykazuje odděleně od ceny výrobku. Přijetí elektroodpadu na místě zpětného odběru a jeho zpracování tedy probíhá ze strany spotřebitele bezplatně. Účelem zákona a zpětného odběru je zamezení černých skládek nebezpečného odpadu. Druhým důvodem je to, že elektroodpad nečistě obsahuje značnou část materiálů (jako jsou třeba kovy: měď, cín, hliník, zinek, někdy dokonce i zlato), které se vyplatí vytržít a zrecyklovat k opětovnému použití.

Obr. 255 - Kontejnery v ČR a SRN



Obr. 256 - Elektroodpad



22.4. Spalovna odpadů

Definice: „Spalovna je technologické zařízení sloužící ke spalování odpadu. Spalovny lze rozlišit na základě toho, zda spalují odpad samostatně nebo s příměsí ušlechtilějšího paliva, podle toho, zda využívají energii uvolněnou při spalovacím procesu k výrobě tepla nebo elektrické energie nebo podle toho, zda spalují nebezpečné, komunální, či další druhy odpadu.“

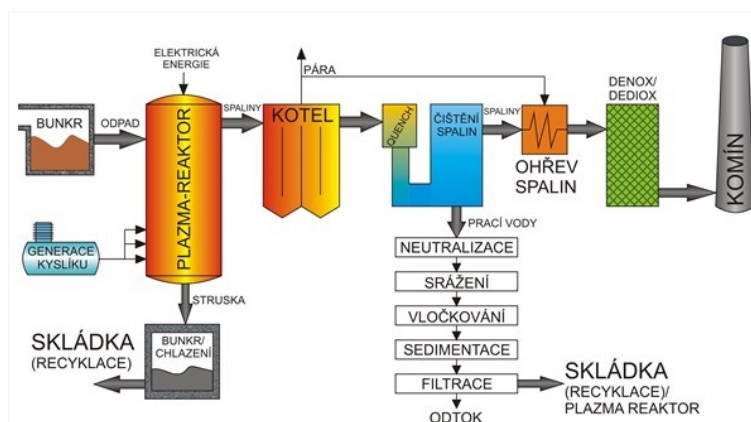
Ve spalovnách určených k energetickému využití odpadů (ZEVO) dochází spálením odpadů k produkci tepelné energie. Ta je pak zdrojem energie v systémech centrálního zásobování teplem ve městech nebo pro výrobu páry k pohonu parních turbín. Takto lze získat elektrickou energii, která je pak předávána do elektrické rozvodné sítě. Společnou výrobu tepla a elektřiny nazýváme kogenerace.

Během spalování vznikají spaliny, které obsahují převážnou část energie k tepelnému využití. Organické látky v odpadu budou hořet, pokud dosáhnou dostatečné teploty vznícení a bude-li dostatečný přívod kyslíku. Při hoření se uvolňuje velké množství energie. Jestliže je dostačující výhřevnost odpadu a množství přiváděného kyslíku, dojde k tepelné řetězové reakci a samonosnému spalování. To znamená, že nejsou potřebné další paliva.

V závislosti na spalovací teplotě se během hlavních stupňů spalování úplně nebo částečně odpaří těkavé těžké kovy a anorganické sloučeniny (např. soli). Tyto látky se přesunou ze vstupního odpadu do spalin i do popílku, který je ve spalinách obsažen. Vzniká minerální zbytkový popílek (prach) a těžší tuhý popel (škvára, struska).

Spaliny jsou následně čištěné výrazně účinněji než u jakýchkoli jiných způsobů hoření, včetně domácích topenišť a proto je spalování odpadu ve spalovnách nejlepší řešení z hlediska ochrany životního prostředí. Např. produkce dioxinů všech tří spaloven v ČR činí cca 1 % z množství, které produkují lokální topeniště.

Obr. 257 - Princip spalovny odpadů



Obr. 258 - Zavážka odpadu do bunkru



Obr. 259 - Mísení odpadu v bunkru



Obr. 260 - Spalování



Obr. 261 - Vyvážka vyříděné strusky



Obr. 262 - Třídění ostatního odpadu



Obr. 263 - Kontejnery u „sousedů“



22.5. Měkké pájení z hlediska životního prostředí

Pro měkké pájení můžeme materiály rozdělit na 4 hlavní skupiny:

1) Materiály pro slévání spojovaných ploch – pájky.

V prodeji jsou 2 hlavní skupiny. Jedná se o olovnaté a bezolvnaté pájky. Základním kovem je u obou cín, který nepatří mezi tzv. těžké kovy. Problémem jsou ostatní látky, které jsou v pájkách obsaženy.

Obr. 264 - Pájka s obsahem olova



Tato pájka obsahuje podle štítkových údajů 60 % cínu a 40 % olova. Pájka je plněná běžným tavidlem. **Olovo patří mezi tzv. těžké kovy.**

Pájky tohoto složení sice vynikají velmi dobrou zatékavostí, ale představují pro životní prostředí velmi velké zatížení. **Proto se již ve výrobě používat nesmějí.**

Olovo představuje velké nebezpečí pro člověka pro jeho schopnost pronikat pokožkou, hromadit se v těle a způsobovat různá onemocnění.

V případě, že by styk s pokožkou byl trvalý, dlouhodobý, mohly by vzniknout

nevratné zdravotní potíže.

Obr. 265 - Bezolvnatá pájka



Podle údajů výrobce na štítku pájka obsahuje 87,1 % cínu, 2 % bizmutu a 0,9 % mědi. **Z tohoto složení mezi těžké kovy patří měď, které je však velmi málo.**

Pájky tohoto typu jsou ve výrobě používány. **Některé pájky obsahují také malé procento stříbra. Ani tento kov mezi těžké kovy nepatří a proto tyto pájky nepředstavují pro životní prostředí zátěž.**

2) Materiály pro přípravu – odmaštění – pájených ploch – tavidla.

Obr. 266 - Vzorky kalafuny



Z ekologického hlediska jsou tyto tavidla prakticky nezávadná. Nehrozí žádné nebezpečí napadení organismu pracovníka stykem pokožky s uvedenou látkou. Základem je pryskyřice z borovice. Problémem je poměrně nízká teplota tání a tím ztížené využití pro bezolovnaté pájení. Nevyžadují oplachování.

Obr. 267 - Příklad bezpečnostního listu tavidla

BEZPEČNOSTNÍ LIST		
Datum vydání: 17.11.1999		Strana 1 z 7
Datum revize: 3.12.2008		
Název výrobku:	Pájecí kapalina neutrální	
1. Identifikace látky nebo přípravku a výrobce nebo dovozce		
1.1 Chemický název látky/obchodní název přípravku: Pájecí kapalina neutrální		

Údaje o nebezpečnosti látky nebo přípravku

Nejzávažnější nepříznivé účinky na zdraví člověka při používání látky/přípravku:
 Žíravý
 Způsobuje poleptání.
 Vstřebáním z poleptaných míst dochází se zpožděním k toxickému působení na střevo, ledviny a srdce.
 Zdraví škodlivý při požití.
 Nejzávažnější nepříznivé účinky na životní prostředí při používání látky/přípravku:
 Nebezpečný pro životní prostředí.
 Toxický pro vodní organismy, může vyvolat dlouhodobé nepříznivé účinky ve vodním prostředí.
 Další nebezpečí:
 Hořlavý.
 Z přípravku unikají hořlavé výpary.
 Možné nesprávné použití látky/přípravku:
 Při pájení s tímto přípravkem se nesmí používat otevřený oheň.
 Přípravek korozivně působí na běžné kovy.

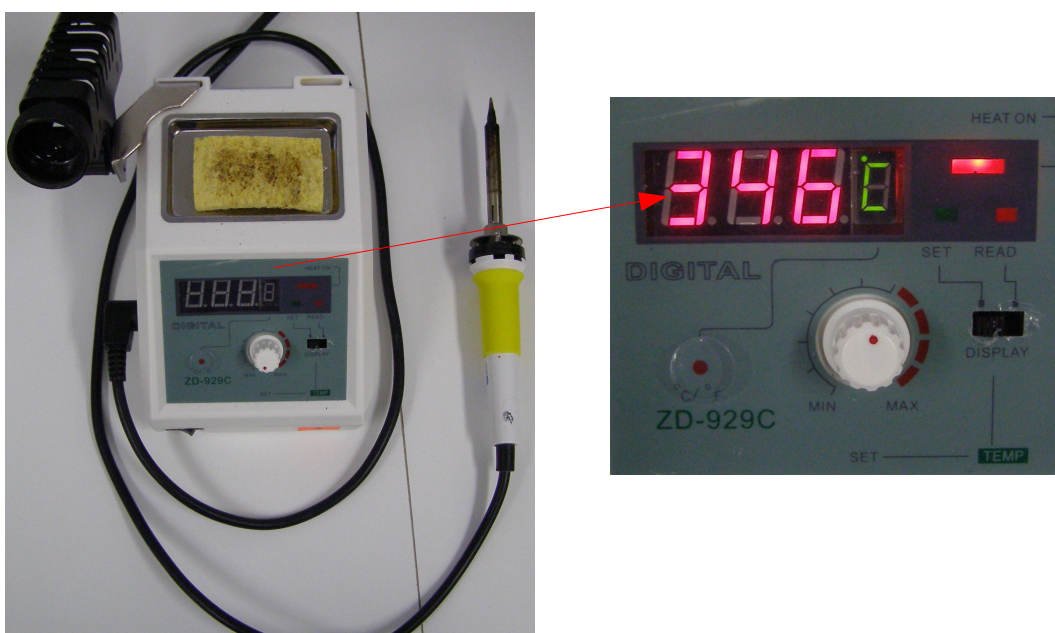
Tavidla, která se používají pro bezolovnaté pájení, většinou vyžadují jistou opatrnost.

Musí snášet vyšší teploty. Nejsou bezoplachová. Zapájená místa je nutné vyprat v uzavřené čistící lázni. Je vždy nutné dodržovat pokyny výrobců. Je absolutně vyloučené zbytky volně vylévat do přírody.

3) Nástroje pro zahřátí pájených ploch - páječky.

Z pohledu vlivu na životní prostředí toto nářadí nepředstavuje žádnou zásadní hrozbu. Jedná se o nástroje, které slouží k zahřívání pájených ploch na dostatečnou teplotu. Je však podstatný rozdíl z hlediska spotřeby elektrické energie. Pro úsporu jsou nejvhodnější pájecí stanice s termostatickou regulací nastavené teploty. Mají úsporný provoz – topné těleso se zapíná jen po nezbytně nutnou dobu. Naproti tomu běžné odporové páječky „topí“ stále.

Obr. 268 - Pájecí stanice



Obr. 269 - Odporová páječka



4) Materiály pro čištění pájených ploch.

Bezoplachová tavidla lze očistit mechanicky. Zbytky kalafuny nejsou nebezpečné. Pro čištění zbytků po bezolovnatém pájení se používají speciální čisticí kapaliny. Pro práci s nimi je opět nutné dodržovat pokyny jejich výrobců a nelze je volně vylévat do odpadu.

Obr. 270 - Příklad bezpečnostního listu čisticí kapaliny

BEZPEČNOSTNÍ LIST		
Datum vydání: 12.1.2009		Strana 1 z 5
Datum revize: 12.2.2009		
Název výrobku:	SERVISOL IPA 170	

1. Identifikace látky nebo přípravku a výrobce nebo dovozce

- 1.1 Chemický název látky: **SERVISOL IPA 170**
/obchodní název přípravku: **Aerosol**
- 1.2 Použití přípravku: **Přípravek je určen jako čisticí kapalina v elektronice.**

3. Informace o složení látky nebo přípravku

Nebezpečná složka	CAS	EINECS	hmot. %	Symbol	R-věty	Pozn.
oxid uhlíčitý	124-38-9	204-696-9	1 - 5	-	-	G
propan-2-ol, isopropylalkohol, isopropanol	67-63-0	200-661-7	60 - 100	F, Xi	11-36-67	
uhlovodíky bohaté na C3,4 z ropných destilátů (1,3-butadien < 0,1 %)	68512-91-4	270-990-9	10 - 30	F+	12	K

K - není klasifikován jako kancerogen, méně než 0,1 hmot. % 1,3-butadienu (Einecs 203-450-8)

G – nepodléhá registraci podle nařízení REACH 1907/2006

4. Pokyny pro první pomoc

4.1 Všeobecné pokyny:

Měla by být dodržována obvyklá opatření jako při práci s chemikáliemi.

Pokud se objeví jakékoliv příznaky, vyhledejte lékařskou pomoc.

4.2 Při zasažení očí:

Vyplachujte intenzivně vlažnou tekoucí vodou alespoň 15 minut.

4.3 Při styku s kůží:

Omyjte zasažené místo vodou a mýdlem.

4.4 Při nadýchání:

Postiženého přenést na čerstvý vzduch, udržujte ho v teple a klidu.

4.5 Při požití:

Požítí je málo pravděpodobné.

Při náhodném požití nevyvolávejte zvracení a vyhledejte lékařskou pomoc.

6. Opatření v případě náhodného úniku

6.1 Bezpečnostní opatření pro ochranu osob:

Uzavřete všechny zdroje zapálení.

Zajistěte přiměřené větrání.

6.2 Bezpečnostní opatření pro ochranu životního prostředí:

Zabraňte vniknutí do odpadů a vodních toků.

Pokud přípravek vyteče do vodních toků, informujte odpovědné orgány.

6.3 Doporučené metody čištění a zneškodnění:

Absorbujte rozlitý přípravek do vhodného inertního materiálu.

7. Pokyny pro zacházení a skladování

7.1 Pokyny pro zacházení:

Používejte pouze v dobře větraných prostorách.

Ani vyprázdněnou nádobku nepronážíte a nevhazujte do ohně.

Nestříkejte do otevřeného ohně nebo na žhavé předměty.

Nevdechujte aerosoly nebo páry.

Zamezte styku s kůží a očima.

7.2 Pokyny pro skladování:

Nádobka je pod tlakem: nevystavujte slunečnímu záření a teplotám nad 50 ° C.

Skladujte na chladném, suchém a dobře větraném místě.

Chraňte před dětmi.

23. Doporučená literatura

Svoboda Ladislav, Ing. Štefan Miloslav: Reproductory a reproduktorové soustavy
SNTL Praha 1983

Antošovský Vojtech: Elektrické merania I
Alfa Bratislava 1988

Ing. Nemec Pavol: Elektrické měření II
SNTL Praha 1990

Elektrotechnická měření
BEN 2002

Haasz Vladimír, Sedláček Miloš: Elektrická měření – Přístroje a metody
ČVUT Praha 2003

doc. Ing. Tlůmová Olga Csc, doc. Ing. Čtvrtník Václav, Ing. Girg František,
Ing. Švarný Jiří Ph.D. : Elektrická měření – Měřicí metody
Západočeská univerzita Plzeň 2005

Dietmaier Ulrich: Vzorice pro elektroniku
BEN Praha 2007

prof. Ing. Srovnal Vilém Csc. a kolektiv: Elektrotechnická měření – Měřicí přístroje
Informatorium Praha 2008

Brtník Bohumil: Elektrická měření pro bakaláře
BEN Praha 2011

24. Kontrolní otázky

Elektrické měření je:

- a) stanovení nadmořské výšky místa měření.
- b) souhrn všech úkonů ke zjištění stavu elektrického obvodu.
- c) souhrn všech úkonů, které slouží ke zjištění hodnoty elektrické veličiny.

Elektrická veličina je:

- a) velikost nebo hodnota jevu, kterou můžeme všeobecně vyjádřit.
- b) kritický stav v elektrickém obvodu.
- c) velikost nebo hodnota, kterou můžeme rozlišit nebo určit a vyjádřit konkrétním číslem.

Měřicí přístroje jsou:

- a) přesné měřicí prostředky, pomocí kterých získáváme údaje o velikosti měřené veličiny.
- b) měřicí prostředky pro nastavování pracovních bodů.
- c) přesné měřicí prostředky pro nastavení maximálních hodnot přepětí.

Etalon je:

- a) přesný měřicí prostředek, který slouží k měření nepřímou metodou.
- b) velmi přesný měřicí prostředek, který slouží k definici hodnoty velikosti jednotky.
- c) velmi přesný měřicí prostředek, který slouží k pouze k porovnávání hodnot v obvodu.

Mezi jednotky soustavy SI patří:

- a) metr, kilogram, sekunda, volt, mol, kandela, kelvin.
- b) kelvin, kandela, mol, ampér, sekunda, kilogram, metr.
- c) metr, kilogram, watt, volt, kilopond, sekunda, ampér.

Měrová střediska jsou:

- a) speciální pracoviště pro opravy a kalibraci měřicích přístrojů.
- b) prodejny měřicí techniky.
- c) speciální pracoviště pro prodej měřicích přístrojů.

Při měření přímou metodou:

- a) odečítáme hodnotu měřené veličiny vždy přímo z měřicího přístroje.
- b) měřicí přístroj automaticky udává hodnoty všech jevů obvodu.
- c) odečítáme hodnotu měřené veličiny téměř vždy z měřicího přístroje.

Pomocí nepřímé metody měření:

- a) zjistíme velikost měřené veličiny jen z analogových přístrojů.
- b) nelze vůbec elektrické veličiny měřit.
- c) musíme požadovanou veličinu dopočítat, např. z přímo změřených hodnot.

Jestliže hodnotu veličiny odečteme z displeje multimetru, jedná se o metodu:

- a) výchylkovou
- b) voltampérovou
- c) nulovou

Chyby měření jsou:

- a) při každém měření naprosto stejné.
- b) souhrnem nepřesností, ke kterým při měření dochází.
- c) prakticky nemožné. Při použití přesných přístrojů k nim nedochází.

Chyby měření rozlišujeme na:

- a) chyby soustavné, občasné a hrubé.
- b) chyby přístrojů, součástek a všech činností na pracovišti.
- c) chyby při pájení plošných spojů a chyby při měření.

Chyby přístrojů vznikají:

- a) nesprávným zapojením v obvodu.
- b) špatnou polohou na pracovním stole.
- c) nedokonalostí při výrobě.

Absolutní chyba je:

- a) rozdíl mezi naměřenou a skutečnou hodnotou a je udána v jednotkách měřené veličiny.
- b) rozdíl mezi naměřenou a skutečnou hodnotou a je udána v %.
- c) nesmysl a nikde nevzniká.

Relativní chyba je:

- a) částečně využitý rozsah přístroje.
- b) vztah absolutní chyby a naměřené hodnoty v %.
- c) maximální přetížení měřicího přístroje v %.

Možnou chybu měřicího přístroje udává:

- a) výrobce.
- b) prodavač.
- c) reklamní agent.

U analogového přístroje k odečtu hodnoty měřené veličiny použijeme:

- a) displej
- b) bargraf
- c) ručičku

U digitálního multimetru k odečtu hodnoty měřené veličiny použijeme:

- a) ručičku
- b) displej
- c) paprsek

Měřicí konstanta je:

- a) u analogového přístroje podíl zvoleného rozsahu a počtu dílků stupnice.
- b) u digitálního přístroje podíl zvoleného rozsahu a počtu míst displeje.
- c) údaj o přesnosti přístroje. Udává ho výrobce.

Analogové měřicí přístroje pracují na principu:

- a) využití pneumatické výchylky.
- b) využití magnetických a dynamických účinků elektrického proudu.
- c) využití fotovoltaiických článků.

Tlumení otočného ústrojí u analogových přístrojů znamená:

- a) ustálení výchylky ručky v co nejkratší době.
- b) vyvážení proudů v napájecím zdroji.
- c) vyvážení přístroje na pracovním stole.

Třída přesnosti udává:

- a) u analogového přístroje relativní chybu v μA .
- b) chybu analogové měřicí soustavy v %.
- c) počet desetinných míst na stupnici přístroje.

Pro magnetoelektrickou soustavu je určující:

- a) měření stejnosměrného proudu, lineární výchylka, magnetické tlumení.
- b) měření stejnosměrného proudu, nelineární výchylka, vzduchové tlumení.
- c) měření stejnosměrného i střídavého proudu, nelineární výchylka, magnetické tlumení.

Tato značka -  - udává soustavu:

- a) magnetoelektrickou,
- b) elektromagnetickou,
- c) elektrodynamickou.

Pro soustavu feromagnetickou je charakteristické:

- a) měření střídavého proudu, lineární výchylka, magnetické tlumení.
- b) měření stejnosměrného a střídavého proudu, nelineární výchylka, vzduchové tlumení.
- c) měření stejnosměrného a střídavého proudu, lineární výchylka, magnetické tlumení.

Systém soustavy ferodynamické charakterizuje:

- a) pevný magnet a otočná cívka.
- b) pevná cívka a pohyblivý magnet.
- c) pevná a pohyblivá cívka.

Jestliže digitální multimetr má 3 a $\frac{1}{2}$ místný displej, znamená to že max. hodnota může být:

- a) 3999.
- b) 1999.
- c) 2999.

Je-li displej multimetru uváděn jako LCD, tvoří jej:

- a) luminiscenční diody.
- b) tekuté krystaly.
- c) ručka z plastické hmoty.

Přetížení napěťového rozsahu digitálního multimetru:

- a) není kritické, nesmí se překročit max. bezpečné napětí udané výrobcem.
- b) není nijak omezeno.
- c) je možné jen do hodnoty 150 %.

Hodnota vstupní impedance u digitálního multimetru znamená:

- a) velikost kapacity vazebního kondenzátoru.
- b) hodnotu vnějšího odporu multimetru při zapojení do obvodu.
- c) velikost odporu vstupního děliče.

Převodník A/D:

- a) slouží k převodu vstupních měřených veličin na číslicový údaj.
- b) převádí digitální údaj na analogový.
- c) převádí měřenou hodnotu na údaj na displeji.

Jestliže výrobce pro analogový ampérmetr 100 μA udává třídu 2,5, znamená to, že:

- a) relativní chyba rozsahu $\Delta I = \pm 0,25 \mu\text{A}$.
- b) absolutní chyba pro rozsah $\delta = \pm 2,5 \mu\text{A}$.
- c) relativní chyba pro rozsah $\delta = \pm 2,5 \%$.

Jestliže pro skupinu rozsahů (400mV – 400V) dig. multimetru se udává 0,8 % + 1 dig.:

- a) je celková absolutní chyba $\delta = \pm 0,85 \%$.
- b) je celková relativní chyba $\delta = \pm 0,825 \%$.
- c) je absolutní chyba $\Delta = \pm 40 \text{ mV}$.

Analogový multimetr pracuje ve třídě 1,5. Absolutní chyba pro rozsah 300V_{DC} tedy je:

- a) $\Delta U = \pm 4,5 \text{ V}$.
- b) $\Delta I = \pm 4,5 \text{ mA}$.
- c) $\delta U = \pm 1,5 \%$.

Analogový voltmetr má rozsahy 10, 100, 1000 V_{DC}. Stupnice má 25 dílků. Konstanta bude:

- a) pro rozsah 1000 V - 40.
- b) pro rozsah 10 V - 4.
- c) pro rozsah 100 V - 0,4.

Při měření napětí v obvodu připojujeme voltmetr k měřeným bodům:

- a) do série.
- b) paralelně.
- c) libovolně. Voltmetr má velkou impedanci a tak nemůže dojít ke zkratu.

U digitálních přístrojů výrobce udává hodnotu označenou zkratkou **rdg**. Znamená to:

- a) typ baterie.
- b) chybu při max. výchylce.
- c) chybu naměřené hodnoty (čtení).

Při měření voltampérovou metodou celkovou chybu určujeme:

- a) sečtením relativních chyb voltmetru a ampérmetru.
- b) sečtením absolutních chyb hodnot napětí a proudu.
- c) jednotlivé hodnoty vynásobíme.

Při měření proudu je ampérmetr:

- a) vždy zařazený do série s měřeným obvodem.
- b) může být i paralelně. Má velkou vstupní impedanci a nemůže dojít ke zkratu.
- c) libovolně.

Rezistor R_1 , zapájený v plošném spoji, má hodnotu 560R/0,5W. Naměřeno $U_{R1} = 25,65 \text{ V}$.

- a) Pozor. Rezistor se zničí. Je přetížený.
- b) Vše je v pořádku.
- c) Rezistor se mírně zahřeje.

Tato značka -  - udává soustavu:

- a) magnetoelektrickou,
- b) feromagnetickou,
- c) elektrodynamickou

U digitálních přístrojů výrobce udává pro naměřenou hodnotu zkratku rms (RMS). Znamená to:

- a) stejnosměrné hodnoty jsou udány ve vrcholové hodnotě.
- b) stejnosměrné hodnoty jsou udány ve střední hodnotě a střídavé v efektivní.
- c) střídavé hodnoty jsou v průměru zvlnění a stejnosměrné v max. hodnotě.