0. ÚVOD

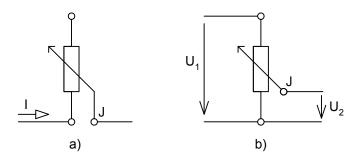
0.1. Zdroje elektrické energie v laboratořích

Každá laboratoř pro elektrická měření je vybavena zdroji stejnosměrného a střídavého napětí. Kromě přenosných elektronických zdrojů se používají napětí rozvedená na jednotlivá měřicí pracoviště přes hlavní rozvaděč laboratoře. Každé pracoviště má na příslušném rozvaděči k dispozici tato střídavé napětí: 220 V (zásuvky), 3 × 120 V (zapojení "do trojúhelníka", bez nulového vodiče, galvanicky odděleno) a 6, 12, 24 a 48 V (zabudovaný transformátor).

0.2. Regulace napětí a proudu

Sestavení obvodu pro regulování napětí nebo proudu je běžnou úlohou laboratorní praxe. Kromě toho, že některé elektronické zdroje mají možnost regulace výstupního napětí, příp. proudu, používáme pro tyto účely regulační posuvné rezistory, příp. odporové dekády.

Regulační rezistor běžného typu je válcový posuvný regulační rezistor, u něhož se velikost odporu mezi svorkou spojenou s jezdcem (označenou J nebo červenou barvou) vůči koncovým svorkám rezistoru mění posuvem jezdce podél tělesa rezistoru. Těleso rezistoru je tvořeno válcovým keramickým tělesem, na němž je navinut odporový vodič ve tvaru šroubovice. Kontakt jezdce tvoří uhlíkový kartáč. Na štítku rezistoru je údaj o hodnotě odporu rezistoru a jeho maximální proudové zatížitelnosti. Regulační rezistor lze do obvodu připojit dvěma způsoby: a) jako sériový proměnný odpor (reostat), b) jako dělič napětí (potenciometr) - viz obr. 0.1. Pro dokonalejší regulaci se používá kombinace obou způsobů.



Obr. 0.1 Zapojení regulačního rezistoru do obvodu: a) sériový proměnný odpor, b) dělič napětí

0.3. Zpracování výsledků měření - vedení záznamů o měření

Každá úloha se zpracovává do pracovního sešitu formou protokolu o měření. Protokol o měření musí obsahovat následující body:

- 1. Úkol měření
- 2. Schéma zapojení
- 3. Soupis použitých přístrojů
- 4. Stručný teoretický rozbor úlohy včetně vzorců potřebných pro výpočty
- 5. Naměřené a vypočtené hodnoty, v případě měření funkční závislosti graf
- 6. Nejistoty měření (pokud jsou požadovány v úkolu měření)
- 7. Zhodnocení dosažených výsledků měření

0.3.1. Úkol měření

Úkol měření je zadán v návodu, který je k dispozici u každé úlohy. Studenti pracují podle zadání, které je k dispozici v laboratořích u jednotlivých úloh (pozn.: aktuální zadání nemusí být úplně totožné se zadáním v těchto skriptech). Aktuální zadání úloh je také k dispozici na www stránkách http://measure.feld.cvut.cz.

0.3.2. Schéma zapojení

Schéma zapojení je součástí zadání každé úlohy.

0.3.3. Soupis použitých přístrojů

Soupis přístrojů musí obsahovat základní údaje pro každý prvek použitý ve schématu zapojení. Tyto údaje umožňují v případě chybných výsledků měření provést kontrolu, zda měření nebylo znehodnoceno nevhodně zvolenými přístroji, případně chybně zvoleným rozsahem přístroje. Dále je možno pomocí těchto údajů určit např. nejistoty měření způsobené nepřesností přístrojů a chyby metody.

V soupisu je nutno pro jednotlivé typy přístrojů uvést následující údaje:

Elektromechanické měřicí přístroje

Označení ve schématu, druh přístroje (voltmetr, ampérmetr atd.), měřicí soustava (postačí schematická značka), třída přesnosti, použitý měřicí rozsah; u voltmetru je nutné uvést také velikost odporu přístroje, u wattmetru velikost odporu napěťové cívky - příklad:

 V_1 - voltmetr magnetoelektrický; třída přesnosti 0,5; rozsah 12 V; odpor 5000 Ω /V

 W_2 - wattmetr elektrodynamický; tř. přes. 0,5; 5 A; 120 V; odpor napěťové cívky R_n = 4000 Ω

Elektronické a číslicové přístroje

V soupisu postačí uvést následující údaje:

označení přístroje ve schématu - druh přístroje, typ (příp. výrobce), u multimetrů také přesnost, použitý rozsah

Příklad:

ČV - číslicový voltmetr M1T330, Metra, přesnost \pm 0,01 % z údaje \pm 0,01 % z rozsahu, rozsah 300 mV

OSC - osciloskop Topward 7026

U_Z - zdroj stejnosměrného napětí 0 až 30 V, typ SZ 3.81

Rezistory

 R_1 - regulační rezistor 500 Ω ; 0,6 A

 R_2 - odporový etalon 100 Ω; 0,02 %

Přípravek

Př₁ - přípravek s usměrňovačem, operačním zesilovačem OP 07, apod.

0.3.4. Stručný teoretický rozbor úlohy včetně vzorců potřebných pro výpočty

Tento bod musí obsahovat stručné pojednání o měřicí metodě, definice potřebných veličin a pojmů a stručný popis postupu měření. Jako pramen lze použít popis jednotlivých úloh v těchto skriptech, případně skripta pro přednášky.

0.3.5. Naměřené a vypočtené hodnoty

Naměřené a vypočtené hodnoty je nutno zpracovat do tabulek, u jednotlivých veličin je nutné uvést do závorek jednotky. Pod tabulkou uvádějte příklad výpočtu pro jednu kombinaci hodnot, aby bylo možné snadno identifikovat případnou chybu. Pokud je v úkolu měření požadována závislost jedné veličiny na druhé, je nutno tuto závislost vyjádřit graficky. Graf musí mít nadpis, o jakou závislost jde, dále je nutné řádně popsat osy a vyznačit jednotlivé hodnoty veličin. Pokud je v jednom grafu vyneseno několik závislostí, je vhodné použít různých typů čar, jimiž prokládáme naměřené hodnoty.

0.3.6. Nejistoty měření

Každé měření je zatíženo nejistotou měření. V úlohách z předmětu Elektrická měření budeme pro zjednodušení uvažovat pouze chybu metody a nejistotu typu B (u_B) údaje. V případech, kdy máme k dispozici potřebné informace, musíme chybu metody (způsobenou např. vlastní spotřebou měřicího přístroje) korigovat a uvažovat pouze nejistotu měření. Při určování nejistoty měření vycházíme ze základních vzorců a volíme nejjednodušší postup, jak výslednou nejistotu měření (absolutní nebo relativní) určit.

0.3.7. Zhodnocení měření

V tomto bodě se uvede, zda naměřené a vypočtené výsledky odpovídají teoretickým předpokladům. Případný rozpor s teoretickým předpokladem je nutné zdůvodnit.

0.4. Praktické pokyny pro měření

Při laboratorních cvičeních z předmětu Elektrická měření se studenti často prakticky poprvé seznamují s celou řadou měřicích přístrojů a metod. Pro každou úlohu jsou proto předem připraveny potřebné přístroje a předepsána metoda měření, často i s doporučeným rozsahem měřených veličin. V této souvislosti je nutné si uvědomit, že v praxi musí experimentátor volit měřicí metodu a použité přístroje samostatně, což vyžaduje znalost vlastností jednotlivých typů měřicích přístrojů a představu o použitelnosti jednotlivých měřicích metod. Laboratorní cvičení z tohoto předmětu by měla studentům pomoci se v této oblasti orientovat.

Protože studenti předem vědí, které úlohy budou na cvičení měřit, vyžaduje se od nich teoretická příprava podle výše uvedených bodů a znalost principu použité metody měření. Na laboratorním cvičení je tedy nutné zapojit obvod, nastavit odpovídající funkci a rozsah jednotlivých přístrojů (pokud není předem známa přibližná velikost měřených hodnot, je nutné nastavit na měřicích přístrojích největší rozsahy, které posléze snížíme), po kontrole zapojení asistentem připojit, popř. zapnout zdroje a změřit podle zadání úlohy všechny požadované hodnoty. Součástí cvičení je i zpracování naměřených hodnot a vyhodnocení výsledků.

Zapojování měřicího obvodu

Rozmístění prvků měřicího obvodu je nutno provést tak, aby byly maximálně potlačeny rušivé vlivy, např. rušivá magnetická pole. Dále je nutno dbát na přehlednost zapojení a snadné nastavování, odečítání a zápis naměřených hodnot.

Nejdříve zapojíme proudové obvody, průřez spojovacích vodičů volíme s ohledem na velikost procházejících proudů (pro proudy větší než 5 A používáme silné vodiče s oky, svorky dostatečně utahujeme). Délku vodičů je nutné zvolit takovou, aby nedocházelo k jejich mechanickému namáhání. Regulační rezistory zapojujeme do obvodu dle obr. 0.1.

Měření

Před měřením zkontrolujeme, zda jsou regulační prvky napěťových zdrojů, popř. regulační prvky zapojené v obvodu, v polohách odpovídajících nulovému napětí (resp. minimálnímu proudu). Po zkontrolování zapojení asistentem zapneme elektronické přístroje a napájecí zdroje, nastavíme postupně požadované hodnoty veličin a provedeme měření. Naměřené hodnoty zaznamenáme. Po změření potřebných hodnot veličin vypneme zdroje a úlohu rozpojíme, není-li v návodu k úloze v laboratoři předepsáno jinak.

0.5. Bezpečnost při práci v laboratoři

Elektrická instalace laboratoře i měřicí přístroje jsou konstruovány tak, aby vyhověly požadavkům na bezpečnost práce. Izolace a ochrana živých částí (tj. částí pod napětím) proti dotyku musí odpovídat příslušným normám. Před zahájením práce v laboratoři, kde probíhají praktická cvičení z předmětu Elektrická měření (tj. na prvním cvičení), je nutné, aby studenti byli seznámeni s pravidly pro zajištění bezpečné práce a elektrickou instalací laboratoří, poučeni o zacházení s jednotlivými prvky elektrické instalace a upozorněni na možné ohrožení elektrickým zařízením. Vyučující svým podpisem potvrdí, že studenty v tomto smyslu poučil, a studenti svým podpisem potvrdí, že byli poučeni a všemu porozuměli.

Zde shrneme pouze základní poznatky a zásady, které se bezprostředně týkají předmětu Elektrická měření.

Při laboratorních cvičeních je nutno dodržovat následující zásady:

- 1. Studenti jsou povinni během cvičení dbát na pořádek v laboratoři a po skončení cvičení pracoviště uklidit (srovnat přístroje a vodiče, zkontrolovat, zda je na místě návod k úloze, atd.).
- 2. Po zapojení obvodu je nutno **před zapnutím zdrojů nechat si zkontrolovat zapojení** úlohy vyučujícím. To je důležité jak z hlediska bezpečnosti práce, tak z hlediska možného zničení použitých přístrojů.
- 3. Jakékoliv úpravy zapojení se provádějí výhradně při vypnutých zdrojích.
- 4. Při obsluze přístrojů a zařízení se obsluhující smí dotýkat pouze částí určených pro obsluhu (vypínačů, přepínačů, jezdců na regulačních rezistorech atd.).
- 5. Poruchu některého z používaných zařízení je nutno ihned ohlásit vyučujícímu. Vadné zařízení je nutné vyměnit.

- 6. Při vzniku požáru je nutno okamžitě vypnout proud a zahájit hašení hasicími přístroji umístěnými v laboratořích. (Typ těchto přístrojů je volen tak, aby jimi bylo možno hasit i předměty pod napětím.)
- 7. Při vzniku úrazu elektrickým proudem je nutno ihned vypnout proud (např. bezpečnostním tlačítkem) a poskytnout postiženému první pomoc.

Bezpečnostní tlačítko ("TOTAL STOP") je umístěno na viditelném místě na hlavním rozvaděči laboratoře a umožňuje vypnout celý elektrický rozvod příslušné laboratoře.

Pro zopakování uvádíme některá důležitá fakta z norem a předpisů.

Z hlediska nebezpečí úrazu elektrickým proudem se prostory dělí na bezpečné, nebezpečné a zvláště nebezpečné. Hraniční hodnoty bezpečného napětí pro prostory bezpečné jsou 50 V pro střídavá napětí a 100 V pro napětí stejnosměrná.

Hraniční hodnoty střídavého napětí se měří mezi fázovým vodičem a zemí a jsou: malé napětí (mn) - 50 V, nízké napětí (nn) - do 600 V, vysoké napětí (vn) - do 30 kV, velmi vysoké napětí (vvn) - do 171 kV, zvlášť vysoké napětí (zvn) – do 800 kV (mezi fázemi) a ultra vysoké napětí – nad 800 kV (mezi fázemi).

Odborný dohled při práci v laboratoři zajišťuje vyučující pro nejvýše deset studentů.

Přiznávání odborné způsobilosti v elektrotechnice studentům stanoví příkaz děkana č. 4/2003:

- a) V průběhu 1. resp. 2. semestru strukturovaného bakalářského studia musí získat všichni studenti všech oborů a všech forem studia poučením, praktickým zaškolením a písemným přezkoušením v předmětu "Technická dokumentace" <u>kvalifikaci na úrovni pracovníka poučeného</u> (§4), s platností do konce 4. semestru bakalářského studia (max. 4 roky).
- b) Na začátku 5. semestru strukturovaného bakalářského studia musí získat studenti v rámci vhodného předmětu speciálním poučením, zaškolením a písemným proškolením kvalifikaci na úrovni pracovníka znalého (§5) s platností pro 5. a 6. semestr.

Pracovník poučený podle §4 vyhlášky 50/1978 sb. může samostatně provádět jednoduchou obsluhu elektrických zařízení všech napětí. Pracovat může na částech zařízení do 1000 V bez napětí a v blízkosti nekrytých částí pod napětím ve vzdálenosti větší než 20 cm pod dohledem pracovníka alespoň znalého. Nesmí pracovat na částech pod napětí vyšším než bezpečným.

Další informace o této problematice lze nalézt např. v [7], [14].

0.6. Základní technická data elektronických měřicích přístrojů používaných v laboratořích předmětu Elektrická měření

0.6.1. Osciloskopy

GOLDSTAR OS - 9020G

Typ analogový 2-kanálový

s vestavěným generátorem

Druhy činnosti pouze kanál 1 (CH1); pouze kanál 2 (CH2);

 $CH1 \pm CH2 (ADD);$

dvoukanálové zobrazení (DUAL) (pro rychlosti do 5 ms/d režim "chopped", od 2 ms/d režim

"alternate" - automatická volba)

Pozn.: Kanál 1 (CH1) je opatřen na zadní stěně

výstupem za zesilovačem (konstanta 20 mV/d,

 $f_{\rm m} = 10 \text{ MHz}$

Vertikální kanál

kmitočtový rozsah (oba kanály) 0 - 20 MHz (-3 dB) stejnosměrný

10 Hz - 20 MHz (-3 dB) střídavý

v poloze zesílení 5x horní mezní kmitočet 7 MHz

prodloužení náběžné hrany 17,5 ns, v poloze zesílení $5\times$: 50 ns citlivost 5 mV/d až 5 V/d v 10 rozsazích přesnost \pm 3 %, v poloze zesílení $5\times$ \pm 5 %

plynulá změna citlivosti 1 : 2,5

vstupní impedance 1 MΩ, 25 pF (paralelně) maximální vstupní napětí (DC + špičková hodnota): 250 V

Časová základna (ČZ)

Rozsahy 0,2 s/d až 0,2 µs/d v 19 rozsazích

přesnost ČZ 3 %

Časová lupa 10× (přesnost ČZ 5 %, rychlosti 50 ns/d

a 20 ns/d nekalibrovány)

Druhy spouštění časové základny

NORM - bez spouštěcího signálu nedojde ke spuštění běhu ČZ

AUT - za nepřítomnosti spouštěcího signálu odbíhá časová základna volně
TV-V - z vestavěného oddělovače vertikálních TV synchronizačních impulsů

TV-H - z vestavěného oddělovače horizontálních TV synchronizačních

impulsů

HOLD OFF - pozdržení možnosti spuštění dalšího běhu ČZ

Režim X-Y

 citlivost obou kanálů jako u vertikálních, kanál A (CH1) jako X, kmitočtový rozsah 0 - 500 kHz (-3 dB), fázový rozdíl mezi kanály méně než 3° do 50 kHz

Vestavěný generátor

výstupní frekvence 0,1 Hz až 1 MHz v 7 stupních

tvary signálu sinus, trojúhelník, obdélník, TTL obdélník stabilita frekvence 0,5 % z rozsahu, na rozsahu 1 MHz 1 %

výstupní napětí plynule (max 14 V_{p-p}),

± 6 V offset plynule (naprázdno)

výstupní impedance 50Ω

GOLDSTAR OS-904RD

Typ analogový, 2-kanálový

Druhy činnosti pouze kanál 1 (CH1); pouze kanál 2 (CH2);

 $CH1 \pm CH2 (ADD);$

dvoukanálové zobrazení (DUAL) - pro rychlosti

do 5 ms/d - režim "chopped",

od 2 ms/d - režim "alternate" - automaticky)

Pozn.: Kanál 1 (CH1) je opatřen na zadní stěně

výstupem za zesilovačem (konstanta 20 mV/d,

 $f_{\rm m} = 10 \text{ MHz}$

Vertikální kanál

citlivost přesnost

kmitočtový rozsah (oba kanály) 0 - 40 MHz (-3 dB) stejnosměrný

10Hz - 40 MHz (-3 dB) střídavý horní mezní kmitočet 7 MHz 8,8 ns, v poloze zesílení 5×: 50 ns 5 mV/d až 5 V/d v 10 rozsazích ± 3 %, v poloze zesílení 5× ± 5 %

plynulá změna citlivosti 1 : 2,5

vstupní impedance 1 MΩ, 25 pF (paralelně) maximální vstupní napětí (DC + špičková hodnota): 300 V

Časová základna A (hlavní):

v poloze zesílení 5x

prodloužení náběžné hrany

rozsahy 0,2 s/d až 0,2 μs/d v 19 rozsazích

přesnost ČZ 3 %

časová lupa 10× (přesnost ČZ 5 %, rychlosti 50 ns/d

a 20 ns/d nekalibrovány)

HOLD OFF pozdržení možnosti spuštění dalšího běhu ČZ

Časová základna B (zpožděná)

rozsahy 20 μs/d až 0,2 μs/d v 7 rozsazích

Druhy spouštění časové základny

NORM - bez spouštěcího signálu nedojde ke spuštění běhu ČZ

AUT - za nepřítomnosti spouštěcího signálu odbíhá časová základna volně
 TV-V - z vestavěného oddělovače vertikálních TV synchronizačních impulsů
 TV-H - z vestavěného oddělovače horizontálních TV synchronizačních impulsů

Režim X-Y citlivost obou kanálů jako u vertikálních; kanál A (CH1) jako X, kmitočtový rozsah 0 - 500 kHz (-3 dB), fázový rozdíl mezi kanály méně než 3° do 50 kHz

Indikace nastavení a kurzorové funkce

Na obrazovce lze zobrazit nastavení ovládacích prvků osciloskopu. Pomocí kurzorů je možné určit (a na obrazovce digitálně odečíst) rozdíl napětí mezi kurzory, rozdíl časů Δt a kmitočet, odpovídající hodnotě $1/\Delta t$.

GOLDSTAR OS-9060D

Typ analogový, 2-kanálový

Druhy činnosti pouze kanál 1 (CH1); pouze kanál 2 (CH2);

CH1 \pm CH2 (ADD);

dvoukanálové zobrazení (DUAL) - pro rychlosti

do 5 ms/d režim "chopped",

od 2 ms/d režim "alternate" - automaticky)

Vertikální kanál

kmitočtový rozsah (oba kanály) 0 - 60 MHz (-3 dB) stejnosměrný

v poloze zesílení 5× horní mezní kmitočet 20 MHz prodloužení náběžné hrany 5,8 ns, v poloze zesílení 5×: 23 ns citlivost 5 mV/d až 5 V/d v 10 rozsazích ± 3 %, v poloze zesílení 5× ± 5 %

plynulá změna citlivosti 1 : 2,5

vstupní impedance 1 MΩ, 25 pF (paralelně)

maximální vstupní napětí (DC + špičková hodnota střídavého signálu): 250 V

Amplitudový kalibrátor obdélníkový průběh - kmitočet 1 kHz,

výstupní napětí 500 mV_{p-p}

Časová základna A (hlavní)

rozsahy 0,2 s/d až 0,1 μs/d ve 20 rozsazích

přesnost ČZ 3 %

časová lupa 10× (přesnost ČZ 5 %, max.rychlost 20 ns/d

nekalibrována)

HOLD OFF pozdržení možnosti spuštění dalšího běhu ČZ

Časová základna B (zpožděná)

rozsahy $10 \,\mu\text{s/d}$ až $0,1 \,\mu\text{s/d}$ v 7 rozsazích

Druhy spouštění časové základny

NORM - bez spouštěcího signálu nedojde ke spuštění běhu ČZ

AUT - za nepřítomnosti spouštěcího signálu odbíhá časová základna volně
 TV-V - z vestavěného oddělovače vertikálních TV synchronizačních impulsů
 TV-H - z vestavěného oddělovače horizontálních TV synchronizačních impulsů

Režim X-Y citlivost obou kanálů jako u vertikálních, kanál A (CH1) jako X, kmitočtový rozsah 0 - 500 kHz (-3 dB), fázový rozdíl mezi kanály méně než 3° do 50 kHz

Indikace nastavení a kurzorové funkce

Na obrazovce lze zobrazit nastavení ovládacích prvků osciloskopu. Pomocí kurzorů je možné určit (a na obrazovce digitálně odečíst) rozdíl napětí mezi kurzory, rozdíl časů Δt a kmitočet, odpovídající hodnotě $1/\Delta t$.

TOPWARD 7026

Typ analogový 2-kanálový

Druhy činnosti pouze kanál 1 (CH1); pouze kanál 2 (CH2);

 $CH1 \pm CH2 (ADD);$

dvoukanálové zobrazení (DUAL) v režimu "chopped" (frekvencí 250 kHz), nebo "alternate"

podle volby

V poloze SOURCE "VERT MODE" v režimu "ALTERNATE" synchronizuje podle kanálu, který právě zobrazuje, a umožňuje současné zobrazení dvou průběhů různých kmitočtů.

Vertikální kanál

kmitočtový rozsah (oba kanály) 0 - 20 MHz (-3 dB) stejnosměrný

10 Hz - 20 MHz (-3dB) střídavý

v poloze zesílení 5× horní mezní kmitočet 15 MHz

prodloužení náběžné hrany 17,5 ns, v poloze zesílení $5\times$: 23 ns citlivost 5 mV/d až 5 V/d v 10 rozsazích přesnost \pm 3 %, v poloze zesílení $5\times$ \pm 5 %

plynulá změna citlivosti 1 : 2,5

vstupní impedance 1 MΩ, 25 pF (paralelně) maximální vstupní napětí (DC + špičková hodnota): 400 V

Pozn.: Kanál CH1 opatřen na zadní stěně výstupem za zesilovačem

(konstanta 50 mV/d, $f_m = 10$ MHz)

Časová základna A (hlavní)

rozsahy 0,5 s/d až 0,2 µs/d ve 20 rozsazích

přesnost ČZ 3 % časová lupa 10×

HOLD OFF - pozdržení možnosti spuštění dalšího běhu ČZ

Časová základna B (zpožděná)

rozsahy 0,5 ms/d až 0,2 μs/d v 11 rozsazích

Druhy spouštění časové základny

NORM - bez spouštěcího signálu nedojde ke spuštění běhu ČZ

AUT - za nepřítomnosti spouštěcího signálu odbíhá časová základna volně
TV - z vestavěného oddělovače TV synchronizačních impulsů. V nebo H

podle rychlosti ČZ

HF-REJ - potlačeny kmitočty nad 50 kHz

Režim X-Y citlivost obou kanálů jako u vertikálních, kanál CH1 jako X,

kmitočtový rozsah 0 - 1 MHz (-3 dB), fázový rozdíl mezi kanály méně

než 3° do 50 kHz

HP 54600A (Hewlett Packard)

Typ s číslicovou pamětí

Princip činnosti viz [1], str. 125

Vertikální kanál

kmitočtový rozsah (oba kanály) 0 - 100 MHz (-3 dB) stejnosměrný

10 Hz - 100 MHz (-3 dB) střídavý

prodloužení náběžné hrany 3,5 ns

citlivost 2 mV/d až 5 V/d v 11 rozsazích

přesnost $\pm 1,5 \%$

zjemnění citlivosti (vernier) v 50 (75) stupních mezi rozsahy, přesnost \pm 3 %

vstupní impedance 1 MΩ, 13 pF (paralelně)

maximální vstupní napětí (DC + špičková hodnota): 400 V

Horizontální systém

Časová základna (hlavní i zpožděná)

rozsahy 5 s/d až 2 ns/d v 29 rozsazích

přesnost ČZ 0,01 %

plně kalibrované zjemnění rozsahů (vernier) - přesnost 0,05 %

pretriggering max. 10 d

posttriggering min. 2560 d nebo 50 ms, max. 100 s

zpožděná ČZ pro rychlosti hlavní základny 5 s/d až 10 ms/d

až 200× hlavní,

pro rychlosti hlavní základny 5 ms/d a vyšší

až 2 ns/d

druhy spouštění časové základny NORM, AUT, TV, jednorázové

HOLD OFF - nastavitelné 200 ns až 13 s

citlivost a kmitočtové rozsahy obou kanálů jako u vertikálních. Režim X - Y

fázový rozdíl mezi kanály méně než 3° do 100 kHz

Vzorkování

maximální vzorkovací frekvence pro periodický signál

při jednorázovém spuštění

10 GHz (stroboskopicky) 20 MHz pro jeden kanál (10 MHz dvoukanálově)

rozlišení 8 bit

zaznamenaná délka 4000 bodů

(2000 bodů při jednorázovém spuštění)

"Peak detect" glitch 50 ns

> (100 ns při dvoukanálovém provozu) při rychlostech ČZ 50 µs/d a vyšších

průměrování přepínatelné: z 8, 64, 256 vzorků

Další funkce

V_{avg} - střední hodnota, V_{rms} - efektivní hodnota, měření napětí

V_{pp} - napětí špička-špička,

 V_{min} , V_{max} – min. a max. hodnota,

V_{top}, V_{base} - ustálená hodnota horní (dolní) části impulsu

f, T, střída (duty cycle), +width, -width, tj. trvání kladné měření času

(záporné) části impulsu, doba náběhu (rise time), doba poklesu

(fall time)

kurzory nastavitelné ručně i automaticky

funkce "autoscale" pro většinu periodických průběhů automatické nastavení

nastaví vhodné rozsahy osciloskopu pro zobrazení a

zasynchronizování

Nastavení osciloskopu a sejmuté průběhy lze uložit do paměti:

15 nastavení ovládacích prvků

2 naměřené průběhy

Je-li osciloskop opatřen paměťovým modulem, lze uchovat (i po vypnutí) až 100 průběhů (podle složitosti), přičemž první 3 průběhy se uchovávají v plné formě a u dalších je provedena komprese dat.

S modulem pro zpracování signálu lze realizovat matematické funkce +, -, *, integrál, du/dt, FFT.

0.6.2. Voltmetry a multimetry

TVT-321 (Troneer)

Typ 1-kanálový střídavý elektronický analogový voltmetr

Rozsahy $300 \mu V$, 1 mV, 3 mV, 10 mV, 100 mV, 300 mV, 1 V, 3 V, 10 V,

30 V, 100 V - ruční přepínání rozsahů

Přesnost $\pm 3 \%$ rozsahu ... pro f = 1 kHz

± 13 % rozsahu ... pro frekvenční rozsah 5 Hz až 1 MHz ± 8 % rozsahu ... pro frekvenční rozsah 10 Hz až 500 kHz ± 6 % rozsahu ... pro frekvenční rozsah 20 Hz až 200 kHz

Vstupní impedance 1 M Ω (± 5 %) paralelně s 45 pF (max.)

Mezní hodnoty vstupního napětí 500 V (DC+AC) na rozsazích 1 V až 100 V

100 V (DC+AC) na rozsazích 300 μV až 100 mV

Stabilita $\pm 0.5 \%$ z rozsahu pro $\pm 10 \%$ kolísání síťového napětí

Zbytkové napětí při zkratu vstupu 2 % rozsahu

M1T 330 (Metra)

Typ číslicový stejnosměrný voltmetr, výrobce Metra

Princip činnosti Voltmetr využívá jednopolaritní integrační převodník, který

zajišťuje proměnnou dobu integrace podle doby periody sítě. Tím je dosaženo potlačení sériového rušivého napětí pro síťový

kmitočet 50 i 60 Hz lepšího než 60 dB.

Rozsahy 300 mV, 3 V, 30 V, 300 V

přepínané automaticky (lze blokovat tlačítkem "auto")

Délka stupnice 30 000 (lze překročit na 32 000 bez ztráty přesnosti)

Vstupní odpor $> 10^9 \Omega$ na rozsazích 300 mV až 30 V; 10 M Ω na rozs. 300 V

Základní přesnost $\pm 0.01 \%$ údaje $\pm 0.01 \%$ rozsahu

Rychlost měření při ovládání z panelu min. 4 měření/s bez filtrace

2 měření/s s filtrací

při řízení po sběrnici max 25 měření/s, doba měření 36 - 50 ms bez filtrace, max 350 ms s filtrací; při automatické volbě

rozsahů doba měření (s filtrací) max 1500 ms

Mezní hodnoty vstupního napětí 320 V na rozsazích 300 mV až 30 V,

nebo při automatickém přepínání rozsahů;

650 V na rozsahu 300 V

Maximální souhlasná napětí 500 V mezi G a zemí; 60 V mezi L a G

Číslicová filtrace funkce FILTR zobrazí aritmetický průměr z 8 odměrů

Výpočet přesnosti funkce CHYBA zobrazí výsledek výpočtu

 $\delta_{\rm N} = 0.01 + 0.01 \frac{M}{N} \ (\%),$

kde M je rozsah, N je měřená hodnota

DMM 7001

Typ 4 1/2 místný stolní digitální multimetr s integračním A/D pře-

vodníkem ICL 7135 (Maxim) a "true RMS to DC" převodníkem

AD 636 (Analog Devices)

Měření stejnosměrných napětí

Rozsahy 200 mV, 2 V, 20 V, 200 V, 1000V Přesnost $\pm 0,05$ % údaje $\pm 0,01$ % rozsahu

Měření střídavých napětí

Rozsahy 200 mV, 2 V, 20 V, 200 V, 400 V Přesnost $\pm 0.5\%$ údaje $\pm 0.15\%$ rozsahu

Vstupní odpor 1 MΩ na všech napěťových rozsazích

Měření stejnosměrných a střídavých proudů

Rozsahy 20 μ A, 200 μ A, 2 mA, 20 mA, 200 mA, 2000 mA, 20 A

Přesnost $\pm 0.2 \%$ údaje $\pm 0.01 \%$ rozsahu pro stejnosměrné proudy

 \pm 0,5 % údaje \pm 0,15 % rozsahu pro střídavé proudy

Úbytek napětí 200 mV při plném rozsahu na všech proudových rozsazích

Výrobce udává, že na střídavých rozsazích přístroj měří správnou efektivní hodnotu

do 5 kHz.

DM-441B (LG Precision)

Typ 4 ½-místný stolní digitální multimetr s integračním A/D pře-

vodníkem a počítacím převodníkem efektivní hodnoty

(True RMS) pro střídavý proud a napětí; měření 2,5-krát/s

Funkce	Rozsah	Rozlišení	Přesnost	Frekvenční rozsah
Měření	200 mV	10 μV	± (0,1 % údaje + 4 digity)	
stejnosměrného napětí	2 V	100 μV	± (0,1 % údaje + 4 digity)	
•	20 V	1 mV	± (0,1 % údaje + 4 digity)	
	200 V	10 mV	± (0,1 % údaje + 4 digity)	
	1000 V	100 mV	± (0,15 % údaje + 4 digity)	
Vstupní odpor	přibližně 1	l0 MΩ na v	šech napěťových rozsazích	
Měření střídavého	200 mV	10 μV	± (0,5 % údaje + 20 digitů)	45 Hz až 1 kHz
napětí	2 V	100 μV	\pm (0,5 % údaje + 20 digitů)	45 Hz až 1 kHz
		•	\pm (0,8 % údaje + 10 digitů)	1 kHz až 10 kHz
			\pm (1,0 % údaje + 20 digitů)	10 kHz až 20 kHz
			$\pm (3.0 \% \text{ údaje} + 30 \text{ digitů})$	20 kHz až 50 kHz
	20 V	1 mV	± (0,5 % údaje + 20 digitů)	45 Hz až 1 kHz
			\pm (1,5 % údaje + 20 digitů)	1 kHz až 10 kHz
			\pm (2,5 % údaje + 20 digitů)	10 kHz až 20 kHz
			\pm (5,0 % údaje + 20 digitů)	20 kHz až 50 kHz
	200 V	10 mV	\pm (0,5 % údaje + 10 digitů)	45 Hz až 1 kHz
			$\pm (2.0 \% \text{ údaje} + 10 \text{ digitů})$	1 kHz až 10 kHz
	750 V	100 mV	\pm (1,0 % údaje + 20 digitů)	45 Hz až 1 kHz
			\pm (3,5 % údaje + 20 digitů)	1 kHz až 10 kHz
Měření	2 mA	0,1 μΑ	± (0,5 % údaje +	1 digit)
stejnosměrného proudu	20 mA	1 μΑ	± (0,5 % údaje +	1 digit)
product	200 mA	10 μΑ	\pm (0,5 % údaje + 1 digit)	
2 A $100 \mu A$ $\pm (0.5 \% \text{ údaje} + 1 \text{ dis}$		1 digit)		
	10 A	1 mA	$\pm (0.75 \% \text{ údaje} + 1.0 \% \text{ vidaje})$	3 digity)
Úbytek napětí na	Rozsahy 2	mA až 200 n	nA: max. 0,3 V;	<i>C J y</i>
bočníku	rozsahy 2 A	A a 10 A: ma	· ·	1
Měření střídavého	2 mA	0,1 μΑ		45 Hz až 10 kHz
proudu			\pm (2,0 % údaje + 20 digitů)	10 kHz až 20 kHz
	20 mA	1 μΑ		45 Hz až 10 kHz
			± (2,0 % údaje + 20 digitů)	10 kHz až 20 kHz
	200 mA	10 μΑ		45 Hz až 10 kHz
			$\pm (2.0 \% \text{ údaje} + 20 \text{ digitů})$	10 kHz až 20 kHz
	2 A	100 μΑ		45 Hz až 2 kHz
	10 A	1 mA	$\pm (1.0 \% \text{ údaje} + 10 \text{ digitů})$	45 Hz až 20 kHz
Měření odporu	200 Ω			
	2 kΩ			
	20 kΩ	1 Ω	, ,	
	200 kΩ	10 Ω	1	
	2 MΩ	100 Ω		
	20 MΩ	1 kΩ	$\pm (0.5 \% \text{ údaje} + 2.0 \% \text{ vidaje})$	2 digity)

Funkce	Rozsah	Rozlišení	Přesnost	
Měření frekvence	20 kHz	1 Hz	\pm (1,0 % údaje + 3 digity)	
	200 kHz	10 Hz	\pm (2,0 % údaje + 3 digity)	
h-parametry FET	Proud báze 3,5 μ A; $U_{CE} = 4,5 \text{ V (přibližně)}$			
Diody	Napětí 4,5 V (přibližně); max. proud 1 mA			
Vodivé spojení	Hodnota odporu 200 Ω a méně			

GDM-8145 (GW Instek)

Type

4 ½-místný číslicový multimetr, jímž lze měřit: stejnosměrné (DC) a střídavé (AC) napětí, stejnosměrný a střídavý proud, odpor. Přístroj měří pravou efektivní hodnotu (TRUE RMS) AC nebo AC+DC signálů s frekvencemi do 50 kHz.

Funkce	Rozsah	Rozlišení	Přesnost	Frekvenční rozsah
Měření	200 mV	10 μV		
stejnosměrného	2 V	100 μV		
napětí (DC)	20 V	1 mV	\pm (0,03 % údaje + 4 digity)	
	200 V	10 mV		
	1000 V	100 mV		
Vstupní impedance	na	všech rozsaz	ích 10 MΩ 100 pF	
Měření střídavého	200 mV	10 μV	± (1 % údaje + 15 digitů)	20 Hz 45 Hz
napětí (AC nebo		·	\pm (0,5 % údaje + 15 digitů)	45 Hz2 kHz
AC+DC)			\pm (1 % údaje + 15 digitů)	2 kHz10 kHz
(TRUE RMS)			\pm (2 % údaje + 30 digitů)	10 kHz20 kHz
			± (5 % údaje + 30 digitů)	20 kHz50 kHz
	2 V	$100 \mu V$	\pm (1 % údaje + 15 digitů)	20 Hz 45 Hz
			\pm (0,5 % údaje + 15 digitů)	45 Hz2 kHz
			\pm (1 % údaje + 15 digitů)	2 kHz10 kHz
			\pm (2 % údaje + 30 digitů)	10 kHz20 kHz
			± (5 % údaje + 30 digitů)	20 kHz50 kHz
	20 V	1 mV	\pm (1 % údaje + 15 digitů)	20 Hz 45 Hz
			\pm (0,5 % údaje + 15 digitů)	45 Hz2 kHz
			\pm (1 % údaje + 15 digitů)	2 kHz10 kHz
			\pm (2 % údaje + 30 digitů)	10 kHz20 kHz
			± (5 % údaje + 30 digitů)	20 kHz50 kHz
	200 V	10 mV	$\pm (1 \% \text{ údaje} + 15 \text{ digitů})$	20 Hz 45 Hz
			\pm (0,5 % údaje + 15 digitů)	45 Hz1 kHz
	1000 V	100 mV	\pm (1 % údaje + 15 digitů)	20 Hz 45 Hz
			\pm (0,5 % údaje + 15 digitů)	45 Hz1 kHz

Funkce	Rozsah	Rozlišení	Přesnost	Frekvenční rozsah
Měření	200 μΑ	0.01 μΑ		
stejnosměrného proudu (DC)	2 mA	0.1 μΑ	\pm (0,2 % údaje + 2 digity)	
produce (BG)	20 mA	1 μΑ		
	200 mA	10 μΑ		
	2000 mA	100 μΑ	\pm (0,3 % údaje + 2 digity)	
	20 A	1 mA		
Úbytek napětí na bočníku při max. výchylce			zsahy 200 µA, 2 mA, 20 mA, 2 zsahy 2 A a 20 A	00 mA;
Měření střídavého	200 μΑ	0.01 μΑ	\pm (1 % údaje + 15 digitů)	20 Hz 45 Hz
proudu (AC nebo			\pm (0,5 % údaje + 15 digitů)	45 Hz2 kHz
AC+DC)			\pm (1 % údaje + 15 digitů)	2 kHz10 kHz
(TRUE RMS)			\pm (2 % údaje + 15 digitů)	10 kHz20 kHz
	2 mA	$0.1 \mu A$	\pm (1 % údaje + 15 digitů)	20 Hz 45 Hz
			\pm (0,5 % údaje + 15 digitů)	45 Hz2 kHz
			\pm (1 % údaje + 15 digitů)	2 kHz10 kHz
			\pm (2 % údaje + 15 digitů)	10 kHz20 kHz
	20 mA	1 μΑ	\pm (1 % údaje + 15 digitů)	20 Hz 45 Hz
			\pm (0,5 % údaje + 15 digitů)	45 Hz2 kHz
			\pm (1 % údaje + 15 digitů)	2 kHz10 kHz
			± (2 % údaje + 15 digitů)	10 kHz20 kHz
	200 mA	10 μΑ	$\pm (1 \% \text{ údaje} + 15 \text{ digitů})$	20 Hz 45 Hz
			\pm (0,5 % údaje + 15 digitů)	45 Hz2 kHz
			\pm (1 % údaje + 15 digitů)	2 kHz10 kHz
			± (2 % údaje + 15 digitů)	10 kHz20 kHz
	2000 mA	100 μΑ	± (1 % údaje + 15 digitů)	20 Hz 45 Hz
			$\pm (0.5 \% \text{ údaje} + 15 \text{ digitů})$	45 Hz2 kHz
	20 A	1 mA	± (1 % údaje + 15 digitů)	20 Hz 45 Hz
			± (0,5 % údaje + 15 digitů)	45 Hz2 kHz

				Napětí na neznámém odporu odpovídající max. hodnotě rozsahu
Měření odporu	200Ω	0.01 Ω	\pm (0,1 % údaje + 4 digity)	0,2 V
	$2 \text{ k}\Omega$	0.1 Ω		2 V
	20 kΩ	1 Ω	\pm (0,1 % údaje + 2 digity)	2 V
	200 kΩ	10 Ω		0,2 V
	2000 kΩ	100 Ω	$\pm (0.25 \% \text{ údaje} + 2 \text{ dig.})$	2 V
	20 MΩ	1 kΩ		2 V
Test diody	Testování diod lze provádět na třech rozsazích; preferován je rozsah 2 kΩ, který je označen velkým symbolem diody.			

Summit 45 (Brighton Electronics)

Тур

přenosný digitální multimetr se 4-místným displejem (obnova 2krát za sekundu), s automatickou nebo ruční volbou rozsahů pro měření stejnosměrného napětí a proudu, střídavého napětí a proudu (s použitím usměrňovače - měří aritmetickou střední hodnotu, ale je kalibrován v efektivních hodnotách sinusového průběhu), měření odporu, testování diod a zjišťování zkratů

Funkce	Rozsah	Rozlišení	Přesnost
Měření	400 mV	0,1 mV	
stejnosměrného napětí	4 V	1 mV	
	40 V	10 mV	± (0,3 % údaje + 2 digity)
	400 V	100 mV	
	1000 V	1 V	
Vstupní impedance	10 MΩ na	ı všech napě	eťových rozsazích
Měření střídavého	4 V	1 mV	± (0,8 % údaje + 3 digity)
napětí	40 V	10 mV	± (0,8 % údaje + 3 digity)
(45 Hz až 450 Hz)	400 V	100 mV	± (1,2 % údaje + 3 digity)
	750 V	1 V	± (1,2 % údaje + 3 digity)
Měření	400 μΑ	0,1 μΑ	± (0,5 % údaje + 2 digity)
stejnosměrného proudu	4 mA	0,001 mA	± (0,5 % údaje + 2 digity)
	40 mA	0,01 mA	± (0,5 % údaje + 2 digity)
	400 mA	0,1 mA	$\pm (0.5 \% \text{ údaje} + 2 \text{ digity})$
	4 A	1 mA	± (1,2 % údaje + 2 digity)
	10 A	0,01 A	± (1,2 % údaje + 2 digity)
Měření střídavého	400 μΑ	0,1 μΑ	\pm (0,8 % údaje + 3 digity)
proudu	4 mA	0,001 mA	± (0,8 % údaje + 3 digity)
	40 mA	0,01 mA	± (0,8 % údaje + 3 digity)
	400 mA	0,1 mA	± (0,8 % údaje + 3 digity)
	4 A	1 mA	± (1,5 % údaje + 3 digity)
	10 A	0,01 A	± (1,5 % údaje + 3 digity)

Funkce	Rozsah	Rozlišení	Přesnost
Měření odporu	400Ω	0,1 Ω	± (0,5 % údaje + 2 digity)
	4 kΩ	1 Ω	\pm (0,5 % údaje + 2 digity)
	40 kΩ	10 Ω	\pm (0,5 % údaje + 2 digity)
	400 kΩ	100 Ω	\pm (0,5 % údaje + 2 digity)
	4 MΩ	1 kΩ	± (1 % údaje + 2 digity)
	40 MΩ	$10 \mathrm{k}\Omega$	\pm (1 % údaje + 2 digity)
Test diod	Testovací napětí 3 V, proud přibližně 30 μA		
Zjišťování zkratu	Testovací napětí 3 V, prahová úroveň < 50 Ω		

Maximální povolené napětí mezi vstupem a zemí: 1000 V

Pojistky: mA: 0,5 A/600 V_{AC} ; A: 10 A/600 V_{AC}

Napájení: 2 ks baterií "AA" (1,5 V)Velikost: 33 mm × 86 mm × 187 mm

Hmotnost: 340 g

MY64 (Mastech)

Тур

přenosný digitální multimetr se 4-místným displejem (obnova údaje 2 až 3-krát za sekundu), s ruční volbou rozsahů pro měření stejnosměrného napětí a proudu, střídavého napětí a proudu (s použitím usměrňovače - měří aritmetickou střední hodnotu, ale je kalibrován v efektivních hodnotách sinusového průběhu), měření odporu, kapacity a teploty, testování diod a tranzistorů, zjišťování zkratů

Funkce	Rozsah	Rozlišení	Přesnost
Měření	200 mV	0,1 mV	± (0,5 % údaje + 1 digit)
stejnosměrného napětí	2 V	1 mV	± (0,5 % údaje + 1 digit)
	20 V	10 mV	± (0,5 % údaje + 1 digit)
	200 V	100 mV	± (0,5 % údaje + 1 digit)
	1000 V	1 V	± (0,8 % údaje + 2 digity)
Vstupní impedance	10 MΩ na všech napěťových rozsazích		

Funkce	Rozsah	Rozlišení		Přesnost		
Měření střídavého	200 mV	0,1	mV	± (1,2 % údaje + 3 digity)		
napětí (40 Hz až 400 Hz)	2 V	1	mV	± (0,8 % údaje + 3 digity)		
(40 HZ dZ 400 HZ)	20 V	10	mV	± (0,8 % údaje + 3 digity)		
	200 V	100	mV	± (0,8 % údaje + 3 digity)		
	750 V	1 V		± (1,2 % údaje + 3 digity)		
					Odpor bočníku	
Měření	2 mA	0,001	mA	\pm (1,0 % údaje + 3 digity)	110 Ω	
stejnosměrného proudu	20 mA	0,01	mA	\pm (1,0 % údaje + 3 digity)	15 Ω	
	200 mA	0,1	mA	± (1,8 % údaje + 3 digity)	5 Ω	
	10 A	10	mA	± (3,0 % údaje + 7 digitů)	0,03 Ω	
Měření střídavého	400 μΑ	0,1	μΑ	± (1,0 % údaje + 3 digity)	110 Ω	
proudu (40 Hz až 400 Hz)	4 mA	0,001	mA	± (1,0 % údaje + 3 digity)	15 Ω	
(**************************************	40 mA	0,01	mA	± (1,8 % údaje + 3 digity)	5 Ω	
	400 mA	0,1	mA	± (3,0 % údaje + 7 digitů)	0,03 Ω	
				Přesnost		
Měření odporu	200 Ω	0,1 Ω		\pm (0,8 % údaje + 3 digity)		
	2 kΩ	1 Ω		\pm (0,8 % údaje + 1 digity)		
	20 kΩ	10 Ω		± (0,8 % údaje + 1 digity)		
	200 kΩ	100 Ω		± (0,8 % údaje + 1 digity)		
	2 MΩ	1 kΩ		± (0,8 % údaje + 1 digity)		
	20 ΜΩ	10	kΩ	± (1,0 % údaje + 2 digity)		
	200 ΜΩ	100	kΩ	\pm 5,0 % (údaj – 10 digitů) \pm 2 digity		
				Pozn.: Při zkratu vstupních svorek ukáže displej 1 MΩ - tuto hodnotu je nutné odečíst od naměřené hodnoty.		
Měření frekvence	20 kHz	10) Hz	\pm (1,5 % údaje + 5 digitů)		
Měření teploty	-20 až () °C		± (5,0 % údaje -	+ 4 digity)	
-20 °C až 1000 °C	0 °C až 4	00 °C 1°C		$\pm (1,0 \% \text{ údaje} + 3 \text{ digity})$		
	400 °C až	1000 °C		± 2,0 % údaje		
Měření kapacity	2 nF	1 pF		± (4,0 % údaje -	+ 3 digity)	
	20 nF	F 10 pF		± (4,0 % údaje -	+ 3 digity)	
	200 nF	100 pF		± (4,0 % údaje -	+ 3 digity)	
	2 μF	1 nF		± (4,0 % údaje -	+ 3 digity)	
	20 μF	10) nF	± (4,0 % údaje + 3 digity)		

Maximální povolené napětí mezi vstupem a zemí: $1000~V_{ss}$ nebo $700~V_{RMS}$ (sinus)

Pojistky: mA: 200 mA/250 V; A: bez jištění

Napájení: 1 ks baterie 9 V

Velikost: $31,5 \text{ mm} \times 91 \text{ mm} \times 189 \text{ mm}$

Hmotnost: 310 g (včetně baterie)

HP 34401A (Hewlett-Packard)

Typ kvalitní šestidekádový multimetr vyšší střední třídy

s automatickým přepínáním rozsahů a možností připojení do

měřicího systému se sběrnicí GP-IB nebo RS-232

Základní parametry

Měření stejnosměrného napětí (měřicí metoda: integrační)

Rozsah	Dlouhodobá přesnost	Vstupní odpor
100,0000 mV	± 0,0050 % údaje ± 0,0035 % rozsahu	$10 \text{ M}\Omega \text{ nebo} > 10 \text{ G}\Omega$
1,000000 V	\pm 0,0040 % údaje \pm 0,0007 % rozsahu	$10 \text{ M}\Omega \text{ nebo} > 10 \text{ G}\Omega$
10,00000 V	$\pm0,\!0035$ % údaje $\pm0,\!0005$ % rozsahu	$10 \text{ M}\Omega \text{ nebo} > 10 \text{ G}\Omega$
100,0000 V	± 0,0045 % údaje ± 0,0006 % rozsahu	$10 \text{ M}\Omega \pm 1 \%$
1000,000 V	± 0,0045 % údaje ± 0,0010 % rozsahu	$10 \text{ M}\Omega \pm 1 \%$

Měření stejnosměrného proudu

Rozsah	Dlouhodobá přesnost	Odpor měřicího bočníku
10,00000 mA	± 0,050 % údaje ± 0,020 % rozsahu	5 Ω
100,0000 mA	± 0,050 % údaje ± 0,005 % rozsahu	5 Ω
1,000000 A	\pm 0,100 % údaje \pm 0,010 % rozsahu	0,1 Ω
3,000000 A	± 0,120 % údaje ± 0,020 % rozsahu	0,1 Ω

Měření odporu (měřicí metoda 4-vodičová nebo 2-vodičová)

Rozsah	Dlouhodobá přesnost
100,0000 Ω	± 0,010 % údaje ± 0,004 % rozsahu
1,000000 kΩ	$\pm0,\!010$ % údaje $\pm0,\!001$ % rozsahu
10,00000 kΩ	± 0,010 % údaje ± 0,001 % rozsahu
100,0000 kΩ	$\pm0,\!010$ % údaje $\pm0,\!001$ % rozsahu
1,000000 ΜΩ	± 0,010 % údaje ± 0,001 % rozsahu
10,00000 MΩ	$\pm0,\!040$ % údaje $\pm0,\!001$ % rozsahu
100,0000 MΩ	$\pm0,\!800$ % údaje $\pm0,\!010$ % rozsahu

Měření střídavého napětí - měří TRUE RMS (střídavá vazba)

Napěťový a frekvenční rozsah	Dlouhodobá přesnost	Vstupní impedance
100,0000 mV		
3 Hz 5 Hz	± 1,00 % údaje ± 0,04 % rozsahu	1 MΩ paral. 100 pF
5 Hz 10 Hz	\pm 0,35 % údaje \pm 0,04 % rozsahu	1 MΩ paral. 100 pF
10 Hz 20 kHz	\pm 0,06 % údaje \pm 0,04 % rozsahu	1 MΩ paral. 100 pF
20 kHz 50 kHz	\pm 0,12 % údaje \pm 0,05 % rozsahu	1 MΩ paral. 100 pF
50 kHz100 kHz	\pm 0,60 % údaje \pm 0,08 % rozsahu	1 MΩ paral. 100 pF
100 kHz 300 kHz	\pm 4,00 % údaje \pm 0,50 % rozsahu	1 MΩ paral. 100 pF
1,000000 V až 750,000 V		
3 Hz 5 Hz	± 1,00 % údaje ± 0,03 % rozsahu	1 MΩ paral. 100 pF
5 Hz 10 Hz	\pm 0,35 % údaje \pm 0,03 % rozsahu	1 MΩ paral. 100 pF
10 Hz 20 kHz	\pm 0,06 % údaje \pm 0,03 % rozsahu	1 MΩ paral. 100 pF
20 kHz 50 kHz	\pm 0,12 % údaje \pm 0,05 % rozsahu	1 MΩ paral. 100 pF
50 kHz100 kHz	\pm 0,60 % údaje \pm 0,08 % rozsahu	1 MΩ paral. 100 pF
100 kHz 300 kHz	\pm 4,00 % údaje \pm 0,50 % rozsahu	1 MΩ paral. 100 pF

Měření střídavého proudu

Proudový a frekvenční rozsah	Dlouhodobá přesnost	Odpor měřicího bočníku		
1,000000 A				
3 Hz 5 Hz	± 1,00 % údaje ± 0,04 % rozsahu	0,1 Ω		
5 Hz 10 Hz	± 0,30 % údaje ± 0,04 % rozsahu	0,1 Ω		
10 Hz 20 kHz	± 0,10 % údaje ± 0,04 % rozsahu	0,1 Ω		

3.000000 A				
3 Hz 5 Hz	± 1,10 % údaje ± 0,06 % rozsahu	0,1 Ω		
5 Hz 10 Hz	± 0,35 % údaje ± 0,06 % rozsahu	0,1 Ω		
10 Hz 20 kHz	± 0,15 % údaje ± 0,06 % rozsahu	0,1 Ω		

Měření kmitočtu a periody

Napěťové rozsahy	Frekvence	Přesnost
100 mV až 750 V _{RMS}	3 Hz 5 Hz	± 0,1 % údaje
	5 Hz 10 Hz	± 0,05 % údaje
	10 Hz 40 Hz	± 0,01 % údaje
	40 Hz 300 kHz	± 0,01 % údaje

Ovládací prvky na předním panelu

- 1. Měřicí funkce
- 2. Matematické funkce: posunutí nuly, sledování minima/maxima, výpočet hodnoty v dB
- 3. Spouštění: jednonásobné/automatické/hold režim
- 4. Shift tlačítko LOCAL přechod z dálkového do místního režimu
- 5. Přepínač předních a zadních vstupních svorek
- 6. Rozsah/rozlišení po zapnutí se nastaví rozlišení 5 digitů; lze nastavit rozlišení 4 digity (rychlé měření) nebo 6 digitů
- 7. Tlačítka pro práci s menu

Ovládací prvky na zadním panelu

- 1. Uzemnění
- 2. Síťová pojistka
- 3. Nastavení síťového napětí
- 4. Vstupní pojistka pro proudové rozsahy
- 5. Analogový výstup
- 6. Vstup pro externí spouštění
- 7. Konektor pro GPIB (IEEE488) interface
- 8. Konektor pro sériový interface RS232

Menu: Některé funkce voltmetru lze v lokálním režimu nastavovat pouze za použití Menu - viz manuál k přístroji.

MXD-4660A (Metex)

Тур

4 1/2 místný stolní digitální multimetr s integračním A/D převodníkem a počítacím převodníkem efektivní hodnoty (True RMS) pro střídavý proud a napětí

Funkce	Rozsah	Rozlišení - R	Přesnost	Frekvenční rozsah
Měření stejnosměrného napětí	200 mV	10 μV		
	2 V	100 μV	$\pm (0.05 \% \text{ údaje} + 3.R)$	
	20 V	1 mV		
	200 V	10 mV		
	1000 V	100 mV	$\pm (0,1 \% \text{ údaje} + 5.R)$	
Vstupní odpor	10 MΩ na všech napěťových rozsazích			
Měření	200 mV	10 μV		
střídavého	2 V	100 μV	$\pm (0.8 \% \text{ údaje} + 10.R)$	40 Hz až 1 kHz
napětí	20 V	1 mV	$\pm (2.5 \% \text{ údaje} + 10.R)$	1 kHz až 10 kHz
	200 V	10 mV		
	750 V	100 mV	$\pm (0.8 \% \text{ údaje} + 10.R)$	neudáno
Vstupní impedance	10 MΩ 100 pF na všech napěťových rozsazích			
Měření	2 mA	100 nA		
stejnosměrného	20 mA	1 μΑ		
proudu	200 mA	10 μΑ	$\pm (0.3 \% \text{ údaje} + 3.R)$	
	20 A	1 mA	$\pm (0.5 \% \text{ údaje} + 3.R)$	
Měření	2 mA	100 nA		
střídavého	20 mA	1 μΑ	$\pm (1,5 \% \text{ údaje} + 10.R)$	40 Hz až 1 kHz
proudu	200 mA	10 μΑ		
	20 A	1 mA	$\pm (1,5 \% \text{ údaje} + 15.R)$	40 Hz až 1 kHz
NAYY / I	200 Ω	0,01 Ω	$\pm (0.2 \% \text{ údaje} + 5.R)$	
Měření odporu	$2\;k\Omega$	0,1 Ω		
	$20 \; k\Omega$	1 Ω		
	$200 \; k\Omega$	10 Ω	$\pm (0.15 \% \text{ údaje} + 3.R)$	
	2 ΜΩ	100 Ω		
	20 ΜΩ	1 kΩ	$\pm (0.5 \% \text{ údaje} + 5.R)$	
Měření	20 kHz	1 Hz		
frekvence	200 kHz	10 Hz		
	2 MHz	100 Hz	$\pm (0,1 \% \text{ údaje} + 2.R)$	
	20 MHz	1 kHz		
h-parametry	Max. testovací proud 1000 μA			
Kontrola diod	Max. proud 1 mA			

PK 430.1 (Metra Blansko)

Тур

univerzální klešťový přístroj s číslicovým zobrazením; je určen k měření

- skutečné efektivní hodnoty (True RMS) proudu a napětí
- střídavého proudu a napětí
- stejnosměrného proudu a napětí
- střídavého činného a zdánlivého výkonu
- stejnosměrného výkonu
- čtyřkvadrantové hodnoty účiníku (odběr, dodávka, induktivní, kapacitní)
- kmitočtu proudu nebo napětí
- odporu (včetně akustického zkratoměru a měření polovodičového přechodu)
- teploty

Technické parametry (převzato z katalogu výrobce)

Měřená veličina	Měřicí rozsah	Rozlišovací schopnost	Základní chyba	Střední četnost měření (n/s)
Střídavý proud	39,99	0,01	1 % rozsahu	4,0
AC, AC+DC (A)	399,9	0,10	1 % rozsahu	4,0
0 až 1000 A	1000	1,00	1 % rozsahu	4,0
Stejnosměrný proud	39,99	0,01	2 % rozsahu 1)	4,0
DC, AC+DC (A)	399,9	0,10	1 % rozsahu	4,0
0 až 1000 A	1000	1,00	1 % rozsahu	4,0
Napětí AC, DC,	39,99	0,01	0,5 % rozsahu	4,0
AC+DC (V)	399,9	0,10	0,5 % rozsahu	4,0
0 až 1000 V	1000	1,00	0,5 % rozsahu	4,0
Činný výkon (kW)	3,999	0,001	2 % rozsahu 1)	0,4
0,4 až 1000 kW	39,99	0,010	2 % rozsahu	0,4
(napětí 10 až 1000 V	399,9	0,100	2 % rozsahu	0,4
proud 10 až 1000 A)	1000	1,000	2 % rozsahu	0,4
Zdánlivý výkon (kVA)	3,999	0,001	2 % rozsahu	0,6
0,1 až 1000 kVA	39,99	0,010	2 % rozsahu	0,6
(napětí 10 až 1000 V	399,9	0,100	2 % rozsahu	0,6
proud 10 až 1000 A)	1000	1,000	5 % rozsahu pod 40 A	0,6
Účiník				
(napětí 10 až 1000 V	-1,0 až 1,0 L	0,01	3 % rozsahu	
proud 40 až 1000 A	-1,0 až 1,0 C	0,01	3 % rozsahu	0,4
zdánlivý výkon				
1 až 1000 kVA)				
Kmitočet (Hz)				
20 až 3999 Hz	399,9	0,1	0,5 % rozsahu	
napětí 10 až 1000 V	3999	1,0	0,5 % rozsahu	3,5
20 až 399,9 Hz				
proud 15 až 1000 A				
Odpor (Ω)	399,9	0,1	0,5 % rozsahu	
0 až 399,9 kΩ	3,999 k	0,001 k	0,5 % rozsahu	
	39,99 k	0,010 k	0,5 % rozsahu	12,5
	399,9 k	0,100 k	0,5 % rozsahu	
Teplota (°C)	-50 až +125,0	0,1	2,5 % rozsahu	12,5

Poznámky:

¹) Pokud při měření překročí velikost měřeného DC proudu hodnotu 200 A, je měření zatíženo přídavnou chybou až několik procent. Pro obnovení základní přesnosti měření je v tomto případě nutné provést autokalibraci přístroje sejmutím z měřeného vodiče a jeho vypnutím a zapnutím.

Kmitočtový rozsah střídavé vstupní veličiny pro zaručovanou přesnost měření

proudu: do 400 A 30 Hz až 300 Hz

nad 400 A 30 Hz až 100 Hz

napětí: 30 Hz až 1000 Hz

výkonů a účiníku: závisí na velikosti proudu (viz specifikace pro hodnoty proudu)

Vnitřní odpor vstupu napětí: $1 \, \mathrm{M}\Omega$

Napájecí baterie: 9 V, alkalická IEC 6LR 61, resp. IEC 6F22

max. odběr 15 mA

Doba provozu: s novou baterií min. 30 hodin,

nedostatečná hodnota napájecího napětí je indikována symbolem

"BAT" na displeji

Doba ustálení po zapnutí: max. 15 sekund, opakované zapnutí po prodlevě min. 3 s

Přetížitelnost vstupů:

trvalá: 120 % po dobu dvou hodin

krátkodobá: 10000 A_{DC} (proud), 1500 V_{DC} (napětí) po dobu 5 sekund, opakovaně

v časovém rozmezí min. 60 sekund

0.6.3. Zdroje

AGILENT E3640A (Single Output DC Power Supply)

Typ Zdroj stejnosměrného napětí a proudu programovatelný buď

pomocí ovládacích prvků na předním panelu, nebo pomocí sběrnice GPIB či RS-232. Volba jednoho ze dvou rozsahů se

provádí buď na předním panelu, nebo pomocí sběrnice.

Rozsahy 0 až +8 V / 0 až 3 A (volba "Low Range")

0 až +20 V / 0 až 1.5 A (volba "High Range")

PřesnostNapětí:< 0.05 % + 10 mV \pm (% výstupní hodnoty + offset)Proud:< 0.2 % + 10 mA

Zvlnění a šum Napětí: $< 0.5 \text{ mV}_{rms} \text{ a 5 mV}_{p-p}$

Proud: $< 1.5 \mu A_{rms}$

0.6.4. Generátory

GOLDSTAR FG-8002

Typ funkční generátor

Výstupní frekvence 0,02 Hz až 2 MHz v 7 stupních

Tvary signálu sinus, trojúhelník, pila, obdélník, TTL obdélník

Stabilita frekvence 0,5 % rozsahu (18 až 28 °C)

Nastavení symetrie od 10 : 1 do 1 : 10

Rozmítání 1 : 1 až 100 : 1 kmitočtem 0,5 Hz až 50 Hz (interně lineárně),

nebo externím napětím 0 až 10 V

Výstupní napětí plynule (max. 20 V_{p-p}), ±10 V offset plynule (naprázdno)

Výstupní impedance 50Ω

GOLDSTAR FG-2002C

Typ funkční generátor

Výstupní frekvence 0,02 Hz až 2 MHz v 7 stupních

Tvary signálu sinus, trojúhelník, pila, obdélník, TTL obdélník

Stabilita frekvence 0,5 % rozsahu (18 až 28 °C)

Nastavení symetrie od 10 : 1 do 1 : 10

Rozmítání 1 : 1 až 100 : 1 kmitočtem 0,5 Hz až 50 Hz (interně lineárně),

nebo externím napětím 1 až 10 V

Výstupní napětí plynule (max. $20 V_{p-p}$), $\pm 10 V$ offset plynule (naprázdno)

Výstupní impedance 50Ω

Generátor je vybaven 4-místným čítačem 2 Hz až 4 MHz (v 6 rozsazích i pro externí signály).

AG-7001C (LG Precision)

Typ audio generátor

Výstupní frekvence 10 Hz až 1 MHz v 5 stupních, spojité ladění 10 : 1 (rozsahy se

částečně překrývají)

Přesnost frekvence 5 % z rozsahu

Sinusový výstup výstupní napětí: 8 V_{RMS} a více (naprázdno)

výstupní impedance: přibližně 600 Ω

frekvenční char.: $\pm 2,5 \text{ V} (10 \text{ Hz až 1 MHz})$ zkreslení: 0,1 % (200 Hz až 100 kHz)

0,5 % (50 Hz až 500 kHz)

Obdélníkový výstup výstupní napětí: 10 V_{p-p} a větší

překmit: max. 2 % (při 1 kHz a max. amplitudě) trvání náběhu a sestupu: max. 120 ns při max. amplitudě

střída: $50 \% \pm 5 \%$ (při 1 kHz a max. amplitudě)

Externí synchr. charakteristiky:

 $\begin{array}{ll} \text{rozsah synchronizace:} & \pm 1 \, \% / V_{RMS} \\ \text{max. vstupní napětí:} & 10 \, V_{RMS} \\ \text{vstupní impedance:} & \text{přibl. } 10 \, \text{k}\Omega \end{array}$

Výstupní attenuátor (min. 100 dB)

ve 4 krocích: 0 dB, -10 dB, -20 dB, -40 dB (přesnost $\pm 1 dB$)

nastavitelný: -60 dB a více

Charakteristiky vestavěného čítače frekvence

frekvenční rozsah: 0,2 Hz až 50 MHz s automatickou volbou rozsahu

displej: 6-místný LED s údajem doby otevření hradla a jednotek

(MHz, kHz, Hz, mHz)

citlivost: 100 mV RMSvstupní impedance: $1 \text{ M}\Omega/25 \text{ pF}$ max. vstupní napětí: $250 \text{ V}_{\text{p-p}}$ časová základna: 10 MHz

přesnost: chyba časové základny + 1 digit

Programovatelná tlačítka: 400 Hz, 1 kHz (použitelné v audio i modulačním módu),

přesnost $\pm 0.5 \%$

0.6.5. Čítače

HP 53131A (Hewlett Packard)

Typ univerzální čítač do 225 MHz

Funkce měření frekvence, periody, šířky impulsu, střídy, trvání náběžné

a sestupné hrany impulsu, časového intervalu, poměru frekvencí, fázového rozdílu aj. (viz uživatelský manuál), volba pomocí

kombinací tlačítek nebo programovatelná

Některé vstupní parametry

Frekvenční rozsahy - kanál 1 a 2

DC vstup: DC až 225 MHz

AC vstup: 1 MHz až 225 MHz (50 Ω)

30 Hz až 225 MHz (1 M Ω)

Rozsah vstupních napětí

harmonický signál DC až 100 MHz: 20 mV_{RMS} až $\pm 5 \text{ V (AC+DC)}$

100 MHz až 200 MHz: 30 m V_{RMS} až ±5 V (AC+DC) 200 MHz až 225 MHz: 40 m V_{RMS} až ±5 V (AC+DC)

pravoúhlé impulsy šířka impulsu 4,5 ns až 10 ns $100 \text{ mV}_{\text{p-p}}$ až $10 \text{ V}_{\text{p-p}}$

šířka impulsu > 10 ns 50 mV_{p-p} až 10 V_{p-p}

Spouštěcí úroveň rozsah $\pm 5,125 \text{ V}$

přesnost \pm (15 mV + 1 % spouštěcí úrovně)

rozlišení 5 mV

Mezní napětí vstup 50Ω : $5 V_{RMS}$

vstup 1 M Ω : 350 V (DC+AC) (0 až 3,5 kHz)

350 V (DC+AC lineárně klesající k 5 V_{RMS})

 $5 V_{RMS} (> 100 \text{ kHz})$

Vstupní impedance $1 \text{ M}\Omega \parallel 30 \text{ pF} \text{ nebo } 50 \Omega$

Připojení signálu AC nebo DC

Vstupní filtr 100 kHz (nebo nezařazen) ... -20 dB pro f > 1 MHz

Vstupní citlivost volitelná - nízká, střední, vysoká Spouštění náběžnou nebo sestupnou hranou

Automatická spouštěcí úroveň rozsah 0 až 100 % po krocích 10 %

frekvence > 100 Hzvelikost $> 100 \text{ mV}_{\text{p-p}}$

Attenuátor napěťový rozsah ×10

spouštěcí rozsah ×10

Měření

frekvence, perioda 0,1 Hz až 225 MHz; 4,44 ns až 10 s

časový interval rozsah -1 ns až 105 s

poměr frekvencí Ch1/Ch2, Ch1/Ch3, Ch2/Ch1, Ch3/Ch1

rozsah 10⁻¹⁰ až 10¹¹

doba otevření hradla (auto) 100 ms

šířka impulsu Ch1/Ch2, Ch1/Ch3, Ch2/Ch1, Ch3/Ch1

Přídavné funkce možnost připojení externího referenčního kmitočtu

1, 5, 10 MHz

možnost volby vysoké nebo střední stability termostatovaných

oscilátorů v případě požadavku vysoké přesnosti

externí spouštění statistické výpočty automatické testování

možnost programování v SCPI

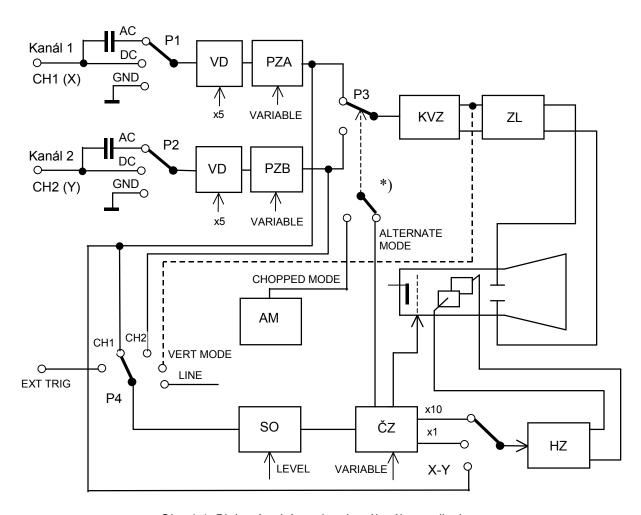
Programovatelné řízení je možné pomocí sběrnice HP-IB. Standardním vybavením čítače jsou porty pro připojení sběrnice HP-IB nebo sériové sběrnice RS-232C. Port pro sériové připojení je možno použít i pro vytištění měřených a analyzovaných dat na tiskárně nebo pro vyvedení signalizace překročení limitu signálů.

1. MĚŘENÍ ANALOGOVÝM OSCILOSKOPEM

1.1. Úkol měření

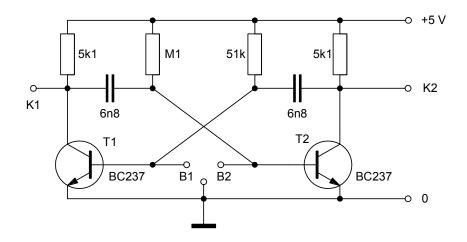
- 1.1.1. Po prostudování blokového schématu (obr. 1.1) a seznámení se s funkcí analogového laboratorního dvoukanálového osciloskopu zobrazte průběhy napětí ve vyznačených bodech astabilního klopného obvodu. U jednotlivých průběhů určete všechny dostupné informace (frekvenci, střídu, střední hodnotu, U_{\min} , U_{\max} , trvání vzestupných a sestupných hran).
- 1.1.2. S využitím nf generátoru a napětí 6 V o kmitočtu 50 Hz (z rozvaděče) ověřte funkci režimu X-Y osciloskopu (Lissajoussovy obrazce).

1.2. Schéma zapojení



Obr. 1.1 Blokové schéma dvoukanálového osciloskopu

(VD – vstupní děliče, P1, P2 – přepínače vstupů, PZA, PZB - předzesilovače, P3 – přepínač režimu (v jednokanálovém režimu měření - přepínání ručně, v dvoukanálovém režimu - přepínání elektronicky; pozn.: *) u některých osciloskopů je přepínání automatické podle rychlosti ČZ), P4 – přepínač synchronizace (SOURCE), KVZ - koncový vertikální zesilovač, ZL -zpožďovací linka, EXT TRIG – spouštění vnějším signálem, AM – astabilní multivibrátor (pro přepínání pevnou frekvencí), ČZ – časová základna, SO –spouštěcí obvod ČZ, ZL – zpožďovací linka, HZ - horizontální zesilovač)



Obr. 1.2 Schéma zapojení astabilního klopného obvodu (Př) s vyznačenými měřicími body

1.3. Seznam použitých přístrojů

OSC - osciloskop, typ ...

Př - přípravek s astabilním klopným obvodem

G - RC generátor, typ ...

1.4. Teoretický rozbor úlohy

Popis funkce osciloskopu – viz [1], str. 113 – 125.

a) Poznámky k ovládání osciloskopu

Měřené signály se připojují na vstupní konektory BNC (Kanál A, Kanál B – CH1, CH2 nebo Y1, Y2), jejichž společný vodič je spojen s kostrou osciloskopu, a tedy i se zemí. To je nutno respektovat jednak v zapojeních, kdy se měří dvoukanálově, jednak v zapojeních, kde se používá více měřicích přístrojů s jednou vstupní, popř. výstupní svorkou spojenou se zemí.

Nulovou úroveň signálu na stínítku osciloskopu zjistíme při poloze vstupního přepínače GND (0), kdy je vstupní signál odpojen a vstup předzesilovače je spojen se zemí osciloskopu. Časová základna (ČZ) osciloskopu musí být v tomto případě v režimu AUTO (automatické spouštění). Polohu stopy nastavíme potenciometrem POSITION příslušného kanálu.

Synchronizace časové základny s měřeným průběhem se provádí pomocí potenciometru LEVEL (úroveň). Při dosažení spouštěcí úrovně se vyšle spouštěcí impuls do obvodu časové základny, generuje se jedna perioda pilovitého průběhu napětí časové základny – v části "přímý běh" se stopa paprsku elektronů pohybuje zleva doprava po stínítku, v části "zpětný běh" se stopa paprsku vrátí na levou stranu obrazovky (není vidět). Pokud se děj periodicky opakuje, všechny takto získané stopy se překrývají a pozorovateli se jeví na stínítku jako statický obrázek. Pokud je úroveň nastavena mimo oblast signálu, synchronizace nenastane; v režimu "AUTO" bude obrázek na obrazovce v pohybu, v režimu "NORM" zůstane obrazovka zhasnuta. Zdroj synchronizačního signálu se volí přepínačem TRIGGER SOURCE (CH1, CH2, LINE – síť, EXT TRIG – vnější signál, případně VERT).

Poznámka: V synchronizačním režimu "VERT" (někdy "VERT MODE") je v alternačním módu přepínání kanálů časová základna synchronizována od toho kanálu, který je právě

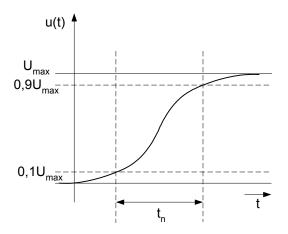
zobrazován. To umožňuje současné pozorování dvou průběhů různé frekvence (u dvoukanálových osciloskopů velmi netypické). Tento režim nesmí být použit při měření fázového rozdílu mezi průběhy na kanálech 1 a 2.

Na obou vstupech osciloskopu lze přepínačem zvolit stejnosměrnou (DC) nebo střídavou (AC) vazbu (přes kondenzátor) s měřeným zdrojem signálu.

Měřítko zobrazeného signálu se řídí přepínačem vstupního děliče (VD) VOLTS/DIV (V/dílek) pro každý kanál samostatně. Zvolená hodnota platí pouze tehdy, je-li jemná regulace citlivosti v poloze CAL (pravý doraz potenciometru).

Přepínač rychlosti běhu časové základny TIME/DIV (čas/dílek) umožňuje nastavení měřítka času na vodorovné ose. Časovou základnu lze vyřadit přepnutím do režimu funkce X-Y.

b) **Doba náběhu** t_n (trvání náběžné hrany impulsu) je délka časového intervalu, který uplyne mezi okamžikem, kdy signál dosáhne 10 % amplitudy, a okamžikem, kdy signál dosáhne 90 % amplitudy (obr. 1.3). Podobně **doba sestupu** t_s (trvání sestupné hrany impulsu) je délka časového intervalu, který uplyne mezi okamžikem, kdy signál dosáhne 90 % amplitudy, a okamžikem, kdy signál dosáhne 10 % amplitudy.



Obr. 1.3 Doba trvání náběžné hrany impulsu

Tab.1.1 Slovník nejběžnějších symbolů a zkratek používaných u osciloskopů

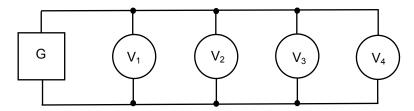
AC (vzniklo z alternating current)	střidavý	level	úroveň
AC-LF (ac-low frequency)	nízkofrekvenční	line	síť (při volbě synchronizace)
add	součet	to lock	uzamknout, aretovat
A int	režim s přisvětlenou stopou	mag (magnitude)	velikost
ALT = alternate mode	režim přepínání kanálů časovou základnou	norm (normal)	normální
auto (automatic)	automatický	OFF	vypnuto
autoscale	aut. nastavení rozsahu	ON	zapnuto
B trig'd	spouštěná čas.základna B	out (output)	výstup
cal (calibration)	kalibrace	peak	špička
coarse	hrubý	power	síťový vypínač
coupling	vazba	probe	sonda
delay	zpoždění	intensity	jas
dly'd = delayed	zpožděný	to pull	zatáhnout
dly'd position	zpoždění čas. základny B	to push	zatlačit
DC (direct current)	stejnosměrný	rej. (rejection)	potlačení
dual	dvojitý	sel = select	výběr
ext. (external)	vnější	slope + (-)	vzestupná (sestupná) hrana
fine	jemný	single	jednotlivý, jednorázový
focus	ostření	source	zdroj
gnd (ground)	země	sweep	přeběh
hold off	oddálení spuštění časové základny	time	čas
hor (horizontal)	vodorovný	time base	časová základna
channel	kanál	trig. (trigger)	spouštění
CHOP = chopped mode	režim přepínání kanálů pevným kmitočtem	trig'd (triggered)	spouštěný
illum (illumination)	osvětlení	variable	proměnný
in (input)	vstup	ver (vertical)	svislý
int. (internal)	vnitřní	volts/div	voltů/dílek
invert	invertovaný		

2a. KMITOČTOVÁ ZÁVISLOST STŘÍDAVÝCH VOLTMETRŮ

Úkol měření

- a) V rozsahu kmitočtů 70 Hz až 300 kHz (pro kmitočty 70, 200, 500 Hz, 1, 3, 10, 20, 50, 100, 200, 300 kHz) změřte kmitočtovou závislost předložených číslicových voltmetrů. Za kmitočtově nezávislý považujte v tomto frekvenčním rozsahu číslicový voltmetr HP 34401A. Měření proveďte na příslušných rozsazích voltmetrů při hodnotách napětí a) 1 V, b) 7 V. Zapojení přístrojů je na obr. 1.
- b) Změřené závislosti vyneste do grafů a teoreticky zdůvodněte.

Schéma zapojení



Obr. 1 Zapojení pro měření

Poznámky k měření:

Protože střídavé voltmetry jsou kalibrovány pro sinusový průběh napětí při frekvenci řádově desítek až stovek Hz, jako první krok nastavíme pomocí generátoru napětí tak, aby při frekvenci 70 Hz ukazoval nejpřesnější voltmetr a) 1 V, b) 7 V (volíme frekvenci odlišnou od 50 Hz, rušení síťovým kmitočtem může při 50 Hz způsobit zázněje znemožňující nastavení stabilního údaje). Při kmitočtu 70 Hz zkontrolujeme údaje ostatních voltmetrů, zda odpovídají tolerancím zaručovaným výrobcem (rozdíl údajů zkoumaného a referenčního voltmetru nesmí přesáhnout součet zaručených absolutních hodnot tolerancí). V daném rozsahu kmitočtů do 300 kHz je podle údajů výrobce nejpřesnější číslicový voltmetr HP 34401A, takže napětí budeme nastavovat podle jeho údajů na hodnotu a) 1 V, b) 7 V při všech kmitočtech – tento číslicový voltmetr bude referenčním přístrojem. Pro zadané kmitočty zaznamenáme údaje ostatních přístrojů a do grafu vyneseme závislosti

$$\alpha_{fn} = f_n(f)$$

kde α_{fn} je údaj přístroje V_n při kmitočtu f.

V grafu je vhodné použít pro osu x (kmitočet) **logaritmické** měřítko.

Z tabulky nebo grafů lze zjistit kmitočet, kdy přestává pro daný typ voltmetru platit jeho přesnost udaná výrobcem.

Seznam použitých přístrojů

- G RC generátor, typ ...
- V₁ číslicový multimetr HP 34401A, rozsah 1 V a 10 V, přesnost ...
- V₂ číslicový multimetr DM-441B (LG), rozsah 2 V a 20 V, přesnost ...
- V₃ číslicový multimetr Summit 45, rozsah 4 V a 40 V, přesnost ...
- V₄ číslicový multimetr MY-64 (Mastech), rozsah 2 V a 20 V, přesnost ...
- V₅ nízkofrekvenční elektronický voltmetr Troneer, rozsah 1 V a 10 V, přesnost ...

Teoretický rozbor úlohy

Číslicové měřicí přístroje používají pro měření střídavých napětí a proudů dva základní typy převodníků: a) implicitní převodníky efektivní hodnoty na stejnosměrnou veličinu, b) dvoucestné operační usměrňovače.

Kmitočtová závislost *číslicového přístroje s usměrňovačem* je zpravidla způsobena poklesem přenosu zesilovače. Výrobce často částečně kompenzuje výslednou frekvenční charakteristiku kapacitou zařazenou paralelně k předřadnému odporu. Je-li kapacita příliš velká, dochází k překompenzování a údaj od jistého kmitočtu roste (následuje pokles způsobený výše uvedenými jevy). K podobnému efektu může dojít u předřadných odporů vysoké hodnoty i v důsledku jejich parazitní kapacity.

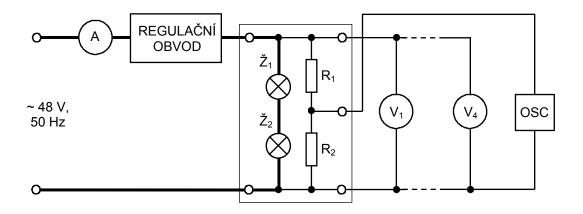
Frekvenční rozsah *číslicových přístrojů s implicitním převodníkem efektivní hodnoty* na stejnosměrnou veličinu bývá vyšší – řádově stovky kHz – a je dán hlavně vlastnostmi použitého převodníku a frekvenční charakteristikou dalších zesilovačů. Ve většině přístrojů je použit integrovaný obvod AD 637 (přesnější přístroje) nebo AD 636.

2b. VLIV TVARU KŘIVKY NA ÚDAJ MĚŘICÍHO PŘÍSTROJE

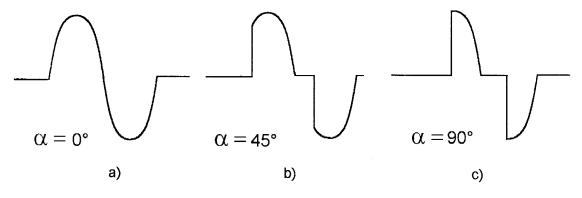
Úkol měření

- 1. Změřte napětí na zátěži, jejíž výkon je regulován obvodem s triakem pro úhel sepnutí α přibližně 0°, 45° a 90° předloženými číslicovými multimetry V_1 až V_4 .
- 2. Průběh napětí sledujte na osciloskopu (osciloskop připojte na výstup odporového děliče).
- 3. Určete, které z multimetrů měří správně efektivní hodnotu, a určete relativní chybu metody měření efektivní hodnoty u ostatních.
- 4. Z údaje multimetrů, které to umožňují, určete aritmetickou střední hodnotu měřeného průběhu.
- 5. Pro úhel sepnutí α = 90° určete aritmetickou střední hodnotu a efektivní hodnotu napětí rovněž výpočtem z definic. Vypočtené hodnoty srovnejte s naměřenými a v případě jejich rozdílu analyzujte možné příčiny.

Schéma zapojení



Obr. 2 Zapojení měřicího obvodu



Obr. 3 Průběhy měřených napětí

Seznam použitých přístrojů

A - ampérmetr elektromagnetický, tř.přes. ..., rozsah ...

Z - přípravek se dvěma žárovkami \check{Z}_1 , \check{Z}_2 a odporovým děličem R_1 , R_2

 V_1 - stolní multimetr, typ ...,

V₂ - stolní multimetr, typ ...,

V₃ - přenosný multimetr, typ ...,

V₄ - přenosný multimetr, typ ...,

Regulační obvod - přípravek pro regulaci průběhu proudu

Teoretický rozbor úlohy

U střídavých voltmetrů se pro převod střídavého napětí na stejnosměrné používají převodníky střední nebo efektivní hodnoty.

U levnějších číslicových multimetrů se používají převodníky střední hodnoty využívající operační usměrňovač (viz [1], kap. 3.2.3). Tyto přístroje měří aritmetickou střední hodnotu podle definičního vztahu (6.2), ale jsou vesměs cejchovány v efektivní hodnotě pro sinusový průběh, pro nějž má koeficient tvaru hodnotu přibližně 1,11. Při měření efektivní hodnoty neharmonických napětí popř. proudů tak mohou vzniknout značné chyby metody vzhledem k tomu, že činitel tvaru je v těchto případech odlišný od hodnoty 1,11. Střední hodnotu měřené veličiny lze vypočíst vydělením údaje přístroje koeficientem tvaru pro sinusový průběh.

V kvalitnějších multimetrech se používají převodníky efektivní hodnoty (viz [1], kap. 3.2.3). Tato skutečnost je obvykle vyznačena buď na přepínači funkcí multimetru, či v návodu k přístroji zkratkou RMS (Root Mean Square = odmocnina ze střední hodnoty kvadrátu - viz definiční vztah (6.1)), popř. True RMS. V tomto případě měří multimetr správně efektivní hodnotu napětí popř. proudu i v případě neharmonických průběhů.

Poznámka:

U většiny multimetrů je při přepnutí přístroje do režimu měření střídavých napětí nebo proudů převodník střední popř. efektivní hodnoty oddělen od vstupních obvodů multimetru kondenzátorem, takže je měřena pouze střídavá složka měřené veličiny.

Výpočet efektivní a střední hodnoty střídavého napětí

Efektivní hodnota střídavého napětí je definována vztahem

$$U_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T}} \int_{0}^{T} u^{2}(t) dt$$
 (1)

a jeho aritmetická střední hodnota vztahem

$$U_{\text{sar}} = \frac{1}{T} \int_{0}^{T} |u(t)| \, dt = \frac{2}{T} \int_{0}^{T/2} u(t) \, dt$$
 (2)

Z těchto definičních vztahů je třeba vycházet při výpočtu střední a efektivní hodnoty napětí na zátěži pro úhel sepnutí α. Pro sinusový průběh napětí dle obr.3.2 a) platí

$$u(t) = U_{\rm m} \sin \omega t$$
, $T = \frac{2\pi}{\omega}$

kde hodnotu $U_{\rm m}$ lze určit z efektivní hodnoty, změřené pro sinusový průběh nejpřesnějším z voltmetrů, činitelem $\sqrt{2}$.

Pro aritmetickou střední hodnotu při úhlu sepnutí α pak platí (při řešení integrálu použijeme substituci $x = \omega t$, dále označme $t_1 = \frac{T}{2} \frac{\alpha}{\pi}$)

$$U_{\operatorname{sar},\alpha} = \frac{2}{T} \int_{t_1}^{T/2} U_{\operatorname{m}} \sin \omega t \, dt = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} U_{\operatorname{m}} \sin x \, dx = \frac{U_{\operatorname{m}}}{\pi} [-\cos x]_{\alpha}^{\pi}$$

a pro efektivní hodnotu platí

$$U_{\text{ef},\alpha} = \sqrt{\frac{2}{T} \int_{t_1}^{T/2} U_{\text{m}}^2 \sin^2 \omega t \, dt} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} U_{\text{m}}^2 \sin^2 x \, dx} = \frac{U_{\text{m}}}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\int_{\alpha}^{\pi} \frac{1 - \cos 2x}{2} \, dx}$$

Po dosazení $\alpha = \pi/2$ lze odvodit, že pro aritmetickou střední hodnotu platí

$$U_{\text{sar,90}} = \frac{U_{\text{m}}}{\pi} = \frac{U_{\text{sar,0}}}{2}$$

a pro efektivní hodnotu platí

$$U_{\text{ef,90}} = \frac{U_{\text{m}}}{2} = \frac{U_{\text{ef,0}}}{\sqrt{2}}$$

3. MĚŘENÍ NA NAPĚŤOVÉM DĚLIČI

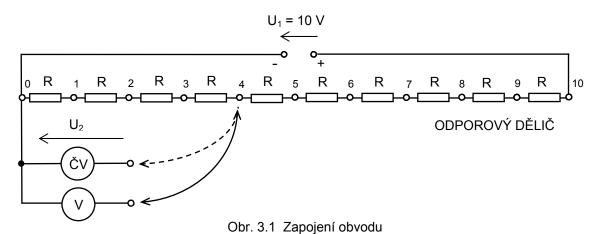
Úkol měření

- 1. Změřte výstupní napětí U_2 děliče sestaveného z deseti rezistorů stejné jmenovité hodnoty pro všechny dělicí poměry d, a to:
 - a) číslicovým voltmetrem,
 - b) magnetoelektrickým voltmetrem (na rozsahu 12 V).

Do společného grafu vyneste závislosti $U_2/U_1 = f(d)$ a vysvětlete jejich rozdíly. Velikost napájecího napětí děliče $U_1 = 10 \text{ V}$.

- Z naměřených hodnot vypočtěte výstupní odpor děliče R_D pro zadaný dělicí poměr d za předpokladu, že vstupní odpor číslicového voltmetru se blíží k nekonečnu.
- 3. Vypočtěte **rozšířenou nejistotu typu B** (koeficient rozšíření $k_r = 2$), s jakou jste určili výstupní odpor děliče R_D za předpokladu, že vnitřní odpor magnetoelektrického voltmetru je definován s tolerancí 0,2%.

Schéma zapojení



Seznam použitých přístrojů

V - voltmetr magnetoelektrický, tř.přes. ..., rozsah ...

ČV - voltmetr číslicový, typ ..., přesnost ... U₁ - zdroj stejnosměrného napětí, typ ...

Př1 - odporový dělič

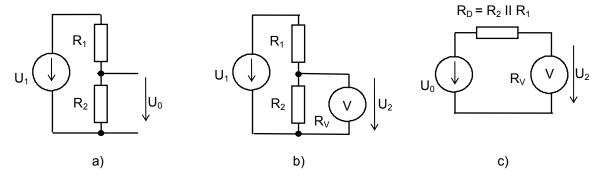
Teoretický rozbor úlohy

Měříme-li výstupní napětí odporového děliče voltmetrem, který má vstupní odpor řádově srovnatelný s výstupním odporem děliče, je hodnota napětí U_2 změřená na výstupu odporového děliče menší než hodnota výstupního napětí děliče naprázdno U_0 (viz obr. 3.2a). Skutečný dělič napájený ze stejnosměrného zdroje napětí U_1 a zatížený voltmetrem se vstupním odporem R_V dle obr. 3.2b) lze nahradit dle Théveninova teorému sériovým spojením zdroje napětí U_0 a pasivního dvojpólu (v tomto případě rezistoru R_D) dle obr 3.2c). Napětí U_0 je rovno napětí naprázdno na výstupu děliče a odpor R_D je roven paralelní

kombinaci odporů děliče R_1 a R_2 . Pro hodnotu výstupního napětí děliče U_2 zatíženého odporem voltmetru R_V pak platí

$$U_2 = U_0 \frac{R_{\rm V}}{R_{\rm V} + R_{\rm D}} \tag{3.1}$$

kde $R_{\rm D}$ je výstupní odpor děliče.

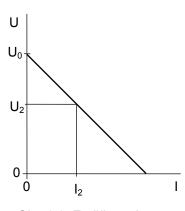


Obr. 3.2 Odporový dělič napětí: a) naprázdno, b) zatížený odporem R_V, c) náhradní schéma odporového děliče napětí zatíženého odporem R_V (podle Théveninova teorému)

Připojením voltmetru vzniká tedy chyba metody, pro jejíž velikost platí

$$\Delta U_{\text{met}} = U_2 - U_0 = U_0 \frac{R_{\text{V}}}{R_{\text{V}} + R_{\text{D}}} - U_0 = U_0 \left(\frac{R_{\text{V}}}{R_{\text{V}} + R_{\text{D}}} - 1 \right) = U_0 \frac{-R_{\text{D}}}{R_{\text{V}} + R_{\text{D}}}$$
(3.2)

Má-li voltmetr vstupní odpor mnohem větší, než je výstupní odpor měřeného zdroje (v našem případě výstupní odpor $R_{\rm D}$ děliče napětí), je chyba metody zanedbatelná. Číslicovým voltmetrem se vstupním odporem řádově $R_{\rm CV} = 10^9~\Omega$ tedy naměříme hodnoty napětí $U_{\rm 2CV}$ blížící se hodnotám pro nezatížený dělič, tedy $U_0 \cong U_{\rm 2CV}$.



Obr. 3.3 Zatěžovací charakteristika děliče

Velikost výstupního odporu děliče můžeme stanovit několika metodami. Jednou z možností je vyjít z náhradního schématu dle obr. 3.2c) a vztahu (3.1), z něhož lze po dosazení vyjádřit R_D . Po úpravě platí

$$R_{\rm D} = \frac{R_{\rm V} (U_{\rm 2CV} - U_{\rm 2})}{U_{\rm 2}} = R_{\rm V} \left(\frac{U_{\rm 2CV}}{U_{\rm 2}} - 1 \right)$$
 (3.3)

Druhá možnost je vyjít ze zatěžovací charakteristiky děliče (obr. 3.3), kde I_2 je proud zatěžovacím odporem R_D . Výstupní odpor děliče je pak dán absolutní hodnotou směrnice zatěžovací přímky:

$$R_{\rm D} = \left| \frac{U_{2\rm CV} - U_2}{0 - I_2} \right| = \frac{U_{2\rm CV} - U_2}{U_2 / R_{\rm V}} = R_{\rm V} \left(\frac{U_{2\rm CV}}{U_2} - 1 \right)$$
(3.4)

Určení nejistoty měření výstupního odporu

Pokud jsou při měření fluktuace údajů každého z použitých voltmetrů podstatně menší než odpovídá jeho přesnosti udané výrobcem (u magnetoelektrického voltmetru ve formě třídy přesnosti, u číslicového voltmetru jako součet chyby z údaje a chyby z rozsahu), je nejistota typu A zanedbatelná a napětí $U_{\rm 2CV}$ a $U_{\rm 2}$ potřebná pro výpočet odporu $R_{\rm D}$ stačí změřit pouze

jednou. V opačném případě však je třeba měření každého z těchto napětí několikrát opakovat, za $U_{\rm 2CV}$ a $U_{\rm 2}$ dosazovat jejich aritmetické průměry a stanovit příslušné nejistoty typu A dle [1], kap. D2.1.

Lze předpokládat, že v tomto případě budou nejistoty typu A výsledků měření napětí $U_{2\text{CV}}$ a U_2 zanedbatelné a že jedinými zdroji nejistoty typu B jsou nepřesnosti použitých voltmetrů a tolerance vnitřního odporu magnetoelektrického voltmetru.

Hodnotu odporu R_D lze určit ze vztahu (3.3), tedy obecně platí $R_D = f(U_0, U_2, R_V)$; nejistota určení této hodnoty je dána vztahem

$$u_{RD} = \sqrt{\left(\frac{\partial R_{\rm D}}{\partial U_{\rm 2CV}} u_{U2CV}\right)^2 + \left(\frac{\partial R_{\rm D}}{\partial U_2} u_{U2}\right)^2 + \left(\frac{\partial R_{\rm D}}{\partial R_{\rm V}} u_{RV}\right)^2} \quad (\Omega)$$
 (3.5)

kde u_{RD} je výsledná standardní nejistota určení hodnoty odporu $R_D(\Omega)$,

 u_{U2CV} standardní nejistota měření napětí U_{2CV} (V),

 u_{U2} standardní nejistota měření napětí $U_2(V)$,

 u_{RV} standardní nejistota hodnoty odporu $R_V(\Omega)$.

Po dosazení parciálních derivací

$$\frac{\partial R_{\rm D}}{\partial U_{\rm 2CV}} = \frac{R_{\rm V}}{U_2} \; ; \quad \frac{\partial R_{\rm D}}{\partial U_2} = -R_{\rm V} \frac{U_{\rm 2CV}}{U_2^2} \; ; \quad \frac{\partial R_{\rm D}}{\partial R_{\rm V}} = \frac{U_{\rm 2CV} - U_2}{U_2} \tag{3.6}$$

dostáváme výslednou standardní nejistotu určení hodnoty odporu R_D

$$u_{RD} = \sqrt{\left(\frac{R_{V}}{U_{2}}u_{U2CV}\right)^{2} + \left(R_{V}\frac{U_{2CV}}{U_{2}^{2}}u_{U2}\right)^{2} + \left(\frac{U_{2CV} - U_{2}}{U_{2}}u_{RV}\right)^{2}} \quad (\Omega)$$
 (3.7)

Jednotlivé standardní nejistoty jsou určeny následujícím způsobem:

$$u_{U2CV} = \frac{\delta_1 \cdot U_{2CV} + \delta_2 \cdot M_{CV}}{100 \sqrt{3}} \quad (V)$$
 (3.8)

$$u_{U2} = \frac{TP \cdot M}{100\sqrt{3}}$$
 (V)

$$u_{RV} = \frac{\delta_{RV} \cdot R_{V}}{100\sqrt{3}} \tag{\Omega}$$

kde δ_1 je chyba v procentech údaje číslicového voltmetru,

 δ_2 chyba v procentech rozsahu číslicového voltmetru,

 $M_{\rm CV}$ použitý rozsah číslicového voltmetru (V),

TP třída přesnosti magnetoelektrického voltmetru (%),

M rozsah magnetoelektrického voltmetru (V),

 δ_{RV} tolerance odporu R_V (%).

Rozšířenou nejistotu U_{RD} určení hodnoty odporu R_D získáme vynásobením standardní nejistoty koeficientem rozšíření k_r (obvykle $k_r = 2$), tj. $U_{RD} = k_r u_{RD}$.

4. MĚŘENÍ MALÝCH PROUDŮ

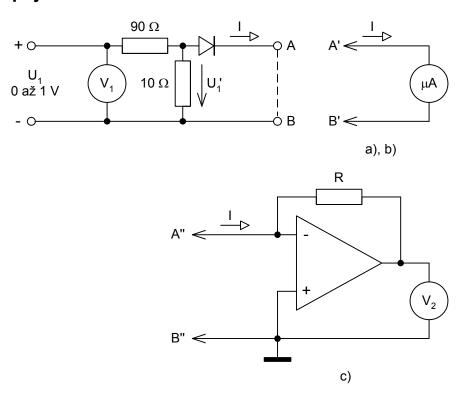
Úkol měření

- 1. V zapojení podle obr. 1 změřte proud germaniovou diodou v propustném směru v oblasti malých napětí (20 až 100 mV) v pěti bodech charakteristiky:
 - a) analogovým mikroampérmetrem,
 - b) číslicovým mikroampérmetrem na různých rozsazích,
 - pomocí převodníku proud napětí s operačním zesilovačem, u něhož před měřením určete velikost odporu zpětnovazebního rezistoru R tak, aby převod proud - napětí byl 10⁻⁵ A/V.

Naměřené hodnoty vyneste do společného grafu.

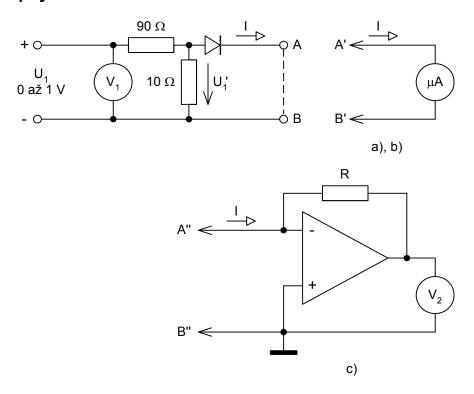
- 2. Při měření dle 1a) a 1b) určete chybu metody způsobenou vnitřním odporem ampérmetru.
- 3. Z naměřených hodnot určete vnitřní odpory použitých mikroampérmetrů.

Schéma zapojení



Obr. 1 Zapojení pro měření malých proudů

Schéma zapojení



Obr. 4.1 Zapojení pro měření malých proudů

Seznam použitých přístrojů

V₂ - voltmetr číslicový, typ ..., přesnost ...

μA₂ - mikroampérmetr magnetoelektrický, tř.přes. ..., rozsah ...

 μA_1 - mikroampérmetr číslicový, typ ..., přesnost ...

R - přesný rezistor nebo odporová dekáda, přesnost 0,1 % (příp. 0,2 %)

Př1 - přípravek s odporovým děličem a polovodičovou diodou

Př2 - přípravek s operačním zesilovačem

U₁ - zdroj proměnného stejnosměrného napětí s číslicově nastavitelnou hodnotou

NZ - napájecí zdroj pro OZ

Teoretický rozbor úlohy

Dioda je napájena ze zdroje napětí s odporovým děličem 10:1 (rezistory $90\ \Omega$ a $10\ \Omega$) podle schématu na obr. 4.1. Zapojíme-li do série s diodou mikroampérmetr, ať již analogový nebo číslicový, které oba mají značný odpor (řádově $k\Omega$), vznikne na něm úbytek napětí srovnatelný s napětím na diodě. Lze též říci, že napětí na rezistoru $10\ \Omega$ nebude napětím na diodě, ale rozdělí se mezi diodu a mikroampérmetr v poměru velikostí jejich odporů, nebo že proud procházející diodou v sérii s odporem mikroampérmetru bude při stejném napětí na rezistoru $10\ \Omega$ menší, než je jeho hodnota při spojení bodů A - B nakrátko. Nenulový odpor mikroampérmetru způsobí tedy značně velkou chybu metody, jejíž velikost předem nelze odhadnout. Použijeme-li (v rozporu se základními pravidly volby měřicího rozsahu) větší rozsah číslicového ampérmetru, bude mít ampérmetr menší vnitřní odpor a klesne chyba metody. Na druhé straně vzroste nejistota měření - vzroste složka nejistoty daná chybou

z rozsahu (zejména část způsobená chybou nuly přístroje). Řešíme tedy následující dilema: měřit s malou nejistotou metodicky chybnou hodnotu, nebo s větší nejistotou hodnotu s menší metodickou chybou.

Vysvětlení výše uvedeného problému je hlavním cílem úlohy. Úlohu nelze chápat jako měření voltampérové charakteristiky diody v propustném směru, neboť v takovém případě bychom měřili napětí přímo na diodě. Při vstupních odporech současných číslicových voltmetrů (10^7 až 10^9 Ω nebo více) by byla metodická chyba zanedbatelná.

Pozn.: Použití odporového děliče plní dvě funkce. Je obtížné nastavit a měřit napětí řádově desítek mV, při použití odporového děliče nastavujeme napětí 10× větší. Odporový dělič dále plní ochrannou funkci. Při přímém připojení diody v propustném směru na vyšší napětí by mohlo snadno dojít k jejímu zničení.

V zapojení podle obr. 1c), což je převodník proud-napětí s operačním zesilovačem, měříme velikost proudu diodou skutečně při napětí na diodě daném napětím na odporu R₂, neboť mezi vstupy OZ (při zanedbání napěťového offsetu) je nulový rozdíl napětí (virtuální nula). Velikost proudu diodou je dána výrazem

$$I = \frac{U_2}{R} \tag{1}$$

Přídavnou chybu měření může způsobit vstupní klidový proud I_0 operačního zesilovače (pro OP07 platí $I_{0\text{max}} = 7 \text{ nA}$); výsledná standardní nejistota měření proudu je pak dána vztahem

$$u_{I} = \sqrt{\left(\frac{-1}{R}u_{U_{2}}\right)^{2} + \left(\frac{U_{2}}{R^{2}}u_{R}\right)^{2} + \left(\frac{I_{0}}{\sqrt{3}}\right)^{2}}$$
 (2)

Poznámka: V použitém zapojení můžeme přibližně určit velikost vstupního klidového proudu tak, že změříme napětí na výstupu operačního zesilovače bez připojené diody. Pro zjištění velikosti vstupního klidového proudu použijeme ve zpětné vazbě rezistor R hodnoty 10 MΩ, aby výstupní napětí úměrné velikosti I_0 bylo vyšší ($I_0 = U_2/10^7$).

Absolutní chybu metody při měření analogovým nebo číslicovým mikroampérmetrem určíme ze vztahu

$$\Delta_{\text{met}} = N - S \quad (\text{mA}) \tag{3}$$

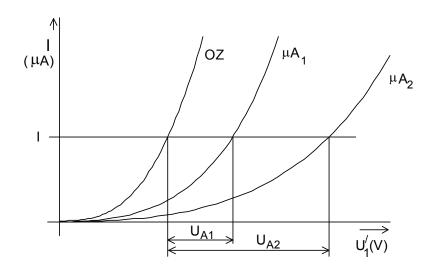
Relativní chybu metody určíme ze vztahu

$$\delta_{\text{met}} = \frac{\Delta_{\text{met}}}{S} \cdot 100 \% = \frac{N - S}{S} \cdot 100 \% \tag{4}$$

kde za naměřenou hodnotu *N* budeme považovat hodnotu proudu naměřenou mikroampérmetrem a za správnou hodnotu *S* hodnotu vypočtenou podle vztahu (4.1) vždy pro tutéž hodnotu nastaveného napětí.

Zpracování výsledků

Naměřené a vypočtené hodnoty zpracujte do tabulky a závislosti $I = f(U_1^{\ /})$ vyneste do společného grafu. Z grafu můžeme určit velikost vnitřního odporu analogového i číslicového mikroampérmetru, který způsobuje chybu metody (viz obr. 2).



Obr. 2 Závislosti pro určení vnitřního odporu mikroampérmetrů

Poznámka: Vzhledem k tomu, že se jedná o nelineární obvod, je třeba použít grafické řešení.

Odpory mikroampérmetrů μA_1 , μA_2 jsou pro zvolenou hodnotu proudu I:

$$R_{\rm A1} = \frac{U_{\rm A1}}{I}, \quad R_{\rm A2} = \frac{U_{\rm A2}}{I}$$
 (5)

Tab. 1 Základní parametry některých vybraných operačních zesilovačů

Typ OZ Vlastnost	ICL 7650	741	LT 1097	OP 07	LM 155
napěťový offset typ./max. (μV)	0,7	1500/5000	10/60	60/150	1000
jeho teplotní drift (μV/°C)	0,02	10	0,3	0,5	5
vstupní klidový proud typ./max. (pA)	5	50000	350	1800/7000	50
CMRR (dB)	120	90	130	110	100
rychlost přeběhu (V/μs)	2,5	0,5	0,2	0,3	5

Pozn.:

ICL 7650 automaticky nulovaný operační zesilovač

741 levný zastaralý bipolární OZ

LT 1097 přesný OZ

OP 07 kvalitní OZ, uvedené parametry odpovídají levné verzi (průmyslový standard)

LM 155 levný OZ typu BIFET (s unipolárními tranzistory na vstupu)

5. MĚŘICÍ ZESILOVAČE

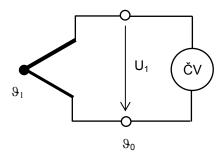
Úkol měření

- 1. Změřte napětí termočlánku předloženým číslicovým voltmetrem pro jednu polohu přepínače termostatu.
- 2. S použitím operačního zesilovače OP 07 navrhněte zapojení:
 - a) invertujícího zesilovače napětí se zesílením -100 a vstupním odporem 1 k Ω ;
 - b) neinvertujícího zesilovače napětí se zesílením 100 a vstupním odporem 100 k Ω .
- 3. Invertující zesilovač napětí použijte pro zesílení napětí termočlánku, napětí na výstupu zesilovače změřte stejným číslicovým voltmetrem a pro stejnou polohu přepínače termostatu jako v bodě 1. Korigujte chybu metody způsobenou konečným vstupním odporem zesilovače.
- 4. Určete rozšířenou nejistotu měření napětí termočlánku (koeficient rozšíření $k_r = 2$) jak pro přímé měření číslicovým voltmetrem, tak pro měření napětí termočlánku po zesílení invertujícím zesilovačem napětí.
 - Při určení celkové nejistoty typu B měření zesíleného napětí termočlánku uvažujte i nejistotu způsobenou vstupní napěťovou nesymetrií operačního zesilovače. Nejistoty způsobené vstupními klidovými proudy zesilovače zanedbejte.
- 5. Pro polohu přepínače termostatu použitou při měřeních dle bodů 1 a 3 určete teplotu teplého konce termočlánku (teplotu měřenou termočlánkem), je-li konstanta použitého termočlánku $K = 54 \ \mu V/^{\circ}C$. Předpokládejte, že teplota srovnávacích (studených) konců termočlánku je 20 °C (teplota laboratoře).
- 6. Ověřte, zda je skutečná vstupní napěťová nesymetrie použitého operačního zesilovače menší než maximální (případně typická) hodnota udaná výrobcem.

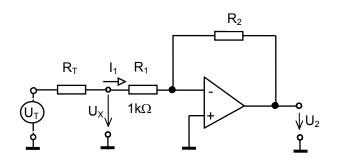
Poznámky k měření:

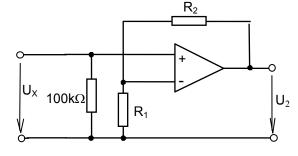
- 1. Měřte až po dosažení tepelného ustálení obvodu, které indikuje zánik monotónních změn údaje číslicového voltmetru (ustálení údaje až na případný vliv šumu).
- 2. Tolerance použitých rezistorů a vnitřní odpor termočlánku jsou uvedeny na přípravcích.
- 3. Operační zesilovač umožňuje kompenzaci vstupní napěťové nesymetrie a vstupních klidových proudů zesilovače pomocí nastavitelného rezistoru (odporového trimru). V praxi se ale tato kompenzace zpravidla nepoužívá a ani v přípravku není zapojena.

Schéma zapojení



Obr. 1 Přímé měření napětí termočlánku číslicovým voltmetrem





Obr. 2 Invertující zesilovač pro zesílení napětí termočlánku

Obr. 3 Neinvertující zesilovač se vstupním odporem 100 $k\Omega$

Tab. 1 Základní parametry některých vybraných operačních zesilovačů

Typ OZ Vlastnost	ICL 7650	741	LT 1097	OP 07	LM 155
napěťový offset typ./max. (μV)	0,7	1500/5000	10/60	60/150	1000
jeho teplotní drift (μV/°C)	0,02	10	0,3	0,5	5
vstupní klidový proud typ./max. (pA)	5	50000	350	1800/7000	50
CMRR (dB)	120	90	130	110	100
rychlost přeběhu (V/μs)	2,5	0,5	0,2	0,3	5

Pozn.: ICL 7650 automaticky nulovaný operační zesilovač

741 levný zastaralý bipolární OZ

LT 1097 přesný OZ

OP 07 kvalitní OZ, uvedené parametry odpovídají levné verzi (průmyslový

standard)

LM 155 levný OZ typu BIFET (s unipolárními tranzistory na vstupu)

Kontrola vstupní napěťové nesymetrie

Vstupní napěťovou nesymetrii invertujícího zesilovače zjistíme změřením výstupního napětí tohoto zesilovače při zkratovaném vstupu a vydělením tohoto napětí zesílením zesilovače pro napěťovou nesymetrii, které je v našem případě rovno 101 (pro odpory R_1 = 1 k Ω a R_2 = 100 k Ω a při uvážení skutečnosti, že napětí napěťové nesymetrie je zesilováno neinvertujícím zesilovačem, viz obr.5.4).

Teoretický rozbor úlohy

Měříme-li výstupní napětí U_1 termočlánku, které je úměrné rozdílu teplot $(\vartheta_1 - \vartheta_0)$ ohřívaného spoje a laboratoře, přímo číslicovým voltmetrem (dle obr. 5.1), určíme standardní nejistotu měření napětí číslicovým voltmetrem pomocí vztahu

$$u_{U1} = \frac{\left| \frac{\delta_1}{100} U_1 \right| + \left| \frac{\delta_2}{100} U_R \right|}{\sqrt{3}}$$
 (5.1)

kde δ_1 je chyba v % měřené hodnoty a δ_2 je chyba v % rozsahu U_R . Relativní standardní nejistota měření napětí číslicovým voltmetrem je

$$u_{U1,r} = \frac{u_{U1}}{U_1} \cdot 100\% \tag{5.2}$$

Obdobné vztahy platí při měření napětí U_2 na výstupu zesilovače podle obr.5.2, zaměníme-li ve vztazích (5.1) a (5.2) napětí U_1 za U_2 . V této úloze měříme napětí termočlánku, které je tak malé, že údaj voltmetru je při přímém měření na začátku měřicího rozsahu. Pokud budeme měřit napětí termočlánku až po zesílení stokrát, ale na stejném rozsahu číslicového voltmetru jako při přímém měření, zvětší se sice první ze složek nejistoty podle (5.1), ale pro voltmetry s chybou v procentech údaje ne příliš výrazně větší než chyba v procentech rozsahu je změna chyby měřeného napětí proti chybě při přímém měření nepříliš výrazná. Naproti tomu relativní nejistota podle (5.2) bude menší tolikrát, kolikrát bylo napětí zesíleno, v našem případě tedy stokrát. Proto je v tomto případě výhodné napětí termočlánku před měřením zesílit. Tato výhoda se ovšem výrazně neprojeví, pokud je po zesílení napětí nutno přepnout rozsah voltmetru a pokud je pro zesílení použit nekvalitní operační zesilovač s velkou vstupní napěťovou nesymetrií.

Pro větší názornost budeme vliv zesílení malého napětí před měřením na relativní nejistotu měření dokumentovat na číselném příkladu.

Příklad

Pro číslicový voltmetr s nejmenším rozsahem 300 mV, s chybou \pm 0,01 % měřené hodnoty a \pm 0,01 % rozsahu a pro výstupní napětí termočlánku řádově jednotky mV leží při přímém měření voltmetrem údaj voltmetru v počáteční části měřicího rozsahu. Je-li napětí termočlánku U_1 = 1 mV, je standardní nejistota typu B přímého měření číslicovým voltmetrem (za předpokladu rovnoměrného rozložení chyb voltmetru v pásmu určeném chybou v procentech údaje a chybou v procentech rozsahu) dána vztahem (5.1), tedy

$$u_{\text{B,ČV}} = \frac{10^{-4} \cdot 1 \cdot 10^{-3} + 10^{-4} \cdot 300 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{3}} = 1,73 \cdot 10^{-5}$$
 (V)

Rozšířená nejistota typu B je $U_{B,CV} = 35 \mu V, k_r = 2$.

Odpovídající (standardní) relativní nejistota (typu B) vyjádřená v procentech je

$$u_{\text{ČV,r}} = \frac{u_{\text{B,ČV}}}{U_1} \cdot 100 \% = 1,73 \%$$

a tedy rozšířená relativní nejistota typu B je $U_{\rm B, \c V,r}$ = 3,5 %; $k_{\rm r}$ = 2.

Po zesílení napětí termočlánku zesilovačem s $A_U = -100$ bude standardní nejistota typu B napětí měřeného číslicovým voltmetrem (pokud měříme opět na nejnižším rozsahu, čili 300 mV) sice

$$u_{\text{B,\center}V} = \frac{10^{-4} \cdot 1 \cdot 10^{-1} + 10^{-4} \cdot 300 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{3}} = 2.3 \cdot 10^{-5}$$
 (V)

tedy (nevýrazně) větší než při měření nezesíleného napětí, ale odpovídající relativní nejistota je

$$u_{\text{ČV,r}} = \frac{u_{\text{B,ČV}}}{U_{\text{1}}} \cdot 100\% = 0.023 \%$$

takže složka celkové relativní nejistoty naměřené hodnoty způsobená chybou číslicového voltmetru je (pokud se v obou případech měří na stejném měřicím rozsahu voltmetru) o dva řády nižší.

Hodnota odporu termočlánku R_T je uvedena na přípravku a jde o jednotky ohmů, typicky 5 Ω . Úbytek napětí na tomto odporu vyvolaný vstupním proudem voltmetru způsobí, že naměřené napětí je menší než hodnota napětí termočlánku, protože měříme výstupní napětí odporového děliče napájeného napětím U_T a tvořeného odpory R_T a R_V . Tím způsobenou systematickou chybu (chybu metody) je možno korigovat. Vstupní odpor číslicových voltmetrů je obvykle $10 \text{ M}\Omega$ (a na nejnižším rozsahu obvykle ještě výrazně vyšší), takže místo napětí termočlánku U_T měříme napětí U_X , pro které platí

$$U_{\rm X} = \frac{R_{\rm V}}{R_{\rm V} + R_{\rm T}} U_{\rm T} \tag{5.3}$$

Pro uvedené číselné hodnoty je přenos odporového děliče v (5.3) 0,9999995 a chyba metody je $\Delta_m = U_X - U_T = 0.5 \,\mu\text{V}$, tedy proti měřené hodnotě i proti nejistotě měření zanedbatelná. Proto není při přímém měření napětí termočlánku číslicovým voltmetrem nutno korigovat naměřenou hodnotu.

Při měření napětí až po zesílení musíme při výpočtu celkové nejistoty měření uvážit složky nejistoty typu B působené tolerancemi odporů zpětnovazební smyčky zesilovače, vstupními proudy a vstupní napěťovou nesymetrií zesilovače a výše zmíněnou metodickou chybu (způsobenou zde konečným vstupním odporem zesilovače).

Schéma invertujícího zapojení zesilovače napětí je na obr. 5.2. Pro ideální OZ platí:

$$U_{\rm X} = -\frac{R_{\rm l}}{R_{\rm 2}} \ U_{\rm 2} \tag{5.4}$$

kde U_2 je výstupní napětí zesilovače a U_X je měřené napětí termočlánku. Odpor R_1 určuje vstupní odpor zesilovače a volí se tedy podle zadání 1 k Ω . Odpor R_2 bude tedy 100 k Ω , abychom dosáhli požadovaného zesílení -100.

Naměřenou hodnotu napětí termočlánku ovlivní ale v tomto případě také zmíněná *chyba metody*, způsobená zatížením termočlánku vstupním odporem měřicího zařízení. Zde se jedná o zatížení vstupním odporem invertujícího zesilovače, tedy odporem R_1 . Odpor R_1 tvoří spolu s odporem termočlánku odporový dělič obdobný děliči podle vztahu (5.3), kde nahradíme odpor voltmetru R_V odporem R_1 .

Takto vzniklou systematickou chybu (chybu metody) můžeme odstranit z výsledku měření vynásobením naměřené hodnoty U_X korekčním činitelem podle vztahu (5.5).

$$U_{\rm T} = U_{\rm X} K_F = U_{\rm X} \frac{R_1 + R_{\rm T}}{R_1} = U_{\rm X} \left(1 + \frac{R_{\rm T}}{R_1} \right)$$
 (5.5)

Bude-li R_T např. 5 Ω , pak pro $R_1 = 1$ k Ω je tento multiplikační korekční faktor K_F roven 1,005. Protože je $R_T/R_1 <<1$, lze nejistotu korekčního faktoru zanedbat.

Složka standardní nejistoty typu B měření napětí U_X způsobená tolerancemi odporu rezistorů a chybou číslicového voltmetru je pro případ ideálního operačního zesilovače dána vztahem

$$u_{U_{X}(id)} = \sqrt{\left(\frac{\partial U_{X}}{\partial R_{1}} u_{R1}\right)^{2} + \left(\frac{\partial U_{X}}{\partial U_{2}} u_{U2}\right)^{2} + \left(\frac{\partial U_{X}}{\partial R_{2}} u_{R2}\right)^{2}} =$$

$$= \sqrt{\left(\frac{-U_{2}}{R_{2}} u_{R1}\right)^{2} + \left(\frac{-R_{1}}{R_{2}} u_{U2}\right)^{2} + \left(\frac{-U_{2}R_{1}}{R_{2}^{2}} u_{R2}\right)^{2}}$$
(5.6)

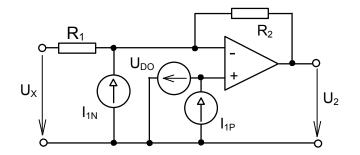
kde

$$u_{R(1,2)} = \Delta R_{(1,2)} / \sqrt{3} = \frac{\delta R_{(1,2)}}{100\sqrt{3}} R_{(1,2)}$$

jsou standardní nejistoty hodnot odporů rezistorů R_1 nebo R_2 ,

 $\delta R_{(1,2)}$ jsou tolerance odporů R_1 nebo R_2 v %,

 u_{U2} je standardní nejistota měření výstupního napětí zesilovače, kterou určíme dle (5.1) a (5.2).



Obr. 5.4 Ekvivalentní obvod invertujícího zesilovače s reálným OZ

Kromě této složky se na nejistotě typu B podílí také složka působená nedokonalostmi reálného operačního zesilovače (nenulovými vstupními klidovými proudy $I_{\rm IP}$ a $I_{\rm IN}$ a nenulovou vstupní napěťovou nesymetrií $U_{\rm D0}$). Ekvivalentní obvod invertujícího zesilovače respektující vstupní proudy a vstupní napěťovou nesymetrii zesilovače uvádí obr. 5.4.

Najdeme-li použitím principu superpozice výraz pro výstupní napětí obvodu z obr. 5.4, který vyjadřuje výstupní napětí jako součet příspěvků všech zdrojů v obvodu, a získáme-li úpravou tohoto výrazu vztah pro U_X , dostaneme

$$U_{\rm X} = -\frac{R_1}{R_2} U_2 \mp I_{\rm 1N} R_1 \pm U_{\rm DO} \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right)$$
 (5.7)

(Zdroj vstupního klidového proudu I_{1P} se neuplatní, protože je v obvodu z obr. 5.4 zkratován nulovým vnitřním odporem zdroje U_{DO} .) Vstupní klidový proud I_{1N} se uplatnit může, pokud je v obvodu velká hodnota odporu paralelního zapojení odporů R_1 a R_2 . V našem případě je ale v zadání předepsáno, že tuto složku nejistoty máme zanedbat. Hodnotu U_{DO} získáme z katalogového listu použitého operačního zesilovače (jde o maximální hodnotu vstupní napěťové nesymetrie). Protože předpokládáme, že veličiny U_{DO} a I_{1N} jsou rovnoměrně rozděleny okolo nulové hodnoty v pásmu $\pm U_{DO}$ a $\pm I_{1N}$, dostaneme příslušné standardní nejistoty jejich vydělením hodnotou $\sqrt{3}$.

Složka standardní nejistoty napětí U_X z (5.5) odpovídající vstupní napěťové nesymetrii U_{DO} je tedy

$$u_{\rm OZ(U_{DO})} = \frac{U_{\rm DO}}{\sqrt{3}} \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) = 87 \,\mu\text{V}$$

protože vstupní napěťová nesymetrie v ekvivalentním obvodu podle obr. 5.4 je zesilována neinvertujícím zesilovačem.

Celková nejistota měření napětí U_X při použití reálného zesilovače je při zanedbání vlivu vstupního klidového proudu I_{1N} tedy

$$u_{U_{\rm X}(\rm OA)} = \sqrt{u_{U_{\rm X}(\rm id)}^2 + u_{\rm OA}^2(U_{\rm DO})} = \sqrt{u_{U_{\rm X}(\rm id)}^2 + \left(\frac{U_{\rm DO}(1 + R_1/R_2)}{\sqrt{3}}\right)^2}$$
 (5.8)

Poznámka:

Protože ve výrazech pro výpočet celkové nejistoty jde o *geometrický* součet jednotlivých složek nejistoty, lze v praxi zanedbat složky nejistoty menší než desetina složky největší.

Měření napětí termočlánku zesíleného neinvertujícím zesilovačem napětí

Při měření se zesilovačem v **neinvertujícím** zapojení (obr. 5.3) platí

$$U_{X} = \frac{R_{1}}{R_{2} + R_{1}} U_{2} \tag{5.9}$$

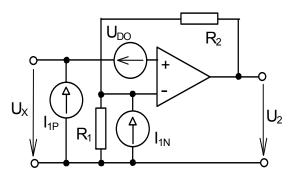
Standardní nejistotu měřeného napětí lze tedy určit (podle zákona šíření nejistot) jako

$$u_{U_{X}(id)} = \sqrt{\left(\frac{\partial U_{X}}{\partial R_{1}}u_{R1}\right)^{2} + \left(\frac{\partial U_{X}}{\partial U_{2}}u_{U2}\right)^{2} + \left(\frac{\partial U_{X}}{\partial R_{2}}u_{R2}\right)^{2}} =$$

$$= \sqrt{\left(\frac{U_{2}R_{2}}{(R_{1} + R_{2})^{2}}u_{R1}\right)^{2} + \left(\frac{R_{1}}{R_{1} + R_{2}}u_{U2}\right)^{2} + \left(\frac{U_{2}R_{1}}{(R_{1} + R_{2})^{2}}u_{R2}\right)^{2}}$$
(5.10)

Standardní nejistota měřeného výstupního napětí u_{U2} zesilovače i standardní nejistoty obou odporů se určí stejně jako v případě zesilování napětí invertujícím zesilovačem (viz výše).

U reálného (neideálního) zesilovače se mohou projevit vlivy vstupních klidových proudů a napěťového ofsetu. Příslušný ekvivalentní obvod je na obr. 5.5. Z obr. 5.5 je zřejmé, že proudový zdroj I_{1P} je zkratován přes odpor zdroje $U_{\rm X}$. Vyjádříme-li vliv ostatních zdrojů na výstupní napětí U_2 a z takto získané rovnice vypočteme $U_{\rm X}$, dostaneme vztah



Obr. 5.5 Ekvivalentní obvod neinvertujícího zesilovače napětí

$$U_{\rm X} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_2 \mp I_{\rm 1N} R_2 \frac{R_1}{R_1 + R_2} \pm U_{\rm DO}$$
 (5.11)

Za předpokladu rovnoměrného rozložení proudů I_{1N} v intervalu $\pm I_{1N}$ a napěťového ofsetu v intervalu $\pm U_{OS}$ jsou složky standardní nejistoty typu B způsobené těmito vlivy dány vztahy

$$u_{\text{OA}(I_{\text{IN}})} = \frac{I_{\text{1N}}}{\sqrt{3}} R_2 \frac{R_1}{R_1 + R_2}, \qquad u_{\text{OA}(U_{\text{OS}})} = \frac{U_{\text{DO}}}{\sqrt{3}}.$$

Výsledná standardní nejistota typu B je v případě zesílení napětí neinvertujícím zesilovačem dána vztahem

$$u_{U_{\rm X}({\rm OA})} = \sqrt{u_{U_{\rm X}({\rm id})}^2 + u_{{\rm OA}(I_{\rm IN})}^2 + u_{{\rm OA}(U_{\rm DO})}^2} = \sqrt{u_{U_{\rm X}({\rm id})}^2 + \left(\frac{I_{\rm 1N}R_1R_2/(R_1 + R_2)}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{U_{\rm DO}}{\sqrt{3}}\right)^2} \quad (5.12)$$

který je obdobou vztahu (5.10) pro invertující zesilovač. Pokud bychom chtěli zanedbat nejistotu působenou vstupním klidovým proudem $I_{\rm IN}$, položili bychom příslušný člen v rovnici (5.12) roven nule. Pokud bychom tento zesilovač použili pro zesílení napětí termočlánku, neuplatnil by se nenulový odpor termočlánku, protože zatížení termočlánku velkým vstupním odporem neinvertujícího zesilovače je zanedbatelné (a to i v případě, že je tento odpor snížen na hodnotu $100~{\rm k}\Omega$ zapojením rezistoru této hodnoty odporu mezi vstupní svorky zesilovače, jak požaduje bod 5.1.2b zadání úlohy – viz obr. 5.3).

Určení teploty

Výpočet teploty teplého konce termočlánku ze změřeného napětí termočlánku se provede podle přibližného vztahu

$$\vartheta_1 = \frac{U_1}{K} + \vartheta_0 \tag{5.13}$$

kde $K = 54 \cdot 10^{-6} \text{ V/°C}$. Teplotu okolí předpokládáme 9 $_0 = 20$ °C.

6. MĚŘENÍ KMITOČTU A DOBY PERIODY ČÍTAČEM

Úkol měření

- 1. Nakreslete blokové schéma čítače v obou režimech činnosti.
- 2. Zkontrolujte správnost stupnice nízkofrekvenčního generátoru:
 - a) čítačem v režimu **měření frekvence při různých dobách měření**,
 - b) čítačem v režimu **měření doby periody** jednak **přímo**, jednak **s využitím průměrování.**

Měřte při kmitočtech 60 Hz, 500 Hz, 5 kHz, 10 kHz, 20 kHz, 50 kHz, 100 kHz. U všech měření určete **nejistotu** měření **způsobenou rozlišením**.

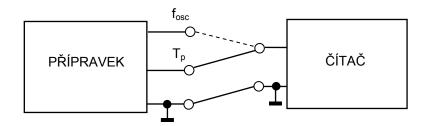
- 3. Ověřte přesnost krystalem řízených hodin:
 - a) měřením doby periody pulsů pro krokový motor (správná hodnota je 2 s),
 - b) přímým měřením frekvence oscilátoru (správná hodnota je 2¹⁵, tj. 32 768 Hz, resp. 2²², tj. 4 194 304 Hz).

V obou případech určete nepřesnost hodin v sekundách za den.

Schéma zapojení

Při kontrole stupnice nízkofrekvenčního generátoru je výstup generátoru připojen ke vstupu čítače koaxiálním kabelem.

Schéma zapojení pro měření na přípravku s krystalem řízenými hodinami je na obr. 1.



Obr. 1 Schéma zapojení měření na přípravku

Poznámka k měření dle bodu 2:

Přímé měření kmitočtu oscilátoru u krystalu není vhodné, protože vstupní kapacita kabelu a čítače (i při použití sondy) ovlivňuje kmitočet oscilátoru. Proto je mezi krystalem a čítačem zařazen emitorový sledovač (je součástí přípravku s hodinami).

Seznam použitých přístrojů

GENERÁTOR - nízkofrekvenční generátor, typ ...

ČÍTAČ - univerzální čítač, typ ...

PŘÍPRAVEK - přípravek s hodinami řízenými krystalem

Teoretický rozbor úlohy

Standardní nejistota typu B při **měření kmitočtu f**_x:

$$u_{f_{\mathcal{X}}} = \sqrt{\left(\Delta' f_{\mathcal{X}} / \sqrt{3}\right)^2 + \left(\Delta f_{\mathcal{X}} / \sqrt{3}\right)^2} \tag{1}$$

kde $\Delta' f_X = 1/T_N$ je rozlišovací schopnost čítače v režimu přímého měření frekvence, T_N doba měření,

$$\Delta f_{\rm X} = \frac{\delta f_0}{100} \frac{N}{T_N} = \frac{\delta f_0}{100} f_{\rm X}$$

 δf_0 relativní nestabilita frekvence krystalového oscilátoru, která způsobuje

chybu doby otevření hradla T_N ,

N počet pulsů načítaných za dobu T_N .

Standardní nejistota typu B při měření **doby periody** T_x :

$$u_{T_{X}} = \sqrt{\left(\Delta T_{X} / \sqrt{3}\right)^{2} + \left(\Delta T_{X} / \sqrt{3}\right)^{2} + 2u_{k}^{2}}$$
 (2)

kde $\Delta' T_X = 1/f_N$ je rozlišovací schopnost čítače v režimu měření periody,

f_N frekvence normálového kmitočtu,

$$\Delta T_{\rm X} = \frac{\delta f_0}{100} T_{\rm N} N = \frac{\delta f_0}{100} T_{\rm X} \ ,$$

kde δf_0 je relativní nestabilita frekvence krystalového oscilátoru f_0 v %,

 $T_{\rm N} = I/f_{\rm N}$ doba periody normálového kmitočtu,

N počet pulsů načítaných za dobu T_X ,

u_k směrodatná odchylka, jejímž zdrojem je kolísání komparační úrovně způsobené šumem vstupního zesilovače a šumem signálu, jak je patrné z obr. 2; stanoví se ze vztahu

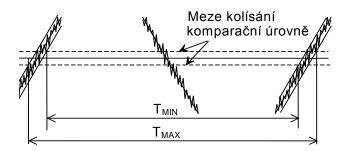
$$u_{\rm k} = \frac{\sqrt{U_{\rm g}^2 + U_{\rm sig}^2}}{v_{\rm p}} \tag{3}$$

kde U_{\S} je efektivní hodnota šumu vstupního zesilovače čítače,

 $U_{\rm sig}$ efektivní hodnota šumu vstupního signálu,

 $v_{\rm p}$ rychlost přeběhu spouštěcí hrany signálu v okamžiku spuštění (V/s).

Poznámka: Zjištění hodnoty U_{\S} a U_{sig} vyžaduje podrobnější analýzu měřeného signálu a vlastností čítače. Měříme-li signál TTL, blíží se hodnota v_{p} nekonečnu a člen u_{k} lze zanedbat. Kolísání údaje je v tomto případě způsobeno nestabilitou kmitočtu měřeného signálu.



Obr. 2 Vliv šumu na kolísání komparační úrovně při měření doby periody

Standardní nejistota typu B při měření **doby periody** T_x s průměrováním:

Poznámka: Průměrováním se při měření doby periody rozumí změření doby **n** period (**n** je zpravidla *k*-tá mocnina deseti, *k* je přirozené číslo), doba 1 periody se určí posunutím desetinné čárky vlevo o *k* pozic. Nejedná se tedy o výpočet průměru z **n** izolovaných měření (ve smyslu stanovení nejistoty typu A), ale o snížení výše popsané nejistoty typu B.

Jednotlivé členy ve vztahu (2) jsou průměrováním ovlivněny následujícím způsobem:

Složka $\Delta^{\prime}T_{\rm X}$ (dána rozlišovací schopností) se n-krát sníží, neboť rozlišitelnost odpovídá hodnotě $1/nf_{\rm N}$. (Po posunutí desetinné čárky odpovídá váha posledního místa na displeji n-krát menší hodnotě než při měřeni doby 1 periody.)

Složka $\Delta T_{\rm X}$ je určena relativní nestabilitou frekvence krystalového oscilátoru f_0 a průměrováním není ovlivněna, neboť

$$\Delta T_{\rm X} = \frac{\delta f_0}{100} T_{\rm X} \frac{n}{n} = \frac{\delta f_0}{100} T_{\rm X} \tag{4}$$

Složka u_k zůstává stejně velká bez ohledu na dobu periody, resp. počtu měřených period. Posunutím desetinné čárky o k pozic se však její hodnota n-krát sníží.

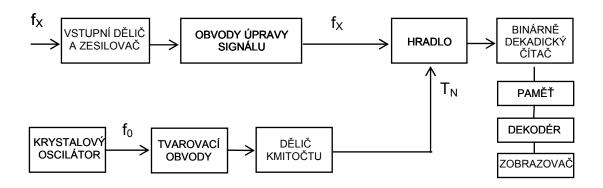
Výsledný vztah pro stanovení standardní nejistoty typu B při měření **doby periody** T_x s průměrováním je tedy:

$$u_{T_{X}} = \sqrt{\left(\Delta' T_{X} / (n\sqrt{3})^{2} + \left(\Delta T_{X} / \sqrt{3}\right)^{2} + 2(u_{k} / n)^{2}\right)}$$
 (5)

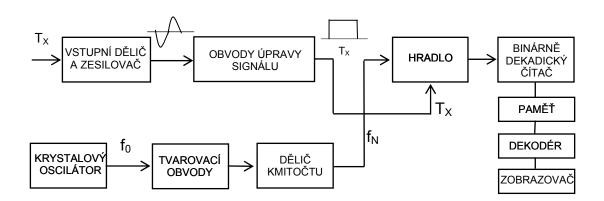
Poznámka k měření dle bodu 2: Přímé měření kmitočtu oscilátoru u krystalu není vhodné, protože vstupní kapacita kabelu a čítače (i při použití sondy) ovlivňuje kmitočet oscilátoru. Proto je mezi krystalem a čítačem zařazen emitorový sledovač (je součástí přípravku s hodinami).

Poznámka k problematice čítačů: V úloze jsou použity "školní čítače", které umožňují nastavení definovaného režimu činnosti (doby otevření hradla v režimu "měření frekvence" a počet period, z něhož se určuje doba periody v režimu "měření periody").

Většina současných levných univerzálních čítačů nabízí režimy "měření frekvence" - údaj v Hz - a "měření doby periody" - údaj v sekundách, zpravidla ale pracují v režimu měření doby periody a v režimu "frekvence" zobrazují převrácenou hodnotu. Úplně matoucí pak je nastavení doby měření (gate time) při měření frekvence. Fakticky se pouze ovlivňuje počet period, ze kterých čítač průměruje, jejich skutečný počet (n) však není znám. Dražší čítače zpravidla optimalizují režim činnosti a používají další principy pro zpřesnění měření (např. tzv. "noniovou" metodu při měření doby periody [4]. Vysledovat okamžitý způsob funkce je v těchto případech velmi obtížné nebo dokonce nemožné.



Obr. 3 Blokové schéma čítače v režimu měření frekvence



Obr. 4 Blokové schéma čítače v režimu měření doby periody

7. MĚŘENÍ ROZPTYLOVÉHO MAGNETICKÉHO POLE TRANSFORMÁTORU

Úkol měření

- 1. Určete potřebné parametry měřicí cívky: konstantu K_{CH} , vlastní rezonanční úhlový kmitočet ω_r a hodnoty prvků L_s a C_p paralelního náhradního schématu.
- 2. Změřte rozptylové magnetické pole transformátoru. Měření proveďte ve vodorovné rovině procházející středním sloupkem transformátoru (viz obr. 4).
- 3. Z výsledků měření určete, v jaké vzdálenosti lze pole transformátoru považovat za pole dipólového charakteru.

Schéma zapojení - viz obr. 2 a 3

Poznámky k měření

Pro periodické průběhy s jedním průchodem nulou během periody lze magnetickou indukci vypočítat ze vztahu

$$B_{\rm m} = \frac{U_{\rm s}}{4f \, S \, N} \tag{1}$$

kde $B_{\rm m}$ je maximální hodnota složky měřené indukce B(t) (T),

 $U_{\rm s}$ aritmetická střední hodnota napětí U(t) (po dvoucestném usměrnění)

indukovaného v měřicí cívce (V),

f kmitočet základní harmonické měřeného napětí (Hz),

N počet závitů měřicí cívky,

S plocha průřezu měřicí cívky (m²).

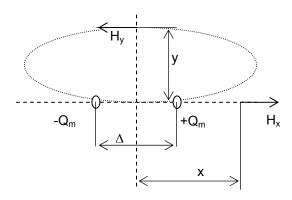
Maximální hodnotu intenzity magnetického pole $H_{\rm m}$ vypočítáme ze vztahu

$$H_{\rm m} = \frac{B_{\rm m}}{\mu_0} \left(\text{A m}^{-1}; \text{ T}, \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H m}^{-1} \right)$$
 (2)

Budeme-li napětí indukované v měřicí cívce měřit voltmetrem udávajícím hodnotu $U_{\rm ef}$ získanou měřením střední hodnoty $U_{\rm s}$ po dvoucestném usměrnění a násobením činitelem tvaru 1,11 pro sinusový průběh, můžeme hodnotu $U_{\rm s}$ získat vydělením údaje přístroje 1,11. (Pozor, pro neharmonický průběh neodpovídá údaj efektivní hodnotě).

Měřený objekt

V některých případech lze zdroj magnetického pole, jehož siločáry se uzavírají převážně vzduchem, přibližně nahradit polem magnetického dipólu (viz obr. 1).



Obr. 1 Souřadnicový systém pro měření dipólového pole v rovině xy

Za předpokladu, že $\Delta \ll x$ resp. y, lze intenzitu magnetického pole v rovině xy na osách x a y vyjádřit vztahy

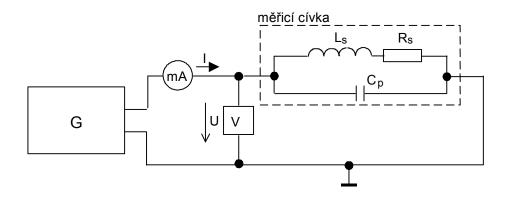
$$H_x = \frac{m_{\rm C}}{2\pi\mu_0 x^3}, \quad H_y = \frac{m_{\rm C}}{4\pi\mu_0 y^3}$$
 (3)

kde $m_{\rm C}$ je Coulombův magnetický moment (Wb·m = T·m³), μ_0 je magnetická konstanta (permeabilita vakua) = $4\pi \cdot 10^{-7}$ (H·m⁻¹), x, y jsou vzdálenosti měřených bodů od středu dipólu (m).

Lze-li měřením složek H_x a H_y dokázat, že v určité vzdálenosti od měřeného objektu má magnetické pole dipólový charakter, je v této oblasti zcela určeno hodnotou m_C .

Určení parametrů měřicí cívky

Odpor vinutí cívky $R_S = k\Omega$ (lze určit libovolnou stejnosměrnou metodou). Celkovou impedanci cívky změříme např. Ohmovou metodou. Předem musíme ale znát hodnotu vlastního rezonančního kmitočtu f_r cívky, který zjistíme např. měřením v zapojení podle obr. 2.



Obr. 2 Obvod pro stanovení vlastního rezonančního kmitočtu

Obvod je napájen ze zdroje konstantního napětí U. Při rezonančním kmitočtu f_r , kdy je impedance cívky maximální, je proud I minimální. Platí

$$f_{\rm r} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{\rm s}C_{\rm p}}}\tag{4}$$

Poznámka: Kapacita C_p je fiktivní a nahrazuje účinek jednotlivých mezizávitových kapacit. Náhradní obvod dobře vyhovuje pro nejnižší rezonanční kmitočet, kapacita C_p je zde tvořena hlavně kapacitou kabelu.

Impedanci měřicí cívky měříme při $f_{\rm m}=0,1\,f_{\rm r}$, kdy je vliv $C_{\rm p}$ zanedbatelný. Pro impedanci při kmitočtu $f_{\rm m}$ platí

$$Z_{\rm m} = \frac{U_{\rm m}}{I_{\rm m}} = \sqrt{R_{\rm s}^2 + \omega_{\rm m}^2 L_{\rm s}^2}, \quad L_{\rm s} = \frac{1}{\omega_{\rm m}} \sqrt{Z_{\rm m}^2 - R_{\rm s}^2}$$
 (5)

kde $U_{\rm m}$ je napětí měřené při kmitočtu $f_{\rm m}$, $I_{\rm m}$ je proud měřený při kmitočtu $f_{\rm m}$.

Hodnotu C_p vypočteme ze vztahu (4), kde známe změřený rezonanční kmitočet f_r a indukčnost L_s .

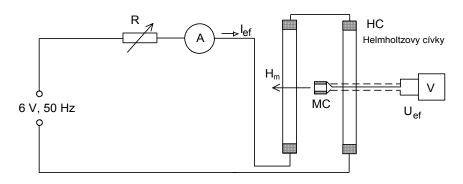
Určení konstanty měřicí cívky

Konstantu $K_{\rm CH}$ měřicí cívky určíme ve známém poli Helmholtzových cívek v zapojení podle obr. 3. Protože magnetické pole cívek má stejnou frekvenci (50 Hz) a stejný průběh (harmonický) jako rozptylové pole transformátoru, platí

$$K_{\rm CH} = \frac{H_{\rm max}}{U_{\rm ef}} = \frac{\sqrt{2}I_{\rm ef}K_{\rm HZ}}{U_{\rm ef}}$$
 (6)

kde $K_{\rm HZ}$ - konstanta Helmholtzových cívek (m⁻¹),

 I_{ef} - proud Helmholzových cívek (A), U_{ef} - napětí indukované v měřicí cívce (V).



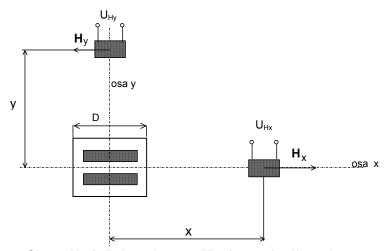
Obr. 3 Obvod pro stanovení konstanty měřicí cívky

Měření intenzity rozptylového pole transformátoru

Měření rozptylového magnetického pole transformátoru provedeme v uspořádání dle obr. 4.

V několika vzdálenostech na osách x a y od středu transformátoru změříme napětí indukovaná v měřicí cívce a s využitím vztahu (6) vypočteme hodnoty intenzity $H_{xmax} = K_{CH} \cdot U_{Hx} = f(x)$ a $H_{ymax} = K_{CH} \cdot U_{Hy} = f(y)$.

Z naměřených hodnot vypočteme podle (3) m_C a zjistíme, v jakých vzdálenostech měřené pole odpovídá poli dipólového charakteru (m_C = konst).



Obr. 4 Umístění sondy pro měření rozptylového pole

Poznámka: Před měřením je nutno při vypnutém napájení transformátoru pro každou polohu měřicí cívky zkontrolovat napětí vyvolané rušivým magnetickým, resp. elektrickým polem. Jeho hodnota musí být zanedbatelná vzhledem k napětí indukovanému rozptylovým polem transformátoru.

Seznam použitých přístrojů

Tr - transformátor jako zdroj měřeného rozptylového pole,

G - RC generátor, typ ..., V - nf voltmetr, typ ...,

mA - miliampérmetr, typ ..., tř.přes., rozsah ...,

HC - Helmholtzovy cívky, $K_{HZ} = \dots m^{-1}$,

MC - měřicí cívka,

R - posuvný rezistor, ... Ω , ... A

zdroj střídavého napětí 48 V, 6 V

8. MĚŘENÍ VÝKONŮ A ÚČINÍKU JEDNOFÁZOVÉ ZÁTĚŽE

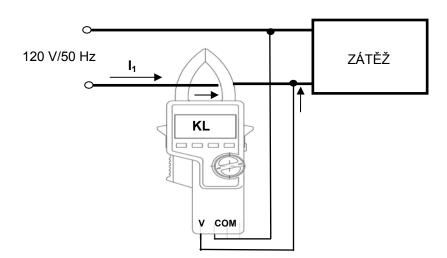
Úkol měření

- 1. Změřte činný výkon, účiník a zdánlivý výkon jednofázové zátěže. K měření použijte univerzální klešťový přístroj s číslicovým zobrazením, činný výkon změřte rovněž pomocí ručkového wattmetru a měřicího transformátoru proudu (MTP). Při měření činného výkonu určete v obou případech rozšířenou nejistotu typu B ($k_r = 2$). U výsledků měření pomocí ručkového wattmetru korigujte chybu metody, chybu úhlu MTP zanedbejte. Posuďte, zda rozdíl hodnot měřených oběma přístroji odpovídá jejich uvedené přesnosti.
- 2. Změřte napětí na sekundárním vinutí MTP a zkontrolujte, není-li překročeno dovolené zatížení transformátoru.

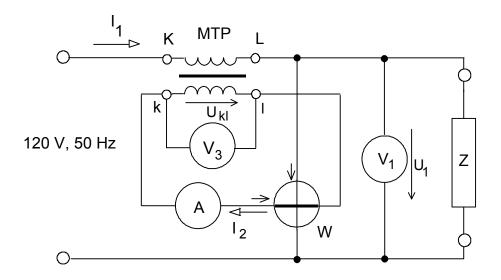
Poznámky k měření

- Zdroj napětí 120 V, 50 Hz (mezi dvěma svorkami sítě 3 × 120 V na rozvaděči).
- Protože při napájecím napětí 120 V protéká zátěží proud větší než 5 A, musí být při měření pomocí ručkového wattmetru použit měřicí transformátor proudu (MTP).
- Zátěž neponechávejte připojenou ke zdroji déle než 2 minuty není dimenzována na trvalý provoz.
- Při provozu nesmí být sekundární obvod měřicího transformátoru proudu rozpojen. Primární i sekundární obvod MTP zapojujte vodiči s dostatečným průřezem s použitím svorek, které zaručují minimální přechodové odpory.

SCHÉMA ZAPOJENÍ



Obr. 8.1 Měření činného výkonu, účiníku a zdánlivého výkonu pomocí univerzálního klešťového přístroje



Obr. 8.2 Zapojení pro měření činného výkonu jednofázové zátěže pomocí ručkového wattmetru

Seznam použitých přístrojů

KL - univerzální klešťový přístroj s číslicovým zobrazením PK 430.1

A - ampérmetr elektromagnetický, tř.přes. ..., použitý rozsah ...

V₁ - voltmetr magnetoelektrický s usměrňovačem, tř.přes. ..., použitý rozsah ..., odpor ...

W - wattmetr elektrodynamický, tř.přes. ..., napěťový rozsah ... V, proudový rozsah ... A, odpor napěťové cívky ... Ω

MTP - měřicí transformátor proudu, převod ..., chyba fáze 30 úhl.minut, chyba převodu ...

120 V - zdroj střídavého napětí - rozvaděč

Z - měřená zátěž

Teoretický rozbor úlohy a postup při měření

Při měření výkonu resp. energie vycházíme z toho, že známe jmenovité napětí zdroje, k němuž je zátěž připojena, a orientačně rozsah proudu, tekoucího do zátěže. Použijeme-li k měření univerzální klešťový přístroj, je třeba zkontrolovat, zda jeho napěťové a proudové rozsahy odpovídají těmto hodnotám. Při měření činného výkonu pomocí ručkového wattmetru jsme zpravidla omezeni proudovým rozsahem wattmetru a při zátěži, která odebírá větší proud než je proudový rozsah wattmetru, musíme pro měření použít měřicí transformátor proudu (MTP) s vhodným převodem. V našem případě zjistíme proud zátěží pomocí klešťového přístroje v zapojení podle obr. 8.1.

Měření pomocí univerzálního klešťového přístroje

Velikost proudu I_1 , činného výkonu P, účiníku cos φ a zdánlivého výkonu S se změří v zapojení podle obr. 8.1 pomocí univerzálního klešťového přístroje s číslicovým zobrazením PK 430.1. Parametry tohoto přístroje jsou uvedeny v úvodní části skript, kap. 0. Přístroj se zapne otočením přepínače volby měřené veličiny do polohy, při které žlutá značka na

hmatníku ukazuje na symbol měřené veličiny. Po zapnutí proběhne autotest, při němž se krátkodobě zobrazí všechny segmenty zobrazovacího displeje. Dále následuje autokalibrace, kdy se na displeji zobrazí nápis "CAL". Během autokalibrace, trvající asi 15 s, se provádí i kompenzace zbytkového magnetického pole v obvodu kleští, jimiž přitom nesmí procházet vodič s proudem. Po autokalibraci se přístroj nastaví do automatické volby měřicího rozsahu daného polohou přepínače a na displeji je zobrazena funkce "AUTO". Měření skutečné efektivní hodnoty (TRMS) v případě proudu nebo napětí je na displeji indikováno jako "AC + DC". Pokud nelze okamžitě odečítat údaj měřené veličiny, je možno aktuální měřenou hodnotu uchovat stisknutím tlačítka "HOLD". Stav se zruší následným stisknutím tohoto tlačítka, přičemž se obnoví měření. Pokud je měřená veličina mimo rozsah přístroje, objeví se na displeji L L L L L.

Měření proudu se provede po ukončení autokalibrace, kdy se v poloze přepínače A čelistmi přístroje obepne vodič s měřeným proudem. Znaménko údaje bude odpovídat skutečnosti, pokud měřený proud bude vstupovat do magnetického obvodu čelistí ve směru šipky vyznačené na pouzdru přístroje v prostoru magnetického obvodu. Citlivost přístroje lze zvětšit ovinutím měřeného vodiče kolem čelistí magnetického obvodu. Skutečnou hodnotu měřeného proudu pak získáme dělením údaje displeje počtem průchodů vodiče magnetickým obvodem čelistí.

Při měření napětí je přepínač volby měřené veličiny v poloze "V" a měřené napětí se přivádí vodiči do svorek označených symboly "V" a "COM".

Při měření činného popř. zdánlivého výkonu je přepínač volby měřené veličiny v poloze kW, popř. kVA. Bude-li napěťová svorka "V" spojena při měření činného výkonu ve správné polaritě vzhledem k vodiči, který prochází kleštěmi, a proud vstupuje do magnetického obvodu ve směru šipky (viz označení šipek na obr. 8.1), bude údaj na displeji s kladným znaménkem, jedná-li se o odběr energie, a se záporným znaménkem, jedná-li se o dodávku. Bude-li vstup jedné z veličin obrácený, změní se znaménko údaje na minus. Také v tomto případě lze zvětšit citlivost měření analogicky jako při měření proudu zvětšením počtu závitů vodiče procházejícího kleštěmi a údaj na displeji dělit počtem závitů.

Při měření účiníku je přepínač měřené veličiny v poloze "cos φ" a přístroj je zapojen stejně jako pro měření výkonu (obr. 8.1). V analogickém zapojení proudového a napěťového obvodu jako v předchozím případě bude kladné znaménko údaje odpovídat odběru energie a záporné dodávce. Symbol L nebo C na poslední pozici údaje znamená indukčnostní nebo kapacitní charakter zátěže. Vzhledem k tomu, že přístroj měří účiník při proudech větších než 40 A, je při menších měřených proudech zátěží potřeba zvětšit počet průvleků vodiče kleštěmi tak, aby jejich součin s procházejícím proudem převyšoval tuto hodnotu.

Určení nejistoty údaje měřeného činného výkonu

Za předpokladu, že údaj přístroje je zatížen pouze relativní chybou δP_R (%) z měřicího rozsahu P_R (W), a rovnoměrného rozložení chyb, lze standardní nejistotu údaje činného výkonu vyjádřit ve tvaru

$$u_P = \frac{\delta P_R \cdot P_R}{100\sqrt{3}} \quad (W) \tag{8.1}$$

a rozšířenou nejistotu pro činitel rozšíření $k_r = 2$ vyjádřit ve tvaru

$$U_P = k_r u_P = 2u_P$$
 (W) (8.2)

Skutečnou hodnotu měřeného činného výkonu lze potom vyjádřit ve tvaru

$$P_{\rm S} = P_{\rm M} \pm U_P \qquad (W) \tag{8.3}$$

Měření činného výkonu pomocí ručkového wattmetru

Z předchozího měření pomocí univerzálního klešťového přístroje je zřejmé, že proud odebíraný zátěží překračuje proudový rozsah ručkového wattmetru, který je pro měření k dispozici. Je proto nezbytné použít k rozšíření proudového rozsahu měřicí transformátor proudu (MTP) a měřicí obvod zapojit podle obr. 8.2.

Zásady použití měřicího transformátoru proudu

Štítkový údaj třídy přesnosti MTP (TP) resp. jemu odpovídající chyba převodu (někdy uváděna jako chyba proudu) a chyba fáze (někdy uváděná jako chyba úhlu) platí za předpokladu, že není překročena jmenovitá hodnota zdánlivého výkonu S_j , odebíraného v sekundárním obvodu transformátoru. Ta je rovněž uvedena na štítku transformátoru a v závislosti na provedení MTP se zpravidla pohybuje v rozmezí 5 až 30 VA. Hodnota S_j je dána vztahem

$$S_{i} = U_{kli}I_{2i} = Z_{2i}I_{i}^{2} \text{ (VA; V, A, }\Omega,\text{ A)}$$
 (8.4)

kde I_{2j} je jmenovitá hodnota sekundárního proudu MTP (zpravidla 5 A),

 U_{klj} úbytek napětí na svorkách k - l MTP (viz obr. 8.2) odpovídající proudu I_{2j} a jmenovité impedanci Z_{2j} zapojené v sekundáru MTP.

Skutečnou velikost zátěže Z_2 , která je konstantní, lze určit z úbytku napětí U_{kl} na sekundárních svorkách MTP a sekundárního proudu I_2 . Pro její hodnotu musí platit

$$Z_2 = \frac{U_{kl}}{I_2} \le \frac{S_j}{I_{2j}^2}$$
 (\O; V, A; VA, A) (8.5)

kde Z_2 je velikost impedance tvořené sériovým spojením proudové cívky wattmetru a ampérmetru, připojené k sekundárnímu vinutí MTP,

 U_{kl} úbytek napětí na svorkách k - l MTP, odpovídající I_2 ,

 I_2 měřená hodnota sekundárního proudu.

Při použití MTP musíme dodržet zásady jeho správného připojení:

- a) prochází-li primárním vinutím MTP proud, nesmí dojít k rozpojení sekundárního obvodu;
- b) sekundární obvod MTP propojujeme vždy pomocí vodičů s dostatečným průřezem a svorkami, které zaručují minimální přechodové odpory. Přívody nesmějí zvyšovat zátěž Z₂ MTP;
- c) začátek primárního vinutí označený "K" připojujeme ke zdroji, začátek sekundárního vinutí označený "k" k začátku proudové cívky wattmetru, označenému zpravidla šipkou.

Měření činného výkonu

Velikost měřeného činného výkonu P_m (obr. 8.2) určíme ze vztahu

$$P_{\rm m} = U_1 I_1 \cos \varphi = P_{\rm W} \cdot p_I = k_{\rm W} \alpha p_I \quad (W; V, A, -; W/d, -)$$
 (8.6)

kde P_{W} je údaj wattmetru (W),

 $k_{\rm W}$ konstanta wattmetru (W/dílek), α výchylka wattmetru (dílek), $p_I = \frac{I_{1j}}{I_{2i}}$ je převod MTP;

 I_{1j} , I_{2j} jsou jmenovité hodnoty primárního a sekundárního proudu MTP (-).

Hodnota $P_{\rm m}$ je zatížena chybou metody, která představuje vlastní spotřebu paralelní kombinace napěťové cívky wattmetru a voltmetru. Tuto chybu lze korigovat výpočtem podle vztahu

$$P_{K} = P_{m} - \frac{U_{1}^{2}}{R_{nW}R_{V}} (R_{nW} + R_{V}) \quad (W; W, V, \Omega)$$
(8.7)

kde P_k je korigovaná hodnota činného výkonu odebíraného zátěží (W),

P_m hodnota výkonu naměřená (W),

 U_1 napětí na zátěži (V),

 $R_{\rm nW}$ odpor napěťové cívky wattmetru (Ω) ,

 $R_{\rm V}$ odpor voltmetru (Ω) .

Pomocí voltmetru V_3 se kontroluje úbytek napětí U_{kl} na sekundárních svorkách MTP, aby celková zátěž MTP odpovídala vztahu (8.5).

Určení nejistoty měření

Po korekci chyby metody závisí nejistota měření pouze na třídě přesnosti wattmetru a měřicího transformátoru proudu. U měřicího transformátoru proudu zanedbáme jeho chybu úhlu, která pohybuje v oblasti jednotek až desítek úhlových minut a budeme předpokládat, že se uplatní pouze chyba velikosti převodu $p_{\rm I}$, označovaná jako chyba proudu. Při určení nejistoty se neuvažuje člen korigující ve vztahu (8.7) chybu metody danou spotřebou voltmetru a napěťové cívky wattmetru vzhledem k tomu, že jeho hodnota je podstatně menší než hodnota měřeného výkonu $P_{\rm m}$.

Nejistota měření výkonu odebíraného zátěží se potom určí ze vztahu

$$P_{\rm m} = P_{\rm W} p_I \ (W; W, -)$$
 (8.8)

kde $P_{\rm m}$ je výkon odebíraný zátěží (W),

 $P_{\rm W}$ údaj wattmetru (W),

 p_I převod MTP, definovaný ve vztahu (8.6) (-).

Standardní nejistotu měření podle vztahu (8.8) lze vyjádřit ve tvaru

$$u_{Pm} = \sqrt{\left(\frac{\partial P_{\rm m}}{\partial P_{\rm W}} u_{PW}\right)^2 + \left(\frac{\partial P_{\rm m}}{\partial p_{\rm I}} u_{pI}\right)^2} = \sqrt{\left(p_{\rm I} \cdot u_{PW}\right)^2 + \left(P_{\rm W} \cdot u_{pI}\right)^2}$$
(8.9)

kde
$$u_{PW} = \frac{TP_{W} \cdot M_{W}}{100\sqrt{3}}$$
; $u_{pI} = \frac{TP_{MTP} \cdot p_{I}}{100\sqrt{3}}$ (8.10)

 u_{Pm} je standardní nejistota měření činného výkonu (W),

 u_{PW} standardní nejistota údaje wattmetru (W),

 $TP_{\rm W}$ třída přesnosti wattmetru (%), $M_{\rm W}$ měřicí rozsah wattmetru (W), u_{pI} nejistota převodu MTP (-), $TP_{\rm MTP}$ třída přesnosti MTP (%),

 p_I převod MTP (-).

Skutečnou hodnotu měřeného výkonu lze pro rozšířenou nejistotu s činitelem rozšíření $k_r = 2$ vyjádřit ve tvaru

$$P_{\rm s} = P_{\rm k} \pm 2u_{\rm Pm}$$
 (W) (8.11)

Porovnání výsledků měření činného výkonu klešťovým přístrojem a ručkovým wattmetrem

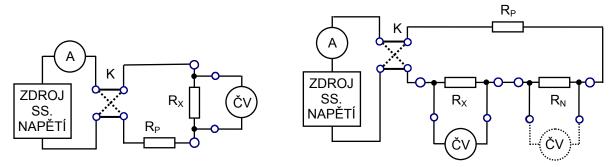
Výsledky měření činného výkonu oběma způsoby lze považovat za správné a údaje nejistot za odpovídající, pokud existuje společný průnik výsledků daných vztahy (8.3) a (8.11).

9. Měření odporů

Úkol měření

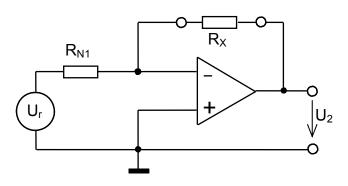
- 1. **Měření malých odporů Ohmovou metodou.** Sestavte měřicí obvod dle obr. 1. Vhodnou metodikou měření vylučte vliv termoelektrických napětí. Z naměřených hodnot napětí a proudu vypočtěte velikost neznámého odporu R_X a stanovte rozšířenou nejistotu měření (pro $k_r = 2$).
- 2. **Měření malých odporů sériovou srovnávací metodou.** Zapojte měřicí obvod dle obr. 2. Změřte napětí na etalonu R_N a napětí na měřeném odporu R_X . Vhodnou metodikou měření vylučte vliv termoelektrických napětí. Vypočtěte velikost neznámého odporu R_X a odvoďte vztah pro nejistotu měření.
- 3. **Měření středních odporů převodníkem R** \rightarrow U. Sestavte převodník odpor-napětí s OZ $(U_r = 10 \text{ V}, R_{NI} = 10 \text{ k}\Omega)$ dle obr. 3. Odvoďte přenos převodníku a ověřte jeho funkci. Jako odpor R_X použijte odporovou dekádu. Zdůvodněte, do jaké hodnoty odporu může uvedený převodník měřit.

Schéma zapojení



Obr. 1 Měření malého odporu Ohmovou metodou

Obr. 2 Měření malého odporu sériovou srovnávací metodou



Obr. 3 převodník $R \rightarrow U$

Teoretický rozbor úlohy

Ohmova metoda

Hodnota měřeného odporu se určí z Ohmova zákona, tedy $R_X = U/I$. Použití čtyřsvorkového zapojení eliminuje vliv přechodových odporů a přívodů, komutace proudu přepínačem K umožní omezení vlivu termoelektrických napětí (viz [1], kap. 7.1.2.2). Hodnota měřeného odporu se vypočte jako průměr z obou měření (před a po komutaci proudu), tj. $R_X = (R_{X1} + R_{X2})/2$. Vzhledem k tomu, že se jedná o nepřímou metodu měření, standardní nejistota hodnoty odporu R_X se určí při měření pro jeden popř. druhý směr proudu ze vztahu

$$u_{RX1,2} = \sqrt{\left(\frac{\partial R_{X}}{\partial I}u_{I1,2}\right)^{2} + \left(\frac{\partial R_{X}}{\partial U}u_{U1,2}\right)^{2}} = \sqrt{\left(-\frac{U_{1,2}}{I_{1,2}^{2}}u_{I1,2}\right)^{2} + \left(\frac{1}{I_{1,2}}u_{U1,2}\right)^{2}}$$
(1)

kde $u_{U1,2}$ jsou standardní nejistoty měření napětí $U_{1,2}$, $u_{I1,2}$ standardní nejistoty měření proudů $I_{1,2}$, indexy 1, 2 odpovídají směrům proudu.

Vzhledem k tomu, že absolutní hodnoty jak proudu, tak napětí před a po komutaci jsou přibližně stejně velké, lze předpokládat, že platí $u_{RX1} \doteq u_{RX2}$ a stačí tedy určit pouze jednu z nich. Standardní nejistota výsledné hodnoty se pak určí ze vztahu

$$u_{RX} = \sqrt{\left(\frac{u_{RX1}}{2}\right)^2 + \left(\frac{u_{RX2}}{2}\right)^2} = \sqrt{\frac{2u_{RX1}^2}{4}} = \frac{u_{RX1}}{\sqrt{2}}$$
 (2)

a rozšířená nejistota jejím vynásobením koeficientem rozšíření $k_{\rm r}$.

Poznámka: Vzhledem k tomu, že se jedná o měření malých odporů a vstupní odpor číslicových voltmetrů je 10 MΩ nebo větší, vliv vstupního odporu voltmetru se zde neprojeví.

Sériová srovnávací metoda

Při měření malých odporů sériovou srovnávací metodou (viz [1], kap. 7.1.4) je obvod zapojen podle obr. 12.2. Číslicovým voltmetrem změříme napětí U_{RN} na etalonu odporu R_N a napětí U_{RX} na neznámém rezistoru U_{RX} . Pro měřený odpor R_X pak platí

$$R_{\rm X} = \frac{U_{\rm RX}}{U_{\rm PN}} R_{\rm N} \tag{3}$$

Stejně jako v předchozím případě je však nezbytné eliminovat termoelektrická napětí komutací proudu. (Změřte nejprve pro oba směry proudu napětí U_{RN} a potom pro oba směry proudu napětí U_{RX} .) Výsledná hodnota měřeného odporu se pak i zde vypočte jako průměr z obou měření (před a po komutaci proudu), tj. $R_X = (R_{X1} + R_{X2})/2$. Standardní nejistota měření odporu R_X pro jeden popř. druhý směru proudu se určí ze vztahu

$$u_{RX1,2} = \sqrt{\left(\frac{\partial R_{X}}{\partial R_{N}}u_{RN}\right)^{2} + \left(\frac{\partial R_{X}}{\partial U_{RX}}u_{URX1,2}\right)^{2} + \left(\frac{\partial R_{X}}{\partial U_{RN}}u_{URN1,2}\right)^{2}} = \sqrt{\left(\frac{U_{RX,2}}{U_{RN1,2}}u_{RN}\right)^{2} + \left(\frac{R_{N}}{U_{RN1,2}}u_{URX}\right)^{2} + \left(-\frac{U_{RX1,2}R_{N}}{U_{RN1,2}^{2}}u_{URN1,2}\right)^{2}}$$
(4)

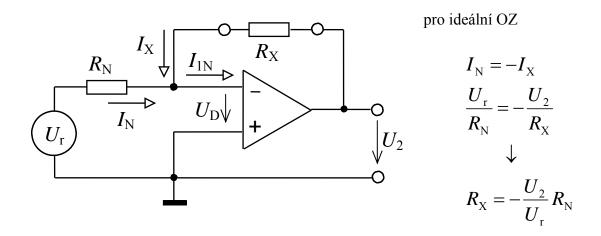
kde $u_{URN1,2}$ a $u_{URX1,2}$ jsou standardní nejistoty měření napětí $U_{RN1,2}$ a $U_{RX1,2}$, které určíme z parametrů použitého voltmetru;

$$u_{RN} = \Delta R_{N} / \sqrt{3} = \frac{\delta R_{N}}{100\sqrt{3}} R_{N}$$
 standardní nejistota odporu etalonu R_{N} ; δR_{N} je tolerance tohoto etalonu v %.

Stejně jako v předchozím případě však lze předpokládat, že platí $u_{RX1} \doteq u_{RX2}$ a stačí tedy určit pouze jednu z těchto nejistot. Standardní nejistota výsledné hodnoty se pak určí stejně jako v předchozím případě ze vztahu (12.2) a rozšířená nejistota jejím vynásobením koeficientem rozšíření k_r .

Poznámka: Stejně jako v případě Ohmovy metody eliminuje použití čtyřsvorkového zapojení vliv přechodových odporů a přívodů.

Měření převodníkem R → U.



Maximální měřený odpor je v tomto případě dán maximálním možným výstupním napětím. Předpokládáme-li, že pro symetrické napájení ± 15V je maximální rozkmit výstupního napětí operačního zesilovače ± 13V, potom

$$R_{X_{\text{max}}} = -\frac{U_{2_{\text{max}}}}{U_r} R_{N1}$$
, pro $U_r = 10 \text{ V}$, $R_{NI} = 10 \text{ k}\Omega$ tedy maximálně 13 k Ω .

10. Měření amplitudové permeability

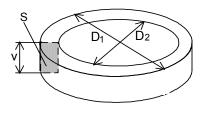
Úkol měření

- 1. V zapojení na obr. 2 zobrazte na osciloskopu dynamickou hysterezní smyčku prstencového vzorku magneticky měkkého materiálu při napěťovém magnetování (sinusovém průběhu B). Smyčka je zadána maximální hodnotou magnetické indukce B_m. Pozorujte vliv velikosti integrační konstanty použitého pasivního integračního RC článku na tvar smyčky a pro další měření rozhodněte, který z rezistorů R₁, R₂, R₃ v integračním článku je vhodné použít.
- 2. Z naměřených hodnot I_{1m} a zadaných parametrů vzorku určete maximální hodnotu intenzity magnetického pole H_m . Dále pomocí osciloskopu (viz obr. 5) zjistěte hodnotu remanence B_r a koercitivity H_c .
- 3. Změřte závislost amplitudové permeability μ_a na maximální hodnotě magnetické indukce pro $B_m = 0.1$; 0.4; 0.7; 0.9; 1.1; 1.4; 1.7 T a závislost vyneste do grafu.

Poznámky k měření:

Před měřením spočtěte pro zadané hodnoty $B_{\rm m}$ odpovídající hodnoty napětí U_2 na měřicím vinutí N_2 . Při měření nastavte magnetování vzorku tak, aby bylo těchto hodnot napětí dosaženo.

Maximální hodnoty magnetovacího proudu $I_{\rm lm}$ se zjišťují měřením úbytku napětí na snímacím rezistoru R_4 číslicovým osciloskopem. (Synchronizace "Line" - síťovým kmitočtem, hodnotu $U_{\rm max}$ měřte s průměrováním.)



Obr. 1 Prstencový vzorek

Parametry vzorku:

počty závitů: $N_1 = 35$ z, $N_2 = 60$ z,

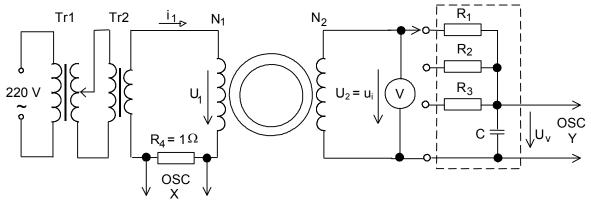
rozměry: $D_1 = 45 \text{ mm}, D_2 = 80 \text{ mm},$

v = 25 mm

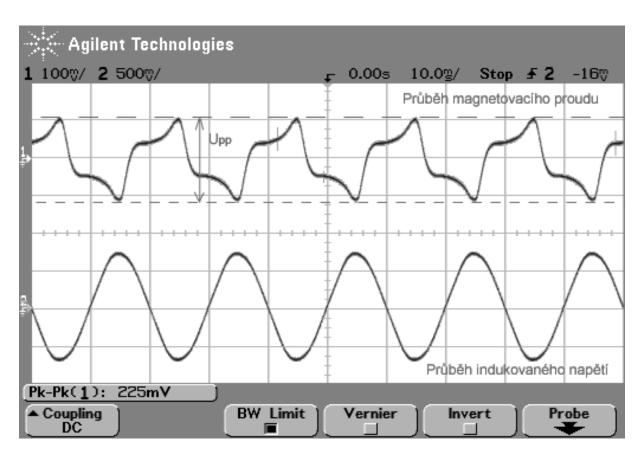
RC článek: $C = 470 \text{ nF}, R_1 = 40 \text{ k}\Omega,$

 $R_2 = 120 \text{ k}\Omega, R_3 = 350 \text{ k}\Omega$

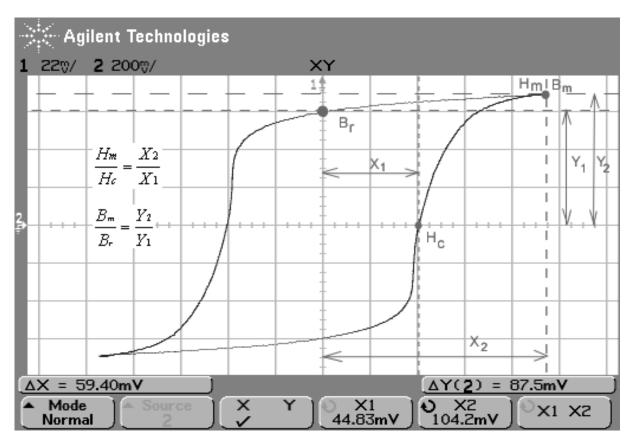
SCHÉMA ZAPOJENÍ



Obr. 2 Schéma zapojení pro měření amplitudové permeability a zobrazení dynamické hysterezní smyčky na osciloskopu



Obr. 4 Měření maximální hodnoty proudu osciloskopem v režimu "Quick meas" u Agilent 54624, resp. režimu "Measure voltage" u HP 54 600 (Pro R_4 = 1Ω platí I_m = Up-p/2)



Obr. 5 Princip výpočtu hodnoty H_c a B_r s použitím kurzorů v režimu XY

Seznam použitých přístrojů

Tr1 - regulační transformátor 0 ÷220 V

Tr2 - transformátor 220 V / 6 V

R₄ - odporový etalon 1 ΩOSC - číslicový osciloskop

V - nf nebo číslicový voltmetr, typ ..., přesnost ...

vzorek magneticky měkkého materiálu ve tvaru toroidu (prstence) přípravek s pasivním integračním článkem se třemi integračními konstantami

Teoretický rozbor úlohy

Pro intenzitu magnetického pole uvnitř prstencového vzorku platí vztah

$$H(t) = \frac{N_1}{l_s} i_1(t) \tag{1}$$

kde H(t) je okamžitá hodnota intenzity magnetického pole (A m⁻¹), N_1 počet závitů primárního (magnetovacího) vinutí,

l_s střední délka siločáry ve vzorku (m),

$$l_{\rm s} = \pi \frac{D_1 + D_2}{2}$$
 ... pro $\frac{D_1}{D_2} < 1,3$

 $i_1(t)$ okamžitá hodnota magnetovacího proudu (A),

 D_1, D_2 vnější a vnitřní průměr vzorku (m).

Z Faradayova indukčního zákona odvodíme

$$u_i(t) = N_2 \frac{d\Phi(t)}{dt} = N_2 S_{Fe} \frac{dB(t)}{dt}$$
 (2)

kde $u_i(t)$ je okamžitá hodnota indukovaného napětí (V),

N₂ počet závitů sekundárního (měřicího) vinutí,

 S_{Fe} průřez měřeného vzorku (viz obr. 1) (m⁻²),

 $\Phi(t)$ okamžitá hodnota magnetického toku ve vzorku (Wb);

pro okamžitou hodnotu magnetické indukce B(t) platí

$$B(t) = \frac{1}{N_2 S_{\text{Fe}}} \int_0^t u_i(t) dt$$
 (3)

Ze vztahů (1) a (3) vyplývá, že časový průběh intenzity magnetického pole má stejný tvar jako průběh magnetovacího proudu a časový průběh magnetické indukce má stejný tvar jako průběh integrálu indukovaného napětí. Průběhy intenzity magnetického pole a magnetické indukce se velmi liší díky nelinearitě magnetického materiálu.

Střídavá magnetická měření se standardně provádějí při sinusovém průběhu magnetické indukce, což odpovídá požadavku sinusového průběhu indukovaného napětí. Tuto podmínku je nutné dodržet, protože parametry magnetických materiálů, jako např. permeabilita, koercitivita nebo ztráty jsou závislé na průběhu indukce.

Požadovaného sinusového průběhu indukce B(t) se dosahuje tzv. napěťovým magnetováním, tj. buzením vzorku ze zdroje sinusového napětí. Celková impedance magnetovacího obvodu

¹)

v 1 1 1/ v 1 v °

- Požadavek na malý poměr poloměrů má 2 důvody:
- 1. Při velkém poměru poloměrů je materiál blíže k vnitřnímu průměru vystaven výrazně vyšší intenzitě než materiál u obvodu vnějšího a jádro je tedy magnetováno nerovnoměrně. Získané výsledky jsou průměrnou hodnotou přes celý průřez a nelze je považovat za správnou charakteristiku materiálu. Tato skutečnost nevadí v případě, že naměřené výsledky chápeme jako charakteristiku příslušného uzavřeného vzorku.
- 2. Určení střední hodnoty intenzity magnetického pole pomocí střední délky siločáry je dostatečně přesné jen pro malé poměry poloměrů. U poměrů větších než 1,3 již vzniká nezanedbatelná chyba a střední hodnotu intenzity je třeba počítat z integrálu [skripta Magnetické prvky a měření]. V této úloze je měřeno jádro z orientované křemíkové oceli, které se používá pro síťové transformátory. Poměr poloměrů je větší než 1,3, pro jednoduchost je však použit výpočet ze střední délky siločáry.

musí být tedy co nejmenší. Jako snímací rezistor pro měření magnetovacího proudu je proto nutné použít rezistor malé hodnoty (pro měření magnetovacího proudu nelze použít ampérmetr, protože proud není sinusový). Při měření musíme dodržet také nízký výstupní odpor napájecího zdroje (což je obvykle odpor vinutí napájecího transformátoru) a nízký odpor primárního (magnetovacího) vinutí vzorku. Tento požadavek lze snadno dodržet při použití napájecího transformátoru dimenzovaného na velký proud (s velkým průřezem vinutí) a magnetovacího vinutí s velkým průřezem drátu.

Kvalitu sinusového průběhu B(t) lze posuzovat buď porovnáváním efektivní hodnoty a aritmetické střední hodnoty indukovaného (sekundárního) napětí $u_i(t)$, jejichž poměr by podle standardu IEC měl být $1,11 \pm 1$ %, nebo pohodlněji sledováním průběhu na osciloskopu (norma předepisuje současné použití obou metod).

Amplitudová permeabilita je definována z poměru amplitud (tj. maximálních hodnot) veličin *B* a *H* podle vztahu

$$\mu_{\rm a} = \frac{B_{\rm m}}{\mu_0 H_{\rm m}} \ (-; T, H \, {\rm m}^{-1}, A \, {\rm m}^{-1})$$
 (4)

kde $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$.

Hodnotu $B_{\rm m}$ lze snadno stanovit z aritmetické střední hodnoty indukovaného napětí i pro obecný průběh B(t) (viz. 9).

Je-li průběh H(t) a $i_1(t)$ deformovaný, nelze hodnotu $H_{\rm m}$ počítat ani z efektivní, ani z aritmetické střední hodnoty proudu $i_1(t)$. Možnosti měření $I_{\rm lm}$ a následného výpočtu $H_{\rm m}$ jsou tyto:

- 1. Použití voltmetru pro měření špičkové hodnoty některé multimetry vyšší kategorie toto měření umožňují.
- 2. Použití číslicového osciloskopu některé typy měří špičkovou hodnotu s dostatečnou přesností; tento způsob měření je využit v této úloze.
- Použití měřicího systému pro magnetická měření řízeného počítačem všechny parametry se vypočtou z ovzorkovaných hodnot magnetovacího proudu a indukovaného napětí, lze nakreslit i dynamickou hysterezní smyčku atd.
- 4. Použití analogového detektoru špičkové hodnoty s operačním zesilovačem.
- 5. Použití vzájemné indukčnosti.

Výpočet magnetické indukce

Hodnotu $B_{\rm m}$ lze pro obecný periodický průběh stanovit z aritmetické střední hodnoty indukovaného napětí. Integrujeme-li rovnici (2), dostaneme podle obr. 3 pro kladnou půlperiodu napětí $u_i(t)$ rovnici

$$\int_{t_1}^{t_1+\frac{T}{2}} u_i(t) dt = N_2 \int_{-\Phi_m}^{+\Phi_m} d\Phi$$
 (6)

a po vydělení rovnice hodnotou T/2 bude

$$\frac{2}{T} \int_{t_1}^{t_1+\frac{T}{2}} u_i(t) dt = \frac{4}{T} N_2 \Phi_{\rm m} , \text{ kde } \frac{1}{T} = f$$
 (7)

Levá strana rovnice (7) je aritmetická střední hodnota $U_{\rm sar}$ indukovaného napětí, kterou určíme např. z údaje voltmetru s usměrňovačem vydělením údaje činitelem 1,11. (V tomto případě nelze použít voltmetr, který měří efektivní hodnotu.)

Dostaneme tedy

$$U_{\rm sar} = 4 f N_2 \Phi_{\rm m} \tag{8}$$

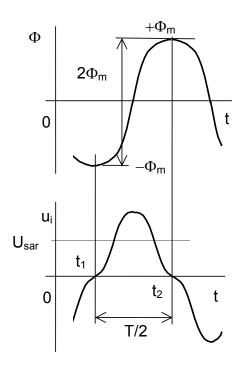
a konečně pro maximální hodnotu magnetické indukce vztah

$$B_{\rm m} = \frac{U_2}{4,44 f N_2 S_{\rm Fe}} \tag{9}$$

kde

 U_2 je údaj voltmetru s usměrňovačem [V], který měří aritmetickou střední hodnotu, ale udává tuto hodnotu násobenou činitelem 1,11;

f frekvence magnetovacího proudu [Hz].



Obr. 3 Průběh magnetického toku a indukovaného napětí

Integrace pasivním RC článkem

Přenos pasivního integračního RC článku (obr. 2) je

$$\frac{\mathbf{U}_{\mathbf{v}}}{\mathbf{U}_{2}} = \frac{1}{1 + \mathrm{j}\omega RC} \tag{10}$$

Platí-li

$$\omega RC >> 1$$
 (11)

můžeme psát

$$\frac{\mathbf{U}_{v}}{\mathbf{U}_{2}} \doteq \frac{1}{j\omega RC} \tag{12}$$

což je přenos ideálního integrátoru.

Použití příliš malé časové konstanty RC integrátoru a tedy nesplnění podmínky (11) vede ke zkreslení tvaru hysterezní smyčky. Použijeme-li velkou hodnotu RC, bude sice podmínka (11) splněna, ale amplituda výstupního napětí integrátoru U_v může být příliš malá pro kvalitní zobrazení hysterezní smyčky na osciloskopu.

Poznámka:

Pasivní integrační RC článek lze nahradit přesným elektronickým integrátorem. V měřicím systému řízeném počítačem se integrace provádí numericky.

11. MĚŘENÍ VÝKONU NESOUMĚRNÉ TŘÍFÁZOVÉ ZÁTĚŽE

Úkol měření

1. Stanovte činný a jalový výkon nesouměrné 3-fázové zátěže zapojené do hvězdy. Uzel zátěže nepřipojujte.

Měření činného výkonu proveďte:

- a) třemi wattmetry,
- b) dvěma wattmetry proveď te ověření Blondelova teorému trojím měřením.

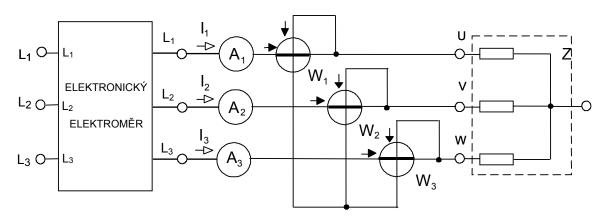
Měření jalového výkonu proveďte třemi wattmetry.

Kde je to možné, proveďte korekci chyby metody.

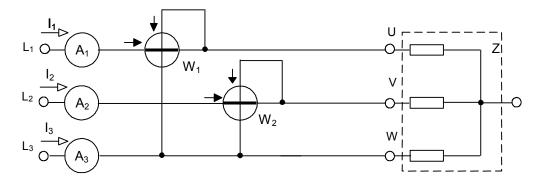
2. Ověřte funkci třífázového elektronického elektroměru a porovnejte údaje elektroměru s údaji naměřenými ostatními měřicími přístroji.

Schéma zapojení

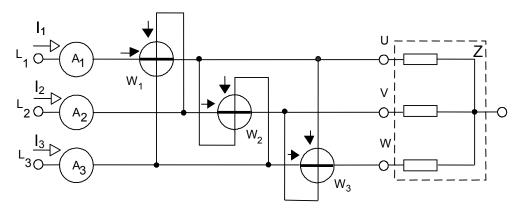
Zapojení pro měření činného výkonu je na obr. 1 a 2, zapojení pro měření jalového výkonu je na obr. 3, pro ověření funkce elektronického elektroměru je použito zapojení dle obr. 1.



Obr. 1 Zapojení pro měření činného výkonu třífázové zátěže třemi wattmetry a pro ověření funkce elektronického elektroměru



Obr. 2 Příklad zapojení pro měření činného výkonu nesouměrné třífázové zátěže dvěma wattmetry – Aronovo zapojení



Obr. 3 Zapojení pro měření jalového výkonu nesouměrné třífázové zátěže třemi wattmetry

Poznámky k měření:

- a) Dodržte správné připojení (sled fází) zdroje a zátěže.
- b) Síť 3 x 120 V je v zapojení do trojúhelníka bez vyvedené nuly.
- c) Ve všech případech dbejte na správnost zapojení začátků proudových a napěťových cívek.
- d) Zátěž ponechte připojenou ke zdroji nejdéle po dobu 5 minut není dimenzována na trvalý provoz.
- e) Elektronický elektroměr neodpojujte, ale ponechte v zapojení jako v prvním měření, i když ve schématech není zakreslen.

Seznam použitých přístrojů

A₁ - ampérmetr elektromagnetický, tř.přes. ..., použitý rozsah ...

A₂ - ampérmetr elektromagnetický, tř.přes. ..., použitý rozsah ...

A₃ - ampérmetr elektromagnetický, tř.přes. ..., použitý rozsah ...

 W_1 - wattmetr elektrodynamický, tř.přes. ..., napěťový rozsah ... V, proudový rozsah ... A, odpor napěťové cívky ... Ω

 W_2 - wattmetr elektrodynamický, tř.přes. ..., napěťový rozsah ... V, proudový rozsah ... A, odpor napěťové cívky ... Ω

 W_3 - wattmetr elektrodynamický, tř.přes. ..., napěťový rozsah ... V, proudový rozsah ... A, odpor napěťové cívky ... Ω

L₁, L₂, L₃ - zdroj střídavého napětí 3 x 120 V - rozvaděč

Z - měřená zátěž

elektronický elektroměr EMU 30, ZPA Trutnov

Teoretický rozbor úlohy

1. Měření činného výkonu třemi wattmetry

K určení činných fázových výkonů P_1 , P_2 , P_3 , odebíraných zátěží ve fázích L_1 , L_2 , L_3 , použijeme zapojení na obr. 1. Protože napájecí soustava 3×120 V je třívodičová - bez nulového vodiče (120 V je napětí sdružené), musí být při měření zaručen stejný odpor napěťových cívek všech tří wattmetrů, aby jejich uzel byl na potenciálu nulového vodiče (tzv. umělá nula). V sérii s každou proudovou cívkou wattmetru je zapojen ampérmetr. Podle údajů ampérmetrů zvolíme odpovídající proudové rozsahy wattmetrů. Celkový změřený činný výkon $P_{\rm Cm}$ odebíraný zátěží bude dán součtem výkonů v jednotlivých fázích:

$$P_{\rm Cm} = P_1 + P_2 + P_3 = K_{\rm W1} \alpha_1 + K_{\rm W2} \alpha_2 + K_{\rm W3} \alpha_3 \quad (W) \tag{1}$$

kde K_{W1} až K_{W3} jsou konstanty wattmetrů (W/dílek), α_1 až α_3 výchylky wattmetrů (dílky).

Chybu metody tvoří v tomto zapojení spotřeba napěťových cívek wattmetrů

$$P_{\rm n1} = P_{\rm n2} = P_{\rm n3} = \frac{U_{\rm f}^2}{R_{\rm n}}$$
 (W)

kde U_f je velikost napětí na napěťové cívce wattmetru (V),

 R_n velikost odporu napěťové cívky wattmetru - u všech použitých wattmetrů je shodná (Ω) .

Korekci chyby metody provedeme odečtením spotřeby napěťových cívek:

$$P_{\rm C} = P_{\rm Cm} - 3 \frac{U_{\rm f}^2}{R_{\rm n}}$$
 (W) (.3)

Standardní nejistota údaje při měření činného výkonu třemi wattmetry je potom

$$u_{\rm P} = \sqrt{u_{\rm Pl}^2 + u_{\rm P2}^2 + u_{\rm P3}^2} \quad (W) \tag{4}$$

Při určování nejistoty se neuvažuje člen korigující ve vztahu (3) chybu metody $(3U_{\rm f}^2/R_{\rm n})$, neboť jeho hodnota je podstatně menší než celkový měřený výkon $P_{\rm Cm}$.

Pro 3 shodné wattmetry (stejný typ i rozsahy) je standardní nejistota dána vztahem

$$u_{\rm P1} = u_{\rm P2} = u_{\rm P3} = u_{\rm P} = \frac{TP_{\rm W} \cdot M_{\rm W}}{100\sqrt{3}}$$
 (W) (5)

kde TP_W je třída přesnosti wattmetru (%),

 $M_{\rm W}$ měřicí rozsah wattmetru (W).

Rozšířenou nejistotu hodnoty $P_{\rm C}$ pro činitel rozšíření $k_{\rm r}=2$ lze potom vyjádřit ve tvaru

$$U_{Pc} = 2\sqrt{3 \cdot u_P^2} \quad (W) \tag{6}$$

Výsledek měření činného výkonu vyjádříme ve tvaru

$$P = P_C \pm U_{P_C}(W) \tag{7}$$

2. Měření činného výkonu dvěma wattmetry

Podle Blondelova teorému je ke změření celkového činného výkonu v n-vodičové síti zapotřebí n -1 wattmetrů. Jedno z možných zapojení pro měření je na obr. 2 (Aronovo zapojení), které můžeme aplikovat postupně na všechny tři kombinace zapojení 2 wattmetrů. Celkový činný výkon změřený dvěma wattmetry je po korekci chyby metody dané spotřebou dvou napěťových cívek wattmetrů s odpory R_{n1} a R_{n2} dán vztahem

$$P_{\rm C} = K_{\rm W1} \alpha_1 - \frac{U_{13}^2}{R_{\rm n1}} + K_{\rm W2} \alpha_2 - \frac{U_{23}^2}{R_{\rm n2}} (\rm W)$$
 (8)

kde R_{n1} a R_{n2} jsou odpory napěťových cívek wattmetrů (Ω) , U_{12} a U_{13} sdružená napětí třífázové soustavy (V).

Protože odpory napěťových cívek jsou u všech wattmetrů shodné a stejná jsou i sdružená napětí sítě (120 V), platí

$$P_{\rm C2} = K_{\rm W1}\alpha_1 + K_{\rm W2}\alpha_2 - 2\frac{U_{13}^2}{R_{\rm n1}} \text{ (W)}$$
 (9)

a za předpokladu stejných wattmetrů se stejnými rozsahy pro rozšířenou nejistotu údaje (pro $k_r = 2$) dostaneme

$$U_{P_{C2}} = 2\sqrt{2 \cdot u_{\rm P}^2}$$
 (W)

kde u_P je dáno vztahem (5). Při určování nejistoty se neuvažuje člen korigující ve vztahu (9) chybu metody $(2U_{13}^2/R_{n1})$, neboť jeho hodnota je podstatně menší než součet $K_{W1}\alpha_1 + K_{W2}\alpha_2$.

Výsledek měření dvěma wattmetry opět vyjádříme ve tvaru

$$P = P_{C2} \pm U_{P_{C2}}$$
 (W) (11)

3. Měření jalového výkonu třemi wattmetry

Zapojení pro měření jalového výkonu třemi wattmetry je na obr. 3. Napěťové cívky wattmetrů jsou připojeny na sdružená napětí zpožděná vždy o $\pi/2$ proti fázovému napětí fáze, v níž je zapojena proudová cívka příslušného wattmetru. Každý wattmetr bude mít výchylku úměrnou velikosti jalového výkonu příslušné fáze, ale násobenou činitelem $\sqrt{3}$, což je poměr sdruženého a fázového napětí. Tímto činitelem musíme dělit každý z údajů wattmetrů. Celkový jalový výkon je tedy dán vztahem

$$Q_{\rm C} = Q_1 + Q_2 + Q_3 = \frac{N_1}{\sqrt{3}} + \frac{N_2}{\sqrt{3}} + \frac{N_3}{\sqrt{3}} = \frac{K_{\rm W1}\alpha_1 + K_{\rm W2}\alpha_2 + K_{\rm W3}\alpha_3}{\sqrt{3}} \quad \text{(VAr)}, \tag{12}$$

kde N_1 , N_2 a N_3 jsou údaje wattmetrů a ostatní symboly mají stejný význam jako ve vztahu (1).

Standardní nejistoty údaje jednotlivých wattmetrů lze stejně jako v (5) vyjádřit ve tvaru

$$u_{\rm N} = \frac{TP_{\rm W} \cdot M_{\rm W}}{100 \cdot \sqrt{3}} \qquad \text{(VAr)},\tag{13}$$

kde $TP_{\rm W}$ je třída přesnosti použitého wattmetru (%),

 $M_{\rm W}$ rozsah použitého wattmetru (VAr), u_N nejistota údaje wattmetru (VAr).

Nejistotu údaje jalového výkonu jednotlivých wattmetrů lze podle vztahu (12) vyjádřit ve tvaru

$$u_{\mathcal{Q}} = \frac{u_{\mathcal{N}}}{\sqrt{3}} \text{ (VAr)} \tag{14}$$

Rozšířená nejistota ($k_r = 2$) celkového měřeného jalového výkonu Q_C je dána vztahem

$$U_{Q_c} = 2\sqrt{u_{Q_1}^2 + u_{Q_2}^2 + u_{Q_3}^2} \text{ (VAr)}$$

Pro 3 shodné wattmetry (stejný typ i rozsahy, $u_{N1}=u_{N2}=u_{N3}=u_{N}$) můžeme tedy pro rozšířenou nejistotu celkového jalového výkonu $Q_{\rm C}$ psát

$$U_{\rm Q_{\rm C}} = 2 \sqrt{3 \left(\frac{u_{\rm N}}{\sqrt{3}}\right)^2} = 2 u_{\rm N} \quad \text{(VAr)}$$
 (16)

a výsledek měření jalového výkonu vyjádřit ve tvaru

$$Q = Q_{\rm C} \pm U_{Q_{\rm C}} \tag{17}$$

Z hodnot činných a jalových výkonů ve všech třech fázích můžeme vypočítat i jednotlivé fázové posuvy

$$\varphi_i = \operatorname{arctg} \frac{Q_i}{P_i} \, (\circ), \quad i = 1, 2, 3$$
 (18)

Poznámka: Při zapojení proudových a napěťových cívek wattmetrů podle obr. 3 odpovídají kladným výchylkám wattmetrů kladné hodnoty Q. Při záporné výchylce wattmetru se napěťová cívka zapojí obráceně a údaj wattmetru má záporné znaménko. Kvadrant, v němž leží fázor proudu \mathbf{I}_i , resp. jemu odpovídající ϕ_i , se určí pomocí znamének P_i , Q_i .

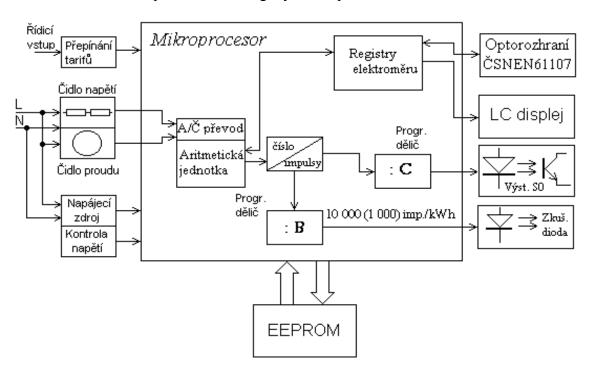
4. Demonstrace funkce třífázového statického elektroměru EMU 30, výrobce ZPA cz Trutnov

Podle obr. 1 je součástí měřicího obvodu třífázový elektronický (tzv. statický) elektroměr. Tento elektroměr dovoluje měření celé řady parametrů, pro běžné odběratele je zpravidla naprogramován tak, že po 10 s rotují údaje činné energie spotřebované v jednotlivých (celkem 4) tarifech. Elektroměry EMU 30 pro tuto úlohu zdarma poskytla firma ZPA cz Trutnov (www.zpa.cz). Elektroměry jsou naprogramovány tak, že po zapnutí ukazují celkovou energii odebranou ve všech fázích (kWh), vždy po stisknutí tlačítka se postupně zobrazují následující údaje:

- celková jalová energie (kVArh),
- celková zdánlivá energie (kVAh),
- okamžitý činný výkon ve všech fázích (1,2,3) (kW),
- okamžitý činný výkon ve fázi 1 (kW),
- okamžitý činný výkon ve fázi 2 (kW),
- okamžitý činný výkon ve fázi 3 (kW),
- okamžitý jalový výkon ve všech fázích (1,2,3) (kVAr),

- okamžitý jalový výkon ve fázi 1 (kVAr),
- okamžitý jalový výkon ve fázi 2 (kVAr),
- okamžitý jalový výkon ve fázi 3 (kVAr),
- okamžitý zdánlivý výkon ve všech fázích (1,2,3) (kVA),
- okamžitý zdánlivý výkon ve fázi 1 (kVA),
- okamžitý zdánlivý výkon ve fázi 2 (kVA),
- okamžitý zdánlivý výkon ve fázi 3 (kVA),
- fázové napětí 1. fáze (V),
- fázové napětí 2. fáze (V),
- fázové napětí 3. fáze (V),
- sdružené napětí 1-2 (V),
- sdružené napětí 2-3 (V),
- sdružené napětí 1-3 (V),
- proud ve fázi 1 (A),
- proud ve fázi 2 (A),
- proud ve fázi 3 (A),
- cos φ ve fázi 1,
- cos φ ve fázi 2,
- cos φ ve fázi 3.

Blokové schéma jednofázového elektroměru je uvedeno na obr. 4. V případě třífázového elektroměru má mikroprocesor 6 analogových vstupů.



Obr.4 Blokové schéma jednofázového elektroměru

Jako "čidlo napětí" je použit kompenzovaný odporový dělič, jako "čidlo proudu" měřící transformátor proudu zatížený rezistorem (používají se speciální transformátory s lineárním průběhem hysterezní smyčky, které zabezpečují správné měření spotřeby i při přítomnosti stejnosměrné složky proudu). Signály úměrné napětí a proudu jsou vzorkovány, výkon, efektivní hodnota, případně další měřené veličiny jsou vypočteny aritmetickou jednotkou.

12. Číslicový měřič impedancí a admitancí

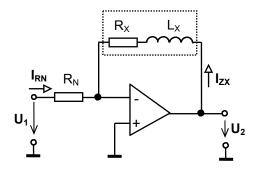
Úkol měření

1. Odvoďte, že pro zapojení na obr. 1 platí vztahy

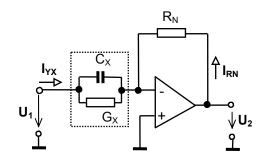
$$R_{\rm X} = \frac{-R_{\rm N} \, \operatorname{Re}\{\mathbf{U}_2\}}{U_1}; \qquad L_{\rm X} = \frac{-R_{\rm N} \, \operatorname{Im}\{\mathbf{U}_2\}}{\omega U_1}$$

a pro zapojení na obr. 2 platí:

$$G_{\rm X} = \frac{-\operatorname{Re}\{\mathbf{U}_2\}}{R_{\rm N} U_1}; \qquad C_{\rm X} = \frac{-\operatorname{Im}\{\mathbf{U}_2\}}{\omega R_{\rm N} U_1}$$



Obr. 1 Zapojení převodníku pro měření impedance



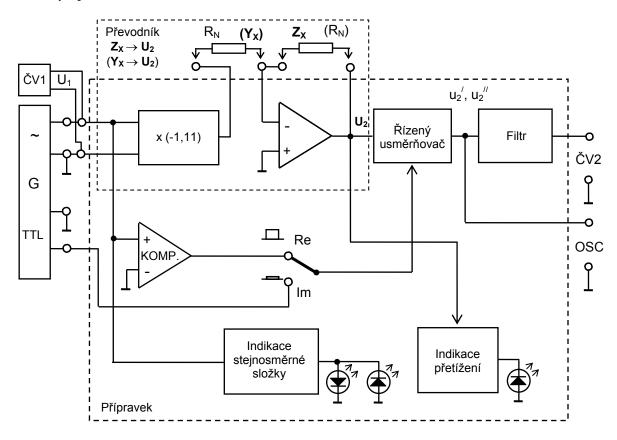
Obr. 2 Zapojení převodníku pro měření admitance

2. Sestaveným RLC měřičem podle obr. 3 změřte indukčnost a ztrátový odpor předložené cívky. Použijte sériové náhradní schéma $L_{\rm X}$, $R_{\rm X}$, měřte při doporučených hodnotách kmitočtů a odporů $R_{\rm N}$ uvedených v tabulce.

Doporučený kmitočet f (Hz)	ω	Velikost R_N (Ω)
159,2	10^3	100
1592	10^{4}	1000

- 3. Pro jedno měření zakreslete do sešitu průběhy napětí za řízeným usměrňovačem (v poloze Re i Im) a dokažte, že střední hodnota (stejnosměrná složka) tohoto napětí U_{2s} odpovídá reálné, popř. imaginární složce fázoru výstupního napětí \mathbf{U}_2 .
- 4. Výše uvedeným RLC měřičem změřte průchozí admitanci předloženého kondenzátoru a obě dvě parazitní kapacity vůči stínění. Použijte paralelní náhradní schéma C_X , G_X , měřte při kmitočtu 1592 Hz, $R_N = 100 \text{ k}\Omega$ (nastavení dekády 99 999 Ω).

Schéma zapojení



Obr. 3 Schéma zapojení přípravku pro měření impedancí a admitancí (není nakresleno napájení)

Poznámky k měření:

- *Pozn. 1:* Volbou $ω = 10^3$ s⁻¹ popř. 10^4 s⁻¹ a $U_1 = 1$ V se dosáhne toho, že hodnoty prvků náhradního schématu (L_X, R_X) popř. $C_X, G_X)$ se vypočtou z příslušných složek výstupního napětí pouhým vynásobením mocninami 10.
- Pozn. 2: Vzhledem k tomu, že stejnosměrná složka napětí na výstupu řízeného usměrňovače je úměrná střední hodnotě měřeného napětí $(U_{2S} = U_2 \cos \varphi)$, je nutné na vstupu převodníku $\mathbf{Z} \to \mathbf{U}$ popř. $\mathbf{Y} \to \mathbf{U}$ nastavovat též střední hodnotu napětí. Protože však u vstupního napětí nastavujeme jeho efektivní hodnotu (údaj číslicového voltmetru odpovídá efektivní hodnotě měřeného napětí) a platí $U_{\text{ef}} \cong 1,11$ $U_{\text{stř}}$, je nutné nastavit hodnotu efektivní na vstupu převodníku 1,11-krát větší, než je požadovaná hodnota střední. Aby bylo možné na vstupu přípravku nastavovat napětí bez vynásobení koeficientem 1,11, je v přípravku vstupní napětí zesilováno invertujícím zesilovačem s přenosem -1,11; záporná hodnota přenosu odpovídá znaménku ve vztazích (1) a (2).

Seznam použitých přístrojů

G - generátor napětí se sinusovým a TTL výstupem - frekvence 159,2 Hz a 1592 Hz

ČV1 - číslicový voltmetr, typ ..., rozsah ..., přesnost ...,

ČV2 - číslicový voltmetr, typ ..., rozsah ..., přesnost ...,

napájecí zdroj ±15 V, typ ...,

R_N - odporová dekáda,

přípravek - viz obr. 3

Teoretický rozbor úlohy

Převodník $Z \rightarrow U$ popř. $Y \rightarrow U$

Pro převodník na obr. 1 platí

$$\mathbf{I}_{\mathrm{RN}} = -\mathbf{I}_{\mathrm{ZX}} \tag{3}$$

Po dosazení za I_{RN} a I_{ZX} dle Ohmova zákona, oddělení reálné a imaginární složky a vyjádření měřených parametrů jako funkce reálné popř. imaginární části výstupního napětí U_2 se získají vztahy (1).

Podobně pro zapojení dle obr. 2 platí

$$\mathbf{I}_{\mathrm{RN}} = -\mathbf{I}_{\mathrm{YX}} \tag{4}$$

a vztahy (2) se odvodí obdobně jako v předchozím případě.

Přesnost měření závisí vedle parametrů použitých přístrojů a toleranci rezistoru R_N zejména na fázových posuvech použitých zesilovačů a nedokonalé funkci řízeného usměrňovače.

Poznámka 1: Volbou $ω = 10^3$ s⁻¹ popř. 10^4 s⁻¹ a $U_1 = 1$ V se dosáhne toho, že hodnoty prvků náhradního schématu $(L_X, R_X \text{ popř. } C_X, G_X)$ se vypočtou z příslušných složek výstupního napětí pouhým vynásobením mocninami 10.

Měření reálné a imaginární složky výstupního napětí

Pro měření reálné a imaginární složky výstupního napětí U_2 využíváme řízený usměrňovač. Jako referenční napětí pro řízení přepínače použijeme při měření reálné složky napájecí napětí U_1 tvarované komparátorem, při měření imaginární složky použijeme pro řízení usměrňovače napětí z TTL výstupu napájecího generátoru, které je o T/4 posunuto proti napětí U_1 odebíranému z výstupu harmonického signálu.

Pro odvození střední hodnoty napětí na výstupu řízeného usměrňovače lze postupovat buď dle [1], kap. 6.1.4.2, nebo lze použít výpočet integrálu přes půl periody sinusového napětí posunutého o φ . Řízený usměrňovač se chová při měření reálné složky napětí jako násobička posunutého průběhu $u_2(t) = U_{2m} \sin(\omega t - \varphi)$ obdélníkem se střídou 1:1 a s amplitudou +1 a -1, který je ve fázi s napájecím napětím $u_1(t)$; střední hodnota napětí U_{2s}^{\prime} je v tomto případě úměrná reálné složce výstupního napětí. Pak platí

$$U_{2s}^{\prime} = \frac{1}{T/2} \int_{0}^{T/2} U_{2m} \sin(\omega t - \varphi) dt = \frac{U_{2m}}{\pi} \left[-\cos(x - \varphi) \right]_{0}^{\pi} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_{2ef} \cos \varphi = \text{Re}\{\mathbf{U}_{2}\}$$
 (5)

Poznámka 2: Při odvození výsledného výrazu použijte substituci ωt = x, dále dosaďte ω = 2π/T, $U_{2m} = U_{2ef} \sqrt{2}$ a použijte vzorec cos(α-β) = cosα cosβ + sinα sinβ.

Pro měření imaginární složky je třeba násobit výstupní napětí $u_2(t)$ obdélníkem s amplitudou +1 a -1 posunutým oproti napájecímu napětí o T/4 (při výpočtu střední hodnoty integrujeme přes půl periody v mezích T/4 až 3T/4). Obdobně jako v předchozím případě pak platí

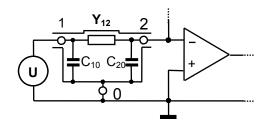
$$U_{2s}^{"} = \frac{1}{T/2} \int_{T/4}^{3T/4} U_{2m} \sin(\omega t - \varphi) dt = \frac{U_{2m}}{\pi} \left[-\cos(x - \varphi) \right]_{\pi/2}^{3\pi/2} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_{2ef} \sin \varphi = \operatorname{Im} \{ \mathbf{U}_2 \}$$
 (6)

Poznámka 3: Vzhledem k tomu, že stejnosměrná složka napětí na výstupu řízeného usměrňovače je úměrná střední hodnotě měřeného napětí $(U_{28} = U_2 \cos \varphi)$, je nutné na vstupu převodníku $\mathbf{Z} \to \mathbf{U}$ popř. $\mathbf{Y} \to \mathbf{U}$ nastavovat též střední hodnotu napětí. Protože však u vstupního napětí nastavujeme jeho efektivní hodnotu (údaj číslicového voltmetru odpovídá efektivní hodnotě měřeného napětí) a platí $U_{\text{ef}} \cong 1,11$ $U_{\text{stř}}$, je nutné nastavit hodnotu efektivní na vstupu převodníku 1,11-krát větší, než je požadovaná hodnota střední. Aby bylo možné na vstupu přípravku nastavovat napětí bez vynásobení koeficientem 1,11, je v přípravku vstupní napětí zesilováno invertujícím zesilovačem s přenosem -1,11; záporná hodnota přenosu odpovídá znaménku – ve vztazích (1) a (2).

Poznámka 4: Vzhledem k tomu, že napětí na výstupu řízeného usměrňovače odpovídající reálné a imaginární složce výstupního napětí převodníku $\mathbf{Z}_{x} \to \mathbf{U}_{2}$ resp. $\mathbf{Y}_{x} \to \mathbf{U}_{2}$ má nejen stejnosměrnou, ale i střídavou složku o frekvenci základní harmonické složky rovné dvojnásobku frekvence měřeného napětí, je nutné zapojit před vstup číslicového voltmetru ve funkci "měření stejnosměrného napětí" filtr typu "dolní propust", který střídavou složku potlačí.

Vliv parazitních kapacit vůči stínění

U použitého převodníku je možné použít třísvorkové připojení měřené admitance. V případě, že stínění měřeného kondenzátoru spojíme se zemní svorkou, parazitní kapacity vůči stínění neovlivní výsledek měření tzv. průchozí admitance \mathbf{Y}_{12} . To vyplývá z náhradního schématu na obr. 4. Rozprostřené kapacity (obecně admitance) mezi měřeným objektem a stíněním (a v případě použití koaxiálních kabelů pro připojení měřeného objektu i jejich kapacitu) lze nahradit parazitními kapacitami C_{10} a C_{20} . Kapacita C_{20} je připojena mezi invertující a neinvertující vstup operačního zesilovače, napětí mezi těmito body je v případě ideálního operačního zesilovače nulové (virtuální nula) a tato parazitní kapacita tedy neovlivní výsledek měření. Kapacita C_{10} je připojena paralelně k referenčnímu zdroji a pokud platí $1/\omega C_{10} >> R_{0}$ (R_{0} je výstupní odpor referenčního zdroje), neovlivní velikost referenčního napětí a tudíž ani výsledek měření.



Obr. 4 Náhradní schéma stínění měřené admitance

Pro určení velikosti parazitních kapacity C_{10} popř. C_{20} je třeba spojit stínění se svorkou 2 popř. 1. V tom případě se měří paralelní kombinace měřené admitance a příslušné parazitní kapacity. Změřená hodnota kapacity je pak rovna $C_{12} + C_{10}$, popř. $C_{12} + C_{20}$, z čehož lze obě parazitní kapacity snadno určit.

LITERATURA

- [1] Haasz, V., Sedláček, M.: *Elektrická měření. Přístroje a metody.* Vydavatelství ČVUT, Praha 2003 (2.vydání)
- [2] Sedláček, M., Haasz, V.: *Electrical Measurements and Instrumentation*. Skripta ČVUT, Praha 1995
- [3] Kolektiv katedry měření: *Elektrická měření*. *Návody k laboratorním cvičenmí*. Skripta ČVUT, Praha 2007 (dotisk 1. vydání)
- [4] Ďaďo, S., Vedral, J.: Číslicové měření. Přístroje a metody. Skripta ČVUT, Praha 2002
- [5] Fajt, V., Haasz, V., Sedláček, M.: *Elektrická měření*. Skripta ČVUT, Praha 1994
- [6] Drechsler, R., Gyarfáš, J., Jakl, M., Vítovec, J.: *Elektrická měření II. Základní metody*. SNTL, Praha 1973
- [7] Honys, V.: Nová příručka pro zkoušky elektrotechniků. Praha 1994
- [8] Vedral, J., Kubíček, M.: *Elektronické obvody měřicích přístrojů. Laboratorní cvičení.* Skripta ČVUT, Praha 1993
- [9] Dostál, J.: Operační zesilovače. SNTL, Praha 1981
- [10] Vedral, J., Fischer, J.: *Elektronické obvody pro měřicí techniku*. Vydavatelství ČVUT, Praha 2004 (2. vydání)
- [11] Boháček, J. a kolektiv: *Elektrická měření*. *Návody k laboratorním cvičením*. Skripta ČVUT, Praha 1981
- [13] Cipra, M., Kříž M., Kůla V.: Úvod do elektrotechniky. Skripta ČVUT, Praha 1999
- [15] HP 53131A/132A Universal Counter. Operating Guide, U.S.A. 1995
- [16] PK 430.1 univerzální klešťový přístroj s číslicovým zobrazením. Návod k používání