



Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava



ELEKTRICKÁ MĚŘENÍ

učební text

Blanka Bičovská

Ostrava 2007

Recenze: Richard Velička

Název: Elektrická měření

Autor: Blanka Bičovská

Vydání: první, 2007

Počet stran: 97

Vydavatel: VŠB – TUO

Studijní materiály pro studijní obor Elektrotechnika a Telekomunikační technika fakulty elektrotechniky a informatiky

Jazyková korektura: nebyla provedena.

Určeno pro projekt:

Operační program Rozvoj lidských zdrojů

Název: E-learningové prvky pro podporu výuky odborných a technických předmětů

Číslo: CZ.O4.01.3/3.2.15.2/0326

Realizace: VŠB – Technická univerzita Ostrava

Projekt je spolufinancován z prostředků ESF a státního rozpočtu ČR

© Blanka Bičovská

© VŠB – Technická univerzita Ostrava

ISBN 978-80-248-1480-3

OBSAH

1. PŘESNOST MĚŘENÍ	1
1.1 CHYBA METODY	2
1.1.1 Měření napětí	2
1.1.2 Měření proudu	3
1.1.3 Měření odporu	3
1.1.4 Měření výkonů	4
1.1.5 Měření impedance	4
1.2 CHYBA MĚŘICÍHO PŘÍSTROJE	5
1.2.1 Třída přesnosti	6
1.2.1.1 Vztažné podmínky	8
1.2.2 Chyba číslicových měřicích přístrojů (ČMP)	9
1.3 CHYBA MĚŘENÍ	11
1.3.1 Nepřímá měření	11
1.3.2 Chyby rušivými vlivy	13
1.4 NEJISTOTY MĚŘENÍ	16
1.4.1 Standardní nejistoty	17
1.4.2 Výpočet standardních nejistot.	18
1.4.3 Princip vyhodnocení nejistoty nepřímých měření	19
2. TYPY SIGNÁLŮ	23
3. MĚŘICÍ PŘÍSTROJE	27
3.1 MĚŘICÍ PŘEVODNÍK	27
3.1.1 Převodníky pro měření střídavých elektrických veličin	29
3.1.1.1 Převodník střídavých veličin na střední aritmetickou hodnotu	29
3.1.1.2 Převodník střídavých veličin na efektivní hodnotu	30
3.1.1.3 Převodník střídavých veličin na maximální hodnotu	30
3.1.2 Měřicí transformátor	31
3.1.2.1 Měřicí transformátory napětí (MTU)	32
3.1.2.2 Měřicí transformátory proudu (MTI)	32
3.2 MĚŘICÍ ÚSTROJÍ	33
3.2.1 Analogové měřicí přístroje	34
3.2.1.1 Magnetoelektrické ústrojí	34
3.2.1.2 Elektromagnetické ústrojí	35
3.2.1.3 Elektrodynamické ústrojí	36
3.2.1.4 Indukční ústrojí	37
3.2.2 Analogový osciloskop	37
3.2.2.1 Vícekanálový osciloskop	38
3.2.2.2 Připojení měřeného signálu na osciloskop	43
3.2.2.3 Příklad analogového osciloskopu	43
3.2.3 Číslicové měřicí přístroje	44
3.2.3.1 Analogovo - digitální (A/D) převodníky	45
3.2.3.2 Typy rušení	48
3.2.4 Číslicový osciloskop	49
3.3 UKAZOVACÍ ÚSTROJÍ	52
3.3.1 Stupnice	52
3.3.2 Displej	52
3.3.3 Obrazovka	53
3.4 VIRTUÁLNÍ MĚŘICÍ PŘÍSTROJE	53
3.4.1 Komunikační rozhraní	53
3.4.2 Virtuální přístroje	54
3.4.3 Architektura měřicích karet	55
3.4.4 VXI sběrnice	55

4.	MĚŘENÍ AKTIVNÍCH VELIČIN	57
4.1	MĚŘENÍ PROUDU.....	57
4.2	MĚŘENÍ NAPĚTÍ	57
4.2.1	<i>Měření efektivní hodnoty analogovými měřicími přístroji.</i>	58
4.2.2	<i>Měření efektivní hodnoty číslicovými měřicími přístroji.</i>	59
4.3	ZAPISOVACÍ MĚŘICÍ PŘÍSTROJE	60
4.3.1	<i>Číslicový zapisovač</i>	60
4.3.2	<i>Analogové zapisovače</i>	60
4.4	MĚŘENÍ VÝKONU	61
4.4.1	<i>Měření činného výkonu</i>	62
4.4.1.1	Měření činného výkonu stejnosměrného proudu.....	62
4.4.1.2	Měření jednofázového činného výkonu	63
4.4.1.3	Měření třífázového činného výkonu.....	63
4.4.2	<i>Měření jalového výkonu</i>	65
4.4.2.1	Měření jalového výkonu v jednofázové síti	65
4.4.2.2	Měření jalového výkonu v trojfázové síti.....	66
4.4.3	<i>Měření zdánlivého výkonu</i>	67
4.4.4	<i>Měření účinníku</i>	67
4.4.5	<i>Možná řešení elektronických převodníků výkonu</i>	67
4.5	MĚŘENÍ KMITOČTU A FÁZOVÉHO POSUNU	68
4.5.1	<i>Univerzální čítače</i>	68
4.5.2	<i>Měření fázového posunu</i>	70
4.5.3	<i>Kmitočtový analyzátor</i>	70
5.	MĚŘENÍ PASIVNÍCH VELIČIN	72
5.1	MĚŘENÍ OHMMETREM	72
5.2	OHMOVA METODA	74
5.2.1	<i>Měření parametrů tlumivek</i>	74
5.3	SÉRIOVÁ SROVNÁVACÍ METODA	74
5.4	SUBSTITUČNÍ METODA.....	75
5.5	REZONANČNÍ METODY MĚŘENÍ	75
5.6	MŮSTKOVÉ METODY	75
6.	MAGNETICKÁ MĚŘENÍ	78
6.1	MAGNETICKÉ PŘEVODNÍKY	79
6.1.1	<i>Měřicí cívka</i>	79
6.1.2	<i>Rogowskiho cívka</i>	80
6.1.3	<i>Feromagnetická sonda</i>	80
6.1.4	<i>Hallova sonda</i>	80
6.2	MĚŘENÍ MAGNETICKÝCH CHARAKTERISTIK FEROMAGNETICKÝCH MATERIÁLŮ	81
6.2.1	<i>Křivka prvotní magnetizace a statická hysterezní smyčka (stejnoseměrné magnetování)</i> 81	
6.2.2	<i>Střídavé charakteristiky</i>	81
6.2.2.1	Měření amplitudové charakteristiky pro sinusové H.....	82
6.2.2.2	Měření amplitudové charakteristiky pro sinusové B	82
6.2.2.3	Zjištění amplitudové permeability.....	82
6.2.2.4	Zobrazení dynamické hysterezní smyčky.....	82
6.2.2.5	Měření ztrát při střídavém magnetování.....	83
6.2.2.6	Číslicové zpracování dat.....	83
7.	RUŠIVÉ VLIVY	84
7.1	RUŠENÍ PŘI MĚŘENÍ STEJNOSMĚRNÝCH SIGNÁLŮ	84
7.1.1	<i>Vliv termoelektrických napětí</i>	84
7.1.2	<i>Přechodové odpory</i>	84

7.1.3	<i>Svodové proudy</i>	84
7.2	RUŠENÍ PŘI MĚŘENÍ STŘÍDAVÝCH SIGNÁLŮ	84
7.2.1	<i>Stínění proti elektrickému poli</i>	85
7.2.2	<i>Stínění proti magnetickému poli</i>	85
7.3	EMC – ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA	86
KLÍČ K ŘEŠENÍ.....		88

POKYNY KE STUDIU

Elektrická měření

Při studiu každé kapitoly doporučujeme následující postup:



Čas ke studiu: xx hodin

V úvodu kapitoly je uveden **čas** potřebný k prostudování látky. Čas je orientační a může vám sloužit jako hrubé vodítko pro rozvržení studia celého předmětu či kapitoly. Někomu se čas může zdát příliš dlouhý, někomu naopak. Jsou studenti, kteří se s touto problematikou ještě nikdy nesetkali a naopak takoví, kteří již v tomto oboru mají bohaté zkušenosti.



Cíl: Po prostudování tohoto odstavce budete umět

popsat ...
definovat ...
vyřešit ...

Ihned potom jsou uvedeny cíle, kterých máte dosáhnout po prostudování této kapitoly – konkrétní dovednosti, znalosti.



Výklad

Tímto typem písma je psán text, který obsahuje souhrnně vše, co by Vám měla tato kapitola dát.

Tímto typem písma je psán text, který jde do podrobností, které Vám pomohou lépe pochopit skutečnosti, uvedené v obvyklém textu.



Shrnutí pojmů 1.1

Na závěr kapitoly jsou zopakovány hlavní pojmy, které si v ní máte osvojit. Pokud některému z nich ještě nerozumíte, vraťte se k nim ještě jednou.



Otázky 1.1

Pro ověření, že jste dobře a úplně látku kapitoly zvládli, máte k dispozici několik teoretických otázek.



Úlohy k řešení 1.1

Protože většina teoretických pojmů tohoto předmětu má bezprostřední význam a využití v praxi, jsou Vám nakonec předkládány i praktické úlohy k řešení. V nich je hlavní význam předmětu a schopnost aplikovat čerstvě nabyté znalosti při řešení reálných situací hlavním cílem předmětu.



Klíč k řešení

Výsledky zadaných příkladů i teoretických otázek výše jsou uvedeny v závěru učebnice v Klíči k řešení. Používejte je až po vlastním vyřešení úloh, jen tak si samokontrolou ověříte, že jste obsah kapitoly skutečně úplně zvládli.

Úspěšné a příjemné studium s touto učebnicí Vám přeje autor výukového materiálu

Blanka Bičovská

1. PŘESNOST MĚŘENÍ

Přesnost prováděného měření se obvykle vyjadřuje pomocí chyby měření.

Absolutní chyba je definována jako rozdíl mezi naměřenou X_M a skutečnou hodnotou X_S

$$\Delta = X_M - X_S$$

Absolutní chyba se obvykle používá při vyhodnocení výsledků měření, protože má stejný rozměr jako měřená veličina.

Při udávání přesnosti měřicí metody se nejčastěji používá **poměrné (relativní) chyby měření**

$$\delta = \frac{\Delta}{X_M} \quad [-]$$

nebo

$$\delta = \frac{\Delta}{X_M} \cdot 100 \quad [\%]$$

nebo

$$\delta = \frac{\Delta}{X_M} \cdot 10^6 \quad [\text{p.p.m.}]$$

p.p.m. - z anglického označení **parts per million** – jednotek z milionu (tak jako jsou procenta jednotky ze sta.)

Ke skutečné hodnotě se lze přiblížit měřením přesnějším přístrojem, nebo přesnější metodou. Kromě toho lze stanovit chybu měření na základě teoretických úvah.

V technické praxi se většinou uvažují dvě soustavné chyby a to chyba metody a chyba měřicího přístroje. Chyby náhodné se snažíme omezit na únosnou mez.

Chybu měření můžeme způsobit už tím, že do měřeného obvodu zapojíme měřicí přístroj. Jeho vnitřní odpor může způsobit změnu poměrů v proměřovaném obvodu. Velikost takto vzniklé chyby se dá většinou vypočítat, nebo ji lze zmenšit vhodnějším zapojením. Této chybě se říká chyba metody a může být způsobena

- vnitřním odporem přístrojů (pak se dá chyba přesně vypočítat včetně znaménka)
- zjednodušeným zapojením (chybu nelze vypočítat, pouze odhadnout)
- zjednodušeným výpočtem (chybu nelze vypočítat, pouze odhadnout)

Chyba měření způsobená nedokonalostí měřidla je tzv. **chyba měřicího přístroje** (sem už se nepočítá vnitřní odpor přístroje, ale pouze chyba údaje). Tato chyba se zjistí při tzv. kalibraci, kdy se srovnává údaj kalibrovaného měřicího přístroje s přesným referenčním přístrojem. Z těchto hodnot se určí absolutní chyba, tedy odchylka mezi tím, co přístroj naměřil a správně měl naměřit. Výsledek kalibrace lze vyjádřit korekční křivkou. Pro označení skupiny měřicích přístrojů, jejichž chyby údajů se udržují v předepsaných mezích, se používá tzv. třída přesnosti. Chyba údaje přístroje se dá vypočítat, ale vyznačuje pouze oblast $\pm$, v níž výsledek leží.

U analogových měřicích přístrojů se třída přesnosti uvádí na číselníku přístroje a platí za definovaných vztažných podmínek.

Chyba číslicových měřicích přístrojů má dvě složky. Každá složka chyby přístroje má jiný charakter. Je to dáno místem vzniku těchto chyb. Chyba δ_1 zůstává v celém rozsahu měřicího přístroje stejná, tzn. nezávisí na velikosti měřené veličiny (je určena např. nestabilitou odporů ve vstupním děliči, nestabilitou referenčního zdroje a kmitočtu generátoru). Chyba δ_2 naopak závisí na velikosti měřené veličiny (je určena např. chybami nuly zesilovačů, komparátoru, zbytkovým napětím spínačů v

sepnutém stavu a kvantizační chybou A/D převodníku). Chová se tedy jako poměrná chyba údaje analogového přístroje.

Při měření se může vyskytnout situace, kdy neumíme danou veličinu měřit přímo. Např. impedanci cívky vypočteme z naměřeného napětí a proudu; nebo proud měříme za měřicím transformátorem proudu atp. Pak jde o tzv. nepřímé měření a potřebujeme zjistit, jaká bude největší možná chyba výsledku, když každá z naměřených veličin je zatížena chybou údaje. Výsledná maximální chyba hledané veličiny je dána zákonem o hromadění chyb. Chyby pro některé základní výpočty jsou uvedeny v tabulce.

Na přesnosti měření se ještě mohou podílet tzv. chyby náhodné, jako například chyby způsobené rušivými vlivy.

Na výsledku měření se tedy podílejí hlavně dvě chyby a to chyba metody a chyba měřicího přístroje. Závěrem měření, u kterého se zjišťuje chyba měření, by měl být zápis měřené veličiny ve tvaru

$$X_M = (X'_M - \Delta_m) \pm |\Delta_U|,$$

kde Δ_m je absolutní chyba metody a Δ_U je absolutní chyba údaje měřicího přístroje.

1.1 Chyba metody



Čas ke studiu: 2 hodiny



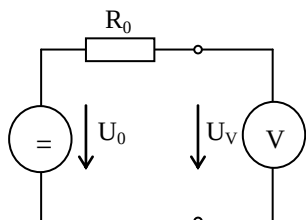
Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat chybu metody
- vypočítat chybu metody



Výklad

1.1.1 Měření napětí



Máme zdroj napětí o velikosti U_0 a vnitřním odporem R_0 . Na jeho výstupní svorky připojíme voltmetr s vnitřním odporem R_V .

Naměřené napětí U_V je napětí na odporu R_V děliče, tvořeného odpory R_0 a R_V a napájeného napětím U_0 . Chceme-li zjistit vnitřní napětí U_0 , pak od naměřeného napětí U_V musíme odečíst chybu metody.

$$U_V = U_0 \frac{R_V}{R_0 + R_V} \Rightarrow U_0 = U_V \frac{R_0 + R_V}{R_V} = U_V \left(1 + \frac{R_0}{R_V} \right)$$

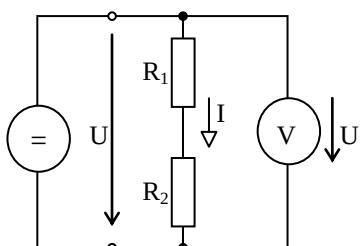
$$\Delta_M = U_V - U_0 = -U_V \frac{R_0}{R_V} \quad \delta_M = \frac{\Delta_M}{U_V} \cdot 100 = -\frac{R_0}{R_V} \cdot 100$$

Kdyby měl voltmetr vnitřní odpor nekonečně velký, pak by k zatížení zdroje nedošlo a napětí U_0 a U_V by se rovnala.

Kdyby měl voltmetr vnitřní odpor $R_V = 10 \text{ M}\Omega$ (obvyklý vnitřní odpor číslicových voltmetrů) a vnitřní odpor zdroje byl $10 \text{ }\Omega$, pak relativní chyba metody bude $10^{-4} \%$, tedy při obvyklých technických měřeních zanedbatelná.

Pokud bude voltmetr analogový vícerozsahový, u něhož bude na stupnici uveden vnitřní odpor ve tvaru $5000\Omega/V$ (obvyklá hodnota magnetoelektrických voltmetrů) a vnitřní odpor zdroje byl 10Ω , pak na rozsahu $1,2V$ bude relativní chyba metody řádově $10^{-1}\%$ ($R_V = 5\text{ k}\Omega \cdot 1,2\text{ V} = 6\text{ k}\Omega$).

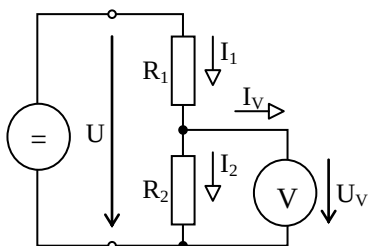
Máme dělič, tvořený zdrojem napětí a dvěma odpory R_1 a R_2 . Výstupní napětí zdroje nastavíme podle připojeného voltmetru tak, aby na odporech bylo napětí U . Toto napětí se rozdělí na odpory přímo úměrně jejich velikosti.



$$U = R_1 \cdot I + R_2 \cdot I$$

To znamená, že na odporu R_2 bude napětí

$$U_2 = U \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$



Chceme-li se o tomto rozložení napětí přesvědčit měřením, připojíme voltmetr na odpor R_2 . Voltmetr ovšem dělič zatíží.

$$U_V = U \frac{R_c}{R_1 + R_c} \quad \text{kde} \quad R_c = \frac{R_2 \cdot R_V}{R_2 + R_V}$$

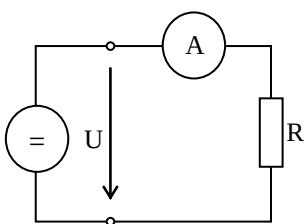
Napětí U_2 a U_V se budou lišit tím víc, čím víc se odpor voltmetru R_V bude blížit odporu R_2 . Protože chybu metody, která takto vzniká, lze vypočítat, je možné z naměřeného U_V vypočítat správné U_2 .

Kdyby měl voltmetr vnitřní odpor nekonečně velký, pak by k zatížení děliče nedošlo a napětí U_V a U_2 by se rovnala.

Kdyby měly odpory R_1 a R_2 hodnotu $10\text{ M}\Omega$, pak na každém z nich bude polovina napětí U . Po zatížení voltmetrem o stejném vnitřním odporu $R_V = 10\text{ M}\Omega$ bude na zatíženém odporu $1/3 U$.

1.1.2 Měření proudu

Ke zdroji napětí připojíme odpor R a nastavíme na něm napětí U . Proud protékající obvodem se



vypočítá $I = \frac{U}{R}$. Pak do obvodu zapojíme ampérmetr s vnitřním

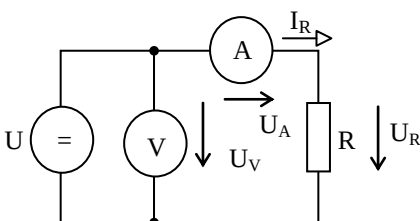
odporem R_A . Proud protékající obvodem se změní

$$I' = \frac{U}{R + R_A}$$

Kdyby měl ampérmetr vnitřní odpor nulový, pak by se proud nezměnil.

Číslicové ampérmetry mají udán vnitřní odpor jako úbytek napětí na rozsahu. Např. na rozsahu 500 mA je úbytek napětí $1,5\text{ V}$. Vnitřní odpor je 3Ω . Kdyby napětí zdroje bylo 1 V a připojený odpor 10Ω pak proud $0,1\text{ A}$ se po vřazení ampérmetru změní na 76 mA . Relativní chyba metody je -23% .

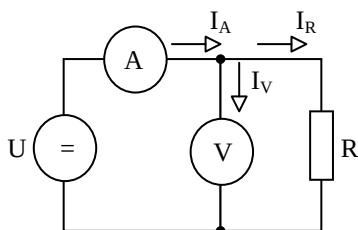
1.1.3 Měření odporu



a) Při měření odporu v tomto zapojení způsobuje chybu metody ampérmetr, protože voltmetr měří jiné napětí, než je na měřeném odporu. Vypočtený odpor R' bude větší než skutečný a to tím víc, čím víc se bude odpor ampérmetru R_A blížit hodnotě odporu R .

$$R' = \frac{U_V}{I_R} = \frac{U_A + U_R}{I_R} = R_A + R \Rightarrow \Delta_m = R' - R = R_A$$

Chyba metody se tedy dá vypočítat. Odhadnout ji lze z poměru odporů R_A a R . Bude-li např. odpor ampérmetru $1\ \Omega$ a měřený odpor bude $1\ \text{k}\Omega$, pak podíl bude 10^{-3} a relativní chyba bude $0,1\ \%$.

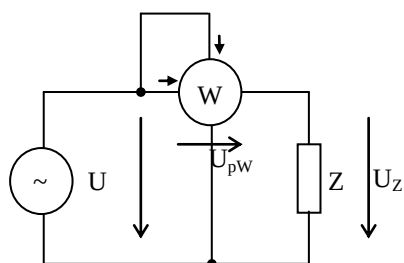


b) Při měření odporu v tomto zapojení způsobuje chybu metody voltmetr, protože ampérmetr měří jiný proud, než teče měřeným odporem. Vypočtený odpor R' bude menší než skutečný a to tím víc, čím víc se bude odpor voltmetru blížit hodnotě odporu R .

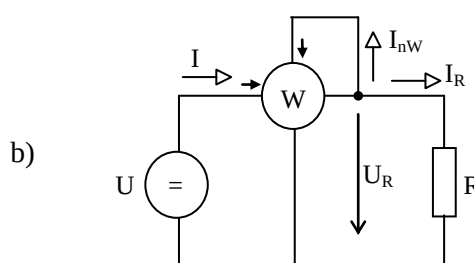
$$R' = \frac{U_V}{I_A} = \frac{U_V}{I_R + I_V} = \frac{R_V R}{R_V + R}, \text{ po úpravě } R = R' \frac{R_V}{R_V - R'}.$$

Chyba metody se dá vypočítat. Odhadnout ji lze z poměru odporů R a R_V . Bude-li např. odpor voltmetru $1\ \text{M}\Omega$ a měřený odpor bude $1\ \text{k}\Omega$, pak proud I_R bude 10^3 větší než proud voltmetrem a relativní chyba bude $0,1\ \%$.

1.1.4 Měření výkonů



Zapojení
a)



b)

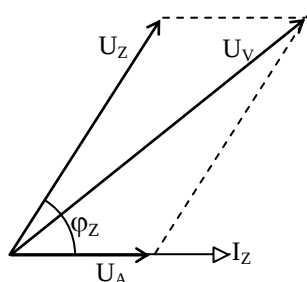
Zapojení wattmetru přináší stejné možnosti zapojení proudové a napěťové cívky, jako zapojení ampérmetru a voltmetru při měření odporu. V zapojení a) způsobuje chybu metody proudová cívka a wattmetr ukáže výkon zátěže zvětšený o ztrátu na proudové cívce wattmetru. V zapojení b) se zvětšuje výkon na wattmetru o ztrátu na napěťové cívce.

$$P_Z = P_W - P_{pW} = P_W - R_{pW} I_Z^2$$

$$P_R = P_W - P_{nW} = P_W - \frac{U_R^2}{R_{nW}}$$

Oprava na chybu metody je stejná pro zátěž činnou nebo impedanční.

1.1.5 Měření impedance



V případě měření impedancí v zapojeních uvedených u měření odporů se situace komplikuje. Napětí U_Z a proud I_Z na impedanci nejsou ve fázi (na rozdíl od odporu). Z toho vyplývá, že ani napětí U_Z a úbytek napětí na ampérmetru U_A v zapojení a) nejsou ve fázi (totéž platí pro proud voltmetrem I_V a I_Z v zapojení b)). Z toho dále plyne, že v rovnicích, uvedených u těchto zapojení, je třeba uvažovat vektorový součet. Takže pokud nebudeme znát fázový úhel zátěže, nedokážeme tyto rovnice vypočítat. Velikost chyby metody dokážeme pouze odhadnout.

Např. pokud poteče cívkou v zapojení b) $1\ \text{A}$ při $100\ \text{V}$ (její impedance je $100\ \Omega$) a voltmetrem $10^{-5}\ \text{A}$ (jeho odpor je $10^7\ \Omega$) pak chyba změření

proudu bude asi $10^{-3}\ \%$, což je většinou chyba v technické praxi zanedbatelná.

Další problém měření vzniká tím, že impedance je plně popsána dvěma parametry: absolutní hodnotou a fází, činnou a jalovou složkou atp. Takže např. cívku popíšeme její indukčností a činným odporem, nebo indukčností a jakostí, při vysokých kmitočtech ještě potřebujeme znát její parazitní kapacitu. Další chyba metody v zapojeních a) i b) tedy vznikne tím, že při střídavém napájení, při kterém bude později měřený prvek provozován, změříme pouze jeho impedanci a činný odpor doměříme při stejnosměrném napájení (např. ohmmetrem). Přitom např. při měření parametrů cívky se železem

takto nepostihneme ztráty v železe, které se při střídavém napájení projeví. Tuto chybu nelze vypočítat, lze ji odstranit volbou jiné metody měření.

Další chyba metody může vzniknout tím, že parametry cívky zjišťujeme při jiné frekvenci nebo při jiném proudu, než při kterém bude později měřený prvek provozován. Ani tuto chybu nelze vypočítat, lze ji odstranit volbou odpovídajících parametrů při měření.



Shrnutí pojmů 1.1

- Chyba metody
- Vnitřní odpor přístroje



Otázky 1.1

- 1.1 Co způsobuje chybu metody
- 1.2 Při snížení rozsahu ampérmetru bočníkem se u analogového přístroje změní vstupní odpor. Zvětší se nebo zmenší?
- 1.3 Při snížení rozsahu voltmetru předřadníkem se u analogového přístroje změní vstupní odpor. Zvětší se nebo zmenší?
- 1.4 Změní se při snížení rozsahu voltmetru předřadníkem u číslicového přístroje vstupní odpor?



Úlohy k řešení 1.1

- 1.5 Dělič tvořený odpory $R_1 = 200 \text{ k}\Omega$ a $R_2 = 100 \text{ k}\Omega$ připojený na napětí 12 V.
 - a) zjistěte rozložení napětí na nezátíženém děliči,
 - b) zjistěte napětí naměřené na odporu R_2 voltmetrem s vnitřním odporem $5 \text{ k}\Omega / \text{V}$ na rozsahu 12V,
 - c) zjistěte napětí naměřené na odporu R_2 voltmetrem s vnitřním odporem $10 \text{ M}\Omega$.

1.2 Chyba měřicího přístroje



Čas ke studiu: 2 hodiny



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat třídu přesnosti analogových přístrojů
- definovat třídu přesnosti číslicových přístrojů
- vypočítat chybu, způsobenou měřicím přístrojem



Výklad

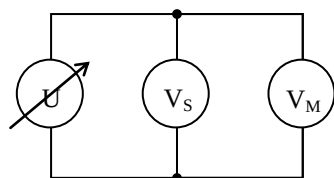
1.2.1 Třída přesnosti

Kalibraci přístroje se stanoví korekční křivka, pomocí které se naměřené hodnoty opravují. Pro většinu sériově vyráběných přístrojů udává výrobce jejich největší absolutní chybu. Tak zaručuje, že hodnota veličiny naměřená přístrojem bude v celém rozsahu mít chybu zpravidla menší, ale nanejvýš rovnou maximální chybě. Maximální chyba je pro analogové měřicí přístroje výrobcem udávána pomocí třídy přesnosti.

Podle normy existují tyto třídy přesnosti (údaj je v procentech): 0,05; 0,1; 0,2; 0,3; 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 5.

Příklad 1

Nakreslete korekční křivku a určete třídu přesnosti nově postaveného analogového voltmetru. Ke kalibraci použijte voltmetr s přesností vyšší, než je předpokládána přesnost nového voltmetru (číslicový voltmetr).

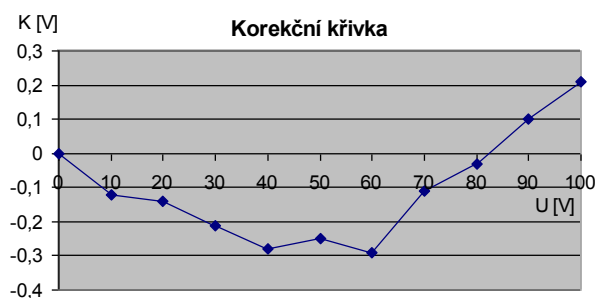


V_S – kalibrační číslicový voltmetr

V_M – kalibrovaný analogový voltmetr

Na zdroji nastavujeme napětí tak, aby výchylky analogového voltmetru odpovídaly hlavním dílkům stupnice (stupnice má 100 dílků, každý desátý je popsán hodnotou – ten je hlavní). Současně odečítáme hodnoty z číslicového voltmetru. Naměřené hodnoty zapíšeme do tabulky, vypočítáme absolutní chybu ($\Delta = U_M - U_S$), korekci ($K = -\Delta$) a nakreslíme korekční křivku:

U_M	U_S	Δ	K
[V]	[V]	[V]	[V]
0	0	0	0
10	9,88	0,12	-0,12
20	19,86	0,14	-0,14
30	29,79	0,21	-0,21
40	39,72	0,28	-0,28
50	49,75	0,25	-0,25
60	59,71	0,29	-0,29
70	69,89	0,11	-0,11
80	79,97	0,03	-0,03
90	90,10	-0,10	0,10
100	100,21	-0,21	0,21



V tabulce najdeme největší absolutní chybu $\Delta_{\max} = -0,29$ V. Podíl této chyby a rozsahu analogového voltmetru je relativní chyba $\delta = \pm \frac{|\Delta_{\max}|}{X_R} 100 = \pm \frac{|-0,29|}{100} 100 = \pm 0,29\%$. Z ní určíme třídu přesnosti. Třída přesnosti této hodnoty (0,29) není, proto přiřadíme nejvyšší bližší, tj. 0,3.

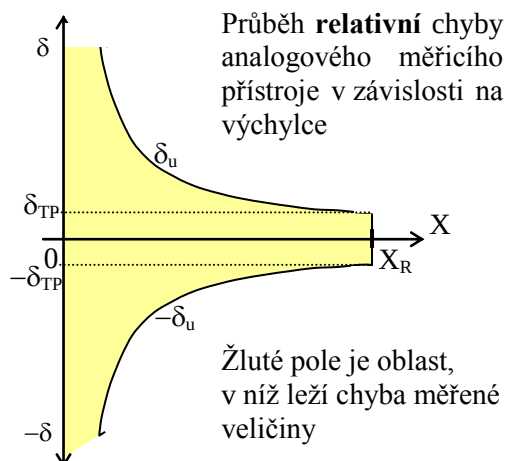
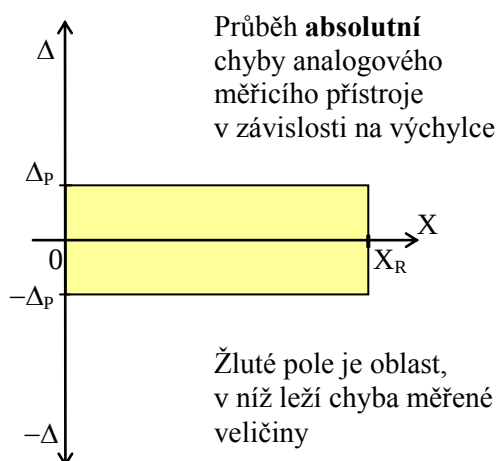
Takto je novým analogovým přístrojem přiřazována třída přesnosti. Korekční křivku přístroje většinou nemáme k dispozici, ale z třídy přesnosti jsme schopni zjistit meze v nichž se pohybuje maximální absolutní chyba. V našem případě to bude $\Delta_p = \pm \frac{|\delta_{TP}| X_R}{100} = \pm \frac{0,3 \cdot 100}{100} = \pm 0,3$ V a bude

stejná v celém rozsahu přístroje i když z příkladu vidíme, že této hodnotě se blíží pouze ve dvou bodech.

Potřebujeme-li zjistit, kolik procent představuje tato maximální absolutní chyba z aktuální výchylky, pak budeme počítat ze vztahu $\delta_u = \pm \frac{|\Delta_p|}{X_M} 100 = \delta_{TP} \frac{X_R}{X_M}$ (Δ_p je absolutní chyba přístroje vypočítaná z třídy přesnosti, δ_{TP} je třída přesnosti, X_R je rozsah přístroje a X_M naměřená hodnota). Takže 10 V změříme v našem příkladě s relativní chybou $\pm 3\%$, 100 V s relativní chybou $\pm 0,3\%$. Stále to však bude s absolutní chybou $\pm 0,3V$.

Relativní chyba údaje je tedy tím větší, čím menší je měřená hodnota vzhledem k maximální hodnotě rozsahu. Proto se s analogovými měřicími přístroji má měřit tak, aby výchylka byla pokud možno ve třetí třetině rozsahu.

Chybu měřicího přístroje nelze opravou (korekcí) zcela vyloučit a proto se udává mezemi ($|\Delta_p|$; $|\Delta_u|$; $|\delta_p|$ a $|\delta_u|$) v nichž leží skutečná hodnota měřené veličiny.



Příklad 2

Laboratorním voltmetrem s rozsahem $X_R = 150\text{ V}$ a třídou přesnosti 0,5 máme změřit $X_M = 90\text{ V}$. Jaká je absolutní a relativní chyba tohoto měření, jestliže jsou dodrženy vztažné podmínky?

$$\Delta_u = \pm \frac{|\delta_{TP}| X_R}{100} = \pm \frac{0,5 \cdot 150}{100} = \pm 0,75\text{ V}$$

Každá naměřená hodnota je tedy zjištěna s tolerancí $\pm 0,75\text{ V}$, tzn. naměřím-li 90 V, pak správná může být každá hodnota v rozmezí 89,25 V až 90,75 V.

$$\delta_u = \pm \frac{|\Delta_u|}{X_M} 100 = \pm \frac{0,75}{90} \cdot 100 = \pm 0,83\%$$

Tento údaj říká, kolik je toleranční pásmo $\pm 0,75\text{ V}$ procent z měřené hodnoty 90 V.

Kdybychom chtěli změřit tímto přístrojem $X_M = 10\text{ V}$, určili bychom je s relativní chybou

$$\delta_u = \pm \delta_{TP} \frac{X_R}{X_M} = \pm 0,5 \cdot \frac{150}{10} = \pm 7,5\%$$

1.2.1.1 Vztažné podmínky

Třída přesnosti platí za vztažných podmínek. Vztažné podmínky znamenají, že veličiny, které ovlivňují správnou funkci ústrojí AMP, mají **vztažnou hodnotu**. Pro ni je dáno úzké pásmo tolerance.

Tabulka 1

Ovlivňující veličina	Vztažné hodnoty ovlivňující veličiny		Dovolené úchytky vztažných hodnot ovlivňujících veličin	
	Jsou-li vztažné podmínky uvedeny na přístroji	Nejsou-li vztažné podmínky uvedeny na přístroji	Přístroje třídy 0,1; 0,2; 0,5	Přístroje třídy 1 a vyšší
Teplota	Vztažná teplota	+23 °C	±1 °C	±2 °C
Poloha	Vztažná poloha	Libovolná poloha	±1°	±1°
Vliv vnějších magnetických polí	Magnetické pole intenzity vyznačené na přístroji	Vyloučení vlivu vnějších magnetických polí	Zemské magnetické pole	
Vliv panelu	Vztažný panel (viz. norma ČSN IEC 51)	Viz. norma ČSN IEC 51	-	-
Kmitočet	Vztažný kmitočet	45 až 65 Hz	±2%	±2%
			Pro jednofázové fázoměry ±0,1% jmenovitého rozsahu	Pro jednofázové fázoměry ±0,2% jmenovitého rozsahu
Tvar vlny střídavého proudu	Podle údaje na přístroji	Viz. norma ČSN IEC 51		
Střídavá složka stejnosměrného proudu	Podle údaje na přístroji	Viz. norma ČSN IEC 51		

Z další tabulky je zřejmé, že např. u wattmetru se může měnit pouze proud a dále, že wattmetr měří s udanou přesností pouze při činné zátěži.

Tabulka 2

Druh přístroje	Vztažné hodnoty		
	napětí	proud	účinník
Wattmetr	jmenovité ±2%	-	$\cos \varphi = 1 (\pm 0,01)$ nebo jmenovitý $\cos \varphi (\pm 0,01)$
Měřič účinníku	jmenovité ±2%	Libovolná hodnota proudu ze vztažného rozsahu, není-li vyznačen vztažný rozsah, hodnota 40 až 100% jmenovitého proudu	-
Ohmmetr	jmenovité ±2%	-	-

Z další tabulky je zřejmé, že wattmetr měří při obecné zátěži s chybou o 100 % větší.

Tabulka 3

Ovlivňující veličina	Mezní hodnoty jmenovitého rozsahu použití, pokud není vyznačeno jinak	Dovolená změna údajů vyjádřená v procentech třídy přesnosti
Okolní teplota	Vztažná hodnota $\pm 10^\circ\text{C}$	100 %
Poloha	Vztažná poloha $\pm 5^\circ$ Vztažná poloha $\pm 1^\circ$ pro přístroje závěsné	100 %
Kmitočet	Vztažný kmitočet $\pm 10\%$	100 %
Napětí	Vztažné napětí $\pm 15\%$	100 %
Proud	20 % až 100 % jmenovitého rozsahu	100 %
Vnější magnetické pole	0,4 kA/m	Viz. norma ČSN IEC 51
Účinník (cos φ) wattmetrů	Pro přístroje třídy 0,1; 0,2; 0,5 jmenovitý cos φ až cos $\varphi = 0$	100 %

Pokud není dodrženo více vztažných podmínek pak se změny údaje sčítají.

Příklad 3

Magnetoelektrickým voltmetrem s měřicím rozsahem 0 až 200 V, třídou přesnosti 1,5 měříme při okolní teplotě 19°C . Vztažná teplota není na přístroji uvedena. S jakou chybou měříme?

Není-li jakákoli vztažná podmínka na přístroji vyznačena, předpokládá se, že její hodnota je rovna hodnotě uvedené v tab. 1. Pro okolní teplotu tedy 23°C . Při této teplotě měří přístroj s přesností danou třídou přesnosti. Se stejnou přesností měří i v toleranci $\pm 2^\circ\text{C}$ (tzn. v rozmezí 21°C až 25°C). Jakmile teplota toto rozmezí překročí, platí tabulka 3. Ta pro okolní teplotu uvádí, že meze jmenovitého rozsahu použití jsou

$$\text{vztažná teplota } \pm 10^\circ\text{C}$$

V tomto rozsahu může dojít k dovolené změně údajů o 100 % třídy přesnosti.

V našem případě bude daný magnetoelektrický voltmetr měřit v rozsahu teplot 21°C až 25°C s chybou $\pm 1,5\%$, tj. $\pm 3\text{V}$, v rozsahu teplot 13°C až 21°C a 25°C až 33°C s chybou $\pm 3\%$, tj. $\pm 6\text{V}$. Pokud tedy měříme při okolní teplotě 19°C , pak chyba údaje je $\pm 3\%$.

1.2.2 Chyba číslicových měřicích přístrojů (ČMP)

U voltmetrů, ampérmetrů a ohmmetrů se většinou dovolená **chyba přístroje** udává součtem dvou poměrných chyb $\delta = \pm(|\delta_1| + |\delta_2|)$ v % nebo p.p.m. Součtem proto, že každá z nich se chová jinak. První chyba δ_1 je z měřené hodnoty X_M a druhá δ_2 je vztažená k největší hodnotě měřicího rozsahu X_R .

Druhá chyba se někdy zadává jako změna na nejnižším místě displeje.

Příklady vyjádření základní chyby číslicových měřicích přístrojů

první složka δ_1 označená jako: MH – z měřené veličiny

RDG – of reading

druhá složka δ_2 označená jako: MHMR – z maximální hodnoty měřicího rozsahu

FS - full scale

of range

nebo: $\pm$ znak

$\pm$ count

$\pm$ digit

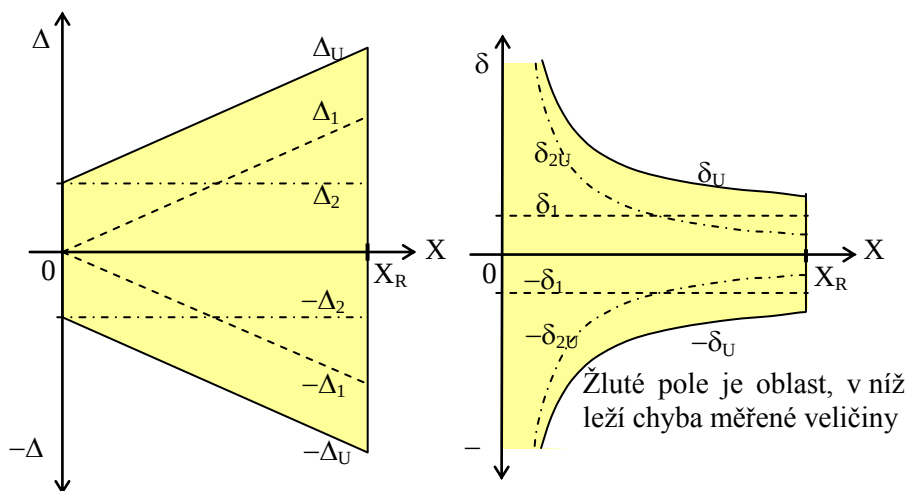
$\pm$ LSB (Least Significant Bit)

Zápis chyby $\pm (0,05 \% \text{ MH} + 0,01 \% \text{ MHMR})$
 $\pm (0,05 \% \text{ rdg} + 1 \text{ digit})$
 $\pm (500 \text{ p. p. m. rdg} + 100 \text{ p. p. m. fs})$

v uvedených tvarech je pro voltmetr s rozsahem 10,000 V rovnocenný.

Uvedené chyby se označují obvykle jako základní chyby ČMP a platí za vztažných podmínek, tj. pro udanou okolní teplotu a teplotní rozsah, např. $23 \pm 5^\circ\text{C}$, během zadané doby po kalibraci přístroje, např. 24 hod. Nepracuje-li přístroj při těchto vztažných podmínkách, pak vznikají přídavné chyby, definované teplotním koeficientem, např. $10^{-5}/^\circ\text{C}$, a časovou stabilitou, např. 30, 90 dní nebo 1 rok.

Jestliže je δ_1 relativní chyba z měřené hodnoty X_M , pak absolutní chyba údaje Δ_{1U} se bude počítat ze vztahu $\Delta_{1U} = \pm \frac{|\delta_1| X_M}{100}$, tzn. lineárně poroste se zvětšující se měřenou veličinou. Relativní chyba δ_2 je



vztažená k největší hodnotě měřicího rozsahu X_R , proto se absolutní chyba Δ_2 bude počítat ze vztahu $\Delta_2 = \pm \frac{|\delta_2| X_R}{100}$ a bude stejná v celém rozsahu. Relativní chyba δ_1 je stále stejná v celém rozsahu, relativní chyba údaje δ_{2U} se chová stejně, jako chyba analogových přístrojů.

Příklad 4

Číslicovým voltmetrem s měřicím rozsahem $X_R = 2,000 \text{ V}$ a chybou $\pm (0,1 \% \text{ z } X_M + 3 \text{ jednotky})$ máme změřit $X_M = 0,5 \text{ V}$. S jakou maximální absolutní a relativní chybou údaje musíme počítat?

Absolutní chybu údaje lze počítat přímo z uvedené chyby s tím, že si uvědomíme, že 3 jednotky na nejnižším místě čísla 2,000 V jsou 3 mV. Pak výpočet vypadá takto

$$\Delta_u = \pm \frac{|\delta_1| X_M + |\delta_2| X_R}{100} = \pm \left(\frac{0,1 \cdot 0,5}{100} + 0,003 \right) = \pm 0,0035 \text{ V}$$

Relativní chybu údaje by se pak počítala $\delta_u = \pm \frac{|\Delta_u|}{X_M} 100 = \pm \frac{0,0035}{0,5} 100 = \pm 0,7 \%$

Pokud chceme převést údaj chyby z rozsahu v jednotkách posledního indikovaného místa na procentní chybu, pak převod vypadá takto (úvaha v podstatě zní – kolik procent jsou 3 zobrazené číslice z 2000 možných?)

$$\delta_2 = \pm \frac{3}{2000} 100 = \pm 0,15 \%$$

Relativní chybu údaje lze pak počítat přímo $\delta_u = \pm \left(|\delta_1| + |\delta_2| \frac{X_R}{X_M} \right) = \pm \left(0,1 + 0,15 \frac{2}{0,5} \right) = \pm 0,7 \%$

**Shrnutí pojmů 1.2.**

- Rozsah
- Třída přesnosti
- Chyba analogových přístrojů
- Chyba číslicových přístrojů

**Otázky 1.2.**

- 1.6 V jakých jednotkách je absolutní chyba měřicího přístroje
- 1.7 V jakých jednotkách je třída přesnosti
- 1.8 Pro jakou výchylku platí třída přesnosti
- 1.9 Jaké největší číslo lze zobrazit na 3 a 4/5 místném displeji

**Úlohy k řešení 1.2.**

- 1.10 Kolik procent představují 2 digity na 4 a ½ místném displeji
- 1.11 Na analogovém měřicím přístroji s rozsahy 6 V, 12 V ... jste naměřili střídavé napětí 7 V. Třída přesnosti je 1,5. Zjistěte absolutní chybu údaje
- 1.12 Na číslicovém multimetru s rozsahy ... 5 V, 50V ... (displej je 3 4/5 místný) jste naměřili střídavé napětí 7 V. Přesnost na uvedených rozsazích je stejná a je $\pm(2,2 \% + 3 \text{ dig})$. Zjistěte absolutní chybu údaje
- 1.13 Změřte odpor 50 mΩ multimetrem s 4 a ½ místným displejem. Nejnižší rozsah je 200 Ω s přesností $\pm 0,2 \% + 10 \text{ dig}$. Zjistěte absolutní i relativní chybu údaje

1.3 Chyba měření**Čas ke studiu:** 2 hodiny**Cíl** Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat nepřímé měření
- vypočítat chybu měření

**Výklad****1.3.1 Nepřímá měření**

Hodnota hledané veličiny Y je funkcí n veličin označených X_1 až X_n ($Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$). Všechny tyto veličiny známe s chybami údajů $|\Delta_{X1}|$ až $|\Delta_{Xn}|$. Výsledná maximální chyba hledané

veličiny Y je dána zákonem o hromadění chyb. Jeho tvar $|\Delta_{T(Y)}| = \left| \frac{\partial Y}{\partial X_1} \right| |\Delta_{X_1}| + \left| \frac{\partial Y}{\partial X_2} \right| |\Delta_{X_2}| + \dots + \left| \frac{\partial Y}{\partial X_n} \right| |\Delta_{X_n}|$ určuje mezní absolutní chybu výsledku jako součet (absolutních hodnot) parciálních derivací funkce podle jednotlivých změřených veličin, násobených absolutní chybou, s níž byla příslušná veličina určena. Relativní chyba je pak $|\delta_{T(Y)}| = \frac{|\Delta_{T(Y)}|}{Y}$.

Příklad 5

Z měření proudu a napětí určete hodnotu výkonu neznámého odporu R_x a největší možnou chybu stanovenou z chyb přístrojů.

Výkon na odporu se bude počítat z naměřeného napětí a proudu $P = UI$.

Absolutní chyba výsledku $\Delta_{T(P)}$ je $|\Delta_{T(P)}| = |I| |\Delta_{T(U)}| + |U| |\Delta_{T(I)}|$.

Relativní chyba určená z chyb přístrojů se vypočte dělením absolutní chyby hodnotou funkce

$$|\delta_{T(P)}| = \frac{|\Delta_{T(P)}|}{P} 100 = \frac{|I| |\Delta_{T(U)}| + |U| |\Delta_{T(I)}|}{UI} 100 = \left(\left| \frac{\Delta_{T(U)}}{U} \right| + \left| \frac{\Delta_{T(I)}}{I} \right| \right) 100$$

takže výsledná poměrná chyba je dána součtem poměrných chyb údajů jednotlivých přístrojů $|\delta_{T(P)}| = |\delta_{T(U)}| + |\delta_{T(I)}|$ nebo $\delta_{T(P)} = \pm (|\delta_{T(U)}| + |\delta_{T(I)}|)$.

K stejnému závěru dojdeme, je-li uvažovaná funkce podílem. Při výpočtu je třeba vzít v úvahu, že hledáme nejnepríznivější případ s ohledem na vzájemnou kombinaci znamének chyb dělence a dělitele.

Při součinu nebo podílu je tedy výhodné počítat s poměrnými chybami. Provedeme-li obdobný výpočet pro funkci, která je dána součtem nebo rozdílem nezávisle proměnných, uvidíme, že zde je výhodné počítat s absolutními chybami.

Je-li funkce, z níž počítáme hledanou veličinu, dána nějakým složitějším výrazem, nemusíme vždy počítat její úplný diferenciál. Danou funkci rozložíme na několik částí, kde každá je tvořena některým jednoduchým početním vztahem (součtem, rozdílem, součinem, podílem, mocninou nebo logaritmem). Jednotlivé části jsou opět spojeny některým jednoduchým početním úkonem. Při výpočtu chyby pak postupujeme tak, že vypočteme chyby (buď absolutní nebo poměrné - co je jednodušší) jednotlivých částí a z nich teprve chybu celé funkce. Při každém kroku si převedeme vypočtené chyby do takové formy (absolutní nebo poměrná), která je pro další výpočet výhodnější.

Chyby pro některé základní matematické operace jsou uvedeny v následující tabulce.

POČETNÍ VÝKON	VÝSLEDNÝ VZTAH	ABSOLUTNÍ CHYBA	RELATIVNÍ CHYBA
Násobení konstantou	$Y = n \cdot X$	$ \Delta_{T(Y)} = n \Delta_{T(X)} $	$ \delta_{T(Y)} = \delta_{T(X)} $
Mocnina	$Y = X^n$	$ \Delta_{T(Y)} = nX^{(n-1)} \Delta_{T(X)} $	$ \delta_{T(Y)} = n \delta_{T(X)} $
Odmocnina	$Y = \sqrt[n]{X}$	$ \Delta_{T(Y)} = \left \frac{1}{n} X^{\left(\frac{1}{n}-1\right)} \right \Delta_{T(X)} $	$ \delta_{T(Y)} = \left \frac{1}{n} \right \delta_{T(X)} $
Přirozený logaritmus	$Y = \ln X$	$ \Delta_{T(Y)} = \frac{1}{X} \Delta_{T(X)} $	$ \delta_{T(Y)} = \frac{1}{\ln X} \delta_{T(X)} $
Součet	$Y = X_1 + X_2$	$ \Delta_{T(Y)} = \Delta_{T(X_1)} + \Delta_{T(X_2)} $	$ \delta_{T(Y)} = \frac{ \delta_{T(X_1)} X_1 + \delta_{T(X_2)} X_2 }{ X_1 + X_2 }$
Rozdíl	$Y = X_1 - X_2$		$ \delta_{T(Y)} = \frac{ \delta_{T(X_1)} X_1 + \delta_{T(X_2)} X_2 }{ X_1 - X_2 }$
Součin	$Y = X_1 \cdot X_2$	$ \Delta_{T(Y)} = \Delta_{T(X_1)} X_2 + \Delta_{T(X_2)} X_1 $	$ \delta_{T(Y)} = \delta_{T(X_1)} + \delta_{T(X_2)} $
Podíl	$Y = \frac{X_1}{X_2}$	$ \Delta_{T(Y)} = \frac{ \Delta_{T(X_1)} X_2 + \Delta_{T(X_2)} X_1 }{ X_2 ^2}$	
Obecná funkce	$Y = f(X_1, X_2)$	$ \Delta_{T(Y)} = \left \frac{\partial f}{\partial X_1} \right \Delta_{T(X_1)} + \left \frac{\partial f}{\partial X_2} \right \Delta_{T(X_2)} $	$ \delta_{T(Y)} = \frac{\left \frac{\partial f}{\partial X_1} \right \Delta_{T(X_1)} + \left \frac{\partial f}{\partial X_2} \right \Delta_{T(X_2)} }{ f(X_1, X_2) }$

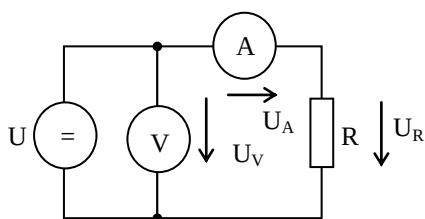
1.3.2 Chyby rušivými vlivy

vznikají působením různých rušivých činitelů v měřicím obvodu (např. rušivá napětí indukovaná v měřicím obvodu cizím polem, rušivé kapacitní a indukční vazby mezi členy měřicího obvodu, odpory spojovacích vodičů a přechodové odpory na svorkách, termoelektrická napětí, svodové odpory nedokonalé izolace apod.). Nepočítáme sem chyby vyvolané rušivými vlivy působícími přímo na měřicí přístroje, tyto chyby patří k chybám údaje přístroje.

Chyby vznikající rušivými vlivy mívají soustavnou i nahodilou složku. Zjištění přítomnosti těchto chyb, jejich odstranění, popř. korigování je zpravidla velmi obtížné, zvláště u složitějších měřicích metod.

Příklad 6

Máme změřit ohmovou metodou velikost odporu R . Voltmetr je číslicový s chybou $\pm(0,3 \% + 2 \text{ dig})$, 3 a $\frac{1}{2}$ místným displejem a vnitřním odporem na všech rozsazích $10 \text{ M}\Omega$, ampérmetr je číslicový s chybou $\pm(1,2 \% + 3 \text{ dig})$, 3 a $\frac{1}{2}$ místným displejem a vnitřním odporem 8 mV/mA .



V tomto zapojení naměřily přístroje $U_V = 19,9 \text{ V}$, $I_A = 96 \text{ mA}$.

Z těchto hodnot vypočítáme odpor R' .

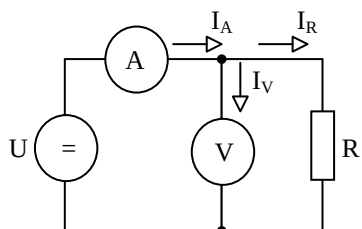
$R' = \frac{U_V}{I_A} = \frac{19,9}{0,096} = 207 \Omega$. Tento výsledek je zatížen chybou metody.

Chybu metody způsobuje vnitřní odpor ampérmetru, který je

$$R_A = \frac{8 \text{ mV}}{1 \text{ mA}} = 8 \Omega. \text{ Správná hodnota odporu je } R = R' - R_A = 207 - 8 = 199 \Omega. \text{ Pokud bychom}$$

neprovedli opravu na chybu metody, bylo by měření zatíženo 4 % chybou ($\delta = \frac{R_A}{R'} \cdot 100 \doteq 4 \%$).

Uvedený výsledek je stále ještě zatížen chybou měřicích přístrojů.



V tomto zapojení naměřily přístroje $U_V = 19,9 \text{ V}$, $I_A = 100 \text{ mA}$.

Z těchto hodnot vypočítáme odpor $R' = \frac{U_V}{I_A} = \frac{19,9}{0,1} = 199 \Omega$. Tento výsledek je zatížen chybou metody.

Chybu metody způsobuje vnitřní odpor voltmetru.

$$\Delta_m = -\frac{R^2}{R + R_V} = -\frac{4 \cdot 10^4}{2 \cdot 10^2 + 10^7} = -4 \cdot 10^3 \Omega. \text{ Správná hodnota odporu je}$$

$R = R' - \Delta_m = 199 - (-4 \cdot 10^3) = 199,004 \Omega$. Pokud bychom neprovedli opravu na chybu metody, bylo by měření zatíženo $2 \cdot 10^{-3} \%$ chybou ($\delta_m = \frac{\Delta_m}{R'} \cdot 100 \doteq -2 \cdot 10^{-3} \%$).

Uvedený výsledek je stále ještě zatížen chybou měřicích přístrojů a je možné, že chyba metody bude vůči chybě přístrojů zanedbatelná.

Odpor se použitou metodou měří nepřímou. Ve vztahu pro výpočet jsou naměřené veličiny v podílu. Podle pravidel pro nepřímá měření se v takovém případě sčítají relativní chyby údajů přístrojů.

Druhá složka chyby přístrojů je udána v digitech; je to změna na posledním místě displeje. Převod na procenta je vlastně otázka kolik procent je toto číslo z nejvyššího zobrazitelného čísla na displeji.

$$\delta_{2V} = \pm \frac{2}{1999} 100 = \pm 0,1 \% \text{ pro voltmetr, pro ampérmetr je } \delta_{2A} = \pm 0,15 \%$$

Relativní chyba údaje se pak pro ampérmetr počítá

$$\delta_{uA} = \pm \left(|\delta_1| + |\delta_2| \frac{X_R}{X_M} \right) = \pm \left(1,2 + 0,15 \frac{199}{100} \right) = \pm 1,5 \%. \text{ Protože na voltmetru byla naměřena hodnota}$$

odpovídající plně výchylce na rozsahu 20 V, stačí sečíst obě složky chyby voltmetru $\delta_{uV} = \pm(0,3 + 0,1) = \pm 0,4 \%$.

Celková chyba přístrojů při měření odporu je $\delta_{uR} = \pm(\delta_{uV} + \delta_{uA}) = \pm(0,4 + 1,5) = \pm 1,9 \%$. Už zde je vidět, že chyba způsobená nepřesností měřicích přístrojů je mnohem větší než chyba metody ($1,9 \% \gg 0,002 \%$).

Po převedení na absolutní chybu měřicích přístrojů dostaneme pásmo, v němž leží správná

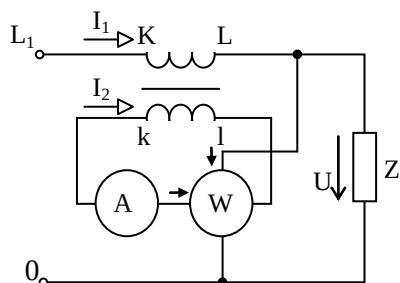
$$\text{naměřená hodnota odporu } \Delta_{UR} = \pm \frac{\delta_{UR} \cdot R}{100} = \pm \frac{1,9 \cdot 199}{100} = \pm 3,8 \Omega \doteq \pm 4 \Omega$$

Ted' můžeme zapsat výsledek měření: $(199,004 \pm 3,8) \Omega$. Opět je vidět, že uvádět ve výsledku tisíciny ohmů nemá smysl, protože správná hodnota je každá hodnota v rozmezí 195,2 až 202,8 Ω . Proto správný zápis výsledku je $(199,0 \pm 3,8) \Omega$, nebo $(199 \pm 4) \Omega$.

Poznámka k výběru metody:

Z příkladu je vidět, že pokud provedeme opravu na chybu metody, dojdeme v obou zapojeních ke stejné opravené hodnotě. Naměřené hodnoty se ale liší, takže pokud nechceme provádět opravu na chybu metody, musíme zvolit to zapojení, ve kterém je chyba metody menší.

Příklad 7



Převod měřicího transformátoru proudu $p_{MTP} = 100 \text{ A/5 A}$;
třída přesnosti ampérmetru $\delta_{TPA} = 0,2$;

wattmetru $\delta_{TPW} = 0,5$;

MTP $\delta_{TPMTP} = 0,1$;

Rozsah ampérmetru $I_R = 5 \text{ A}$;

Napěťový rozsah wattmetru $U_N = 240 \text{ V}$;

Proudový rozsah wattmetru $I_N = 5 \text{ A}$;

Jmenovitý účinník wattmetru $\cos \varphi_N = 1$

stupnice wattmetru má $\alpha_R = 120$ dílků

naměřené hodnoty $I_2 = 4,5 \text{ A}$; $U = 225 \text{ V}$; $\alpha_W = 90$ d

Zjistěte absolutní chybu údaje wattmetru.

Nejdříve zjistíme, jakou hodnotu ve wattech změřil wattmetr. Potřebujeme zjistit konstantu rozsahu

$$K_R = \frac{X_R}{\alpha_R} = \frac{U_N \cdot I_N \cdot \cos \varphi_N}{\alpha_R} = \frac{240 \cdot 5 \cdot 1}{120} = 10 \text{ W/d}.$$

Údaj wattmetru zatížený chybou metody je $P'_2 = K_R \cdot 90 = 900 \text{ W}$.

Výkon na zátěži zatížený chybou metody je $P'_1 = p_{MTP} \cdot P'_2 = 18000 \text{ W}$.

Protože se výkon měří přes MTP, jde o nepřímé měření. Pro výpočet hodnoty výkonu před MTP je použit předchozí vzorec, v kterém je součin převodu trať a výkonu v jeho sekundáru. Pro výpočet chyby přístrojů se tedy budou počítat relativní chyby MTP a wattmetru. Z tabulky uvedené u měřicích transformátorů vyplývá, že na 90 % I_{1n} můžeme počítat s chybou údaje rovnou třídě přesnosti. Chyba údaje wattmetru se vypočítá

$$\delta_{uW} = \pm \delta_{TPW} \frac{P_R}{P'_2} = \pm 0,5 \cdot \frac{1200}{900} = \pm 0,67 \%$$

Celková chyba měření výkonu daná chybami přístrojů $\delta_p = \pm(\delta_{uW} + \delta_{MTP}) = \pm(0,67 + 0,1) = \pm 0,77 \%$

Absolutní chyba měření výkonu daná chybami přístrojů se vypočítá

$$\Delta_u = \pm \frac{|\delta_p| P'_1}{100} = \pm \frac{0,77 \cdot 18000}{100} = \pm 138,6 \text{ W}$$



Shrnutí pojmů 1.3.

- Nepřímé měření
- Chyba měření



Otázky 1.3.

1.14 Co je to nepřímé měření

1.15 Jak se počítá celková chyba přístrojů, jestliže hledaná veličina se počítá jako podíl dvou změřených veličin



Úlohy k řešení 1.3.

1.16 Při měření činného výkonu v třífázové čtyřvodičové síti třemi wattmetry zjistíte celkovou absolutní chybu přístrojů, jestliže všechny wattmetry jsou stejné a mají třídu přesnosti 0,5. Použitý proudový rozsah je 1 A, napětový rozsah je 60 V, jmenovitý účinník wattmetru je 1.

1.17 Vypočítejte celkovou absolutní chybu zjištění proudu I_1 ve výše uvedeném příkladě 7.

1.18 Ve výše uvedeném příkladě 7 zjistíte celkovou chybu metody, jestliže vnitřní odpor proudové cívky wattmetru je 10 mΩ a vnitřní odpor napětové cívky wattmetru je 2 kΩ na 60 V, vnitřní odpor ampérmetru je 20 mΩ.

1.19 Se znalostí všech chyb měření k příkladu 7 запиšte výsledný výkon.

1.4 Nejistoty měření



Čas ke studiu: 2 hodiny



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- definovat standardní nejistoty měření
- vypočítat standardní nejistoty měření



Výklad

Přesnost měření probíraná ve skriptech používá pojmy *chyba měření* a *správná hodnota* měřené veličiny. V poslední době se ale v měřicí technice zavádí hodnocení přesnosti jiným způsobem – pomocí *nejistoty měření*.

Pojem nejistota měření byl zaveden na základě doporučení Mezinárodního výboru pro míry a váhy. V roce 1993 vydala Mezinárodní organizace pro normalizaci (ISO) první vydání praktické příručky pro určování nejistot měření.

V roce 2003 vstoupila v platnost česká verze evropské normy „Elektrická a elektronická měřicí zařízení – vyjadřování vlastností“ (ČSN EN 60359). Tato norma **definuje měřenou hodnotu jako střední prvek souboru, který reprezentuje měřenou veličinu a nejistotu měření jako rozsah hodnot v nichž se může měřená hodnota s určitou jistotou pohybovat.**

Základní kvantitativní charakteristikou nejistoty měření je standardní nejistota. Je to směrodatná odchylka veličiny, pro niž je nejistota udávána. Označuje se symbolem u (z angl. uncertainty).

1.4.1 Standardní nejistoty

Pokud za stejných podmínek provedeme několik měření a výsledek se mění, pak tento soubor naměřených hodnot vyhodnotíme podle počtu pravděpodobnosti. Výsledek je odhadnut jako aritmetický průměr $\bar{x}$ z provedených měření. Míra, která ve spojení s průměrem umožňuje přehled o rozdělení jednotlivých hodnot shrnutých v průměru je míra rozptylu – směrodatná odchylka. Tato směrodatná odchylka je označována za

- *standardní nejistotu typu A* (označení u_A) – určuje se tedy statistickým zpracováním opakovaných měření podobně jako v případě náhodných chyb měření. Její příčiny se považují za neznámé a jejich hodnota klesá s počtem měření.

Naměřené hodnoty byly zjištěny měřicím přístrojem, který měří s uvedenou přesností (třída přesnosti analogového přístroje, přesnost číslicového přístroje). Abychom mohli tuto přesnost přičíst k statistickým parametrům, popisujícím rozptyl naměřených hodnot, musíme k přesnosti zjistit směrodatnou odchylku. To jsou

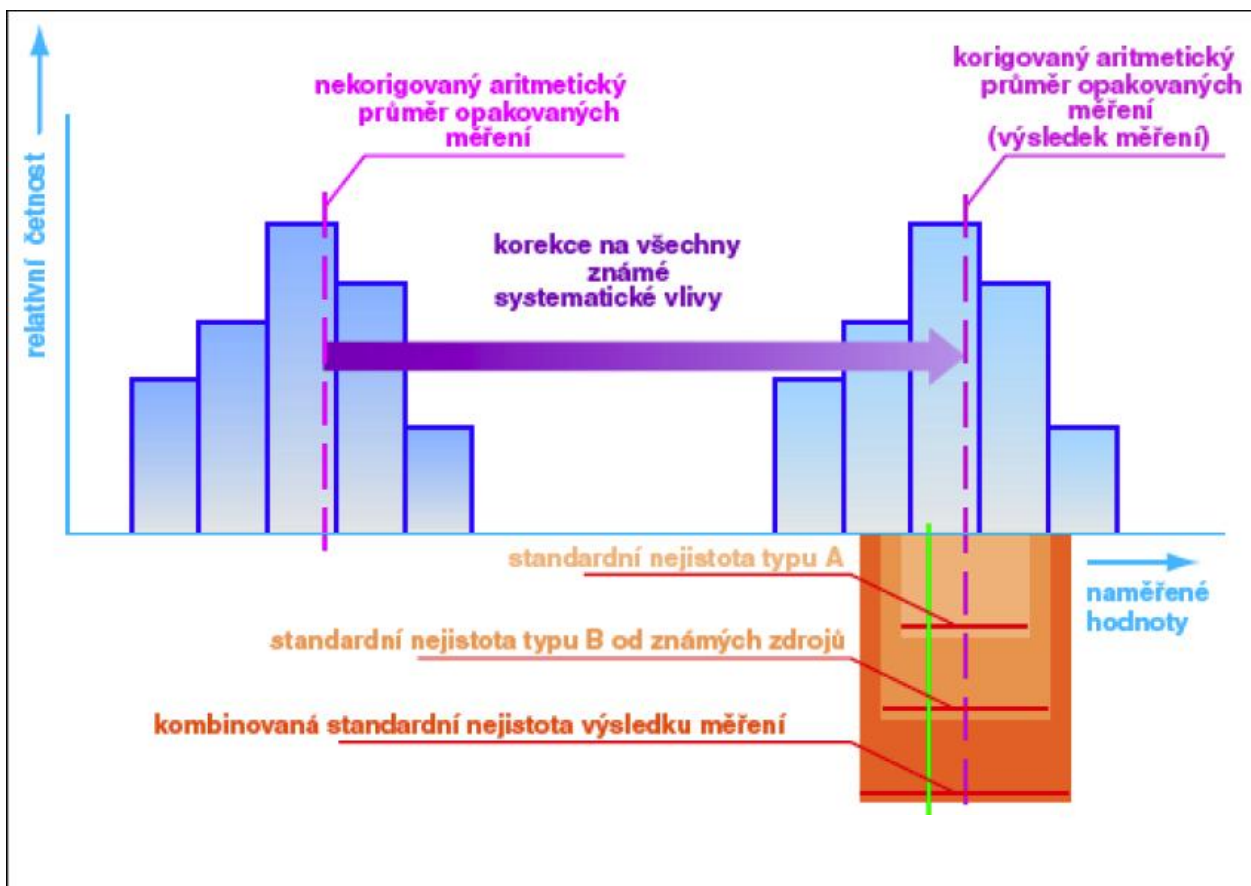
- *standardní nejistoty typu B* (označení u_B). Pocházejí od různých zdrojů (přesnost přístroje, ovlivňující parametry – okolní teplota, atd.) a jejich hodnoty nezávisí na počtu opakování měření (podobně jako systematické chyby měření). Společné působení od různých zdrojů vyjadřuje *výsledná standardní nejistota typu B*.

Pokud se při měření vyskytnou oba zdroje nejistoty, pak se určuje **kombinovaná standardní nejistota** u_C získaná sloučením standardní nejistoty typu A a výsledné standardní nejistoty typu B.

Rozšířená nejistota definuje interval okolo výsledku měření, v němž se s určitou požadovanou pravděpodobností nalézá výsledek měření. Rozšířená nejistota se získá z kombinované standardní nejistoty vynásobením příslušným koeficientem rozšíření.

Pro lepší představu nadefinovaných pojmů je uveden obrázek:

Pozn.: korigovaný výsledek měření obvykle vznikne z nekorigovaného po **opravě měření na chybu metody**.



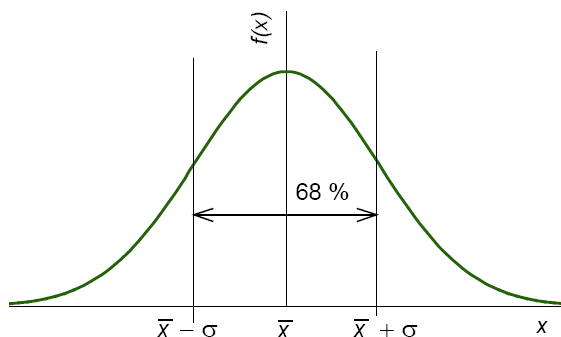
1.4.2 Výpočet standardních nejistot.

Standardní nejistota je vlastně směrodatná odchylka veličiny x . Výpočet směrodatné odchylky se liší podle typu statistického rozdělení.

1. pro veličinu mající normální rozdělení představuje standardní nejistota polovinu šířky intervalu kolem výsledku měření $\bar{x}$ v němž s pravděpodobností asi 68 % leží skutečná hodnota měřené veličiny.

Aproximace normálním rozdělením se použije tehdy, mohou-li se častěji vyskytovat malé odchylky od jmenovité hodnoty, zatímco s rostoucí velikostí odchylek klesá pravděpodobnost jejich výskytu.

Většinou se uvažuje, že toto normální rozdělení má standardní nejistota typu A.



Výběrová směrodatná odchylka a tedy standardní nejistota veličiny s normálním rozdělením se počítá ze vztahu

$$\sigma(\bar{x}) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \text{ kde } n \text{ je}$$

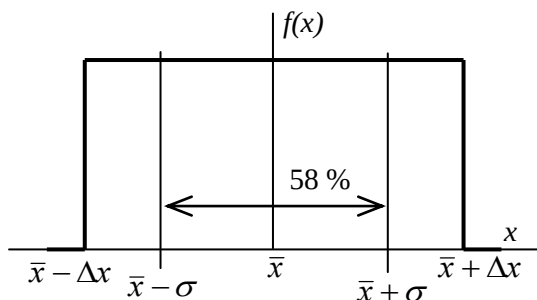
počet opakování měření, x_i jsou hodnoty provedených měření a aritmetický průměr

$$\bar{x} \text{ se vypočítá ze vztahu } \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i.$$

Aby bylo určení těchto veličin dostatečně spolehlivé, musí být počet opakování alespoň 10.

2. pro veličinu mající rovnoměrné rozdělení představuje standardní nejistota polovinu šířky intervalu kolem výsledku měření $\bar{x}$ v němž s pravděpodobností asi 58 % leží skutečná hodnota měřené veličiny

Rovnoměrné rozdělení se použije v případě, kdy je stejná pravděpodobnost výskytu kterékoliv odchylky v celém daném intervalu $\pm \Delta x$. *Tato aproximace se v praxi používá nejčastěji pro standardní nejistotu typu B – důvodem je i nedostatek znalostí rozdělení odchylek, proto se žádné nedává přednost. (Standardní nejistota typu B ale může mít i normální rozdělení!)*



Standardní nejistota a tedy směrodatná odchylka veličiny s rovnoměrným rozdělením se počítá ze

$$\text{vztahu } \sigma = \frac{\Delta x}{\sqrt{3}}$$

kde Δx je interval, v němž leží všechny hodnoty měřené veličiny.

Kombinovaná standardní nejistota u_C se získá ze vztahu $u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}$.

Rozšířená nejistota (U). Vzhledem k tomu, že pravděpodobnost, že v intervalu $\bar{x} \pm \sigma$ se nachází skutečná hodnota měřené veličiny, je pouze 68 % pro normální rozdělení a jen 58 % pro rovnoměrné rozdělení, zvětšuje se kombinovaná standardní nejistota koeficientem rozšíření k : $U = k \cdot u_C$

Koeficient rozšíření k se volí podle toho, jak velkou chceme mít pravděpodobnost toho, že v intervalu $\bar{x} \pm U$ se nachází skutečná hodnota měřené veličiny.

Pro normální rozdělení a pravděpodobnost 95 % je $k = 2$.

Pro rovnoměrné rozdělení a pravděpodobnost 95 % je $k = 0,95 \cdot 1,73 = 1,65$.

V kombinované standardní nejistotě jsou obsaženy obvykle dvě standardní nejistoty - standardní nejistota typu A, u které se předpokládá normální rozdělení a standardní nejistota typu B, u které se může předpokládat rovnoměrné rozdělení. Pak se koeficient rozšíření volí podle normálního rozdělení, tj. $k = 2$.

Pokud se standardní nejistota typu A neuvažuje a mezi složkami tvořícími standardní nejistotu typu B převažují složky s rovnoměrným rozdělením, pak se koeficient rozšíření volí $k = 1,65$.

Vyjadřování celkového výsledku měření.

V závěru měření je nutné uvést celkový výsledek měření ve tvaru $\bar{x} \pm U$, s vysvětlující poznámkou: *uvedená rozšířená nejistota měření je součinem standardní nejistoty měření a koeficientu rozšíření $k = 2$ ($k = 1,65$) což pro normální rozdělení (rovnoměrné rozdělení) odpovídá pravděpodobnosti pokrytí asi 95 %.*

1.4.3 Princip vyhodnocení nejistoty nepřímých měření

Nepřímá měření jsou měření, u kterých se měřená veličina Y vypočítá pomocí známé funkční závislosti z n veličin X_i , určených přímým měřením, jejichž odhady a nejistoty (případně i známé závislosti) jsou známé. Platí $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N)$, kde f je známá funkce.

Odhad y hodnoty výstupní veličiny Y lze stanovit ze vztahu $y = f(x_1, x_2, \dots, x_N)$, kde $x_1, x_2, \dots, x_N$ jsou odhady vstupních veličin $X_1, X_2, \dots, X_N$.

Zákon šíření nejistot je v případě, že mezi vstupními veličinami není závislost, dán vztahem

$$u_y^2 = \sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} u_{x_i} \right)^2, \text{ kde } u_y \text{ je kombinovaná standardní nejistota veličiny } y \text{ a } u_{x_i} \text{ kombinované}$$

standardní nejistoty veličin x_i .

Při slučování nejistot se tedy používá geometrický součet, na rozdíl od výpočtu chyb nepřímých měření, kde se používá aritmetický součet.

Příklad 2 z kapitoly 1.2

Laboratorním voltmetrem s rozsahem $X_R = 150 \text{ V}$ a třídou přesnosti 0,5 máme změřit $X_M = 90 \text{ V}$. Jaká je absolutní a relativní chyba tohoto měření, jestliže jsou dodrženy vztažné podmínky?

- **Výpočet podle teorie chyb**

$$\Delta_u = \pm \frac{|\delta_{TP}| X_R}{100} = \pm \frac{0,5 \cdot 150}{100} = \pm 0,75 \text{ V}$$

Výsledek měření je $(90,00 \pm 0,75) \text{ V}$

- **Výpočet podle teorie nejistot**

Jestliže se údaj voltmetru nemění, pak standardní nejistota typu A se nepočítá. Pro výpočet

standardní nejistoty typu B se předpokládá rovnoměrné rozdělení a jako interval Δx , v němž leží všechny hodnoty měřené veličiny, se bere hodnota Δ_u vypočítaná výše. Směrodatná odchylka se počítá ze vztahu

$$\sigma = \frac{\Delta x}{\sqrt{3}} = \frac{0,75}{\sqrt{3}} = 0,43 \text{ V} = u_B.$$

Protože $u_A = 0$, pak $u_B = u_C$

Jestliže budeme požadovat, aby pravděpodobnost toho, že v intervalu $X_M \pm U$ se nachází skutečná hodnota měřené veličiny, byla 95 %, pak rozšířenou nejistotu U vypočítáme ze vztahu

$$U = k \cdot u(E_X) = 1,65 \cdot 0,43 = 0,72 \text{ V}.$$

Výsledek měření je $(90,00 \pm 0,72) \text{ V}$; uvedená rozšířená nejistota měření je součinem standardní nejistoty měření a koeficientu rozšíření $k = 1,65$ což pro rovnoměrné rozdělení odpovídá pravděpodobnosti pokrytí 95 %.

Příklad 6 z kapitoly 1.3

Máme změřit ohmovou metodou velikost odporu R . Voltmetr je číslicový s chybou $\pm(0,3 \% + 2 \text{ dig})$, 3 a $\frac{1}{2}$ místným displejem a vnitřním odporem na všech rozsazích $10 \text{ M}\Omega$, ampérmetr je číslicový s chybou $\pm(1,2 \% + 3 \text{ dig})$, 3 a $\frac{1}{2}$ místným displejem a vnitřním odporem 8 mV/mA .

Naměřené hodnoty $U_V = 19,9 \text{ V}$, $I_A = 100 \text{ mA}$

Oprava na chybu metody se provede stejně, i když se budou počítat nejistoty měření.

- **Výpočet podle teorie chyb**

Odpor se použitou metodou měří nepřímě. Ve vztahu pro výpočet jsou naměřené veličiny v podílu. Podle pravidel pro nepřímá měření se v takovém případě sčítají relativní chyby údajů přístrojů.

$$\delta_{uV} = \pm 0,4 \%, \quad \delta_{uA} = \pm 1,5 \%$$

Celková chyba přístrojů při měření odporu je $\delta_{uR} = \pm(\delta_{uV} + \delta_{uA}) = \pm(0,4 + 1,5) = \pm 1,9 \%$.

Po převedení na absolutní chybu měřicích přístrojů dostaneme pásmo, v němž leží správná naměřená hodnota odporu $\Delta_{UR} = \pm \frac{\delta_{uR} \cdot R}{100} = \pm \frac{1,9 \cdot 199}{100} = \pm 3,8 \Omega \div \pm 4 \Omega$

Výsledek je $(199,0 \pm 3,8) \Omega$, nebo $(199 \pm 4) \Omega$.

• Výpočet podle teorie nejistot

I při tomto výpočtu můžeme použít zkrácený výpočet podle poučky, že jestliže ve vzorci výpočtu je násobek nebo podíl naměřených hodnot, pak se sčítají relativní nejistoty.

$$\delta_{uV} = \pm 0,4 \%, \quad \delta_{uA} = \pm 1,5 \%$$

$$u_U = \frac{\delta_{uV}}{\sqrt{3}} = \frac{0,4}{\sqrt{3}} = 0,23 \%, \quad u_I = \frac{\delta_{uA}}{\sqrt{3}} = \frac{1,5}{\sqrt{3}} = 0,87 \%$$

Na rozdíl od výpočtu podle teorie chyb se relativní nejistoty sčítají geometricky

$$u_R = \sqrt{u_U^2 + u_I^2} = \sqrt{0,23^2 + 0,87^2} = 0,9 \%$$

Rozšířená nejistota s koeficientem rozšíření 1,65 (rovnoměrné rozdělení) je

$$U_R = 1,48 \%, \text{ nebo } U_R = \pm \frac{1,48 \cdot 199}{100} = \pm 2,95 \Omega \div \pm 3 \Omega$$

Výsledek včetně rozšířené nejistoty s koeficientem rozšíření 1,65 (rovnoměrné rozdělení) je $(199 \pm 3) \Omega$.

Příklad

Číslicovým multimetrem změřte stejnosměrné napětí v obvodu. Přesnost na rozsahu 20 V je $\pm(0,05 + 0,015) \%$. Naměřené hodnoty napětí jsou:

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
U_i	14,987	14,979	14,995	14,981	15,019	15,021	15,016	15,008	14,982	15,018	15,005

Naměřená hodnota napětí se mění; i když se nemění ani parametry obvodu, ani hodnota napájecího napětí. Naměřenou hodnotu odhadneme jako aritmetický průměr $\bar{x}$ z provedených měření.

$$\bar{U} = \frac{\sum_{i=1}^n U_i}{n} = \frac{14,987 + 14,979 + 14,995 + 14,981 + 15,019 + 15,021 + 15,016 + 15,008 + 14,982 + 15,018 + 15,005}{11} = 15,001 V$$

Směrodatná odchylka představuje standardní nejistotu typu A.

Při výpočtu směrodatné odchylky nejdříve určíme odchylky jednotlivých naměřených hodnot od průměru (např. $U_1 - \bar{U} = 14,987 - 15,001 = -0,014 V$, atd.), a tyto odchylky dosadíme do vztahu

$$\sigma(\bar{U}) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (U_i - \bar{U})^2} = \sqrt{\frac{0,003}{110}} = 0,005 V = u_A$$

Tak jsme zjistili standardní nejistotu typu A.

Standardní nejistotu typu B zjistíme stejně, jako v předchozích příkladech.

Určení chyby údaje z přesnosti přístroje:

$$\Delta_U = \pm \frac{|\delta_1|X_M + |\delta_2|X_R}{100} = \pm \left(\frac{0,05 \cdot 15,001 + 0,015 \cdot 20}{100} \right) = \pm 0,011 \text{ V}$$

Výpočet standardní nejistoty typu B: $u_B = \frac{\Delta_U}{\sqrt{3}} = \frac{0,011}{\sqrt{3}} = 0,006 \text{ V}$

Kombinovaná standardní nejistota: $u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{0,005^2 + 0,006^2} = 0,008 \text{ V}$

Rozšířená nejistota: protože jsou hodnoty standardních nejistot typu A a B řádově shodné, uvažuje se, že výsledné rozložení je normální. Proto se koeficient rozšíření volí podle normálního rozdělení, tj. $k = 2$.

Výsledek měření je $(15,001 \pm 0,016) \text{ V}$, nebo lépe $(15,00 \pm 0,02) \text{ V}$; uvedená rozšířená nejistota měření je součinem standardní nejistoty měření a koeficientu rozšíření $k = 2$ což pro normální rozdělení odpovídá pravděpodobnosti pokrytí 95 %.



Shrnutí pojmů 1.4.

- Standardní nejistoty
- Kombinovaná standardní nejistota
- Rozšířená nejistota
- Normální rozdělení
- Rovnoměrné rozdělení
- Směrodatná odchylka



Otázky 1.4.

1.20 Co je to standardní nejistota

1.21 Co je to rozšířená nejistota

1.22 Jaký součet se používá při slučování nejistot při nepřímém měření

2. TYPY SIGNÁLŮ



Čas ke studiu: 1 hodina

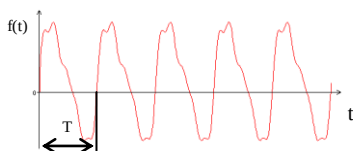


Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- popsat různé typy signálů
- vypočítat střední a efektivní hodnotu některých typů signálů
- změřit střední a efektivní hodnotu

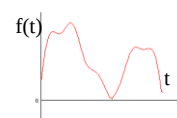
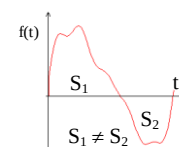


Výklad



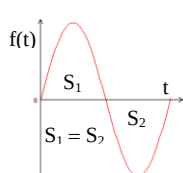
Periodický průběh je takový signál jehož okamžité hodnoty se po periodě opakuji.

Kmitavý periodický signál nabývá v části periody kladných hodnot a v části záporných. Plochy omezené křivkou nad časovou osou t a pod ní jsou různé.

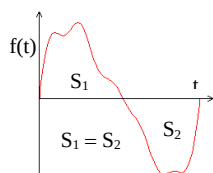


Pulsující (tepavý) periodický signál nabývá v celé periodě pouze kladných nebo záporných hodnot.

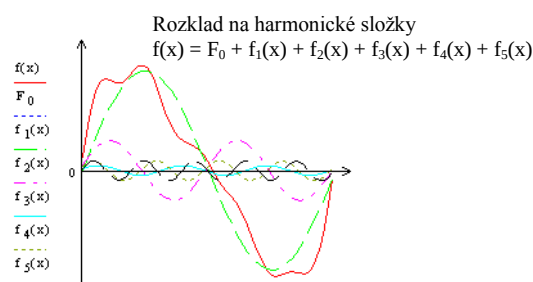
Střídavý průběh je definován jako periodický průběh, jehož plochy omezené křivkou nad časovou osou t a pod ní jsou stejné. Tvar může mít **harmonický** – sinusový, nebo **neharmonický** – ten se dá rozložit podle Fouriera na **součet harmonických složek**. Tyto složky mají frekvenci, která je celistvým násobkem základní harmonické.



harmonický průběh



neharmonický průběh



hodnot

Střídavý signál lze popsat průběhem okamžitých pro sinusový signál analytickým zápisem

$$x(t) = X_m \cdot \sin(\omega t + \varphi) \text{ nebo } x(t) = \sqrt{2} \cdot X_{ef} \cdot \sin(\omega t + \varphi),$$

pro nesinusový signál zápisem např. $x(t) = \sum_{i=1}^n \sqrt{2} \cdot X_{ef,i} \cdot \sin(i \cdot \omega t + \varphi_i),$

Kmitavý průběh lze popsat např. $x(t) = X_0 + X_m \cdot \sin(\omega t + \varphi)$

tzn. lze jej popsat střední (X_0), maximální (X_m) či efektivní (X_{ef}) hodnotou, frekvencí a fází (φ).

Střední hodnota představuje takovou stejnosměrnou hodnotu, o kterou se musí signál na svislé ose posunout, aby plochy omezené křivkou nad časovou osou t a pod ní byly shodné.

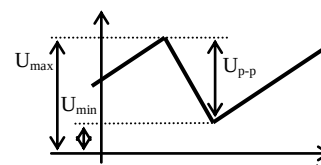
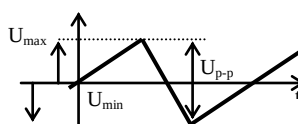
Matematické vyjádření je $X_s = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt$. Střední hodnotě se taky říká **stejnoseměrná složka**.

Protože střední hodnota střídavého průběhu je rovna nule, byla pro **střídavý signál** definovaná **střední aritmetická hodnota** $X_{SA} = \frac{1}{T} \int_0^T |x(t)| dt$. Je to vlastně střední hodnota z usměrněného signálu.

Efektivní hodnota představuje takovou stejnosměrnou hodnotu proudu, který má stejné tepelné účinky jako daný střídavý proud.

Matematické vyjádření je $X_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt}$.

Maximální hodnota je největší hodnota, které periodický signál dosahuje.



Maximální hodnota střídavého průběhu se označuje jako **amplituda**.

Napětí U_{p-p} je **rozkmít** (někdy se říká špička-špička, což vzniklo z anglického označení peak-peak).

Podílu maximální a efektivní hodnoty se říká **činitel výkyvu** ($k_v = \frac{U_{max}}{U_{ef}}$), je pro různé tvary signálů různý a pro sinusový průběh má hodnotu $\sqrt{2}$.

Podílu efektivní a střední aritmetické hodnoty se říká **činitel tvaru** ($k_t = \frac{X_{ef}}{X_{SA}}$), je pro různé tvary signálů různý a pro sinusový průběh má hodnotu $1,11 \left(\frac{\pi}{2\sqrt{2}} \right)$.

Podíl maximální a střední hodnoty pro sinusový průběh má hodnotu $1,57 \left(\frac{\pi}{2} \right)$.

Střídavé veličiny mění svou okamžitou hodnotu s časem. Pokud by ji měřicí přístroj sledoval, měnila by se neustále i jeho výchylka. Při měření je ovšem potřeba, aby se výchylka na nějaké hodnotě ustálila. Obvykle je touto hodnotou hodnota **efektivní**.



Když se podíváme na přepínač multimetru, kterým volíme měřenou veličinu, najdeme zde zkratky DC a AC. Co znamenají?

DC je odvozeno od slova *Direct*, a znamená to, že na tomto rozsahu budeme měřit stejnosměrné napětí (DCV) nebo proud (DCA), nebo také stejnosměrnou složku kmitavého průběhu.

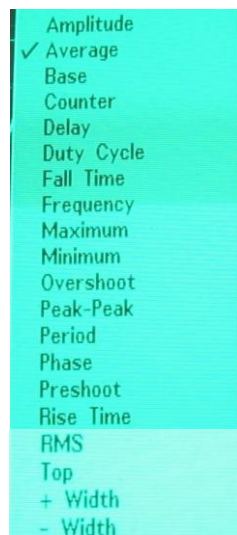
AC je odvozeno od slova *Alternate* a znamená to, že na tomto rozsahu budeme měřit efektivní hodnotu střídavého napětí (ACV) nebo proudu (ACA), nebo také efektivní hodnotu střídavé složky kmitavého průběhu.



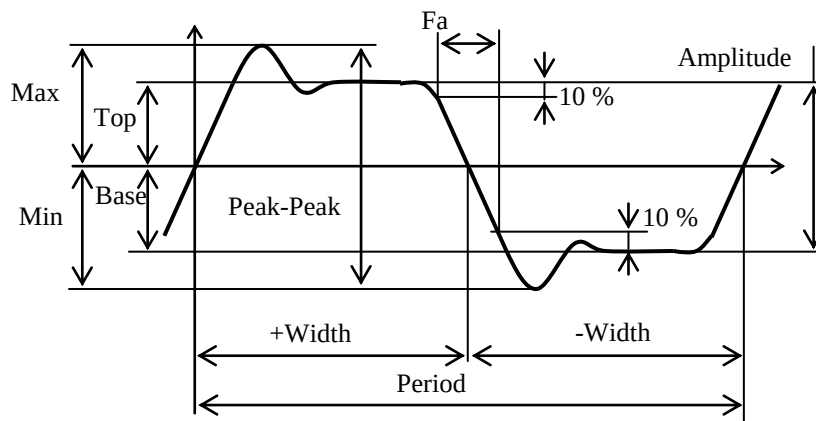
Tento typ měřicího přístroje nabízí ještě jednu možnost měření, označenou **AC+DC**. To znamená, že na tomto rozsahu budeme měřit efektivní hodnotu kmitavého průběhu, tzn. efektivní hodnotu stejnosměrné i střídavé složky.



Na tomto přístroji najdeme další, zatím neznámé, označení. Je to TRUE RMS. RMS je anglické označení efektivní hodnoty *Root Mean Square* - je to vlastně popis rovnice pro výpočet efektivní hodnoty. TRUE RMS je skutečná efektivní hodnota, což znamená efektivní hodnotu kmitavého průběhu.



U číslicových osciloskopů lze kromě střední hodnoty (*Average*) a efektivní hodnoty (*RMS*) změřit i další parametry signálu. Některé jsou znázorněny v obrázku.



Pozor! Zde pojem Amplitude znamená něco jiného než v českém textu!

U neharmonického signálu lze zjistit efektivní hodnotu celého signálu, nebo efektivní hodnoty jednotlivých harmonických. Efektivní hodnotu celého signálu lze zjistit analogovými nebo číslicovými měřicími přístroji, efektivní hodnoty jednotlivých harmonických se zjišťují kmitočtovými analyzátory.

Jiný způsob měření parametrů střídavého signálu představují měřicí přístroje využívající číslicové zpracování signálů. Ty mohou být vytvořeny tak, že na sběrnici počítače připojíme měřicí kartu, která obsahuje analogovo-digitální převodník. Sběr dat a jejich zpracování řídíme softwarem nainstalovaným na počítači. Takové přístroje signál navzorkují, vzorky převedou na binární číslo a uloží do paměti. Vznikne tak posloupnost číselných hodnot, popisující průběh signálu, která bude sloužit k výpočtu např. efektivních hodnot, k rozkladu na harmonické atd.

Příklad A.3

Činitel tvaru je podíl efektivní a střední aritmetické hodnoty. U průběhů, jejichž tvar lze popsat rovnicí, je možno hodnotu činitele tvaru vypočítat (sinusovka, obdélník, trojúhelník atp).

Pro sinusový průběh je střední aritmetická hodnota

$$U_{sa} = \frac{1}{T} \int_0^T |u(t)| dt = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} u(t) dt = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} U_m \sin(\omega t) dt = \frac{2U_m}{T} \cdot \frac{T}{2\pi} [-\cos \omega t]_0^{T/2} = \frac{2U_m}{T} \cdot \frac{T}{2\pi} \cdot 2 = \frac{2U_m}{\pi}$$

Efektivní hodnota

$$U_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U_m^2 \sin^2(\omega t) dt} = \sqrt{\frac{U_m^2}{2} \frac{1}{T} \int_0^T (1 - \cos 2\omega t) dt} = \sqrt{\frac{U_m^2}{2T} \left[t - \frac{1}{2\omega} \sin 2\omega t \right]_0^T} = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$$

Hodnota činitele tvaru pro sinusový průběh je

$$k_t = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,11$$

U zkreslených neharmonických průběhů, jejichž analytické vyjádření neznáme, činitel tvaru vypočítat neumíme.

**Shrnutí pojmů 2.**

- Periodický signál
- Střídavý signál
- Kmitavý signál
- Střední hodnota
- Efektivní hodnota
- Maximální hodnota

**Otázky 2.**

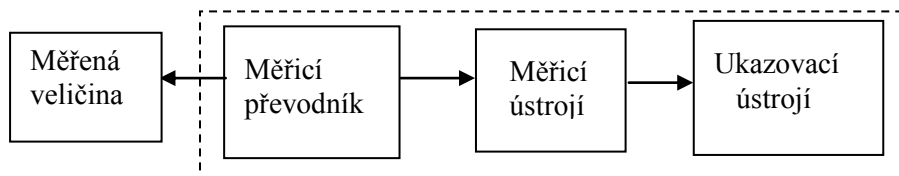
- 2.1 Z kolika harmonických je složen sinusový signál?
- 2.2 jak dostaneme z kmitavého periodického průběhu průběh střídavý

**Úlohy k řešení 2.**

- 2.3 Jakou frekvenci má signál $x(t) = 2 + 5 \cdot \sin(2\pi 200t)$?
- 2.4 Vypočítejte efektivní hodnotu střídavého obdélníkového signálu o amplitudě 2 V.
- 2.5 Nakreslete střídavý obdélníkový signál (ke změně polarity dochází v polovině periody – střída je 50%) o amplitudě 2 V se stejnosměrnou složkou 2 V a vypočítejte jeho efektivní hodnotu.

3. MĚŘICÍ PŘÍSTROJE

Měřicí přístroje jsou většinou tvořeny měřicím řetězcem, tj. posloupností funkčních prvků, v nichž se uskutečňuje přeměna měřené veličiny na veličinu indikovanou.



Všechny měřicí přístroje nemusí obsahovat všechny uvedené bloky.

3.1 Měřicí převodník



Čas ke studiu: 2 hodiny



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete

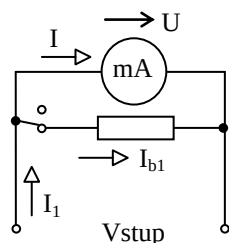
- vědět, jak se mění vnitřní odpor přístrojů se změnou rozsahu
- znát základní zapojení s operačním zesilovačem
- znát principy převodníků pro měření střídavých elektrických veličin
- umět používat měřicí transformátory



Výklad

Měřicí převodník u elektrických měřicích přístrojů může upravovat velikost měřené veličiny tak, aby ji měřicí ústrojí mohlo bez poškození a s dostatečnou přesností měřit, nebo může převádět jednu elektrickou veličinu na elektrickou veličinu jiného druhu.

Bočník snižuje citlivost ampérmetru, tj. zvětšuje jeho měřicí rozsah. Je to rezistor připojený paralelně k měřicímu ústrojí. Může být v měřicím přístroji zabudován, nebo je oddělený jako příslušenství k měřicímu přístroji.

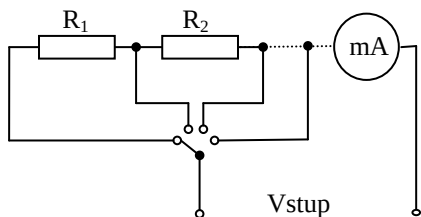


U magnetoelektrických ampérmetrů je základní rozsah dán rozsahem použitého miliampérmetru. Zvětšování rozsahu se děje paralelně připojováním odporů.

Např. základní rozsah $I = 10 \text{ mA}$. Při zvoleném vyšším rozsahu $I_1 = 100 \text{ mA}$, poteče bočnickem proud $I_{b1} = 90 \text{ mA}$. Při stále stejném úbytku napětí na vstupních svorkách bude odpor bočnicku 9 krát menší než odpor miliampérmetru. Proto se na vyšším rozsahu zmenší celkový vstupní odpor ampérmetru. Na přístrojích nebývá odpor ampérmetrů uváděn.

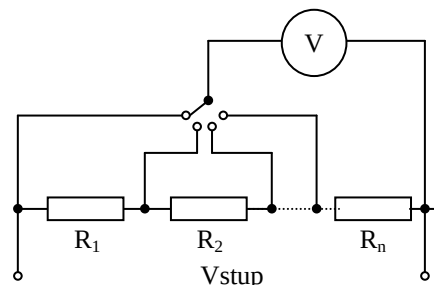
U číslicových multimetrů se musí měřený proud převést na napětí. Pokud se nepoužije převodník I/U , získá se napětí průchodem měřeného proudu známým odporem. Čím větší proud měřím, tím menší odpor je potřeba. V popisu přístroje se obvykle udává úbytek napětí na vstupu při zvoleném rozsahu. Z těchto údajů se pak vstupní odpor vypočítá.

Předřadník snižuje citlivost voltmetru, tj. zvětšuje jeho měřicí rozsah. Je to rezistor připojený do série k měřicímu ústrojí.



Takto bývá řešen vstup analogových voltmetrů. V zakreslené pozici přepínače lze připojit nejvyšší napětí, tj. je zařazen nejvyšší rozsah. Vstupní odpor se při změně rozsahu mění – čím větší měřené napětí, tím větší vstupní odpor. Vstupní odpor bývá udáván ve tvaru Ω/V . Např. voltmetr má zvolený rozsah 60 V, na číselníku je uveden vnitřní odpor 5 $k\Omega/V$. Vnitřní odpor na zvoleném rozsahu je tedy 300 $k\Omega$.

Takto bývá řešen vstup číslicových voltmetrů. V zakreslené pozici přepínače lze připojit nejmenší napětí, tj. je zařazen nejnižší rozsah. Vstupní odpor se při změně rozsahu nemění a bývá obvykle 10 $M\Omega$.



Zesilovač zesiluje malé hodnoty měřené veličiny. Obvykle je v něm použito měřicích operačních zesilovačů.

Operační zesilovač (OZ)

Je to stejnosměrný zesilovač provedený jako integrovaný obvod. Má dvě vstupní svorky. Jedna je označena znaménkem + a nazývá se neinvertující. Druhá je označena znaménkem - a nazývá se invertující. Napětí přivedené na neinvertující vstup vyvolá na výstupu napětí stejné polarity, napětí přivedené na invertující vstup vyvolá na výstupu napětí opačné polarity. Všechna vstupní a výstupní napětí jsou vztažena k zemní svorce, která je připojena na společnou zem dvou zdrojů souměrných napájecích napětí $\pm U_B$. Při zjednodušeném kreslení se zemní svorky a napájecí svorky obvykle vynechávají a kreslí se pouze oba vstupy a výstup.

Operační zesilovač je určen především pro provoz v uzavřené zpětnovazební smyčce. Zpětnovazební obvod může být sestaven z pasivních i aktivních součástek a obecně zajišťuje propojení zdroje signálu (U_1), operačního zesilovače a zátěže. Při použití ideálního operačního zesilovače jsou vlastnosti takto vzniklého měřicího zesilovače dány pouze vlastnostmi zpětnovazební smyčky.

Vlastnosti ideálního operačního zesilovače:

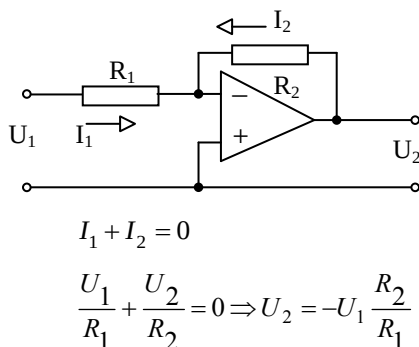
- nekonečné zesílení v celém kmitočtovém pásmu
- nekonečná vstupní impedance
- nulový výstupní odpor
- statická převodová charakteristika $U_2 = f(U_1)$ je přímka
- nulový rozdíl napětí mezi oběma vstupy

Skutečný operační zesilovač

- má statickou převodovou charakteristiku $U_2 = f(U_1)$ přímku pouze v rozmezí $\pm U_B$, tzn. výstupní napětí je omezeno maximálně hodnotou napájecího napětí.
- má vstupní klidový proud řádu 10^{-7} až 10^{-12} A.
- na rozdíl od ideálního operačního zesilovače není při nulovém vstupním napětí nulové výstupní napětí = vstupní napěťový offset (vstupní napěťová nesymetrie)

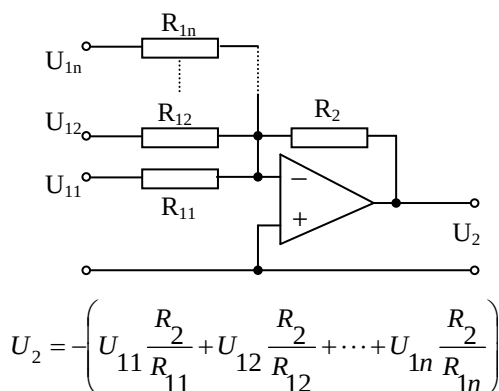
Invertující zesilovač

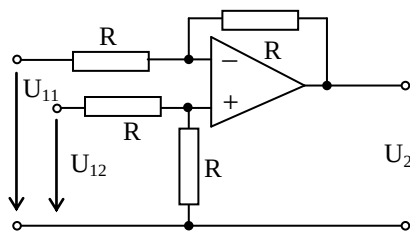
(lze použít jako převodník R na U)



vstupní odpor je roven R_1

Součtový zesilovač

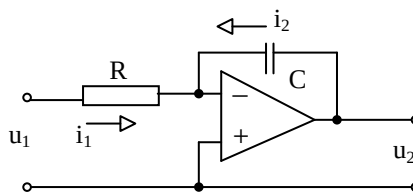


Rozdílový zesilovač (diferenciální zapojení OZ)

$$U_2 = U_{12} - U_{11}$$

Integrační zesilovač

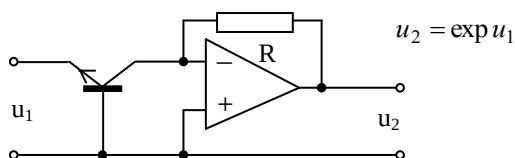
prohodíme-li R a C vznikne derivační zesilovač



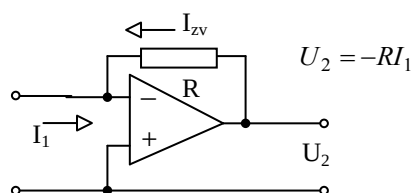
$$i_1 + i_2 = 0, \quad \frac{u_1}{R} + C \frac{du_2}{dt} = 0 \Rightarrow u_2 = -\frac{1}{RC} \int u_1 dt$$

Exponenciální zesilovač

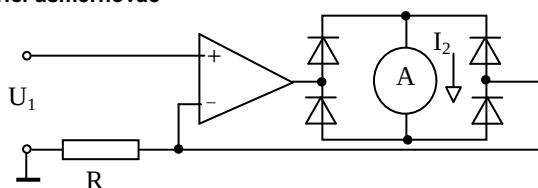
prohodíme-li R a tranzistor vznikne logaritmický zesilovač



$$u_2 = \exp u_1$$

Převodník proudu na napětí

$$U_2 = -RI_1$$

Měřicí usměrňovač

$$I_2 = \frac{U_1}{R}$$

obvod se chová jako zdroj proudu - usměrněný proud není závislý na nelinearitě diod

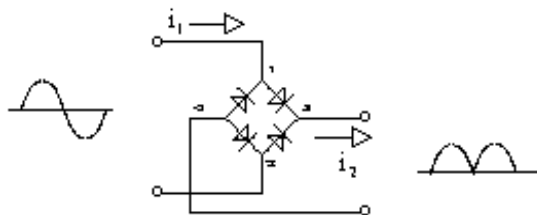
U číslicových multimetrů je základní měřenou veličinou elektrické napětí. Měření všech ostatních veličin, jejichž měření multimetr dovoluje, musí převodníky převést na měření napětí. Jsou zde tedy např. *převodníky proudu na napětí, odporu na napětí* atd.

3.1.1 Převodníky pro měření střídavých elektrických veličin**3.1.1.1 Převodník střídavých veličin na střední aritmetickou hodnotu**

Střední hodnota $X_S = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt$ střídavého signálu je rovna nule. Proto je pro střídavý signál

definována tzv. **střední aritmetická hodnota** $X_{SA} = \frac{1}{T} \int_0^T |x(t)| dt$, což je vlastně střední hodnota usměrněného signálu.

V analogových přístrojích se používají diodové usměrňovače. Nepotřebují napájení, ale nedovolují měřit malá napětí (nejmenší rozsah řádově volty a nerovnoměrná stupnice) a chyba převodu je řádově procenta.

Diodový usměrňovač

Teoreticky má proud i_2 na výstupu z můstkového usměrňovače pulzující průběh a každý z pulzů má přesně tvar původních půlperiod střídavého průběhu. Prakticky se na tvaru pulzů projeví nelinearita diod a úbytek napětí v otevřeném stavu. Diody začínají propouštět až při určitém prahovém napětí (0,6 V pro křemíkové usměrňovací diody) a závislost proudu na napětí není lineární. Ampérmetr připojený na proud i_2 pak nemá při měření malých proudů lineární stupnici a malá napětí pod 1 V nelze přístroji s tímto usměrňovačem měřit.

Protože proud má pulzující charakter, měla by se i hodnota na ampérmetru měnit. Pokud je ampérmetr analogový, ustálí se

ručička na střední hodnotě z usměrněného průběhu, což je tzv. střední aritmetická hodnota.

V číslicových přístrojích se používá usměrňovačů ve složitějších zapojeníích s operačním zesilovačem. Odstraní se tím vliv nelinearity a díky zesílení OZ lze měřit nižší napětí.

3.1.1.2 Převodník střídavých veličin na efektivní hodnotu

Efektivní hodnotu $X_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt}$ jakéhokoli průběhu zjišťují převodníky efektivní hodnoty. Starší analogové přístroje využívají fyzikální definice efektivní hodnoty a jako převodník používají termočlánek.

Fyzikální definice efektivní hodnoty

Efektivní hodnota střídavého proudu se rovná stejnosměrnému proudu, který má stejné tepelné účinky jako daný střídavý proud.

Termočlánek

Jestliže zahříváme spoj dvou materiálů o různém termoelektrickém potenciálu, naměříme na jejich koncích napětí úměrné vyvinuté teplotě. Takže pokud teplo produkuje vodič protékáný proudem, bude napětí úměrné efektivní hodnotě měřeného proudu.

Číslicové přístroje využívají matematické definice efektivní hodnoty a bývají označeny zkratkou RMS.

Výpočtové převodníky efektivní hodnoty

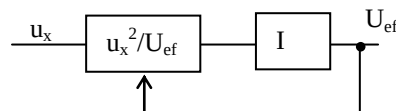
Jejich blokové schéma vychází z matematické definice: signál umocnit na druhou – integrovat – odmocnit (anglicky Root Mean Square – odtud zkratka RMS).

Mocnina a odmocnina vnášejí do převodu největší chybu.

Abychom se vyhnuli odmocnině, lze matematický vztah upravit následovně:

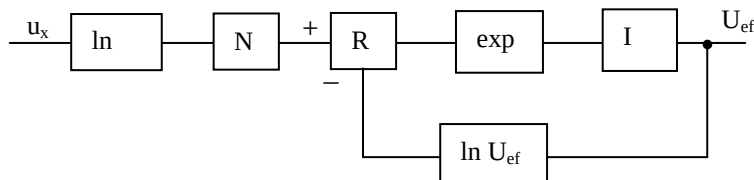
$$X_{ef}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt \Rightarrow X_{ef} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{x^2(t)}{X_{ef}} dt$$

Tomu odpovídá zavedení zpětné vazby



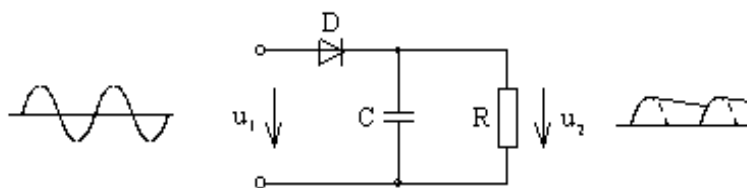
Další úprava vychází z této myšlenky: $\frac{a^2}{b} = \exp(2 \ln a - \ln b)$

N – násobení dvěma
R – rozdíl
I – integrál

**3.1.1.3 Převodník střídavých veličin na maximální hodnotu**

Nejjednodušší převodník pro měření **maximální hodnoty** je usměrňovač s kondenzátorem. Ten se nabije na maximální hodnotu harmonických i neharmonických průběhů.

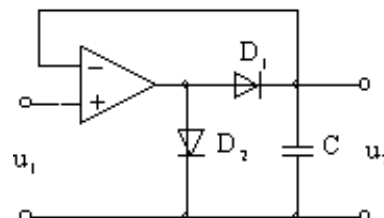
Pro měření maximální hodnoty měřeného průběhu se používá převodník pro měření maximální hodnoty ve spojení se stejnosměrným měřicím přístrojem (analogovým nebo číslicovým).



naměřená hodnota rovná $U_{nam} = U_0 + U_m$.

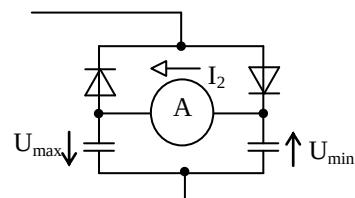
Tento převodník měří maximální hodnotu (amplitudu) harmonických i neharmonických průběhů. Obsahuje-li signál kladnou stejnosměrnou složku, zvětší či zmenší se výstupní napětí o tuto hodnotu podle polarity diody a vstupního napětí (takže pro signál definovaný jako $u(t) = U_0 + U_m \sin \omega t$ bude

Protože nedokonalým nabíjením kondenzátoru (dioda není ideální - je na ní i v otevřeném stavu úbytek napětí) a jeho vybíjením v intervalech mezi nabíjecími impulsy vzniká chyba, je vhodnější použít např. zpětnovazebních převodníků.



Sériový dvoucestný usměrňovač s kondenzátory měří rozkmit střídavé složky měřeného signálu.

Pokud však budeme měřit průběhy impulsní (tzn. krátký impuls s dlouhou periodou), pak budeme muset použít převodníků složitějších, nebo číslicových přístrojů s pamětí, nebo osciloskopů.



Kromě měření ve vysokofrekvenční technice je nejpožadovanější vyjádření střídavé veličiny pomocí efektivní hodnoty.

3.1.2 Měřicí transformátor

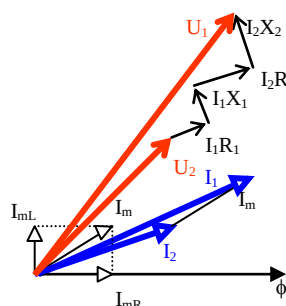
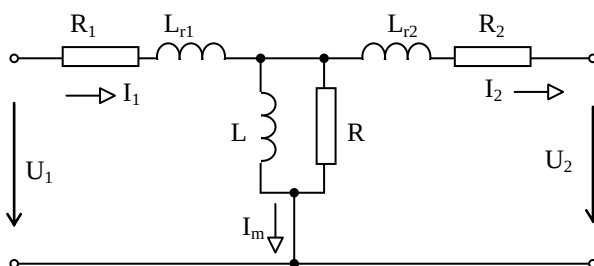
To je měřicí převodník, který není součástí měřicích přístrojů.

- Slouží ke změně velikosti měřeného napětí nebo proudu.
- Galvanicky odděluje primární (měřený) a sekundární (měřicí) obvod.

Měřicí transformátory (MT)

Podíl primárního proudu (napětí) k sekundárnímu se nazývá jmenovitý převod p a bývá udán zlomkem – např. 100/5 A znamená, že proud 100 A je snižován na 5 A.

Následující fázorový diagram je kreslen pro převod 1/1. Pak by se měly rovnat proudy $I_1 = I_2$ a měly by být ve fázi, stejně jako napětí $U_1 = U_2$ a . U skutečného transformátoru dochází k ztrátám v magnetizačním okruhu a k úbytkům napětí na odporech vinutí a na rozptylových indukčnostech reaktancí obou vinutí. Z toho vyplývá, že MT způsobují chybu převodu a chybu fáze.



3.1.2.1 Měřicí transformátory napětí (MTU)

Výhodou proti předřadníkům je velmi malá spotřeba.

- Obvyklá hodnota sekundárního napětí je 100 V.
- MTU způsobují chybu převodu. Ta se udává třídou přesnosti; podle normy ČSN jsou pro MTU určeny TP 0,2 – 0,5 – 1 – 3. Tyto hodnoty platí pro jmenovitý kmitočet sítě a pro MTU musí vyhovovat v rozmezí 50 – 120% jmenovitého napětí.
- MTU způsobují chybu fáze. S tou musíme počítat v případě, že přes MT měříme výkony, účinniky atp.
- MTU se vzhledem k malým impedancím vinutí chová jako zdroj napětí. Při zkratu na sekundárních svorkách může dojít ke zničení MT velkými zkratovými proudy. Proto **mají MTU pracovat blízko stavu naprázdno** – v sekundáru je připojen velký odpor.
- Tam, kde záleží na polaritě napětí (měření wattmetry, elektroměry, fázoměry), je třeba dbát na označení svorek. Napětí jde od svorky M ke svorce N; v případě měření napětí proti uzemněnému uzlu sítě od M k 0.
- MT nelze použít tam, kde by docházelo k magnetování jádra stejnosměrnou složkou průběhu.

3.1.2.2 Měřicí transformátory proudu (MTI)

Z fázorového diagramu opět vyplývá, že MTI způsobují

- chybu převodu
- chybu fáze.

Chyba fáze opět vadí pouze při měření wattmetry, elektroměry, fázoměry.

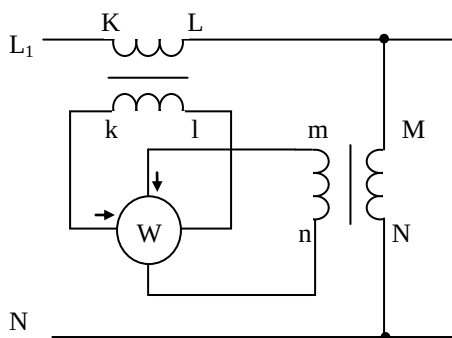
Prim. proud V % I _{1n}	Třídy přesnosti měřicích transformátorů proudu									
	0,1		0,2		0,5		1		3	
	Dovolené chyby proudu δ _i a úhlu δ _φ									
	δ _i	δ _φ	δ _i	δ _φ	δ _i	δ _φ	δ _i	δ _φ	δ _i	δ _φ
	%	min	%	min	%	min	%	min	%	min
10	0,25	10	0,5	20	1	60	2	120		
20	0,2	8	0,35	15	0,75	45	1,5	90		
100	0,1	5	0,2	10	0,5	30	1	60	3	
120	0,1	5	0,2	10	0,5	30	1	60	3	

Většinou je známo, na jaké primární napětí bude MTU připojeno. Naopak pro MTI nemusí být transformovaný proud konstantní. Se snižujícím se proudem roste chyba údaje transformátoru podle vedle uvedené tabulky:

Dále je na MT uvedeno číslo s rozměrem VA. Toto číslo představuje tzv. břemeno MT, t.j. hodnotu zdánlivého výkonu odebraného ze sekundáru, při němž ještě platí uvedená přesnost transformátoru. Např. pokud v obvodu sekundárního vinutí MTP je zapojen ampérmetr a proudová cívka wattmetru, pak musí platit $(R_A + R_{W1}) \cdot I_2^2 < S$.

- Výkon MTI (břemeno) se pohybuje od jednotek do desítek VA.
- Obvyklá hodnota sekundárního proudu je 5 A.
- Při měření MTI se **nesmí rozpojit sekundární obvod**, dokud primárním vinutím prochází proud. Při rozpojení je jádro magnetováno primárním proudem do nasycení. Magnetická indukce pak má téměř obdélníkový průběh a indukované napětí dosahuje vysokých špičkových hodnot. Může dojít k průrazu izolace mezi primárním a sekundárním vinutím nebo k úrazu elektrickým proudem. Proto jsou MTI opatřeny na sekundární straně **zkratovacím zařízením**.
- Tam, kde záleží na směru proudu (měření wattmetry, elektroměry, fázoměry), je třeba dbát na označení svorek. Proud jde od svorky K ke svorce L.
- MT nelze použít tam, kde by docházelo k magnetování jádra stejnosměrnou složkou průběhu.
- Při použití laboratorních MTI je nutno obvod s transformovaným proudem rozpojit a MTI vložit. Provozní MTI mohou být v provedení s děleným jádrem, či průvlekové, tzn. obvod s transformovaným proudem není nutno rozpojovat.

Zapojení wattmetru s proudovým a napět'ovým transformátorem.



Shrnutí pojmů 3.1.

- Bočník
- Předřadník
- Měřicí převodníky pro měření střední, efektivní a maximální hodnoty
- Měřicí transformátory



Otázky 3.1.

- 3.1 Jaké chyby může způsobit měřicí transformátor napětí
- 3.2 S jakými chybami měřicího transformátoru proudu musíme počítat při zapojení ampérmetru na sekundární vinutí MTI
- 3.3 Jak jsou označeny svorky měřicího transformátoru napětí
- 3.4 Jaké zatížení měřicího transformátoru proudu je ideální
- 3.5 Voltmetr má zvolený rozsah 60 V, měří hodnotu 48 V, na číselníku je uveden vnitřní odpor 5 k Ω /V. Jaký je vnitřní odpor na zvoleném rozsahu
- 3.6 Při zvětšení rozsahu ampérmetru bočníkem vnitřní odpor ampérmetru vzroste nebo poklesne?
- 3.7 Jaké chyby způsobují diody v převodnicích střední nebo maximální hodnoty
- 3.8 Co je hlavním blokem převodníku střídavého průběhu na střední aritmetickou hodnotu
- 3.9 Jaký převodník střídavého průběhu na efektivní hodnotu používají přístroje, označené RMS



Úlohy k řešení 3.1.

- 3.10 Nakreslete zapojení wattmetru s měřicím transformátorem proudu

3.2 Měřicí ústrojí

Měřicí ústrojí je systém, který převádí měřenou veličinu na údaj na ukazovacím ústrojí. Tuto část měřicího řetězce musí obsahovat každý měřicí přístroj.

Základní rozdělení měřicích ústrojí je na analogové a číslicové.

Analogové měřicí ústrojí poskytuje výstupní signál nebo údaj, který je spojitou funkcí měřené veličiny.

Číslicové měřicí ústrojí poskytuje výstupní signál nebo údaj v číslicovém tvaru, který se mění pouze po skocích, tedy je nespojitou funkcí měřené veličiny.

Potom elektrické měřicí přístroje, které obsahují analogové měřicí ústrojí, se označují jako analogové měřicí přístroje, ale i jako **elektronické měřicí přístroje**. To v případě, že obsahují nějaké přídavné elektronické obvody.

Číslicové měřicí přístroje pak využívají číslicové měřicí ústrojí a jsou dnes nejčastěji používanými měřicími přístroji.

3.2.1 Analogové měřicí přístroje



Čas ke studiu: 2 hodiny



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete vědět, k jakému měření se hodí přístroje

- magnetoelektrické
- elektromagnetické
- elektrodynamické
- analogový osciloskop



Výklad

Analogové měřicí přístroje (AMP) poskytují výstupní signál nebo údaj, který je spojitou funkcí měřené veličiny.

Základní částí analogových měřicích přístrojů jsou analogová měřicí ústrojí. Ty dávají těmto měřicím přístrojům jejich specifické vlastnosti.

Analogové měřicí ústrojí převádí měřenou elektrickou veličinu na mechanický pohyb ukazovacího ústrojí.

Podle způsobu převodu se jednotlivá ústrojí AMP nazývají

- magnetoelektrické
- elektromagnetické
- elektrodynamické
- indukční

Pokud měřicí převodníky obsahují elektronické obvody, pak se takovým měřicím přístrojům může říkat **elektronické**. Stále je však jejich výchylka spojitou funkcí měřené veličiny.

3.2.1.1 Magnetoelektrické ústrojí.

Výchylka přístroje je přímo úměrná protékajícímu proudu a reaguje i na změnu jeho polarity. Může tedy měřit pouze stejnosměrné signály, nebo stejnosměrnou složku signálu.

Ampérmetry s tímto ústrojím mohou měřit stejnosměrné proudy od μA do desítek A. S odděleným bočníkem (mimo vlastní přístroj) až do kA.

S rostoucím rozsahem klesá vnitřní odpor přístroje (u mikroampérmetrů může být až $\text{k}\Omega$, u ampérmetrů $\text{m}\Omega$).

Voltmetry mohou měřit stejnosměrná napětí od mV do 1000 V. S odděleným předradníkem až do desítek kV.

Vnitřní odpor přístroje se obvykle udává ve tvaru $\dots \Omega/\text{V}$.

Stejnoseměrné přístroje lze vyrobit i v nejvyšší třídě přesnosti. Pouze mikroampérmetry mají nejlepší třídu 1.

Samotné magnetoelektrické ústrojí neumí měřit střídavé elektrické veličiny. Musíme je proto doplnit měřicími převodníky. Nejčastěji se používá můstkových usměrňovačů.

Další často používaný převodník je termoelektrický článek. Takový přístroj pak měří tzv. pravou efektivní hodnotu – TRMS. Má nevýhody tepelných převodníků – velká setrvačnost, snadná přetížitelnost. Frekvenční rozsah takových přístrojů je velký – stovky kHz.

Přesnost střídavých přístrojů je obecně menší než stejnosměrných, protože ji zhoršuje přidaný obvod měřicího převodníku.

Značka přístroje s usměrňovačem je  značka přístroje s termočlánkem je 

Galvanoměr je velmi citlivý magnetoelektrický přístroj na měření malých proudů a napětí (asi 10^{-8} A, 10^{-6} V), hlavně používaný jako nulový indikátor k stejnosměrným můstkům a kompenzátorům a k různým speciálním měřením.

Magnetoelektrické ústrojí



- 1 – magneticky měkký materiál
- 2 – magnet
- 3 – cívka
- 4 – ručička
- 5 – uchycení cívky (vlákno nebo hroty v ložisku)

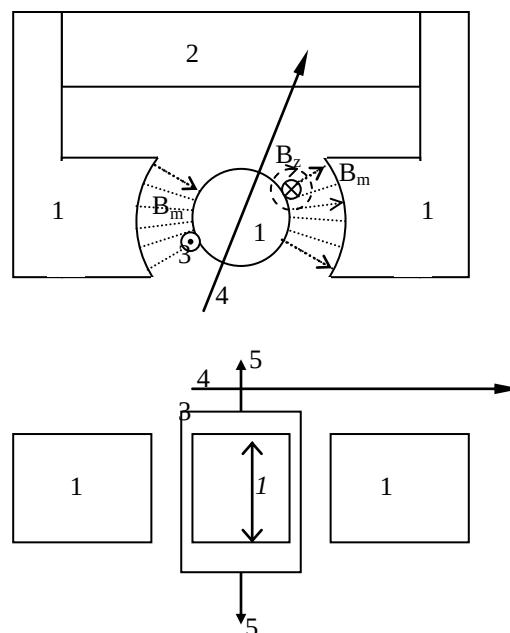
B_m – indukce ve vzduchové mezeře vyvolaná magnetem
 B_z – indukce vyvolaná proudem protékajícím cívkou
 l – délka závitů, ležící v magnetickém poli

Na přímý vodič kolmý ke směru vektoru magnetické indukce B působí síla $F = B I l$

Jeden závit na jedné straně otočné cívky je tento vodič. Cívka jich má N na dvou stranách. Poloměr cívky představuje rameno na němž tyto síly působí. Pak pohybový moment vyvolaný protékajícím proudem je

$$M_p = 2 B I r N l = k I$$

Výchylka ručičky je tedy úměrná velikosti i polaritě měřeného proudu.



3.2.1.2 Elektromagnetické ústrojí

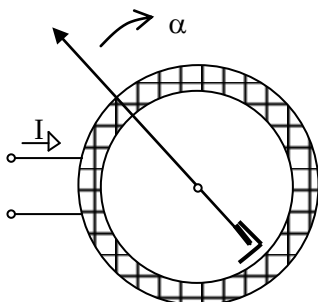
Elektromagnetický měřicí přístroj je použitelný k měření stejnosměrných i střídavých veličin.

Pokud měří střídavý proud nebo napětí, pak je výchylka úměrná efektivní hodnotě měřeného napětí. Stupnice je pak kvadratická. Dají se vyrobit ve třídě přesnosti 1, u laboratorních přístrojů až 0,1; mají větší spotřebu než magnetoelektrické přístroje a kmitočtový rozsah do 100Hz, u laboratorních přístrojů do 500Hz.

Elektromagnetický systém



Pracuje na principu vtahování feromagnetického tělíska do cívky, kterou prochází elektrický proud, nebo na odpuzování dvou souhlasně magnetovaných feromagnetických plíšků v magnetickém poli cívky, jak je znázorněno na obrázku. Elektromagnetický měřicí přístroj je použitelný k měření stejnosměrných i střídavých veličin.



Moment působící pohyblivý plíšek je úměrný energii elektromagnetického pole
 $M_p \sim W_m = 1/2 L I^2$ (L je indukčnost cívky), takže výchylka je úměrná kvadrátu proudu
 $\alpha \sim I^2$.

Při měření periodického signálu se výchylka ustálí na střední hodnotě kvadrátu proudu

$$\alpha \sim \frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt, \text{ tedy na efektivní hodnotě včetně případné stejnosměrné složky.}$$

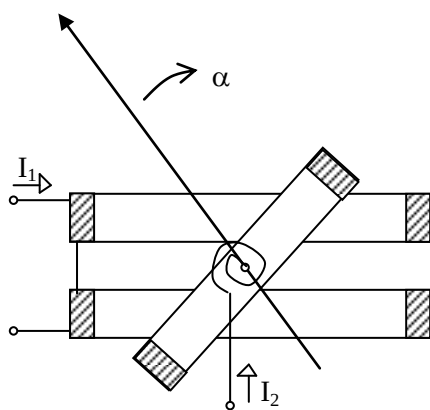
3.2.1.3 Elektrodynamické ústrojí

Elektrodynamický měřicí přístroj je použitelný k měření stejnosměrných i střídavých veličin.

Pokud měří střídavý proud nebo napětí, pak je výchylka úměrná efektivní hodnotě měřeného napětí. Stupnice je pak kvadratická. Dají se vyrobit ve třídě přesnosti 0,2; mají větší spotřebu než magnetoelektrické přístroje a kmitočtový rozsah maximálně do 1kHz.

Elektrodynamické ústrojí se jako jediné analogové ústrojí dá použít pro stavbu wattmetrů a to je také jeho nejčastější použití.

Elektrodynamické ústrojí poměrové se používá k měření účinníku.



počátek stupnice zůstává potlačen. Dají se vyrobit ve třídě přesnosti 0,2; mají větší spotřebu než magnetoelektrické přístroje a kmitočtový rozsah do 1kHz.

Elektrodynamické ústrojí



Funguje na principu vzájemného působení pevné a otočné cívky, jimiž prochází elektrický proud

Elektrodynamický měřicí přístroj je použitelný k měření stejnosměrných i střídavých veličin.

Moment působící na otočnou cívku je úměrný energii elektromagnetického pole $M_p \sim W_m = 1/2 M I_1 I_2$ (M je vzájemná indukčnost cívek), takže výchylka např. ampérmetru je úměrná kvadrátu proudu $\alpha \sim I^2$.

Při měření periodického signálu se výchylka ustálí na střední hodnotě

kvadrátu proudu $\alpha \sim \frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt$, tedy na efektivní hodnotě včetně

případné stejnosměrné složky.

Stupnice je pak přibližně kvadratická. Dá se linearizovat tvarem cívek, ale

Elektrodynamické ústrojí se jako jediné analogové ústrojí dá použít pro stavbu wattmetrů. Pevnou cívkou pak protéká proud zátěže (proudová cívka), pohyblivou cívkou pak protéká přes předřadník R_p proud úměrný napětí na zátěži (napěťová cívka). Výchylka je pak při stejnosměrném napájení zátěže úměrná $\alpha \sim U I$ a závisí i na polaritě napětí a proudu. Proto je na wattmetru označen začátek proudové i napěťové cívky.

V případě střídavého napájení zátěže se výchylka ustálí na střední hodnotě součinu okamžitých hodnot

napětí a proudu $\alpha \sim \frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t) dt = U_{ef} I_{ef} \cos \varphi$, což je činný výkon. I zde závisí polarita výchylky na

směru proudu a napětí.

U většiny wattmetrů je možno měnit proudové i napěťové rozsahy. Stupnice je proto cejchovaná v dílcích. Plnému počtu dílků odpovídá součin jmenovitého napětí (hodnota zvoleného napěťového rozsahu), jmenovitého proudu a účinníku. Při úhlu mezi napětím a proudem blízkému se 90° ($\cos \varphi = 0$) je potom výchylka wattmetru malá a svádí ke snížení napěťového nebo proudového rozsahu. Proto se v obvodech s neznámým proudem a napětím zapojuje spolu s wattmetrem i ampérmetr a voltmetr, aby rozsahy byly zvoleny správně a nedošlo k přetížení wattmetru.

Většina wattmetrů je cejchována pro účinník roven jedné a pak se tato hodnota na wattmetru neuvádí. U speciálních wattmetrů s účinníkem různým od jedné (např. 0,1) je jeho hodnota na číselníku uvedena.

Pokud má ústrojí dvě pohyblivé cívky posunuté o určitý úhel, pak se mu říká poměrový a pracuje na základě rovnosti dvou pohybových momentů. Nemá tedy řídicí moment, a když přístroj neměří, otočná část se zastaví v libovolné poloze. Na tomto principu pracuje **měřič účinníku**. Výchylka přístroje je úměrná fázovému posunu mezi napětím na zátěži a proudem, který jí protéká. Na stupnici čteme přímo účinník, tedy cosinus tohoto úhlu.

Značka elektrodynamického přístroje s ústrojím chráněným proti vnějším rušivým vlivům (ústrojí je astatizováno) vypadá takto  značka ferodynamického přístroje je 

Značka poměrového přístroje je  .

3.2.1.4 Indukční ústrojí

Tohoto ústrojí se využívá výhradně pro *elektroměry*. Pohybový moment je přímo úměrný měřenému výkonu a brzdicí moment je úměrný rychlosti kotoučku. Počet otáček kotouče zaznamenaný počítacím strojkem udává energii spotřebovanou v obvodu připojenému k síti přes elektroměr.



Shrnutí pojmů 3.2.1.

- Magnetoelektrické ústrojí
- Magnetoelektrické přístroje s usměrňovačem
- Magnetoelektrické přístroje s termočlánkem
- Elektromagnetické přístroje
- Elektrodynamické přístroje
- Wattmetry
- Měřiče účinníku



Otázky 3.2.1.

- 3.11 Jaké ústrojí musí mít přístroj, který má měřit stejnosměrnou složku kmitavého průběhu
- 3.12 Který analogový systém změří skutečnou efektivní hodnotu kmitavého průběhu
- 3.13 Který analogový systém se používá pro měření výkonu

3.2.2 Analogový osciloskop

Osciloskop je elektronický měřicí přístroj, umožňující sledovat na stínítku obrazovky časový průběh napětí nebo závislost jednoho napětí na druhém. (V případě zobrazení průběhu proudu jej musíte převést na napětí).

Analogový osciloskop zobrazuje plynule a okamžitě proměnnou analogovou veličinu. Naměřené křivky neumí uložit ve tvaru vhodném pro další zpracování.

Obrazovka analogového osciloskopu je elektronka, generující paprsek elektronů, který je vychylován ve vertikálním i horizontálním směru napětími přivedenými na vertikální (Y) a horizontální (X) vychylovací elektrody obrazovky.

Osciloskop má dva základní vstupy – vertikální vstup Y a horizontální vstup X.

Při zobrazování časového průběhu napětí se využívá pouze vstupu Y, na nějž se měřený signál přivádí. Po zpracování v tzv. vertikálním kanále, který provádí úpravu signálu (například jej zesílí), se signál dostane na vertikální vychylovací elektrody obrazovky.

Abychom získali časový průběh napětí na stínítku obrazovky, musíme paprskem dopadajícím na stínítko pohybovat rovnoměrně zleva doprava, a to současně s vychylováním vertikálním směrem, vyvolaným měřeným napětím. Rovnoměrný pohyb paprsku zleva doprava zajišťuje pilovité napětí generované časovou základnou a přiváděné na horizontální vychylovací destičky. Nulové napětí pilovitého průběhu odpovídá pozici paprsku na levé straně obrazovky, maximální hodnota pily pozici paprsku na pravé straně obrazovky. Po dosažení pravé strany obrazovky se paprsek okamžitě vrací na levou stranu (napětí pily rychle klesá k nule) a nesmí být při tom vidět.

Aby byl obraz stabilní, je časová základna opakovaně spouštěna spouštěcím obvodem. V případě vnitřního spouštění je spouštěcí pulz vyslán vždy, když zobrazovaný signál dosáhne nastavené spouštěcí úrovně.

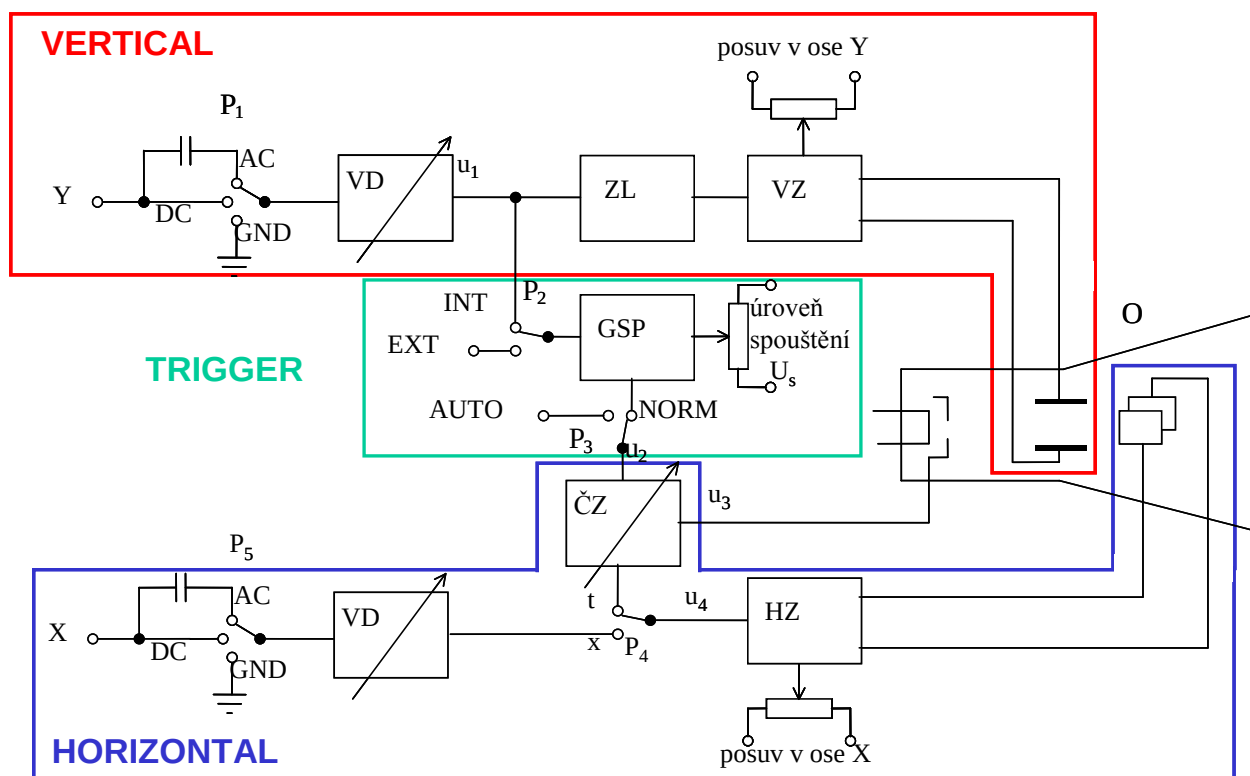
Jestliže se od horizontálních destiček odpojí napětí z časové základny a připojí napětí přivedené na vstup X, vychyluje se paprsek v závislosti na tomto napětí a na napětí na vstupu Y. Pak je osciloskop v tzv. XY režimu. Můžeme pak vidět například tzv. Lissajousovy obrazce (na vstupy se přivádí napětí s různou frekvencí, nebo se stejnou frekvencí a různým fázovým posunem), nebo A-V charakteristiky elektronických prvků (na vstup Y se přivádí napětí úměrné proudu prvkem a na vstup X se přivádí napětí na prvku).

3.2.2.1 Vícekanálový osciloskop

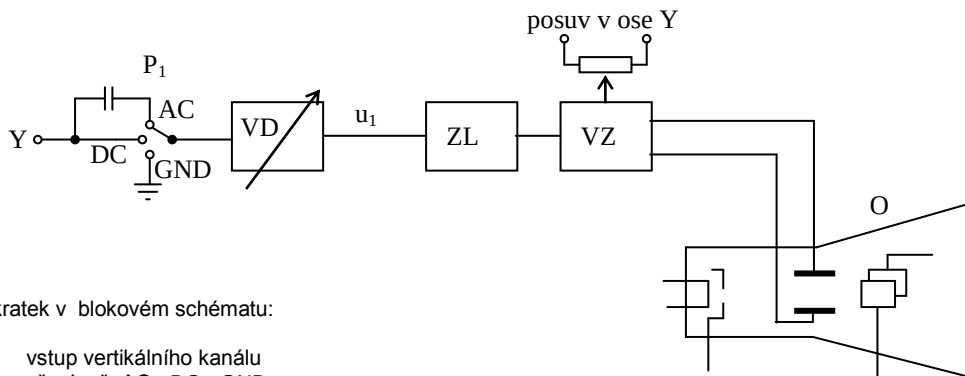
Pro současné zobrazení několika průběhů (obvykle dvou, někdy i čtyř) se používají vícekanálové osciloskopy. Jsou osazeny obvyklou obrazovkou s jedním svislým i vodorovným systémem, tzn. jeden svazek elektronů musí vykreslit několik průběhů na sobě nezávislých. Podle frekvence zobrazovaných signálů volí buď přístroj sám nebo jeho obsluha způsob přepínání mezi jednotlivými kanály. Díky nedokonalosti oka a dosvitu obrazovky vidíme dvě nebo více téměř dokonalých stop.

Jak už bylo řečeno, jednocanálový analogový osciloskop zobrazuje plynule a okamžitě proměnnou analogovou veličinu. Tato plynulost a okamžitost se u vícekanálových osciloskopů ztrácí. Při prvním způsobu přepínání (režim „chop“) paprsek střídavě vykresluje krátké úseky více signálů a ztrácí se plynulost. V druhém režimu přepínání (režim „alternate“) se zobrazuje signál jednoho vertikálního signálu po dobu celého jednoho cyklu časové základny a signál druhého kanálu po dobu následujícího celého cyklu. Oko pozorovatele vidí oba průběhy současně, i když se ztratila okamžitost.

Analogový osciloskop



Vertikální kanál



Význam zkratk v blokovém schématu:

Y - vstup vertikálního kanálu

P1 - přepínač AC - DC - GND

v poloze AC zobrazí střídavý signál bez stejnosměrné složky (používá se při zobrazování malých periodických signálů s velkou stejnosměrnou složkou; jinak může kondenzátor na vstupu zobrazovaný signál zkreslit).

v poloze DC zobrazí periodický signál včetně stejnosměrné složky nebo stejnosměrný signál

v poloze GND spojí vstup s nulou (pro nastavení časové osy na obrazovce)

VD - vstupní dělič a předzesilovač

umožňuje měnit citlivost po stupních a přitom zachovávat stejný vstupní odpor. Ovládací prvek označen Volt/dílek a má skokovou změnu (obvykle 1:2:5) a plynulou změnu. Pokud chceme z obrazovky přímo odečítat amplitudu signálu, musí být prvek pro plynulou změnu v poloze "kalibrováno".

ZL - zpožďovací linka

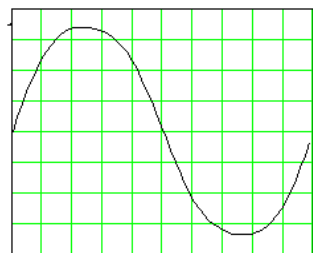
zaručuje zobrazení sejmутého signálu od spouštěcí úrovně

VZ - vertikální zesilovač

dodatečně zesiluje vstupní signál na hodnotu dostatečnou pro vychýlení paprsku na obrazovce a nastavením výstupního napětí zesilovače pro nulový vstupní signál umožňuje posuv v ose Y - nastavení polohy stopy na obrazovce při nulovém signálu.

O - obrazovka

s ovládáním obrazovky souvisí dva ovládací prvky na panelu osciloskopu. Především je to prvek "jas", umožňující regulovat energii dopadajícího elektronového paprsku na stínítko a tím intenzitu svícení stopy. Dále je to prvek "bod" (případně "fokus"), tedy zaostření (tloušťka čáry).



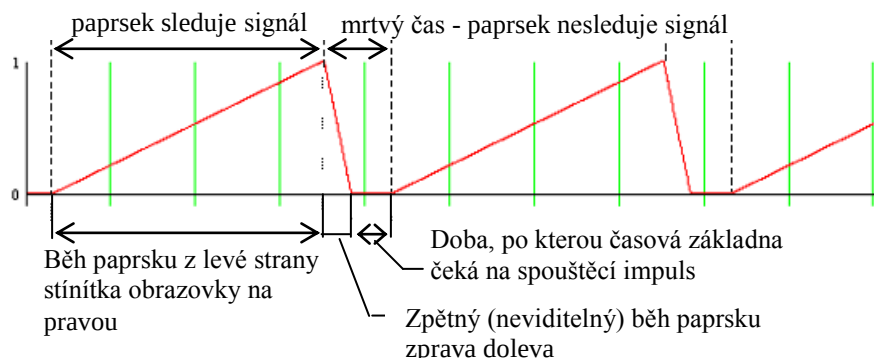
Po spuštění osciloskopu si bez připojeného signálu nastavte stopu nejlépe do poloviny svislé osy; to bude místo nulového napětí. Totéž lze provést s připojeným signálem přepnutím přepínače AC – DC – GND do polohy GND.

Z přepínače citlivosti V/d (kde d je dílek – strana čtverečku v rastru, cca 1 cm) zjistíte aktuální nastavení; např. 2 V/d. Pak zde zobrazený signál má amplitudu asi 6,8 V.

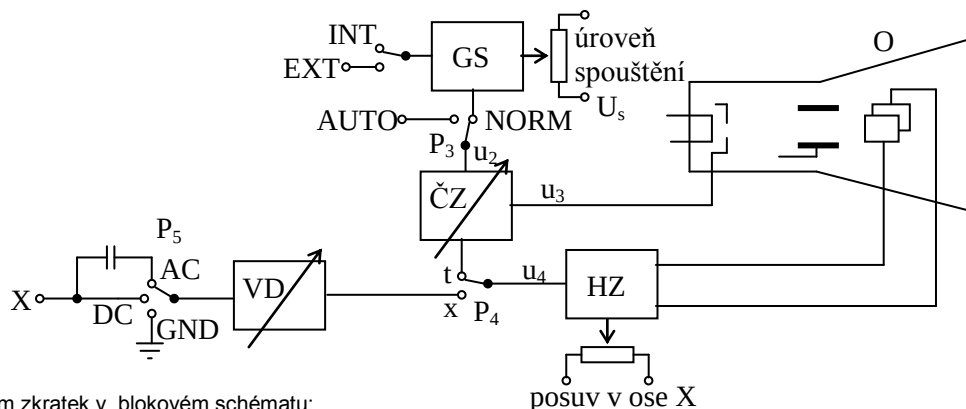
Z přepínače časové základny s/d zjistíte aktuální nastavení; např. 2 ms/d. Pak zde zobrazený signál má periodu 20 ms.

Časová základna

Obvod časové základny dodává přes horizontální zesilovač (HZ) přesný trojúhelníkový signál (linearita náběžné hrany trojúhelníka odpovídá za nezkreslené zobrazení signálu). Při běhu paprsku zleva doprava po obrazovce se kreslí sejmутý signál. Zpětný běh paprsku zprava doleva nesmí být vidět. Pak následuje čekací doba po kterou časová základna čeká na spouštěcí impuls; bývá označována jako hold - off time. Časová základna bývá vybavena režimem LUPA, násobícím nastavenou hodnotu časové základny. Časová základna musí rovněž zaručit rozsvícení paprsku při přímém běhu paprsku a zhasnutí při zpětném běhu ovládáním napětí na mřížce obrazovky (signál u_3).

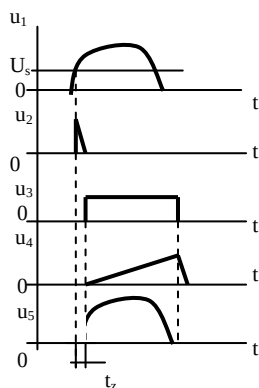


Horizontální kanál



Význam zkratk v blokovém schématu:

- X - vstup horizontálního kanálu
P3 - přepínač AC - DC - GND (nemají jej všechny osciloskopy)
v poloze AC zobrazí střídavý signál bez stejnosměrné složky
v poloze DC zobrazí střídavý signál včetně stejnosměrné složky nebo stejnosměrný signál
v poloze GND spojí vstup s nulou (pro nastavení časové osy na obrazovce)
VD - vstupní dělič a předzesilovač (nemají jej všechny osciloskopy)
umožňuje měnit citlivost po stupních a přitom zachovávat stejný vstupní odpor. Ovládací prvek označen T/dílek a má skokovou změnu (obvykle 1:2:5) a plynulou změnu.
HZ - horizontální zesilovač
dodatečně zesiluje vstupní signál na hodnotu dostatečnou pro vychýlení paprsku na obrazovce a nastavením výstupního napětí zesilovače pro nulový vstupní signál umožňuje posuv v ose X - nastavení polohy stopy na obrazovce při nulovém signálu.
ČZ - časová základna osciloskopu.
Časová základna je ovládána z panelu osciloskopu ovládacím prvkem označeným s/d (čas/ dílek), má skokovou a plynulou změnu. Chceme-li odečítat na obrazovce hodnoty signálu na časové ose (f , T , φ) pak ovládací prvek pro plynulou změnu musí být v poloze "kalibrováno".
GSP - generátor spouštěcích pulzů



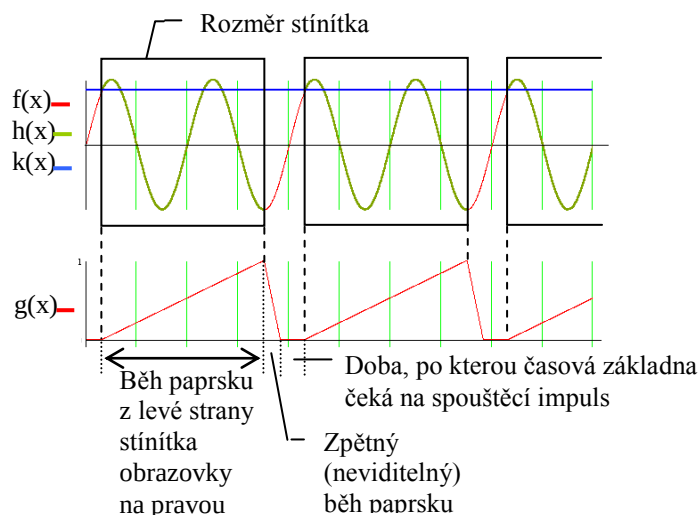
Všechny moderní osciloskopy mají **spouštěnou časovou základnu**, kterou je někdy možno přepnout do režimu **volně běžící základny**. V případě spouštěné časové základny je začátek přímého běhu časové základny spouštěn impulsem odvozeným od měřeného signálu. Tento spouštěcí impuls (na obrázku je označen u_2) je vyroben generátorem spouštěcích impulsů GSP při určité úrovni vstupního signálu (na obrázku je označena U_s), nastavitelné ovládacím prvkem na panelu (označeným úroveň spouštění – TRIGGER LEVEL).

Časový interval t_z je zpoždění v obvodech časové základny (zpoždění mezi příchodem spouštěcího impulsu a počátkem přímého běhu časové základny).

O stejný časový interval je třeba nastavit **zpoždění zpožďovací linky**. Zpoždění je záměrně zavedeno do vertikálního kanálu, aby se zobrazovaný signál dostal na vertikální destičky obrazovky až potom, kdy započal přímý běh časové základny. Bez tohoto zpoždění by signál vykreslený na stínítku nezačínal od spouštěcí úrovně.

Tento způsob spouštění, kdy **obraz je synchronizován** prvkem "úroveň spouštění" (TRIGGER LEVEL) bývá označen jako "**normální spouštění**" (TRIGGER NORM, nebo **NORM**).

Spouštěná časová základna osciloskopu – normální spouštění

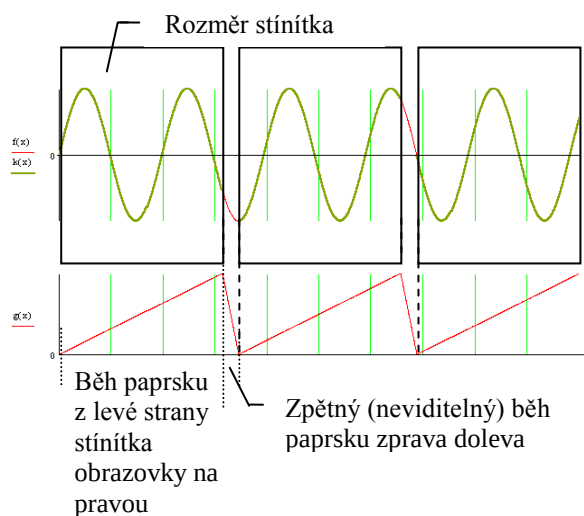


$f(x)$ – zobrazovaný signál
 $k(x)$ – úroveň spouštění ovládaná knoflíkem označeným LEVEL (úroveň) umístěným v části předního ovládacího panelu označené TRIGGER (spouštění)
 $h(x)$ – části signálu pozorovatelné na stínítku obrazovky pro po sobě následující přeběhy paprsku
 $g(x)$ – průběh napětí časové základny

Na obrázku je vidět, že zobrazování průběhu signálu na obrazovce osciloskopu začíná při každém přeběhu paprsku od stejné napěťové úrovně – obraz na stínítku je stabilní, nepohybuje se.

Při signálu menším než spouštěcí úroveň úroveň zmizí obraz i stopa. Stejně tak bez vstupního signálu není na obrazovce ani stopa.

Proto bývá možno spouštěnou časovou základnu přepnout na **"režim automatického spouštění" (AUTO)**, ve kterém spouštěcí generátor samočinně vydává spouštěcí puls, pokud tento není vyvolán měřeným signálem nebo vnějším spouštěcím signálem do určité doby po skončení přímého běhu časové základny. Vypadne-li synchronizace, je vidět pohybující se obraz a bez signálu je vidět stopa. Může se stát, že v tomto režimu se nepodaří obraz zasynchronizovat – obraz na stínítku není stabilní, pohybuje se.



Automatická časová základna, označovaná „AUTO“

$f(x)$ – zobrazovaný signál
 $k(x)$ – části signálu pozorovatelné na stínítku obrazovky pro po sobě následující přeběhy paprsku (paprsek začíná kreslit vždy v jiném bodě křivky – pozorovatel má dojem pohybující se křivky)
 $g(x)$ – průběh napětí časové základny

Časová základna obvykle může užít tří zdrojů spouštěcích pulsů (TRIGGER SOURCE) – při tzv. **vnitřním (INT) spouštění** se spouštěcí puls odvozuje od měřeného signálu, při **vnějším (EXT) spouštění** jsou spouštěcí pulsy přiváděny na zvláštní vstup osciloskopu a třetí možnost je spouštět časovou základnu kmitočtem sítě.

Spouštění může být **stejnoseměrné (TRIGGER COUPLING DC)** – signálem v kmitočtovém pásmu od nuly do udaného horního kmitočtu, nebo **střídavé (AC)** – přes kondenzátor, od určitého kmitočtu – např. 20 Hz – do horního mezního kmitočtu, a je možno volit **vzestupnou** nebo **sestupnou hranu spouštěcího signálu**, při které dojde ke spuštění základny. Někdy má přepínač typu spouštění přidavné polohy – "střídavé s potlačením nř" (**REJ HF**) – pro spouštění vř signálů, obsahujících nř složku – obvykle od asi 20 kHz do mezního kmitočtu, a "střídavé s potlačením vř" (**REJ LF**) – pro spouštění vř signálů s vř složkou, zhruba v pásmu 20 Hz až 100kHz.

Kvalitní časová základna má ještě jeden nastavovací prvek, velmi užitečný pro zastavení obrazu tvořeného např. opakovanými seriemi několika nepravidelně časově rozložených pulsů. Jde o **regulaci čekací doby (HOLD-OFF time)**, doba t_h z obr.5.2). Regulaci této doby je možno nastavit kmitočtem časové základny rovný kmitočtu opakování serií pulsů a tak získat na stínítku stojící obraz části nebo celé série pulsů. Není-li osciloskop vybaven touto možností, je nutno použít plynulé regulace rychlosti časové základny (potenciometr "ČZ – jemně"), při jehož vychýlení z označené polohy ale přestává platit kalibrace rychlosti časové základny.

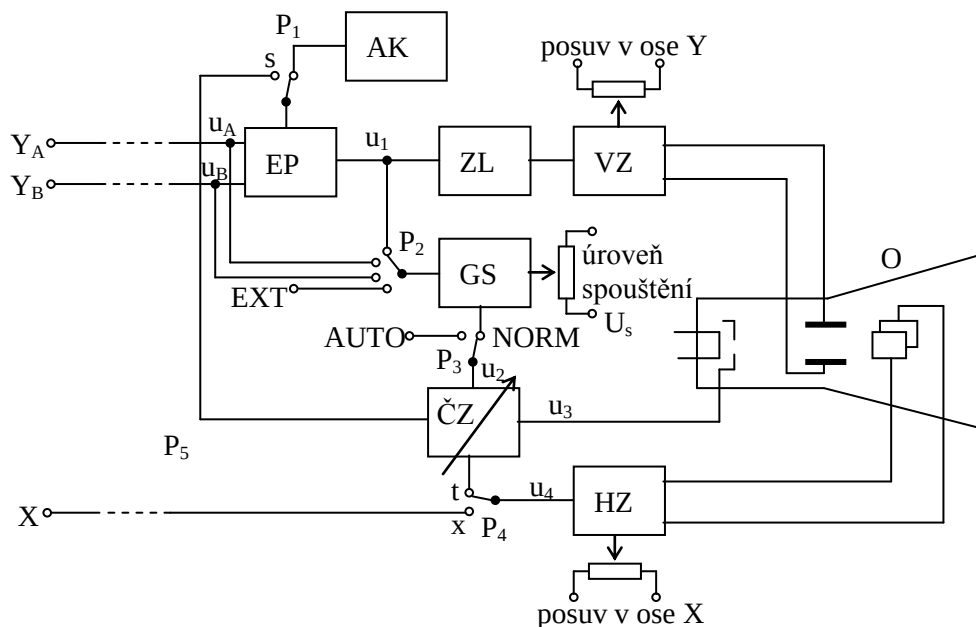
Zjednodušené blokové schéma dvoukanálového osciloskopu

Význam zkratk v blokovém schématu:

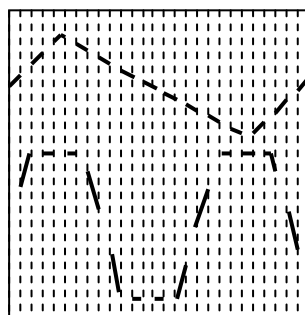
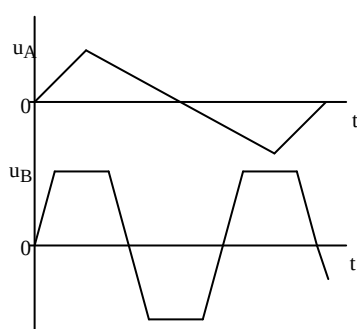
EP - elektronický přepínač

střídavě přepíná vstupní napětí u_A a u_B na vertikální kanál. Je řízen buď časovou základnou ČZ (ve střídavém režimu – s), nebo astabilním klopným obvodem AKO (v přepínacím režimu – p).

Zbývající zkratky souhlasí se zkratkami ve vertikálním a horizontálním kanále jednopaprskového osciloskopu (vstupní obvody zde nejsou rozkresleny).

**Přepínací režim (Chopp mode – CHOP)**

Signály u_A a u_B mají různou frekvenci.



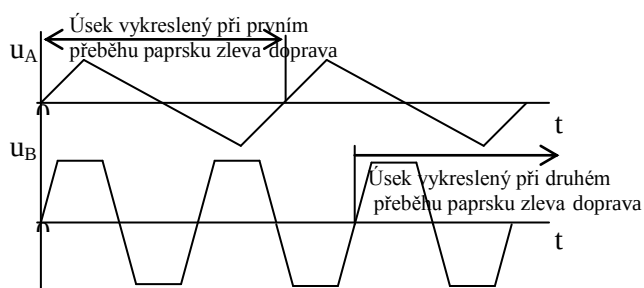
Při **spouštěcí úrovni $U_s = 0V$** budou v přepínacím režimu (CHOP) zobrazeny na stínítku obrazovky takto: (svislé čárkované čáry nejsou rastr, ale okamžiky přepnutí elektronického přepínače EP)

Tento způsob přepínání se volí při nízkých frekvencích signálů, kdy rychlost přepínání elektronického přepínače je podstatně vyšší. Režim přepínání volí buď osciloskop sám, nebo obsluha, a to podle modelu osciloskopu.

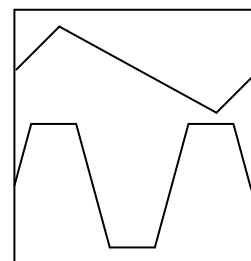
Střídavý režim (Alternate mode – ALT)

Signály u_A a u_B mají různou frekvenci.

Při spouštěcí úrovni $U_s = 0V$ budou průběhy ve střídavém režimu (ALT) zobrazeny na stínítku obrazovky takto:



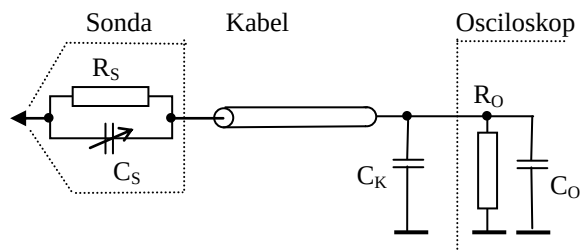
(podle obrázku výše uvedeného je počátek zobrazování signálů posunutý, ačkoli to na obrazovce tak nevypadá)



Tento způsob přepínání se volí při vysokých frekvencích signálů, kdy rychlost přepínání elektronického přepínače astabilním klopným obvodem je pomalá. Režim přepínání volí buď osciloskop sám, nebo obsluha, a to podle modelu osciloskopu.

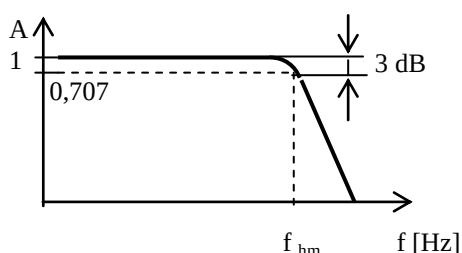
3.2.2.2 Připojení měřeného signálu na osciloskop

Obvykle jsou vstupní svorky osciloskopu upraveny pro připojení koaxiálního kabelu. Ten má kromě svého charakteristického odporu (50 nebo 75 Ω) také kapacitu (může být až 100 pF/m). Horní mezní frekvence osciloskopu je dána vztahem $f_h = \frac{1}{2\pi C_0 R_0}$. Po připojení koaxiálního kabelu na vstup



osciloskopu se tato kapacita připojí paralelně ke vstupní kapacitě osciloskopu. Tím se zvýší celková vstupní kapacita a sníží mezní frekvence osciloskopu s koaxiálním kabelem. Proto se do hrotu kabelu vkládá sonda, aby snížila vliv kapacity koaxiálu. Pasivní sonda vstupní signál ještě zeslabí, aktivní zachová.

Horní mezní frekvence



U osciloskopů se jako jeden z parametrů uvádí horní mezní frekvence, nebo-li frekvenční rozsah osciloskopu. Horní mezní frekvence je taková frekvence, která je zobrazena s potlačením amplitudy o 3 dB, a pro vyšší frekvence potlačení roste. Pro harmonické signály to znamená, že je lze zobrazovat i s frekvencí rovnou horní mezní frekvenci s tím, že víme, že amplituda je zobrazena s chybou 30 %. Pro neharmonické signály to znamená, že všechny harmonické musí padnout do frekvenčního pásma osciloskopu.

3.2.2.3 Příklad analogového osciloskopu





Shrnutí pojmů 3.2.2.

- Vertikální a horizontální kanál
- Časová základna
- Spouštěná časová základna
- Dvoukanálový osciloskop
- Sonda k osciloskopu



Otázky 3.2.2.

- 3.14 K čemu je dobrá spouštěná časová základna
- 3.15 Jak se zjistí frekvence signálu zobrazeného na osciloskopu
- 3.16 Kterému bodu na obrazovce se rovná maximální napětí časové základny

3.2.3 Číslicové měřicí přístroje



Čas ke studiu: 1 hodina



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- popsat funkci A/D převodníků
- srovnat vlastnosti A/D převodníků



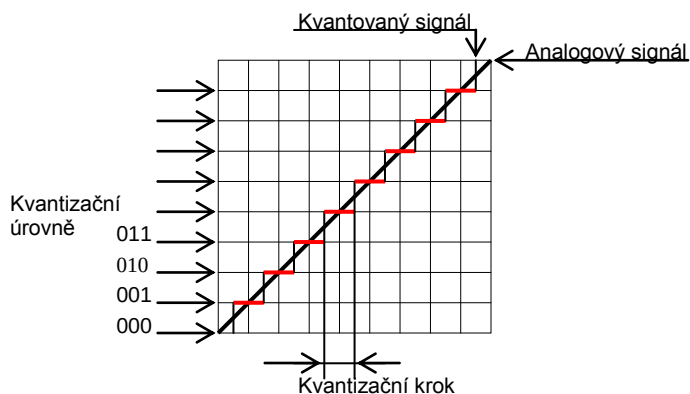
Výklad

Číslicové měřicí přístroje převádí analogovou, spojitě proměnnou elektrickou veličinu na diskrétní údaje, vyjádřené číslem.

Základní částí číslicových měřicích přístrojů jsou analogovo - digitální (A/D) převodníky. Ty dávají těmto měřicím přístrojům jejich specifické vlastnosti. Převádí na číslo *vždy napětí*.

Převod, který A/D převodníky provedou, je zatížen tzv. **kvantizační chybou**, která vzniká tzv. kvantizací.

Kvantizační krok



Úrovně digitalizované veličiny jsou popsány binárním číslem. Čím více bitů (počet nul a jedniček) bude toto číslo mít, tím více úrovní je schopno popsat a tím menší změnu měřené veličiny je takový A/D převodník schopen rozlišit. Např. 8 bitový A/D převodník na rozsahu 10 V zachytí změnu vstupního napětí o 39 mV ($10V/2^8=10/256=39$ mV), 12 bitový A/D převodník na stejném rozsahu zachytí změnu vstupního napětí už o 2,4 mV. Kvantizační chyba je polovina kvantizačního kroku.

A/D převodník je samozřejmě v číslicovém měřicím přístroji doplněn různými měřicími převodníky a ukazovacím ústrojím – displejem.

Obvykle nejsou ČMP jednoúčelové, ale měří více elektrických veličin – tzv. multimetry.

3.2.3.1 Analogovo - digitální (A/D) převodníky

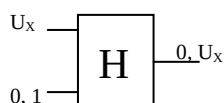
A/D převodníky mohou být

- okamžité
- integrační

Okamžité A/D převodníky srovnávají měřené napětí se skokově se měnícím referenčním napětím. V okamžiku rovnosti převod ukončí a měřená veličina je vyjádřena binárním číslem. Rychlost převodu u některých A/D převodníků závisí na velikosti měřeného napětí, u některých ne. Rychlost převodu nejrychlejších z nich je řádově ns; to odpovídá jedné změřené hodnotě za jednu periodu signálu o frekvenci řádově GHz. Používají se v případě, že chceme popsat průběh jeho okamžitými hodnotami. U číslicových měřicích přístrojů napájených ze sítě se stává, že vstupní signál může být tímto napájecím napětím o frekvenci 50 Hz modulován, tzn. amplituda měřeného stejnosměrného signálu se mění. Jde o tzv. sériové rušení (v technické dokumentaci se uvádí činitel potlačení sériového rušení SMRR – Series Mode Rejection Ratio). V případě měření stejnosměrného napětí (samozřejmě i při měření střední, maximální nebo efektivní hodnoty střídavého signálu) nám bude toto kolísání vadit. Proto se používají **integrační A/D převodníky**, které integrují měřenou veličinu po dobu jedné nebo několika period rušivého napětí a tím chybu odstraní. Jejich převod však nemůže být kratší než 20 ms.

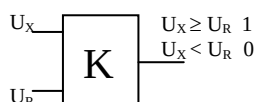
A/D převodníky

Bloky, které se v blokových schématech A/D převodníků vyskytují:



Hradlo

Pokud je na hradlovacím vstupu logická 0, je i na výstupu z hradla logická 0. Pokud je na hradlovacím vstupu logická 1, projde hradlem analogová hodnota U_x .



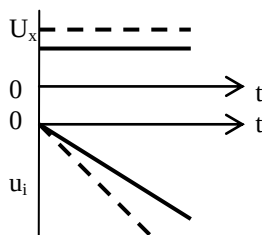
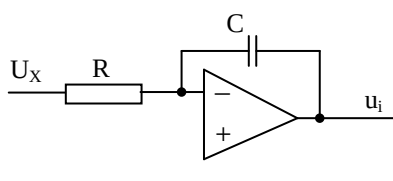
Komparátor

Analogová hodnota U_x se srovnává s analogovou hodnotou U_R .

Pokud $U_x < U_R$, je na výstupu z komparátoru logická 0.

Pokud $U_x \geq U_R$, je na výstupu z komparátoru logická 1.

Integrátor

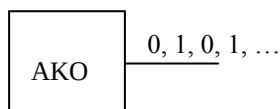


Napětí u_i je integrálem vstupního napětí u_x .

$$u_i = \frac{1}{RC} \int u_x dt$$

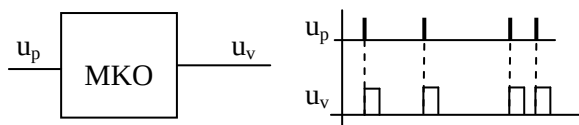
Pokud je U_x konstantní, pak při stálé hodnotě RC klesá napětí u_i za integrátorem tím rychleji, čím větší je U_x .

Astabilní klopný obvod

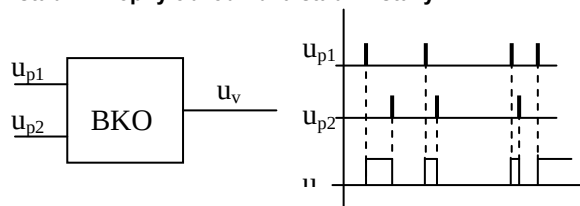


Frekvence překlápění mezi logickými úrovněmi je dána vnitřním nastavením prvků astabilního klopného obvodu; žádný stabilní stav. Délka impulsů i perioda jejich opakování je konstantní.

Monostabilní klopný obvod - jeden stabilní stav



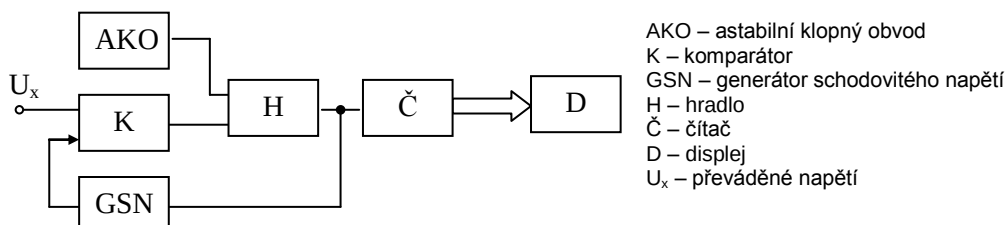
V případě MKO čeká klopný obvod v logické nule na příchod impulsu, který ho přepoklopí do logické 1. Tam zůstane tak dlouho, jak má nastaveno vnitřními prvky a vrátí se sám do výchozího stavu (log 0) – impulsy jsou stále stejně dlouhé, ale opakují se s proměnnou periodou.

Bistabilní klopný obvod - dva stabilní stavy

V případě BKO čeká klopný obvod v logické nule na příchod impulsu u_{p1} , který ho přepne do logické 1. Tam zůstane tak dlouho, dokud nepřijde impuls u_{p2} , který ho vrátí do výchozího stavu (log 0) – impulsy jsou různé dlouhé a opakují se s proměnnou periodou.

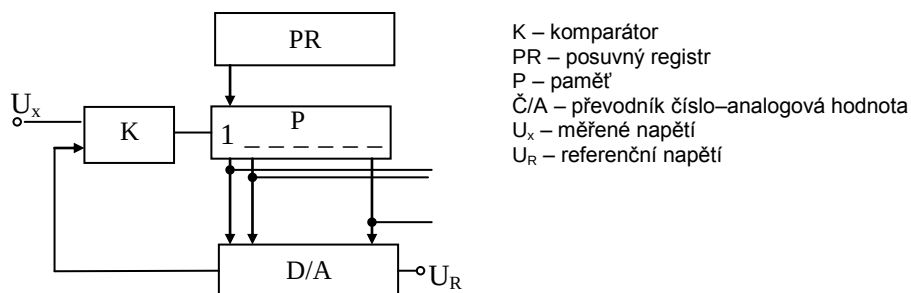
Kompenzační A/D převodník se schodovitým**napětím**

Hlavním blokem tohoto typu převodníku je komparátor, který srovnává měřené napětí s referenčním.



Astabilní klopný obvod posílá na vstup hradla obdélníkové impulsy o stálé frekvenci. Hradlo je propouští do čítače a generátoru schodovitého napětí tak dlouho, dokud je referenční napětí přiváděné z GSN na komparátor menší než převáděné napětí. (S každým impulsem vzroste napětí z GSN o jeden kvantizační krok.) Pak je převod ukončen, čítač vynulován a celý cyklus začíná znovu.

Počet schodů na celý rozsah převáděného napětí odpovídá počtu bitů převodníku. Počet impulsů načítaných čítačem je tím větší, čím větší je převáděné napětí. Takže doba převodu závisí na velikosti U_x .

Kompenzační A/D převodník s postupnou aproximací

Postup práce aproximačního A/D převodníku:

Posuvný registr zapisuje do paměti jedničku postupně od nejvyššího bitu k nejnižšímu. Jednička na nejvyšším bitu představuje za Č/A–převodníkem nejvyšší napětí. Jednička na nižších bitech představuje vždy poloviční napětí. Toto napětí je porovnáváno v komparátoru s převáděným napětím. Jestliže je $U_x \geq U_R$, pak v paměti zůstane jednička, pokud $U_x < U_R$ přepíše se jednička na nulu. Porovnání proběhne tolikrát, kolika bitový převodník je, tzn. doba převodu nezávisí na velikosti převáděného napětí. Více bitů bude znamenat přesnější, ale pomalejší převod.

Příklad:

8 bitový převodník má nejvyššímu bitu přiřazeno napětí 5 V; na nižších bitech postupně 2,5 V; 1,25 V; 0,625 V; 0,313 V; 0,156 V; 0,078 V; 0,039 V. Nejmenší rozlišitelná změna napětí je tedy 39 mV. Nejvyšší zobrazitelné napětí bude 9,999 V s chybou 0,039 V. (Součet všech napětí je 9,96 V.)

Předpokládejme, že převáděné napětí má hodnotu 3,58 V.

V 1. kroku srovná komparátor 3,58 V s 5 V. Protože $U_x < U_R$ přepíše se jednička v paměti na 0 a na výstupu z Č/A–převodníku je také nulové napětí. Posuvný registr se posune na nižší bit, do paměti запиše jedničku.

V 2. kroku srovná komparátor 3,58 V s 2,5 V. Protože $U_x \geq U_R$ zůstane 1 v paměti a na výstupu z Č/A–převodníku zůstane 2,5 V. V dalším kroku se k tomuto napětí přidá 1,25 V, takže v 3. kroku srovná komparátor 3,58 V s 3,75 V. Protože $U_x < U_R$ přepíše se jednička v paměti na 0 a na výstupu z Č/A–převodníku bude opět napětí 2,5 V.

Ve 4. kroku srovná komparátor 3,58 V s 3,125 V. Protože $U_x \geq U_R$ zůstane 1 v paměti a na výstupu z Č/A–převodníku zůstane 3,125 V.

V 5. kroku srovná komparátor 3,58 V s 3,438 V. Protože $U_x \geq U_R$ zůstane 1 v paměti a na výstupu z Č/A–převodníku zůstane 3,438 V.

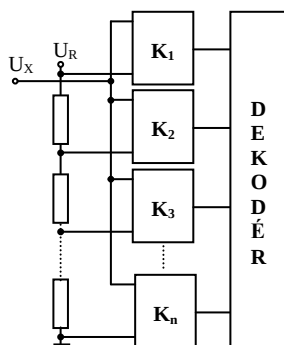
V 6. kroku srovná komparátor 3,58 s 3,594 V. Protože $U_x < U_R$ přepíše se jednička v paměti na 0 a na výstupu z Č/A–převodníku bude opět napětí 3,438 V.

V 7. kroku srovná komparátor 3,58 V s 3,516 V. Protože $U_x \geq U_R$ zůstane 1 v paměti a na výstupu z Č/A–převodníku zůstane 3,516 V.

V 8. kroku srovná komparátor 3,58 V s 3,555 V. Protože $U_x \geq U_R$ zůstane 1 v paměti a na výstupu z Č/A–převodníku zůstane 3,555 V.

V paměti zůstane číslo 01011011 a na displeji čteme číslo 3,555 V.

Komparační paralelní A/D převodník



Kompenzační A/D převodníky srovnávají postupně měřené napětí s různě nastavenými hodnotami referenčního napětí. Tím je dána doba převodu.

Komparační paralelní A/D převodníky srovnávají najednou měřené napětí s různě nastavenými hodnotami referenčního napětí. Doba převodu je tak výrazně kratší. Nevýhodou je to, že zároveň výrazně vzrůstá cena převodníku. Na rozdíl od jednoho komparátoru použitého u kompenzačního A/D převodníku je zde použito tolik komparátorů, kolik hodnot referenčního napětí srovnáváme s měřeným napětím. Tzn. u 8 bitového převodníku potřebujeme 256 komparátorů, u 12 bitového už 4096 komparátorů.

Srovnání A/D převodníků

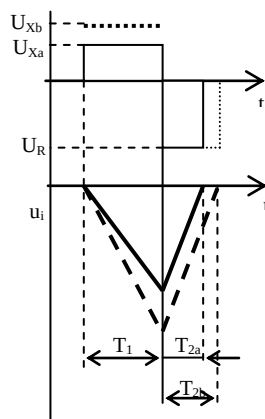
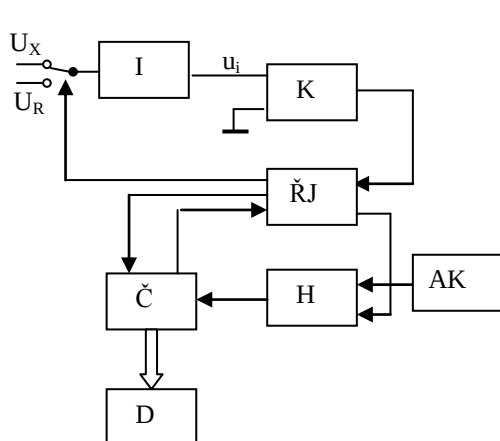
Aproximační převodník byl vysvětlen na 8 bitovém převodníku a předpokládali jsme maximální vstupní napětí 10 V. Kvantizační krok je tedy 39 mV. Referenční a převáděné napětí bylo během jednoho převodu srovnáno 8krát.

Při stejném kvantizačním kroku proběhne srovnání stejného převáděného napětí 3,58 V v převodníku se schodovitým napětím 91 krát (3,58:0,039). Převod maximálního vstupního napětí 10 V bude ukončen po 256 srovnáních.

Komparační paralelní převodník převod provede během jednoho srovnání, ale bude potřebovat 256 komparátorů.

Tato skupina A/D převodníků není odolná proti sériovému rušení.

Integrační A/D převodníky s dvojitou integrací



K – komparátor
ŘJ – řídicí jednotka
H – hradlo
Č – čítač
AKO – astabilní klopný obvod
D – displej
 U_x – převáděné napětí
 U_R – referenční napětí
 u_i – napětí za integrátorem
K – komparátor
ŘJ – řídicí jednotka
H – hradlo
Č – čítač
AKO – astabilní klopný obvod

Na začátku převodu je na integrátor připojeno převáděné napětí U_x . Napětí u_i za integrátorem klesá tak rychle, jak velké je napětí U_x . Zároveň se přes otevřené hradlo plní čítač impulsy z astabilního klopného obvodu. Jakmile se čítač naplní, řídicí jednotka jej vynuluje a připne na vstup integrátoru referenční napětí U_R . Napětí U_R má opačnou polaritu než napětí U_x , proto se napětí u_i za integrátorem vrací k nule. Zároveň se přes otevřené hradlo opět plní čítač impulsy z astabilního klopného obvodu. Jakmile napětí u_i za integrátorem dosáhne nuly, řídicí jednotka uzavře hradlo. Načítané impulsy odpovídají převáděnému napětí U_x . Celý cyklus se opakuje.

První integrační doba je odvozena od periody rušivého napětí. Obvykle se za rušivé napětí bere napájecí napětí o frekvenci 50 Hz. Proto trvá první integrační doba 20 ms, nebo násobky této doby (obvykle 100 ms). Tím jsou tyto převodníky odolné proti sériovému rušení.

Srovnání A/D převodníků

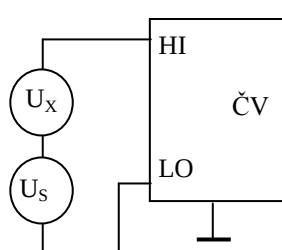
Nejpomalejší A/D převodníky jsou převodníky integrační. Doba převodu u nich trvá 100 – 200 ms, jsou odolné proti sériovému rušení frekvencí síťového napájecího napětí (50 Hz), a bývají až 18 bitové (velmi přesné).

Doba převodu kompenzačních A/D převodníků s postupnou aproximací je zhruba desítky ms, nejsou odolné proti sériovému rušení a bývají 8 až 16 bitové.

Nejrychlejší jsou komparační paralelní A/D převodníky. Doba převodu je 0,5 ns až stovky ns, nejsou odolné proti sériovému rušení a bývají 6 až 10 bitové.

3.2.3.2 Typy rušení

Na vstupní svorky stejnosměrného voltmetru se mohou k měřenému napětí přičítat rušivá napětí. Mohou být stejnosměrná, střídavá nebo náhodná. K měřenému napětí se mohou přidávat v sérii (sériové rušení – SM – series mode) nebo proti zemi (souhlasné rušení – CM – common mode). Nejčastěji jde o rušení střídavé od napájecí sítě s frekvencí 50 Hz.

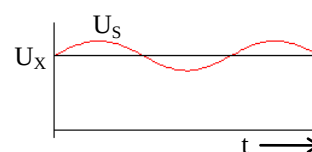


Sériové rušení

Lze odstranit použitím filtru na vstupu voltmetru. Tak se odruší kompenzační A/D převodníky, které z principu nejsou proti sériovému rušení vůbec odolné. Ztratí se tím ale jejich rychlost. Odolné proti tomuto rušení jsou integrační převodníky.

Činitel potlačení sériového rušení SMRR (series mode rejection ratio) je podíl rušivého napětí U_{SM} ku změně

$$\text{údaje } \Delta U_X \text{ v decibelech } SMRR = 20 \log \frac{U_{SM}}{\Delta U_X} \text{ [dB]}$$

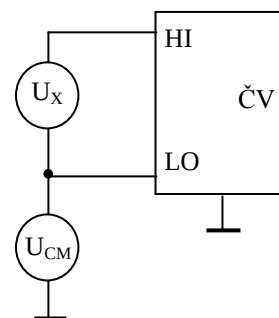


Souhlasné rušení

se potlačuje konstrukcí přístroje. Dá se zjednodušeně říct, že žádná ze vstupních svorek přístroje nesmí být spojena se zemí. Přesto mezi vstupními svorkami a uzemněnou skříní jsou, byť velké, impedance (Z_4 , Z_5 u číslicového voltmetru s plovoucím vstupem; Z_4 až Z_7 u ČV s plovoucím stíněním). (Plovoucí stínění uzavírá analogovou část přístroje.) Při zjišťování činitele potlačení souhlasného rušení

(common mode rejection ratio) $CMRR = 20 \log \frac{U_{CM}}{U_{SE}}$ se předpokládá, že odpor

přívodu $R_1 = 0 \Omega$, $R_2 = 1 \text{ k}\Omega$. Pak napětí U_{SE} je úbytek napětí na odporu R_2 vyvolaný proudem tekoucím ze zdroje rušení tímto odporem a impedancí Z_4 do země. Obvykle se s tímto způsobem potlačení dosahuje činitele CMRR 120 dB pro stejnosměrné a 60 dB pro střídavé (50 Hz) rušení. Pro potlačení plovoucím stíněním platí hodnoty CMRR 160 dB pro stejnosměrné a 120 dB pro střídavé (50 Hz) rušení.



U_X – měřené napětí

U_{SM} – zdroj sériového rušení

U_{CM} – zdroj souhlasného rušení

G – svorka stínění

ČV – číslicový voltmetr

Z_4 až Z_7 – izolační impedance mezi vstupními svorkami a zemněnou skříní MP

HI (high) – vstupní svorka vzdálenější od zemního potenciálu („živá“)

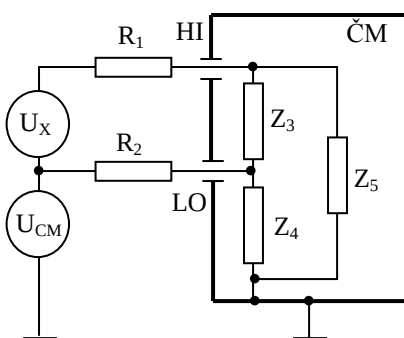
LO (low) – vstupní svorka bližší zemnímu potenciálu

R_1 , R_2 – odpor přívodního vodiče

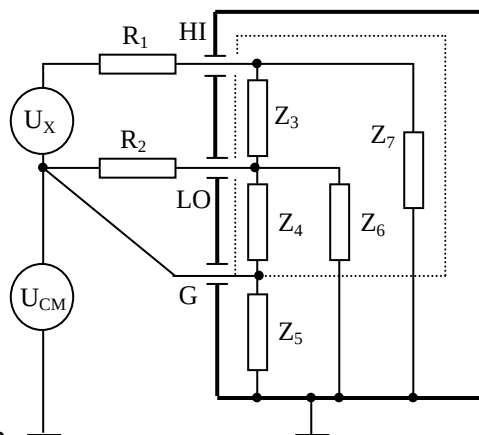
Z_3 – vstupní impedance MP

ČMP – číslicový měřicí přístroj

Plovoucí vstup



Plovoucí stínění (G – guard) – elektrostatické oddělení vstupního obvodu a analogové části od číslicových obvodů





Shrnutí pojmů 3.2.3.

- Kvantizační krok
- Kompenzační A/D převodník se schodovitým napětím
- Kompenzační A/D převodník s postupnou aproximací
- Komparační paralelní A/D převodník
- Integrovní A/D převodníky s dvojí integrací
- Sériové rušení
- Souhlasné rušení



Otázky 3.2.3.

- 3.17 Jak zjistíte velikost kvantizační chyby
- 3.18 Jakou veličinu převádí integrační AD převodník – stejnosměrný proud, střídavý proud, stejnosměrné napětí, střídavé napětí, odpor, výkon
- 3.19 Co je hlavním blokem okamžitých AD převodníků
- 3.20 Jakou podmínku musí splnit integrační AD převodníky, aby byly odolné proti sériovému rušení

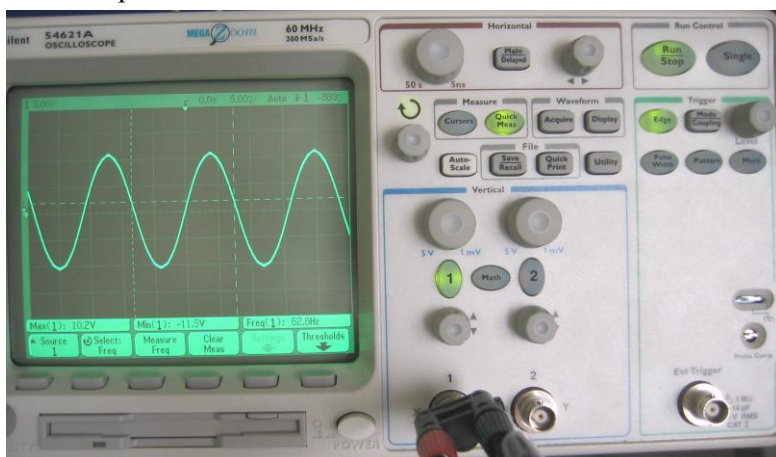
3.2.4 Číslicový osciloskop

Osciloskop je elektronický měřicí přístroj, umožňující sledovat na stínítku obrazovky časový průběh jedné nebo několika elektrických veličin, nebo fyzikálních veličin převedených na elektrický signál.

U číslicového osciloskopu není paprsek bezprostředně vychylován vstupním signálem. Místo toho je plynulý vstupní signál rozložen na diskrétní měřicí body - vzorky (sample), které jsou digitalizovány, uloženy do paměti a znovu skládány na displeji do celkového obrazu signálu.

Kromě křivky mohou být na obrazovce zobrazeny vybrané číselné údaje o nastavení osciloskopu či o zobrazeném průběhu.

Jednoznačnou výhodou je možnost uchování dat popisujících zaznamenaný časový průběh a jejich dalšího zpracování.



Způsob ovládání je podobný, jako u analogových osciloskopů. Zase se dají ovládací prvky rozdělit na ovládání v horizontálním a vertikálním směru a spouštění (Trigger). Jenom je většinou pod jedním tlačítkem skryto více funkcí. Dále přibývají tlačítka pro měření zobrazovaného signálu (Measure), ukládání do paměti (File) a další.

Přesnost zobrazení amplitudy

Aby byly číslicové osciloskopy schopny zobrazovat signály o vysoké frekvenci, používají se nejrychlejší A/D převodníky, např. komparační paralelní. Ty jsou většinou pouze 8 bitové, takže údaj o napětí na číslicovém osciloskopu bude mnohem nepřesnější, než údaj multimetru.

Vzorkování

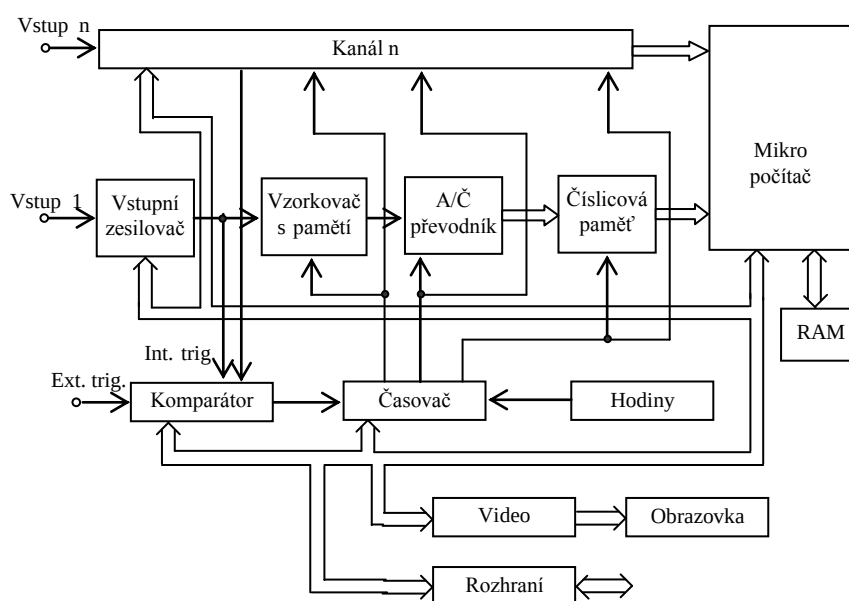
Vzorkování může probíhat v

- reálném čase, tzn. dostatečný počet vzorků je nasbírán během jedné periody,
- režimu opakovaného vzorkování, tzn. dostatečný počet vzorků je nasbírán během několika period. Při tomto způsobu vzorkování stačí nižší vzorkovací frekvence a tudíž nižší nároky na obvody signál zpracovávající. Tento režim lze ale použít pouze pro periodické průběhy.

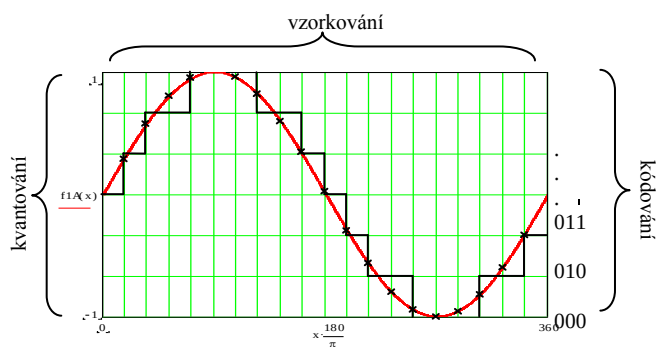
To, v jakém režimu vzorkování, a tudíž pro zobrazení jakých průběhů je osciloskop vhodný, poznáme z poměru vzorkovací frekvence a horní mezní frekvence osciloskopu. Je-li tento poměr alespoň 4, pak lze osciloskop použít v celém rozsahu k zobrazení jednorázových dějů.

Pokud je vzorkovací frekvence menší než horní mezní frekvence osciloskopu (poměr menší než 1, např. 200 MHz, 100 Msa/s), pak pro nejvyšší frekvence lze použít osciloskop pouze pro zobrazení opakovaných (periodických) průběhů.

Číslicový osciloskop

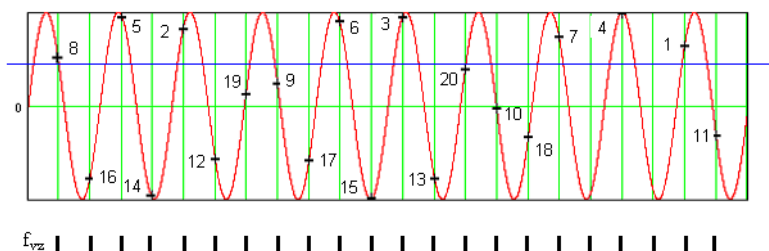


Digitalizace signálu

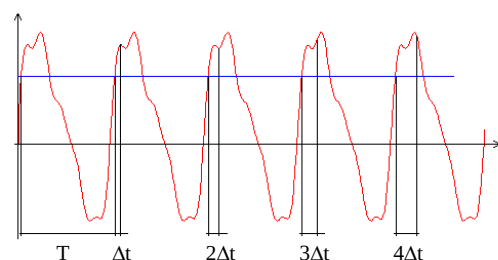


Křížky na sinusovce představují odebrané vzorky, vodorovné části schodovité křivky představují kvantizační úrovně, kterými jsou vzorky vyjádřeny a binární čísla, popisující tyto úrovně, se uloží v paměti.

Při vzorkování může dojít k chybě tím, že k závažné události na snímaném průběhu dojde mezi dvěma vzorky. Většinou ale tato událost neodezní tak rychle, aby nebyla, byť zkráceně, zachycena. Druhá možnost vzniku chyb je v nedostatečném počtu vzorků na periodu zobrazovaného signálu (viz vzorkování).

Opakované vzorkování náhodné

Impulzy vzorkovací frekvence nejsou nijak zasynchronizovány s frekvencí zobrazovaného signálu. Na každé periodě je odebráno několik vzorků. Ty jsou pak sestaveny ve správném pořadí za sebou tak, že jako první je brán nejbližší vyšší vzorek nad spouštěcí úroveň (modrá čára).

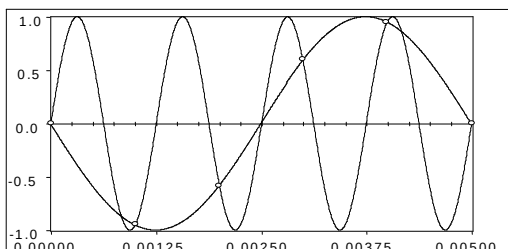
Opakované vzorkování postupné

Okamžik vzorkování je zasynchronizován s časem průchodu signálu spouštěcí úrovní. Další vzorky se pak odebírají v čase, zpožděném o násobky času Δt .

Multiplexovaný vstup

Vzorkovací frekvence uvedená u vícekanalového osciloskopu může platit pro každý kanál.

Pokud jsou vstupy vícekanalového osciloskopu připojovány na vzorkovací obvod postupně, pak může uvedená vzorkovací frekvence platit jen pro jeden kanál; po připojení dalšího kanálu klesá vzorkovací frekvence na polovinu atd. (Pro jeden kanál je vzorkovací frekvence např. 100 MSa/s, pro dva kanály 50 MSa/s, ...)

**Aliasing**

Vlivem malého počtu vzorků na periodu může dojít ke špatnému proložení daných bodů a k zobrazení úplně jiného průběhu, než jaký byl nasnímán. Tomuto jevu se říká aliasing.

Podobný problém může nastat i když byl nasnímán dostatečný počet vzorků na periodu, ale z nějakého důvodu chceme na obrazovce osciloskopu zobrazit větší počet period (počet vzorků na obrazovku je stále stejný).

Ukázka parametrů, uváděných v nabídce osciloskopů.

Bandwidth – frekvenční rozsah Max Sample Rate – vzorkovací frekvence
Max Memory – velikost paměti Channels – počet kanálů

Model	Bandwidth	Max Sample Rate	Max Memory	Channels
▶ 54621A	60 MHz	200 MSa/s	4 MB	2
▶ 54621D	60 MHz	200 MSa/s	4 MB	2+16
▶ 54622A	100 MHz	200 MSa/s	4 MB	2
▶ 54622D	100 MHz	200 MSa/s	4 MB	2+16
▶ 54624A	100 MHz	200 MSa/s	4 MB	4
▶ 54641A	350 MHz	2 GSa/s	8 MB	2
▶ 54641D	350 MHz	2 GSa/s	8 MB	2+16
▶ 54642A	500 MHz	2 GSa/s	8 MB	2
▶ 54642D	500 MHz	2 GSa/s	8 MB	2+16



Shrnutí pojmů 3.2.4.

- Kvantování
- Vzorkování
- Kódování
- Vzorkování v reálném čase
- Opakované vzorkování



Otázky 3.2.4.

3.21 Lze zobrazit neharmonický signál číslicovým osciloskopem s mezní horní frekvencí 100 MHz a $f_{vz} = 100 \text{ MSa/s}$ v celém jeho frekvenčním rozsahu?

3.22 Pro jaké průběhy lze použít režim opakovaného vzorkování?

3.3 Ukazovací ústrojí



Čas ke studiu: 30 minut



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- vypočítat konstantu přístroje
- zjistit rozsah displeje
- vypočítat parametry signálu, zobrazeného na osciloskopu



Výklad

3.3.1 Stupnice

V případě vícerozsahového přístroje může být u značky stupnice vyjádřeno pouze její pořadové číslo. Pak je nutno výpočtem přiřadit dané výchylce správnou hodnotu měřené veličiny. K tomu je nutno znát konstantu rozsahu.

Konstanta rozsahu K_R se určuje jako podíl největší hodnoty rozsahu X_R k celkovému počtu dílků stupnice α_R

$K_R = \frac{X_R}{\alpha_R}$. Hodnotu měřené veličiny X_M pak určíme jako součin zjištěného počtu dílků α_M a

konstanty rozsahu $X_M = K_R \cdot \alpha_M$.

Rozsah wattmetru je nutno vypočítat s nastaveného rozsahu napětového, proudového a ze jmenovitého účinníku (viz. příklad 7 v kapitole 1.3 Chyba měření).

3.3.2 Displej

Na displeji se odečítá měřená veličina přímo v desítkové soustavě.

O displeji se může mluvit např. jako o osmi místním; pak číslice na všech osmi místech čísla mohou nabývat všech hodnot, tj. 0 až 9.

Pokud je displej tzv. 3 1/2 (tři a půl) místný, pak číslice na nejvyšším řádu může nabývat pouze hodnot 0 nebo 1 a číslo má celkem 4 číslice (nejvyšší zobrazitelné číslo je 1999).

Displej 4 3/4 místný může měnit číslici na nejvyšším řádu pouze od 0 do 3 a číslo má celkem 5 číslic (nejvyšší zobrazitelné číslo je 39999).

3.3.3 Obrazovka

Slouží obvykle k pozorování tvaru signálu. Číslicové osciloskopy nabízejí kromě toho i zobrazení některých zajímavých hodnot. Pokud chceme zjistit amplitudu nebo frekvenci signálu u analogového osciloskopu, pak musíme tyto parametry vypočítat.

Na obrazovce je viditelný rastr. Hodnota jednoho dílku (1 cm) se vypočítá z nastavené citlivosti V/dílek (y osa) a z nastavené časové základny s/dílek (x osa; zjistíme hodnotu v sekundách). Velikost amplitudy pak zjistíme vynásobením hodnoty dílku příslušným počtem dílků, délku periody obdobně.



Shrnutí pojmů 3.3.

- Konstanta rozsahu
- 3a 1/2 místný displej
- Obrazovka osciloskopu



Otázky 3.3.

3.23 Kolik voltů měří vícerozsahový voltmetr, když na rozsahu 60V ukazuje 100 dílků. Stupnice má rozsah 120 dílků.

3.24 Kolik voltů jsou 3 digity při měření multimetrem s 3a 1/2 místným displejem na rozsahu 20 V?

3.25 Kolik procent jsou 3 digity při měření multimetrem s 3a 1/2 místným displejem na rozsahu 20 V?

3.4 Virtuální měřicí přístroje



Čas ke studiu: 2 hodiny



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete znát

- rozhraní, používaná k ovládání a sběru dat z měřicího přístroje do počítače
- možnosti vytvoření virtuálního měřicího přístroje



Výklad

U klasických analogových měřicích přístrojů určoval jeho funkce jednoznačně jeho výrobce a uživatel mohl využít pouze těch funkcí, které měl od výrobce připraveny. S rostoucími výkonnostními parametry a s klesající cenou výpočetní techniky začíná její průnik i do oblastí, pro které dříve nebyla určena, včetně oblasti měřicí techniky.

3.4.1 Komunikační rozhraní

První etapou využití výpočetní techniky je snaha **ovládat měřicí přístroje pomocí počítače**. K tomuto účelu vybavují výrobci své měřicí přístroje modulem rozhraní. V praxi převládají dvě základní rozhraní:

- ♦ **sériové RS 232**, které se vyznačuje
 - jednoduchou a levnou kabeláží (pro jeden směr komunikace vystačí s jedním signálovým a společným zemním vodičem),
 - standardním vybavením tímto rozhraním na straně počítače (připojuje se k němu obvykle myš, souřadnicové zapisovače a další periférie),
 - poměrně velkou vzdáleností, na kterou lze takto měřicí přístroj ovládat s omezením na dva komunikující protějšky (počítač a jeden měřicí přístroj; RS 485 dovoluje adresovat až 32 stanic),
 - malou propustností (omezená přenosová rychlost díky sériovému řazení informace po bitech a nutné redundantní informaci pro synchronizaci přenosu, standard max. 115 kb/s).
- ♦ **paralelní rozhraní GPIB (General Purpose Interface Bus)** zavedené v roce 1965 firmou Hewlett Packard pod označením HP-IB a zdokonalené v roce 1975 do podoby IEEE standardu 488 a v roce 1987 do podoby ANSI/IEEE 488.1 standardu, později rozšířeného na ANSI/IEEE 488.2 standard. Firma National Instruments dále rozvíjí toto rozhraní pod označením GPIB. Toto rozhraní se vyznačuje:
 - vysokou přenosovou rychlostí (přes 1 MB/s),
 - možností připojit na jeden řídící počítač až 14 měřicích přístrojů,
 - omezenou vzdáleností komunikujících přístrojů (max. délka kabelu cca 20 m),
 - existencí standardizovaného protokolu pro řízení přístrojů akceptovaného všemi výrobci, kteří tímto rozhraním své přístroje vybavují
 - nutností dovybavit počítač modulem tohoto rozhraní (karta nebo konvertor stávajícího rozhraní Centronics nebo RS 232)
- ♦ **rozhraní USB**
 - nástupce sériových a paralelních portů PC,
 - možnost připojení až 127 zařízení s použitím HUBu,
 - USB1.1 rychlost 8-12 Mb/s, USB2.0 rychlost 480 Mb/s. Přenosová rychlost se snižuje s počtem připojených aktivních zařízení,
 - vzdálenost
- ♦ **rozhraní Ethernet** je v poslední době se objevující alternativou s těmito možnostmi:
 - připojení měřicího přístroje na standardní médium lokální počítačové sítě (koaxiální kabel, kroucená dvoulinka) v místě měření přes standardní vstup do této sítě
 - možnost konfigurace měřicího přístroje a zpracování naměřených dat v jiném místě lokální počítačové sítě popřípadě odkudkoliv z internetu
 - velká propustnost tohoto rozhraní (standardně 10/100 Mbitů/s, je definovaná i rychlost 1 Gb/s)
 - neomezená vzdálenost
 - možnost využití standardních protokolů známých z komunikace mezi počítači (TCP/IP)
 - málo výrobců měřicí techniky zatím vybavuje své přístroje tímto rozhraním
 - standardní obslužné programy jsou zatím uzpůsobeny pro využití rozhraní RS232 nebo GPIB

Funkce měřicího přístroje se v tomto případě obvykle omezuje pouze na sejmutí měřených dat a jejich přenos přes rozhraní do počítače, kde probíhá jejich zpracování. Z měřicího přístroje se využije pouze vstupních obvodů a paměti dat, což vedlo k tzv. virtuálním měřicím přístrojům.

3.4.2 Virtuální přístroje

Podstatou **virtuálního přístroje** je doplnění počítače měřicí kartou (většinou je nutno před měřicí kartu zařadit vstupní obvody, které přizpůsobí velikost měřených veličin velikosti vstupních napětí měřicí karty) a vytvoření vhodného programu pro počítač, který realizuje všechny činnosti měřicího přístroje. Filosofie virtuálních měřicích přístrojů je velmi progresivní, neboť umožňuje při zachování výkonnostních parametrů klasické měřicí techniky vytvářet přístroje, jejichž funkce přesně odpovídají

požadavkům uživatele. Cena takto vytvářených měřicích přístrojů bývá nižší, než je cena klasické analogové měřicí techniky. Navíc je možno kdykoliv změnou programu vytvořit jiný měřicí přístroj nebo upravit vlastnosti stávajícího.

Při spojení měřicího přístroje a počítače přes rozhraní nebo při vytváření virtuálních měřicích přístrojů hraje vedle hardwarových prostředků v podobě počítače a přídavných karet čím dál významnější roli software. V rámci naší katedry se pracuje s vývojovým prostředím LabWindows a LabView americké firmy National Instruments, která již dlouhá léta tvoří špičku vývoje měřicí techniky na bázi využití komponentů výpočetní techniky.

3.4.3 Architektura měřicích karet

A/D převodníky - umožňují vstup analogových veličin obvykle v podobě napětí a jejich převod na číslo

Měřicí karty obvykle začínají vstupním multiplexerem – postupně připojují signály z jednotlivých kanálů. Pak je signál zesílen měřicím zesilovačem programově řízeným, navzorkován a A/D převodníkem převeden na číslo.

Dále mohou být na kartě:

D/A převodníky - převádějí číslo na analogovou veličinu - obvykle napětí

dvouhodnotové vstupy a výstupy - umožňují dvouhodnotové ovládání nebo testování dvou stavů - obvyklý vstup a výstup v TTL úrovních - obvykle násobek osmi bitů (port)

čítače a časovače - umožňují generovat obdélníkový signál v TTL úrovních daných parametrů a nebo čítat takový signál zvenčí

Běžně udávané parametry A/D převodníků

vstupní rozsah 0 až 5V, 0 až 10V, -2.5V až +2.5V, -5V až 5V (jednopolaritní nebo oboupolaritní)

počet vstupních kanálů (1, 2, 4, 8, 16) kanálů - společná zem nebo diferenční

zesílení (1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500)

šířka výstupního slova (8, 12, 14, 16, 22 bitů)

vzorkovací frekvence (50 kHz až 1 MHz)

Hranice použití A/D převodníků

Je hlavně dána omezenou vzorkovací frekvencí - špička klasické architektury aproximačního převodníku je u cca 1 MHz, špičkový osciloskop dnes 10 GSa/s

3.4.4 VXI sběrnice

Byla poprvé zavedena v roce 1987.

VXI sběrnice - architektura

Používá se šasi s maximálně 13 pozicemi - tzv. VXI mainframe

na pozici 0 se dává:

jednodeskové PC (embedded PC) - zde se připojuje i klávesnice a monitor

konvertor GPIB - VXI - přes něj se připojuje klasické plnohodnotné PC s kartou GPIB rozhraní

Na zbývajících pozicích se dávají měřicí přístroje v podobě zásuvných modulů - jsou na nich de facto pouze vstupní obvody a převodníky, přípojná místa pro měřený signál, nemají čelní panel

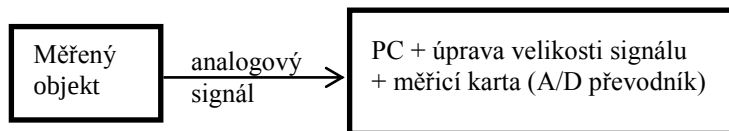
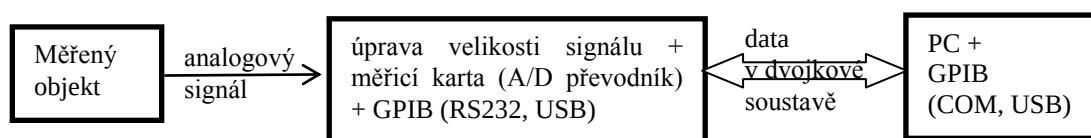
VXI sběrnice - výhody

Využívá rychlé 32 bitové VME sběrnice – z toho vyplývá velká propustnost, přesné časování. Aby se výhoda této rychlosti neztratila, používá se i rychlejších převodníkových karet.

Díky použité vysoké integraci je delší střední doba mezi poruchami a je kratší doba opravy.

Existuje aliance výrobců této technologie – vzniká jednotný poměrně volný průmyslový standard, doporučení této aliance se stávají závaznými.

Existuje vrstva softwaru umožňující efektivní využívání tohoto hardware.

Blokové schéma sběru dat z číslicového měřicího přístroje (ČMP) do počítače (PC)**Blokové schéma sběru dat virtuálním měřicím přístrojem, vytvořeným v počítači****Blokové schéma sběru dat virtuálním měřicím přístrojem, když úprava signálu probíhá mimo počítač****Shrnutí pojmů 3.4.**

- Rozhraní sériové
- Rozhraní paralelní
- Virtuální přístroj
- VXI sběrnice

**Otázky 3.4.**

3.26 Co potřebujete ke sběru dat z měřicího přístroje do počítače

3.27 Co potřebujete k vytvoření virtuálního měřicího přístroje

4. MĚŘENÍ AKTIVNÍCH VELIČIN



Čas ke studiu: 1 hodina



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete

- umět měřit napětí a proud
- umět vybrat správný měřicí přístroj vzhledem k měřenému signálu
- znát zapisovací přístroje
- umět měřit výkony
- umět měřit frekvenci, periodu a fázový posun



Výklad

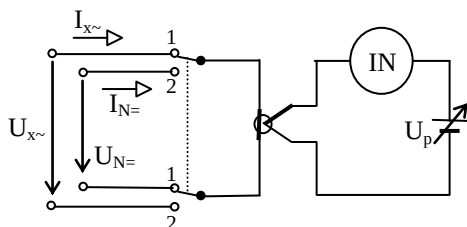
4.1 Měření proudu

Ampérmetry jsou základní přístroje pro přímé měření elektrického proudu. Jsou to buď analogové nebo číslicové měřicí přístroje.

Ampérmetry se zapojují do série k zátěži, jak je uvedeno např. v kapitole 1.1 Chyba metody.

Aby ampérmetry nezpůsobovaly chybu metody musely by mít nulový vnitřní odpor. K tomu se pouze více nebo méně přiblížíme.

Komparátor stejnosměrného a střídavého proudu využívá fyzikální definice efektivní hodnoty a používá se pro přesné definování efektivní hodnoty.



Komparátor stejnosměrného a střídavého proudu

Srovnávání stejnosměrného a střídavého proudu probíhá ve dvou krocích:

připojí se střídavý proud $I_{x\sim}$, jehož efektivní hodnota se hledá, a změnou pomocného napětí U_p vyvážíme komparátor tak, aby indikátor nuly ukazoval nulu

připojí se stejnosměrný proud $I_{N=}$ a jeho změnou opět vyvážíme komparátor (napětí U_p se nesmí změnit).

Pak efektivní hodnota proudu $I_{x\sim}$ je rovna proudu $I_{N=}$.

Klešťový ampérmetr je měřicí transformátor proudu s rozevratelným magnetickým obvodem. Vodič, v němž měříme proud, představuje jeden závit primárního vinutí. Z principu může měřit pouze střídavé proudy. Za sekundárním vinutím tedy musí následovat měřicí převodník na střední, efektivní nebo maximální hodnotu a poté analogový nebo číslicový přístroj. Takto lze měřit proud bez přerušení proudového okruhu.

Existují i klešťové přístroje, které umí měřit střídavý i stejnosměrný proud. Pak je v kleštích umístěna Hallova sonda. Takový přístroj potřebuje napájení.

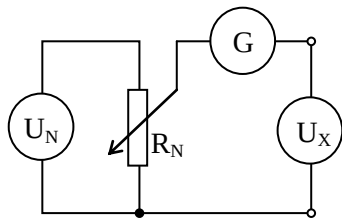
4.2 Měření napětí

Voltmetry jsou základní přístroje pro přímé měření elektrického napětí. Jsou to buď analogové nebo číslicové měřicí přístroje.

Voltmetry se zapojují paralelně k zátěži, jak je uvedeno např. v kapitole 1.1 Chyba metody.

Aby voltmetry nezpůsobovaly chybu metody musely by mít nekonečný vnitřní odpor. K tomu se pouze více nebo méně přiblížíme.

Napětové kompenzátory představují další možnost, jak měřit stejnosměrné napětí. Používají kompenzační metody měření. Měřené napětí U_x je srovnáváno se známým napětím U_N . Napětí se porovnávají pomocí galvanoměru. Při rovnosti napětí je proud nulový a galvanoměr ukazuje nulu. Z toho též vyplývá, že ve vyváženém stavu kompenzátor nezatěžuje měřený objekt. Jde tedy o měření bez spotřeby - chyba metody je nulová. Taky se dá říct, že vstupní odpor kompenzátoru je nekonečný. Díky této vlastnosti, a také díky tomu, že touto metodou se dají jednoduše měřit i velmi malá napětí, se různé modifikace kompenzačních zapojení stále používají.



4.2.1 Měření efektivní hodnoty analogovými měřicími přístroji.

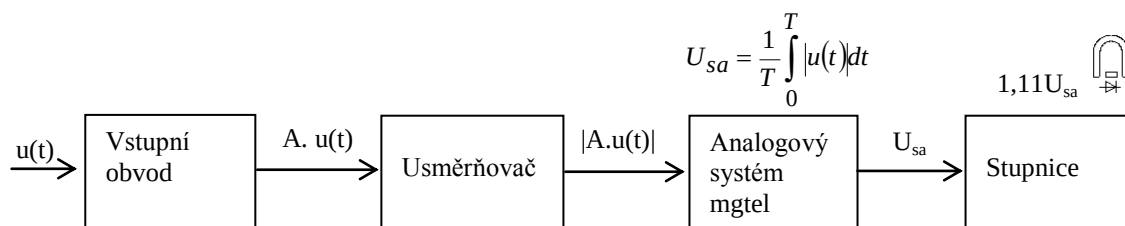
Výchylka AMP je způsobena fyzikálními účinky protékajícího proudu. Protože efektivní hodnota je úměrná kvadrátu měřené veličiny, budou přístroje, jejichž výchylka je úměrná kvadrátu proudu měřit přímo efektivní hodnotu, a to bez ohledu na tvar proudu.

Takto měří elektromagnetický (feromagnetický) a elektrodynamický systém. Běžné provozní přístroje mají třídu přesnosti 1,5 a víc a mají velkou spotřebu. Dalším problémem je jejich frekvenční rozsah. Elektromagnetické provozní přístroje mají frekvenční rozsah 100 Hz, tzn. že neharmonický signál o základní frekvenci 50 Hz smí obsahovat nejvyšší druhou harmonickou, aby naměřená efektivní hodnota byla správná.

Nejobvyklejší analogové měřicí přístroje a multimetry využívají magnetoelektrický systém. Ten ovšem umí měřit pouze stejnosměrný signál – jeho výchylka je úměrná proudu a reaguje i na polaritu. Protože je to ale systém s malou spotřebou a přesný, řeší se problém střídavého signálu usměrňovačem. Za ním umístěný magnetoelektrický systém změří střední aritmetickou hodnotu. Ta ovšem není zajímavá a je tedy nutno stupnici ocejchovat v efektivní hodnotě.

Z toho vzniká největší problém těchto přístrojů. Hodnota podílu efektivní a střední aritmetické hodnoty (činitel tvaru k_t) je pro každý tvar signálu jiná. Protože nejčastěji předpokládaný tvar průběhu je sinusový, mají měřicí přístroje s usměrňovačem stupnici cejchovanou v efektivní hodnotě pouze pro sinusový signál, tedy pro činitel tvaru $k_t = 1,11$.

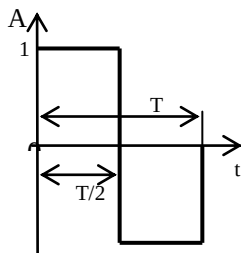
Pro každý jiný tvar průběhu - obdélník, pila, zkreslená sinusovka - neodpovídá údaj efektivní hodnotě! Po podělení tohoto údaje činitelem tvaru sinusovky ($k_t = 1,111$) získáme skutečnou aritmetickou střední hodnotu jakéhokoliv signálu.



Měření neharmonických signálů přístroji s usměrňovačem

Měříme obdélníkový průběh s amplitudou 1 a střídou 50 % (střída je podíl kladné části periody k periodě buď vyjádřeno bezrozměrně – v našem případě 0,5, nebo v procentech).

Měřicí přístroj s usměrňovačem zjistí střední aritmetickou hodnotu tohoto průběhu



$$U_{sa} = \frac{1}{T} \int_0^T |u(t)| dt = \frac{1}{T} \int_0^T 1 \cdot dt = \frac{1}{T} T = 1.$$

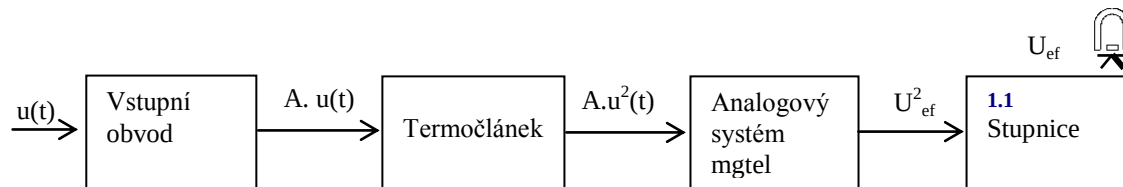
Na stupnici či displeji však čteme efektivní hodnotu pro sinusový průběh, tzn. střední aritmetickou hodnotu přístroj vynásobí hodnotou 1,11. Takže zobrazená efektivní hodnota je $U_{ef} = 1,11$.

Skutečná efektivní hodnota tohoto průběhu je

$$U_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T 1^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} T} = 1$$

Rozdíl mezi skutečnou efektivní hodnotou a hodnotou čtenou na přístroji s usměrňovačem je 11 %.

Aby bylo možné měřit efektivní hodnotu i neharmonického signálu, vyrábějí se magnetoelektrické měřicí přístroje s termočlánekem. Výstupní napětí termočláneku je úměrné teplu vznikajícímu průchodem měřeného proudu. Výchylka takového přístroje je tedy úměrná efektivní hodnotě v širokém frekvenčním rozsahu (asi 100 kHz). Pokud na tento přístroj přivedeme kmitavý signál, změří efektivní hodnotu celého signálu, tzn. včetně stejnosměrné složky. Přesnost přístrojů je nejlépe 1,5; nevýhodou je velká setrvačnost a snadná přetížitelnost.



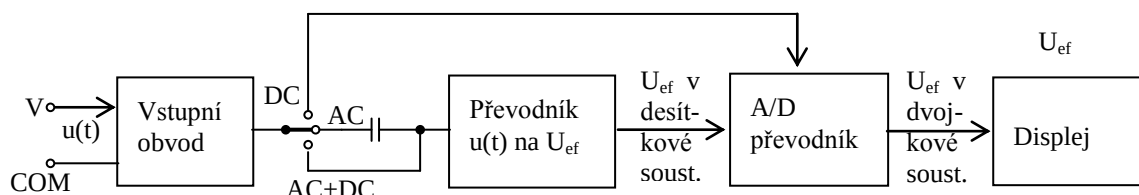
4.2.2 Měření efektivní hodnoty číslicovými měřicími přístroji.

Zde je převodníkem mezi měřenou veličinou a jejím zobrazením na displeji analogovo – digitální (A/D) převodník. Ve většině případů jsou použity pomalé integrační převodníky, které převádějí na číslo průměrnou hodnotu měřeného napětí za určitý časový interval. Dá se tedy říci, že správně budou převádět pouze stejnosměrné napětí.

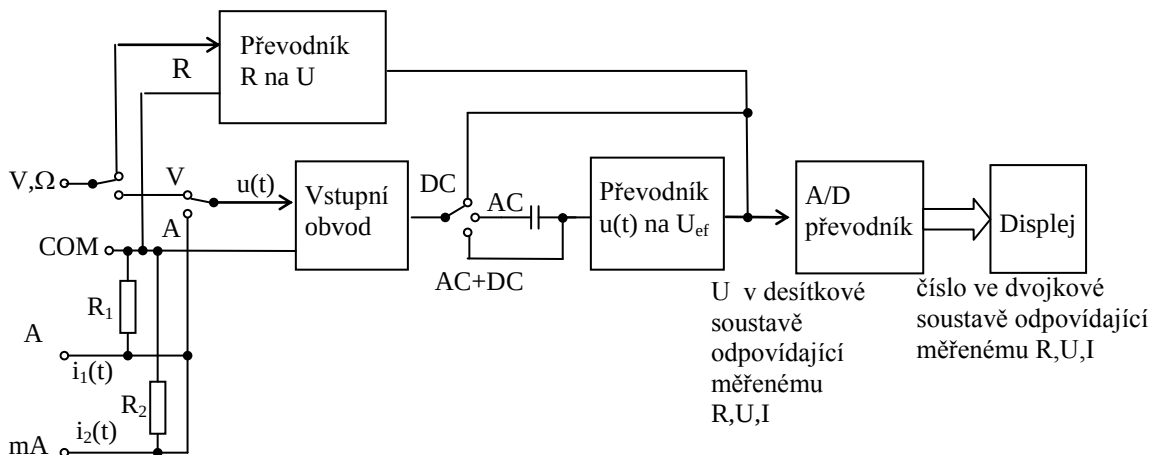
U levnějších číslicových multimetrů se pro měření střídavého signálu volí stejné řešení, jako u analogových přístrojů magnetoelektrických – předradí se usměrňovač. A opět efektivní hodnota je správná pouze pro sinusový signál. U dražších přístrojů se signál zpracuje podle matematické definice efektivní hodnoty – umocní se na druhou, provede se jeho integrál a odmocní se. Tento postup se také skrývá v anglickém označení efektivní hodnoty – Root Mean Square (RMS). Takto označené číslicové multimetry měří efektivní hodnotu střídavého signálu bez ohledu na tvar signálu.

Multimetry

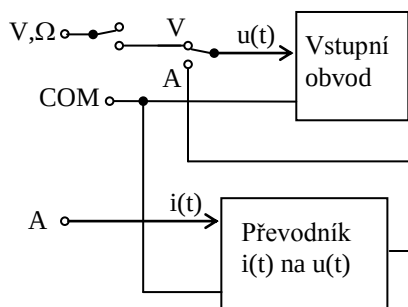
obecně dovolují měřit stejnosměrné (rozsah bývá označen DC) a střídavé signály (rozsah bývá označen AC, někdy RMS). Na rozsahu AC změříme efektivní hodnotu střídavé složky. Pokud měříme kmitavý signál, pak musí být na rozsahu AC zařazen kondenzátor, aby případnou stejnosměrnou hodnotu odfiltroval. Existují multimetry s rozsahem AC + DC (někdy bývá označen TRMS); na tomto rozsahu změříme efektivní hodnotu celého periodického signálu včetně případné stejnosměrné složky.



A/D převodníky převádí na číslo napětí. Pokud chceme měřit proud, pak jej musíme na napětí převést. Nejjednodušší způsob je zařadit mezi vstupní proudové svorky známý odpor a na něm snímat napětí pro A/D převodník. To ovšem znamená, že vstupní odpor ampérmetru nebude nulový.



U lepších multimetrů se proto na proudový vstup vřazuje převodník proud – napětí s operačním zesilovačem.



Další obvyklou veličinou měřenou multimetrem je odpor. Jako převodníku R na U lze použít invertujícího zesilovače.

Svorky označené $V, \Omega - COM - A - mA$ jsou vstupní zdířky multimetru, jednotlivé přepínače ze schématu jsou ve skutečnosti zastoupeny jedním rotačním přepínačem.

4.3 Zapisovací měřicí přístroje

Zaznamenávají průběh měřené veličiny ve formě

- dat,
- diagramu,
- vytištěných číselných hodnot.

4.3.1 Číslicový zapisovač

Záznam ve formě dat předpokládá navzorkování a digitalizaci signálu a následné uložení většinou okamžitých hodnot časového průběhu sledované obvodové veličiny v paměti počítače, nebo v paměti tzv. zapisovače přechodných dějů.

Je to způsob umožňující jakékoli operace s uloženými daty, včetně vykreslení na papír.

Jako číslicový zapisovač lze použít i číslicový osciloskop.

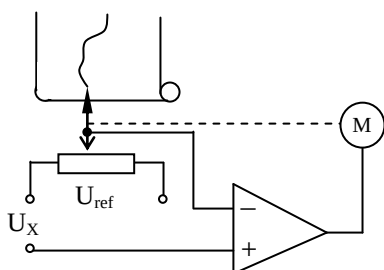
4.3.2 Analogové zapisovače

Záznam ve formě diagramu se obvykle provádí na papír písátkem. To může být např. fix, nebo vyhřívaný hrot, píšící na teplocitlivý papír. Možností je samozřejmě více.

V případě zapisovače časového průběhu je na papíře, odvíjejícím se zvolenou konstantní rychlostí, předkreslený rastr.

Lze zapsat také závislost dvou veličin na sobě – tzv. **souřadnicové zapisovače**.

Jako převodník mezi elektrickou veličinou a pohybem písátka může být použito některé analogové ústrojí. Pak jde o tzv. **přímopíšící zapisovače**. Protože v místě styku písátka s papírem dochází ke tření, musí být ústrojí robustní, aby pohybový moment byl dostatečný. Proto je spotřeba velká a ani přesnost není dobrá.



Nejpřesnější analogový zapisovač je tzv. **kompenzační zapisovač**. Je to vlastně samočinně vyvažovaný kompenzátor napětí. Protože obvykle obsahuje operační zesilovač, je jeho vstupní odpor velký (malá spotřeba) a chyby jsou řádu 0,1%. Protože jde o převod elektrické veličiny na mechanický pohyb, nelze zapisovat rychlé změny (jednotky Hz).

Takto zapsaný průběh slouží pouze k vizuální kontrole a následné archivaci dějů ve sledovaném obvodu.

Kompenzační zapisovač srovnává velikost měřeného napětí U_x s částí napětí U_{ref} vymezenou jezdcem potenciometru (jezdec je zároveň písátkem). Jestliže jsou napětí rozdílná, napětí na výstupu operačního zesilovače točí motorkem tak dlouho, dokud se napětí na vstupu OZ nevyrovnají.



Shrnutí pojmů 4.3.

- Komparátor stejnosměrného a střídavého proudu
- Napěťový kompenzátor
- Měření efektivní hodnoty
- Multimetry
- Kompenzační zapisovač
- Souřadnicový zapisovač



Otázky 4.3.

- 4.1 Jaký měřicí přístroj je nutno použít pro zjištění střední aritmetické hodnoty
- 4.2 Z jakých bloků je sestaven číslicový měřicí přístroj pro měření odporu
- 4.3 Co měří a co ukazuje číslicový měřicí přístroj s usměrňovačem při harmonických průbězích
- 4.4 Co měří a co ukazuje číslicový měřicí přístroj s usměrňovačem při neharmonických průbězích
- 4.5 Lze kompenzačním zapisovačem zapsat průběh efektivní hodnoty v čase?



Úlohy k řešení 4.3.

- 4.6 Jakou hodnotu naměří číslicový multimetr na AC rozsahu po připojení signálu $x(t) = 2 + 5 \cdot \sin(2\pi 200t)$.
- 4.7 Jakou hodnotu napětí nastavíte na střídavém rozsahu číslicového multimetru, jestliže sinusový signál má mít amplitudu 2 V.

4.4 Měření výkonu

V obvodu napájeném ze stejnosměrného zdroje je výkon odebíraný zátěží

$$P = UI. \quad (1)$$

Při měření výkonu střídavého proudu je součin okamžitých hodnot napětí a proudu okamžitý výkon

$$p(t) = u(t) \cdot i(t)$$

Protože to je hodnota proměnná, je definován činný (P), jalový (Q) nebo zdánlivý (S) výkon.

Zdánlivý výkon se zjišťuje ze součinu efektivních hodnot napětí a proudu

$$S = UI. \quad (2)$$

(z časového průběhu $p(t)$ je vidět, že je to maximální

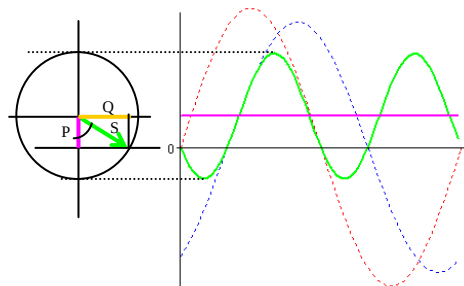
hodnota ze střídavé složky tohoto průběhu).

Činný výkon je střední hodnota ze součinu okamžitých hodnot napětí a proudu

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) i(t) dt. \quad (3)$$

Pro harmonický průběh napětí a proudu s efektivními hodnotami U a I a fázovým posunem φ platí pro činný výkon vztah

$$P = UI \cos \varphi, \quad (4)$$



$u(x)$
 $i(x)$
 $p(x)$
 P

pro jalový výkon vzorec

$$Q = UI \sin \varphi \quad (5)$$

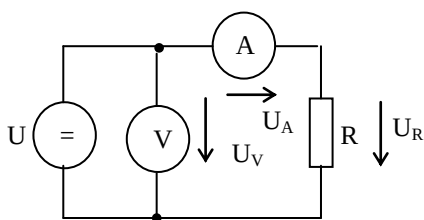
a zdánlivý výkon je jejich vektorovým součtem

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} . \quad (6)$$

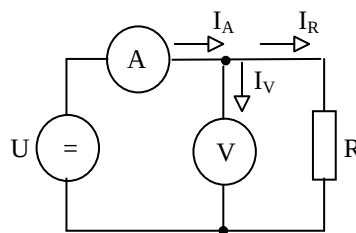
4.4.1 Měření činného výkonu

4.4.1.1 Měření činného výkonu stejnosměrného proudu

Z rovnice 1 je vidět, že tento výkon lze zjistit z naměřeného proudu a napětí. Voltmetr a ampérmetr lze zapojit dvěma způsoby.



Obr. 1



Obr. 2

Ze způsobu zapojení vyplývá chyba metody. Pokud uvažujeme s následným provedením korekce chyby metody, je v podstatě lhostejné, zda zapojíme voltmetr za ampérmetr či naopak. Obě zapojení jsou totiž naprosto rovnocenná, ovšem z praktického hlediska je výhodnější použít variantu s voltmetrem za ampérmetrem, protože voltmetry mají na rozdíl od ampérmetrů vždy uveden na stupnici jmenovitý odpor svého systému a nemusíme ho tudíž zjišťovat dalším měřením. Jiná je však situace, kdy neuvažujeme s provedením korekce výsledku (např. při rychlém orientačním měření). Pak může být výsledek měření zatížen poměrně značnou chybou metody a je nutné vybrat vhodnější zapojení.

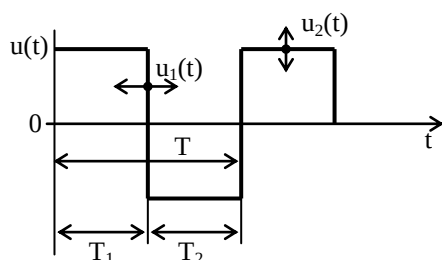
Pokud jde o výpočet chyby dané nepřesností měřicích přístrojů, je třeba si uvědomit, že v případě takto měřeného výkonu se jedná o nepřímé měření (měřenou veličinu musíme vypočítat z údajů ampérmetru a voltmetru) a protože výsledek je dán součinem naměřených veličin, výsledná relativní chyba bude rovna součtu dílčích relativních chyb.

K přímému měření elektrického činného výkonu se používají wattmetry.

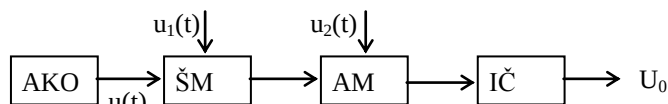
Analogové wattmetry pracují na principu elektrodynamického ústrojí, protože jen tento systém je schopen provádět násobení.

Analogové násobení je možno provádět také např. modulační násobičkou. Na tomto principu pracují některé elektronické převodníky výkonu na stejnosměrný proud nebo napětí. Tyto hodnoty lze měřit stejnosměrným analogovým nebo číslicovým přístrojem, nebo je po převedení na číslicový údaj ukládat v paměti. Podobně pracují elektronické wattmetry, které mají přímo naměřenou hodnotu zobrazenou na analogové stupnici nebo na displeji. Ty mohou využívat i Hallovy násobičky.

Modulační násobička

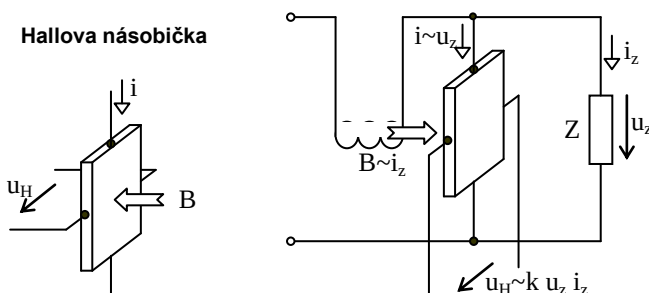


Nazývaná taky násobička s amplitudově-šířkovou modulací nebo TDM (Time Division Multiplier). Chyba takové násobičky je v desetinách procenta ve frekvenčním pásmu od nuly do zhruba 10 kHz.



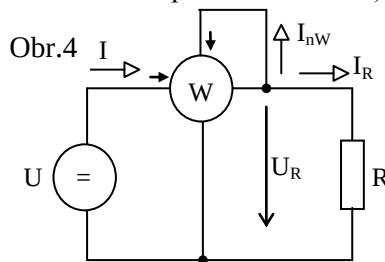
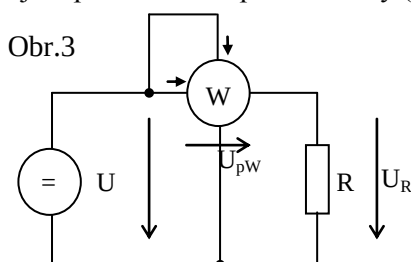
Astabilní klopný obvod (AKO) generuje střídavý obdélníkový průběh ($T_1 = T_2$). Obvod šířkové modulace (ŠM) mění dobu trvání T_1 a T_2 v závislosti na $u_1(t)$ při zachování periody T . Obvod amplitudové modulace (AM) mění amplitudu obdélníkového signálu v závislosti na $u_2(t)$. Integrovní členek (IČ) zjišťuje střední hodnotu takto modulovaného signálu, která je úměrná součinu okamžitých hodnot $u_1(t)$ a $u_2(t)$.

Hallová násobička



Působí-li na plochu destičky z polovodičového materiálu magnetické pole o indukci B , a protéká-li destičkou proud i , objeví se na zbývajících hranách Hallovo napětí $u_H \sim i B$. Tohoto jevu lze využít pro měření magnetických polí, ale i pro měření výkonu. Napětí u_H je nutno integrovat, abychom dostali stejnosměrnou hodnotu úměrnou činnému výkonu P .

Zapojení proudové a napěťové cívky (proudového a napěťového okruhu) je možné dvěma způsoby,



podobně jako při měření ampérmetrem a voltmetrem. Vnitřní odpory cívek vnášejí do měření chybu metody a pro volbu zapojení a výpočet chyby metody platí totéž, co je

uvedeno výše, jen ampérmetr je nahrazen proudovou a voltmetr napěťovou cívkou wattmetru.

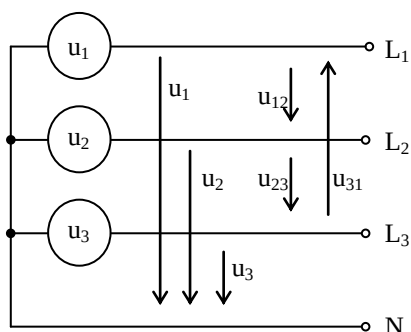
Protože jde o přímé měření je chyba údaje wattmetru počítána z třídy přesnosti wattmetru. Přitom je třeba si uvědomit, že přesnost, daná třídou přesnosti, platí za vztažných podmínek.

4.4.1.2 Měření jednofázového činného výkonu

Měření střídavého činného výkonu v jednofázové síti vychází z rovnice 3. Tomu odpovídá přímé měření wattmetry ať už elektrodynamickými, nebo elektronickými v zapojení podle obr. 3 nebo 4. Opět je třeba počítat s chybou metody i s chybou danou přesností přístroje.

Do zapojení podle obr. 3 nebo 4 je potřeba přidat ampérmetr do série s proudovou cívkou a voltmetr paralelně k napěťové cívice. To z toho důvodu, že plná výchylka wattmetru odpovídá připojení jmenovitého napětí, jmenovitého proudu a činné zátěže (pro wattmetr cejchovaný pro $\cos \varphi = 1$). Při jiném charakteru zátěže ($\cos \varphi \ll 1$) budeme mít snahu zmenšit proudový nebo napěťový rozsah, což může vést k destrukci wattmetru.

4.4.1.3 Měření třífázového činného výkonu



Činný výkon v třífázové soustavě je dán součtem výkonů v jednotlivých fázích

$$P = U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 + U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 + U_3 \cdot I_3 \cdot \cos \varphi_3$$

kde U_1, U_2, U_3 je fázové napětí, I_1, I_2, I_3 je proud fází a $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ úhel mezi příslušnými napětími a proudy.

Při měření třífázového činného výkonu může být několik variant konfigurace sítě v níž měříme.

1. Napájecí síť je obecná a

- a) má přístupný nulový vodič = čtyřvodičová síť
- b) nemá přístupný nulový vodič = třívodičová síť

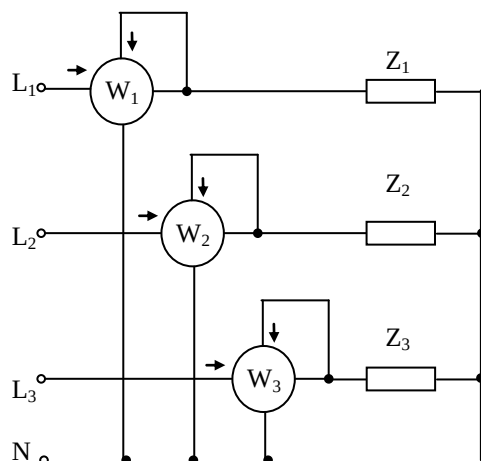
Obecná síť znamená obecné velikosti fázových napětí a obecné úhly mezi nimi.

Zvláštním případem je souměrná síť, tzn. fázová napětí mají stejnou velikost a úhly mezi nimi jsou 120° . Mezi fázemi je sdružené napětí. Jejich fázory tvoří rovnostranný trojúhelník. Sdružené napětí je $\sqrt{3}$ krát větší než fázové.

2. Zátěž je a) obecná
 b) souměrná

Podle Blondelova teorému v n-vodičové soustavě můžeme správně změřit činný výkon zátěže nejméně (n-1) wattmetry. Měření je správné při obecné soustavě napětí i obecné zátěži a i při nesinusovém průběhu proudu. Je zatíženo chybou metody způsobenou vlastní spotřebou měřicích systémů a chybou danou přesností přístrojů.

Obecná soustava napětí, obecná zátěž, čtyřvodičová síť:



Obr.5

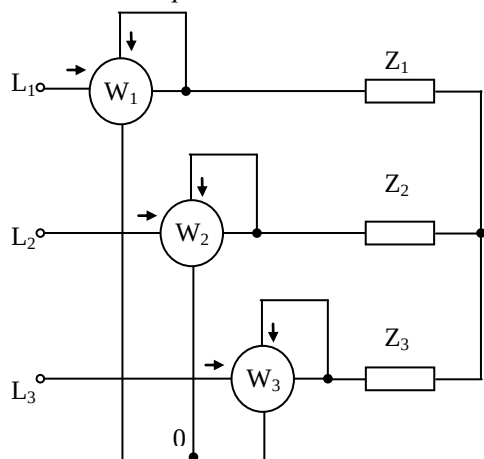
- napětňové cívky wattmetrů musí být zapojeny na fázové napětí. To je k dispozici.
- Dle Blondelova teorému musí být použito nejméně tři wattmetry. Údaj každého wattmetru je roven výkonu v dané fázi a součet údajů dává celkový třífázový výkon (obr. 5).

Souměrná soustava napětí, souměrná zátěž, čtyřvodičová síť:

- napětňové cívky wattmetrů musí být zapojeny na fázové napětí. To je k dispozici.
- Pro souměrnost napájení i zátěže jsou výkony ve všech fázích stejné.

Použije se tedy jeden wattmetr a jeho údaj se vynásobí třemi.

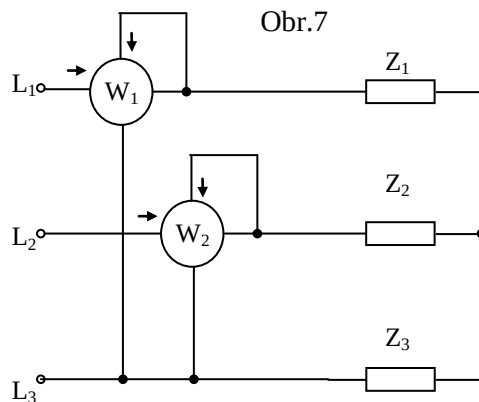
Obecná soustava napětí, obecná zátěž, třívodičová síť:



Obr. 6

- napětňové cívky wattmetrů musí být zapojeny na fázové napětí. To není k dispozici. Pokud chceme použít tři wattmetry musí se vytvořit tzv. umělá nula (obr. 6). Tu tvoří spojené konce napětňových cívek tří wattmetrů. Pokud vnitřní odpory wattmetrů nejsou shodné, pak údaje wattmetrů neodpovídají výkonům v jednotlivých fázích, ale součet údajů dává celkový třífázový výkon.

- dle Blondelova teorému stačí pro měření dva wattmetry. Tomuto zapojení se říká Aronovo a lze jej použít pro souměrnou i nesouměrnou (obecnou) soustavu napětí, souměrnou i nesouměrnou (obecnou) zátěž, vždy však třívodičovou síť.



Obr.7

Souměrná soustava napětí, souměrná zátěž, třívodičová síť:

- pro souměrnost napájení i zátěže jsou výkony ve všech fázích stejné. Stačil by tedy jeden wattmetr. Kvůli vytvoření umělé nuly však potřebujeme ještě dva odpory o velikosti rovné odporu napěťové cívky použitého wattmetru. Údaj wattmetru se vynásobí třemi.
- Běžnější je použití Aronova zapojení (obr.7).

Aronovo zapojení

Při měření třemi wattmetry v třívodičové síti podle obr. 6 je celkový výkon dán součtem výkonů naměřených jednotlivými

$$\text{wattmetry } P = P_{W1} + P_{W2} + P_{W3} = \frac{1}{T} \int_{t=0}^T (u_1 i_1 + u_2 i_2 + u_3 i_3) dt.$$

Pro proudy v třívodičové síti platí $i_1 + i_2 + i_3 = 0$ takže $i_3 = -(i_1 + i_2)$. Další úpravou rovnice pro celkový výkon dojdeme k Aronovu zapojení

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{T} \int_{t=0}^T (u_1 i_1 + u_2 i_2 + u_3 i_3) dt = \frac{1}{T} \int_{t=0}^T (u_1 i_1 + u_2 i_2 - u_3 (i_1 + i_2)) dt = \frac{1}{T} \int_{t=0}^T [(u_1 - u_3) i_1 + (u_2 - u_3) i_2] dt = \\ &= \frac{1}{T} \int_{t=0}^T (u_{13} i_1 + u_{23} i_2) dt = P_{W1} + P_{W2} \end{aligned}$$

Pro **souměrný zdroj a souměrnou zátěž** lze Aronova zapojení použít i pro měření jalového výkonu.

Výchyly wattmetrů jsou úměrné těmto rovnicím:

$$P_{w1} = U_{13} I \cos(30^\circ - \varphi) = U_S I (\cos 30^\circ \cos \varphi + \sin 30^\circ \sin \varphi)$$

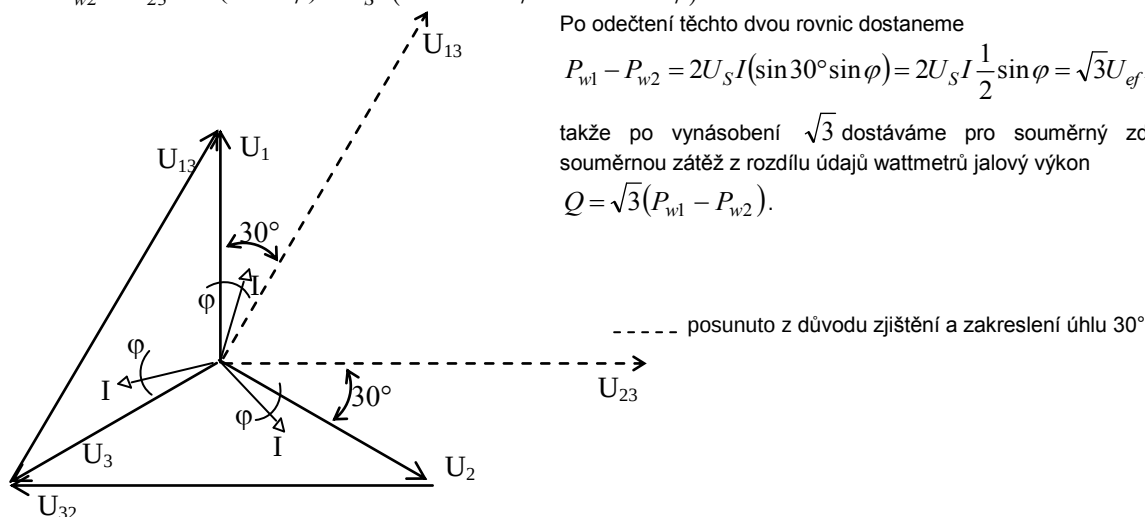
$$P_{w2} = U_{23} I \cos(30^\circ + \varphi) = U_S I (\cos 30^\circ \cos \varphi - \sin 30^\circ \sin \varphi)$$

Po odečtení těchto dvou rovnic dostaneme

$$P_{w1} - P_{w2} = 2U_S I (\sin 30^\circ \sin \varphi) = 2U_S I \frac{1}{2} \sin \varphi = \sqrt{3} U_{ef} I \sin \varphi$$

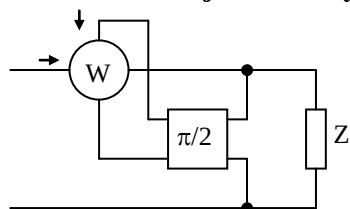
takže po vynásobení $\sqrt{3}$ dostáváme pro souměrný zdroj a souměrnou zátěž z rozdílu údajů wattmetrů jalový výkon

$$Q = \sqrt{3} (P_{w1} - P_{w2}).$$



4.4.2 Měření jalového výkonu

4.4.2.1 Měření jalového výkonu v jednofázové síti



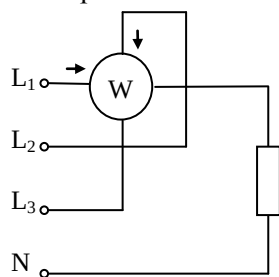
Obr.:8

Podle rovnic 4 a 5 je mezi činným a jalovým výkonem posun o 90° . Takže pokud se natočí napětí na napěťové cívce wattmetru o 90° proti napětí na zátěži, bude wattmetr měřit jalový výkon.

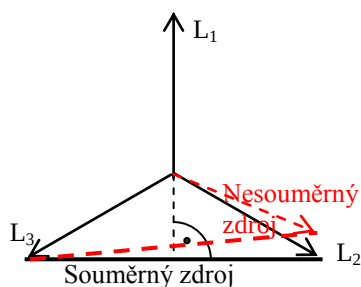
Pokud se napětí před a za blokem posuvu nerovná, musí se zjištěný výkon přepočítat.

Pokud spotřeba bloku posuvu bude pouze činná, chyba metody bude nulová. Chyba daná třídou přesnosti přístroje musí brát v úvahu případnou konstantu přenosu napětí (nepřímé měření).

V případě, že je k dispozici souměrný třífázový zdroj, lze využít toho, že mezi fázovým napětím např. první fáze a sruženým napětím mezi druhou a třetí fází je právě 90° . **To bude platit přesně jen pro souměrný zdroj.** Naměřený výkon bude ale $\sqrt{3}$ krát větší. Varmetry analogové i elektronické už mají dělení provedeno a ukazují správnou hodnotu.



Obr.:9

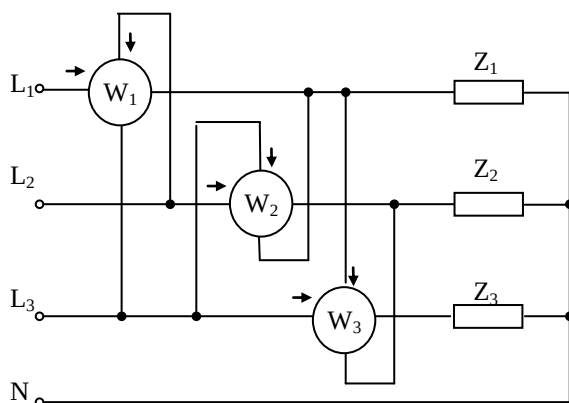


Obr.:10

Chyba údaje přístroje daná třídou přesnosti se musí podělit $\sqrt{3}$. Varmetry mají už dělení v chybě zahrnuto.

4.4.2.2 Měření jalového výkonu v trojfázové síti

- Obvyklé zapojení pro měření jalového výkonu v třífázové síti vychází z úvahy uvedené pro jednofázové měření. V případě



Obr.:11

souměrného zdroje a obecné zátěže se použijí tři wattmetry (obr.:11). Údaje wattmetrů podělené $\sqrt{3}$ odpovídají výkonům v jednotlivých fázích, a součet údajů podělený $\sqrt{3}$ dává celkový třífázový výkon.

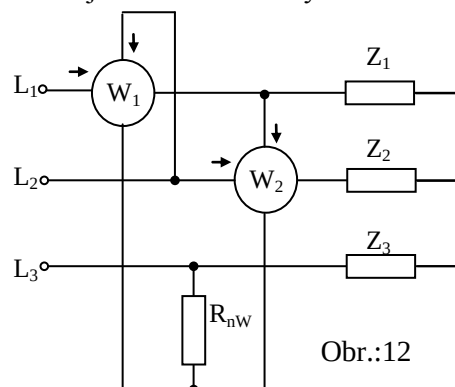
- V případě obecného zdroje a obecné zátěže je třeba pro natočení napětí o 90° použít blok posuvu pro všechny wattmetry.
- V případě souměrného zdroje a souměrné zátěže lze použít Aronova zapojení i pro měření jalového výkonu.

Ve všech měřeních je potřeba znát sled fází a správně zapojit vstupní a výstupní svorky proudových a napěťových vstupů.

Celková chyba měření jalového výkonu je dána součtem absolutních chyb jednotlivých přístrojů. Při měření jalového výkonu podle obr. 11 se tento součet dělí $\sqrt{3}$, u Aronova zapojení se násobí $\sqrt{3}$.

Vícesystémové varmetry analogové nebo elektronické mají uvedenu jednu celkovou chybu.

Pro **souměrný zdroj** a **nesouměrnou zátěž** existuje modifikované Aronovo zapojení (někdy se označuje jako zapojení s umělým zapojením napěťových cívek) pro měření jalového výkonu. Úprava vychází opět z úvahy, že napětí na cívkách wattmetru je třeba posunout o 90° (v Aronově zapojení). Tzn. napěťová cívka prvního wattmetru se musí přepojit ze sruženého napětí u_{13} na fázové napětí u_2 , napěťová cívka druhého wattmetru se musí přepojit ze sruženého napětí u_{23} na fázové napětí u_1 . Protože není k dispozici nulový vodič, je třeba vytvořit umělou nulu vložením odporu o stejné velikosti, jako jsou odpory napěťových cívek použitých wattmetrů (R_{nw}). Pro

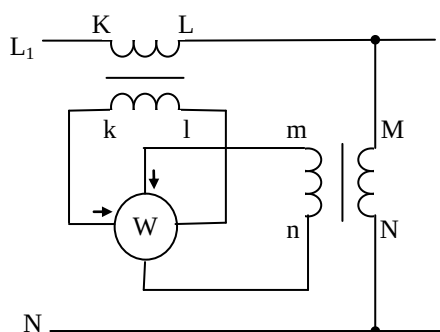


Obr.:12

výpočet jalového odporu platí vztah

$$Q = \sqrt{3}(P_{w1} - P_{w2}).$$

Pokud proudy nebo napětí v měřeném obvodu neodpovídají rozsahům wattmetru, který je k dispozici, lze použít měřicích transformátorů proudu nebo napětí.

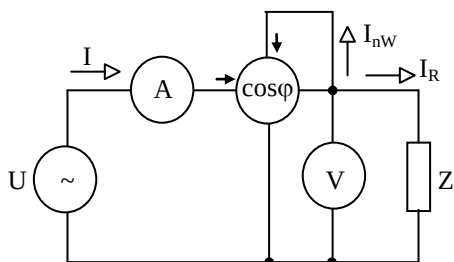


Tam, kde záleží na polaritě napětí a směru proudu (měření wattmetru, elektroměry, fázoměry), je třeba dbát na označení svorek. Napětí jde od svorky M ke svorce N, proud jde od svorky K ke svorce L.

4.4.3 Měření zdánlivého výkonu

Zdánlivý výkon se měří nepřímou, počítá se z proudu a napětí. Při zjišťování chyby metody jsme ve stejné situaci, jako při měření impedance – chybu můžeme pouze odhadnout, ale ne vypočítat.

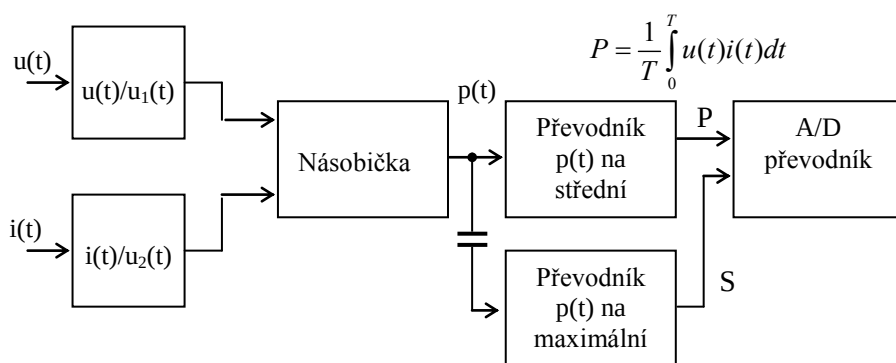
4.4.4 Měření účinníku



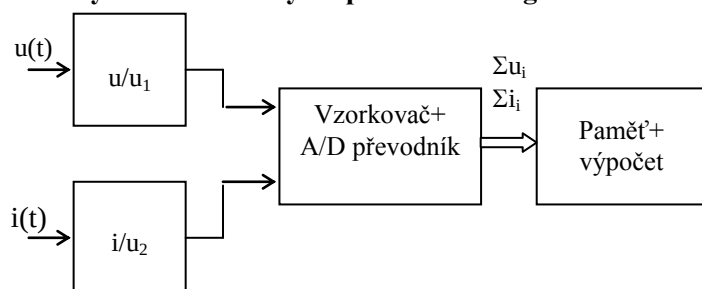
Pro měření účinníku lze použít $\cos\varphi$ -metru (měřiče účinníku). Může to být elektrodynamický poměrový přístroj, nebo také elektronický přístroj a zapojuje se jako wattmetr.

4.4.5 Možná řešení elektronických převodníků výkonu

Převodník výkonu s analogovým zpracováním signálu



Převodník výkonu s číslicovým zpracováním signálu





Shrnutí pojmů 4.4.

- Činný, jalový, zdánlivý výkon
- Čtyřvodičová síť
- Třívodičová síť
- Blondelův terém
- Aronovo zapojení
- Měření účinníku



Otázky 4.4.

- 4.8 Jaké analogové ústrojí se používá pro měření činného výkonu
- 4.9 Jak to, že při střídavém napájení spotřebiče měří wattmetr činný výkon
- 4.10 Z jakých bloků může být sestaven číslicový wattmetr
- 4.11 Čemu se rovná konstanta analogového wattmetru

4.5 Měření kmitočtu a fázového posunu

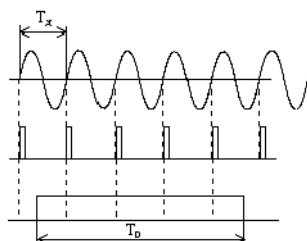
Kmitočtoměr je přístroj k měření kmitočtu periodicky proměnné obvodové veličiny.

Pro technické kmitočty (silnoproudé rozvody) se používá rezonanční kmitočtoměr nebo jazýčkový kmitočtoměr (nazývaný též kmitoměr), založený na principu mechanické rezonance jazýčků rozkmitávaných působením střídavého magnetického pole cívky.

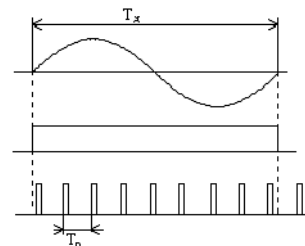
4.5.1 Univerzální čítače

Pro široké pásmo kmitočtů se používají elektronické číslicové měřiče kmitočtu - **univerzální čítače**. Pracují na principu čítání impulsů vytvářených z měřeného signálu ve známém časovém intervalu (přímé měření kmitočtu), nebo na čítání impulsů vestavěného generátoru přesné frekvence po dobu jedné nebo několika period měřeného signálu (kmitočet se zjišťuje nepřímo pomocí měření doby periody).

Kmitočet signálu lze také odečíst na analogovém nebo číslicovém osciloskopu (u analogového musíme samozřejmě dbát na to, aby platila kalibrace rastru). Přesnost zjištění bude na číslicovém samozřejmě lepší. Kmitočet lze zjistit také při zobrazení XY srovnáním se známým kmitočtem.



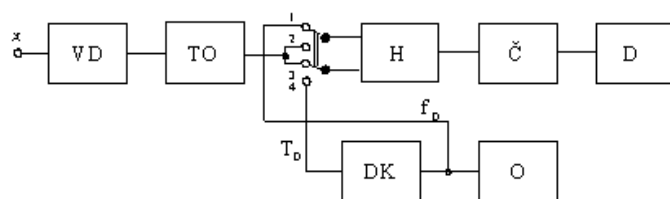
Každou periodu přemění tvarovací obvod na jeden impuls. (Okamžik vytvoření impulsu je dán zvolenou spouštěcí úrovní). Počet impulsů za známou dobu dá zjišťovanou frekvenci. (Jednotkou frekvence je Hertz a ten je definován jako počet period za jednu sekundu.)



Při měření periody nebo nízkých frekvencí se hradlo otvírá na dobu periody neznámého kmitočtu a čítají se impulsy o známé frekvenci.

Univerzální čítač

Hlavním obvodovým prvkem v blokovém schématu je hradlo H. Na jeho vstupy přivádíme přes přepínač měřený a známý kmitočet. V první poloze (1,3) bude přístroj měřit periodu signálu x - hradlo je otevíráno na dobu danou měřenou periodou a čítají se impulsy o známé frekvenci generované oscilátorem. V druhé poloze (2,4) bude přístroj měřit frekvenci - hradlo je otevíráno na dobu danou známou periodou T_0 a čítají se impulsy odvozené od neznámé frekvence.



VD - vstupní dělič
TO - tvarovací obvod
H - hradlo
Č - čítač
D - displej
DK - dělič kmitočtu
O - oscilátor

Univerzální čítač je obvykle tvořen dvěma shodnými kanály A, B, které obsahují mimo vstupních zesilovačů též tvarovače signálu a spouštěcí obvody s nastavitelnou úrovní spouštění, přičemž je možno volit náběžnou nebo sestupnou spouštěcí hranu vstupního signálu. Univerzální čítače umožňují přesné měření

- kmitočtu
- periody
- časových intervalů
- šířky impulsů
- strmosti hran
- poměru kmitočtů

Univerzální čítače jsou přístroje obecně velmi přesné. Známy kmitočet je totiž odvozen z rezonance krystalu. Běžně je chyba časové základny 10^{-4} - 10^{-5} , s termostaticací krystalu 10^{-7} - 10^{-8} . Základní kmitočet krystalového oscilátoru bývá 1÷10 MHz, dělením bývá získána možnost otevření hradla až 10 s. Počet míst na displeji 8 až 10.

Lissajoussovy obrazce (čti Lisažus)

Na jeden pár vychylovacích destiček přivádíme napětí jednoho signálu a na druhý pár napětí druhého signálu. Jsou-li kmitočty obou signálů stejné, zobrazí se na stínítku obrazovky šikmá úsečka, která může přes elipsu přecházet až v kružnici podle vzájemného fázového posunu obou signálů.

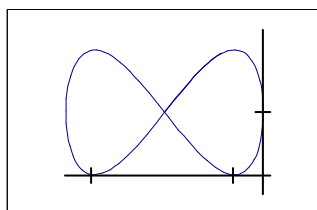
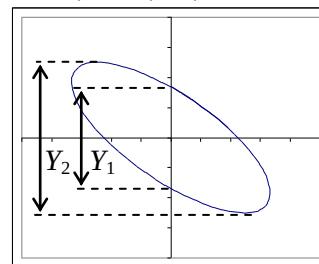
$$\varphi = \arcsin \frac{X_1}{X_2} = \arcsin \frac{Y_1}{Y_2} = 2 \arctg \frac{Y_2}{X_1}$$

Bude-li hlavní osa nakloněna pod úhlem 45° , pak měřený fázový posun může mít hodnoty $0 < \varphi < 90^\circ$ nebo $270^\circ < \varphi < 360^\circ$, tzn. tato metoda nerozlišuje jednoznačně kvadrant, v kterém úhel φ leží a je nutno použít ještě další informace o měřených napětích. Celková přesnost je nejvýše $\pm 5\%$.

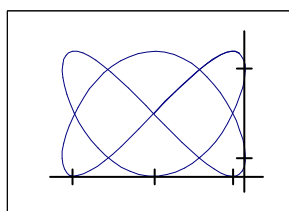
Při jiném poměru kmitočtů jsou obrazce složitější a měřený kmitočet vypočítáme ze

$$\text{vztahu } f_x = f_n \frac{n_n}{n_x}$$

kde f_x je měřený kmitočet (přiveden na vertikální destičky - vstup Y)
 f_n známý normálový kmitočet (přiveden na horizontální destičky - vstup X)
 n_x počet dotkových bodů se svislou stranou myšleného opsaného obdélníka
 n_n počet dotkových bodů s vodorovnou stranou opsaného obdélníka



$f_x = 200 \text{ Hz}$ pro
 $f_n = 100 \text{ Hz}$



$f_x = 150 \text{ Hz}$ pro
 $f_n = 100 \text{ Hz}$

4.5.2 Měření fázového posunu

Fázoměry jsou přístroje k měření fázového rozdílu (posuvu nebo posunu) mezi dvěma periodickými obvodovými veličinami o stejném kmitočtu.

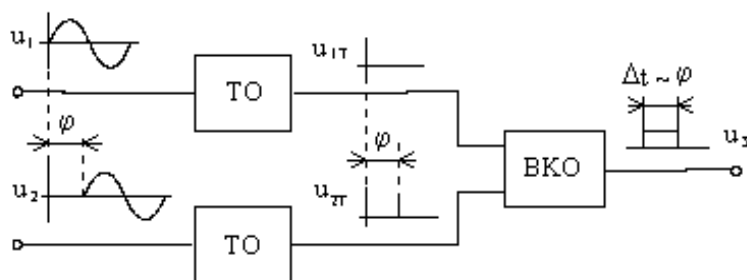
Fázový rozdíl mezi dvěma stejnými elektrickými veličinami lze pozorovat a odečíst na dvoukanálovém analogovém nebo číslicovém osciloskopu. Přesnost zjištění bude na číslicovém samozřejmě lepší. Fázový rozdíl lze změřit také při zobrazení XY.

Jednouúčelový číslicový fázoměr obsahuje převodník fázového posunu na délku impulzu a čítač, který tuto délku převede na čas. Z této hodnoty a doby trvání periody přístroj vypočítá fázový posun.

Dražší univerzální čítače umožňují měřit fázový posun a to přímo ve stupních.

(Cosinus fázového rozdílu mezi dvěma různými elektrickými veličinami – napětím a proudem – se nazývá účinník. Analogový měřič účinníku pracuje s elektrodynamickým poměrovým ústrojím.)

Měření fázového posunu univerzálním čítačem



dostali přímo fázový posun, musíme ještě změřit délku periody signálu a fázový posun vypočítat.

Měření fázového posunu univerzálním čítačem převedeme na měření šířky impulsu převodníkem fázového posunu. Signál přivedeme zároveň na oba vstupy univerzálního čítače (je tedy nutné mít k dispozici čítač se dvěma vstupy). Jeden vstup (A) nastavíme tak, aby odstartoval vzestupnou hranou měřeného impulsu čítání vnitřních impulsů. Druhý vstup (B) sestupnou hranou měřeného impulsu čítání zastaví.

Takto zjistíme délku impulsu úměrnou fázovému posunu dvou signálů. Abychom

4.5.3 Kmitočtový analyzátor

Kmitočtové analyzátory poskytují informaci o tom, z jakých frekvenčních složek (harmonických) se skládá měřený signál.

Způsoby, jak toho dosáhnout jsou v podstatě dva:

- pomocí analogových nebo číslicových filtrů pevných či přeladitelných. Tento způsob, hlavně tzv. heterodynní princip, vede na kmitočtové analyzátory s širším frekvenčním pásmem – až desítky GHz.
- výpočtem Fourierovy transformace. Tento způsob předpokládá navzorkování a digitalizaci signálu. Výpočtem rychlou Fourierovou transformací získáme nejen amplitudy jednotlivých harmonických, ale lze zjistit i jejich fázi. Kromě toho lze s uloženými vzorky provádět i další matematické operace. Hlavním obvodem tohoto způsobu analýzy je A/D převodník, což je také obvod který limituje frekvenční rozsah takto realizovaného kmitočtového analyzátoru – přibližně do 100 kHz.

Kmitočtové analyzátory se vyrábějí jako samostatné přístroje s výstupem na obrazovku, zapisovač, nebo tiskárnu, jako zásuvné jednotky do osciloskopů, nebo jako zásuvné karty do počítačů doplněné příslušným programovým vybavením.



Shrnutí pojmů 4.5.

- Univerzální čítače
- Lissajousovy obrazce
- Měřič fázového posunu
- Kmitočtový analyzátor



Otázky 4.5.

- 4.12 Na jakém principu pracují univerzální čítače při přímém měření kmitočtu
- 4.13 Na jakém principu pracují univerzální čítače při přímém měření periody
- 4.14 Lze změřit účinník osciloskopem?
- 4.15 Co je to kmitočtový analyzátor

5. MĚŘENÍ PASIVNÍCH VELIČIN



Čas ke studiu: 2 hodiny



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- měřit odpory
- měřit impedance



Výklad

Metody měření parametrů rezistorů, cívek a kondenzátorů závisí na tom, zda jejich velikost je závislá na nastavení pracovního bodu (např. na velikosti proudu, frekvence atp.).

Pokud není, pak se jako nejjednodušší metoda měření jeví použití ohmmetru pro měření odporu a měřiče impedance (popř. LCR měřiče) pro cívky a kondenzátory.

Pokud zde závislost je, pak nejobvyklejším je měření Ohmovou metodou. V případě impedancí se ampérmetr a voltmetr doplní wattmetrem pro zjištění činné složky impedance.

Velikost odporu

Způsob měření odporu bude záviset na jeho velikosti

- jestliže hodnota měřeného odporu je srovnatelná s odpory přírodních vodičů nebo s přechodovými odpory svorek, pak se jedná o malé odpory.
- jestliže poměr velikosti parazitních svodových proudů a proudu protékajícího měřeným odporem je srovnatelný s požadovanou relativní chybou měření, pak se jedná o velké odpory.
- odpory s velikostí mezi těmito extrémami jsou střední odpory

5.1 Měření ohmmetrem

Nejnižší rozsah ohmmetru v číslicovém multimetru je obvykle 100 Ω . Proto při měření malých odporů bude přesnost malá nejenom díky vlivu odporu přírodních vodičů a přechodových odporů (viz. příklad).

Vliv odporu přírodních vodičů a přechodových odporů lze omezit u multimetrů, které umožňují tzv. relativní měření (eliminují odpor přírodních vodičů tlačítkem ZERO).

Přesnější stolní číslicové multimetry obvykle umožňují tzv. čtyřvodičové měření malých odporů.

Ohmmetry

jsou měřicí přístroje udávající velikost odporu přímo v ohmech. Ve většině případů (kromě analogových poměrových ohmmetrů) jsou součástí multimetrů.

U analogových multimetrů se zpravidla využívá magnetoelektrického ústrojí. Hodnota měřeného odporu se převádí na proud a odečítá na nelineární stupnici o rozsahu více dekád. Odečítání je tedy poměrně nepřesné, třída přesnosti multimetru ve funkci ohmmetru je řádově nejvýše jedno procento z délky stupnice (nikoliv z hodnoty rozsahu). Proto musíme znát délku stupnice (bývá uvedena v návodech či popisech přístrojů) a přímo při měření vypočítat chybu údaje v milimetrech. Potom při pohledu na stupnici a konkrétní výchylku odhadnout chybu přístroje v ohmech.

U číslicových multimetrů se měření odporu převádí převodníkem odpor - napětí na měření napětí. Měření je proto mnohem přesnější než u analogového měření. Nejpřesnějšími číslicovými přístroji můžeme měřit i malé odpory, protože většinou umožňují čtyřvodičové připojení měřeného objektu.

Příklad měření odporu

Změřte vnitřní odpor proudového vstupu na rozsahu 10 A multimetru MX 24.

1. metoda

Ampérmetr s přesností $\pm(1 + 0,1) \%$ na daném rozsahu zapojíme do obvodu, v němž teče proud 5 A. Paralelně k němu připojíme voltmetr s vnitřním odporem 10 M Ω a přesností $\pm 0,05 \%$ + 3 dig na rozsahu 200 mV (Metex, 4 a 1/2 místný displej). Voltmetr naměří 159,4 mV.

Vypočtený odpor 31,88 m Ω není zatížen chybou metody, pouze chybou přístrojů.

$$\delta_{2V} = \pm \frac{3}{19999} 100 = \pm 0,015 \% \quad \delta_{uV} = \pm \left(|\delta_1| + |\delta_2| \frac{X_R}{X_M} \right) = \pm \left(0,05 + 0,015 \frac{199,9}{159,4} \right) = \pm 0,07 \%$$

$$\delta_{uA} = \pm \left(|\delta_1| + |\delta_2| \frac{X_R}{X_M} \right) = \pm \left(1 + 0,1 \frac{10}{5} \right) = \pm 1,2 \%$$

$$\delta_{uR} = \pm (\delta_{uV} + \delta_{uA}) = \pm (0,07 + 1,2) = \pm 1,27 \%. \quad \Delta_{uR} = \pm \frac{\delta_{uR} \cdot R}{100} = \pm \frac{1,27 \cdot 32}{100} = \pm 0,4 \text{ m}\Omega$$

Vnitřní odpor byl změřen s přesností 1,27 % a jeho hodnota je $(31,9 \pm 0,4) \Omega$.

2. metoda

Multimetr Metex byl použit jako ohmmetr. Nejnižší rozsah je 200Ω s přesností $\pm 0,2 \% + 10 \text{ dig}$.

Pokud se nepoužije relativní měření, bude výsledek zatížen chybou přírodních vodičů.

Přesto, že přístroj má docela velký počet míst zobrazitelných na displeji (19999), na změření odporu $32 \text{ m}\Omega$ to nestačí (vidíme zobrazeny setiny ohmu - $199,99 \Omega$). Asi bychom viděli nějaké číslo na posledním místě, ale z přesnosti je vidět, že chyba je 10 dig, tedy na předposledním místě. Výpočtem by chyba byla 312 %.

3. metoda

Přesný 6 a $\frac{1}{2}$ místný multimetr byl použit jako ohmmetr. Nejnižší rozsah je 150Ω s přesností $\pm (0,02 + 0,005) \%$.

Při dvou vodičovým připojení se naměřil odpor $79 \text{ m}\Omega$, při čtyřvodičovým $36 \text{ m}\Omega$. Hodnota $36 \text{ m}\Omega$ je hodnota nezátížená chybou metody, měřená s chybou přístroje 20 % $[(36 \pm 7) \text{ m}\Omega]$.

Závěr:

Z měření vyplývá, že nejpřesnější je 1. metoda, tedy zjištění vnitřního odporu ampérmetru z jím změřeného proudu a úbytku napětí na něm.

Číslicové RLC měřiče

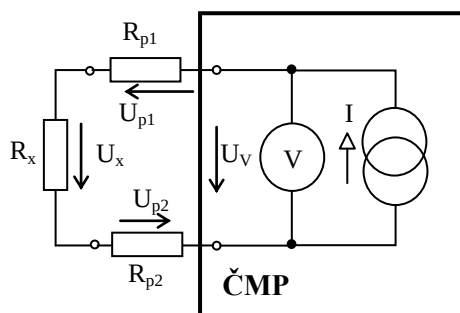
Základním obvodem je obvykle převodník $Z - U$. V převodníku $R - U$ se místo odporu R_2 zapojí měřená impedance (např. cívka, představovaná sériovou kombinací jejího odporu R_x a indukčnosti L_x). Za předpokladu ideálního operačního zesilovače platí $\frac{\bar{U}_1}{R_1} = -\frac{\bar{U}_2}{Z_x}$. Jestliže reálná složka $\text{Re} \bar{U}_2$ je ve fázi s napětím $\bar{U}_1$ a imaginární složka $\text{Im} \bar{U}_2$ je

$$\text{kolmá k } \bar{U}_1, \text{ pak } \bar{Z}_x = R_x + j\omega L_x = -\frac{R_1}{U_1} \text{Re} \bar{U}_2 - j \frac{R_1}{U_1} \text{Im} \bar{U}_2.$$

Měření probíhá s proudem i s frekvencí danými LCR měřičem. Obvyklá velikost proudu jsou stovky miliampér, lepší RLC měřiče umožňují volbu více frekvencí - např. 120 Hz a 1 kHz .

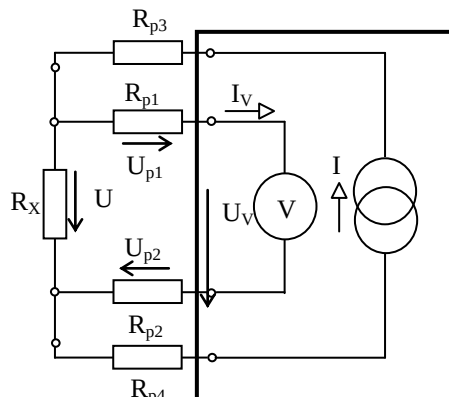
Měření malých odporů

Při měření malých odporů je třeba vyloučit vliv odporů přírodních vodičů a přechodových odporů, jejichž velikost může být srovnatelná s velikostí měřeného odporu. Toho se dá dosáhnout právě čtyřvodičovým připojením měřeného odporu R_x . Původní zapojení dvou vodičové se upraví tak, že se oddělí okruh napájecí od okruhu měřicího. Protože voltmetr má velký vnitřní odpor, protéká přírodními vodiči (R_{p1} , R_{p2}) k voltmetru proud mnohem menší, než proud do měřeného odporu. Proto jsou i úbytky napětí na těchto odporech zanedbatelné proti úbytku na měřeném odporu. Měřený odpor je však třeba připojit stejně, jak ukazuje čtyřvodičové schéma zapojení - měřicí okruh blíže měřenému odporu, napájecí okruh vně.



$$R'_x = \frac{U_V}{I} = \frac{U_{p1} + U_x + U_{p2}}{I} = R_x + \Delta_m$$

Dvou vodičové připojení měřeného odporu



Pro výpočet odporu R'_x platí stejný vztah, jen úbytky U_{p1} a U_{p2} jsou zanedbatelné (protože $I_v \ll I$). Proto se dá napsat, že $R_x = R'_x$.

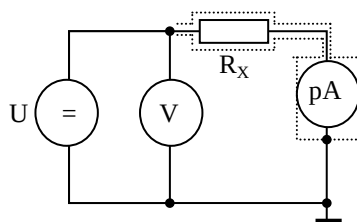
Čtyřvodičové připojení měřeného odporu

5.2 Ohmova metoda

Jde o nepřímé měření odporu výpočtem ze změřeného napětí a proudu. Voltmetr, ampérmetr a odpor lze zapojit dvěma způsoby (viz. kapitola Chyba metody). Ze zapojení vyplývá chyba metody. Celková chyba přístrojů se počítá podle pravidel pro nepřímá měření. Při měření impedancí je určení chyb složitější.

Ze zapojení, kdy voltmetr je připojen ke zdroji, vychází i způsob měření velkých odporů. Aby se neuplatnil svodový proud (měřený odpor se velikostí blíží izolačnímu odporu vodičů) a protože měřený proud je velmi malý (až pikoampéry) je třeba celé zapojení stínit a zemnit.

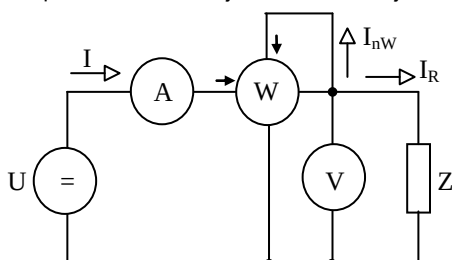
Měření velkých odporů



5.2.1 Měření parametrů tlumivek

Pro tlumivky jako cívky s feromagnetickým jádrem platí, že jejich parametry jsou závislé na proudu a frekvenci. Nelze proto měřit měřičem RLC, ani doměřovat odpor tlumivky stejnosměrným proudem. Nejobvyklejším je měření ampérmetrem, voltmetrem a wattmetrem.

Bod připojení voltmetru a napěťové cívky wattmetru je volen podle impedance cívky, v tomto případě tedy předpokládáme impedanci malou. Stejně zde ovšem dojde k chybě metody a její velikost je závislá na velikosti vnitřních odporů voltmetru a napěťové cívky wattmetru.

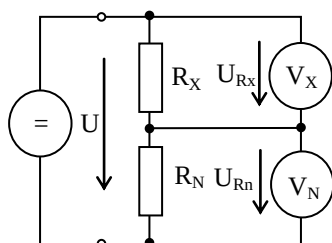


Wattmetr zde slouží k určení činného odporu cívky. Pokud zanedbáme chybu metody, pak odpor R_X vypočteme z údaje wattmetru $R_X = \frac{P}{I^2}$. Pokud nelze zanedbat chybu metody, pak od naměřeného výkonu odečteme ztrátu na cívce wattmetru, která chybu způsobuje (v případě uvedeného zapojení je to napěťová cívka).

5.3 Sériová srovnávací metoda

Metoda je vhodná zejména pro přesná měření malých odporů kdy nelze použít číslicový multimetr. Je však nutné mít odporový normál řádově stejné velikosti jako měřený odpor.

Při měření impedancí je tato metoda vhodná i pro vyšší frekvence.



Referenční odporový normál a měřený neznámý odpor jsou v tomto případě zapojeny v sérii na stejnosměrný napěťový zdroj.

Velikost měřeného odporu vypočítáme z úbytků napětí na odporech R_X , R_N podle

$$\text{vztahu } R_X = R_N \frac{U_{R_X}}{U_{R_N}}.$$

Úbytky napětí změříme nejlépe dvěma stejnými voltmetry. Pokud bude platit, že R_X a $R_N \ll R_V$, lze zanedbat chybu metody. Maximální možná chyba měření je daná součtem relativních chyb $\delta_{R_X} = \delta_{R_N} + \delta_{U_{R_X}} + \delta_{U_{R_N}}$ (nepřímé měření).

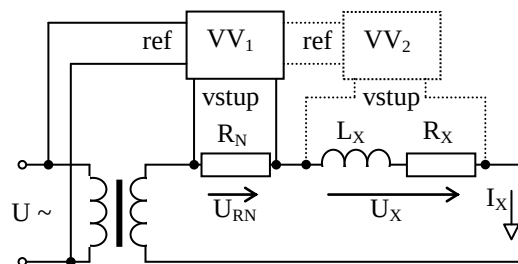
Tuto metodu lze použít i pro měření parametrů impedancí. Blok VV je tzv. vektorvoltmetr, tj. voltmetr, který umí měřit nejenom velikost napětí, ale i jeho fázový posun vůči zvolenému referenčnímu napětí.

Pro měřená napětí platí $\frac{\bar{U}_X}{R_X + j\omega L_X} = \frac{\bar{U}_{RN}}{R_N}$.

Po

úpravě $R_X = \frac{R_N}{U_{RN}^2} (\text{Re}U_X \text{Re}U_{RN} + \text{Im}U_X \text{Im}U_{RN})$,

$L_X = \frac{R_N}{\omega U_{RN}^2} (\text{Im}U_X \text{Re}U_{RN} - \text{Im}U_X \text{Re}U_{RN})$.



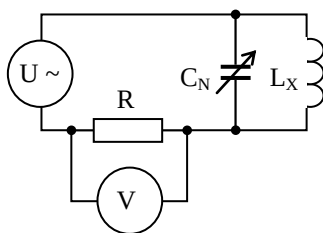
5.4 Substituční metoda

Metoda je vhodná zejména pro přesná porovnání skutečné hodnoty odporu dvou rezistorů stejných jmenovitých hodnot.

Liší se od srovnávací metody použitím odporové dekády místo odporového normálu. Hodnota dekády se mění tak dlouho, dokud napětí na obou prvcích (dekáda a neznámý odpor, měřeno stejným voltmetrem) není stejné. Chyba metody je nulová, chyba měření je dána přesností dekády (přesnost voltmetru můžeme zanedbat, protože v obou měřeních ukáže stejnou výchylku).

5.5 Rezonanční metody měření

Používají se pro měření indukčností cívek určených pro aplikace na frekvencích od stovek kHz výše. Na stejném principu pracují Q-metry, které umožňují měřit nejen indukčnost a kapacitu, ale i činitel jakosti cívek Q a ztrátový odpor kondenzátorů.



Na napětí zvolené frekvence je připojen paralelní obvod, tvořený měřenou cívkou a kapacitní dekádou. V případě rezonance (docílíme změnou kapacity) poteče do paralelního obvodu minimální proud, který indikujeme ampérmetrem nebo voltmetrem, který měří úbytek napětí na odporu R. Přístroje samozřejmě musí mít takový frekvenční rozsah, aby měřily při zvolené vysoké frekvenci. Indukčnost měřené cívky se

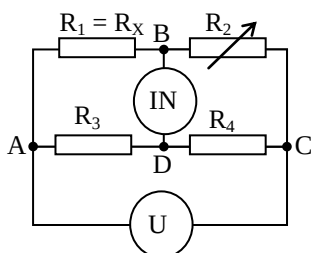
vypočítá $L_X = \frac{1}{\omega^2 C_N}$.

5.6 Můstkové metody

V současnosti se můstkové metody používají pouze pro velmi přesná měření. Pak se použije vyváženého Wheatstoneova můstku pro měření středních hodnot odporu nebo Thomsonova můstku pro měření malých hodnot odporu. Existují i střídavé můstky Wheatstoneova typu, ale kvůli problémům se stíněním a zdlouhavému vyvažování se přestávají používat.

Základem můstku je elektrický obvod složený ze dvou odporových (stejnosměrný měřicí můstek), nebo impedančních děličů (střídavý měřicí můstek). Jeden z děličů střídavého měřicího můstku může být nahrazen rozděleným vinutím transformátoru nebo autotransformátorem. Potom bývá měřicí můstek nazýván transformátorový měřicí můstek.

Přístroj dále obsahuje zdroj budicího signálu a tzv. nulový indikátor (např. galvanoměr). Po připojení měřeného prvku se obvod vyváží změnou nastavitelných odporů, impedancí nebo odbočkami transformátoru v můstkovém obvodu tak, aby nulový indikátor ukazoval nulový proud nebo napětí. Z nastavených hodnot odporů, příp. impedancí se pak stanoví odpor, příp. impedance měřeného prvku.



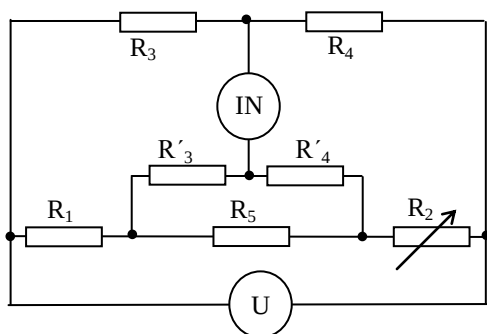
Wheatstoneův můstek

Stejnosměrný můstek sestává ze čtyř ohmických odporů zapojených dle obrázku. Mezi body AC (tzv. napájecí diagonála) je zapojen stejnosměrný zdroj a mezi body BD (tzv. měřicí diagonála) je indikátor vyvážení. Je-li můstek vyvážen, jsou body B a D ekvipotenciální a měřicí diagonálou neprotéká proud.

Podmínka rovnováhy Wheatstoneova můstku je dána vztahem $R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3$. Můžeme tedy určit jeden neznámý odpor, jsou-li ostatní známy. Přesnost měření je dána součtem relativních přesností použitých odporů (nepřímá měření).

Aby měřicí můstek měřil s vypočtenou přesností musí být dostatečně citlivý. Citlivost je obecně definována jako poměr změny výstupní veličiny ke změně měřené veličiny.

Tedy např. napěťová citlivost můstku $C_{mU} = \frac{\Delta U_{BD}}{\Delta R_1}$. To znamená, že i při malé změně měřeného odporu (nebo dekadý R_2) musí dojít k čitelné změně v měřicí diagonále.



Thomsonův můstek

V současné době se používá pouze pro velmi přesná měření malých hodnot odporů.

Platí stejná podmínka rovnováhy.

Pokud dále platí $R_3/R_4 = R'_3/R'_4$ pak odpor R_5 , který představuje odpory přechodové a přívodních vodičů se ve vyváženém stavu neuplatní.

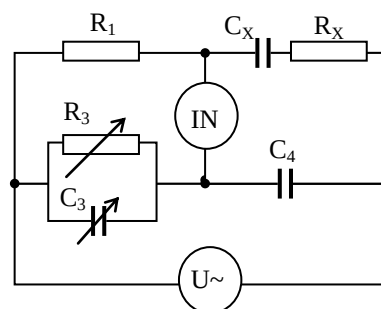
Střídavý můstek

Podmínka rovnováhy střídavého Wheatstoneova můstku je dána vztahem $\bar{Z}_1 \cdot \bar{Z}_4 = \bar{Z}_2 \cdot \bar{Z}_3$. Pro zjištění parametrů měřené impedance je třeba tuto podmínku rozdělit na reálnou a imaginární složku, tzn. musí být splněna rovnováha pro obě složky.

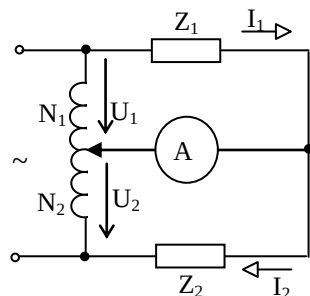
Zde uvedený střídavý můstek je Scheringův můstek pro měření kondenzátorů.

Kapacita se vypočte z hodnot prvků $C_x = C_4 \frac{R_3}{R_1}$, ztrátový odpor

kondenzátoru $R_x = R_1 \frac{C_3}{C_4}$.



Jde o frekvenčně nezávislý můstek, protože ani jeden ze vztahů neobsahuje frekvenci. Vyvažování složek je nezávislé – není zde společný prvek pro vyvažování reálné a imaginární složky.



Transformátorový měřicí můstek.

V okamžiku rovnováhy platí

$$\frac{U_1}{Z_1} = \frac{U_2}{Z_2} \Rightarrow \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$



Shrnutí pojmů 5.

- Ohmmetry
- Čtyřvodičové měření malých odporů
- Ohmova metody
- Sériová srovnávací metoda
- Substituční metoda
- Rezonanční metoda
- Wheatstoneův můstek
- Thomsonův můstek
- Transformátorový můstek



Otázky 5.

- 5.1 Kdy nelze použít ohmmetr pro měření odporu
- 5.2 K čemu se používá transformátorový měřicí můstek
- 5.3 Jak se vypočítá chyba měření odporů můstkovou metodou
- 5.4 Kdy použijete čtyřvodičové měření odporu
- 5.5 Jaké rušivé vlivy působí při měření velkých odporů

6. MAGNETICKÁ MĚŘENÍ



Čas ke studiu: 1 hodinu



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete umět

- měřit magnetické veličiny ve vzduchu
- měřit magnetické charakteristiky feromagnetických materiálů



Výklad

Základním úkolem magnetických měření je stanovení magnetických veličin, jako je intenzita magnetického pole H , magnetická indukce B nebo magnetický tok ϕ ve vzduchu nebo ve feromagnetiku, dále pak stanovení magnetických charakteristik při stejnosměrném nebo střídavém magnetování (závislosti $B = f(H)$), určení závislosti permeability μ na intenzitě magnetického pole atd.

Žádnou magnetickou veličinu neumíme měřit přímo; vždy ji převádíme na veličinu elektrickou, tedy napětí a proud. K tomu používáme převodníky, využívající buď vztahu mezi intenzitou a proudem (Ampérův zákon), nebo vztahu mezi elektrickým napětím a magnetickým tokem (indukční zákon).

Při měření charakteristik feromagnetických vzorků měříme jednak velikost magnetické indukce, jednak velikost skutečné intenzity magnetického pole. Dosud není známa metoda, která by umožňovala stanovení obou veličin přímo ve feromagnetiku. Na velikost magnetické indukce usuzujeme z velikosti indukovaného napětí ve vinutí těsně obepínajícím vzorek při změnách indukce, na intenzitu magnetického pole ve feromagnetiku usuzujeme z velikosti tangenciální složky pole nad povrchem vzorku. V některých případech je možno stanovit intenzitu pole z magnetizačního proudu, procházejícího budičím vinutím na vzorku.

Měření charakteristik feromagnetických materiálů provádíme buď na uzavřených, nebo otevřených vzorcích.

Vycházíme-li při stejnosměrném magnetování z odmagnetovaného stavu vzorku ($H = 0$, $B = 0$), pak při monotónním zvyšování magnetické intenzity se bude pracovní bod magnetovaného feromagnetika pohybovat po křivce prvotní magnetizace.

Pokud po dosažení maximální intenzity začneme intenzitu snižovat, nebudeme se již pohybovat po křivce prvotní magnetizace, ale přejdeme na hlavní hysterezní smyčku.

Magnetické veličiny

Ampérův zákon celkového proudu: $\sum I = \oint H dl$, pro homogenní pole intenzita $H = \frac{NI}{l}$ [A.m⁻¹]

(N – počet závitů, I – elektrický proud, l – délka střední siločáry).

Indukční zákon: $u_i = -N \frac{d\phi}{dt}$; tzn. aby se indukovalo napětí u_i , musí docházet ke změně magnetického toku ϕ .

Mezi magnetickým tokem a indukcí platí vztah $B = \frac{\phi}{S}$ [T; Wb, m⁻²], tzn. indukce je vlastně hustota toku.

Mezi magnetickou indukcí a intenzitou platí vztah $B = \mu_0 \mu_r H$. Ve vakuu a přibližně i ve vzduchu je relativní permeabilita prostředí μ_r rovna jedné. Protože $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ [H.m⁻¹] je konstanta, je v těchto dvou prostředích závislost

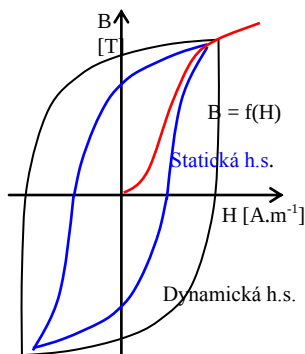
$B = f(H)$ lineární. Takže pokud zjistíme B můžeme vypočítat H a naopak. V každém jiném prostředí je závislost $B = f(H)$ nelineární.

Tato závislost je nejen nelineární, ale její okamžité hodnoty jsou závislé na předchozím stavu.

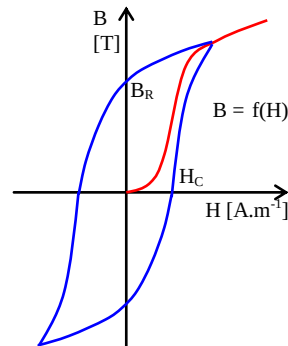
Takže v případě prvního magnetování materiálu (nebo po předchozím odsmagnetování) se při zvyšování proudu pohybujeme po tzv. křivce prvotní magnetizace (červená čára).

Indukce v bodě, od něhož závislost $B = f(H)$ zůstává lineární, se nazývá

indukce nasycení. Pokud v tomto bodě začneme snižovat intenzitu, dostaneme se na hlavní hysterezní smyčku (modrá čára). Hodnota indukce, která zůstává v materiálu při nulové intenzitě je tzv. remanentní indukce. Hodnota intenzity, která zůstává v materiálu při nulové indukci je tzv. koercitivní síla. Koercitivní síla H_C určuje velikost intenzity magnetického pole

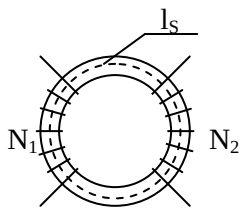


potřebné ke zrušení magnetické indukce ve vzorku, je to jedna z nejdůležitějších charakteristik feromagnetika, podle níž se feromagnetické materiály dělí na magneticky měkké a magneticky tvrdé. (Nijak to nesouvisí s mechanickými vlastnostmi!). Pokud bychom se s proudem vraceli z nižší hodnoty, než je indukce nasycení, dostaneme se na tzv. normální hysterezní smyčku.



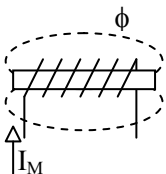
měřené charakteristiky (naměříme statickou hysterezní smyčku). Střídavé je takové, při němž magnetický tok ve feromagnetiku se mění periodicky s frekvencí vyšší než 10 Hz (naměříme dynamickou hysterezní smyčku). Magnetování při frekvenci nižší než 10 Hz jsou kvazistatická.

Při střídavém magnetování se ve feromagnetiku projevuje vliv vířivých proudů, dochází k nerovnoměrnému rozložení magnetické indukce v průřezu měřeného vzorku a k vzájemnému časovému posunu fází magnetické indukce a intenzity magnetického pole.



Uzavřené vzorky tvoří homogenní magnetický obvod s konstantním průřezem nepřerušovaný vzduchovou mezerou (např. toroid), nebo s mezerou vyplněnou jiným materiálem. V takovém vzorku se magnetický tok uzavírá pouze feromagnetikem. Velkou výhodou uzavřených vzorků je to, že můžeme intenzitu magnetického pole ve vzorku vypočítat z magnetizačního proudu, počtu závitů magnetizačního vinutí a střední délky siločar.

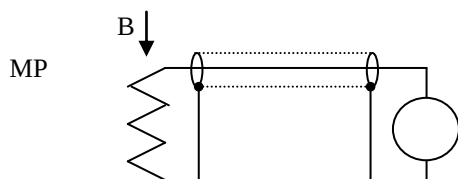
N_1 – počet závitů budícího (magnetizačního) vinutí
 N_2 – počet závitů měřícího vinutí



Otevřené vzorky mají obvykle tvar tyčí nebo pásků. Při měření se magnetický tok uzavírá vně vzorku vzduchem. Intenzita magnetického pole se tu nedá určit výpočtem z magnetizačního proudu a stanoví se proto měřením tečné složky intenzity pole nad povrchem vzorku. U těchto vzorků je velmi obtížné dosáhnout homogenního rozložení toku v celém objemu vzorku.

6.1 Magnetické převodníky

6.1.1 Měřicí cívka



Pro převod magnetické veličiny na elektrickou využívá vztahu

$$u_i = -N \frac{d\phi}{dt}, \text{ tzn. v cívce se bude indukovat napětí, jestliže bude}$$

docházet ke změně magnetického toku (indukce). Ve střídavém poli je tato podmínka automaticky splněna, ve stejnosměrném poli se změna musí nějak vyvolat (např. vypnutím magnetického pole,

vzdálením cívky z prostoru pole, otočením cívky). Cívka tedy může měřit pole stejnosměrné i střídavé, ve vzduchu i v magnetickém materiálu (ve vzduchu použijeme samonosnou cívku o známých rozměrech, na magnetický materiál cívku navineme).

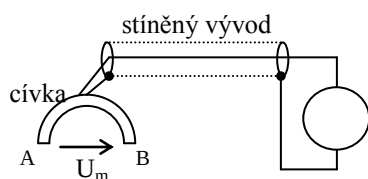
Aby mohl být měřicí přístroj MP cejchován ve Wb nebo v T, musí MP měřit střední hodnotu – integrovat.

Ve střídavém poli použijeme přístroj s usměrňovačem (magnetoelektrický nebo číslicový), z jehož údaje jsme schopni vypočítat střední aritmetickou hodnotu, protože mezi střední aritmetickou

hodnotou napětí a maximální hodnotou toku platí vztah $U_{SA} = \frac{2}{T} \int_{t_1}^{t_1+T/2} u_i dt = \frac{2}{T} \int_{-\Phi_m}^{+\Phi_m} d\phi_C = \frac{4\phi_m}{T}$. Maximální

hodnotu magnetické indukce pak lze vypočítat $B_m = \frac{U_{SA}}{4fSN} = \frac{U_{nam}}{4,44fSN}$ (U_{nam} je údaj MP s usměrňovačem).

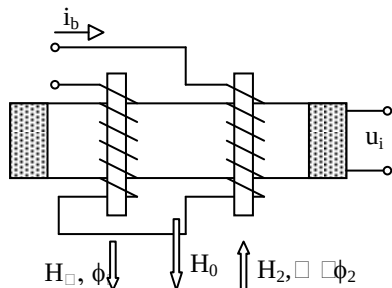
6.1.2 Rogowskiho cívka



Je to cívka s velkým počtem závitů navinutá z tenkého drátu (průměr 0,05 – 0,08 mm) na pásek z nevodivého a nemagnetického materiálu (vytváraný do oblouku nebo ohebný). Vinutí cívky bývá dvojvrstvé – začíná uprostřed délky pásku, vine se ke kraji, zpět k druhému konci a odtud opět ke středu, vývody jsou u sebe. Magnetický tok takto vytvořenou cívkou je úměrný magnetickému napětí U_M a to je úměrné intenzitě mezi body A a

B ($U_M = \int_A^B H dl$). Rogowskiho cívku lze použít pro měření stejnosměrných i střídavých polí ve vzduchu.

6.1.3 Feromagnetická sonda

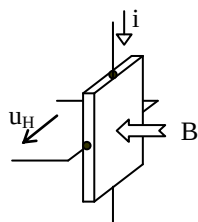


Je určena pro měření velmi slabých stejnosměrných i střídavých polí (až 10^{-5} A.m^{-1}) ve vzduchu.

Na dvou magneticky měkkých plíščích jsou navinuty cívky o stejném počtu závitů tak, aby střídavé magnetické toky byly v protifázi. Není-li sonda v magnetickém poli, je napětí indukované ve vnější cívce nulové.

Při vnějším stejnosměrném magnetickém poli H_0 se rovnováha poruší a ve vnější cívce se naindukuje střídavé napětí s amplitudou úměrnou poli H_0 .

6.1.4 Hallova sonda



Působí-li na plochu destičky z polovodičového materiálu magnetické pole o indukci B , a protéká-li destičkou proud i , objeví se na zbývajících hranách Hallovo napětí $u_H \sim i B$.

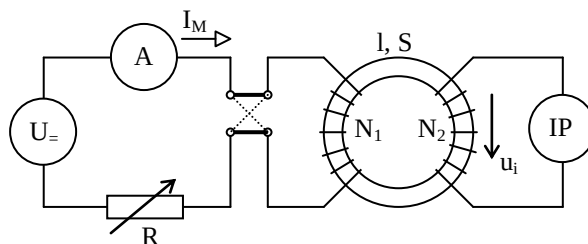
6.2 Měření magnetických charakteristik feromagnetických materiálů

Pro měření magnetických charakteristik je potřeba vytvořit z feromagnetických materiálů vzorek. Nejvýhodnější je vzorek uzavřený, pokud nelze z nějakého důvodu pořídit vzorek ve tvaru toroidu (uzavřený) lze měření uskutečnit i na vzorku otevřeném. Měření je však komplikovanější.

Všechna měření a schémata zde uváděná jsou na uzavřených vzorcích. Cívka s N_1 závitů je cívka budicí, která budí magnetický tok ve vzorku. Cívka s N_2 závitů je cívka měřicí a napětí v ní naindukované odpovídá změně toku v čase. Obě jsou rovnoměrně navinuty po celém obvodu vzorku, měřicí cívka se vine jako první.

6.2.1 Křivka prvotní magnetizace a statická hysterezní smyčka (stejnoseměrné magnetování)

Při skokové změně magnetizačního proudu ΔI_M dojde ke skokové změně magnetické intenzity ΔH - pro uzavřený vzorek platí vztah $\Delta H = \frac{\Delta I_M N_1}{l}$, kde N_1 je počet závitů magnetizační cívky, I_M je magnetizační proud a l je střední délka siločáry ve vzorku.



Jestliže IP bude integrační přístroj, tvořený například integračním zesilovačem s pasivními prvky R a C a voltmetrem pak při skokové změně magnetizačního proudu ΔI_M dojde ke skokové změně naindukovaného napětí Δu_i , z něhož vypočítáme změnu indukce $\Delta B = \frac{RC}{SN_2} \Delta U$. Součtem všech

přírůstků dostaneme celou křivku.

(R , C jsou parametry integrátoru, S je průřez vzorku v m^2 , N_2 je počet závitů měřicí cívky a ΔU je napětí za integrátorem. Vztah pro změnu indukce vyplývá z napětí za integrátorem a z naindukovaného napětí $u = \frac{1}{C} \int i_2 dt = \frac{1}{RC} \int u_i dt = \frac{1}{RC} \int N_2 \frac{d\phi}{dt} = \frac{1}{RC} N_2 S_T B$).

Při snižování magnetizačního proudu ΔI_M po dosažení bodu nasycení naměříme statickou hysterezní smyčku.

6.2.2 Střídavé charakteristiky

Výsledky střídavého měření jsou závislé jak na nelinearitě charakteristik, tak na použitém kmitočtu.

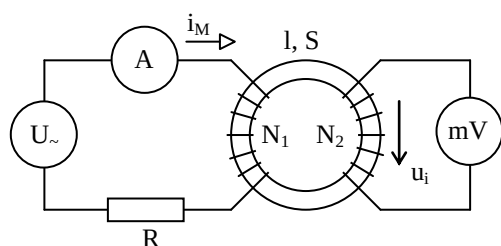
Nelineárnost závislosti indukce B na intenzitě H způsobí deformaci časového průběhu B i H .

Jestliže zaručíme sinusový průběh magnetizačního proudu (odpor vložený v obvodu magnetizačního proudu musí být větší než reaktance magnetizačního vinutí $R \gg \omega L_1$), pak průběh B se bude blížit obdélníku, tzn. bude obsahovat harmonické složky.

Splnění požadavku na sinusový průběh B je obtížnější. Je nutno zabezpečit, aby vložený odpor měřicích přístrojů byl zanedbatelný vůči reaktanci magnetizačního vinutí $R \ll \omega L_1$. Průběh H bude potom neharmonický.

V obou případech můžeme měřit závislost hodnot maximálních – amplitudová charakteristika $B_m = f(H_m)$, nebo závislost prvních harmonických – zdánlivá charakteristika $B_1 = f(H_1)$ (naindukované napětí měříme selektivním voltmetrem, naladěným na první harmonickou).

6.2.2.1 Měření amplitudové charakteristiky pro sinusové H



Pro uzavřený vzorek lze intenzitu vypočítat ze vztahu $H_m = \frac{N_1 I_{Mm}}{l}$, kde N_1 je počet závitů magnetizační cívky,

I_{Mm} je maximální hodnota magnetizačního proudu (protože se proud většinou měří běžným ampérmetrem cejkovaným v efektivních hodnotách, musíme maximální hodnotu proudu z naměřené hodnoty vypočítat!) a l je střední délka siločáry ve vzorku.

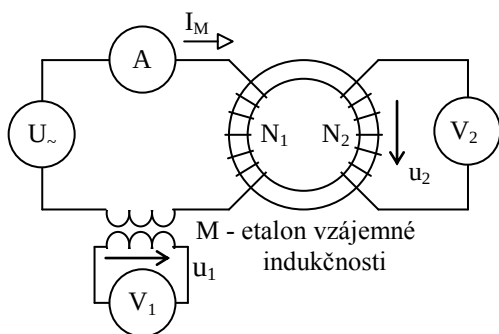
U otevřeného vzorku by se intenzita měřila Rogowskiho cívkou nebo Hallovou sondou na povrchu vzorku.

Maximální indukce se počítá ze vztahu $B_m = \frac{U_{nam}}{4,44 f S N_2}$, kde U_{nam} je údaj voltmetru s usměrňovačem!,

f je frekvence zdroje, S je průřez vzorku a N_2 je počet závitů měřicí cívky (odvození viz měřicí cívka). U otevřeného vzorku by se indukce měřila stejně.

6.2.2.2 Měření amplitudové charakteristiky pro sinusové B

Při sinusové indukci bude intenzita neharmonická. Toho se dosáhne tak, že vložený odpor měřících přístrojů bude zanedbatelný vůči reaktanci magnetizačního vinutí. Proto se měření magnetizačního proudu převádí přes etalon vzájemné indukčnosti na měření napětí.

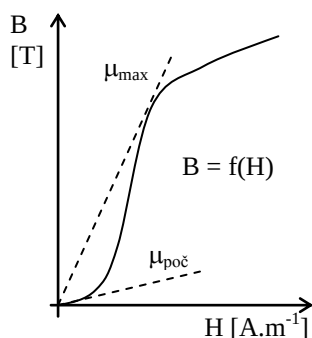


Pro uzavřený vzorek lze intenzitu vypočítat ze vztahu

$$H_m = \frac{N_1 U_{nam}}{4,44 f M l} \quad \text{kde } N_1 \text{ je počet závitů magnetizační cívky,}$$

U_{nam} je údaj voltmetru s usměrňovačem!, f je frekvence zdroje, M je vzájemná indučnost a l střední délka siločáry ve vzorku.

6.2.2.3 Zjištění amplitudové permeability

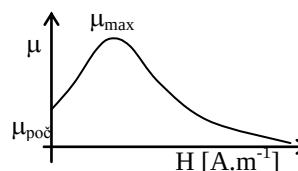


Hodnoty amplitudové permeability lze vypočítat z rovnice $\mu_A = \frac{B_m}{\mu_0 H_m}$.

Někdy nás zajímá pouze maximální permeabilita. Lze ji zjistit z hodnot indukce a intenzity v bodě dotyku tečny vedené z počátku k amplitudové charakteristice.

Počáteční permeabilitu lze zjistit ze směrnice přímky označené $\mu_{poč}$. Lze ji taky změřit v bodě s malou intenzitou, např. $0,4 \text{ A.m}^{-1}$.

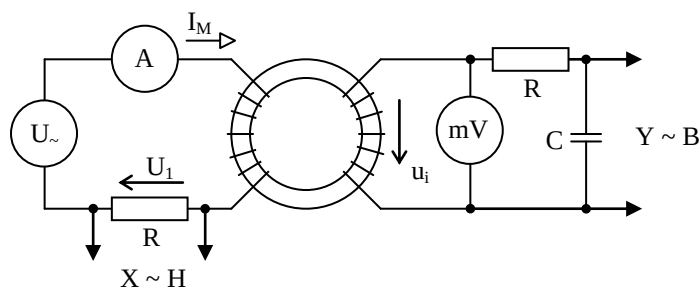
Závislost $\mu = f(H)$



6.2.2.4 Zobrazení dynamické hysterezní smyčky.

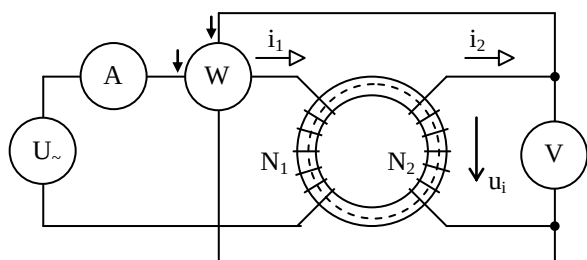
Nejběžnějším způsobem je zobrazení na osciloskopu. K tomu se vstup X připojí na odpor v magnetizačním obvodu (převod proudu na napětí) a indukce (osa Y) se snímá na kondenzátoru integračního článku.

Integrátor je zde proto, že na výstupu měřicí cívky se indukuje napětí úměrné



derivaci toku (indukce) v čase. Proto pokud chceme přivést na osu Y indukci, musíme naindukované napětí integrovat. Časová konstanta RC musí být správně zvolena, aby nedocházelo ke zkreslení hysterezní smyčky v jejich vrcholech.

6.2.2.5 Měření ztrát při střídavém magnetování



V oblasti technických kmitočtů se většinou používá wattmetrická metoda.

Wattmetr v tomto zapojení měří nejen ztráty ve feromagnetiku, ale i ztráty ve vlastní napěťové cívice a na voltmetru, takže pokud je výkon naměřený wattmetrem P' , pak ztráty se

$$\text{vypočítají } P_{Fe} = \frac{N_1}{N_2} P' - \frac{U_2^2}{R_{NW}} - \frac{U_2^2}{R_V}.$$

Voltmetr je v zapojení k nastavení požadované indukce ve vzorku (pro požadované B_m vypočítáme U_{nam} a ze zdroje $U_{\sim}$ je na voltmetru V nastavíme).

Pro měření ztrát transformátorových plechů se používá **Epsteinův přístroj**. Z materiálu se nastříhají pásy definovaných rozměrů, které se poskládají do čtverce tak, aby tvořily uzavřený magnetický obvod. Ten je zároveň jádrem cívek se známým počtem závitů N_1 a N_2 . Další zapojení odpovídá wattmetrické metodě. (Malý Epsteinův přístroj: pásy mají rozměr 250 x 30 mm, je jich celkem 0,5 až 1,5 kg; $N_1 = N_2 = 4 \times 175$ závitů.)

6.2.2.6 Číslíkové zpracování dat

Další možností je sejmutí vzorků napětí u_1 a u_2 a jejich uložení v číslíkové podobě. Poté se vypočítají časové průběhy $H(t)$ a $B(t)$. Z těchto průběhů pak lze zjistit všechny charakteristiky výše uvedené.



Shrnutí pojmů 6.

- Magnetická indukce, intenzita, magnetický tok
- Permeabilita
- Hysterezní smyčka
- Ampérův zákon celkového proudu
- Indukční zákon
- Měřicí cívka
- Rogowskiho cívka
- Feromagnetická sonda
- Hallova sonda
- Křivka prvotní magnetizace
- Amplitudová charakteristika
- Měření ztrát



Otázky 6.

- 6.1 Na jakém principu pracuje měřicí cívka při měření magnetické indukce
- 6.2 Lze použít měřicí cívku pro zjištění stejnosměrného magnetického pole? Za jakého předpokladu?
- 6.3 Vztah mezi indukci a intenzitou ve vzduchu je lineární nebo nelineární?
- 6.4 Vztah mezi indukci a intenzitou ve feromagnetickém materiálu je lineární nebo nelineární?
- 6.5 Jak zjistíte magnetickou intenzitu v uzavřeném vzorku a v otevřeném vzorku
- 6.6 Jak zjistíte magnetickou indukci v uzavřeném vzorku a v otevřeném vzorku
- 6.7 Proč je na výstup z měřicí cívky při zobrazování hysterezní smyčky zapojen integrátor?

7. RUŠIVÉ VLIVY



Čas ke studiu: 1 hodina



Cíl Po prostudování tohoto odstavce budete znát

- možné zdroje rušení
- některé způsoby ochrany proti rušení



Výklad

7.1 Rušení při měření stejnosměrných signálů

7.1.1 Vliv termoelektrických napětí

Projevuje se při měření malých napětí (řádově μV). Vzniká v místech pevných spojů měřicího zařízení, kde se stýkají dva různé kovy s nenulovým termoelektrickým napětím nebo na přepínačích, které se oteplují průchodem proudu, nebo třením při přepínání. Vliv termoelektrických napětí lze někdy odstranit dvojím měřením při obou polaritách stejnosměrného proudu nebo dostatečně dlouhým prohrátím celého obvodu – dojde k vyrovnání a stabilizaci teplot jednotlivých míst obvodu.

7.1.2 Přechodové odpory

Vyskytují se u rozebíratelných spojů. Závisí na materiálu kontaktů, jakosti povrchu styku, tlaku, procházejícím proudem. U pečlivě provedeného kolíčkového přepínače může být hodnota přechodového odporu $0,5 \cdot 10^{-4} \Omega$, u dobrého otočného přepínače 10^{-3} až $10^{-4} \Omega$ a přechodové odpory svorek jsou 10^{-2} až $10^{-4} \Omega$.

7.1.3 Svodové proudy

Při měření malých napětí lze dosáhnout takový izolační odpor, že svodové proudy procházející izolanty lze zanedbat. Při použití vyšších napětí se musí celé zařízení dobře izolovat i stínit.

7.2 Rušení při měření střídavých signálů

Problémy zde působí stejně jako u stejnosměrných měření přechodové odpory a svodové proudy. Hlavním problémem jsou však zde rušivá pole.

Jednou z základních metod, jak potlačit rušivá pole, je stínění. Ke stínění můžeme mít dva základní přístupy:

- stíníme zdroj rušení. Snažíme se omezit a uzavřít prostor, ve kterém rušení působí a nedovolit jeho šíření mimo uzavřenou oblast. Napájecí a signální vodiče vedeme přes odrušovací filtry, které mají zamezit průniku nežádoucího signálu ze stíněné oblasti. Takto stíníme a odrušujeme různé motory, tyristorové usměrňovače, regulátory apod.
- Stíněním chráníme citlivé, zejména vstupní části zařízení. Stínění má zamezit tomu, aby se do obvodu dostal jiný signál, než požadovaný.

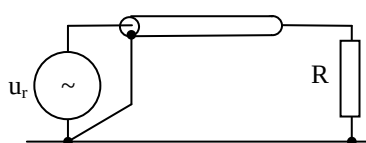
Nežádoucí signál může pronikat kapacitní nebo indukční vazbou. Podle způsobu jeho pronikání dělíme stínění na elektrostatické (proti kapacitní vazbě) a na magnetické (proti vazbě indukční). Vazbě odporové bráníme správným vedením vodičů.

Každý individuální případ musí být analyzován pečlivě a samostatně. V první řadě je nutno najít zdroje a přijímače rušení a možný způsob parazitní vazby. Nedokonalé a nesprávně provedené stínění, založené na nesprávném pochopení problému, může situaci zhoršit a vyvolat nové problémy.

7.2.1 Stínění proti elektrickému poli

Elektrostatické stínění používáme pro odstranění vlivu nežádoucích kapacit. Stínicí kryt je z elektricky vodivého materiálu. Jeho účinnost nezávisí na vodivosti materiálu, ani na jeho tloušťce - může to být tenká fólie nebo jen síťka. Pokud je v krytu uzavřen nějaký prvek, změní se jeho hodnota. Všechny prvky i vodiče přenášející signál, který by mohl být rušen, musí být uvnitř stínicího krytu. Stínění musí být připojeno na vhodný potenciál, obvykle na straně zdroje signálu (tzn. pokud je zdroj signálu uzemněn, musí být se zemí spojeno i stínění).

Správné připojení elektrostatického stínění souosého kabelu

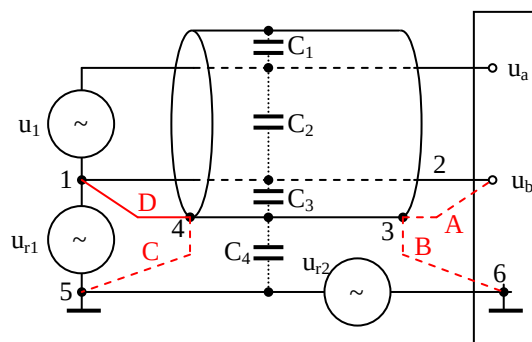


Příklad kapacitních vazeb a elektrostatického stínění

Neuzemněný zdroj u_1 , který má proti zemi rušivé napětí u_{r1} a měřicí systém s diferenčním vstupem (u_a a u_b) spojený se zemí (např. přes síťovou šňůru). Parazitní kapacity jsou označeny C_1 až C_4 . Stínění propojovacího kabelu můžeme připojit čtyřmi způsoby:

- A – se společnou svorkou 2 na straně měřidla
- B – se zemní svorkou 6 na straně měřidla
- C – se zemní svorkou 5 na straně zdroje
- D – se společnou svorkou 1 na straně zdroje

Např. v případě A prochází rušivý proud z u_{r1} přes 1-2-3- C_4 -5 v úseku 1-2 společně se signálem. Vhodná je pouze varianta D.



7.2.2 Stínění proti magnetickému poli

Plášť stíněného vodiče uzemněný na jedné straně má dobrý stínicí účinek proti elektrickému poli, ale malý nebo žádný proti poli magnetickému.

Máme-li obvod citlivý na střídavé magnetické pole, lze jej odstínit vložením do uzavřeného krytu, který brání průniku rušivého pole do stíněného prostoru.

Kryt může být tvořen magneticky vodivým materiálem – pak jde o feromagnetické stínění, které je účinné i proti stejnosměrnému magnetickému poli (magnetické pole země, pole permanentního magnetu). Indukční čáry vnějšího pole se uzavírají z větší části stínicím krytem s velkou magnetickou vodivostí a v prostoru uvnitř krytu je indukce magnetického pole slabá nebo žádná. Účinnost stoupá se zvětšující se permeabilitou materiálu a s jeho tloušťkou. Působí proti stejnosměrnému poli a střídavému o nižší frekvenci.

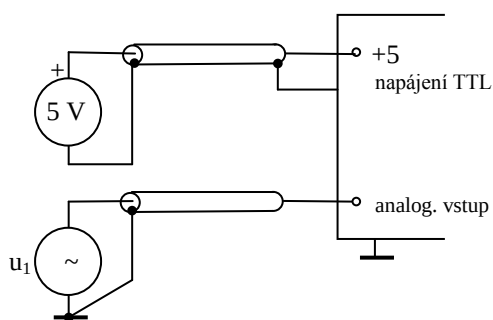
Pokud je kryt tvořen elektricky vodivým materiálem jde o elektromagnetické stínění. Stínicí účinek je vyvolán indukovanými vířivými proudy ve stěně krytu, které podle Lenzova zákona potlačují pole, jímž byly vyvolány. Účinnost stoupá se zvětšující se vodivostí materiálu stínicího krytu, se zvětšením jeho tloušťky a s rostoucí frekvencí pole (např. pro kmitočty 600 kHz stačí tloušťka měděného krytu 0,6 mm, pro 50 Hz by to bylo asi 6 cm.)

Při navrhování nového přístroje se snažíme dodržovat zásady, které pomohou k tomu, aby přístroj byl vůči vnějším magnetickým polím necitlivý a zároveň nebyl jejich zdrojem:

Citlivé obvody umísťujeme čo najďal od rušivých magnetických polí (např. síťový transformátor).

Citlivé vodiče vedeme tak, aby naindukované napětí bylo co nejmenší, tj. rovnoběžně s magnetickými siločarami. Indukované napětí je úměrné ploše smyčky a její orientaci ke zdroji rušení (do smyčky o ploše 10 cm^2 se v magnetickém poli o frekvenci 50 Hz a magnetické indukci 10^{-5} T naindukuje řádově 10^{-5} V).

Výkonový vodič k zátěži nebude zdrojem rušivého magnetického pole provedeme-li jej zkroucenými vodiči (twist). Stejně tak je vhodné pro velké signály použít souosý kabel – nejedná se o stínění, ale o kompenzaci magnetického pole, vznikajícího průchodem proudu (plášť takového kabelu slouží jako zpětný vodič).



Příklad připojení citlivého analogového vstupu a výkonového napájecího zdroje zařízení.

Pro napájení logických TTL obvodů je použit souosý kabel, připojený na obou koncích (plášť je použit jako zpětný vodič), aby bylo zabráněno vyzařování vlivem spínacích jevů (kompenzace magnetického pole). Analogový vstup je připojen souosým stíněným vodičem, jehož stínění je spojeno se zemí pouze na straně vstupu.

7.3 EMC – elektromagnetická kompatibilita

Obor, který zkoumá souvislosti vzájemného působení elektrotechnických systémů včetně působení na lidský organismus se nazývá Elektromagnetická kompatibilita. Zabývá se dále definicí problémů a pojmů spojených s EMC a stará se o normalizaci.

Podle normy ČSN EN 1000-2-4 je zároveň elektromagnetická kompatibilita schopnost zařízení nebo systému fungovat vyhovujícím způsobem ve svém elektromagnetickém prostředí bez vytváření nepřijatelného elektromagnetického rušení čehokoliv v tomto prostředí

Z definice EMC lze odvodit dva závěry:

- přístroj, zařízení nebo systém nemá produkovat rušení, které by překračovalo předepsané tolerance
- každý přístroj, zařízení nebo systém musí vykazovat určitou úroveň odolnosti vůči rušení.

Podle Mezinárodní elektrotechnické komise (IEC) se EMC týká celého frekvenčního spektra (od stejnosměrného proudu až do oblasti gigahertzového pásma).

Většinu norem v tomto oboru stanovuje a vydává komise International Electrotechnical Commission – IEC. Její normy začínají zkratkou IEC....

V Evropě působí CENELEC – komitét pro evropskou normalizaci v elektrotechnice a vydává normy týkající se EMC platné pro Evropskou unii. Většinou převzaté normy IEC a značené EN....

V České republice se přijímají normy IEC nebo EN a mají označení ČSN IEC, ČSN EN



Shrnutí pojmů 7.

- Termoelektrické napětí
- Přechodový odpor
- Svodový proud
- Elektrostatické stínění
- Feromagnetické stínění
- Elektromagnetické stínění
- Elektromagnetická kompatibilita

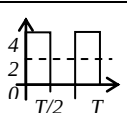


Otázky 7.

- 7.1 Jak se potlačí rušení elektrickým polem
- 7.2 Jak se potlačí rušení stejnosměrným magnetickým polem
- 7.3 Jak se potlačí rušení střídavým magnetickým polem



KLÍČ K ŘEŠENÍ

1.1	Vnitřní odpor přístrojů, zjednodušení zapojení, zjednodušení výpočtu
1.2	Zvětší
1.3	Zmenší
1.4	Ne
1.5	a) $U_1=8V$, $U_2=4V$; b) $1,9V$; c) $3,96 V$
1.6	V jednotkách měřené veličiny
1.7	V procentech
1.8	Pro plnou výchylku
1.9	4999
1.10	0,01%
1.11	$\pm 0,18 V$
1.12	$\pm 0,184 V$
1.13	$\pm 0,1 \Omega$, relativní chyba 200 %
1.14	Hledaná hodnota se musí vypočítat z více měřitelných veličin
1.15	Sečtou se relativní chyby údajů přístrojů
1.16	0,9 W
1.17	0,29 A
1.18	6,33 W
1.19	$(17993,7 \pm 138,6) W$
1.20	Standardní nejistota je směrodatná odchylka veličiny, pro niž je nejistota udávána.
1.21	Rozšířená nejistota definuje interval okolo výsledku měření, v němž se s určitou požadovanou pravděpodobností nalézá výsledek měření.
1.22	geometrický
2.1	sinusový signál je harmonický signál, takže má pouze 1. harmonickou
2.2	odečteme (odfiltrujeme) stejnosměrnou složku
2.3	200 Hz
	
2.4	2 V
2.5	2,82V
3.1	chybu převodu a fáze
3.2	s chybou fáze
3.3	velkými písmeny M,N primární strana, malými písmeny m,n sekundární strana
3.4	nakrátko
3.5	300 k Ω
3.6	poklesne
3.7	nelinearita diod a úbytek napětí v otevřeném stavu
3.8	usměrňovač
3.9	Výpočtové převodníky - využívají matematické definice efektivní hodnoty

3.10	
3.11	magnetoelektrické ústrojí
3.12	magnetoelektrický s termočlánkem, elektromagnetický a elektrodynamický v omezeném frekvenčním rozsahu
3.13	elektrodynamický systém
3.14	k zasynchronizování časové základny (získáme stojící obraz signálu), nebo k spuštění časové základny od zvolené napěťové úrovně
3.15	počet dílků periody vynásobíte konstantou časové základny a vypočtu převrácenou hodnotu
3.16	bodů na pravé straně stínítka
3.17	kvantizační chyba je polovina kvantizačního kroku
3.18	stejnoseměrné napětí
3.19	komparátor
3.20	první doba integrace se musí rovnat periodě rušivého napětí
3.21	nelze
3.22	periodické průběhy
3.23	50 V
3.24	30 mV
3.25	0,15%
3.26	měřicí přístroj i PC vybavené rozhraním, kabel k propojení a software
3.27	počítač vybavený měřicí kartou a software
4.1	měřicí přístroj s usměrňovačem
4.2	převodník odpor/napětí, AD převodník, displej
4.3	měří střední aritmetickou hodnotu a ukazuje efektivní
4.4	měří střední aritmetickou hodnotu a ukazuje nesmysl
4.5	ano, pokud předřadíme před kompenzační zapisovač převodník okamžitá hodnota/efektivní
4.6	3,54 V
4.7	1,414 V
4.8	elektrodynamické ústrojí
4.9	protože údaj wattmetru je úměrný střední hodnotě ze součinu okamžitých hodnot napětí a proudu
4.10	převodník velikosti napětí na zátěži, převodník proudu zátěží na napětí, násobička, převodník okamžitého výkonu na střední hodnotu, AD převodník
4.11	součinu jmenovitého napětí, proudu a účinníku poděleného počtem dílků stupnice
4.12	hradlem otevřeným na známou dobu prochází měřený kmitočet
4.13	hradlem otevřeným po dobu periody měřeného signálu prochází impulsy o známé frekvenci
4.14	lze změřit úhel mezi napětím a proudem zátěží. Na jeden kanál osciloskopu přivedeme napětí na zátěži, na druhý kanál přivedeme napětí sejmuté ze známého odporu, zapojeného do série se zátěží a zjistíme fázový posun. Kosinus úhlu dopočítáme.
4.15	přístroj, který zjistí obsah harmonických v měřeném průběhu
5.1	v případě, že velikost odporu je závislá na nastavení pracovního bodu, nebo je odpor pod napětím
5.2	pro přesná měření parametrů impedancí
5.3	sečtou se relativní přesnosti odporů, z nichž se měřený odpor počítá
5.4	když jsou odpory přívodních vodičů a přechodové odpory srovnatelné s velikostí měřeného odporu
5.5	měřený odpor se velikostí blíží izolačnímu odporu vodičů -může téct svodový proud
6.1	pokud měřicí cívka leží v proměnném magnetické poli, na svorkách cívky se objeví naindukované napětí

6.2	ano v případě, že lze cívkou otáčet, nebo ji lze z měřeného pole vyjmout, nebo lze měřené pole vypnout
6.3	lineární
6.4	nelineární
6.5	v uzavřené vzorku je intenzita úměrná proudu budící cívkou, v otevřeném vzorku měříme intenzitu na povrchu vzorku Hallovo sondou nebo Rogowskiho cívkou
6.6	v obou případech výpočtem z napětí, naindukovaného v měřicí cívce
6.7	protože na výstupu z měřicí cívky je napětí úměrné derivaci magnetické indukce
7.1	Stínícím krytem z elektricky vodivého materiálu, připojeným na vhodný potenciál
7.2	feromagnetickým stíněním - kryt tvořený magneticky vodivým materiálem
7.3	elektromagnetickým stíněním - kryt tvořený elektricky vodivým materiálem