



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



ESF II projekt Západočeské univerzity v Plzni

reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013239

KEV – MZS

Měření a zkoušení elektrických strojů



Předpokládaný čas: 15 min



Po prostudování tématu budete:

- Umět popsat druhy zkoušek
- Uvést příklady jednotlivých druhů zkoušek
- Vědět rozdíl mezi přímým a nepřímým měřením

1. Filozofie experimentu

Experiment je

- proces získávání kvalitativních a kvantitativních informací o objektu
- soubor pokusů (měření)

Experimentu předchází

- teoretická úvaha, která vychází ze současných znalostí o objektu, jeho matematického popisu, modelu
- formulace cíle měření (matematický model experimentu)

Vztah experiment – teorie (objekt – model)
experiment

- potvrzuje teorii
- vyvrací teorii
- poskytuje nové informace (podněty pro rekonstrukci či úpravy modelu)

teorie

- vysvětluje chování objektu
- poskytuje možnost predikcí
- umožňuje zobecnění problému – vyšší kvalita poznání
- vyvolává požadavky a podněty pro následný experiment

Měření a zkoušky elektrických zařízení

Zkouška je experiment, při němž se ověřují nebo garantují vlastnosti, kvalita, jakost apod.

Druhy zkoušek a měření

- vstupní kontrola a zkoušky materiálu a subdodávek (může být nahrazeno atestem výrobce)
- mezioperační (např. izolační zkouška tyčí)
- zkoušky výrobku
 - typové
 - kusové
 - namátkové (u hromadné výroby)
 - přejímací, garanční
- vývojové zkoušky
 - na fyzikálních modelech
 - na výrobcích
- identifikace parametrů stroje, zařízení (např. indukčnosti, časové konstanty, charakteristiky apod.)
- zkoušky při uvádění do provozu
- diagnostická měření
 - občasná (hluk, chvění,...)
 - trvalá (stav izolačního systému,...)
- identifikace poruch – hledání příčin
- průkazný experiment (prokazuje platnost teorie)

Z hlediska možného poškození jsou zkoušky

- bezpečné (měření odporů, napětí, ...)
- rizikové (izolační zkoušky, průběžné otáčky)
- destrukční, neopakovatelné (izolační pevnost materiálu, mechanická pevnost)

Měření veličin jsou

- přímá (hodnota měřené veličiny se zjistí přímo)
- nepřímá (hodnota měřené veličiny se zjistí na základě známé závislosti této veličiny na veličinách měřených přímo)

Předpoklady a potřeby pro realizaci zkoušek

- informace o objektech, teoretické znalosti
 - měřicí a zkušební metody
 - zkušební zdroje, pohonné a zatěžovací stroje
 - měřicí přístroje, systémy
 - organizační zajištění, bezpečnostní předpisy
 - zpracování výsledků, zkušební protokoly
- tvoří součást
vybavení zkušebny



Otázky k tématu:

- Uveďte příklady vstupních zkoušek materiálu.
- Uveďte příklad kusové zkoušky na asynchronním stroji.
- Jakým druhem měření je určení zdánlivého výkonu pomocí V-metru a A-metru?



Správné odpovědi

- Uveďte příklady vstupních zkoušek materiálu.

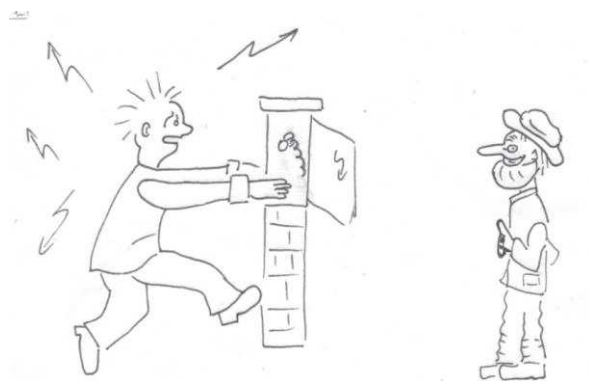
Měření ztrátového čísla magnetických plechů na Epsteinově přístroji. Kontrola rovinnosti magnetických plechů. Kontrola pájitelnosti drátu.

- Uveďte příklad kusové zkoušky na asynchronním stroji.

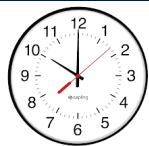
Kontrola odporů vinutí, kontrola izolačních odporů, proud naprázdno. Musí se jednat o rychlé a levné zkoušky, provádějí se na každém vyrobeném kusu.

- Jakým druhem měření je určení zdánlivého výkonu pomocí V-metru a A-metru?

Měření je nepřímé, $S = U \cdot I$ v 1f obvodě.



Jó, mladíku, elektřina má budoucnost, tý se držte.



Předpokládaný čas: 45 min



Po prostudování tématu budete:

- Umět charakterizovat hrubé chyby, soustavné chyby a chyby náhodné
- Umět vypočítat absolutní a relativní chybu měření
- Umět stanovit chybu výsledku složeného z více veličin
- Umět stanovit chybu digitálního přístroje
- Umět vypočítat metodou nejmenších čtverců rovnici regresní přímky

2. Chyby měření a statistické vyhodnocení

Každé měření lze realizovat pouze s omezenou přesností (určitou chybou¹). Hlavní příčinou jsou nedokonalost a nepřesnost měřících přístrojů a zařízení, nedokonalost a nepřesnost našich smyslů a přehlížení okolních vlivů působících na měření. Podle původu dělíme chyby na

- **Hrubé chyby**

Jsou zpravidla způsobeny nesprávným odečtením nebo zapsáním údaje přístroje, náhlým selháním měřící aparatury a vedou zpravidla ke zcela nesprávným výsledkům. Dané měření se výrazně liší od ostatních. Jejich příčinou bývá malá pozornost při měření. Digitální přístroje vzniku těchto chyb zcela zabrání, pokud umožňují naměřená data přímo vyhodnotit, popř. poslat např. do PC, kde vyhodnocení proběhne. Pak je tento druh omylu lidského činitele z měřícího řetězce zcela vyloučen.

- **Soustavné (systematické) chyby**

Tyto chyby jsou způsobeny nedokonalostí použitých přístrojů (posunutá nula, vliv pole, teploty, frekvence, tvaru měřeného průběhu, stárnutí přístrojů...), použité metody (přívody při měření malého odporu, vlastní spotřeba přístrojů) nebo i

¹ Chybovat je lidské, odpouštět božské – ale zahrnovat možnost výskytu chyby do svého projektu – to je statistické. (Leslie Kish)

2. Chyby měření a statistické vyhodnocení

nedokonalostí smyslových orgánů pozorovatele, nikoliv však jeho nedbalostí nebo nepozorností. Uvedené chyby učiní výsledek měření trvale vyšším nebo nižším. Nelze je odstranit matematickými prostředky (navenek se neprojeví), ale je možné je odhalit použitím vhodnějšího přístroje, popř. metody měření.

Systematické chyby se dělí na *aditivní* (chyba nastavení nulové hodnoty) a *multiplikativní* (chyba citlivosti).

- Náhodné chyby

Vznikají při každém měření vlivem nahodilých příčin. Jejich velikost nelze zjistit, ale můžeme vyjádřit jejich vliv na výsledek měření pomocí teorie chyb a počtu pravděpodobnosti. Proto provádíme u měření jedné hodnoty veličiny několik měření.

Chyby měření

- absolutní

$$\varepsilon = A - A_m = \Delta A \quad (2.1)$$

kde je A skutečná hodnota měřené veličiny (přesně nezjistitelná)

A_m naměřená hodnota přístrojem

- relativní

$$\delta = \pm \frac{\varepsilon}{A} \approx \pm \frac{\varepsilon}{A_m} [\%] \quad (2.2)$$

Přístroje se dělí podle přesnosti do tříd. Třída přesnosti je číslo ze zvolené řady, které klasifikuje přesnost měřícího přístroje nebo příslušenství. Chyba přístroje je poměr absolutní chyby ε k hodnotě měřícího rozsahu M

$$\delta_m = \frac{\varepsilon}{M} \cdot 100 [\%] \quad (2.3)$$

Přístroj patří do určité třídy přesnosti, pokud nemá v kterémkoliv místě měřícího rozsahu větší chybu δ_m , než je číslo třídy přesnosti. Norma definuje třídy přesnosti 0,1; 0,2; 0,5; 1; 2,5; 5. Rozdělení se nevztahuje na přístroje speciální (galvanometry). U přístrojů s několika stupnicemi se zjišťují chyby na každé stupnici.

Nejmenší přesnost mají rozvaděčové (analogové) přístroje (třída přesnosti 2,5; 5), které však svojí velikostí umožňují odečet veličiny i ze vzdálenosti několika metrů. Pak jsou běžné přístroje (třídy 0,5 a 1). Laboratorní přístroje mají třídu přesnosti 0,2, normály pak 0,1.

Chyby výsledku

Některé fyzikální veličiny se určují zprostředkovaně, jsou funkcí jiných měřených veličin. Jak potom stanovíme celkovou chybu výsledku?

Výsledek V je funkcí všech měřených veličin

2. Chyby měření a statistické vyhodnocení

$$V = f(A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_n) \quad (2.4)$$

a chyba výsledku vlivem nepřesného měření i -té veličiny je

$$\Delta V_i = \frac{\partial f}{\partial A_i} \varepsilon_i = \pm \left| \frac{\partial f}{\partial A_i} \right| \varepsilon_i \quad (2.5)$$

Parciální derivace vyjadřuje citlivost výsledné veličiny V na změnu měřené veličiny A_i .

$$\varepsilon_i = A_i - A_{mi} \quad (2.6)$$

V nejnejpříznivějším případě je mezní chyba výsledné veličiny (horní odhad)

$$\Delta V = \sum_{i=1}^n \Delta V_i \leq \pm \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial f}{\partial A_i} \right| \varepsilon_i = \Delta V_{mez} \quad (2.7)$$

a horní odhad poměrné chyby výsledku

$$\delta V = \frac{\Delta V_{mez}}{V} \quad (2.8)$$

Příklad:

Stanovení chyby, s jakou jsou určeny ztráty ve vodiči při použití vztahu

$$V = P_j = RI^2 \quad (2.9)$$

přičemž měříme odpor vodiče a procházející proud. podle vztahu (2.5) provedeme derivaci a obdržíme

$$\Delta V_{mez} = I^2 \varepsilon_R + 2RI \varepsilon_I \quad (2.10)$$

$$\delta V = \frac{\Delta V_{mez}}{V} = \frac{I^2 \varepsilon_R + 2RI \varepsilon_I}{RI^2} = \frac{\varepsilon_R}{R} + 2 \frac{\varepsilon_I}{I} = \delta_R + 2\delta_I \quad (2.11)$$

Z uvedeného příkladu plyne, že musíme měřit s větší přesností proud. Z rozboru chyb plynou požadavky na

- přesnost měření jednotlivých veličin
- volbu měřicí metody

Tato skutečnost (volba měřicí metody) je nejmarkantnější při stanovení účinnosti (přímá a nepřímá metoda).

Přímý postup

Podle přímé metody změříme výkon P a příkon Q s přesnostmi ε_P a ε_Q

$$V = \eta = \frac{P}{Q} \quad (2.12)$$

$$\Delta V = \pm \left(\frac{\varepsilon_P}{Q} + \left| -\frac{P \varepsilon_Q}{Q^2} \right| \right) = \pm \left(\frac{\varepsilon_P}{Q} + \frac{P \varepsilon_Q}{Q^2} \right) \quad (2.13)$$

$$\delta V = \frac{\Delta V}{V} = \pm \left(\frac{\varepsilon_P}{Q} + \frac{P \varepsilon_Q}{Q^2} \right) \frac{Q}{P} = \pm \left(\frac{\varepsilon_P}{P} + \frac{\varepsilon_Q}{Q} \right) = \pm (\delta_P + \delta_Q) \quad (2.14)$$

U strojů s vysokou účinností (80% a více) bychom vyhodnocení provedli s velkou chybou, protože se výkon příkonu velmi blíží. Pak je výhodnější následující nepřímý postup.

Nepřímý postup

Stanovíme příkon Q a ztráty ve stroji Z s přesností ε_Q a ε_Z .

$$V = \eta = \frac{Q - Z}{Q} = 1 - \frac{Z}{Q} \quad (2.15)$$

$$\Delta V = \pm \left(\left| -\frac{\varepsilon_Z}{Q} \right| + \frac{Z}{Q^2} \varepsilon_Q \right) \quad (2.16)$$

$$\delta V = \frac{\Delta V}{V} = \frac{\frac{\varepsilon_Z}{Q} + \frac{Z}{Q^2} \varepsilon_Q}{\frac{P}{Q}} = \frac{\varepsilon_Z}{P} + \frac{Z}{P} \frac{\varepsilon_Q}{Q} = \frac{\varepsilon_Z}{Z} \frac{Z}{P} + \frac{Z}{P} \frac{\varepsilon_Q}{Q} = \frac{Z}{P} (\delta_Z + \delta_Q) \quad (2.17)$$

Tento postup je výhodný pro $Z = \Delta P < P$, tj. od účinnosti 50%. Protože je však zpravidla stanovení dílčích ztrát pracnější, používá se nepřímá metoda až od účinností vyšších.

Chyby měření u digitálních přístrojů

U moderních digitálních přístrojů se chyba měření nejčastěji vyjadřuje ve tvaru

$$\pm (4\% MH + 2D) \quad (2.18)$$

kde je MH ... měřená hodnota
 D ... digit

MH je část chyby, která je proměnná a její velikost závisí na velikosti měřené veličiny, tzn. že např. 4% z 1,00 Ω je 0,04 Ω , ale 4% z 50 Ω jsou 2 Ω .

Digit je číslo na nejméně významném místě displeje (tj. na posledním místě vpravo). Tato část chyby je stálá a připočítává se v celém měřicím rozsahu k proměnné části chyby. Uvažujeme-li např. rozlišovací schopnost ohmmetru 0,01 Ω , odpovídají 2 D hodnotě 0,02 Ω . Při rozlišovací schopnosti ohmmetru 1 Ω by ale 2 D odpovídaly hodnotě 2 Ω .

Jestliže tedy tímto ohmmetrem s již udanou chybou a rozlišovací schopností 0,01 Ω změříme odpor, jehož hodnota bude přesně 1,00 Ω , *absolutní chyba* měření bude

$$\pm (4\% \cdot 1,00 \Omega + 2D) = \pm (0,04 \Omega + 0,02 \Omega) = \pm 0,06 \Omega \quad (2.19)$$

Tento ohmmetr proto může zobrazit hodnotu v rozmezí 0,94 Ω až 1,06 Ω .

Relativní chyba, tj. procentní vyjádření absolutní chyby měření odporu 1,00 Ω je

$$\pm \left(\frac{0,06 \Omega}{1,00 \Omega} \right) \cdot 100\% = \pm 6\% \quad (2.20)$$

Všimněme si ještě jedné věci. Změříme-li stejným přístrojem odpor o velikosti přesně 0,25 Ω a uvedeným postupem opět spočítáme chyby, zjistíme, že absolutní chyba sice klesla na $\pm 0,03 \Omega$, ale relativní chyba naopak vzrostla na $\pm 12\%$.

Relativní chyba měření je tedy tím vyšší, čím nižší je měřená hodnota. Budeme-li měřit „dokonalý zkrat“, tj. odpor 0,00 Ω , bude relativní chyba nekonečně velká.

2. Chyby měření a statistické vyhodnocení

Chyba základní a chyba pracovní

Základní chyby je přístrojem dosahováno za předpokladu, že přístroj je provozován v předepsaných referenčních podmínkách. Veškeré veličiny, které mohou nepříznivě ovlivnit přesnost měření, musí mít předepsanou velikost, resp. se mohou pohybovat jen ve velmi úzkých (stanovených) mezích. Mezi hlavní ovlivňující veličiny obvykle patří okolní teplota, kolísání napájecího napětí apod. Lze říci, že základní chyby přístroje je dosahováno v laboratorních podmínkách.

Pracovní chyby je oproti základní chybě dosahováno v širším rozsahu pracovních teplot, při silnějším rušení apod. Proto pracovní chyba bývá vyšší než chyba základní.

Měřicí rozsah [Ω]	Rozlišovací schopnost [Ω]	Základní chyba	Jmenovitý rozsah [Ω]	Pracovní chyba
0,00 ÷ 9,99	0,01	±(4% z MH +2D)	0,08 ÷ 9,99	±(5% z MH +2D)

Tab. 2.1. Příklad parametrů vzorového ohmmetru

Z uvedené tabulky plyne, že v návodu k použití mohou být uvedeny dva rozsahy. Přístroj je schopen měřit, zobrazovat výsledky měření v měřicím rozsahu. Pracovní relativní chyba měření však nesmí přesáhnout $\pm 30\%$ ¹. Jmenovitý měřicí rozsah je užší ve srovnání s měřicím rozsahem.

$$\begin{aligned} \pm(5\% \cdot 0,08\Omega + 2D) &= \pm(0,004\Omega + 0,02\Omega) = \pm 0,024\Omega \\ \pm \frac{0,024\Omega}{0,08\Omega} \cdot 100\% &= \pm 30\% \end{aligned} \quad (2.21)$$

Je zřejmé, že relativní pracovní chyba měření dosáhla požadovaných $\pm 30\%$ právě při měření odporu 0,08 Ω. V rozsahu 0,00 Ω až 0,07 Ω je pracovní relativní chyba měření mnohem větší.

Nejistota měření

V kalibračních a zkušebních protokolech se musí uvádět² nejistota měření. Nejistota měření je parametr přidružený k výsledku měření, který charakterizuje rozptyl hodnot, které by mohly být důvodně prisuzovány k měřené veličině. Při měření se zpravidla udává tzv. rozšířená nejistota měření U , která se rovná dvojnásobku směrodatné chyby souboru měření, tj.

$$U = 2\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}, \quad (2.22)$$

kde

¹ Stanoveno normou ČSN EN 61557 -4.

² Dle dokumentu EA 4/02.

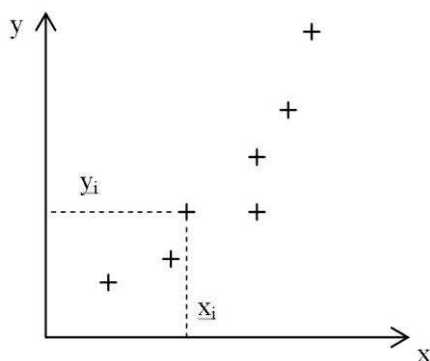
$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.23)$$

je střední hodnota.

Aproximace funkčních závislostí (regresní metody)

Zjednodušující předpoklady:

- sledujeme odezvu y na jediné nezávislé veličině (faktoru) x . (Pokud by se jednalo o více nezávislých proměnných, byla by situace složitější, viz faktorová analýza)
- změřené body $[x_i, y_i]$, kde $i=1, 2, \dots, n$ (uspořádané dvojice) jsou stanoveny s určitou přesností (náhodnou chybou)



Obr. 2.1. Změřené body, které je třeba proložit funkcí (křivkou)

Cíle:

- proložit naměřené body křivkou (grafické zpracování)
- proložit naměřené body křivkou pro účely dalších výpočtů (vstupní hodnoty matematického modelu, náhrada magnetizační charakteristiky)
- hledání funkční závislosti pro matematický popis (model) neznámého objektu (nejobtížnější, vyžaduje zkušenosti, nutná opatrnost).

Nástroje:

- regresní modely

Požadavky:

- vyrovnat rozptyly naměřených hodnot hladkou křivkou
- popsat závislost s minimálním počtem parametrů (koeficientů)
- souhlas s fyzikální skutečností (je-li známa)

- rychlé zpracování
- popis v celém potřebném rozsahu (někdy lze rozdělit na úseky; interpolace je zpravidla bezproblémová, ale extrapolovat se musí opatrně, zvláště u polynomů s vyšším stupněm)

Regresní modely

- lineární model

$$y = \sum a_i f_i(x) \quad (2.24)$$

lineární kombinace jednoduchých křivek, z nichž žádná není funkcí dalšího parametru. Příkladem jsou polynomy.

- nelineární model

$$y = \sum a_i f_i(x, b_i) \quad (2.25)$$

Např. $y = ae^{bx}$ nebo $y = ax^b$ a jiné.

Někdy lze linearizovat vhodnou transformací nebo Taylorovým rozvojem. Příkladem může být funkce

$$y = ae^{bx} \quad (2.26)$$

a logaritmováním máme

$$\ln y = \ln a + bx \quad (2.27)$$

Stanovení parametrů:

- metoda nejmenších čtverců
- metoda maximální věrohodnosti
- jiné metody, např. skupinové

Metoda nejmenších čtverců

Je vhodná pro lineární (nebo linearizované) modely (polynomy). Mějme za úkol stanovit parametry lineární regresní funkce

$$\hat{Y} = a + bX \quad (2.28)$$

To znamená, že musíme najít vzorec pro výpočet úseku a na ose y a směrnici přímky b . Otázka je, jak určit a a b , abychom získali co nejméně rozptýlený soubor vertikálních odchylek d , kde

$$d = Y - \hat{Y} \quad (2.29)$$

Mohli bychom minimalizovat $\sum d$ - součet všech odchylek. Protože však některé body jsou nad přímkou a některé pod přímkou, vzájemně by se odchylky rušily a součet všech odchylek by se blížil nule. Abychom se tomu vyhnuli, můžeme zkusit počítat s absolutními hodnotami odchylek a pak minimalizovat jejich součet

$$\text{minimální } \sum |d| = \sum |Y - \hat{Y}| \quad (2.30)$$

Známější alternativa je však umocnit odchylky a následně minimalizovat součet těchto kvadratických hodnot

2. Chyby měření a statistické vyhodnocení

$$\text{minimální } \sum (d)^2 = \sum (Y - \hat{Y})^2 \quad (2.31)$$

To se nazývá běžná metoda nejmenších čtverců (OSL) a s její pomocí můžeme nalézt vyrovnávací (regresní) přímku (2.32).

Směrnice b se vypočítá dle vztahu

$$b = \frac{\sum (X - \bar{X})(Y - \bar{Y})}{\sum (X - \bar{X})^2} = \frac{\sum xy}{\sum x^2}, \text{ kde je } x = (X - \bar{X}) \text{ a } y = (Y - \bar{Y}) \quad (2.32)$$

kde $\bar{X}$ a $\bar{Y}$ značí aritmetický průměr hodnot. Podle definice udává b sklon (směrnici) přímky. Jedná se o změnu Y v závislosti na změně X . Máme-li vypočteno b , můžeme vypočítat a podle vztahu

$$a = \bar{Y} - b\bar{X} \quad (2.33)$$

Příklad ¹:

V padesátých letech dvacátého století došlo k úniku radioaktivního odpadu ze skládky v Harfordu (stát Washington) do řeky Columbia river. V devíti okrscích níže po proudu ve státě Oregon bylo počítáno vystavení radioaktivitě X (na základě vzdálenosti od Hanfordu a vzdálenosti průměrného obyvatele od řeky apod.). Současně se sledovala úmrtnost na rakovinu Y (úmrť na 100 000 lidí za rok v letech 1959-64) a získané údaje byly následující (Fadeley 1965, via Anderson a Sclove, 1978):

okrsek	radioaktivní vystavení X	úmrtnost na rakovinu Y
Clatsop	8,3	210
Columbia	6,4	180
Cilliam	3,4	130
Hood River	3,8	170
Morrow	2,6	130
Portland	11,6	210
Sherman	1,2	120
Umatilla	2,5	150
Wasco	1,6	140

Pro tyto údaje byly vypočteny následující statistiky:

$$\bar{X}=4,6 \quad \bar{Y}=160 \quad \sum x^2 = 97 \quad \sum y^2 = 9400 \quad \sum xy = 876$$

1. Vypočteme regresní přímku pro předpověď Y v závislosti na X .

Dosazením do vzorce (2.32) dostaneme

$$b = \frac{\sum (X - \bar{X})(Y - \bar{Y})}{\sum (X - \bar{X})^2} = \frac{876}{97} = 9,03, \quad (2.34)$$

a do vzorce (2.33)

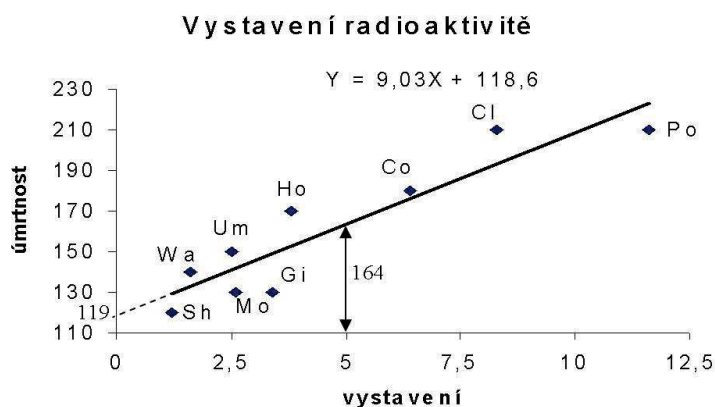
¹ Ale ze všech těchto principů je metoda nejmenších čtverců principem nejzákladnějším. Všechny ostatní nás zavádějí do mnohem komplikovanějších výpočtů. (K.F. Gauss, 1809)

2. Chyby měření a statistické vyhodnocení

$$a = \bar{Y} - b\bar{X} = 160 - 9,03 \cdot 4,6 = 118,6 \quad (2.35)$$

Regresní přímka má proto rovnici

$$\hat{Y} = 118,6 + 9,03X \quad (2.36)$$



2. Odhadneme úmrtnost na rakovinu, jestliže X bylo 5,0 a jestliže $X=0$.

Dosazením do (2.36) přímo vyjde úmrtnost 164, popř. 119 lidí na 100 000 lidí za rok.

Obr. 2.2. Grafické znázornění regresní přímky

Otázky k tématu:



- Jakou třídu přesnosti zpravidla mívají provozní přístroje?
- Pro elektrické stroje je přesnější metodou pro stanovení účinnosti metoda přímá nebo nepřímá?
- Lze při použití metody nejmenších čtverců použít místo matematické operace umocňování raději absolutní hodnotu?



Správné odpovědi

- Jakou třídu přesnosti zpravidla mívají provozní přístroje?

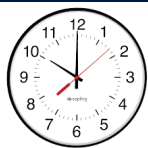
Třídy přesnosti 0,5-1-2,5.

- Pro elektrické stroje je přesnější metodou pro stanovení účinnosti metoda přímá nebo nepřímá?

Přesnější, ale také pracnější, je metoda nepřímá. Elektrické stroje mají obecně vysokou účinnost. Přímou metodou bychom se dopustili velké chyby.

- Lze při použití metody nejmenších čtverců použít místo matematické operace umocňování raději absolutní hodnotu?

Ano, lze. Jde v principu o to, aby se kladné a záporné odchylky nevyrušily. Procesoru však trvá určení absolutní hodnoty déle než umocnění, což je výhodné ve velkých souborech dat pro úsporu výpočetního času.



Předpokládaný čas: 60 min



Po prostudování tématu budete:

- Umět formulovat požadavky na měření
 - Mít přehled o základních vlastnostech analogových a digitálních přístrojů
 - Znat princip snímače LEM
 - Znat základní výhody a nevýhody digitálních přístrojů
-

3. Měřený objekt, metody, přístroje

Měřený objekt předurčuje použitelné měřicí metody a přístroje. Předpokladem úspěchu při výběru měřicí metody a při vlastním měření je znalost technické problematiky a cenových relací.

Požadavky na měření – technické zadání

- formulace cíle
- technické požadavky (výběr měřených veličin, jejich závislostí, měření ustálených nebo přechodových stavů, četnost měření, podmínky měření, přesnost)
- časové termíny
- účel měření
- cenový limit

Měřicí metody

- přímé – měření a výpočet podle definičních vztahů (např. $\eta = \frac{P}{P_p}$)
- nepřímé – použití jiného postupu, znalost jiných veličin (např. $\eta = 1 - \frac{\Delta P}{P_p}$)

Jiné členění měřících metod

- Absolutní. Používají se výjimečně. Poskytují absolutní (prostou) hodnotu. Jsou zpravidla cennější, ale též náročnější.

3. Měření objekt, metody, přístroje

- Relativní. Obdržíme pouze poměrné hodnoty. Metody jsou to jednodušší a též méně nákladné, proto se převážně používají. Měřicí přístroj se srovnává s normálem, absolutním měřičem.
- Můstkové. Jsou zvláštním případem relativních metod. Přesnost je silně závislá na vztažné veličině. Při porovnávání s normálem (etalonem) měřené veličiny lze získat prakticky „absolutní“ hodnoty měřené veličiny.

Metody měření

- dotykové (teplota)
- bezdotykové (laser, infračervené záření, klešťový A-metr)
- destrukční (trhací zkouška, průrazné napětí)

Volba měřící metody závisí na

- požadavcích (počet veličin, čidel, četnost měření, přesnost, účel atd.)
- znalostech a zkušenostech, místních zvyklostech
- měřících přístrojích, které jsou k dispozici

Měřicí přístroje

a) klasické analogové

Magnetoelektrické (Deprézské) přístroje jsou nejpřesnější elektromechanické přístroje (třída přesnosti až 0,1). Měří napětí od 10^{-7} V (galvanometry) až do 1kV. Rozsah se mění předřadným rezistorem. Frekvenční rozsah je 20Hz – 20kHz, ale je to v horší třídě přesnosti (vliv usměrňovače). S usměrňovačem měří střední hodnotu, stupnici však mají kalibrovánu v efektivních hodnotách, platných pouze pro harmonický signál. S termočlánkem měří efektivní hodnotu bez ohledu na časový průběh a mají i větší frekvenční rozsah, než s usměrňovačem.

Elektromagnetické voltmetry se používají jako přesné laboratorní přístroje. Dříve se označovaly jako feromagnetické přístroje. Měří ss i st signál, protože nerozlišují polaritu. Ideální systém by měřil efektivní hodnotu bez ohledu na frekvenci a tvar průběhu měřené veličiny. Ve skutečnosti se projevuje vliv změny indukčnosti a vířivých proudů, takže údaj na frekvenci závisí. Nelineární (kvadratickou) stupnici lze v části linearizovat úpravou systému. Oproti magnetoelektrickým mají větší spotřebu. Pokud nejsou stíněny, jejich údaj je snadno ovlivnitelný cizím mag. polem.

Elektrodynamické voltmetry mají třídu přesnosti až 0,1 ve frekvenčním rozsahu 40Hz-5kHz. Měří efektivní hodnotu. Lze je kalibrovat ss proudem. Mají vysokou vlastní spotřebu. V sériovém zapojení obou měřících cívek se dříve používaly jako A-metry a V-metry. Dnes se používají převážně jako wattmetry. Pevná cívka je proudová, otočná napěťová.

Ferodynamické voltmetry se používají jako rozvaděčové přístroje, odolné proti otřesům. Měří efektivní hodnotu. Třída přesnosti 1,5 – 2,5. Frekvenční rozsah je

3. Měření objekt, metody, přístroje

velice úzký, 40-60Hz. Vzhledem k hysterezi magnetického obvodu je nelze použít na měření ss napětí.

Elektrostatické voltmetry měří efektivní hodnotu. Používají se pro měření vysokých napětí.

Tepelné voltmetry měří efektivní hodnotu. Mají velkou časovou konstantu, proto nemohou sledovat rychlé změny měřené veličiny.

Značky ústrojí měřících přístrojů



magnetoelektrické



magnetoelektrické s
usměrňovačem



magnetoelektrické s
termočlánkem



magnetoelektrické
poměrové



feromagnetické



feromagnetické
poměrové



tepelné s drátem



tepelné s dvojkovem



elektrodynamické



elektrodynamické
stíněné



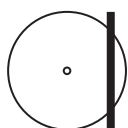
elektrodynamické
poměrové



ferodynamické



ferodynamické
poměrové



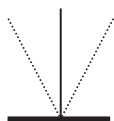
indukční



indukční
poměrové



elektrostatické



vibrační



elektrostatické stínění

3. Měření objekt, metody, přístroje

Pro galvanické oddělení a snížení napětí na normalizovaných 100V se používají měřicí transformátory napětí. Do jejich sekundárních obvodů se zapojují paralelně voltmetry, napěťové cívky wattmetrů, převodníky napětí, popř. se z nich odebírá signál, např. k synchronizaci stroboskopu pro měření skluzu AM apod.

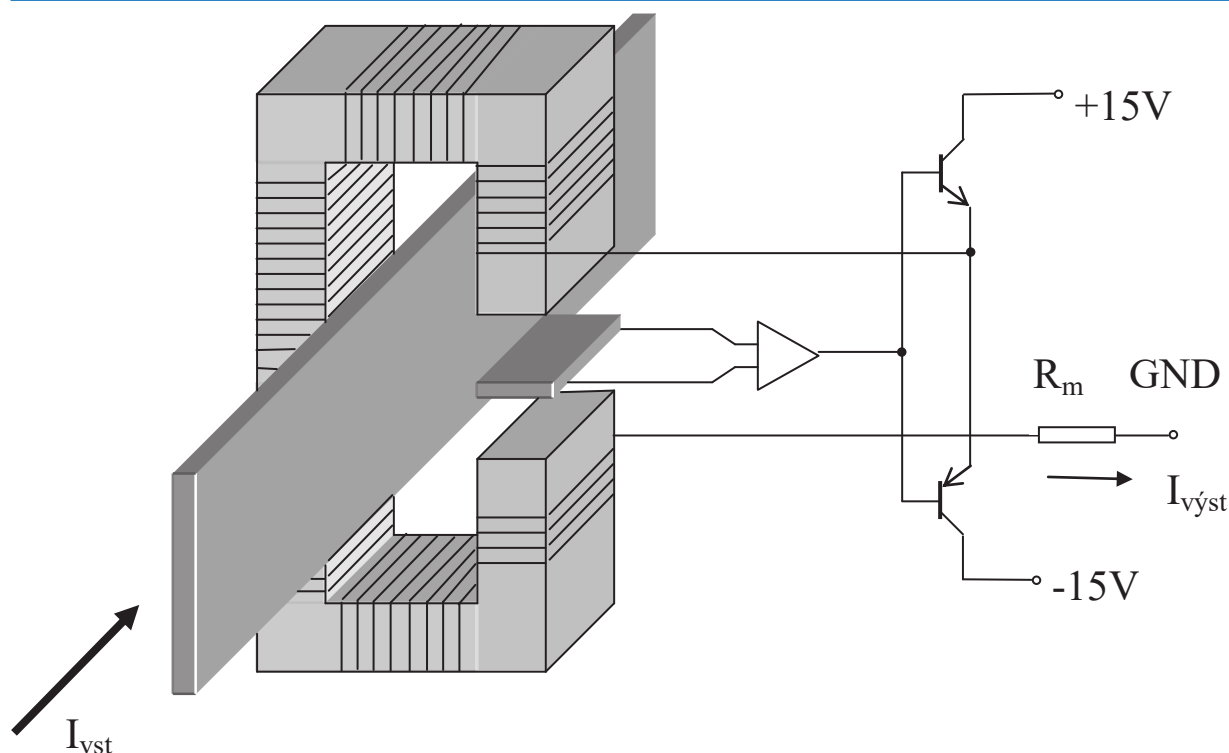
Pokud se při měření proudu rozsah rozšiřuje pomocí bočníku, stoupá spotřeba. Při měření st proudů může být přímo v přístroji měřicí transformátor proudu až do 50A. Velké střídavé proudy se měří pomocí samostatných přístrojů - proudových transformátorů. Jejich výstup je normalizován zpravidla na 5A. Při zatížení nesmí dojít k rozpojení sekundárního obvodu (např. při výměně přístrojů). Pokud jsou však transformátory bezpečně odpojeny od zátěže, mohou být připojeny na napětí, aniž by došlo k jejich destrukci při rozpojení sekundárním obvodu. Sekundární obvody transformátorů proudu i napětí se uzemňují.

Měření proudu elektronickými a digitálními přístroji je založeno na měření úbytku napětí na přesném bezindukčním odporu.

Velmi malé proudy lze měřit galvanometry, které mají proudovou konstantu asi $10^{-11} \text{ A} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ a napěťovou $10^{-8} \text{ V} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$. Měření ještě menších proudů se provádí elektrometry, nepřímou metodou (napětí na vysokoohmovém odporu, náboj na známé kapacitě). Měření úbytku napětí na odporu používají též digitální pikoampérmetry.

Velmi velké ss proudy se měří pomocí sběrnicových bočniců. Nevýhodou je jejich teplotní závislost a skutečnost, že je nelze vždy umístit na bezpečné napětí. Dále je třeba zajistit co nejmenší plochu smyčky, tvořenou přívody k měřidlu, kvůli rušivému indukovanému napětí (zkroucení vodičů). Je snaha o galvanické oddělení měřidla, např. použitím Hallových sond.

K měření proudů v rozsazích od 5A do 500kA je velmi výhodné použít tzv. LEM moduly, nazývané též LEM – čidla. Princip je znázorněn na obrázku. Vstupní proud je veden příslušně dimenzovaným vodičem, který prochází magnetickým obvodem. Tento vodič tvoří primární vinutí. Sekundární vinutí je protékáno proudem, který je spínán tranzistorem. Tranzistory přijímají signál z Hallové sondy a jsou řízeny tak, aby sekundární proud vytvořil magnetický tok, který kompenzuje tok způsobený proudem primárním. Tento sekundární proud je zároveň výstupním proudem. Kde je potřeba mít jako výstupní veličinu napětí, lze měřit napěťový úbytek na přesném odporu. Tyto moduly měří stejnosměrné, střídavé i pulzní průběhy, galvanicky oddělují výstupní signál, mají vysokou přetěžitelnost, přesnost a citlivost. Mezní kmitočet je asi 150kHz, di/dt je až 50A/ μs . Modul je konstruován (mimo nejmenších typů) jako průvlekový, tzn. že pokud u 100A-ového modulu použijeme dva závity (průvleky) primárního vodiče, obdržíme na výstupu plné napětí při 50A, podle zákona celkového proudu.



Obr. 3.1. Princip LEM modulu

Mezi další klasické přístroje patří např. analogové osciloskopy, oscilografy, měřící magnetofony elektronické voltmetry.

Elektronické voltmetry mají kromě (magnetoelektrického) ručkového přístroje navíc vstupní obvody a zesilovače signálu, takže jejich vstupní odpor je vysoký. Je možné filtrovat nežádoucí frekvence a tak se dělí na nf a vf přístroje. V současné době se nahrazují digitálními přístroji.

Analogové osciloskopy mají většinou dva (ale též až 6) vstupní kanály. Vzhledem k dnešním digitálním osciloskopům mají mnohá omezení. Obrazovka s dlouhým dosvitem je např. nahrazována pamětí u digitálních přístrojů.

Měřící magnetofony slouží k zachycení přechodového děje a jeho pozdější vyhodnocení. Musí mít široký frekvenční rozsah a jsou zpravidla vícestopé. Pro měření v terénu mají vestavěny akumulátory. Dnes se nahrazují číslicovými záznamníky, popř. lze měření přímo provést na digitálním přístroji a data pak uložit na paměťové médium (HDD, disketa, zip mechanika, CD ROM apod.).

b) Číslicové (digitální) přístroje

Sem patří např. digitální voltmetry, multimetry, číslicové záznamníky, PC zásuvné karty, osciloskopy, frekvenční analyzátory, číslicové wattmetry apod. Profesionální systémy umožňují na jednom kanále měřit napětí až 1kV a na sousedícím kanále např. zpracovávat signál z piezoelektrického akcelometru.

Digitální multimetr obsahuje zpravidla kvalitní voltmetr a různé přizpůsobovací převodníky pro měření nejrůznějších veličin, elektrických i neelektrických. Multimetry mohou být kapesního i stolního provedení, s přesností několika procent, ale i více než 7 místný displej. Rozsahy jsou od několika pA až do jednotek kV, (ss i st) dle typu a účelu použití. Vyšší moderní typy mají zpravidla konektor pro komunikaci s PC.

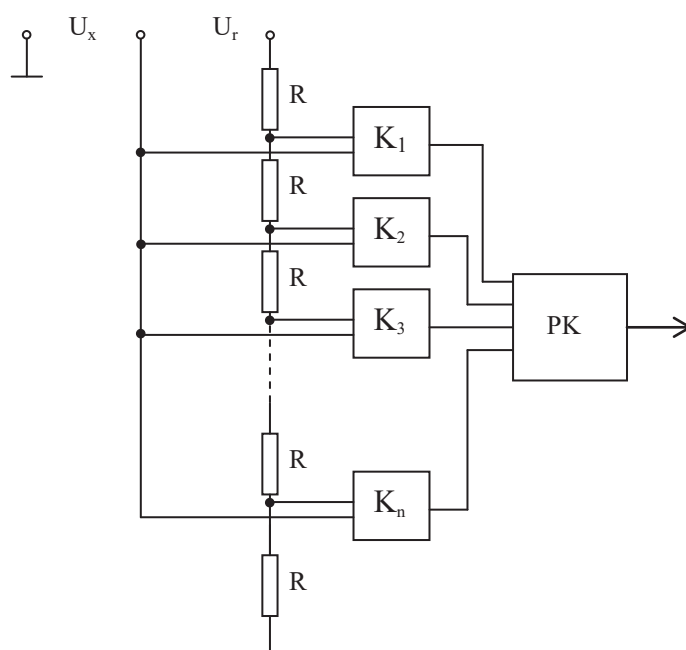
Vysokorychlostní zapisovač (streamer) umožňuje kontinuální záznam a ukládání dat po dlouhou dobu. Během záznamu zpravidla nelze změnit vzorkovací kmitočet. Systém zpravidla není vybaven trigovací logikou. Tok zapisovaných dat může být až desítky MSa/s.

Transientní zapisovače jsou určeny pro krátký záznam s extrémně vysokým vzorkovacím kmitočtem. Pro zahájení měření a záznam požadovaného přechodového děje jsou vybaveny (někdy i dost složitým) trigovacím zařízením (např.. funkce OR, AND, XOR,...).

Kombinované systémy pro záznam různých signálů mohou synchronně ukládat a při dostatečně výkonném HW i ON-LINE zpracovávat digitální a analogové signály, mohou analyzovat tok dat na CAN sběrnici, vyhodnocovat GPS, pořizovat videosnímky atd.

Digitální voltmetry umožňují velice rychlá a přesná měření. Data je možné dále zpracovávat pomocí dalších obvodů, přenášet do PC apod. Postupně vytlačují (až na výjimky) výše uvedené typy analogových měřících systémů.

Základem číslicových voltmetrů je A/D převodník. Dále sem patří další, víceméně samostatné části, jako je např. přepínač rozsahů, přepínač rychlosti vzorkování, display, paměť, obvody pro přenos dat do nadřazených přístrojů apod.



Obr. 3.2. Princip paralelního kompenzačního analogově-číslicového převodníku.

Základním prvkem analogově číslicového převodníku naznačeného typu je odporový dělič, složený ze stejných přesných rezistorů. Dělič je napájen stabilním referenčním napětím, které odpovídá pracovnímu rozsahu převodníku. Měřené napětí je současně porovnáváno v komparátorech K_i . Je-li měřené napětí větší, než napětí přiváděné do komparátoru z odporového děliče, komparátor dává signál. Signály se v převodníku kódu převedou na vhodný číslicový kód. Ten se pak dále zpracovává.

Rychlost vzorkování je zpravidla do 5kHz. Je omezena dobou převodu analogové hodnoty na digitální, tj. rychlostí převodníku. Podle překlopení komparátorů se analogová hodnota převede na digitální. Rychlost převodu tedy závisí na rychlosti ustálení operačních zesilovačů, které tvoří jednotlivé komparátory. Např. 12bitový převodník má možnost nabývat $2^{12}=4096$ různých hodnot. S tím souvisí rozlišitelnost.

Rozlišitelnost

Pokud máme např. 4místný displej, je maximální zobrazitelná hodnota 10 000 (9999), minimální je 1. Pak je rozlišitelnost $1:10^4 = 0,01\%$. Někdy může tomuto displeji na prvním místě předcházet zobrazitelná pouze číslice 1. Pak hovoříme o $4^{1/2}$ místném displeji. Pokud je první zobrazitelná číslice max. 4, pak se jedná o $4^{3/4}$ místný displej.

Přesnost

Přesnost je největší přípustná odchylka při měření etalonového napětí. Je to součet chyby měřené hodnoty a rozlišitelnosti. Mějme např. 4místný voltmetr s údaji $\pm (0,02\% + 1 \text{ digit}) = \pm (0,02\% + 0,01\%)$.

3. Měření objekt, metody, přístroje

Při měření 3V na rozsahu 10V bude chyba $\pm (3 \times 0,0002 + 10 \times 0,0001) = 0,0016V$.

Citlivost

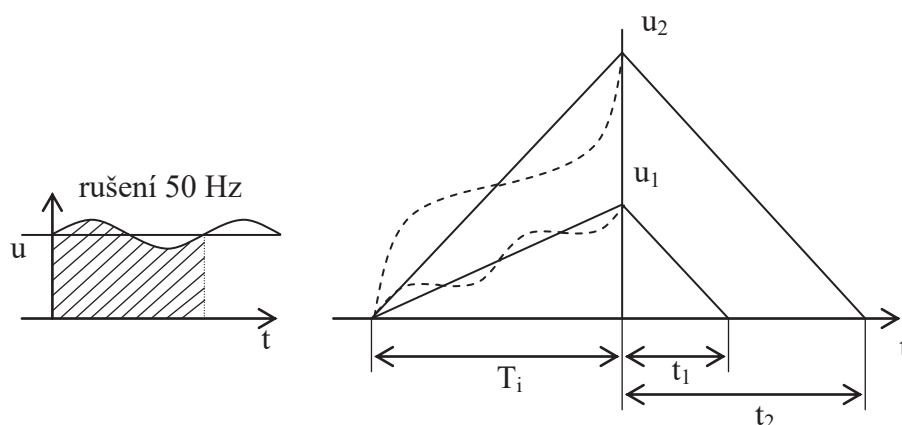
Jde o rozlišitelnost na nejmenším rozsahu. Např. při rozlišitelnosti 0,01% na rozsahu 100mV je citlivost 10μV.

Potlačení rušení

K potlačení rušení lze s výhodou využít vlastností operačních zesilovačů v integračním zapojení. Integrační převodníky měří střední hodnotu napětí U_x za dobu T_i . Tím se potlačí účinek superponovaných střídavých rušivých napětí. Jejich perioda je

$$T_r = \frac{1}{n} T_i, \quad (3.1)$$

kde n je celé kladné číslo. Měřicí interval T_i je řízen přesným generátorem.



Obr. 3.3 Princip odstranění rušení integrací po dobu jedné periody. Metoda dvojité integrace

Doba t_1 (t_2) je úměrná napětí. Vybíjení je totiž prováděno konstantním proudem ze zdroje referenčního napětí. Pak se použije napětově-časový převodník. Tato metoda však selže, jestliže je rušení způsobeno jinou frekvencí, která není násobkem síťového kmitočtu.

Při měření střídavých napětí neharmonických průběhů musíme věnovat pozornost principu, jaký přístroj používá k měření. Některé systémy měří z principu hodnotu střední, cejchovány jsou však v hodnotách efektivních, platných pouze pro harmonický signál. Tyto digitální přístroje jsou označeny zkratkou RMS. Platí následující vztahy:

$$U_{ef} = \frac{U_{\max}}{\sqrt{2}}, \quad U_{stř} = \frac{2}{\pi} U_{\max}. \quad (3.2)$$

Proto je
$$RMS = U_{stř} \cdot \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = U_{stř} \cdot 1,11. \quad (3.3)$$

Měření skutečné efektivní hodnoty obecných signálů je obtížnější. Přístroje, které její výpočet provádějí na základě definice

$$U_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sin^2 x dx} \quad (3.4)$$

jsou označovány zkratkou TRMS (True RMS). Pak je jejich údaj správný pro jakýkoliv obecný průběh (např. obvody s výkonovou elektronikou).

U přístroje by měl být též údaj o činiteli zkreslení, pro který ještě platí výrobcem zaručená přesnost přístroje.

Přednosti digitálních přístrojů

- Vyšší dosažitelná přesnost
- absolutní přesnost v odečítání naměřených hodnot
- snadné uchování dat (databáze)
- vyšší rychlost měření

Větší náchylnost na rušení se řeší

- metodou dvojité integrace
- vnitřním plovoucím stíněním (svorka G)
- filtrací, případně průměrováním

Měřicí systémy řízené počítačem

Při současném stupni vývoje moderní výpočetní techniky je možné každý experiment provádět pomocí mikrokontrolérů, PC apod. Podle nároků konkrétní aplikace lze vybrat přiměřený HW a SW. S ohledem na finanční náročnost však zřejmě ještě dlouhou dobu budou existovat aplikace prováděné klasickým způsobem.

Základní části

- počítač (CPU, řadič, operační paměť, vstupně-výstupní zařízení)
- periferie (klávesnice, displej-TFT, terminál, paměťová média, tiskárny, souřadnicové zapisovače, plotr)
- kvalitní voltmetr
- přepínač kanálů (multiplexer) polovodičový - max. 10V
reléový – měřicí – zpravidla 3pólový H-L-G, 200V/500mA,
až 1000 přepnutí za sec.
- akční (řídící) - 2pólové, menší přepínací rychlost, 2A
- univerzální čítač nebo časový generátor, měří reálný čas po dobu zkoušky.
- číslicový osciloskop

- frekvenční analyzátor
- a případně další speciální výbava dle konkrétních požadavků aplikace.

Režim spolupráce periférií s počítačem

- korespondenční - periferní zařízení je zpravidla pomalejší, procesor vyšle výzvu a čeká na data
- přerušení V/V (interrupt I/O) – pro systémy pracující v reálném čase
- přímý vstup do paměti (Direct Memory Access)



Obr. 3.4. Příklady externích přístrojů

Způsoby styku, komunikační rozhraní

Sériový přenos

Zaměříme se na oblast sériové komunikace na pevných privátních linkách, v sítích lokálně ohraničených kabely v délce do několika kilometrů, s přenosovou rychlostí maximálně stovky kb/s. Odstavec má poskytnout základní informace pro návrh komunikačního systému přiměřeně odolného vůči rušivým elektromagnetickým polím a to z pohledu spolehlivosti přenosu dat a ochrany koncových zařízení přenosu dat. U vybraných sériových rozhraní budeme posuzovat, jaký vliv na ně mají délka vedení, rozdíl potenciálů nulových vodičů u koncových zařízení a rušení.

Přitom si budeme všimnout jevů popsanych v následujících bodech.

1. S délkou kabelu roste jeho odpor a kapacita, které omezují maximální přenosovou rychlost. Útlum kabelu má rovněž vliv na maximální překlenutelnou délku kabelu.
2. S růstem délky kabelu roste pravděpodobnost rušení, která se budou indukovat do vedení a tím zvyšovat chybovost přenosu.

3. Rozdíl potenciálů nulových vodičů u dvou koncových zařízení vzdálených desítky, stovky až tisíce metrů může být větší než u zařízení napájených z téhož zásuvkového okruhu. Rozdíl potenciálů může vést k chybnému vyhodnocení přijímaného signálu. Vlivem vyrovnávacích proudů v různých okruzích může rozdíl potenciálů nulových vodičů nabývat nežádoucích hodnot jen krátkodobě a způsobovat jen občasné „nevysvětlitelné“ poruchy v přenosu.
4. Pokud některým z nulových vodičů protéká proud vzniklý poruchou třetího zařízení, pak po dobu, než zareagují ochrany, může rozdíl potenciálů nulových vodičů překročit přípustné hodnoty a zničit koncová zařízení.
5. Na vedení se mohou vyskytnout impulsy, které zničí koncová zařízení, i z jiných důvodů, zejména indukci ze souběžných silových vedení a statická elektřina,
6. Vedení je vystaveno vlivům atmosférické elektřiny, které zničí koncová zařízení.

Rozhraní RS232 (V.28)

Toto rozhraní v asynchronním provedení je implementováno na každém IBM-PC kompatibilním zařízení a na značném množství periférií k nim připojovaných.

Jedná se o rozhraní s nesymetrickými dvouproudovými signály. Zátěž by měla mít impedanci 3-7 k Ω , kapacita do 2500pF. Zátěž by neměla být induktivní povahy.

Tyto parametry dávají omezení:

ad 1) typická kroucená dvojlinka vykazuje kapacitu 2500pF na délce cca 50m

ad2) vysoká impedance zátěže (3-7 k Ω) umožňuje naindukovat nežádoucí rušivé impulsy i od relativně měkkých zdrojů, ad 3) asymetrie signálů nemůže eliminovat vliv rozdílu potenciálu nulových vodičů ani při striktním dodržování doporučených úrovní vysílaného a hlavně přijímaného signálu (ze zkušeností víme, že často nejsou dodržovány, zejména pak nebývá dodržováno zakázané pásmo od -3V do +3V), ad4-6) přepětí nad +(-)15V může způsobit destrukci obvodů.

V každém případě se doporučuje použít stíněný kabel a věnovat pozornost způsobu provedení signálové země a země zařízení (v plné specifikaci RS232 jsou to dva samostatné vodiče). Tyto důvody vedou ke stanovení rozumné maximální délky kabelu 15m. Pokud nastanou problémy podle bodů 3-5, řešíme je pomocí skupiny výrobků zvaných ISOLER.

Rozhraní RS422 (V.11)

Pro přenos dat na větší vzdálenosti se používá rozhraní RS422 a RS485. V obou případech jde o provedení v podstatě o diferenciální proudovou smyčku, kde datové stavy vyjadřuje směr tekoucího proudu. Podle specifikace je dosah těchto rozhraní 1200 metrů a přenosová rychlost 10Mb/s. Toho se dosahuje na vedení realizovaného stíněnou kroucenou dvojlinkou (u RS422 na dvoj páru) se zakončovacími odpory 120 Ω na obou koncích vedení. Použití při nižších rychlostech bývá nutné zejména na delších kabelech, než dovoluje RS232.

U rozhraní RS422 jde o propojení jednoho vysílače až s 10 přijímači na jedné lince a na druhé lince je až 10 vysílačů připojeno na jeden přijímač (jsou od sebe oddělena vysílaná a přijímaná data, řídicí signály u rozhraní RS422 nejsou). Pokud se takto propojí pouze dvě zařízení, není ani nutný speciální obslužný software, což v praxi umožňuje převod signálů RxD a TxD z rozhraní RS232 na signály rozhraní RS422, a tím zvětšit dosah rozhraní RS232. Je-li požadavek převést z RS232 na RS422 i další řídicí kanály, musí se použít vícekanálový převodník RS232<->RS422, tím ale narůstá počet párů vodičů. Je-li na jednu linku připojeno více vysílačů, musí se jejich přístup na linku řídit (hardwarem nebo softwarem). Jeho nejpodstatnějším rysem je symetrie signálů.

ad 1) nízká impedance vysílače výrazně eliminuje vliv kapacity a odporu vedení na dosažitelnou rychlost přenosu, ad 2) symetrie signálů spolu s nízkou impedancí vysílače dává vyšší odolnost vůči rušivým impulsům, ad 3) symetrie signálů dává vyšší odolnost vůči rozdílu potenciálů nulových vodičů, ad 4-6) společné napětí na přijímači (posuv nulových vodičů + naindukované rušivé šumové napětí) nemá přesáhnout 7V, proti vlivům atmosférické elektřiny je nutná doplňková ochrana. Pokud vysílač i přijímač převodníku pracuje v pasivním (P) režimu, nepotřebuje převodník externí zdroj.

V podmínkách překračujících bod 4-5 je nutné galvanické oddělení linky od koncového zařízení. V případě možného vlivu atmosférické elektřiny musí být vedení opatřeno příslušně dimenzovanou přepětovou ochranou.

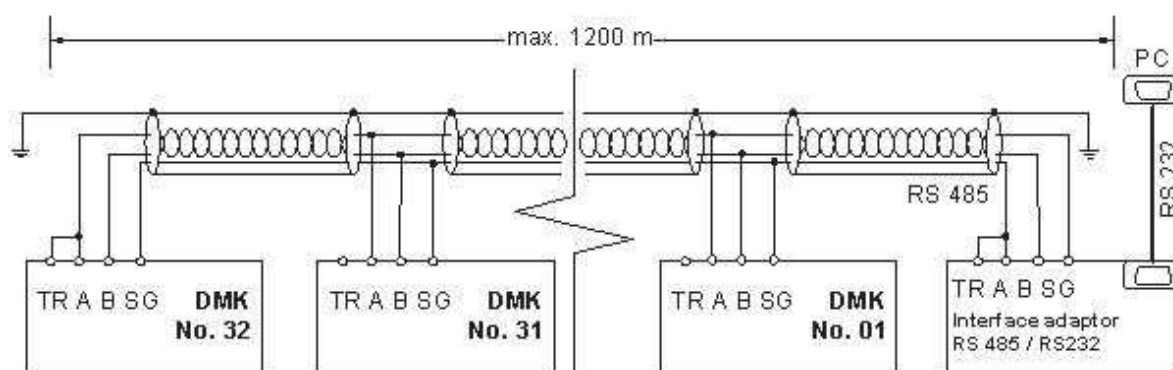
Rozhraní RS485

Je to rozhraní pro sběrníkové (vícebodové) spojení koncových zařízení. Elektrické parametry vysílače a přijímače jsou v podstatě shodné s RS422 a body 1-5 předchozího odstavce se na ně vztahují stejně.

Rozhraní umožňuje sdílet jedno vedení více účastníky a je proto oblíbeno zejména v automatizační technice, kde je potřeba komunikovat malými rychlostmi (do 19,2kb/s) na vzdálenost řádu kilometrů. Přijímače mají vysokou impedanci, takže na jednom vedení (dvoudrát) může být až 32 koncových zařízení, z nichž v daném časovém okamžiku nanejvýš jeden vysílá a ostatní přijímají. Synchronizaci v síti (maximálně jeden smí vysílat) zajišťuje komunikační protokol. Řídicí signály u rozhraní RS485 nejsou. Vysílač je ovládán z koncového zařízení buď povolovacím signálem, nebo automaticky od vysílaných dat.

Přenosovou linku lze prodloužit pomocí repeateru RS485. Podobně je možné zvýšit maximální počet účastníků.

Každé zařízení může být řídicím zařízením (MASTER). Vedení je společné pro vysílaná i přijímaná data. Aby nedocházelo ke kolizi dat na lince, musí být v každém případě použito řízení ovládání přístupu na linku (HW nebo SW řešení). Při převodu signálů z rozhraní RS232 na rozhraní RS485 se nabízí použít k řízení aktivity vysílačů některý z řídicích signálů RS232 (RTS nebo DTR řízené uživatelským softwarem) nebo použít převodník RS232<->RS485 s automatickou aktivací vysílače.



Obr. 3.5. Sběrnice RS 485 a připojení přístrojů pro přenos dat

Rozhraní „proudová smyčka“

Je to historicky nejstarší dosud využívané sériové rozhraní zděděné z dálkopisné techniky (často se označuje jako TTY). Dnes nachází nejčastější využití v terminálových sítích. Používají se dva stavy: v jednom (klidovém) teče proud 20, 40 nebo 60mA a v druhém proud neteče. Proto je velice odolná proti rušení. Převod je relativně jednoduchý a dosah se zvýší řádově na stovky metrů a komunikační rychlost zůstane zachována.

ad 1) negativní vliv kapacity a odporu vedení na dosažitelnou rychlost přenosu je výrazně větší než u RS422, takže nejčastější aplikace používají proud 20mA, rychlost 19,2kb/s na vzdálenosti kolem 1km; použitím vyššího proudu se vzdálenost zkracuje, ad 2) asymetrie signálu zajišťuje větší odolnost vůči rušivým impulsům ve stavu protékajícího proudu než ve stavu s nulovým proudem, ad 3-6) rozhraní samo o sobě nedává odolnost vůči rozdílu potenciálů nulových vodičů, proto se takřka výhradně používá ve spojení s galvanickým oddělením smyčky od koncového zařízení, proti vlivům atmosférické elektřiny je nutná doplňková ochrana.

Proudové smyčky se od sebe liší provedením vysílačů a přijímačů. Mohou být aktivní nebo pasivní, přímé nebo galvanicky oddělené. Galvanické oddělení může být i tím hlavním důvodem, který vede k použití proudové smyčky. Vedení proudové smyčky se realizuje velmi jednoduše, v minimálním případě stačí čtyři vodiče, které ani nemusí být zkrouceny (ve většině případů stejně budou, použijeme-li sériově vyráběný kabel). Propojuje se vzájemně vždy jeden vysílač s jedním přijímačem a to v kombinaci aktivní vysílač - pasivní přijímač nebo pasivní vysílač - aktivní přijímač.

Nejrozšířenější typy průmyslových sběrnic se sériovým přenosem dat

Publikované marketingové studie jednoznačně potvrzují prudký růst ročně instalovaných systémů na bázi průmyslových sběrnic. Vedle dále uvedených (dnes nejrozšířenějších) průmyslových sběrnic existuje mnoho dalších, např. HART, ControlNet, ARCNet, Seriplex, Foundation Fieldbus H1 aH2 aj. Často se používá

též FireWire nebo USB, zejména pro přenos dat z mobilních autonomních přístrojů do počítače.

Nejpoužívanější průmyslové sběrnice

Profibus

P – NET

FIP

DIN – Messbus

CAN- bus (Controller Area Network)

Interbus – S

Další používaná přenosová média

1) Internet

Internet je fenomén dnešní doby, který výrazným způsobem ovlivňuje tok informací. Proto již mnohé firmy používají tohoto média k mnohým účelům, mimo jiné i k řízení a monitorování technologických procesů.

2) Energetická rozvodná síť

V dnešní době je již samozřejmostí vysílání signálů HDO (hromadné dálkové ovládání, zejména akumulčních spotřebičů u maloodběratelů) po rozvodné síti. K těmto signálům patří i signály pro ovládání varovného systému v blízkosti jaderných elektráren. V poslední době se po rozvodné síti vysílají také např. naměřená data z elektronických elektroměrů. Příkladem takových elektroměrů je výrobek ENERMET. Základním prvkem je zákaznický integrovaný obvod, zahrnující všechny funkce. Mimo pulzního výstupu pro krokový motor má tento obvod také výstup pro testovací účely a dálkovou komunikaci. Jde o maximálně přesné a spolehlivé přístroje (poruchovost 0,075%), protože nedochází k mechanickému pohybu. Lze získat i odběrové diagramy jednotlivých zákazníků. Výhodou je také vícenásobný tarif.

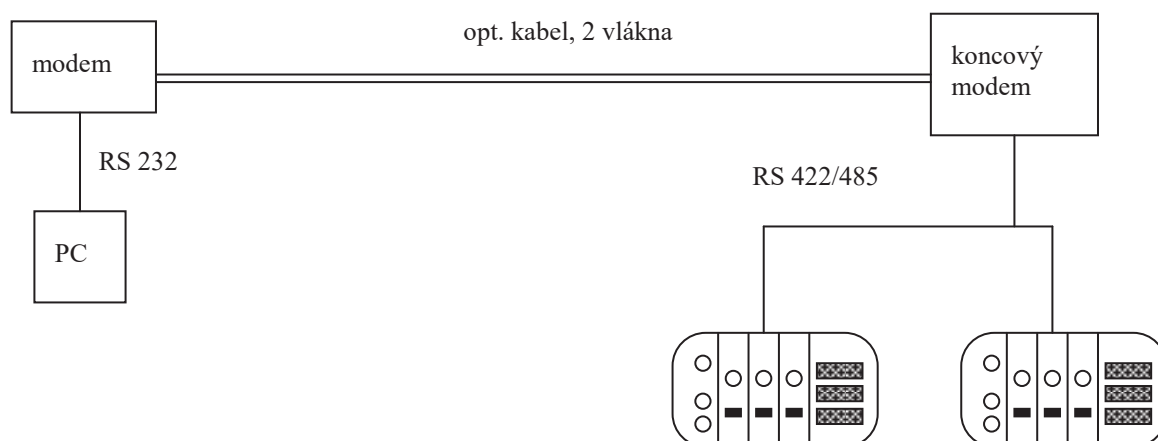
Pomocí „silových modemů“ lze energetickou síť použít pro přenos dat i pro jiná zařízení.

3) Optické kabely

Kromě komunikací a počítačových sítí se optické kabely stále ve větší míře používají také v průmyslu. Zde jsou sice převážně malé objemy dat, přenášené asynchronními protokoly, ale optické kabely mají jiné výhody. Je to téměř úplná imunita proti elektromagnetickému rušení, absolutní galvanické oddělení i pro vysoká napětí, kabely je možno položit prakticky kamkoliv bez nebezpečí vzájemného ovlivňování. Nelze je „odposlouchávat“. Cena optického kabelu se v současné době již přibližuje ceně kvalitního metalického kabelu. Další výhodou je maximální vzdálenost při dané přenosové rychlosti. Lze dosáhnout 10x větší

3. Měřený objekt, metody, přístroje

vzdálenosti (12km) při 15x vyšší rychlosti přenosu (1,5Mbit/s), než u metalického vedení a protokolu RS 422/485. Nejčastější aplikace je překlenutí prostoru s vysokou hladinou rušení nebo přenos na větší vzdálenost při vyšších rychlostech. Optické kabely se např. integrují do zemnicích lan vedení vvn. S minimálními náklady na pořízení trasy tak vznikají informační dálnice.



Obr. 3.6. Spojení bod-bod

4) Telefonní síť, GSM

Pomocí modemu (modulátor – demodulátor) lze uskutečnit přenos dat na velké vzdálenosti po telefonní síti. Rychlost přenosu je závislá na kvalitě linky. Obvykle modem postupně rychlost přenosu zvyšuje, až do určitého počtu chyb za jednotku času. Pokud při konstantní přenosové rychlosti počet chyb stoupá, modem snižuje rychlost přenosu. Lze též použít postup opačný. Modem začíná na nejvyšší přenosové rychlosti a přenosovou rychlost snižuje, až se protější strana úspěšně zúčastní přenosu.



Otázky k tématu:

- *Jaké jsou metody měření?*
- *Lze použít magnetoelektrický přístroj také pro měření střídavých veličin?*
- *Je výstup snímač proudu typu LEM galvanicky oddělen od silového obvodu?*



Správné odpovědi

- *Jaké jsou metody měření?*

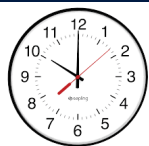
Metody dotykové a bezdotykové.

- *Lze použít magnetoelektrický přístroj také pro měření střídavých veličin?*

Ano, ale musí být vybaven usměrňovačem polovodičovým nebo termoelektrickým.

- *Je výstup snímač proudu typu LEM galvanicky oddělen od silového obvodu?*

Ano, výstupy snímače LEM jsou galvanicky oddělené.



Předpokládaný čas: 60 min



Po prostudování tématu budete:

- Umět popsat druhy snímačů teploty vhodné pro elektrické stroje a jejich principy
- Znat snímače tlaku, hladiny a průtoků, jejich použití
- Vědět možnosti měření rychlosti, zrychlení a polohy rotoru stroje
- Znat principy měření chvění elektrického stroje
- Znat metody potlačení rušení a použití oddělovacího transformátoru

4. Měření neelektrických veličin, čidla, převodníky, rušivé vlivy

V současné době je elektřina všudypřítomná, i když ji přímo nepotřebujeme. Mnohdy potřebujeme např. pouze mechanický pohyb a právě elektřina nám umožňuje přenos energie od mechanicky se pohybujících zdrojů (turbín) na často i velmi odlehlá místa, kde opět pomocí dalšího měniče (motoru) mechanický pohyb využíváme. Elektřina je tedy pouze prostředníkem pro přenos energie na určitou vzdálenost. Postupem doby se zjistilo, že je velmi výhodné používat elektrických signálů i na přenos neenergetický, tj. na přenos informací. Protože se jedná o velice výhodný informační kanál, hledají se cesty, jak převést i informace s elektřinou nesouvisející na elektrický signál. K tomu slouží převodníky pro měření neelektrických veličin.

Upustíme od popisování starších principů, jednalo se zde často o mechanicko-elektrické převody. Princip spočíval v tom, že se např. spolu s ručkou přístroje tlakoměru pohyboval jezdec po odporové dráze a tak došlo k převodu výchylky na elektrickou veličinu. Samozřejmě, že měřící přístroj musel vykazovat značný moment, potřebný k posuvu jezdce. Zde se omezíme na všeobecné zásady a principy moderní konstrukce.

Vlastní čidla, senzory, poskytují zpravidla signál o velmi nízké napěťové úrovni (μV , mV , maximálně V). Tento signál je nevhodné přenášet vedením na větší vzdálenost, protože je velmi snadno napadnutelný rušivými vlivy. V krajním případě se stane signál čidla nepoužitelným, protože šumová složka zcela překryje užitečný signál. Signál je tudíž nutné co nejbližší senzoru zpracovat tak, aby byl schopen přenosu na větší vzdálenost. To je úkolem převodníků.

4. Měření neelektrických veličin, čidla, převodníky, rušivé vlivy

Převodníky signál dodaný snímačem zesílí (popř. zeslabí), převedou na standardní výstup (většinou proudový 4 – 20 mA, nebo napěťový 0 - 10V, v poslední době též výstup sériový pro PC) a galvanicky oddělí snímač od výstupu převodníku. Někdy může být snímač již přímo součástí převodníku, jindy se připojuje. Pak navíc musí převodník být schopen oddělit rušení od užitečného signálu snímače. Mezi převodníky lze řadit i měřicí transformátory proudu a napětí, protože též poskytují normalizovanou veličinu na výstupu.

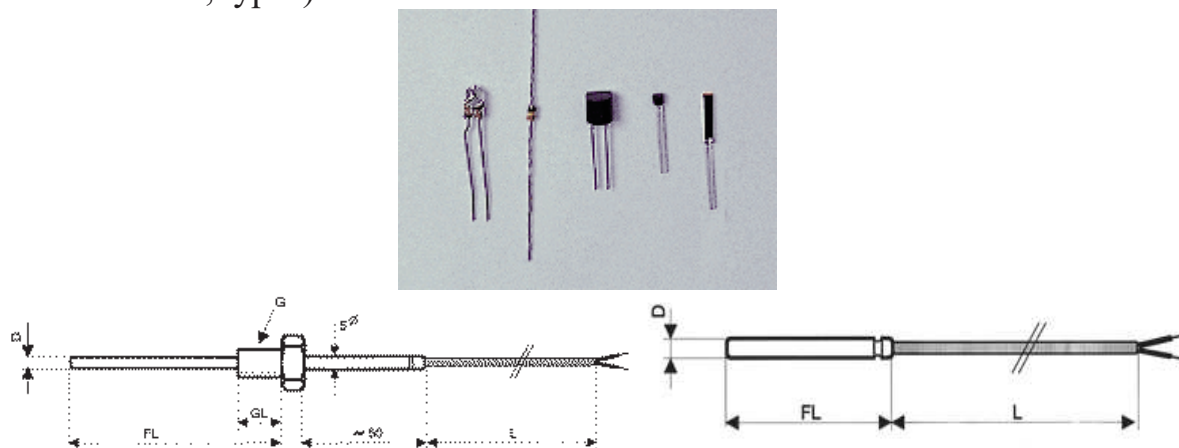
Převodníky principiálně mohou převádět

střídavý signál na stejnosměrný
stejnosměrný na stejnosměrný
střídavý na střídavý (galvanické oddělení)

Převodník způsobí zkreslení a zpoždění signálu (kvantování, doba převodu), popř. dojde i ke zvlnění ss výstupu. Následná filtrace nebo integrace signálu, pokud ji použijeme, způsobí rovněž zpoždění měřeného signálu.

Měření teploty

Moderní tepelné senzory jsou vyráběny na bázi platiny nebo molybdenu. Jejich rozsahy teplot jsou běžně od $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$, u platiny až do $+600^{\circ}\text{C}$. Rozměry jsou řádově mm až cm. Jejich jmenovitý odpor je definován pro určitou teplotu, např. $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ nebo $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Stále používané jsou termočlánky nikl-chrom/nikl-hliník (tzv. „K“), železo/měď-nikl (typ J), měď/konstantan (tj. měď/měď-nikl, typ T).



Obr. 4.1. Příklady termočlánků a typy pouzdra snímače.

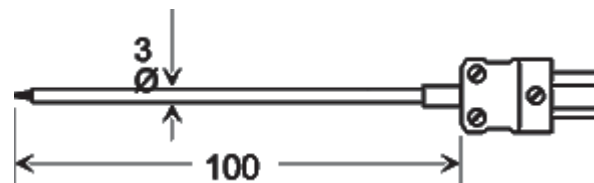
Pouzdra snímačů je možné konstruovat jako ponorná, prostorová (např. s otvory), zapichovací, se závitem nebo příložná. Rozměry snímače a typ senzoru je možné volit dle potřeby aplikace. Jímka pro vkládání senzoru do potrubí může být např. z nerezové oceli, teplotní rozsah je asi $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+1150\text{ }^{\circ}\text{C}$, dle senzoru. Teplotní rozsah termočlánku typu K je $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+1370^{\circ}\text{C}$, přesnost 0,4% z naměřené hodnoty, popř. $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Rychlost odezvy je 2s (90% naměřené hodnoty). Výhodou je jejich ohebnost, i pro malé poloměry. Třída přesnosti snímačů teploty je určena dle DIN IEC 751, DIN IEC 584 k referenční teplotě 0°C . Dosažitelné přesnosti

4. Měření neelektrických veličin, čidla, převodníky, rušivé vlivy

jsou až několik setin stupně. Většinou se uvádí linearita a hystereze vzhledem k rozsahu přístroje, popř. též z rozsahu stupnice nebo měřené hodnoty. Tyto snímače se nehodí pro rychlá (sekundová) měření.

V případě termočlánků je zpravidla nutné, aby teplota měřeného místa nebyla ovlivněna přívody ani konstrukcí termočlánku. Pak se termočlánky tepelně kotví, např. krčkem. Ten se používá zejména pro měření teplot nad 200 °C. Délka krčku se volí dle teploty.

Při měření termočlánků je nutno volit správný přístroj. Současné univerzální multimetry mají kontakty ze stejného materiálu jako termočlánek (viz obr.), takže nevznikají žádné přechody a tím falešná termonapětí. Díky konektoru nelze zaměnit jejich polaritu. Pro prodloužení přívodu se musí použít speciální kabel.



Obr. 4.2. Snímač typu „K“ s konektorem

Některé převodníky jsou určeny pro konkrétní typ snímače (senzoru), nebo mohou být univerzálnější. Jsou např. digitální převodníky, které lze pomocí PC naprogramovat a pak spolupracují s odporovým snímačem teploty, termočlánkem, odporovým vysílačem, nebo již přímo s napětím úměrným teplotě. Jejich výstup je lineární, mohou indikovat porušení nebo zkrat snímače a jejich výstup (kromě standardního) je i na sériovou linku s protokolem RS 232. Existují též bezdotykové teploměry, pracující na principu infračerveného záření.

U běžných snímačů je časová konstanta odezvy řádově sekundy. Existují však i speciální rychlé snímače s mezní frekvencí až 300 Hz (!). Zprostředkovaně lze pak určit i otáčky spalovacího motoru, pokud známe počet válců. Při výfuku je totiž teplota spalin nejvyšší.

Měření tlaku

V průmyslové praxi je třeba měřit absolutní tlaky, diferenciální tlaky, hlídat stavy klimatizačních zařízení, měřit výšku vodního sloupce apod.

Snímače mohou být tvořeny např. piezodoporovým senzorem relativního tlaku, s integrovanou kompenzací teploty. Přesnost senzoru bývá $\pm 0,2 \%$ z rozsahu pro hysterezi a linearitu, $\pm 0,4 \%$.

Převodníky tlaku jsou v jednom pouzdře se senzorem. Podle aplikace se řídí jejich materiál a tvar, případně mají přímo závit pro našroubování do stěny potrubí, nebo jinou úpravu pro uchycení. Napájení bývá standardně 10 – 30 V_{ss}, výstup 4 – 20 mA.

Měření rychlosti proudění

4. Měření neelektrických veličin, čidla, převodníky, rušivé vlivy

Jako čidlo anemometru se používá vrtulka o různých průměrech, typický rozsah pro plyny je 0,4 – 30 m/s. Přesnost je max. 1% ze změřené hodnoty. Jiný princip měření proudění nevyžaduje žádné pohyblivé díly, ale pracuje na principu anemometru s vyhřívaným čidlem. Zjišťuje se teplotní spád mezi dvěma miniaturními snímači. Přesnost je asi $0,5\text{m/s} + 0,5\%$ ze změřené hodnoty. Rozsah bývá pro plyny 0 – 20m/s při teplotách 0 - 50 °C.

Měření průtoku

Lze využít principu zubového čerpadla. Výstup je pak impulzní. Přesnost je 2%. Snímač je třeba dimenzovat na správný tlak a viskozitu tekutiny. Samozřejmě musí odolávat chemickému působení tekutiny. Kapalina nesmí pěnít. Při známém průřezu lze užít i anemometr. Další možností je užití tzv. Thomasova válce. Průtok se určí ze ztrát, vnucených do média. Musí být známa tepelná kapacita média. Průtok se pak určí z oteplení média.

Měření vlhkosti

Používá se kapacitní tenkovrstvý polymerový snímač. Měří relativní vlhkost v rozsahu 0 – 100%. Snímač se může orosit. Linearita je asi 2% v rozsahu 30-80% a 2,5% v rozsahu 11-90% relativní vlhkosti. Hystereze je asi 1%. Zvláštní přístroje se používají k zjišťování vlhkosti stavebních materiálů, dřeva a betonu.

Měření hladiny

Pro stanovení úrovně hladiny kapaliny lze použít např. kapacitní snímač. V kovové trubce s otevřeným dnem (pro volný pohyb hladiny uvnitř) je umístěn izolovaný vodič. Jednou elektrodou je vlastní vodič, druhou trubka, resp. přímo kapalina, pokud je vodivá. Dielektrikem je izolace vodiče, resp. i nevodivá kapalina. Změnou úrovně hladiny v trubce se mění kapacita. Výhodou je kontinuální měření, nevýhodou přímý kontakt s kapalinou, která může být agresivní nebo může tvořit výbušné páry.

Lze použít i speciální kapacitní snímač, který může být umístěn vně plastové nádoby.

Měření vodivosti roztoků

V průmyslu je potřeba měřit vodivost roztoků popř. zjišťovat znečištění odpadních vod. K měření se používají speciální konduktometry. Typický rozsah je 0,0 – 200mS/cm. Přístroj může zjišťovat i tzv. salinitu vody v rozsazích (0,0 – 70) %. Přístroj má dvojici grafitových elektrod.

Otáčky

Otáčky lze měřit kontaktním a bezkontaktním způsobem. Starší, kontaktní způsob, vyžadoval přitlačení hřídelky otáčkoměru s pryžovou čepičkou na čelo hřídele stroje, jehož otáčky se měřily. Pomocí převodovky pak došlo k úpravě otáček na velikost vhodnou pro ústrojí otáčkoměru. Zvláště pro malé otáčky bylo nutno

4. Měření neelektrických veličin, čidla, převodníky, rušivé vlivy

zvolit převod do rychla, což měřený stroj (malých rozměrů) mohlo tak zatížit, že došlo k poklesu otáček. Novější způsob již mechanických převodů nepoužívá. Na hřídel se sice opět přikládá čelně hřídelka otáčkoměru, ale její moment je prakticky nulový, protože systém otáčkoměru používá princip fotodiody, fototranzistoru a clonky. Měří se počet impulzů za jednotku času. Pro přesné bezkontaktní měření se používá celá série clonek rovnoměrně rozmístěných po obvodu tenkého průhledného kotouče. Využívá se též odrazu světla od reflexní plošky, nalepené na rotující část. Doplnkové vybavení přístroje paměti pro nejvyšší, nejnižší a posledně změřené otáčky, stejně tak jako obvodů pro přenos dat do PC po sériové lince s protokolem RS 232, se stalo v současné době standardem.

Chvění, zrychlení

Pro měření chvění se používají např. piezoelektrické snímače. Poskytují signál úměrný zrychlení povrchu, na který jsou přiloženy, proto se též nazývají akcelerometry. Jejich vlastní rezonanční kmitočet leží vysoko nad měřenými frekvencemi. Signál je vhodné zaznamenat pro pozdější opakovatelné zpracování (integrace, harmonická analýza). Jejich signálem je elektrický náboj nízké úrovně, proto se někdy již přímo k senzoru dává předzesilovač, který je napájen po kabelu. Do měřicího řetězce se musí zapojit hned za snímač tzv. nábojové zesilovače. Tyto zesilovače mají extrémně vysoký vstupní odpor, takže nedochází k zatěžování piezoelektrického snímače. Vstupní obvody obsahují prvky FET (řízené polem). Integrací signálu lze získat rychlost měřeného povrchu, druhou integrací pak signál úměrný výchylce. Pozornost je třeba věnovat eliminaci rušivé ss složky, vzniklé integrací.

Některé další často měřené veličiny

osvětlení (luxmetry, princip fotoodporu, popř. fotodiody)

tíha, síla, moment, hmotnost (piezoelektrické snímače)

pH metr (pracují na principu zjištění vodivosti, kyseliny jsou vodivější než zásady)

alkoholometr (pro dechovou zkoušku řidičů na alkohol, přesnost setiny promile alkoholu v krvi), tonometr (krevní tlak)

poloha rotoru stroje (inkrementální čidla, resolvers)

tenzometrická měření silových namáhání (např. viz kapitola 22.2)

Příčiny rušení

Příčin rušení je mnoho. Nejčastěji je to však chybné zemnění. Zemnicími vodiči pak mohou téci značné vyrovnávací proudy. Dalším vlivem může být rušivé magnetické pole, které do smyček indukuje napětí. Obdobný vliv má elektrické pole (zejména na zkušebnách vvn), kde se uplatňuje hlavně kapacitní vazba. V současné době může docházet k rušení též po napájecí síti, kde výkonová elektronika způsobuje silné rušivé pulzy. V úvahu je potřeba vzít i možnost vzniku

4. Měření neelektrických veličin, čidla, převodníky, rušivé vlivy

různých termonapětí na styku dvou kovů. V některých případech je velmi obtížné zdroj rušení identifikovat.

Druhy rušení

- paralelní rušení je tvořeno vyrovnávacími proudy přes zemnicí vodiče
- sériové rušení je tvořeno magnetickou, popř. elektrickou vazbou nebo z napájecí sítě

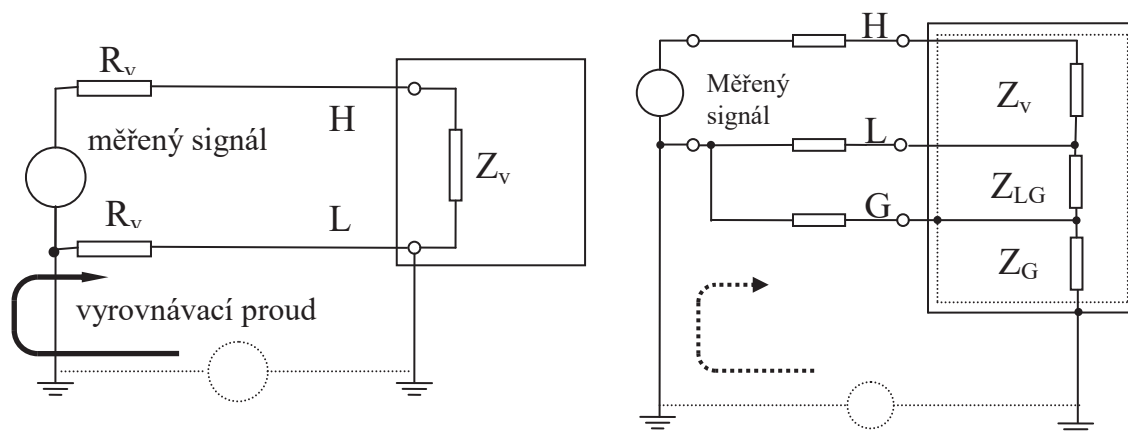
Potlačení rušivých signálů

Jak již bylo zmíněno, rušivá napětí (proudy) mohou užitečný signál ovlivnit, popř. až přehlušit. U moderních elektronických měřicích přístrojů je nutno odstranit rušivá napětí zvláště pečlivě, protože mají vysoký vstupní odpor, značné zesílení signálu a široký frekvenční rozsah. Vliv pak mají indukovaná napětí i od zapínacích a vypínacích pulzů, která jsou moderní přístroje schopny zachytit.

Způsoby potlačení rušivých signálů:

a) správné použití svorek přístroje

Některé přístroje umožňují třívodičové připojení k měřenému objektu. Pak vyrovnávací proudy vyvolané různými zemními potenciály prakticky netečou přes vodiče signálové. Podmínkou je, aby měřicí přístroj takového zapojení umožňoval a jeho vnitřní plovoucí stínění (svorka G) mělo vůči kostře dostatečnou kapacitu ($Z_G \gg Z_{LG}$).



Obr. 4.3. Vliv vyrovnávacích proudů na měřenou veličinu. V druhém případě je vyrovnávací proud veden jiným vodičem.

4. Měření neelektrických veličin, čidla, převodníky, rušivé vlivy

Při připojování vodičů by měla být dodržena souslednost G-L-H, při jejich odpojování pak sled opačný. Pokud je měřicí přístroj přepínán pomocí relé k různým měřeným místům, je obzvláště nutné dodržet správný sled zapínání a spínat vždy jen po jednom vodiči. Jinak by mohlo dojít k rozkmitání měřícího přístroje.

b) integrace signálu

Integraci signálu můžeme provést analogově nebo digitálně – číslicově. Průběh se tak vyhladí, protože odstraníme náhodné rušení. Lze měřit a integrovat opakovaně a pak udělat průměrnou hodnotu (průměrování). Nevýhodou je časové zpoždění signálu. Některé měřicí přístroje (např. multimetry) mají přímo vnitřní dvojitou integraci. Jindy se provádí integrace vnější, např. pokud chceme vyhodnotit ze signálu snímače zrychlení (akcelerometru) rychlost. Pokud se provede druhá integrace, je možné získat signál úměrný výchylce.

Stejnoseměrné voltmetry jsou zpravidla vybaveny integrací, jejíž doba je násobkem periody průmyslové napájecí frekvence. Tím lze tuto rušivou frekvenci a její násobky ze signálu vyloučit.

c) průměrování signálu

Často používaná metoda opakovaných měření, která potlačuje náhodné poruchy. V náročných případech lze předradit ještě integraci (viz bod b).

Nejjednodušší číslicový filtr zobrazuje na displeji „novou“ hodnotu N , jež je dána součtem

$$N = k + (1 - k) \cdot 2^n, \text{ kde je } k = \frac{1}{2^n} \text{ a } n = 0, 1, 2, \dots \quad (4.1)$$

Slovně vyjádřeno - nová zobrazovaná hodnota je určena na základě naměřené hodnoty a předešlé „staré“ zobrazované hodnoty.

d) filtrace

Připojitelný filtr je zpravidla na vstupu každého elektronického měřícího přístroje a měřicí PC karty. Pak se jedná o filtry vnitřní. Např. přímo na svorkovnici pro měřené signály je možné do připravených otvorů naletovat příslušné odpory a kondenzátory a tak udělat pro každý kanál PC měřicí karty požadovaný jednoduchý filtrační článek. Je možné též do cesty signálu vložit externí filtr, pasivní, popř. i aktivní. Většinou se jedná o dolnofrekvenční propustě, pásmové propustě a zádrže. Patříčný filtr se zvolí podle frekvence rušení, kterou je třeba odstranit. Pro termočlánky se používají pasivní RC články, protože tepelná setrvačnost měřeného zařízení je obvykle značná. Aktivní filtry obsahují tranzistory, operační zesilovače, popř. speciální integrované obvody.

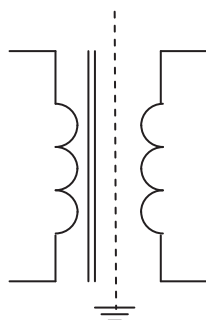
e) měřicí příklady

4. Měření neelektrických veličin, čidla, převodníky, rušivé vlivy

Je třeba dodržovat zásadu co nejkratších přívodních kabelů. Přívody je vhodné zkroutit, aby byla minimalizována plocha smyčky a tak potlačit rušení magnetickým polem. Pro omezení vlivu elektrického pole se provádí stínění vodičů. Pro zvláště těžké podmínky se provádí kombinace obojího, kroucení i stínění. Zemnit je nutno pouze v jediném bodě. Pokud je signál z čidla extrémně slabý, dělá se dokonce dvojité stínění a měřicí přístroj se dává co nejbližší ke snímači. U moderních zařízeních je již zesilovač přímo v čidlu.

f) trasy, po kterých vedou měřicí a sdělovací vodiče by měly ležet 2 – 3m od tras silových a napájecích přívodů. Mezi měřicími přístroji by měly být zachovány vzdálenosti asi 30cm, aby nedocházelo k ovlivňování přístrojů navzájem.

g) Použitím oddělovacího transformátoru pro napájení síťových měřicích přístrojů omezíme rušení síťové. Lze pak používat bez obav i přístroje, které nesplňují podmínky uvedené v bodu a). Pokud napájíme ze sítě měřicí přístroj, který má jednu svorku měřeného signálu společnou i pro napájecí napětí, pak při nepřipojeném vstupu měřicího přístroje vidíme chaotické údaje na jeho stupnici. Tento jev je pozorovatelný např. u bateriových multimetrů, u nichž používáme adaptér pro napájení ze sítě. Pokud však použijeme upravený transformátoček se stínicí fólií mezi primárním a sekundárním vinutím, rušení omezíme.



Obr. 4.4. Stínicí fólie mezi vinutími napájecího transformátoru. Fólii je potřeba uzemnit.



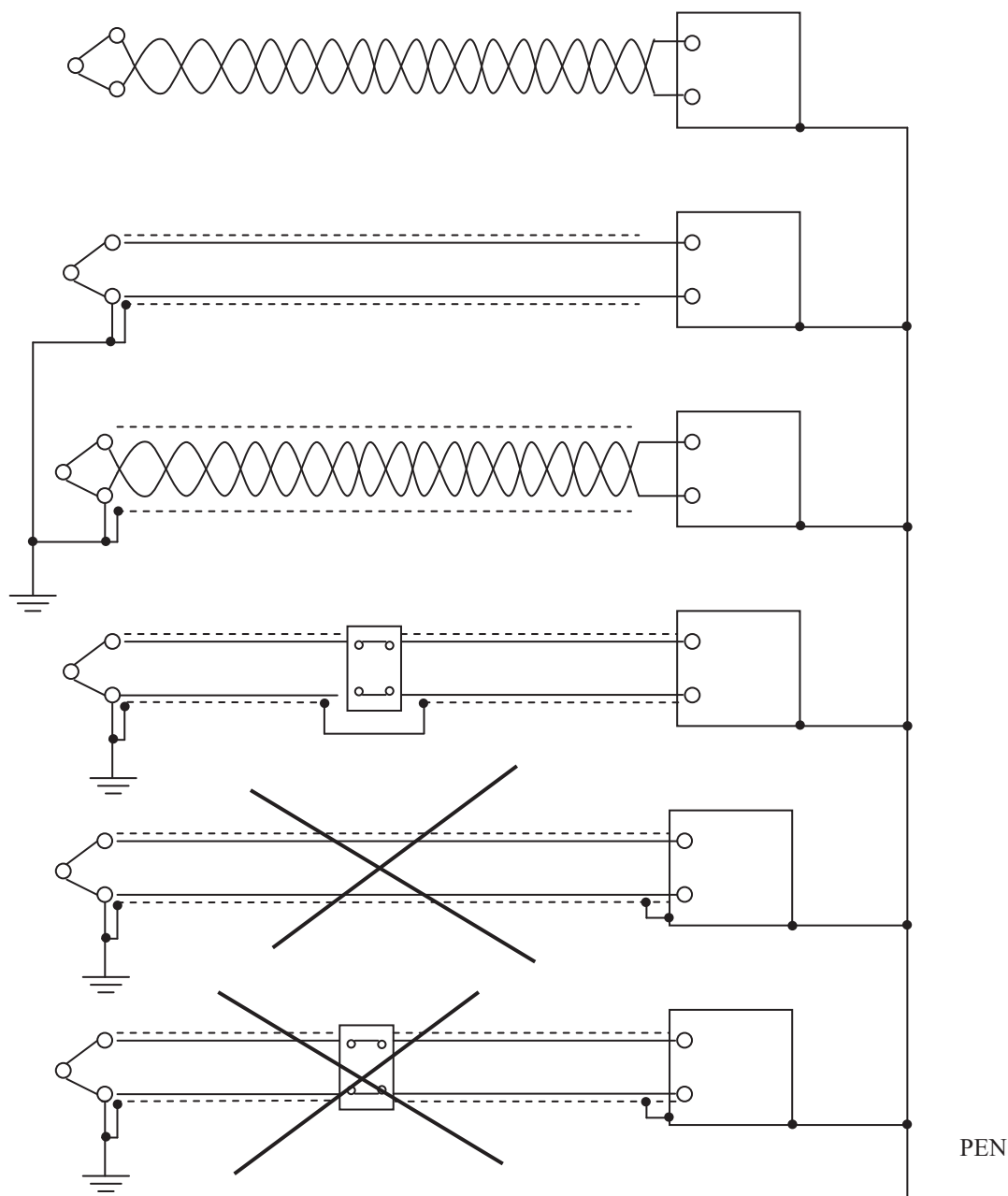
Paní Faradayová, to je zvláštní, co ten váš synek na té kleci pořád vidí?

4. Měření neelektrických veličin, čidla, převodníky, rušivé vlivy

h) magnetické stínění

Přístroje mají mít kryt z dostatečně silného, magneticky vodivého, materiálu. Pokud by kryt byl tenký, mohlo by v silném magnetickém poli dojít k jeho nasycení a průniku pole do přístroje, takže by taková ochrana byla bezcenná. Přívodní vodiče je možno klást nebo vést ocelovými trubkami.

h) Elektrické stínění je provedeno uvnitř přístroje. Používá se též na zkušebnách vn a vvn pro ochranu obsluhy (Faradayova klec).



Obr. 4.5. Správné a nesprávné připojení stíněných vodičů ke snímačům a přístrojům

4. Měření neelektrických veličin, čidla, převodníky, rušivé vlivy

Rušení je potřeba věnovat patřičnou pozornost. V dnešní době jsou již k dispozici normy, které problematiku elektromagnetické kompatibility řeší. Proto musí být některé přístroje (u kterých to připadá v úvahu) odrušeny a naopak jiné přístroje musí být rušení odolné. Při tvorbě měřících a vyhodnocovacích systémů je třeba mít na zřeteli, v jakém prostředí bude zařízení pracovat. Např. zařízení odzkoušené v laboratorních podmínkách, může v průmyslovém prostředí vlivem silného rušení selhat.

Zejména v laboratorních objektech je též možno využít speciální, tzv. „měřící“ zemní svorky. Silový rozvod, který je dnes již výhradně proveden pětivodičově, je pak doplněn šestým vodičem (GND). Tato svorka je připojena na speciální místní uzemňovací soustavu



Otázky k tématu:

- *Jak měříme teplotu částí elektrického stroje?*
- *Proč musíme měřit rychlost proudění?*
- *Proč měříme vodivost roztoků, reps. chladicí vody?*
- *Může mít oddělovací transformátor na výstupu zásuvku resp. dvojbzásuvku 230V s ochranným kolíkem?*



Správné odpovědi

- *Jak měříme teplotu částí elektrického stroje?*

Dotykově, např. termočlánkem typu K, bezdotykově IR teploměrem nebo kamerou (pak ale musíme znát emisivitu povrchu) a snímači vkládanými do stroje během výroby (Pt100). Teplotu vinutí lze též určit na základě známého přírůstku odporu vinutí.

- *Proč musíme měřit rychlost proudění a velikost průtoku?*

Jedná se zejména o ověření jmenovitého chlazení vzduchem, resp. vodou.

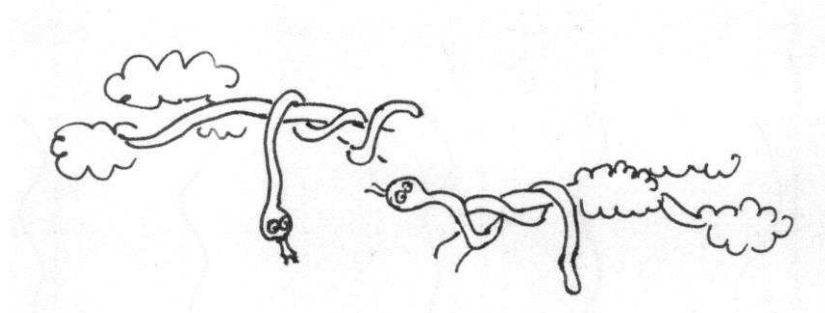
- *Proč měříme vodivost roztoků, reps. chladicí vody?*

Pro aktivní přímé chlazení satorových závitů se používá demineralizovaná voda. Musí být zbavena všech iontů, protože se stejnou vodou chladí všechny tři fáze. Musí proto být “dostatečně nevodivá” pro sdružené napětí až 24kV.

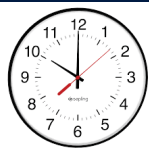
- *Může mít oddělovací transformátor na výstupu zásuvku resp. dvojbzásuvku 230V s ochranným kolíkem?*

4. Měření neelektrických veličin, čidla, převodníky, rušivé vlivy

Může, ale ochranný kolík nesmí být připojen na potenciál PE. Pokud se jedná o dvojjádrovou, kolíky mohou být propojeny pouze mezi sebou. V tom případě musíme dát pozor, aby se nevytvořila smyčka mezi přívody k přístrojům.



Chtěla jsem se celé odpoledne vyhřívat na slunci, ale jeho stínění mrakem mě ruší v odpočinku.



Předpokládaný čas: 15 min



Po prostudování tématu budete:

- Umět připravit experiment a měření u zákazníka nebo v terénu
- Zpracovat zprávu o měření a vyhodnotit výsledky z různých hledisek

5. Projekt, příprava a realizace měření

Rozsah prací je závislý zejména na

- Druhu měření. Může se jednat o měření, jehož cílem je zjištění nových poznatků o objektu. Takovému měření bude jistě předcházet pečlivější příprava, než u měření, jehož úkolem je pouze ověření poznatků již známých.
- Měřeném objektu. Menší stroje kladou malé nároky na zkušebnu. U velkých strojů je třeba zajistit např. též olejové a vodíkové hospodářství apod.

Z hlediska druhu měření klade největší nároky výzkumně – vývojové měření a typové zkoušky. Naopak nejmenší nároky jsou u kusových zkoušek a rutinních měření. Nejvíce času zabírá obvykle příprava měření a zpracování výsledků.

Hlavní body

- 1) Formulace záměru a cíle. Správně stanovit reálný cíl je mnohdy obtížné. Vyžaduje to odborný rozhled, zkušenosti a znalosti. Měření musí být proveditelné s přiměřenými náklady.
- 2) Projekt experimentu. V tomto místě je třeba volit
 - vhodné měřicí metody
 - způsob napájení a zatěžování zkoušence (výkon zdrojů)
 - požadavky na měření (počet měřících míst, čidel, druhy a úrovně signálů, četnost měření – přechodový x ustálený stav, časové průběhy, předběžné požadavky na zpracování naměřených dat, průběžná kontrola teploty vybraných čidel, přepočty, výstup výsledků)
 - výběr měřicího systému a speciálních přístrojů, čidel a převodníků, popř. zakoupit nové přístroje a vybavení
 - lokalizaci zkoušence a měřicího systému, měřicí trasy, kabelová vedení, eliminace rušení
- 3) Příprava měření. Již v průběhu výroby se provádí zakládání čidel. V průběhu výroby se také provádí výroba přípravků pro měření (spojky, montážní kostky).

Vzhledem k časovému plánu zkoušek se musí též včas připravit (objednat) měřicí systém. Ten se musí zapojit a ověřit jeho funkce. Připraví se napájecí zdroje a také stroje zatěžovací, případně další části silového obvodu. Plán zkoušek se věcně a časově upřesní. Musí též proběhnout příprava mazacích, chladících a dalších okruhů. Zajistí se média jako olej, vodík apod. Když je vše připraveno, proběhne ověření ovládacího softwaru měřicího systému.

- 4) Realizace zkoušky. Předem je stanoven vedoucí zkoušek. Vhodnou organizací zkoušek se zajistí ekonomické aspekty. Zbytečný rozběh velkého stroje je nákladná záležitost. Je však třeba dbát na bezpečné provedení každého úkonu. Během zkoušky se výsledky musí ukládat na vhodná média a případně je ihned zálohovat. Výsledky se předběžně vyhodnocují a v případě potřeby se provede další zpřesnění programu zkoušek nebo se zařadí zkoušky další. Předpokladem úspěšného měření je důkladná předběžná kontrola a seřízení všech obvodů.

Z elektrického hlediska musí být vše správně zapojeno, dostatečný izolační odpor, vinutí bez závitů nakrátko, seřízené sběrací ústrojí apod.

Z magnetického hlediska musí být dodrženy vzduchové mezery, mezi plechy magnetického obvodu nesmějí být zkrat, vinutí musí mít správnou polaritu atd.

Z mechanického hlediska musí být v pořádku hlavně ložiska, mazání, montáž a upnutí stroje, zaběhnuté kartáče, chlazení stroje, vodíkové ucpávky a související zařízení pro plnění stroje vodíkem, rotory musí být vyvážené aj.

- 5) Vyhodnocení měření. V této fázi se jedná o zpracování výsledků. V současné době probíhá téměř výhradně na PC. Zvolí se vhodný způsob jejich prezentace (grafy) a zpracují se závěry a doporučení.

Z hlediska konstrukčního návrhu se hodnotí provozní účelnost, namáhání jednotlivých částí, mechanická činnost, spolehlivost, přístupnost ložisek, vyměnitelnost kartáčů, hlučnost, chvění, ochrana před dotykem, nebezpečí úrazu apod.

Z hlediska výpočtového návrhu se hodnotí charakteristiky, ztráty, odpory, reaktance, oteplení, časové konstanty apod.

Z hlediska norem se hodnotí elektrická a mechanická pevnost, přetěžitelnost, oteplení, účinnost, ztráty, účinník, tvar křivky napětí, apod.

Z hlediska provozních požadavků se hodnotí činnost dle požadavků odběratele se zřetelem na prostředí a možné poruchy, bezpečnost při práci, obsluha, revize a údržba.



Otázky k tématu:

- *Je potřeba předem se zákazníkem jednat o parametrech měření?*
 - *Jaké jsou povinnosti vedoucího zkoušek?*
-



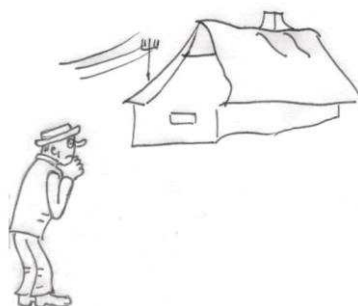
Správné odpovědi

- *Je potřeba předem se zákazníkem jednat o parametrech měření?*

Je potřeba do detailů prodiskutovat co nejvíce okolností, variant, možností a vlivů, které mohou mít na úspěšnost měření vliv.

- *Jaké jsou povinnosti vedoucího zkoušek?*

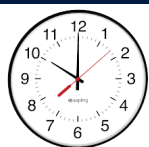
Dohlížet na dodržování bezpečnostních předpisů, rozhodovat o pořadí zkoušek, parametrech prováděných měření, odpovídá za správnost měření a vyhodnocení atd.



Exekuce u toho chlápka, co neplatil za elektřinu, proběhla dobře. Dlužníkovi jsme zabavili i provaz.

6. Experimentální výzkum neznámého objektu, faktorová a citlivostní analýza

6. Experimentální výzkum neznámého objektu, faktorová a citlivostní analýza



Předpokládaný čas: 65 min



Po prostudování tématu budete:

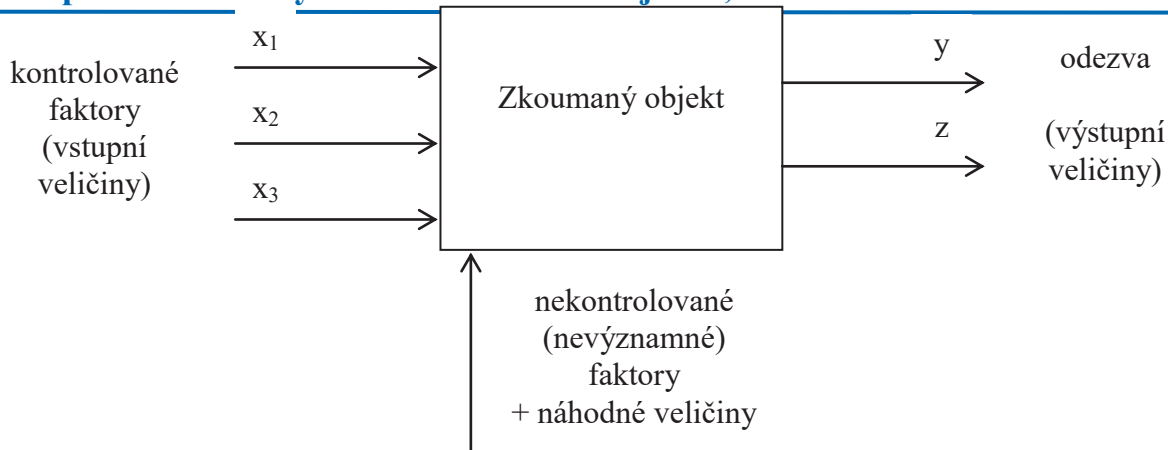
- Umět navrhnout faktorový experiment
- Normovat faktory a stanovit centrum experimentu
- Stanovit koeficienty polynomu faktorového experimentu

Cílem experimentálního výzkumu neznámého objektu je na základě vhodně volených pokusů poznat fyzikální strukturu objektu a popsat závislost fyzikálních výstupních veličin na vstupních. Na základě matematického popisu (modelu) je pak možno provádět simulace chování objektu.

Experiment můžeme obvykle rozdělit na části (pokusy), které jsou do jisté míry samostatné. Základní vlastností pokusu jsou stabilizované hodnoty všech faktorů a výsledkem pokusu je jediná naměřená hodnota měřené veličiny. Návrhem experimentu nazýváme výběr pokusů, které zařadíme do experimentu, výběr počtu opakování těchto pokusů, popř. též určíme pořadí vykonávání pokusů. Samotné měření je proces získávání kvantitativních údajů o měřeném objektu.

Každému experimentu musí předcházet teoretická úvaha o měřeném objektu. Čím lepší je teorie měřeného objektu, čím promyšlenější je cíl měření, tím lepší jsou výsledky experimentu. V krajních případech (kdy nemáme žádnou informaci o objektu nebo naopak již víme vše a není co nového změřit) je experiment bezpředmětný.

6. Experimentální výzkum neznámého objektu, faktorová a citlivostní analýza



Obr. 6.1. Model experimentu

Někdy je velmi obtížná správná volba faktorů. Faktory se rozdělí na kontrolované (podstatné) a nekontrolované (nevýznamné). Odezvu je možno definovat jako složitou funkci kontrolovaných faktorů. Lze ji též definovat jako odchylku výstupní veličiny při změně vstupního faktoru (faktorů) a jejich interakcí. Faktory jsou v interakci (korelují), jestliže účinek jednoho faktoru závisí na úrovni jiného faktoru.

Matematický zápis:

$$y = f(x_1, x_2, x_3, x_4, \dots, x_n) + \varepsilon \quad (6.1)$$

kde ε je náhodná veličina a nekontrolované faktory.

V některých případech, zejména když o zkoumaném objektu víme velmi málo nebo když je analytický model pro svoji složitost nebo nepřesnost nepoužitelný, je vhodné předpokládat model experimentu ve tvaru polynomu.

$$y = a_0 + a_1x_1 + \dots + a_kx_k + a_{12}x_1x_2 + \dots + a_{kk}x_k^2 + \dots + \varepsilon \quad (6.2)$$

Koeficienty a_{ij} představují členy příslušné Taylorově řadě, která je aproximací neznámé, ale existující funkce

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_k) + \varepsilon \quad (6.3)$$

Experimenty, které nám slouží k určení neznámých parametrů modelu (6.2) se nazývají faktorové experimenty. Všechny faktory musí mít kvantitativní charakter. Navíc je vhodné úrovně faktorů normovat.

Nejprve zvolíme centrum experimentu, tj. bod

$$\tilde{X}_0^T = (\tilde{X}_{10}, \tilde{X}_{20}, \dots, \tilde{X}_{k0}) \quad (6.4)$$

v okolí kterého budeme objekt zkoumat. Potom zvolíme pro každý faktor délku variačního intervalu $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k$. Normování provedeme podle vztahu

$$x_i = \frac{\tilde{X}_i - \tilde{X}_{i0}}{\lambda_i} \quad (i=1, 2, \dots, k) \quad (6.5)$$

kde $\tilde{X}_i$ je původní nenormovaná úroveň i-tého faktoru a x_i je jeho normovaná úroveň. Centrum experimentu je v počátku prostoru normovaných úrovní faktorů.

6. Experimentální výzkum neznámého objektu, faktorová a citlivostní analýza

Úroveň $x_i=1$ se nazývá horní úroveň experimentu a $x_i=-1$ dolní úroveň i -tého faktoru (běžně se označují pouze + a -).

Když každý faktor nastavíme na určitou úroveň, je tím určen právě jeden pokus na zkoumaném objektu. Výsledkem pokusu je naměřená hodnota na výstupu y . Má-li model m neznámých parametrů, musí návrh experimentu obsahovat alespoň m různých pokusů.

Postup zkoumání neznámého objektu spočívá obvykle ve zvolení modelu ve tvaru polynomu prvního stupně, tzn. faktorový model 1. řádu. Pokud se ukáže, že zvolený model není odpovídající, zvýšíme stupeň polynomu v modelu a navrhne nový faktorový experiment, pomocí kterého odhadujeme parametry tohoto rozšířeného modelu. Postup opakujeme, dokud není dokonalost modelu uspokojující. Většina úloh vystačí s faktorovým modelem 1. řádu, proto se soustředíme na tyto modely. Jde o dvojúrovňové experimenty.

Pokud experiment obsahuje všechny různé pokusy, které se liší kombinací úrovní + a - jednotlivých faktorů, pak se jedná o úplný faktorový experiment (UFE). Počet pokusů pro k faktorů je

$$N = 2^k \quad (6.6)$$

pokus	x_1	x_2	x_3
1	-	-	-
2	-	-	+
3	-	+	-
4	-	+	+
5	+	-	-
6	+	-	+
7	+	+	-
8	+	+	+

Obr. 6.2. Příklad návrhu UFE 2^3

Faktorový model prvního řádu (redukovaný)

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_kx_k + \varepsilon \quad (6.7)$$

obsahuje $m=k+1$ neznámých parametrů. Počet pokusů 2^k však převyšuje číslo m . To nám dovoluje rozšířit model o další členy. Tyto členy budou vyjadřovat interakce několika faktorů současně. Pokud k faktorovému modelu prvního řádu přidáme všechny možné vzájemné interakce faktorů, získáme model ve tvaru

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_kx_k + a_{12}x_1x_2 + \dots + a_{k-1,k}x_{k-1}x_k + \dots + a_{12\dots k}x_1x_2\dots x_k + \varepsilon \quad (6.8)$$

6. Experimentální výzkum neznámého objektu, faktorová a citlivostní analýza

který se nazývá úplný faktorový model. Počet neznámých parametrů modelu m je shodný s počtem pokusů. Matice koeficientů normovaných faktorů

$$F = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & \dots & x_{k1} & x_{11}x_{21} & \dots & x_{k-1,1}x_{k1} & \dots & \prod_{i=1}^k x_{i1} \\ 1 & x_{12} & \dots & x_{k2} & x_{12}x_{22} & \dots & x_{k-1,2}x_{k2} & \dots & \prod_{i=1}^k x_{i2} \\ \vdots & & & & & & & & \\ 1 & x_{1N} & \dots & x_{kN} & x_{1N}x_{2N} & \dots & x_{k-1,N}x_{kN} & \dots & \prod_{i=1}^k x_{iN} \end{bmatrix} \quad (6.9)$$

je čtvercová matice řádu N a její hodnota je též N . Její normované prvky nabývají pouze hodnot -1 a $+1$. Pro parametry modelu platí

$$a_i = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N \{F\}_{ui} y_u \quad (i=1,2,\dots,m) \quad (6.10)$$

Vše se vysvětlí nejlépe na příkladu. Uvažujme UFE typu 2^2 . Úplný faktorový model má tvar

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_{12}x_1x_2 + \varepsilon \quad (6.11)$$

a matice koeficientů má tvar

$$F = \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.12)$$

Pro odhad parametrů modelu platí vztahy

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{4}(y_1 + y_2 + y_3 + y_4) \\ a_1 &= \frac{1}{4}(-y_1 - y_2 + y_3 + y_4) \\ a_2 &= \frac{1}{4}(-y_1 + y_2 - y_3 + y_4) \\ a_{12} &= \frac{1}{4}(y_1 - y_2 - y_3 + y_4) \end{aligned} \quad (6.13)$$

Nevýhodou UFE typu 2^k je, že při rostoucím počtu faktorů k velice prudce narůstá počet pokusů. Pokud vystačíme s modelem prvního řádu a pokud je počet pokusů značně vyšší než počet neznámých parametrů $k+1$, vzniká nadbytek informací. Máme tudíž snahu snížit počet pokusů. To umožňují redukované faktorové experimenty (RFE). Jeho princip vysvětlíme na příkladu.

Budeme uvažovat UFE typu 2^2 . Pokud můžeme předpokládat malou hodnotu parametru a_{12} , pak poslední sloupec matice koeficientů (6.12), který je ortogonální vzhledem k ostatním sloupcům, můžeme použít jako vektor návrhu experimentu pro další faktor x_3 . Tak jsme získali návrh pro tři faktory, který má jen 4 pokusy. Při porovnání s UFE typu 2^3 (6.6) zjistíme, že počet pokusů klesl na polovinu.

Pokus	x_1	x_2	x_3
-------	-------	-------	-------

6. Experimentální výzkum neznámého objektu, faktorová a citlivostní analýza

1	-	-	+
2	-	+	-
3	+	-	-
4	+	+	+

Obr. 6.3. Návrh experimentu pro tři faktory se čtyřmi pokusy

Sloupec x_3 vznikl vynásobením sloupců x_1 a x_2 , což lze zapsat

$$x_3 = x_1 x_2 \quad (6.14)$$

a to je tzv. generující vztah. Nyní má model experimentu tvar

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + \varepsilon \quad (6.15)$$

Vidíme, že původních 8 parametrů UFE typu 2^3 se nějakým způsobem sloučilo do 4 parametrů modelu (6.15). Nastává smíšení efektů. Lze ukázat, že parametry a_1 , a_2 a a_3 z modelu (6.14) jsou součty parametrů $a_1 + a_{23}$, $a_2 + a_{13}$ a $a_3 + a_{12}$ z UFE typu 2^3 . Pokud je centrum experimentu daleko od extrému funkce nebo je objekt zkoumání lineární, jsou parametry vyjadřující interakce faktorů zanedbatelné vzhledem k parametrům a_1 , a_2 a a_3 . Pak použití RFE místo UFE způsobí jen malou chybu. Další redukce není možná.

Samobuzený asynchronní generátor

Stanovte parametry modelu samobuzeného indukčního stroje pomocí dvojúrovňových experimentů.

Štítkové údaje:

Jmenovité otáčky	1400 ot.min ⁻¹
Jmenovité napětí statoru	380 V _Δ
Frekvence	50 Hz
Jmenovitý proud statoru	5 A
účinník	0,8

Z účinníku, statorového proudu a napětí lze stanovit jalový výkon, který musí dodávat baterie kondenzátorů. Takto byla zvolena výchozí hodnota kapacity kondenzátorů. Rozsah hodnot odporu zátěže byl určen experimentálně. Zvolené základní úrovně jednotlivých faktorů (centrum experimentu) ukazuje tabulka.

Faktor	x_1	x_2	x_3
Fyzikální veličina	R	C	N
Rozměr	Ω	μF	min ⁻¹
Základní úroveň	200	24	1300
Variační interval	100	4	100
Horní úroveň	300	28	1400
Dolní úroveň	100	20	1200

6. Experimentální výzkum neznámého objektu, faktorová a citlivostní analýza

Obr. 6.4. Hodnoty stanovující centrum experimentu

Asynchronní stroj je roztáčen pomocí dynamometru na požadované otáčky. Kondenzátory jsou zapojeny vždy do trojúhelníka. Zátěž je tvořena třemi shodnými odpory. Jejich změna se nastavovala pomocí ohmmetru.

Dále je třeba zvolit návrh faktorového experimentu. Pro tři faktory je možné sice použít RFE se 4 pokusy, nebo UFE s 8 pokusy. Protože však zkoumaný objekt je nelineární, nemůžeme zanedbat koeficient respektující vzájemné interakce faktorů. Proto použijeme UFE,

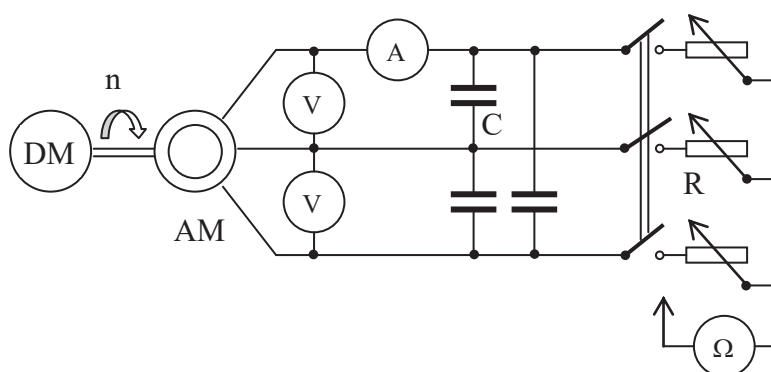
$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_{12}x_1x_2 + a_{13}x_1x_3 + a_{23}x_2x_3 + a_{123}x_1x_2x_3 \quad (6.16)$$

kde napětí naměřená v jednotlivých pokusech tvoří vektor výsledků y .

Každý pokus byl opakován třikrát. Uvedený příklad ilustruje zpracování modelu pro odezvu napětí U .

x_1	x_2	x_3	U [V]			f [Hz]			I [A]		
-	-	-	265	266,5	265	37,5	37,5	37,5	2,6	2,6	2,6
-	-	+	357,5	356	355	43,5	43,5	43,5	3,95	3,95	3,95
-	+	-	311,5	310	310	37	37,2	37,3	3,95	3,95	3,95
-	+	+	397,5	397,5	396,5	43	43	43	5,8	5,75	5,75
+	-	-	313,5	313	314	38,5	38,3	39	2,81	2,82	2,82
+	-	+	405	405	405	45	45	45	4,25	4,25	4,25
+	+	-	350	350	350	38,5	38,5	38,5	4,35	4,35	4,35
+	+	+	446	447,5	447,5	45	45	45	6,5	6,49	6,48
Návrh experimentu			Výsledky pokusů								

Obr. 6.5. Výsledky provedeného experimentu



Obr. 6.6 Schéma zapojení samobuzeného asynchronního stroje

Matice koeficientů je

(význam jednotlivých sloupců je $x_0 \ x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_1x_2 \ x_1x_3 \ x_2x_3 \ x_1x_2x_3$)

6. Experimentální výzkum neznámého objektu, faktorová a citlivostní analýza

$$F = \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.17)$$

Po vyčíslení byly získány hodnoty parametrů modelu (6.16), které jsou následující:

a_0	a_1	a_2	a_3	a_{12}	a_{13}	a_{23}	a_{123}
355,54	23,33	20,63	45,79	-1	1,33	0,13	0,25

Protože jsou parametry a_{23} a a_{123} (např. podle Studentova testu) nevýznamné, můžeme je vynechat. Výsledný model má pak tvar

$$y = 355,54 + 23,33x_1 + 20,63x_2 + 45,79x_3 - x_1x_2 + 1,33x_1x_3$$

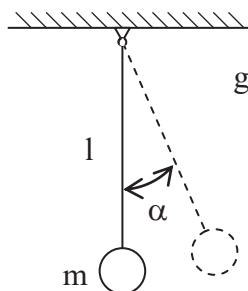
Kromě právě popsané faktorové analýzy existují i jiné metody, jak lze řešit, popř. zjednodušit matematický model.

Metoda fyzikální dimenze

Metodu fyzikální dimenze bude nejlépe vysvětlit na příkladu. Za úkol máme stanovit závislost doby kyvu kyvadla.

Budeme zkoumat závislost doby kyvu v závislosti na faktorech

- délka l
- hmotnost m
- počáteční úhel vychýlení z rovnovážné polohy α
- gravitační zrychlení g



Obr. 6.7. Vyšetřovaná závislost doby kyvu na faktorech

6. Experimentální výzkum neznámého objektu, faktorová a citlivostní analýza

Doba kyvu kyvadla je zatím neznámou funkcí

$$t = f(l, m, \alpha, g) \quad (6.18)$$

Zvolíme

$$t = \sum_i a_i l^{b_i} m^{c_i} \alpha^{d_i} g^{e_i}, \text{ kde } b_i, c_i, d_i, e_i = 0, 1, \quad (6.19)$$

Nyní zavedeme dimenze

$$\begin{array}{ll} \text{času } [T] & \\ \text{délky } [L] & \text{zrychlení je pak } [L]/[T]^2 \\ \text{hmotnosti } [M] & \end{array}$$

a dosadíme

$$[T] = [L]^{b_i} [M]^{c_i} [L]^{d_i} [T]^{-2e_i} \quad (6.20)$$

Provedeme porovnání exponentů u jednotlivých dimenzí

$$\begin{array}{l} [T]: 1 = -2e_i \\ [L]: b_i + d_i = 0 \\ [M]: c_i = 0 \end{array} \quad (6.21)$$

Po výpočtu jednotlivých exponentů je dosadíme zpětně do (6.19)

$$t = \sum_i a_i l^{\frac{1}{2}} m^0 \alpha^{d_i} g^{-\frac{1}{2}} = \sqrt{\frac{l}{g}} \sum_i a_i \alpha^{d_i} \quad (6.22)$$

Nyní stačí udělat několik pokusů a pro různé počáteční úhly α zjistíme

$$\begin{array}{l} d_i \rightarrow 0 \\ \sum_i a_i \rightarrow \pi \end{array} \quad (6.23)$$

Výsledkem je hledaná doba kyvu matematického kyvadla

$$t = \pi \sqrt{\frac{l}{g}} \quad (6.24)$$

Citlivostní analýza

Citlivostní analýza umožňuje detailnější vyšetření závislostí. Vyžaduje však již určité znalosti o zkoumaném objektu. Pokud ještě potřebné znalosti nemáme, musíme postupovat opatrně a provádět raději řadu dalších kontrolních měření při jiných úrovních kontrolovaných faktorů. Metodu je vhodné použít jako doplňující po faktorové analýze. Dále je třeba všechna měření provádět za stejných podmínek, aby také náhodné veličiny a nekontrolované faktory měly stejnou úroveň. Princip metody totiž spočívá v tom, že se mění pouze jeden faktor (ostatní kontrolované faktory zůstávají konstantní), a zjišťuje se odezva systému na jeho změnu.

Metodu lze výhodně použít pro vyšetřování matematického modelu a jeho chování. Lze tak snadno zjistit např. citlivost výsledků na volbu (přesnost zadání) parametrů apod.

6. Experimentální výzkum neznámého objektu, faktorová a citlivostní analýza



Otázky k tématu:

- Jak se vypočítá počet pokusů UFE při dvojúrovňových experimentech?
- Lze mít ve faktorovém experiment se třemi faktory pouze 4 pokusy pro určení koeficientů?



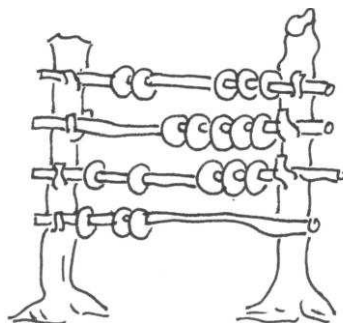
Správné odpovědi

- Jak se vypočítá počet pokusů UFE při dvojúrovňových experimentech?

Počet pokusů je mocnina dvou, přičemž mocnitel je počet uvažovaných faktorů.

- Lze mít ve faktorovém experiment se třemi faktory pouze 4 pokusy pro určení koeficientů?

Ano, lze. Musí však být interakce mezi faktory zanedbatelná. Použijeme redukovaný faktorový experiment.



7. Měření základních magnetických a elektrických veličin



Předpokládaný čas: 75 min



Po prostudování tématu budete:

- Umět popsat princip Hallovy sondy, Rogowskiho potenciometru a fluxmetru
- Umět měřit tok cívkovou sondou a ztrátové číslo Epsteinovo přístrojem
- Umět zvolit vhodné zapojení přístrojů pro určení napětí a proudů i výkonů
- Umět měřit sled fází, fázový posun i energii
- Umět měřit kmitočet, malé i velké odpory, kapacity a indukčnosti

Měření magnetických veličin

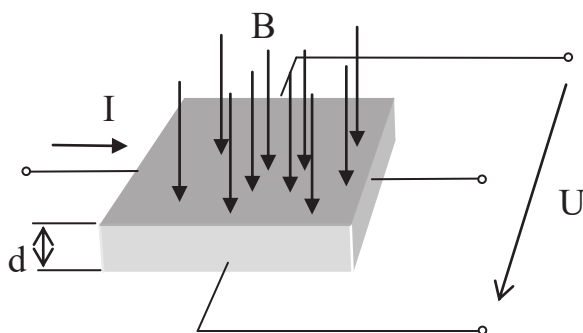
Hallová sonda

Přímé měření magnetické indukce B umožňuje Hallův jev. Na příčných elektrodách destičky z polovodičového materiálu, kterou prochází pomocný proud I a je vložena do magnetického pole s indukcí B , se objeví tzv. Hallovo napětí

$$U_H = R_H \frac{BI}{d}, \quad (7.1)$$

kde R_H je Hallova konstanta [m^3C^{-1}] a d je tloušťka destičky [m].

Účinkem magnetické indukce se deformují proudová vlákna budícího proudu, takže roste odpor budícího obvodu. Pro měření střídavého magnetického pole nebo při sledování dynamických průběhů je vhodné napájet budící obvod ze zdroje proudu.



Obr. 7.1. Princip Hallova jevu

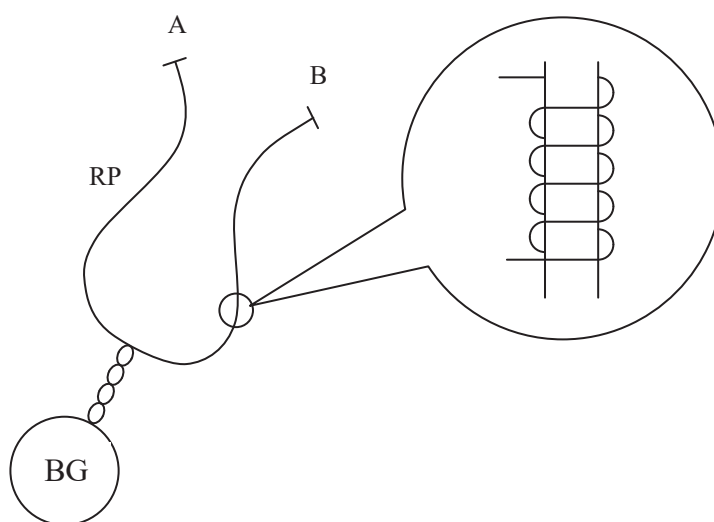
7. Měření základních magnetických a elektrických veličin

Hallovovy sondy jsou malé, takže se dají použít pro měření indukce v malých vzduchových mezerách, pokud lze předpokládat pole na tomto malém úseku za homogenní. Hallovo napětí je malé, řádově mV (speciální materiál InAs dává asi 100mV na 1T při proudu 100mA). Hallovo napětí je stejnosměrné, takže lze měřit magnetoelektrickým systémem, který má stupnici cejchovanou přímo v jednotkách T (popř. Am, Gauss). Moderní měřicí přístroje jsou opět digitální, s přenosem dat do PC, pamětí pro data a dalšími doplňky.

Hallovo sondu lze v zásadě použít i pro měření ss polí při střídavém pomocném proudu nebo pro měření st polí při ss pomocném proudu. V těchto případech je Hallovo napětí střídavé.

Rogowskiho potenciometr¹

Rozdíl magnetických napětí měří Rogowskiho potenciometr (správně by se měl proto nazývat potenciálometrem). Jde o cívku s velkým počtem závitů o stejném průřezu, rovnoměrně navinutou na pásku nebo hadici, popř. jádro z nevodivého, nemagnetického materiálu.



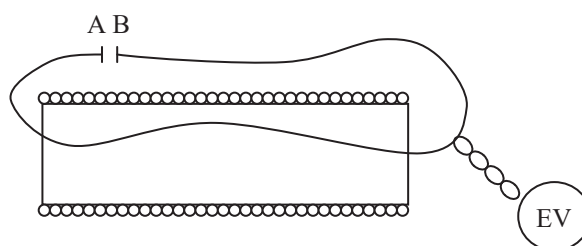
Obr. 7.2. Princip Rogowskiho potenciometru

Pro magnetické napětí platí rovnice

$$U_{mAB} = K_{RP} \alpha_m, \quad (7.2)$$

kde K_{RP} je konstanta Rogovského potenciometru a α_m výchylka galvanometru. Tuto konstantu lze určit např. měřením podle následujícího obrázku.

¹ Zejména v anglicky mluvících zemích lze též najít název Chatokova cívka.



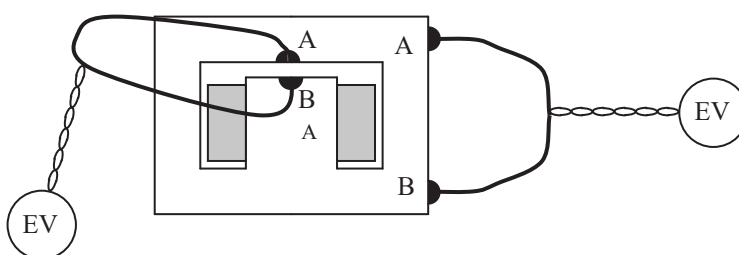
Obr. 7.3. Určení konstanty Rogovského potenciometru pomocí solenoidu se známým počtem závitů

Cívkou se známým počtem závitů N se provleče Rogovského potenciometr, jehož konce A a B se spojí. Po komutaci ss proudu I , procházejícího cívkou, bude v bodě A=B magnetické napětí

$$U_m = 2NI = K_{RP}\alpha_m \Rightarrow K_{RP} = \frac{2NI}{\alpha_m}. \quad (7.3)$$

Rogovského potenciometrem lze měřit i střídavé pole, balistický galvanometr pak ale musíme vyměnit za střídavý elektronický voltmetr. Pokud Rogovského potenciometrem obepneme jeden vodič, lze měřit i proud vodiče. Tato metoda se hodí pro velké (zkratové) proudy, popř. pro měření hřídelových proudů. Potenciometr pak tvoří uzavřený kruh, takže se též někdy nazývá Rogovského kruh. Indukované napětí je pak úměrné magnetickému napětí, což je celkový obemknutý proud, dle zákona celkového proudu

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = I. \quad (7.4)$$



Obr. 7.4. Měření magnetických napětí na střídavém magnetickém obvodu

Rogovského potenciometr mívá velký počet závitů tenkého drátu a tedy i velký odpor. Proto se pro měření musí použít měřicí přístroj s velkým vstupním odporem. Pak je např. možné mapovat magnetická pole v okolí transformátorů apod.

Fluxmetr a cívková sonda

Stejnoseměrné magnetické pole lze měřit pomocí cívky, která je speciálně vložena do vinutí a pomocí fluxmetru, což je v podstatě kvalitní integrátor. Cívka může být

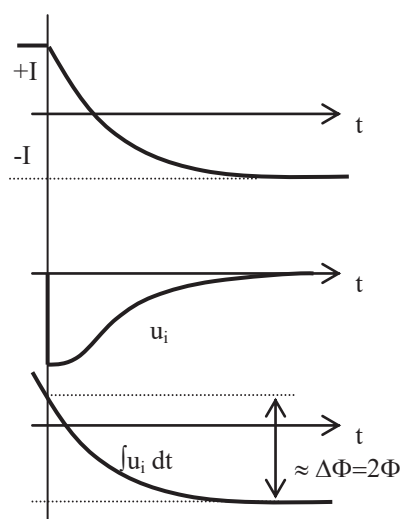
7. Měření základních magnetických a elektrických veličin

z velice tenkého drátku a je vložena na dno drážek tak, aby obepínala jeden zub, jednu pólovou rozteč, popř. jho stroje. Cívek je tedy zpravidla několik. Budící vinutí stroje se napájí ss proudem, který se pak překomutuje. Tím vznikne změna toku a do měřících cívek se naindukují napětí. Dle indukčního zákona platí

$$u_i = \frac{d\Psi}{dt} \cong k \frac{d\Phi}{dt} \Rightarrow \int_{-\Phi}^{+\Phi} d\Phi = \frac{1}{k} \int_0^\infty u_i dt, \quad (7.5)$$

takže po úpravě dostaneme

$$2\Phi = \frac{1}{k} \int_0^\infty u_i dt. \quad (7.6)$$



Obr. 7.5. Časový průběh komutovaného proudu, indukovaného napětí a jeho integrace

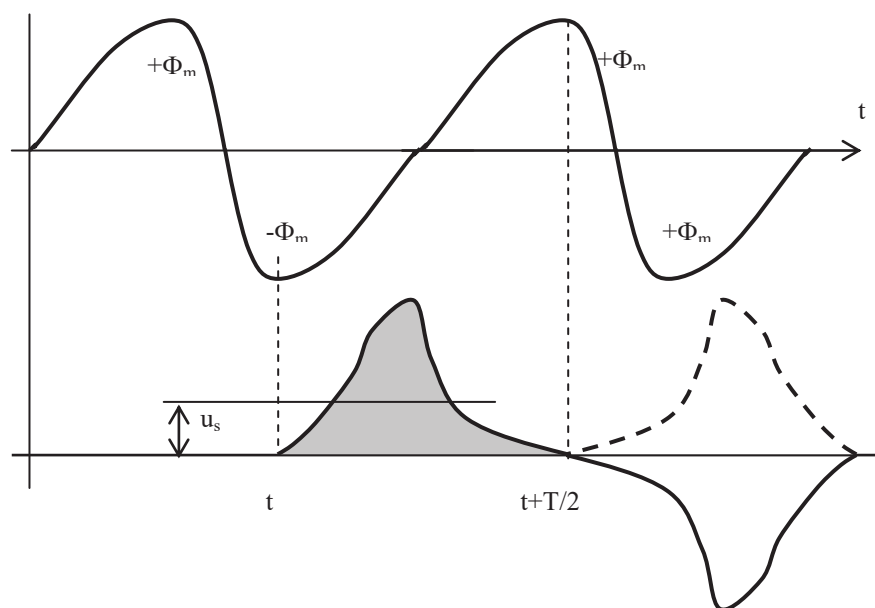
V cívce, rotující konstantní rychlostí, se indukuje ve stejnosměrném magnetickém poli napětí úměrné indukci a otáčkám $u_{ind} \approx B \cdot f$. Napětí z rotující cívky, používané pro měření B , se odebírá z kartáčků. Proměnný odpor kartáčků však ovlivňuje měřené napětí a tím i indukci. Tuto nevýhodu můžeme odstranit tak, že cívka se bude pouze natáčet kolem rovnovážné polohy a přívody k ní pak mohou být nepřerušované (kluzným kontaktem).

Měříme-li cívkovou sondou střídavý magnetický tok, který indukuje střídavé indukované napětí, musíme použít měřicí přístroj, který z principu měří střední hodnotu, abychom správně změřili amplitudu magnetického toku Φ_m i při deformovaném průběhu. (Takovýto přístroj může být cejchován v efektivních hodnotách. Stupnice pak platí pouze pro sinusový průběh.)

7. Měření základních magnetických a elektrických veličin



Pane Křížík, já také zasvětil život elektrině. Omylem jsem si sáhl na 230 V.



Obr. 7.6. Nesinusový průběh a jeho integrace

Platí rovnice

$$u_i = k \frac{d\Phi}{dt} \quad (7.7)$$

$$\int_{-\Phi}^{+\Phi} d\Phi = \frac{1}{k} \int_t^{t+\frac{T}{2}} u_i dt \quad (7.8)$$

$$2\Phi_m = \frac{1}{k} \frac{T}{2} U_s = \frac{1}{k} \frac{1}{2f} \frac{\pi}{\pi} U_s \quad (7.9)$$

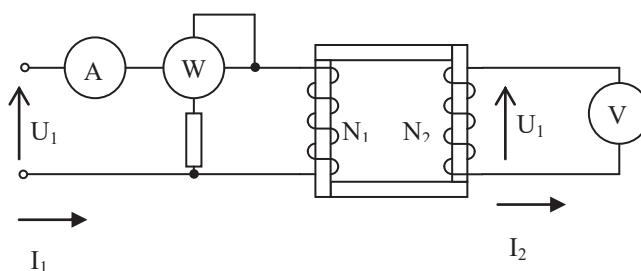
$$\Phi_m = \frac{\pi U_s}{2 \omega k} = \frac{\pi}{2} \frac{U_{ef}}{\frac{\pi}{2 \sqrt{2}} \omega k} = \frac{\sqrt{2} U_{ef}}{\omega k} \quad (7.10)$$

Epsteinův přístroj

Slouží k měření ztrát ve vzorku při průmyslové frekvenci. Vzorek plechů je vsunut do dutiny cívek primárního a sekundárního vinutí. Obě cívky jsou rozděleny na 4 sekce, do každé sekce se vloží 1/4 zkoušeného vzorku, takže se vytvoří uzavřený

7. Měření základních magnetických a elektrických veličin

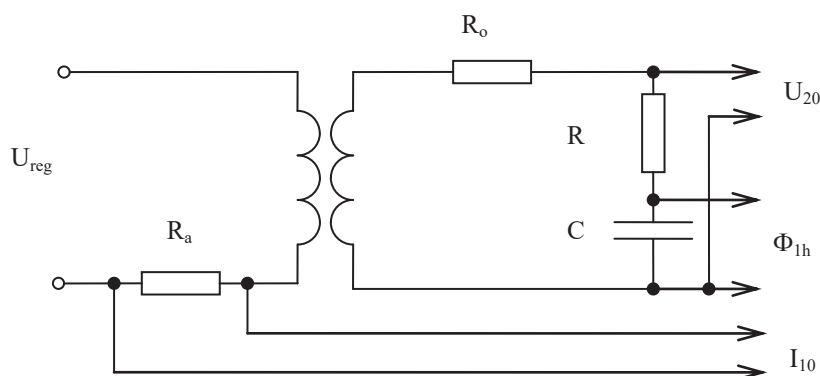
magnetický obvod. Primární a sekundární cívka má stejný počet závitů. Wattmetr měří kromě ztrát ve vzorku též spotřebu přístrojů a Jouleovy ztráty ve vinutí. Celková hmotnost vzorku je 10 kg plechů s hmotnostní tolerancí poloviny pásu o rozměrech 500x30 mm. Do každé cívky se vkládá 2,5kg svazek. Při měření neorientovaných plechů se polovina vystřihne ve směru válcování, polovina ve směru kolmém. Plechy se zvláště neizolují, ale nesmí mít otřepy, nerovné okraje apod. Magnetické vlastnosti plechů se mohou lišit až o 20% podle toho, z jaké části tabule pocházejí. Proto je velký Epsteinův přístroj vhodnější, než malý (1kg plechů). Tento přístroj se hodí pouze pro orientované plechy.



Obr. 7.7. Wattmetrické měření ztrát na Epsteinově přístroji

Osciloskopická metoda

Pomocí osciloskopu lze zjistit tvar hysterezní smyčky, popř. diferenciální permeabilitu.



Obr. 7.8. Použití osciloskopu pro stanovení hysterezní smyčky

Na odporu R_a se odebírá napětí úměrné proudu. To se přivede na x-ovou osu osciloskopu, protože to odpovídá intenzitě magnetického pole H . Ze sekundárního vinutí se odebírá napětí, úměrné změně magnetické indukce a vede se na integrační článek. Na kondenzátoru je napětí úměrné intenzitě magnetického pole. Toto napětí se přivede na y-ovou osu osciloskopu. Kde by činilo potíže galvanické spojení osciloskopu se sítí, je možno napájet osciloskop z oddělovacího

7. Měření základních magnetických a elektrických veličin

transformátoru nebo místo odporu R_a použít měřicí transformátor proudu. Pro správnou funkci musí být splněna podmínka $(R_0 + R) \gg \frac{1}{\omega C}$. Protože je výstupní impedance vysoká, můžeme zanedbat magnetizační účinek výstupního proudu i úbytek na rozptylové reaktanci.

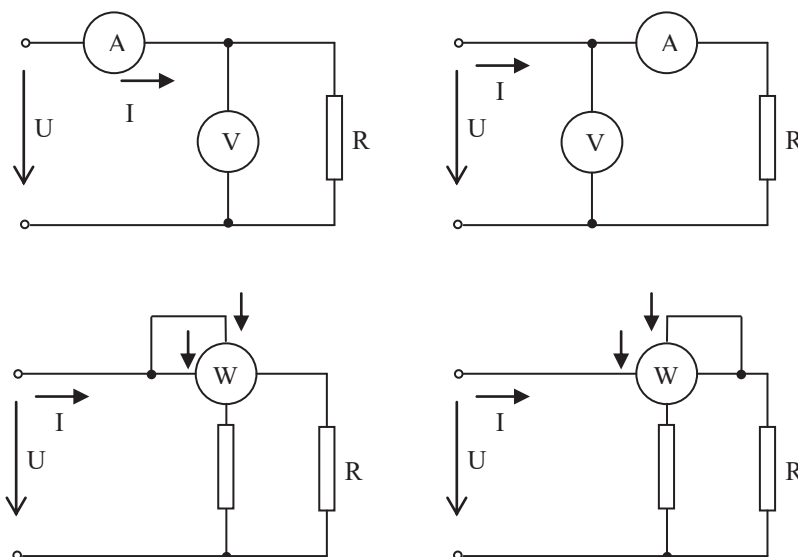
Číslicovými osciloskopy lze pomocí SW integrovat měřený signál, pak stačí snímat pouze indukované napětí.

Měření napětí a proudů

K měření lze použít přístroje, jejichž popis je náplní 3. kapitoly.

Měření výkonu elektrického proudu

Výkon ss proudu je $P=U \cdot I$, kde U je napětí na zátěži a I je proud zátěže. Nepřímou metodou lze výkon stanovit pomocí ampérmetru a voltmetru. Zanedbáme-li spotřebu V-metru v prvním nebo A-metru ve druhém případě, dopustíme se chyby měření, která je chybou metody a v tomto případě je lehce spočitatelná. Použijeme-li k měření elektrodynamický wattmetr, bude chyba měření menší. Je vhodné použít astatizovaný wattmetr, aby se vyloučil vliv cizích magnetických polí.



Obr. 7.9. Měření výkonu proudu V-metrem a A-metrem a pomocí wattmetru

Při měření činného výkonu v 1f síti se používá nejčastěji jednoho wattmetru. Při zapojení vstupní svorky napěťové cívky wattmetru před vstupní svorku proudové cívky je údaj wattmetru větší o spotřebu proudové cívky

$$P = P_z + R_p \cdot I_z^2. \quad (7.11)$$

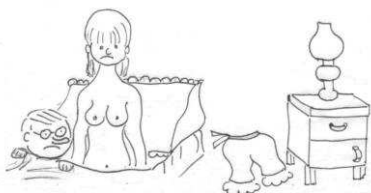
Při zapojení opačném je údaj větší o spotřebu napěťové cívky

$$P = P_z + \frac{U_z^2}{R_w}. \quad (7.12)$$

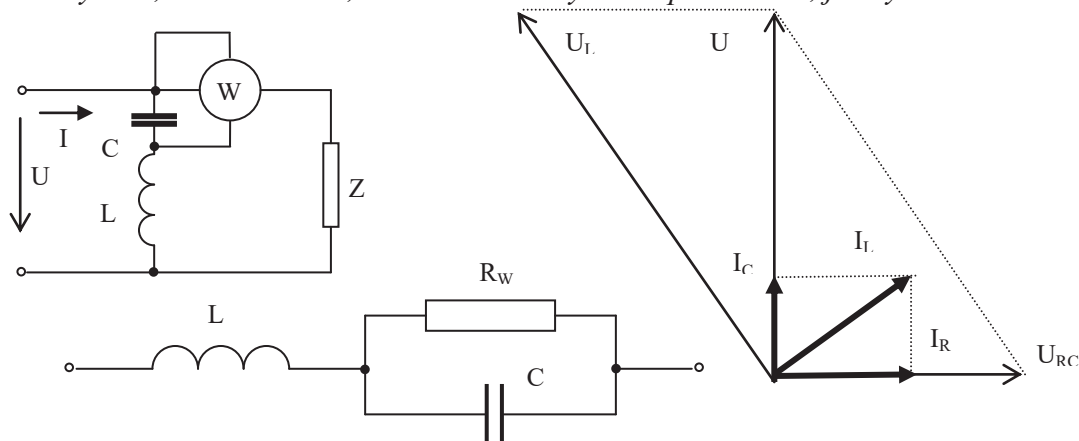
Protože je zpravidla udán odpor cívky napěťové a nikoliv proudové, je vhodnější používat zapojení druhé, protože pak chybu můžeme stanovit. Pro měření jalového

7. Měření základních magnetických a elektrických veličin

výkonu se používají různá umělá zapojení. Musíme posunout proud napěťové cívky o 90° , protože $Q = U \cdot I \cdot \cos(90^\circ - \varphi) = U \cdot I \cdot \sin \varphi$.

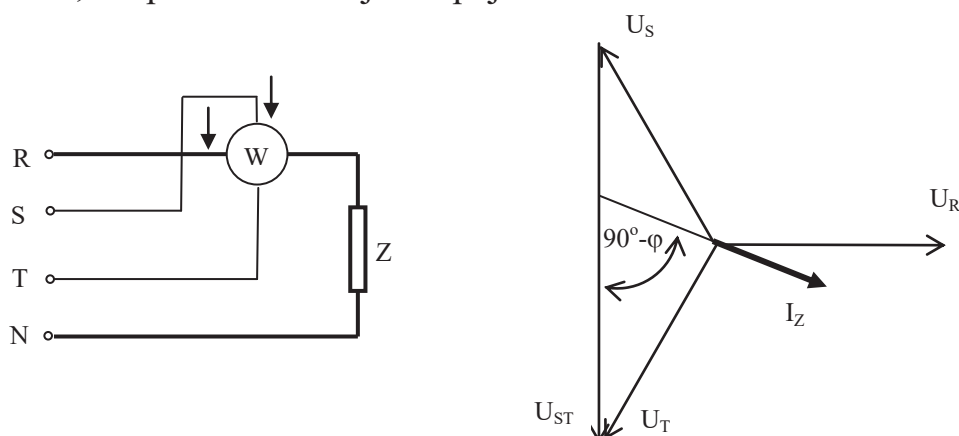


Nemysli si, Thomasi Alvo, že zase budu celý večer poslouchat, jak vynalézáš žárovku!



Obr. 7.10. Schéma umělého zapojení wattmetru, náhradní schéma a fázorový diagram

Pokud nás zajímá pouze jednofázový jalový výkon, ale máme k dispozici trojfázovou síť, lze použít následující zapojení.



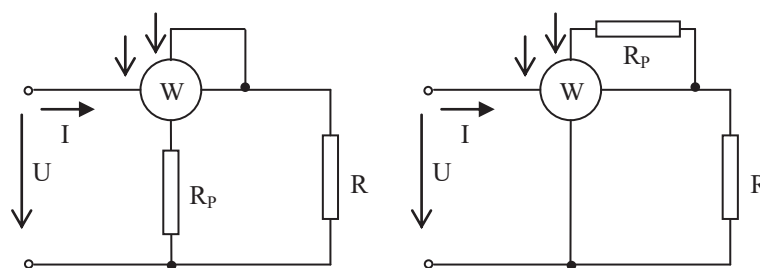
Obr. 7.11. Měření jednofázového jalového výkonu pomocí 3f sítě

Trojfázová soustava třívodičová nebo čtyřvodičová je nejčastějším druhem vícefázové sítě. Celkový výkon je dán součtem všech fázových výkonů. Je třeba dbát na správné zapojení vstupních svorek wattmetrů. Při měření např. jalového výkonu a při použití měřicích transformátorů proudu a napětí může dojít

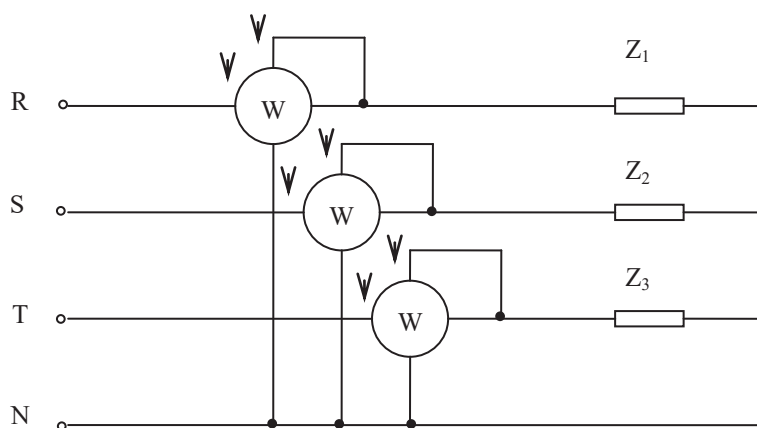
7. Měření základních magnetických a elektrických veličin

k omylům, kdy wattmetry sice ukazují výchylky, ale nesprávné. Např. při Aronově zapojení s transformátory proudu a napětí existuje 576 variant, ale pouze 24 je správných.

Na předchozích (ale i na následujících) obrázcích je zachycen pouze princip zapojení. Nejsou uvažovány prvky pro rozšíření rozsahů wattmetrů. Používají se transformátory proudové a napěťové. Napěťový rozsah wattmetru lze rozšířit i pomocí předřadného odporu. Odpor musí být zapojen tak, aby potenciál mezi měřicími cívkami wattmetru byl co nejmenší. Pokud odpor zapojíme k nesprávné svorce, je mezi cívkami wattmetru téměř stejné napětí, jako na zátěži. Potenciální rozdíl způsobuje rušivé momenty od elektrostatických sil. Proto musíme v případě potřeby přepólovávat vždy proudovou cívku, nikoliv napěťovou. Toto neplatí, pokud se používá alespoň jeden měřící transformátor k wattmetru. Pak jsou cívky odděleny galvanicky.

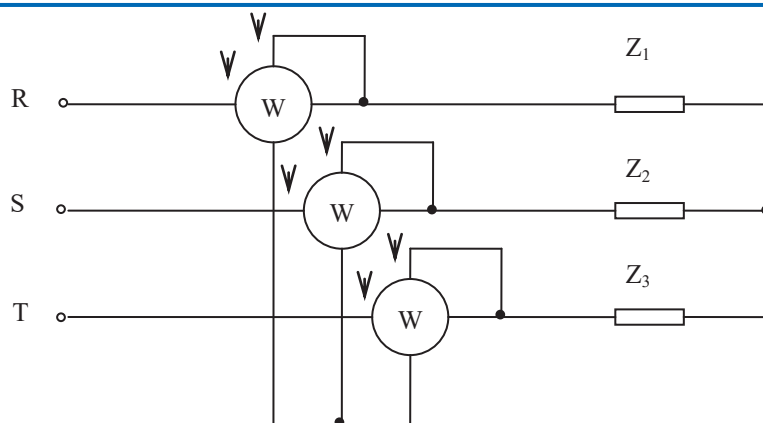


Obr. 7.12. Správné a nesprávné zapojení předřadného odporu



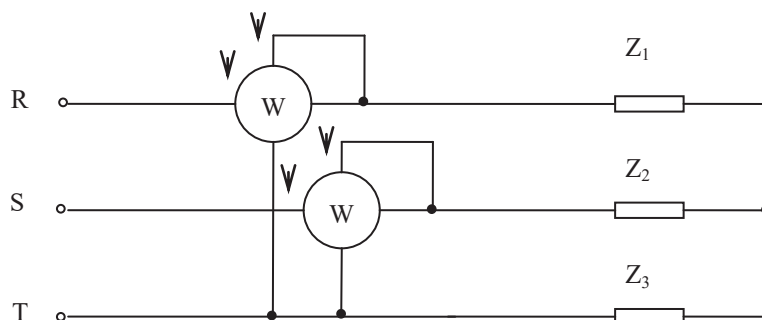
Obr. 7.13. Měření činného výkonu ve čtyřvodičové síti

7. Měření základních magnetických a elektrických veličin

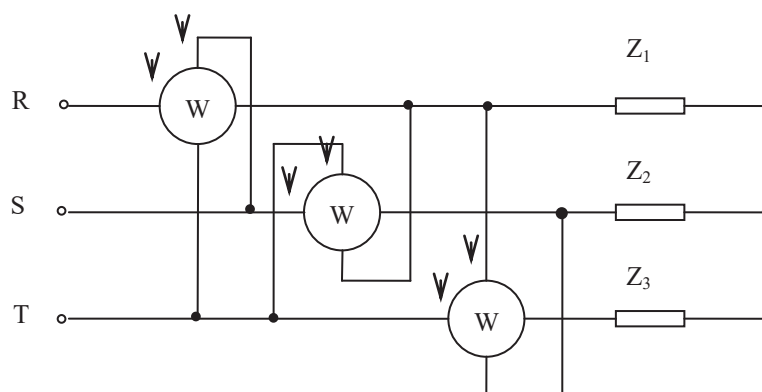


Obr. 7.14. Měření činného výkonu ve třívodičové síti (umělá nula)

Pokud hodláme použít zapojení s umělou nulou, a máme k dispozici pouze dva wattmetry, je nutné místo třetí napěťové cívky zapojit odpor o velikosti vnitřního odporu ostatních wattmetrů.



Obr. 7.15. Aronovo zapojení wattmetrů



Obr. 7.16. Měření jalového výkonu v třífázové soustavě

Pro měření v třífázových soustavách existují též speciální měřicí přístroje (např. QN 10), které sdružují do jednoho pouzdra wattmetr (speciální, dvojitý), voltmetr (přepínatelný na fázové nebo všechna tři sdružená napětí a tři ampérmetry. Pomocí přepínačů volíme rozsahy ampérmetrů a voltmetru, konstanta wattmetru je pak na nich závislá a zvyšuje se automaticky s nimi.

7. Měření základních magnetických a elektrických veličin

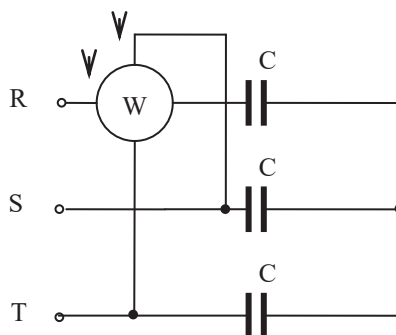
Při měření je vhodné mít zapojeny spolu s wattmetry též kontrolní voltmetry, ale hlavně ampérmetry. Napětí sítě totiž zpravidla známe, takže přetížení napětového rozsahu wattmetru nehrozí. Klesající výchylka wattmetru však svádí ke zmenšení jeho proudového rozsahu. Pokles výchylky může být způsoben klesajícím účinníkem a nikoliv proudem. Kontrolní ampérmetry nás o velikosti proudu informují.

Měření sledu fází

Sled fází nízkého napětí lze stanovit zkoušečkou (např. SN3). Připojíme-li ji na dvě po sobě jdoucí fáze, při dotyku prstu s kontaktním nýt看em doutnavka svítí.

Použít můžeme také wattmetr. Zátěží jsou tři shodné kondenzátory zapojené do hvězdy. Souhlasí-li zvolený sled fází se skutečným – měřeným sledem fází, musí wattmetr ukazovat na opačnou stranu (záporná výchylka), aby byl jalový výkon záporný. Nesouhlasí-li sled fází s předpokládaným sledem fází, wattmetr ukazuje výchylku.

Sled fází se asi nejjednodušeji zjistí měřičem, označeným názvem USLO. Jedná se malý indukční stroj, jehož rotor (kotouček se šipkou) se roztočí ve směru šipky, pokud skutečný sled fází souhlasí s předpokládaným.



Obr. 7.17. Měření sledu fází wattmetrem

Existují též digitální přístroje pro určení sledu fází. Přítomnost všech fází je indikována trojicí doutnavek, smysl sledu fází rozsvícením příslušné LED diody. Fyzický smysl točení stroje je možné dokonce určit i v případě, že hřídel není vyvedena (např. oběhové čerpadlo topné vody, které je integrováno i s motorem do jednoho celku). Měřič stačí přiložit i bez připojených přívodů k povrchu stroje, pak se rozsvítí příslušná LED dioda.

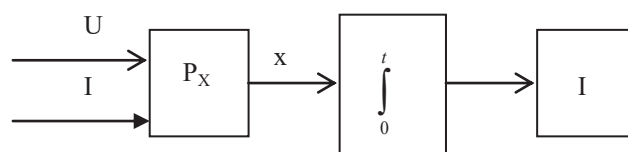
Měření elektrické energie

Nejběžnějším přístrojem pro měření elektrické energie je indukční elektroměr. Při nízké pořizovací ceně má dobré vlastnosti, jako malou základní chybu, spolehlivost, robustnost a velkou přetížitelnost. Vlivem vyšších harmonických v síti (od výkonové elektroniky) vzniká přídavná chyba indukčních elektroměrů. Tyto klasické elektroměry nelze vůbec použít:

7. Měření základních magnetických a elektrických veličin

- v soustavách vvn, kde je malý počet měřících míst a žádá se proto vyšší přesnost měření energie
- při exportu a importu elektrické energie, rovněž je požadována vysoká přesnost měření
- při výskytu ss složky
- při kalibračních měření odběru energie

Klasické indukční elektroměry jsou postupně nahrazovány elektronickými. Tyto elektroměry jsou schopny též samočinně odeslat naměřená data (digitální signál po rozvodné síti), ohlásit vlastní poruchu apod., takže vyžadují pouze minimální pozornost.



Obr. 7.18. Princip elektronického elektroměru

Používá se převodník výkonu P_x na veličinu x , kterou může být frekvence, proud, napětí apod. Veličina se integruje a zobrazuje na indikátoru. Nejčastěji je veličina x dána frekvencí impulzů a integrátorem je čítač. Indikátor pak může kromě zobrazování zajišťovat též data pro obvody, které data přenesou k dalšímu zpracování.

Použitím impulzního elektroměru je možné hlídat tzv. čtvrt hodinové maximum, při jehož překročení platí odběratel pokuty. Elektroměr může vyslat naměřená data do PC. Regulace čtvrt hodinového maxima je prováděna odepínáním jednotlivých spotřebičů na základě měření okamžitého příkonu a odhadu celkové práce odebrané na konci čtvrt hodiny. Výběr spotřebiče nebo jejich skupiny pro vypnutí se provádí na základě parametrů popisujících daný spotřebič.

Statické elektroměry se vyrábějí s digitálním LCD displejem nebo s mechanickým počítadlem. Změřenou spotřebu lze pak na elektroměru odečíst i v případě výpadku sítě. V případě LCD displeje se musí nejprve dodávka elektriny obnovit, pak se naměřené údaje v paměti opět zobrazí.

Na elektroměru je zpravidla k dispozici i pulzní výstup, který poskytuje např. 10 000 impulzů na 1 kWh, ale lze jej naprogramovat i na jiné hodnoty.

Přímé měření elektroměrem lze realizovat asi do 100A. Při vyšších odběrech se použijí měřicí transformátory proudu.

Elektroměry se vyrábějí v jednofázovém (dvouvodičové připojení) a třífázovém provedení (čtyřvodičové připojení). Pro případ odběru i dodávky elektrické energie do sítě se tyto elektroměry konstruují jako čtyřkvadrantové, popř. se měří i odběr a dodávka jalové složky.

Elektroměry jsou velice citlivé, standardně začínají měřit již od asi 15 mA. Zpravidla jsou konstruovány pro několik tarifů, které se přepínají díky vestavěnému modulu HDO. Elektroměr má pak vestavěno i několik výstupních relé pro ovládání (blokování) vybraných skupin spotřebičů.

Měření frekvence

Lissajousovy obrazce na obrazovce osciloskopu udávají poměr měřené a známé frekvence, přivedené na druhý kanál osciloskopu. Obrazec se nepohybuje jen tehdy, je-li poměr frekvencí dán podílem celých čísel. Tento podíl se určí jako poměr počtu průsečíků s osou x a s osou y. Pak bude

$$f_x = \frac{x}{y} f_n. \quad (7.13)$$

Je-li poměr frekvencí vyšší než 10, je již obrazec příliš složitý a tato metoda nevhodná. Dnes se tato metoda prakticky nepoužívá.

Číslicové měření frekvence je založeno na principu čítače, který udává počet impulzů za jednotku času. Čítač zpravidla obsahuje generátor přesného kmitočtu s krystalem křemene.

Měření fázového posuvu

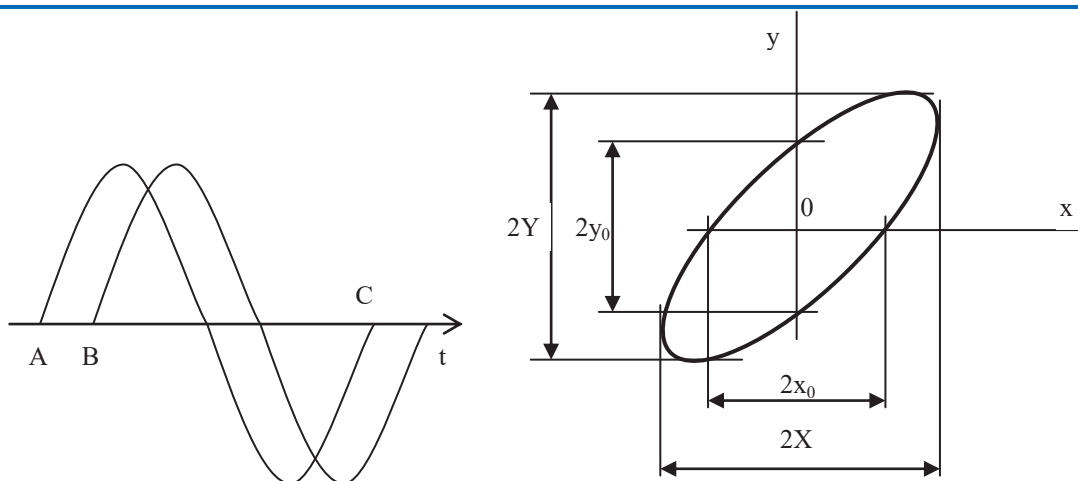
Fázový posuv dvou časových (nejčastěji harmonických) průběhů se zjišťuje např. v energetice, kde se jedná zejména o posuv napětí a proudu (účinník $\cos\varphi$), ale i v přenosové technice, radiolokaci apod., kde se zjišťuje posuv dvou obecných napětí. V těchto případech je frekvenční rozsah velmi široký. Přístroje se nazývají fázoměry a jsou to poměrové přístroje (elektrodynamické, ferodynamické a elektrodynamické). Nulu mají uprostřed a měří v rozsahu $\pm 90^\circ$, pro účinník $\cos\varphi$ od -1 do $+1$, případně ještě rozlišují odběr a dodávku.

Fázový posuv lze samozřejmě měřit na osciloskopu. Při lineární časové základně přivedeme na dva kanály měřené signály a pomocí dílků na obrazovce určíme délku periody a fázový posuv

$$\varphi = 2\pi \frac{\overline{AB}}{AC}. \quad (7.14)$$

Můžeme též jedno napětí připojit k horizontální ose osciloskopu, druhé na vertikální osu a z rozměrů elipsy určit fázový posun. Platí

$$\sin \varphi = \frac{x_0}{X} = \frac{y_0}{Y}. \quad (7.15)$$



Obr. 7.19. Měření fázového posunu osciloskopem při použití lineární a harmonické časové základny

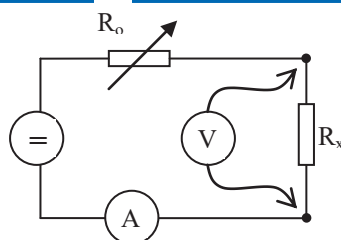
Při použití PC zásuvné měřicí karty se přivedou signály na její vstupy a některé programy, dodávané spolu s kartou, jsou schopny provést kompletní vyhodnocení. Jedná-li se např. o měření na 6 kanálech, přičemž se jedná o signály úměrné napětí a proudu v třífázové síti, je program ScopeWin 2 schopen provést tzv. energetickou statistiku. Spočítá činný, jalový a zdánlivý výkon, posun napětí, účinník, periodu, frekvenci, amplitudu apod. Je však třeba současně poznamenat, že se program orientuje podle průchodu signálu nulou. To může působit problémy zejména tehdy, je-li hlavní signál silně ovlivněn např. třetí harmonickou. Pak výpočet periody (50Hz) a dalších hodnot selže.

V současné době jsou na trhu běžně dostupné přístroje, které sdružují několik „klasických“ přístrojů do jednoho. Nejde zde pouze o multimetry, ale i o speciální elektronické přístroje, např. pro analýzu třífázového výkonu, FFT analýzu apod. Všechny tyto moderní přístroje umožňují přenos dat do PC (GPIB, RS232,...).

Měření odporů

Měření malých odporů může být ovlivněno přechodovými odpory, odpory přívodů, případně termoelektrickými napětími. Proto se používá čtyřvodičové zapojení. Týká se to i měření odporů vinutí strojů, zpravidla se jedná o velmi nízké hodnoty. Použitelná je Ohmova metoda. Voltmetr je na špičkách a napětí (úbytek na vinutí) se odpíchne. Voltmetr je nutné odpojit dříve, než dojde k přerušení proudu. I pokud proud snížíme (proudovým zdrojem, vloženým odporem) na malou hodnotu, vzniká na indukčnosti při odpojení přepětí, které voltmetr ohrožuje. Napájecí zdroj napětí s ochranným odporem můžeme nahradit zdrojem proudu. Procházející proud by neměl přesáhnout 20% jmenovité hodnoty, aby nedošlo ke změně odporu vlivem ohřátí vinutí.

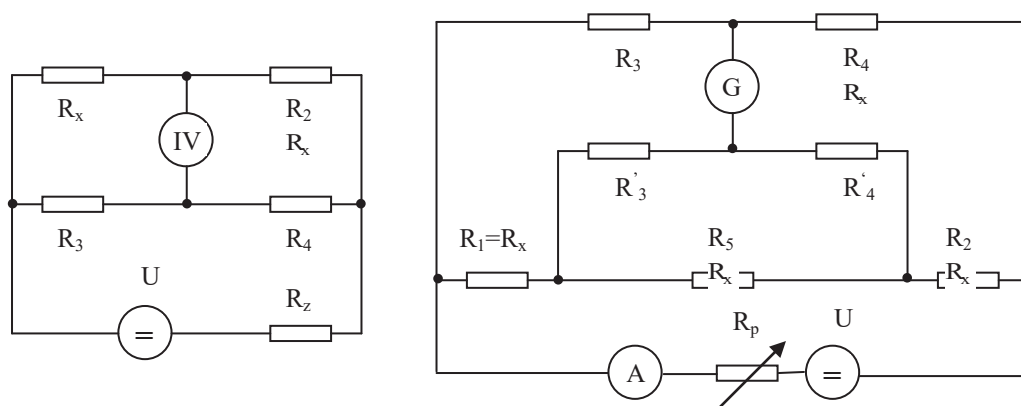
7. Měření základních magnetických a elektrických veličin



Obr. 7.20. Ohmova metoda pro měření malých odporů

Měření středních odporů lze provádět běžnými měřicími metodami. Rušivé vlivy, které je třeba uvažovat při měření vysokých a malých odporů, jsou téměř zanedbatelné. Je však třeba znát charakter zátěže. Některé digitální přístroje používají k měření odporů místo ss proudu např. signál o frekvenci 1kHz. Pak si musíme uvědomit, že při měření induktivní zátěže nezměříme její odpor, ale impedanci.

Měření velkých odporů nelze provádět běžnými metodami, protože citlivost měřicích přístrojů je nedostatečná a jejich vnitřní odpor srovnatelný s odporem měřeným. Jde zejména o měření izolačních odporů. Tyto odpory se měří při vysokém napětí, které si vyrobíme pomocí generátoru vestavěného do přístroje. Jde o přístroje Megmet, konstruovány jsou na různá napětí. K měření se používají též můstky, např. Wheatsonův nebo Thomsonův.



Obr. 7.21. Wheatsonův a Thomsonův můstek

Wheatsonův můstek se používá ve vyváženém stavu k měření odporů, v nevyváženém stavu pak v regulační technice k měření neelektrických veličin. Indikátorem vyvážení je nejčastěji magnetoelektrický galvanometr. Thomsonův můstek (dvojitý můstek) se používá k měření malých odporů, protože umožňuje odstranit vliv přechodových odporů a přívodů. Odpory R_1 a R_2 jsou malé a na jejich potenciální svorky je připojen obvod, složený z podstatně větších rezistorů. Odpor R_5 je odpor spojovacího kabelu a přechodových odporů na proudových svorkách odporů R_1 a R_2 .

7. Měření základních magnetických a elektrických veličin

Měření kapacit

K měření lze použít modifikovanou Ohmovu metodu. Na zdroj st napětí o známé frekvenci je zapojen kondenzátor. Impedanci ampérmetru můžeme zanedbat vzhledem k impedanci kondenzátoru. Má-li kondenzátor malý ztrátový činitel, je pak přibližně

$$C_x = \frac{I}{\omega U}. \quad (7.16)$$

Je-li ztrátový činitel větší než 10^{-2} , je nutné korigovat údaj ampérmetru. Proud měřený ampérmetrem je

$$I = I_c \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} \quad (7.17)$$

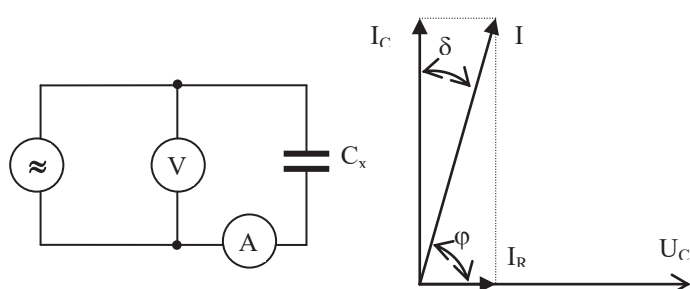
a kapacita takto stanovená je

$$C'_x = \frac{I}{\omega U} = \frac{I_c}{\omega U} \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}. \quad (7.18)$$

Měřená kapacita je potom rovna

$$C_x = \frac{I_c}{\omega U} = \frac{C'_x}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}}. \quad (7.19)$$

Ztrátový činitel je možno určit velmi citlivým wattmetrem.



Obr. 7.22. Měření kapacity kondenzátoru V-metrem a A-metrem a fázorový diagram paralelního náhradního schématu kondenzátoru

Přesnost měření je ovlivněna tvarem křivky harmonického napětí a přesností přístrojů. Metoda je vhodná pro provozní měření, přesnost je $(1 - 3)\%$.

Pro můstkové měření kapacit se používá Wheatsonův můstek, ovšem napájený střídavým napětím a též indikátor vyvážení již nemůže být tvořen galvanoměrem. Můstek se musí vyvážit pro reálnou i imaginární složku, takže musí mít proměnné minimálně dva prvky. Bližší rozbor vyvažování můstků a jejich speciálních druhů je nad rámec tohoto textu.

Měření indukčnosti

Měření lze opět provést (jako u měření kapacit) pomocí voltmetru a ampérmetru, na principu Ohmovo metody. Zde již je třeba věnovat pozornost impedanci cívky a v případě malých impedancí zařadit voltmetr přímo na svorky cívky (za ampérmetr). Korekce na spotřebu přístrojů by zde byla složitější, protože napětí a

7. Měření základních magnetických a elektrických veličin

proudy jsou vůči sobě fázově posunuty. Změřením proudu a napětí určíme impedanci

$$Z = \frac{U}{I} = \sqrt{R_x^2 + \omega^2 L_x^2}. \quad (7.20)$$

Chceme-li určit indukčnost, musíme znát odpor cívky R_x . Tuto metodu lze použít pouze pro vzduchové cívky a pro frekvence, kdy se neuplatní povrchový jev ve vodičích. Indukčnost cívky je pak

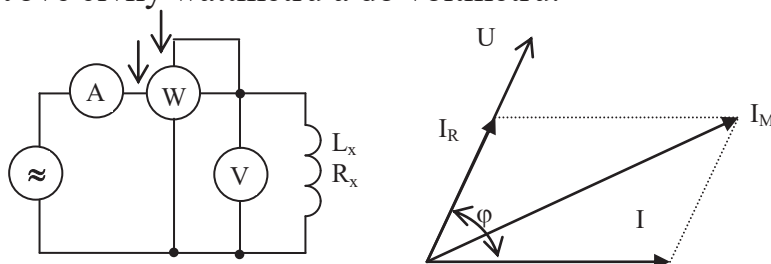
$$L_x = \frac{1}{\omega} \sqrt{Z_x^2 - R_x^2} = \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{U^2}{I^2} - R_x^2}. \quad (7.21)$$

Přesnost je opět ovlivněna tvarem křivky napájecího napětí a je asi 5%. Jedná se tudíž o provozní měření.

Cívky lze měřit také V-metrem, A-metrem a W-metrem. Pak měříme kromě napětí a proudu také příkon cívky. Indukčnost se určí ze vztahu

$$L_x = \frac{1}{\omega} \sqrt{Z_x^2 - \left(\frac{P}{I^2}\right)^2} = \frac{1}{\omega I} \sqrt{U^2 - \left(\frac{P}{I}\right)^2}. \quad (7.22)$$

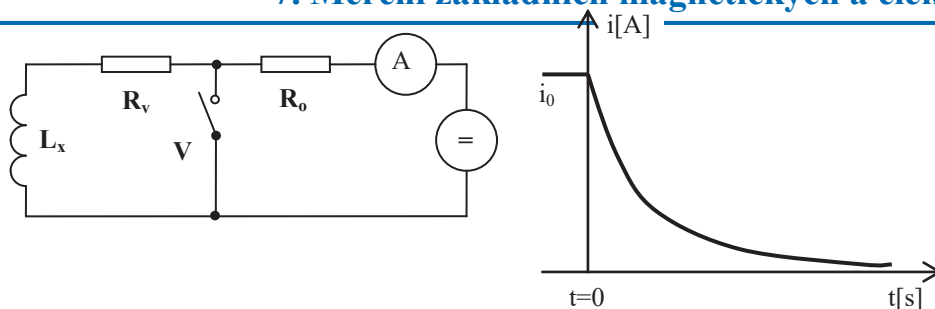
Tato metoda je zvláště vhodná pro měření větších indukčností a cívek s feromagnetickým jádrem. U těchto cívek je indukčnost závislá na procházejícím proudu. Nechceme-li zanedbat spotřebu přístrojů, uvažujeme, že wattmetr měří navíc spotřebu voltmetru a své napěťové cívky. Ampérmetr měří navíc proud tekoucí do napěťové cívky wattmetru a do voltmetru.



Obr. 7.23. Schéma zapojení a fázorový diagram pro měření wattmetrem

Ve skutečnosti není indukčnost konstantní, ale závisí na magnetické indukci a kmitočtu procházejícího proudu. Je proto vhodné ji měřit při několika kmitočtech, např. 10, 20, 30, 40 a 50 Hz. Indukčnost při kmitočtu 0 Hz lze stanovit na základě statické definice indukčnosti.

7. Měření základních magnetických a elektrických veličin



Obr. 7.24. Měření indukčnosti dle statické definice a zanikající proud v cívce

Při vypnutí spínače V necháme protékat cívkou ss proud až do ustáleného stavu. Pak sepneme spínač V a zaznamenáme přechodový děj, tj. vybíjecí proud. Lze např. snímat osciloskopem napětí na známém odporu R_v . Indukčnost se stanoví integrací plochy pod křivkou. Současně je třeba znát odpor obvodu nakrátko. Platí vztah

$$L = S \frac{R}{I_0} m_I m_t, \quad (7.23)$$

kde L je indukčnost [H],
 S plocha pod křivkou [mm^2],
 I_0 počáteční hodnota proudu [A],
 R je odpor obvodu nakrátko [Ω]
 m_I měřítko proudu [$\text{A} \cdot \text{mm}^{-1}$],
 m_t měřítko času [$\text{s} \cdot \text{mm}^{-1}$].

Odpor R_0 je ochranný odpor zdroje před účinky zkratového proudu. Porovnáme-li hodnoty indukčnosti, změřené při ss a st proudu, zjišťujeme, že první z nich jsou obvykle vyšší. Při měření st proudem se měří totiž při proudech, které jsou zlomkem jmenovitého ss proudu.

Měření vzájemné indukčnosti

Lze použít i metody pro měření vlastní indukčnosti. Zapojíme-li cívky do série tak, aby se jejich magnetická napětí sčítala, pak výsledná indukčnost této kombinace je

$$L_a = L_1 + L_2 + 2M_x. \quad (7.24)$$

Pak provedeme druhé měření, ale u jedné cívky zaměníme přívody. Magnetická pole se budou odečítat a výsledná indukčnost bude nyní

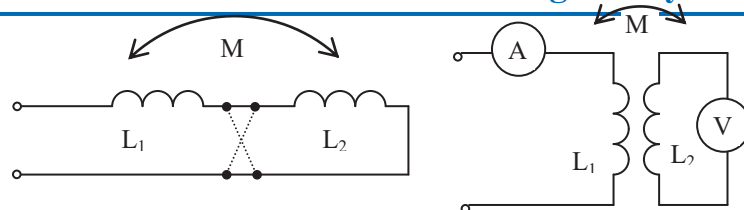
$$L_b = L_1 + L_2 - 2M_x \quad (7.25)$$

Vzájemná indukčnost pak bude

$$M_x = \frac{L_a - L_b}{4}. \quad (7.26)$$

Metoda je vhodná pro přibližně stejné indukčnosti bez feromagnetického jádra, protože se neměří při stejném proudu a tedy i indukčnosti jsou při obou měřeních rozdílné.

7. Měření základních magnetických a elektrických veličin



Obr. 7.25. Měření vzájemné indukčnosti metodou vlastních indukčností a pomocí V-metru a A-metru

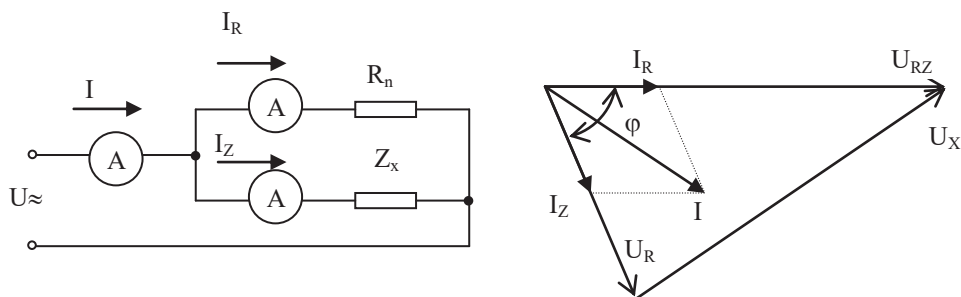
Druhá metoda pro stanovení vzájemné indukčnosti je také na obr. 7.25. Primární cívka se připojí na harmonické napětí a ampérmetrem měříme procházející proud. Na sekundární cívce měříme voltmetrem s velkým vnitřním odporem indukované napětí. Přibližně platí vztah

$$M_x \cong \frac{U_2}{\omega I_1}. \quad (7.27)$$

Metoda je vhodná pro provozní měření, nelze počítat s velkou přesností. Pro měření indukčností existují i můstkové metody (Maxwell – Wienův můstek, Owenův můstek).

Měření impedance třemi ampérmetry

Obecná zátěž je zapojena paralelně se známým odporem R_n a třemi ampérmetry měříme proudy v obou větvích i proud celkový, který je jejich vektorovým součtem. Impedance ampérmetrů musí být zanedbatelně malé proti měřené impedanci Z_x a odporu R_n .



Obr. 7.26. Měření obecné impedance třemi ampérmetry, schéma zapojení a fázorový diagram

Platí vztah pro výpočet odporové složky měřené impedance

$$R = Z_x \cdot \cos \varphi_Z = \frac{R_n}{2I_Z^2} (I^2 - I_Z^2 - I_R^2) \quad (7.28)$$

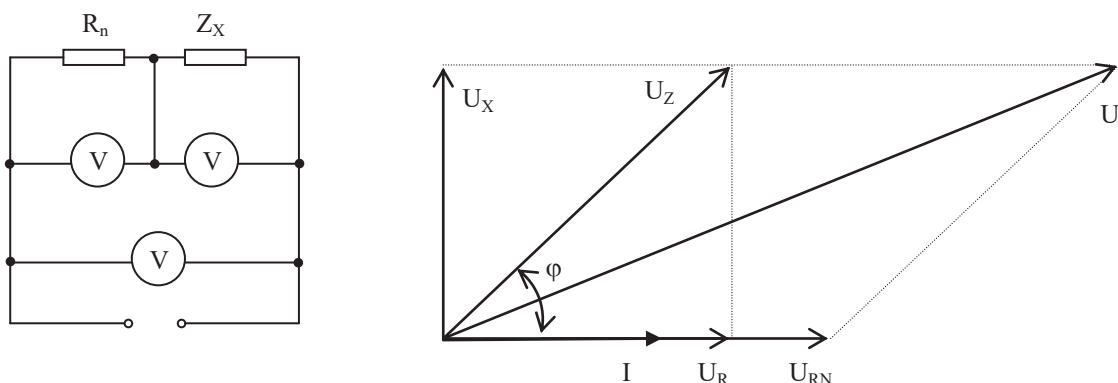
a reaktanční složky

$$X = Z_x \cdot \sin \varphi_Z = \frac{R_n}{2I_Z^2} \sqrt{4I_Z^2 I_R^2 - (I^2 - I_Z^2 - I_R^2)}. \quad (7.29)$$

Z hlediska přesnosti je nejvýhodnější, když jsou proudy I_R a I_Z přibližně stejné a fázový posuv je velký. Metoda se hodí pro měření cívek s feromagnetickým jádrem, protože můžeme měřit indukčnosti při různých proudtech.

Měření impedance třemi voltmetry

Měřená impedance Z_X je zapojena v sérii se známým odporem R_n . Třemi voltmetry se měří napětí na odporu, na impedanci a napětí celkové. Pokud nejsou k dispozici tři shodné voltmetry, použijeme jeden, který přepínáme.



Obr. 7.27. Měření impedance třemi voltmetry. Schéma zapojení a fázorový diagram

Pro složky R a X měřené impedance obdržíme

$$R = \frac{R_n}{2U_Z^2} (U^2 - U_Z^2 - U_{RN}^2) \quad (7.30)$$

$$X = \frac{R_n}{2U_Z^2} \sqrt{4U_Z^2 U_{RN}^2 - (U^2 - U_Z^2 - U_{RN}^2)}. \quad (7.31)$$

Opět je nejvýhodnější velký fázový posuv a přibližně stejná napětí U_Z a U_{RN} . Voltmetry musí mít vysoký vstupní odpor. Běžné voltmetry se hodí pro měření malých indukčností. Pro měření kapacit je tato metoda nevhodná, protože nelze zanedbat vnitřní odpor voltmetru vzhledem k vysoké impedanci kondenzátoru.

Otázky k tématu:

- Lze Hallovo sondou měřit střídavé pole?
- Lze Rogowskiho potenciometrem měřit elektrický proud?
- Jak je možné zabránit zkratu mezi kanály osciloskopu při měření hysterezní smyčky?
- Proč nelze použít Aronova zapojení W-metrů ve 4-vodičové síti?
- Jak lze po určení sledu fází identifikovat jednotlivé fáze L1-L2-L3?
- Můžeme zaznamenat statickým elektroměrem odběr se stejnosměrnou složkou?



7. Měření základních magnetických a elektrických veličin

- *Můžeme při měření indukčnosti metodou třech V-metrů použít pouze jediný V-metr?*



Správné odpovědi

- *Lze Hallovo sondou měřit střídavé pole?*

Ano, je to možné. Při DC pomocném proudu bude ovšem Hallovo napětí též střídavé.

- *Lze Rogowskiho potenciometrem měřit elektrický proud?*

Ano, lze. Konce potenciometru přiložíme na sebe a kolem vodiče, kde chceme měřit proud, vytvoříme tzv. Rogowskiho kruh. Nelze takto měřit DC proud, resp. zjistíme pouze jeho proměnnou složku.

- *Jak je možné zabránit zkratu mezi kanály osciloskopu při měření hysterezní smyčky?*

Musíme zajistit galvanické oddělení proudové sondy. Místo měřicího odporu použijeme např. snímač LEM nebo galvanicky oddělenou proudovou sondu.

- *Proč nelze použít Aronova zapojení W-metrů ve 4-vodičové síti?*

Zapojení použít lze, ale pouze v přesně vyvážené a symetrické síti, kdy nulovým pracovním vodičem neteče žádný proud. Pokud se na to spolehnout nelze, nebude měření správné.

- *Jak lze po určení sledu fází identifikovat jednotlivé fáze L1-L2-L3?*

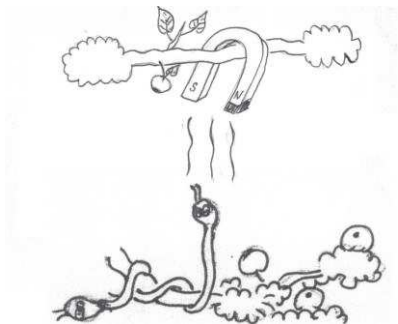
Z nadřazeného rozvaděče, kde fáze již identifikovány jsou, si pomocným vodičem přivedeme napětí známé fáze k rozvaděči, kde fáze hodláme identifikovat. Měříme napětí identifikovaných přípojníc proti pomocnému vodiči. Kde naměříme (rozdíl napětí) nulovou hodnotu, jedná se stejnojmennou fázi jako v nadřazeném rozvaděči.

- *Můžeme zaznamenat statickým elektroměrem odběr se stejnosměrnou složkou?*

Ano, statický elektroměr je vybaven Hallovými sondami jako snímači, takže na DC složku je citlivý.

- *Můžeme při měření indukčnosti metodou třech V-metrů použít pouze jediný V-metr?*

Ano, dokonce je to výhodnější, protože měření má pak vyšší přesnost. Jeden voltmetr postupně připojujeme k naznačeným uzlům obvodu.



Proboha řekni mi, co tě pořád na tu horní větev tak přitahuje?

8. Zkoušky dielektrické odolnosti a měření vlastností dielektrik



Předpokládaný čas: 45 min



Po prostudování tématu budete:

- Umět měřit izolační odpory a vypočítat polarizační index
- Umět popsat zkoušky přiloženým napětím
- Umět popsat zkoušku indukovaným napětím
- Mít přehled o teplotních třídách izolačních materiálů

Elektrická zařízení rozdělujeme z hlediska bezpečnosti do několika skupin. Jedná se o zařízení

- třídy 0, pouze s pracovní izolací
- třídy 1, s pracovní izolací a ochranou neživých částí před nebezpečným dotykovým napětím
- třídy 2, s pracovní a doplňkovou izolací (dvojitá izolace)
- třídy 3, přístroje na malé napětí (PELV, SELV, FELV)

Izolační zkouška se provádí u všech výrobků, obsahujících elektrické vinutí. Jde nejen o elektrické stroje, ale i např. o topné odpory, vodiče, spínací přístroje apod. Zvláštní požadavky jsou kladeny na elektrické stroje a přístroje. Jde zejména o transformátory a spínací přístroje vvn. Ve zvlášť důležitých případech se dělají také mezioperační zkoušky již v průběhu výroby.

Měření izolačních odporů se má provést jako jedna z úvodních zkoušek nového stroje a opakovat po zapojení stroje ke zkouškám, včetně připojovacích kabelů. Lze takto odhalit hrubou závadu v izolačním systému stroje. Měří se přístrojem MEGMET na příslušné napětí, 100V - 10kV. Měření izolačních odporů by se mělo opakovat po každé izolační zkoušce. Izolační odpor je veličina značně závislá na teplotě, vlhkosti, napětí a velikosti stroje. Proto bychom měli uvést u měření i stav stroje, teplotu vinutí i okolního vzduchu a relativní vlhkost vzduchu. Velikost izolačního odporu rozhoduje u nových strojů, zda mohou být připojeny na jmenovité napětí, u generátorů, zda mohou být nabuzeny, nebo jestli se může provést zkouška přiloženým napětím. Zmenšení izolačního odporu může být způsobeno znečištěním povrchových cest, hlavně u vývodů vinutí a zejména pak

8. Zkoušky dielektrické odolnosti a měření vlastností dielektrik

celkovým zvlhnutím izolace. Mechanické porušení izolace (zlomení, proříznutí) se většinou na izolačním odporu neprojeví, měříme-li napětím do 2 500V.

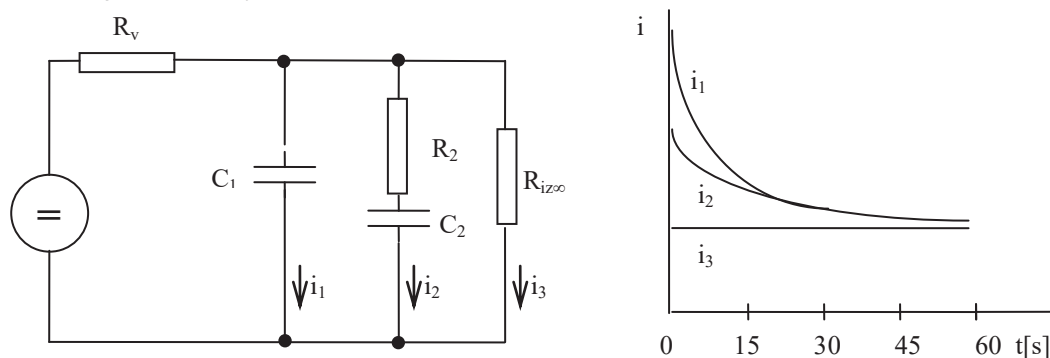
Minimální izolační odpor se určuje dle přibližného vztahu

$$R_{iz} = \frac{U_n}{\frac{S_n}{100} + 1000} [M\Omega] \quad (8.1)$$

kde U_n je jmenovité sdružené napětí [V], S_n je zdánlivý výkon [kVA]. Vzorec platí pro provozní teplotu vinutí. Při 20°C by měl být asi 5x větší. Vztah je přibližný, protože nerespektuje teplotu vinutí, velikost stroje ani třídu izolace. Tuto hodnotu bychom však měli odměřit jako minimální při nepřetržitém měření (nad 60s, viz polarizační index).

Polarizační index se častěji zjišťuje u velkých strojů. Izolační odpor není jednoznačným kritériem pro posouzení vlhkosti izolace. Lépe ji postihuje právě polarizační index. Měření může být ovlivněno přetížením zdroje megaohmmetru. Velká kapacita a malý svodový odpor vyžaduje výkonný zdroj. Doporučuje se použít přístroj s motorickým pohonem.

Vinutí představuje svojí izolací nejen svodový odpor, ale i kapacitu, kde jednou elektrodou je vlastní vinutí, dielektrikem je jeho izolace a druhou elektrodou je železo. Přiložíme-li ss napětí mezi vodiče vinutí a železo, protékající proud bude mít následující složky:



Obr. 8.1. Náhradní schéma izolace vinutí a časový průběh proudu dielektrikem

Proud i_1 je kapacitní proud, potřebný k nabití kondenzátoru o kapacitě C_1 , který je omezen jen vnitřním odporem zdroje a zaniká nejrychleji. Proud i_2 je absorpční proud, jeho velikost je omezena $R_v + R_2$, zaniká za několik minut nebo až několik desítek minut. Fyzikálně se vysvětluje polarizací dielektrika. Proud i_3 je svodový proud, na čas nezávislý. Proud i_1 a i_2 jsou na zvlhnutí izolace nezávislé, proud i_3 ano.

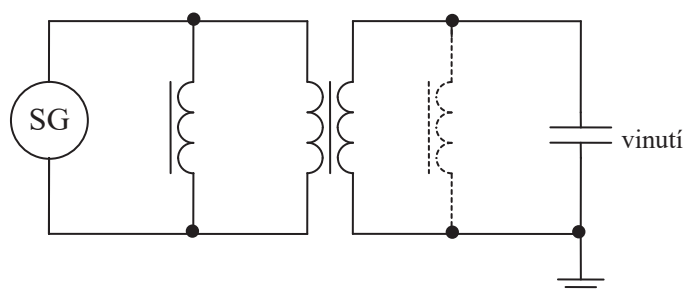
V praxi je zavedeno měření izolačního odporu v čase 15 a 60s, nebo v časech 1 a 10 minut. Polarizační index je pak poměr

$$p_{i1} = \frac{R_{i10}}{R_1} \quad (8.2)$$

Zjistí-li se navlhnutí izolace, je nutno ji před napěťovými zkouškami vysušit.

Přiloženým ss a st napětím kontrolujeme izolaci proti kostře a mezi fázemi, rázovým přiloženým napětím se kontroluje hlavně závitová izolace. Indukovaným napětím zkusíme také závitovou izolaci. Při zkoušce se musí mezi jednotlivými závity cívky vytvořit úbytek napětí, odpovídající hodnotě napětí zkušebního. Proto se musí zkoušet buď napětím o zvýšené frekvenci nebo napětím rázovým.

Při zkoušce střídavým napětím je zdrojem zpravidla synchronní generátor se zvyšovacím transformátorem. K synchronnímu stroji je vhodné připojit paralelně kompenzační tlumivku, aby nedošlo vlivem velké kapacity zkoušence k přebuzení generátoru.



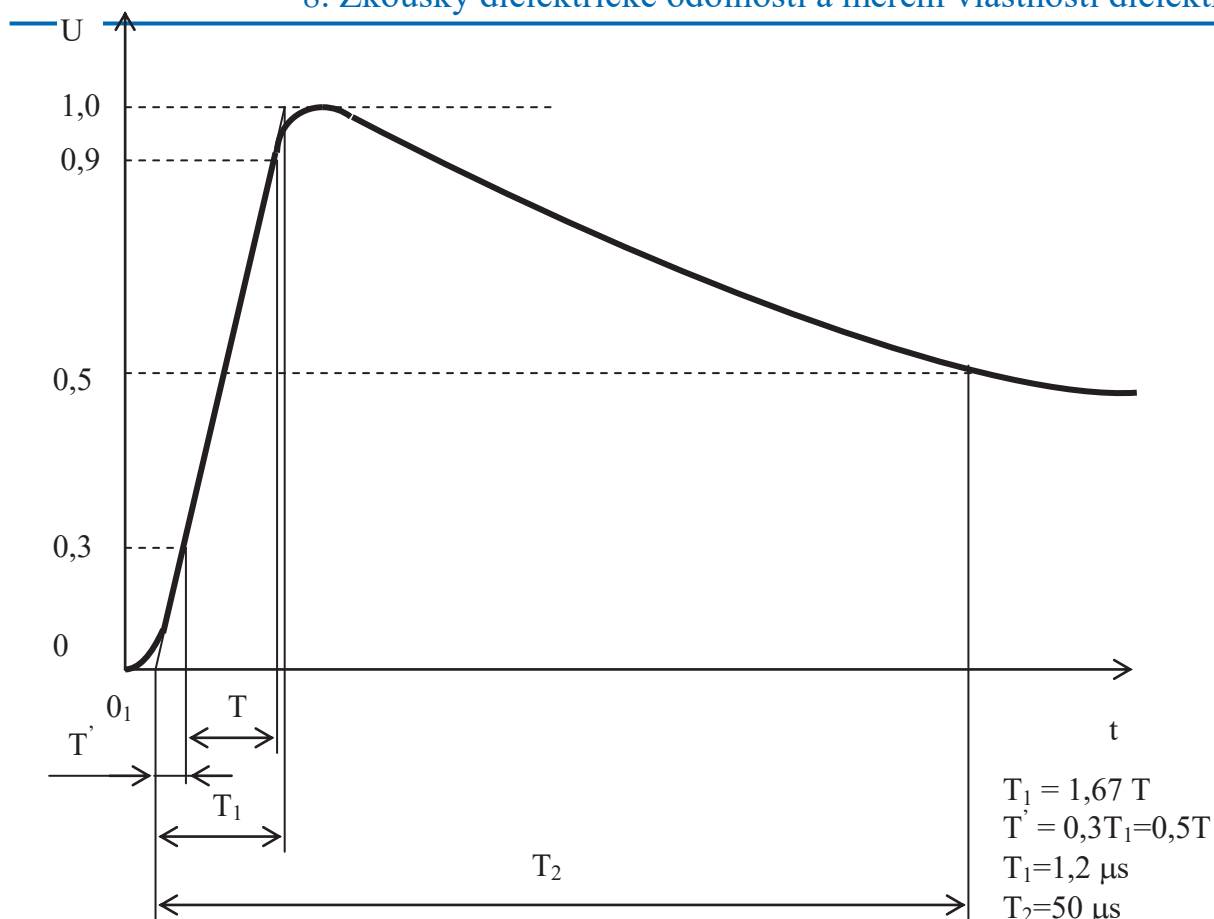
Nemáme-li k dispozici požadovaný zdroj napětí 50Hz, provedeme alespoň zkoušku ss napětím, které však zvýšíme na (160 - 170) % zkušebního napětí střídavého. Podle etapy zkoušek se může takto postupně při snižujícím se napětí zkoušet samotná tyč, cívka, cívka založená do drážky před pospojováním vinutí a konečně cívky po spojení vinutí, ale před impregnací. Pokud se dělá zkouška na tyči (cívce), která není opatřena vodivým lakem, obalí se vodivou elektrodou nebo se vloží do korýtky, imitujícího drážku. Po dobu jedné minuty se udržuje napětí pro izolaci čel, která bývá na nižší napětí. Po odvinutí vodivé elektrody z čel se

8-3

opakuje zkouška pro rovnou část cívky. U tyčového vinutí se zkouší v průběhu zakládání nejprve spodní vrstva tyčí, pak se založí horní vrstva, drážky se zaklínují, cívky vodivě spojí a zkouší se proti železu. Po úplném dokončení vinutí, před jeho impregnací, se zkouška opakuje při sníženém napětí. Zkouší se jednak proti železu, jednak i fáze proti sobě (kvůli izolaci čel na rozhraní fází). Kromě napájeného vinutí se ostatní vinutí vždy uzemní. Dojde-li k průrazu izolace, musí se po opravě na postižené fázi opakovat i zkouška závitové izolace (indukovaným napětím).

Zkouška rázovým napětím vyžaduje rázový generátor, popř. generátor opakovaných rázů. Normalizovaná vlna 1,2 / 50 μ s simuluje atmosférická přepětí, kusá vlna napodobuje přeskok, popř. průraz izolace.. Zkouší se též spínací vlnou, která je pomalejší, modeluje spínací přepětí v síti. Zkouška rázovým napětím je zvláště významná pro stroje pracující přímo do venkovního vedení vn nebo vvn, tj. pro transformátory a generátory pracující přímo do venkovní sítě a pro venkovní elektrické přístroje.

Vrcholová hodnota rázového napětí se měří kulovým jiskřištěm. Výhodou je jednoduchost, přesnost (3%) vyhovuje normám. Zpoždění kulového jiskřiště je pouze zlomek mikrosekundy. Pro měření tvaru rázové vlny se použije osciloskopu s kapacitním nebo odporovým děličem.



Obr. 8.3. Plný atmosférický impuls (ČSN IEC 60-1 (345640), str. 51)

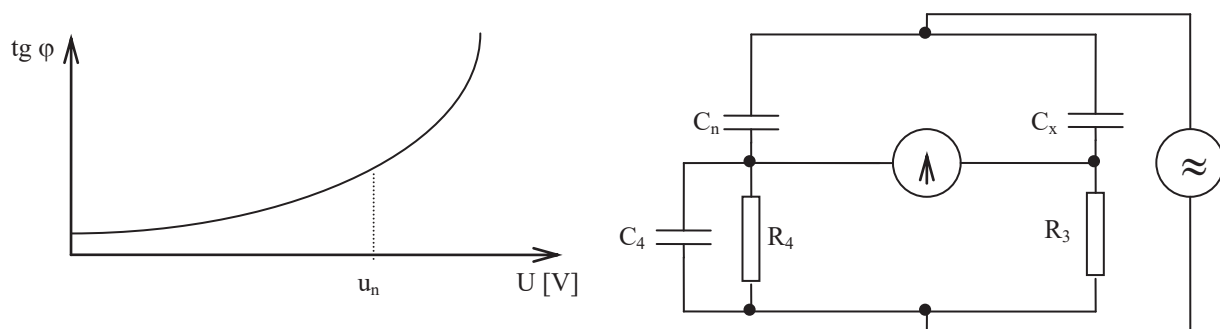
Zkouška indukovaným napětím je snazší, pokud stroj pracuje jako generátor. Musíme však mít k dispozici poháněcí stroj. Pokud jej nemáme, provede se zkouška v motorickém režimu. Pokud zkoušíme v generátorickém chodu, stroj se uvede na jmenovité otáčky a budící proud se pomalu zvyšuje až do asi 130% U_n . Zkouškou trvající zpravidla 5 min se prověří, zda nevznikl v kotvě mezizávitový zkrat.

Ztrátový činitel $\tan \varphi$ udává poměr činné složky proudu, prosakujícího izolací a složky kapacitní. Vyjadřuje se v procentech, čím je menší, tím je izolace kvalitnější.

$$\tan \varphi = 100 \frac{P}{Q} = 100 \frac{\frac{U^2}{R_{iz}}}{U^2 \omega C} = \frac{100}{R_{iz} \omega C} [\%; M\Omega, s^{-1}, \mu F] \quad (8.3)$$

Hodnota je závislá na napětí, protože částečné výboje v dutinkách způsobují nárůst svodového proudu a z toho vyplývá i pokles kapacity. Protože se jedná o hodnotu závislou na napětí, musí se měřit zejména v oblasti jmenovitého napětí. Typické hodnoty se pohybují mezi (1 - 10)%. K měření se používají speciální vysokonapěťové Scheringovy můstky (fy Tettex). Princip je naznačen na obrázku, ale konstrukce je složitější, protože se jedná o měření na napětí až několik stovek

kV. Můstek má vysokonapěťovou část (ve vysokonapěťovém prostoru) a nízkonapěťovou část, sloužící k vyvážení. Obě svorky nulového indikátoru jsou opatřeny svodiči přepětí, které v případě průrazu izolace chrání obsluhu. Kapacitní normál C_n je plněn dusíkem nebo oxidem uhličitým, takže je prakticky bezeztrátový. Nízkonapěťová část má v jedné větvi proměnný R_3 , sloužící k vyrovnaní kapacitní složky sériového náhradního schématu. Další regulačním prvkem je C_4 . Nulový indikátor v diagonále indikuje vyvážení. Celá nízkonapěťová část je stíněna, pro omezení rušivých vlivů elektromagnetických polí.



Obr. 8.4. Závislost $\operatorname{tg} \varphi$ na napětí a princip Scheringova můstku

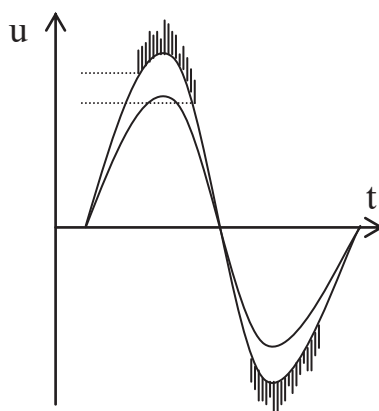
Měření částečných výbojů. Technický izolant obsahuje dutinky, vyplněné vzduchem nebo i jiným plynem. Tyto dutinky jsou vždy více elektricky namáhány, než okolní izolant. Napětí se totiž rozdělí v opačném poměru permitivit. Zdrojovou oblastí je často styk dvou různých izolantů. Tyto výboje jsou velmi nepříznivé, protože způsobují degradaci izolace. Proto se částečné výboje musí měřit a sledovat jejich rozsah po celou dobu provozu stroje. Měří se zejména počáteční a zhašecí napětí, při kterém trvale nastávají, popř. ustávají částečné výboje, jejich četnost, a některé další parametry.

Např. u olejových transformátorů je normou stanoveno max. množství částečných výbojů na 300pC. Olejové transformátory se musí sušit, po naplnění olejem se likvidují bublinky vzduchu, což lze urychlit cirkulací oleje, jeho filtrací a vyšší teplotou. Částečné výboje se zjišťují i u točivých strojů. Zde jsou kritickým místem vůle mezi izolací a železem v drážce. Tyče jsou většinou izolovány Relanexem, který je tvrdý, takže v drážce vzniknou nežádoucí dutinky. Pro tento typ výbojů je užíván termín drážkové výboje. Na povrchu izolace se proto provádí polovodivý nátěr a výboje se tak odvedou mimo drážku. Provádí se také vakuová bezrozpouštědlová impregnace, takže izolace je pak kompaktní, bez dutinek po rozpouštědlech a také se pak zlepší přestup tepla.

Měření částečných výbojů se používá též v diagnostice, k ověření stavu izolačního systému stroje.

Obr. 8.5. Částečné výboje nastávají od určitého napětí. Výboje zpravidla nasazují při vyšším napětí, nežli je jejich zhášecí napětí, projevují určitou hysterezi.

Mezioperační a závěrečné zkoušky stroje. Všeobecně platí zásada, že hladiny zkušebního napětí při výrobě velkého stroje, převážně z ekonomických důvodů, klesají. Před vyrobením celé série, nebo v průběhu výroby, se vyrobí též vzorky, na kterých lze měřit až do zničení. Dělá se obvykle jeden vzorek na stroj, nebo na



200 - 300 cívek, popř. tyčí vinutí. Předchozí zkoušky vstupních materiálů zde nejsou zahrnuty.

Zkoušky samostatné tyče.

- dílčí vodiče Rebelových tyčí proti sobě. Zkouší se napětím asi 230V přes žárovku. Pokud žárovka svítí, zkusí se tatáž kombinace vodičů bez žárovky, někdy dojde k přepálení tenkého bříty a izolační stav se obnoví.

- izolační napěťová zkouška, každá tyč se zkouší vůči uzemněné fólii, kterou je tyč ovinuta

- u vybraných tyčí se měří ztrátový úhel

- u jedné tyče se zpravidla měří průrazná pevnost až do zničení

Izolační zkoušky během navíjení a po navinutí. Nejprve se měří izolační stav spodních, dříve založených stran cívek, pak horních stran. Pro prozatímní spojení tyčí lze použít téměř jakýkoliv (i „tenký“) vodič. Po definitivním spojení vinutí se měří celé vinutí.

Zkouška závitové izolace indukovaným napětím.

Izolační zkouška v teplém stavu, po zkoušce stroje. (minutová zkouška přiloženým napětím)

Měření izolačního odporu. (provádí se před a po každé izolační zkoušce)

Zkoušky materiálů a izolačních systémů na modelech. Jde hlavně o vývojová měření.

1. Teplotní odolnost

Materiály se dělí do tříd dle tabulky

Teplotní třída	Teplota
Y	90 °C
A	105 °C
E	120 °C
B	130 °C
F	155 °C
H	180 °C
200	200 °C
220	220 °C
250	250 °C

Teplotní intervaly nad 250 °C jsou 25 °C a přiřadí se jim příslušné třídy.

2. Druhy dielektrik a jejich měření

Pevná dielektrika

- elektrická průrazná pevnost
- R_{iz} a polarizační index
- ztrátový úhel
- mechanické zkoušky (tah, ohyb, tvrdost)
- chemický rozbor
- struktura materiálu (infračervená spektroskopie)
- klimatická odolnost
- teplotní odolnost a zkouška stárnutí (měknutí, atd.)

Kapalná dielektrika (oleje)

- fyzikální rozbor (elektrická průrazná pevnost, ztrátový úhel, obsah absorbované vody)
- chromatografický rozbor (stanovení obsahu rozpuštěných plynů)

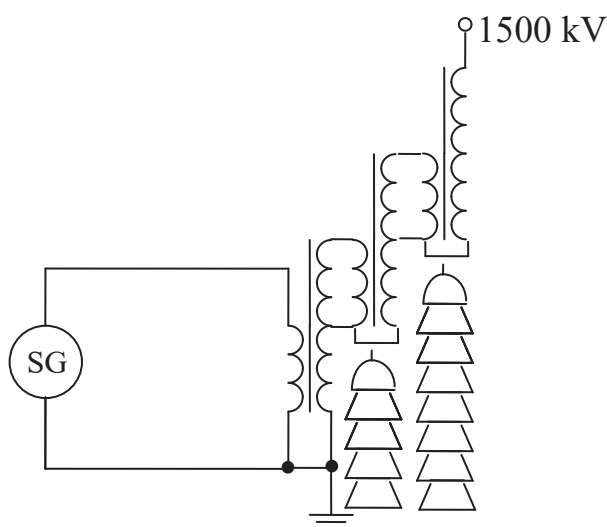
3. Izolační systém (modely včetně vodičů). Mimo předchozích zkoušek je třeba sledovat a zkoušet:

- snášlivost materiálů (napadání smaltu impregnací)
- dilatace, tepelná pnutí různých materiálů
- zkoušky průrazným napětím
- životnost izolačního systému (časově napěťové zkoušky)

Vybavení zkušeben vvn je dost speciální. S ohledem na nutné izolační vzdálenosti zabírají značný prostor. Většinou by měl být k dispozici rázový (Marxův) generátor, transformátorová kaskáda (2-3 stupňová) a měřicí zařízení. Jedná se zejména o kapacitní a odporové děliče, osciloskop, kulové jiskřiště, svodiče přepětí, apod.

8. Zkoušky dielektrické odolnosti a měření vlastností dielektrik

Aby nemohlo dojít k úrazu obsluhy zkušebny, je velín, odkud jsou zařízení ovládána, chráněn drátěným pletivem (Faradayova klec). Zkušební prostor má být ohrazen a pokud se zkouší, musí svítit výstražná světla. Vstup do zkušebního prostoru je vhodné blokovat dveřním kontaktem, při jehož rozpojení dojde k odpojení zdroje zkušebního napětí. V celém zkušebním prostoru se projevuje silná elektrostatická indukce. Je proto nutné všechny kovové předměty spolehlivě spojit se zemí. To platí i pro stroje v blízkosti zkušebního prostoru, které jsou připraveny na zkoušení. Jejich vývody se zkratují a spojí se zemí.



Obr. 8.6. Schéma kaskády zkušebních transformátorů

Na izolační materiály a systémy působí svými účinky a vzájemnou interakcí následující hlavní faktory:

- teplota
- elektrické namáhání
- mechanické namáhání (vibrace, tepelná dilatace izolovaného materiálu způsobuje otěr,...)
- prostředí (klimatické podmínky)
- radiační záření
- biologičtí škůdci (zvláště v tropech)



Otázky k tématu:

- *Izolační odpor se měří napětím DC nebo AC?*
- *Jak lze zapojit vinutí při sušení stroje?*
- *Jak se zapojuje vinutí při zkoušce rázovým přiloženým napětím?*
- *Jaké je pořadí mezioperačních zkoušek při zakládání vinutí do*

velkého stroje?



Správné odpovědi

- *Izolační odpor se měří napětím DC nebo AC?*

Měří se napětím DC.

- *Jak lze zapojit vinutí při sušení stroje?*

Vinutí spojíme pokud možno do série. Jedná-li se o synchronní stroj, budící vinutí napájíme jiným zdrojem, pokud má výrazně jiný proud.

- *Jak se zapojuje vinutí stroje při zkoušce rázovým přiloženým napětím?*

Stuha od rázového generátoru se připojí na jednu fázi zkoušeného stroje a všechna ostatní vinutí se musí uzemnit.

- *Jaké je pořadí mezioperačních zkoušek při zakládání vinutí do velkého stroje?*

Po založení spodních cívkových stran tyto provizorně na koncích ovineme – pospojujeme - pocínovaným holým vodičem a provedeme zkoušku přiloženým napětím. Po založení horních cívkových stran zopakujeme stejný postup i na těchto horních cívkových stranách. Provedeme spojení vinutí do fází a zkoušku opakujeme pro jednotlivé fáze proti kostře a proti sobě navzájem. Vše, co se nenapájí, uzemníme.

9. Ventilační a hydraulická měření, oteplovací zkoušky



Předpokládaný čas: 15 min



Po prostudování tématu budete:

- *Mít přehled o možnostech měření průtoku chladiva*
- *Znát princip měření pomocí Thomasova válce*
- *Vědět, jak pracuje a k čemu se používá alfa-metr*
- *Znát postup pro vykonání oteplovací zkoušky*

Ztráty vzniklé ve stroji se musí odvést do okolního prostředí chladivem (vzduch, voda, olej, vodík). Před oteplovací zkouškou je nutno změřit (nastavit) průtok chladiva.

Měření průtoku chladiva

Měření průtoku clonami a dýzami

Do potrubí se zabuduje škrticí člen, jehož tvar a umístění je přesně definováno normou. Měří se tlakový úbytek na členu a průtok se vypočítá pro konkrétní člen z tlakového úbytku. Výhodou je možnost zabudování do potrubí. Nevýhodou je složitější příprava, utěšňování diferenciálního tlakoměru a úpravy potrubí pro měření (měřicí trať). Metoda je vhodná pro měření plynů i kapalin.

Měření průtoku danaidou

Jde o zvláštní případ měření s clonou. Danaida je svisle postavená válcovitá nádoba. Její dno je tvořeno clonou o přesně definovaném otvoru. Průtok je úměrný výšce vodního sloupce, který se v nádobě ustálí. Metoda je jednoduchá, přesná a měří okamžité hodnoty. Nevýhodou je nutnost volného odpadního kanálu.

Měření průtoku měrnou nádobou

Jde o přesnou metodu, ale je vhodná jen pro malé průtoky kapalinami.

Vrtulkové a ultrazvukové průtokoměry

9. Ventilační a hydraulická měření, oteplovací zkoušky

Průtokoměr se zabuduje do potrubí. Proudící kapalina pohání vrtulku a od jejího pohybu se odvodí průtok. Pro provozní měření průtoku kapalin se často používají ultrazvukové průtokoměry, které se nasazují na potrubí bez demontáže.

Prandtlůva trubice

Mikromanometrem se měří tlakový rozdíl mezi oběma vývody trubice. Na přímý otvor působí dynamický

$$p_{dyn} = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (9.1)$$

i statický tlak současně. Na boční otvor působí pouze tlak statický. Rychlost proudění se vypočítá ze vztahu

$$v = c_1 \sqrt{\frac{2p_d}{\rho}} \quad (9.2)$$

kde c_1 je korekce udaná výrobcem (zde =1)

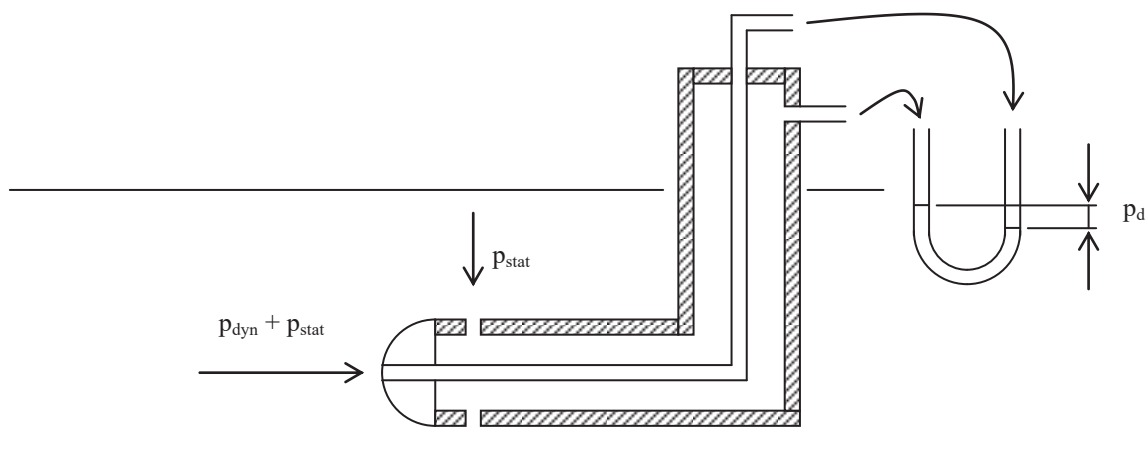
ρ je hustota chladiva [kg.m^3]

p_d je dynamický tlak změřený mikromanometrem [Pa]

v je hledaná rychlost.

Pokud známe průřez S , je možno za předpokladu rovnoměrného rozložení rychlosti stanovit průtok chladiva podle jednoduchého vztahu

$$Q = v \cdot S \quad (9.3)$$

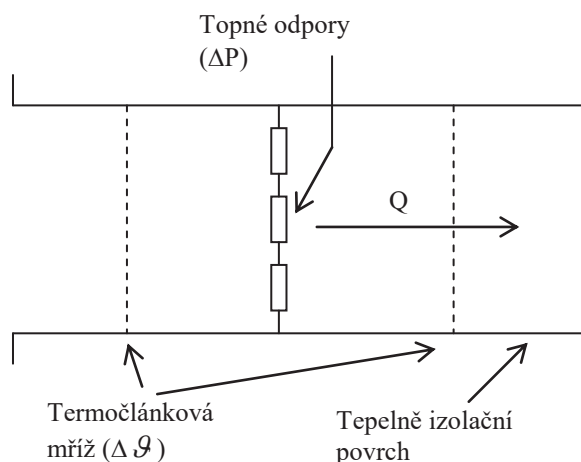


Obr. 9.1. Princip měření rychlosti Prandtlovou trubicí

K měření rychlosti lze použít též žárový anemometr. Pracuje na principu žhaveného drátu a sleduje se změna jeho odporu.

Thomasův válec

je velmi přesným zařízením pro měření objemového průtoku vzduchu.



Obr. 9.2. Princip Thomasova válce

Platí následující vztahy:

$$\Delta \theta = \frac{\Delta P}{\rho c_p Q} \quad (9.4)$$

z něhož lze vyjádřit

$$Q = \frac{\Delta P}{\rho c_p \Delta \theta} \quad (9.5)$$

pro vzduch je

$$\rho = 1,1 \div 1,3 \text{ kg.m}^{-3}$$

$$c_p = 1000 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$$

$$\rho.c_p \text{ je měrná tepelná kapacita J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$$

Anemometry

Oproti měření pomocí Thomasova válce jsou podstatně levnější a méně náročné. U velkých strojů se snažíme najít takové části ve stroji nebo uspořádat vně stroje vzduchovod, kde by byl definovaný průřez a ustálený proud vzduchu. Anemometr má mít průměr menší než 1/6 hydraulického průměru, aby neovlivňoval proudění vzduchu. Hydraulický průměr je definován vztahem

$$D_n = \frac{4.S}{O} \quad (9.6)$$

kde S je průřez kanálu

O je obvod kanálu.

Měření koeficientu přestupu tepla α -metry

Součinitel přestupu tepla $\alpha [\text{W/m}^2/\text{K}]$ z povrchu materiálu do chladiva závisí na rychlosti proudění a uspořádání. Dle jeho velikosti můžeme pak rozhodnout např. o nucené ventilaci rozvaděče apod. Hlavní součástí α -metru je izolační destička o známé tloušťce a tepelné vodivosti λ . Na jejím povrchu jsou dvě skupiny termočlánků. Pracuje na principu sdílení tepla Q .

$$\alpha = \frac{Q}{S \Delta \vartheta_{\alpha}}, \quad (9.7)$$

kde Q je sdílené teplo

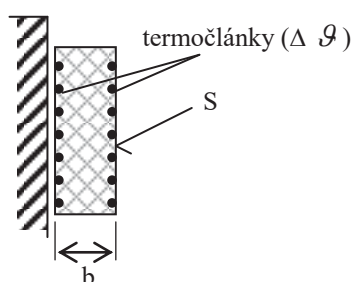
$\Delta \vartheta_{\alpha}$ je rozdíl teploty povrchu a chladiva

Protože současně platí

$$Q = \lambda \frac{S}{b} \Delta \vartheta_{\varepsilon}, \quad (9.8)$$

(λ je tepelná vodivost, $\Delta \vartheta_{\varepsilon}$ je teplotní spád na α -metru), pak můžeme přepsat vzorec (9.7) na tvar

$$\alpha = \lambda \frac{\Delta \vartheta_{\varepsilon}}{b \Delta \vartheta_{\alpha}} \quad (9.9)$$



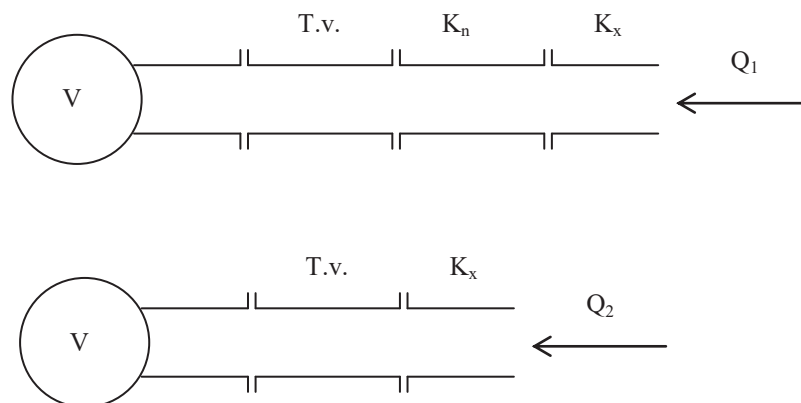
Obr. 9.3. Princip α -metru. Plocha S je plocha, kterou prochází tepelný tok Q .

Hydraulický odpor

Zastavme se ještě u hydraulického odporu K . Platí vztah

$$\Delta p = K \cdot Q^2, \quad (9.10)$$

z něhož plyne, že úbytek tlaku roste se čtvercem průtoku. Hydraulický odpor je závislý na průřezu, tvaru kanálu, drsnosti stěn, ohybech, zúžení, rozšíření apod. Měření úbytku tlaku na samotném zkoušenci je nepřesné, protože jsou na jeho vstupu a výstupu zpravidla malé rozdíly tlaku. Proto se k určení neznámého hydraulického odporu K_x zkoušence používají vzduchotechnické tratě. Trať se skládá ze zdroje tlaku (ventilátor), normálu hydraulického odporu K_n , Thomasova válce o hydraulickém odporu K_T a zkoušence o neznámém hydraulickém odporu K_x . Vzduchotechnické tratě jsou zpravidla značně dlouhé, protože se vřazují ještě uklidňující válce.



Obr. 9.4. Vzduchotechnická trať ke stanovení hydraulického odporu zkoušence

V prvním nakresleném případě platí rovnice

$$p = (K_T + K_n + K_x)Q_1^2 \quad (9.11)$$

v druhém případě

$$p = (K_T + K_x)Q_2^2 \quad (9.12)$$

Pokud v obou případech byl dodržen shodný tlak vyvolaný ventilátorem, můžeme vyjádřit neznámý hydraulický odpor zkoušence jako

$$K_x = \frac{K_n}{\left(\frac{Q_2^2}{Q_1^2}\right) - 1} - K_T \quad (9.13)$$

Oteplovací zkoušky

Jejich účelem je zjistit oteplení všech důležitých částí stroje. Zpravidla se určuje oteplení při trvalém zatížení jmenovitým výkonem, u trakčních strojů po hodinovém zatížení tzv. hodinovým výkonem. Ve zvláštních případech se stroj zatěžuje cyklicky podle předepsaného diagramu výkon - čas.

Pro dosažení jmenovitého výkonu se předpokládá i jmenovité napětí, účinník a otáčky. Stroj musí mít předepsané krytí a být chlazen předepsaným průtokem chladiva při předepsané teplotě.

Obecný postup činností při přípravě a provádění zkoušky

a)

Stanovení jmenovitých parametrů zkoušence a popř. i stanovení rozsahu, v jakém budou překračovány.

b)

Vhodná volba umístění zkoušence na zkušebně, popř. zajištění zařízení, které není k dispozici (koupě, výroba, vypůjčka). Projednání dodávky a odběru činné a jalové energie, mimořádné propojení energetické sítě, revize zařízení, které bude

9. Ventilační a hydraulická měření, oteplovací zkoušky

plně zatěžováno, popř. přetěžováno, zintenzivnění ventilace zatěžovacích strojů apod. Pro stroje s vodními chladiči vyrobit přívod a odpad chladicí vody včetně přístrojů pro měření průtoků a teplot.

c)

Mimo elektrické veličiny se měří též parametry chladiv. Vstup a výstup chladicího vzduchu je třeba uspořádat tak, aby bylo ustálené proudění a byl definován průřez. Pak je možné měřit průtok vzduchu. Pro měření teploty okolního vzduchu se použijí dva teploměry, které nesmí být ofukovány chladícím vzduchem.

Do všech vstupních otvorů sání se umístí teploměry, stejně tak u výfuku. Čidlo teploměru (popř. lihová nádobka) musí být v intenzivním proudě vzduchu, nikoliv v závětrí. Při měření teplot kapalin je třeba, aby byl teploměr ponořen v délce, pro kterou je cejchován.

d)

Nejdůležitější operací při přípravě oteplovací zkoušky je měření odporu vinutí v chladném stavu. Slouží k výpočtu středního oteplení v teplém stavu z přírůstku odporu. Jelikož se jedná o velmi malé odpory, je výhodné je stanovit z úbytku napětí na měřeném odporu, který je způsoben známým proudem. Připojení měřeného odporu musí být čtyřvodičové. Pokud se jedná o velký stroj, který má velkou časovou konstantu, je potřeba počkat i několik sekund, než odezní přechodový stav. Měření za tepla se provádí stejnými přístroji, proto se zapisují jejich inventární čísla do protokolu. Měří se při 10 - 20% jmenovitého proudu, aby se měřené vinutí neohřívalo Jouleovými ztrátami. Obvykle se měří při dvou hodnotách ss proudu, odlišných asi o 20 - 50%, které se volí tak, aby měřící přístroje měly výchylku v druhé polovině stupnice.

Stroj má být před měřením asi 24h v klidu v prostředí s malými změnami teplot, aby teplota vinutí byla shodná s teplotou vzduchu ve stroji. Na konci oteplovací zkoušky je velmi důležité co nejdříve změřit odpor.

e)

Před zatížením stroje je třeba seřídít průtok chladiv na předepsanou hodnotu. Je též vhodné vyzkoušet ukončení zkoušky a brzdění zkoušence. To bude důležité při ukončení zkoušky.

f)

Po zatížení stroje zvoleným výkonem se první hodinu odečítají teploty po 15 minutách, pak asi po 30 min. Zkoušenec je v provozu až do ustálení teplot (vzestup o méně než 1° za 30 min). Je třeba udržovat stálé zatížení. Kolísá-li napájecí napětí, udržuje se konstantní proud, nikoliv výkon. Pokud stoupá teplota vstupujícího chladiva, nelze dosáhnout ustáleného stavu (teplota vzduchu v létě

9. Ventilační a hydraulická měření, oteplovací zkoušky

stoupá). Pak je ustálený stav takový, když přírůstek teploty, zmenšený o přírůstek teploty vstupujícího chladiva, vyhovuje výše uvedené podmínce.

g)

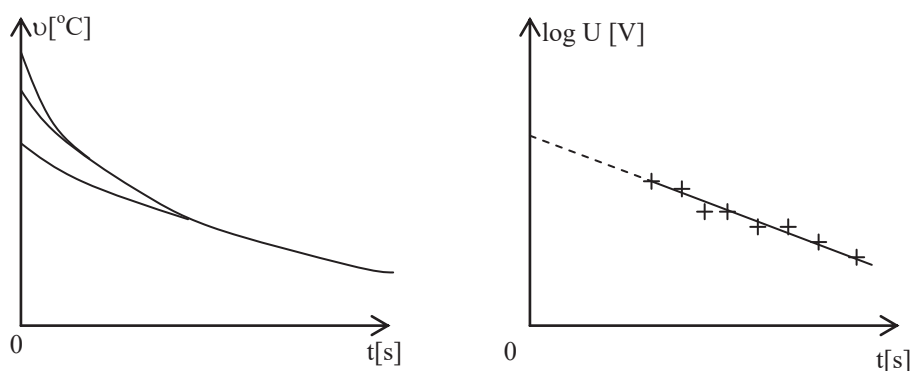
Pokud nastal ustálený stav stroje, je třeba připravit konec zkoušky. Kromě pečlivého zápisu sledovaných hodnot se doporučuje změřit teplotu chladícího vzduchu ve více bodech profilů (termistorový teploměr s rychlou odezvou). Pak je též vhodné změřit teplotu aktivních částí zkoušence (železo, holé ss vinutí, kartáče apod.) dotykovým termistorovým teploměrem.

Zkontrolujeme připravenost soupravy pro měření odporů vinutí v teplém stavu. Pak co nejrychleji zmenšíme výkon a zkoušenec se zastaví. Současně se vypne chlazení. V okamžiku, kdy poklesne zatěžovací proud, začíná se měřit čas. Pokud stroj pracoval na síti, spustí se stopky při vypnutí vypínače. Stejnoseměrné stroje lze často brzdít jmenovitým proudem až do zastavení. V takovém případě se čas měří až od zániku brzdícího proudu.

V okamžiku zastavení se ihned změří teploty komutátoru, drátové bandáže, sběrací kroužky, spojovač nakrátko, podpěrné kruhy vinutí, klec nakrátko, tlumič apod. Současně se zahájí měření odporů vinutí v teplém stavu, pokud je to možné do 60 s po zániku zatěžovacího proudu.

h)

Odpor vinutí v okamžiku vypnutí proudu se stanoví extrapolací. Po vypnutí proudu chladne vinutí podle křivky tvořené součtem několika exponenciál. V semilogaritmickém měřítku se znázorní změřené úbytky napětí při konstantním proudu. Tím se průběh linearizuje. Vzniklá přímka se extrapoluje do času $t=0$ s a tak se zjistí úbytek napětí (a tím i odpor vinutí) v okamžiku zániku proudu.

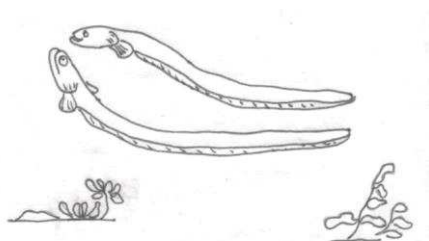


Obr. 9.5. Průběh teploty vinutí po ukončení oteplovací zkoušky a extrapolace úbytku napětí na odporu vinutí na okamžik vypnutí v semilogaritmických souřadnicích

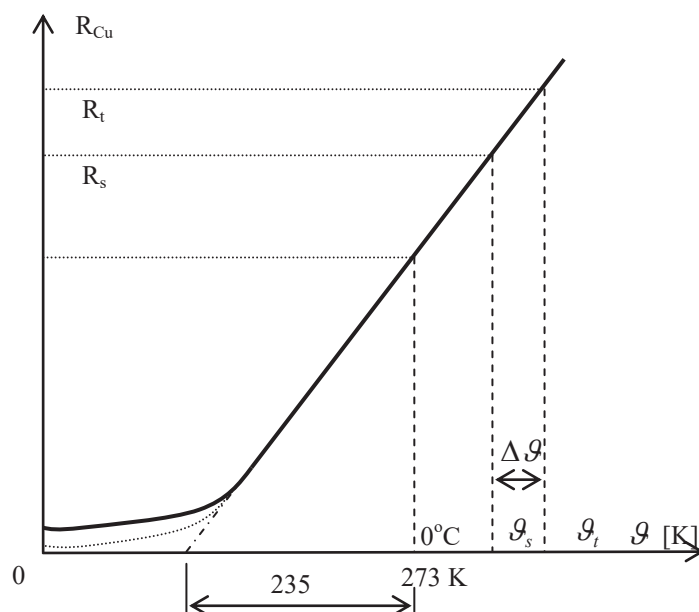
9. Ventilační a hydraulická měření, oteplovací zkoušky

Protože úbytky napětí ve studeném i teplém stavu se měří při stejném proudu, je poměr úbytku napětí shodný s poměrem odporů. Extrapolovaná střední hodnota teploty vinutí na konci oteplovací zkoušky je dána vztahem

$$\Delta \vartheta = \left(\frac{R_t}{R_s} - 1 \right) (235 + \vartheta_s) \quad (9.14)$$



My sladkovodní úhoři máme špatný elektrolyt. Ale rejnok v mořské vodě – ten má napětí!



Obr. 9.6. Vysvětlení vztahu (9.14). S klesající teplotou klesá odpor mědi

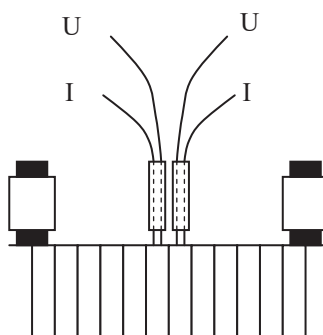
Oteplovací zkouška stejnosměrných strojů

Nejvíce tepelně namáhané je vinutí kotvy. Protože je kotva na rotoru, je během zkoušky nepřístupná. O ustáleném stavu se rozhoduje nesnadno podle teplot vinutí statorových a vystupujícího chladicího vzduchu.

9. Ventilační a hydraulická měření, oteplovací zkoušky

Pro stanovení odporů statorových vinutí se stroje po zkoušce nezastavují, protože to není potřeba a tak se ani odpory nestanovují extrapolací. Odpory vinutí ve studeném stavu se však neměří při malém proudu, protože by se musely použít jiné přístroje, což je s ohledem na vzniklou chybu nepřípustné. Postupuje se tedy tak, že se stroj opatří měřením budícího proudu a proudu kotvy, měřením úbytků na vinutí budícím, kompenzačním, vinutí sériového buzení a pomocných pólů. Odpory se pak měří těsně před zahájením oteplovací zkoušky, krátkou dobu při plných proudech, které bude mít stroj při zkoušce.

Vlivem přechodových dějů pod kartáči se používá k měření odporu kotvy následující metoda. Je vhodná i pro stanovení oteplení z přírůstku odporu. Zvolí se dvě sousední lamely, uprostřed mezi kartáči. Pokud možno se volí lamely bez vyrovnávacích spojek. U vinutí n-paralelních se volí první a (n+1) lamela. Mezi těmito lamelami je zapojena jedna cívka smyčkového vinutí nebo p-cívek vlnového vinutí. Zvolené lamely se trvanlivě (na boku) barevně označí. Současně se označí poloha kotvy vůči statoru. Odpor za studena i za tepla se měří v téže poloze.



Obr. 9.7. Měření odporu mezi lamelami komutátoru pomocí dvojitého elektrod

Měříme tak malý odpor jedné cívky, která je spojena paralelně s velkým odporem ostatního vinutí, který je sice závislý na poloze kotvy, ale protože je velký, nemá na měření podstatný vliv.

Oteplovací zkouška synchronních strojů

Tato zkouška slouží zejména ke stanovení budícího proudu, momentové přetěžitelnosti a oteplení aktivních částí stroje při jmenovitém zatížení. Pokud možno, zatěžuje se jmenovitým výkonem při jmenovitém účinníku.

Velké stroje však není možno na zkušebně zatěžovat jmenovitým činným výkonem, proto se zatěžují výkonem jalovým, při přebuzení stroje. Jsou zde však následující nevýhody:

a) Pro dosažení jmenovitého statorového proudu se stroj musí přebudit a hrozí přetížení rotorového vinutí.

9. Ventilační a hydraulická měření, oteplovací zkoušky

- b) Pokud nepřesáhneme jmenovitý budící proud, je proud statorový nižší než jmenovitý a oteplovací zkouška je nedostatečně průkazná.
- c) Při přebuzení jsou vnitřní indukovaná napětí a indukce větší než v pracovním režimu a i ztráty v železe jsou vyšší.
- d) Pokud je výkon napájecího transformátoru srovnatelný se zkoušenecem, ještě navíc stoupne svorkové napětí.

Pokud nelze dělat zkoušky ani v kompenzačním režimu, stanoví se oteplení součtem dílčích oteplení při oteplovacích zkouškách v chodu naprázdno a nakrátko. Toto však neplatí přesně a tak jsou výsledky příznivější než skutečnost. Obvykle se dělají následující zkoušky:

- a) naprázdno při $U_{sv} = U_{in}$
 - b) nakrátko při I_{ln}
 - c) naprázdno při I_{bn} , pokud $U_{sv} < 1,3 U_n$, jinak při $1,3 U_n$
 - d) bez buzení (pro odečet mechanických ztrát)
- Celkové oteplení železa a mědi statoru se pak stanoví ze vztahu

$$\Delta \vartheta = \Delta \vartheta_a + \Delta \vartheta_b - \Delta \vartheta_d \quad (9.15)$$

Oteplovací zkouška asynchronních strojů

Nelze-li zatížit stroj při jmenovitém napětí, zatěžuje se při napětí sníženém a při jmenovitém proudu. Většinou se provádějí tři obdobné zkoušky jako u synchronních strojů:

- a) naprázdno při U_n
- b) při jmenovitém proudu I_{ln} a sníženém napětí
- c) naprázdno při sníženém napětí U

Celkové oteplení se pak určí ze vztahu

$$\Delta \vartheta = \Delta \vartheta_a + \Delta \vartheta_b - \Delta \vartheta_c \quad (9.16)$$

Napětí však nelze snižovat libovolně. Požadovaný proud totiž nesmí být dosažen překročením skluzu zvratu. Pak by již neplatily předpoklady o nezávislosti oteplení rotoru na skluzu. Napětí se nesmí snížit pod hodnotu

$$U = U_n \frac{P_n}{P_{\max}} \quad (9.17)$$

Nejčastěji se volí napětí $0,5 U_n$.



Otázky k tématu:

- Na jakém principu pracuje Prandtlova trubice?
- Co měří Thomasův válec?

9. Ventilační a hydraulická měření, oteplovací zkoušky

- *Co je to hydraulický průměr?*
 - *K čemu potřebujeme alfa-metr?*
 - *Co je cílem oteplovací zkoušky?*
-



Správné odpovědi

- *Na jakém principu pracuje Prandtlova trubice?*

Při proudění chladiva vzniká rozdíl mezi statickým tlakem a dynamickým tlakem. Jejich rozdělení zajišťuje právě Prandtlova trubice. Na základě rozdílu obou tlaků se stanoví rychlost proudění. Podobného principu se užívá i pro určení rychlostí (bezmotorových) letadel.

- *Co měří Thomasův válec?*

Thomasův válec měří objemový průtok vzduchu.

- *Co je to hydraulický průměr?*

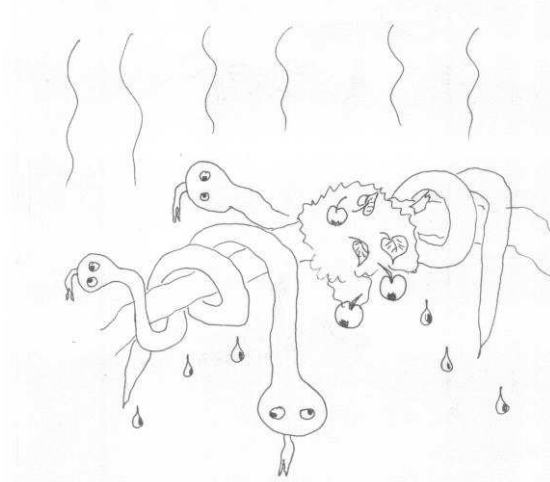
Hydraulický průměr je definovaný vztahem (9.6) a závisí na tvaru ventilačního kanálu.

- *K čemu potřebujeme alfa-metr?*

Pro stanovení přestupu tepla z povrchu do chladiva. Lze takto určit např. druh chlazení, rozhodnout o ventilaci rozvaděče apod.

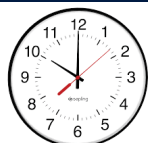
- *Co je cílem oteplovací zkoušky?*

Jejich účelem je zjistit oteplení všech důležitých částí stroje. Zpravidla se určuje oteplení při trvalém zatížení jmenovitým výkonem.



V tom třífázovém navinutí je sakramentsky horko.

10. Měření chvění a hluku



Předpokládaný čas: 60 min



Po prostudování tématu budete:

- Mít přehled o zdrojích chvění a základních pojmech
- Umět popsat podrezonanční a nadrezonanční oblast
- Mít přehled o snímačích chvění
- Znat souvislost chvění a hluku
- Znat základní akustické veličiny

V současné době se snaha omezit hluk promítá i do oboru elektrických strojů. V podstatě to znamená snížit jejich chvění, protože to je zdrojem hluku nebo vybavit stroj protihlukovým krytem. Je to však někdy značný problém.

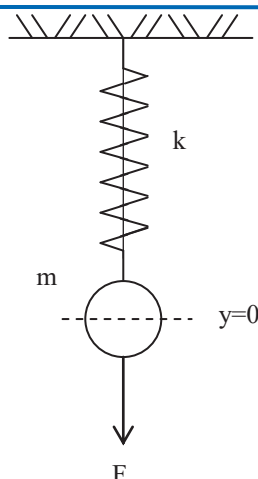
Zdroje chvění

- nevyváženost rotujících částí (frekvence závisí na otáčkách)
- reálné pohyby (posuvy, pohybové mechanismy, doprava...)
- účinek tekutin, proudění chladiv (voda, olej, vzduch, vodík)
- magnetostrikce (změna mechanických rozměrů magnetického obvodu při přemagnetování $\Phi = \Phi(t)$)
- silové účinky magnetického pole a proudu

Základní pojmy

- budící síla (moment) (F)
- tuhost konstrukce (soustavy) (k)
- vynucené chvění (vibrace, výchylka) (y)
- vlastní frekvence (soustava může mít i několik vlastních frekvencí) (Ω)
- dynamický součinitel
- tlumení (kmitů), (člen s derivací 1. řádu)

Základní pojmy vysvětlíme na ideálním mechanickém oscilátoru s jednou hmotou.



Obr. 10.1. Situace na mechanickém oscilátoru

Staticky platí rovnost

$$F = ky \quad (10.1)$$

Pokud budeme předpokládat budící sílu harmonickou

$$F = F_0 \sin \omega t \quad (10.2)$$

pak bude pro dynamické chování platit rovnice

$$F = ky + ma = ky + my'' \quad (10.3)$$

Tuto rovnici můžeme upravit na tvar

$$\frac{F}{m} = y'' + \Omega^2 y, \quad (10.4)$$

kde vlastní frekvence

$$\Omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (10.5)$$

Ustálené řešení rovnice (10.4) předpokládáme ve tvaru

$$y = Y \sin \omega t \quad (10.6)$$

a dosazením do rovnice (10.4) dostaneme vztah

$$-\omega^2 Y \sin \omega t + \Omega^2 Y \sin \omega t = \frac{F_0}{m} \sin \omega t \quad (10.7)$$

Tento vztah můžeme přepsat do tvaru

$$\frac{F_0 \sin \omega t}{m} = (-\omega^2 Y + \Omega^2 Y) \sin \omega t \quad (10.8)$$

a pak na tvar

$$Y = \frac{\frac{F_0}{m} \frac{k}{k}}{\Omega^2 - \omega^2} = \frac{F_0}{k} \frac{k}{m(\Omega^2 - \omega^2)} = \frac{F_0}{k} \frac{\Omega^2}{\Omega^2 - \omega^2}, \quad (10.9)$$

kde se výraz

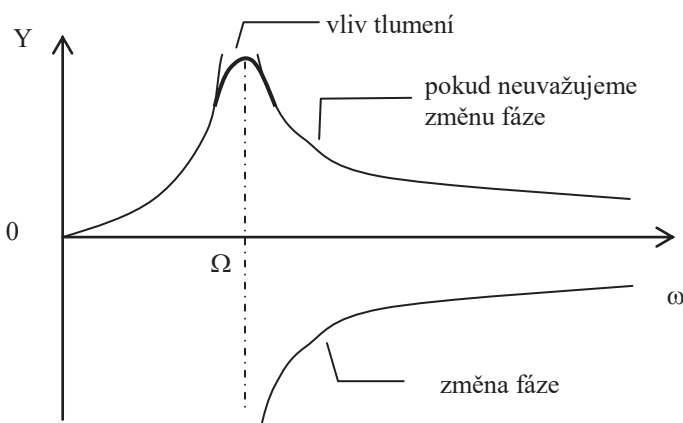
$$\frac{k}{m(\Omega^2 - \omega^2)} \quad (10.10)$$

nazývá někdy dynamickým součinitelem. Pro $\omega=0$ je dynamický součinitel roven jedné. Pro $\omega \neq 0$ se mluví o třech oblastech:

- podrezonanční oblasti
- rezonanci ($\omega = \Omega$)
- nadrezonanční oblasti, ve které nastává překročením rezonanční frekvence fázový posuv kmitů 180° vzhledem k budící síle.



Obávám se, milé posluchačky, že vás zklamu. Budu přednášet o tření, které je zdrojem elektřiny.



Obr. 10.2. Frekvenční charakteristika

Intenzita chvění (jeho velikost) se posuzuje podle

- amplitudy (výchylky) y [μm]
- rychlosti (amplitudy rychlosti) v [$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$]
- zrychlení (amplitudy zrychlení) a [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$]
- kmitočtu (základní složka, vyšší harmonické)

Vzájemné vztahy mezi zrychlením, rychlostí a výchylkou jsou zřejmé

$$v = \frac{dy}{dt} \quad (10.11)$$

$$a = \frac{dv}{dt} \quad (10.12)$$

Pro harmonické kmitání platí

$$y = Y \sin \omega t \quad (10.13)$$

$$v = \omega Y \cos \omega t = V \cos \omega t \quad (10.14)$$

$$a = -\omega^2 Y \sin \omega t = -A \sin \omega t \quad (10.15)$$

Snímače chvění

- relativní (např. pro stanovení chvění ložiska vůči stojanu)
- absolutní (dynamické, piezoelektrické)

Používají se převážně absolutní snímače, proto se o nich zmíníme podrobněji.

Elektrodynamický snímač

Snímač se skládá z magnetického obvodu, který je spojen s měřeným (kmitajícím) povrchem. Ve vzduchové mezeře je umístěna jako hmotné tělísko cívka. Za předpokladu konstantní magnetické indukce v mezeře se do cívky indukuje napětí úměrné rychlosti kmitajícího povrchu. Vlastní kmitočet snímače leží hluboko pod pracovním rozsahem, aby se neuplatnil dynamický součinitel.

Piezoelektrický snímač

Upevňuje se přímo na měřený objekt pomocí šroubu, lepidla, speciálního vosku, tmele apod. Uvnitř je hmotné tělísko, které je upevněno na pružném členu. Vlastní kmitočet tělíska musí ležet dostatečně vysoko nad maximální frekvencí, kterou chceme vyhodnocovat. Vlivem pohybu se mění přítláčná síla na piezoelektrický krystal. Vzniklý náboj je úměrný zrychlení povrchu.

Na výstup snímače se připojuje tzv. nábojový zesilovač. Ten má extrémně vysoký vstupní odpor díky prvkům FET. Protože je signál na výstupu snímače velice slabý, je velice snadno napadnutelný rušením. Proto se musí používat velmi kvalitní stíněné kabely, popř. se přímo ke snímači umísťuje předzesilovač signálu, který je napájen po zmíněném stíněném kabelu. Kabely by měli být po celé trase dobře upevněny, aby se neměnila jejich kapacita vůči zemi. Trasa by měla být dostatečně vzdálena od silových přívodů, případně ji kolmo křížit.

Hmota měřeného povrch musí být podstatně větší, než je hmotnost vlastního snímače, aby nedošlo k ovlivnění kmitání. S výjimkou velmi malých elektrických strojů je toto vždy bez problémů splněno.

Chceme-li získat signál úměrný výchylce, musíme signál z elektrodynamického snímače integrovat jednou, signál z nábojového zesilovače (piezoelektrického snímače) dvakrát. Pro integraci je nutno do měřícího řetězce zařadit integrační zesilovač.

Na výstup zesilovače, popř. až za integrátor (integrátory) je zařazeno záznamové zařízení (měřicí magnetofon, digitalizér, apod.), popř. přímo osciloskop či frekvenční analyzátor pro vyhodnocení měřeného signálu. Výhodné je měřený signál zaznamenat a pak až vyhodnocovat, protože vyhodnocení lze učinit nezávisle na provozu zkušebny.

Posuzování chvění

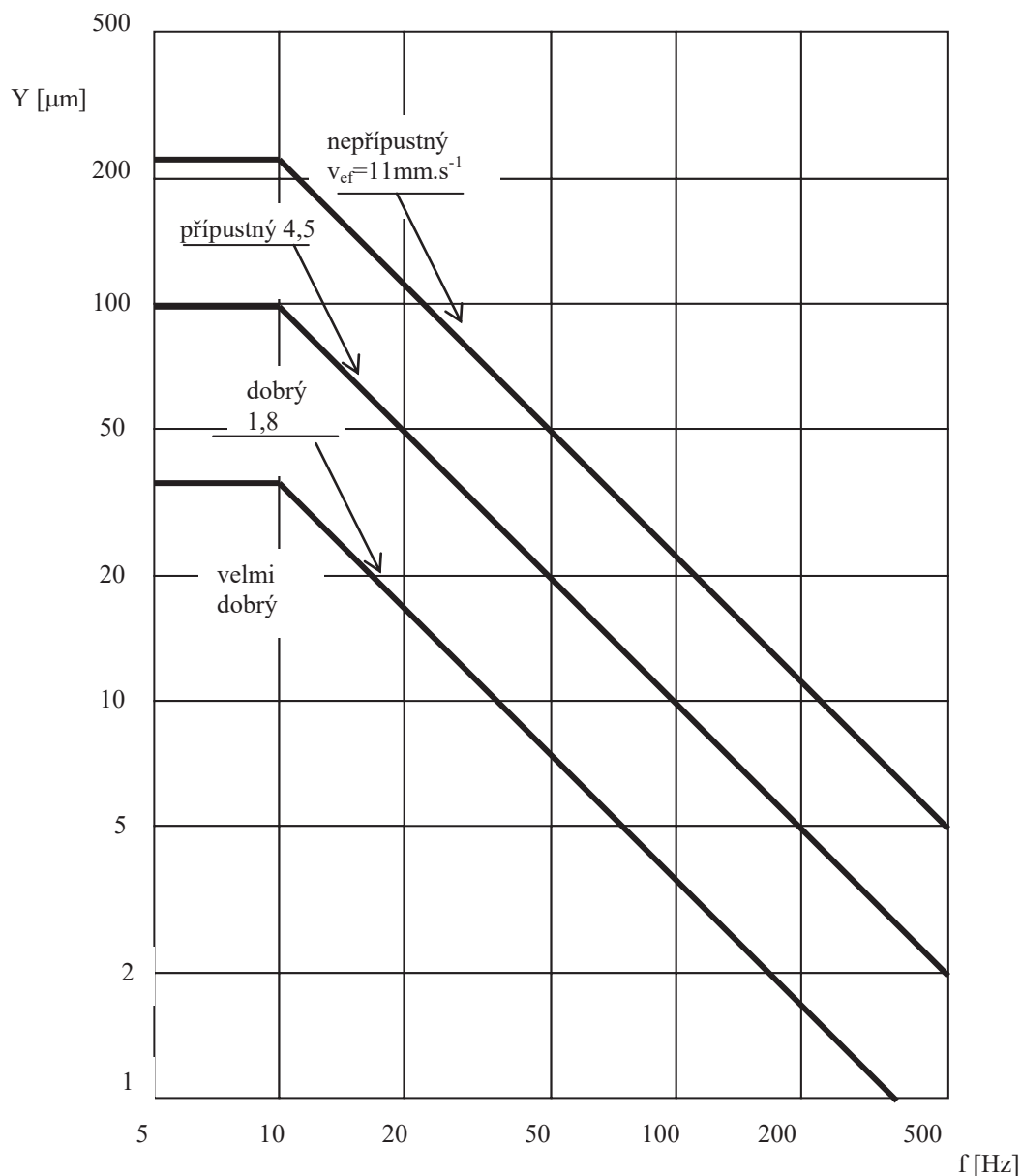
Přípustné hodnoty chvění jsou dány normou. Udávají se dovozené hodnoty jednoduché ekvivalentní amplitudy (nikoliv dvojamplitudy) rychlosti chvění. Nomogram udávající hodnocení chvění je na následujícím obrázku. Stroje se při hodnocení chvění třídí do skupin podle výkonů, otáček, způsobu uložení apod. Uvedený nomogram je pro skupinu strojů G, které jsou vysoko laděné, na tuhých nebo těžkých základech. Platí pouze pro stroje s rotujícími hmotami.

Hluk

Hluk je jedním z důležitých parametrů stroje, zejména jedná-li se o stroj určený pro pohon dopravního prostředku nebo má-li stroj pracovat trvale v přítomnosti osob. Nehlučný stroj může být až o polovinu dražší, než stejný stroj neodhlučněný. Přesto, nebo však právě proto, bude na trhu schopen konkurence.

Měření hluku velkých elektrických strojů je obtížné, protože jsou rozměrné a nelze je umístit do tiché (bezdozvukové) komory, jako stroje malé. Obvykle se měří ze vzdálenosti 1m od stroje. Předpokládá se, že dále je zvukové pole shodné s akustickým polem volným. Kolem zkoušence má být volný prostor alespoň 5m. Okolní prostředí má být relativně tiché, hluk pozadí musí být alespoň o 10dB nižší, než hladina hluku zkoušence. Proto je vhodné měřit v noci.

V oblasti měření hluku a chvění je zavedenou značkou firma Brüel & Kjaer. Nejčastěji se měří hluk v oktávových a třetinooktávových pásmech. Dále se používají váhové filtry A, B, C a některé další. Tyto filtry potlačují některé frekvence podle závislostí uvedených normou.



Obr. 10.3. Nomogram pro posouzení stavu stroje podle chvění točivých strojů skupiny G

Zdroje hluku:

- kmitající plochy (membrány)
- kmitající nosníky (struny)
- turbulentní proudění (Karmánovy víry, a to i v kapalinách)
- rázy těles

- magnetostrickce (dvojnásobek napájecího kmitočtu)

Akustické veličiny

1. Akustický tlak p [Pa]

Jde o střídavý tlak akustického vlnění. Jedná se o lokální odchylky od středního barometrického tlaku. Vztažná hodnota je $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa. Jedná se o minimální slyšitelnou hodnotu zdravého lidského orgánu sluchu.

2. Akustická rychlost v [m.s⁻¹]

Akustická rychlost je rychlostí kmitání částic nositele zvuku kolem klidové polohy. Pro volné postupné vlnění platí rovnice

$$\frac{p}{v} = \rho c = \text{konst} \quad (10.16)$$

kde je ρ [kg.m⁻³] hustota vzduchu $\rho = 1,23$ [kg.m⁻³]
 c [m.s⁻¹] rychlost šíření zvuku

3. Rychlost šíření zvuku c [m.s⁻¹]

Pro rychlost šíření zvuku ve vzduchu platí přibližně vztah

$$c \cong 332 + 0,6\vartheta \quad (10.17)$$

kde je ϑ [°C] teplota vzduchu

4. Vlnová délka zvuku λ [m]

Se určí pomocí vztahu

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (10.18)$$

5. Intenzita zvuku I [W.m⁻²]

Je to energie, která prochází plochou 1 m² ve směru kolmém na směr šíření. Platí vztahy

$$I = p \cdot v \quad (10.19)$$

$$I = \rho c v^2 = \frac{p^2}{\rho c} \quad (10.20)$$

Vztažná hodnota je $I_0 = 10^{-12}$ [W.m⁻²]. Toto je minimální (prahová) hodnota intenzity zvuku, která je slyšitelná lidským sluchem.

6. Akustický výkon P [W]

Akustický výkon zdroje hluku se stanoví jako

$$P = I \cdot S \quad (10.21)$$

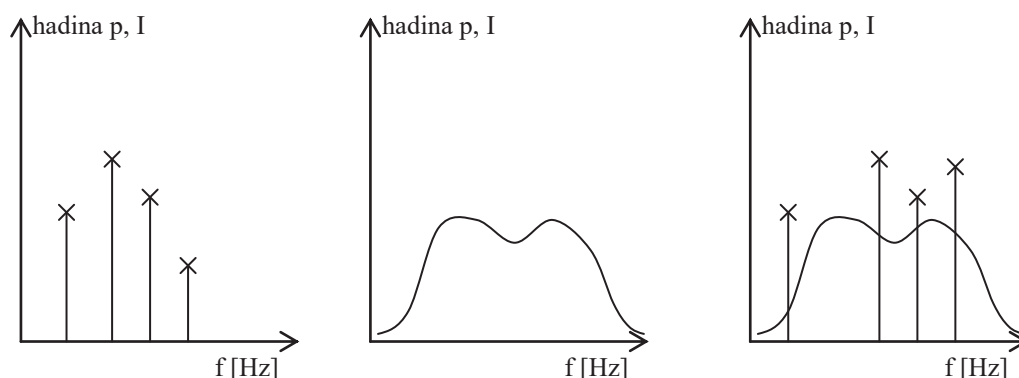
Pokud je však na ploše S proměnná intenzita zvuku, použijeme vztah

$$P = \oint_S IdS \quad (10.22)$$

7. Spektrum hluku

V zásadě lze spektra hluku dělit do tří typů, dle následujícího obrázku.

- Diskrétní spektrum (několik tónů -frekvencí- je významných)
- Spojité spektrum (např. bílý šum, růžový šum, ...)
- Smíšené spektrum (kombinace obou)



Obr. 10.4. Diskrétní, spojité a smíšené spektrum hluku

8. Hladina intenzity zvuku, hladina akustického tlaku L [dB]

Platí fyziologický zákon, který říká: „Smyslové vnímání člověka je úměrné logaritmu podnětů.“ Jak lidské oko, tak lidský sluch je schopen zpracovat obrovský rozsah (asi v rozmezí 6 řádů) akustického tlaku. Protože vyjadřování pomocí exponentů by bylo neúčelné (nepřehledné), zavádějí se tzv. hladiny. Vztažnou hladinou je pak prahová intenzita, popř. akustický tlak, který je člověk schopen zaznamenat. Pro hladiny je zavedena jednotka Bell [B]. Protože se však jedná o velkou jednotku, používá se prakticky pouze její podíl – decibell [dB].

Hladina intenzity zvuku

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} \text{ [dB]} \quad (10.23)$$

Protože platí

$$I = pv = \frac{p^2}{\rho c} \quad (10.24)$$

můžeme zavést

$$I_0 = \frac{p_0^2}{\rho c} \quad (10.25)$$

Pak bude hladina akustického tlaku

$$L = 10 \log \frac{p^2}{p_0^2} = 20 \log \frac{p}{p_0} \text{ [dB]} \quad (10.26)$$

Jedná se o hladinu lineární, bez korekce (viz dále).

Pro zdroje hluku se zavádí hladina akustického výkonu

$$L_p = 10 \log \frac{P}{P_0}, \quad (10.27)$$

kde je $P_0 = 10^{-12}$ [W]

9. Váhové filtry

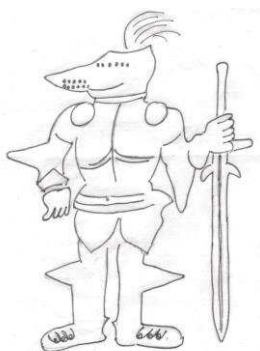
Hladiny zvuku se mohou korigovat (a také často korigují) váhovými filtry (např. A, B, C), které mají za úkol zohlednit fyziologické slyšení lidského ucha. V podstatě jde o to, že i když bude pro všechny slyšitelné frekvence naprosto shodná hladina akustického tlaku, lidské ucho neslyší všechny frekvence stejně silně. Lidské ucho nejcitlivěji vnímá frekvence v rozmezí asi 1 – 4 kHz.

Hladina zvuku korigovaná podle filtru A bude stanovena jako

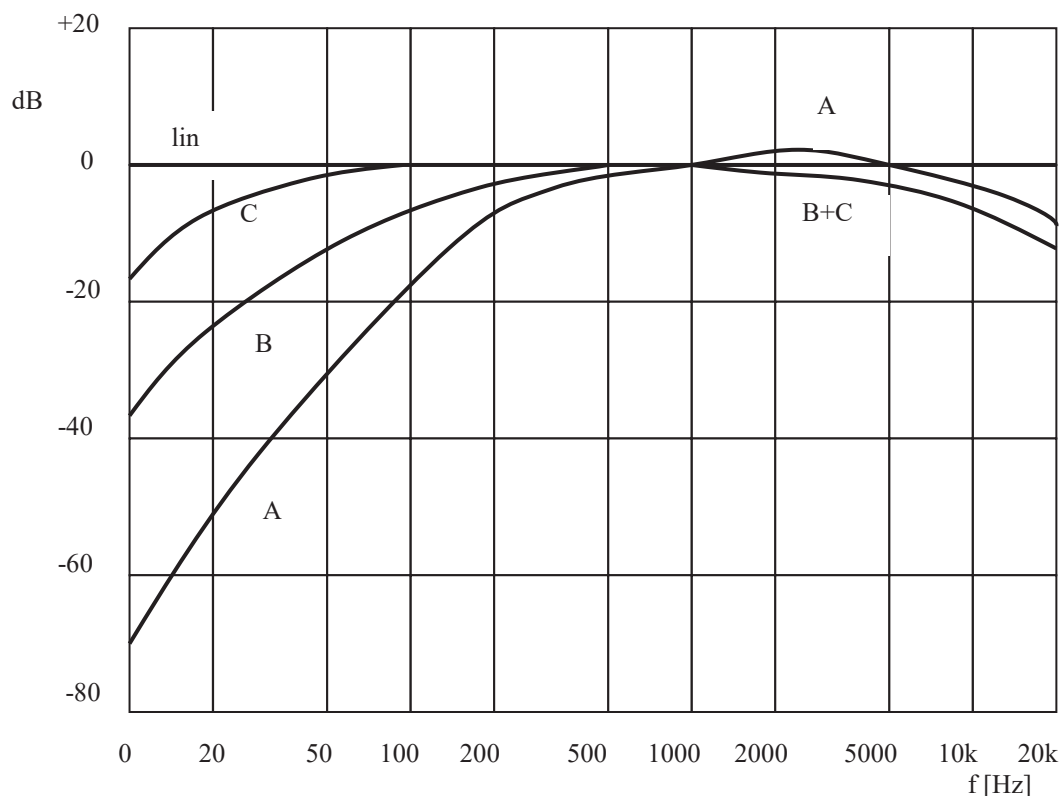
$$L_A = 20 \log \frac{P_A}{P_0}, \quad (10.28)$$

tedy nikoliv podle vztahu (10.27).

Rozsah slyšitelných frekvencí lidského sluchu se udává od 20Hz do 16kHz (někdy až do 20kHz). Rozsah tlaků, které je lidský sluch schopen zpracovat je značný (od prahu vnímání $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa do hranice poškození sluchu, která se udává jako $p = 20$ Pa). Jedná se o rozsah asi 6 řádů $\rightarrow 0 - 120$ dB.



Brnění je skvělá věc, jen se v něm neumím nehlučně plížit k nepříteli.



Obr. 10.5. Váhové filtry A, B, C

Pro sčítání hladin od více zdrojů platí vztahy

$$L_I = 10 \log \frac{\sum_i I_i}{I_0} \quad (10.29)$$

$$L = 10 \log \frac{\sum_i p_i^2}{p_0^2} \quad (10.30)$$

Pokud k jednomu zdroji hluku přidáme druhý zdroj, který vyzařuje na jiné frekvenci, ale o shodné intenzitě ($I=I_0$), zvýší se hladina akustické intenzity hluku o

$$L_I = 10 \log \frac{2I}{I_0} = 10 \log 2 + 10 \log \frac{I}{I_0} \cong 3 \text{ dB} \quad (10.31)$$

a hladina akustického tlaku o

$$L = 20 \log \frac{2p}{p_0} = 20 \log \frac{p}{p_0} + 6 \text{ dB} \quad (10.32)$$

Pro sčítání hladin od dvou zdrojů shodné (diskrétní) frekvence $f_1 = f_2$ a intenzity $I_1 = I_2$ pak záleží na fázi kmitu. Pokud se fáze podporují, může dojít (při naprosto nulovém fázovém posunu) o nárůst hluku až o 6 dB. Pokud jsou kmity v protifázi, hluk se vyruší. Toho se někdy i využívá. Pokud požadujeme v lokálním místě snížení hluku, hluk se snímá mikrofony a s opačnou fází se pomocí reproduktorů vybuzuje a sčítá s hlukem původním. V lokálním místě je pak hluchost nižší.

Pokud máme dva zdroje o shodné intenzitě a blízké frekvenci, pak vznikají zázněje.

Zvukové vlny a jejich šíření

- rovinné
- kulové (poblíž malých zdrojů hluku, ve velké vzdálenosti je lze považovat za rovinné)

Zvukové pole

- volné zvukové pole
- stojaté vlnění (při nárazu na překážku, jejíž rozměr je $>\lambda$ se odráží)
- difúzní pole (vlivem mnohonásobných odrazů v uzavřeném prostoru je výsledné pole velice složité. Bezprostřední okolí zdroje je asi do vzdálenosti

$$d = 0,1\sqrt[3]{V} \quad [m] \quad (10.33)$$

kde V je objem uzavřeného prostoru, ve kterém je měřený zdroj umístěn.

V tomto okolí převažuje pole přímých vln a zde je potřeba měření provést.

Souvislost chvění a hluku

Uvažujme rovinnou stěnu o ploše 1 m^2 , která kmitá harmonicky s amplitudou $Y=1 \text{ }\mu\text{m}$ a frekvencí $f=1 \text{ kHz}$. Uvažujme, že vznikne rovinná vlna.

Amplituda rychlosti

$$V = \omega Y = 2\pi \cdot 1000 \cdot 10^{-6} = 6,28 \cdot 10^{-3} \text{ m.s}^{-1} \quad (10.34)$$

akustická rychlost

$$v = \frac{V}{\sqrt{2}} = 4,44 \cdot 10^{-3} \text{ m.s}^{-1} \quad (10.35)$$

akustický tlak

$$p = v\rho c = 4,44 \cdot 10^{-3} \cdot 1,23 \cdot 330 = 1,8 \text{ Pa} \quad (10.36)$$

hladina akustického tlaku

$$L = 20 \log \frac{p}{p_0} = 20 \log \frac{1,8}{2 \cdot 10^{-5}} = 20(\log 9 + \log 10^4) = 20(0,95 + 4) \cong 99 \text{ dB} \quad (10.37)$$

Měření hluku strojů

- se provádí ve více místech (min. 8) kolem stroje, ve vzdálenosti asi $0,5 - 1 \text{ m}$. Změří se L_A , L_{lin} pomocí zvukoměru.
- stanoví se střední hodnoty a ty se porovnají s normou a hygienickými předpisy
- pro identifikaci zdrojů hluku se provede harmonický rozbor. Jde hlavně o oktávovou analýzu, třetinooktávovou analýzu, které se udělají pomocí filtrů a

pásmových propustí. V případě potřeby se ještě provede detailní analýza pomocí frekvenčního analyzátoru.

- korekce na hluk pozadí. Nejprve se změří hluk bez zapnutého stroje. Pak se stroj spustí. Pokud je rozdíl hladin alespoň 10dB, korekce se neprovádí. Pokud je rozdíl hladin menší, provádí se následující korekce :

Rozdíl hladin [dB]	Korekce [dB]
6-9	-1
4-5	-2
<4	nelze měřit

Pokud měření nelze uskutečnit pro vysoký hluk pozadí, musí se měřit v bezdozvukové komoře nebo v noci.

Charakter hlukových signálů

- ustálený hluk (ve sledovaném časovém intervalu jsou změny max. 5dB)
- proměnný hluk (změny kolísají o více než 5 dB, dělá se zpravidla záznam)
- impulzní hluk (jednotlivé pulzy, popř. sled pulzů 1-200 ms, měří se vrcholová hodnota, popř. se dělá analýza. Příkladem může být hluk vypínače)

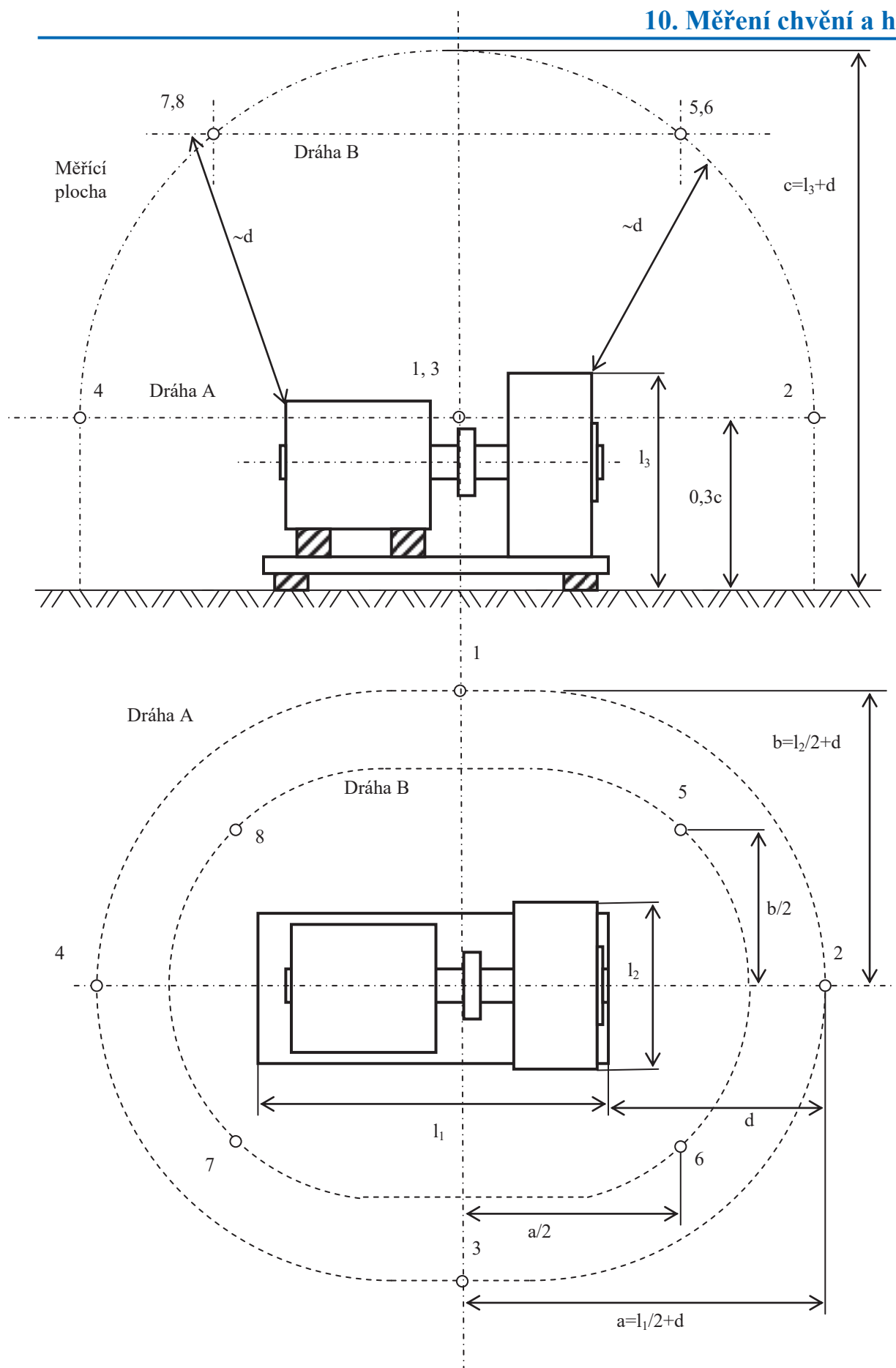
Čidla zvuku

- kondenzátorový mikrofón (nejpřesnější, ale také nejchoulostivější)
- dynamický mikrofón
- krystalový mikrofón

Mikrofony se kalibrují.



Ta zem oplývá medem...Nebo že bych objevil magnetismus??



Obr. 10.6. Volba měřicích míst



Otázky k tématu:

- *Jakým kmitočtem se projevuje magnetostrickce?*
 - *Co to je rezonance?*
 - *Jaká je rychlost zvuku ve vzduchu?*
 - *K čemu jsou vhodné váhové filtry?*
-



Správné odpovědi

- *Jakým kmitočtem se projevuje magnetostrickce?*

Projevuje se dvojnásobným kmitočtem než je napájecí frekvence.

- *Co to je rezonance?*

Shoda kmitočtu vlastních kmitů a budících kmitů.

- *Jaká je rychlost zvuku ve vzduchu?*

Přibližně 330m/s.

- *K čemu jsou vhodné váhové filtry?*

Zohledňují nelineární vnímání různých kmitočtů lidským uchem.

11. Vyvažování rotorů



Předpokládaný čas: 15 min

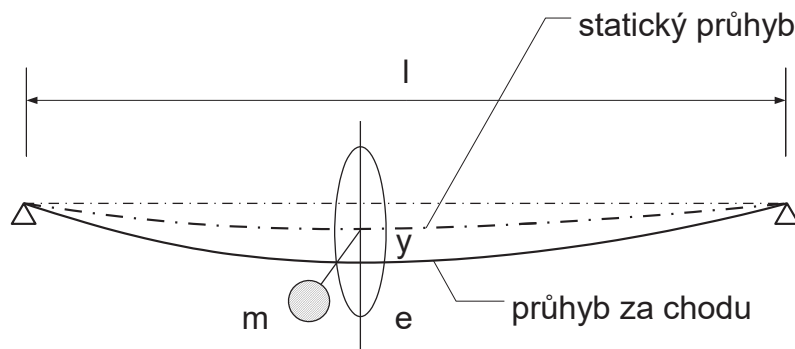


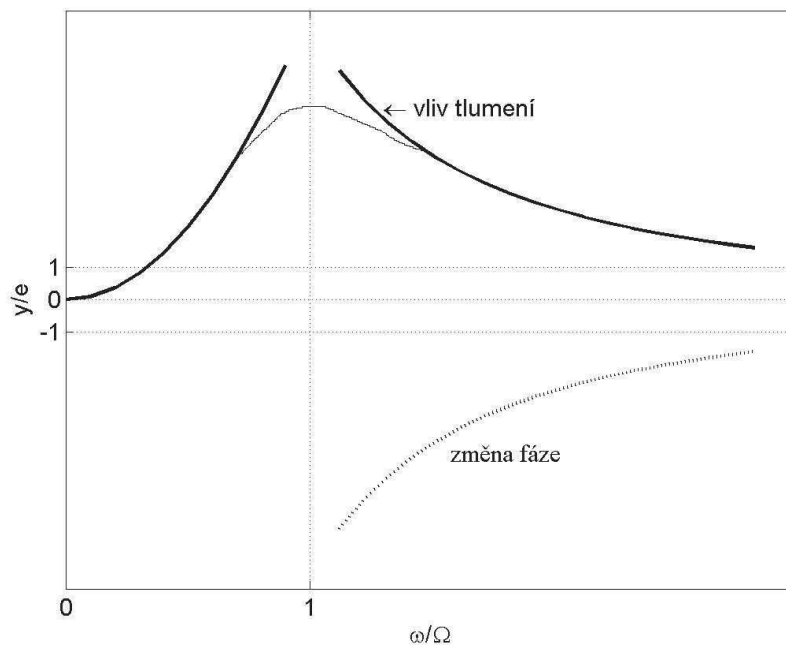
Po prostudování tématu budete:

- Umět na rotory aplikovat termíny “těžiště”, “hlavní osa setrvačnosti”, “statická nevyváženost”, “dynamická nevyváženost”, kombinovaná nevyváženost”
- Umět třídit rotory dle tuhosti a vyvažování
- Znat postup při vyvažování tuhého rotoru

Chvění elektrických strojů vzniká zejména odstředivými silami, které jsou způsobeny rotací nevyvážených hmot. Uvažujme idealizovaný případ rotoru s jedinou soustředěnou hmotou.

Krouživé kmitání





Obr. 11.1. Průhyb hřídele za chodu a amplitudová charakteristika

Na obrázku jsou znázorněny poměry při krouživém kmitání hmoty na dvou podporách, kde je

y ... výchylka elastické (pružné) osy
M ... hmotnost
e ... excentricita.

Pak je odstředivá síla rovna direktivní síle od hřídele, která se snaží vrátit rotor zpět, podle vztahu

$$M(y + e)\omega^2 = ky \quad (11.1)$$

a kde pro zatížení ve středu hřídele platí

$$k = \frac{48EI}{l}, \quad (11.2)$$

kde je l ... délka rotoru [m]
E ... modul pružnosti [MPa]
I ... moment setrvačnosti průřezu hřídele [m⁴].

Rovnici (11.1) upravíme na tvar

$$(y + e)\omega^2 = \frac{k}{M}y \quad (11.3)$$

a zavedeme označení

$$\frac{k}{M} = \Omega^2, \quad (11.4)$$

kde Ω je vlastní frekvence. Rovnici pak můžeme přepsat na tvar

$$y = \frac{\omega^2}{\Omega^2 - \omega^2}e \quad (11.5)$$

nebo po vydělení excentricitou e a úpravě na tvar

$$\frac{y}{e} = \frac{\left(\frac{\omega}{\Omega}\right)^2}{1 - \left(\frac{\omega}{\Omega}\right)^2}, \quad (11.6)$$

kde je na pravé straně rovnice tzv. dynamický součinitel.

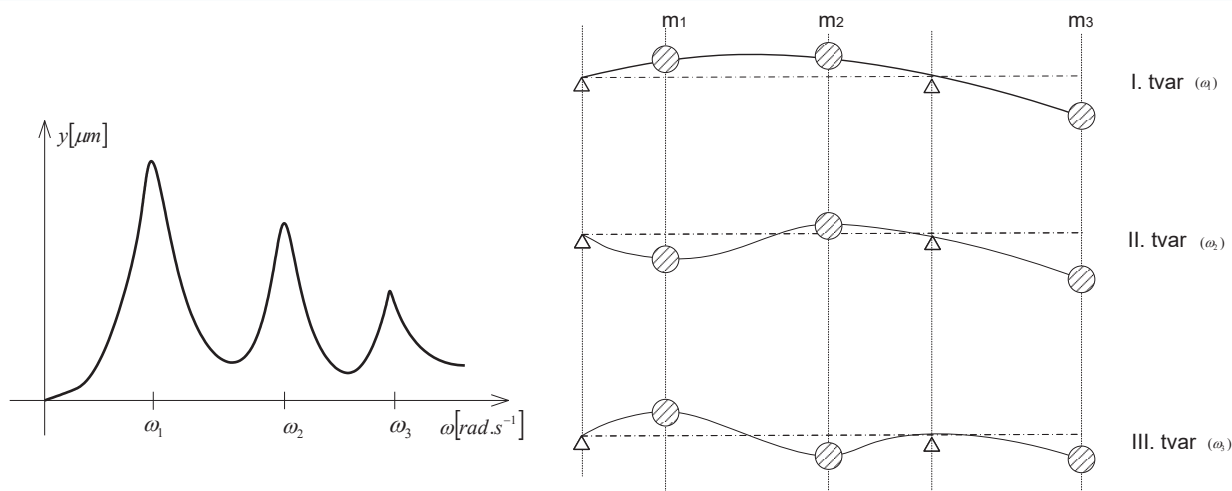
Základní pojmy

Těžiště je bod, kde je součet všech elementárních momentů daného tělesa, vztažených k těžišti, nulový. Těleso má pouze jedno těžiště. Na těleso podepřené v těžišti nepůsobí žádný točivý moment, který by byl vyvolaný vlastní hmotností tělesa.

Hlavní osa setrvačnosti prochází těžištěm a na těleso rotující podle ní nepůsobí žádný deviační moment. Těleso může mít několik hlavních os setrvačnosti.

Nevyváženost je způsobena tím, že osa rotace, daná geometrickou osou čepů rotujícího tělesa, se neshoduje s hlavní osou setrvačnosti. Prochází-li osa rotace těžištěm, ale je různoběžná s hlavní osou setrvačnosti, vzniká tzv. **dynamická nevyváženost**. Za klidu nepůsobí na těleso žádný točivý moment, za rotace pouze momentová dvojice (deviační moment). Prochází-li osa rotace mimo těžiště, ale rovnoběžně s hlavní osou setrvačnosti, vzniká **statická nevyváženost**. Za klidu i za rotace působí na těleso posuvná síla ve směru výslednice odstředivého a tíhového zrychlení. V praxi se většinou jedná o kombinovanou nevyváženost. Skutečná osa rotace je mimoběžná s hlavní osou setrvačnosti.

Při **kritických otáčkách** dochází ke značnému vzrůstu amplitudy chvění. Jde o rezonanci při shodě otáčkového kmitočtu a vlastního ohybového kmitočtu rotujícího tělesa. Při úhlové rychlosti ω_1 nastane rezonance ohybového kmitočtu při jednoduchém průhybu (I. tvar). Druhá kritická úhlová rychlost a vyšší kritické rychlosti nastávají při II. a vyšších tvarech průhybů.



Obr. 11.2. Rezonanční charakteristika a tvary průhybových čar při krouživém kmitání s více hmotami. Platí $\omega_1 < \omega_2 < \omega_3$.

Třídění rotorů podle tuhosti a podle vyvažování

Rotor musí mít jmenovitou rychlost dostatečně daleko od kritických otáček. Může pracovat pod nebo nad kritickými otáčkami. Rotory pracující do 70% kritických otáček jsou považovány za tuhé. Rotory pracující v nadkritické rychlosti jsou uvažovány jako pružné.

Podle druhu rotoru se samozřejmě musí volit i metoda jeho vyvažování. U velkých elektrických strojů se nejčastěji vyskytují tyto druhy rotorů:

- tuhé, krátké rotory ($\omega_n \leq 0,5 \Omega$)
- kombinované
- pružné, ($\omega_n \geq 0,8 \Omega$)
- vertikální rotory, většinou tuhé

Vyvažování

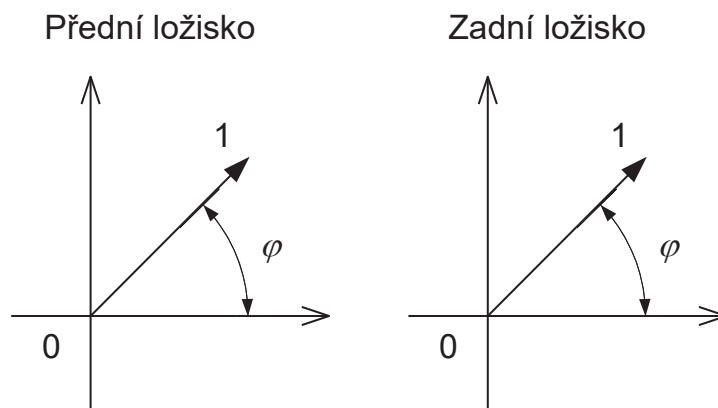
Aby bylo vyvažování účinné, je nutno umisťovat vývažky na co největší poloměr. Pak je hmotnost vývažků nejmenší možná. U rotorů typu a) je nutná jedna vyvažovací rovina, u rotorů typu b) dvě roviny u typu c) tři a více (až 20).

U rotorů s kontinuálně rozloženou hmotou je výpočet vyvážení složitější (diferenciální rovnice 4. řádu, řešení na PC). Existuje totiž teoreticky nekonečně mnoho vlastních frekvencí.

Na kritické otáčky mají vliv i tuhosti ložiskových podpor. Konečná tuhost podpor způsobí pokles rezonanční frekvence a tím i kritických otáček.

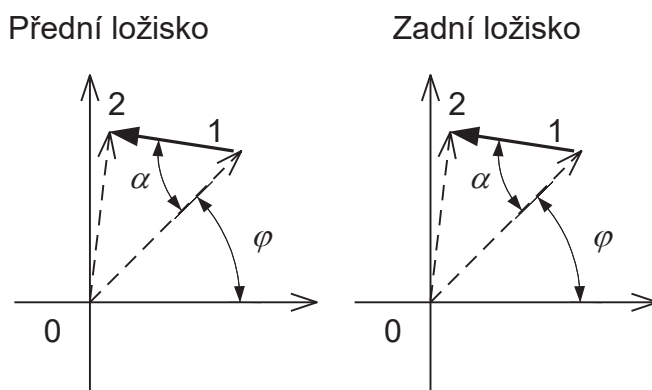
Tuhé rotory se vyváží staticky - v jediné rovině. Pro hrubé vyvážení lze místo vývažku určit odvalováním po pravítkách. Rotor se zastaví nejtěžší částí dole. Vývažek umístíme naproti.

Polohu vývažku pro konečné vyvážení určíme na vyvažovačce. Na obou ložiskách jsou umístěny snímače chvění a s hřídelem je spojen i snímač fáze. V prvním běhu se stroj roztočí na jmenovité otáčky a změří se chvění obou ložiskových podpor. Kmitání se zobrazí ve vektorovém diagramu jako vektor, který je určený amplitudou chvění (modul) a fází (úhel).



Obr. 11.3. Vektory chvění ložisek po prvním běhu (tuhý rotor)

Pak se stroj zastaví a na libovolné místo se umístí vývažek. V druhém běhu se zjistí vliv pokusného vývažku na chvění ložisek. Nové hodnoty amplitud se zakreslí jako body 2 do téhož diagramu. Vektor 12 představuje vliv pokusného vývažku.



Obr. 11.4. Vektory chvění po prvním a druhém běhu

U tuhých krátkých rotorů jsou kmity obou ložisek obvykle ve fázi. Mezi hmotností a polohou vývažku, amplitudou a fází chvění jsou lineární závislosti. Proto měření v digramu určíme velikost a polohu definitivního vývažku. Hmotnost musí být změněna v poměru

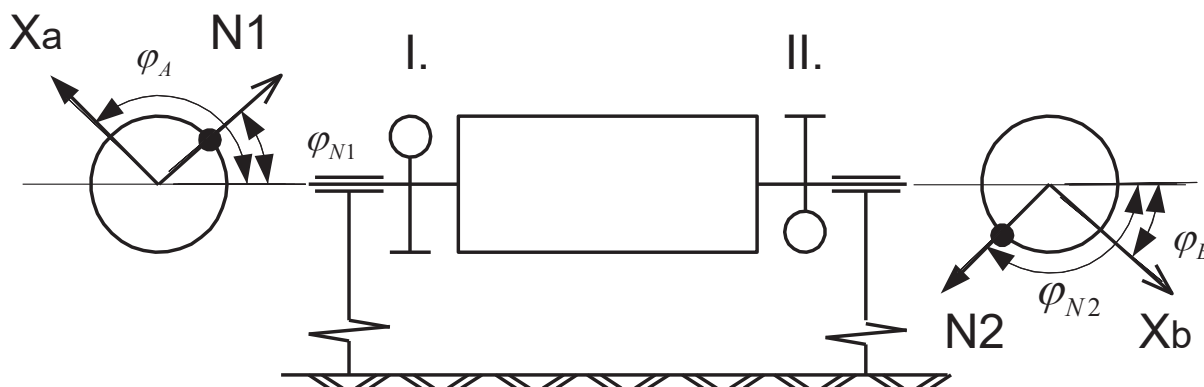
$$\frac{m_d}{m_p} = \frac{01}{12} \quad (11.7)$$

kde m_d je definitivní hmotnost vývažku
 m_p je hmotnost pokusného vývažku.

Vývažek musí být pootočen o úhel α ve směru měření úhlů. Třetím během se kontroluje, zda vývažek byl určen správně.

Tuhé rotory větší délky se vyvažují ve dvou rovinách. Je nutno je vyvážit staticky i dynamicky. Lze očekávat rozdílné kmity ložisek co do amplitudy i fáze. Předpokládáme však, že

- Výchylky ložisek jsou úměrné nevývažkům
- Jedná se o lineární soustavu



Obr. 11.5. Rotor, vyvažovací roviny a nevývažky

Nevyváženost způsobují nevývažky N_1 a N_2 ve vyvažovacích rovinách I a II na poloměru r , pod úhly φ_{N1} a φ_{N2} . Souřadný systém je pevně spojen s rotorem. Nevývažky způsobují výchylky ložisek X_A a X_B pod úhly φ_A a φ_B . Cílem je proto stanovit nevývažky N_1 a N_2 (velikost) a stanovit jejich polohu φ_{N1} a φ_{N2} .

Vhodná metoda stanovení je pomocí Maxwellových vzájemných koeficientů α_{AI} , α_{AII} , α_{BI} , α_{BII} .

Platí rovnice

$$X_A = \alpha_{AI} N_1 + \alpha_{AII} N_2 \quad (11.8)$$

$$X_B = \alpha_{BI} N_1 + \alpha_{BII} N_2 \quad (11.9)$$

Veličiny X a N jsou komplexní čísla, určující modul a úhel.

Koeficienty α_{AI} , α_{AII} , α_{BI} , α_{BII} získáme ze dvou pomocných běhů při shodných otáčkách.

V prvním běhu umístíme do roviny I známý nevývažek W_1 . Po stanovení chvění jej vyjmeme.

V druhém běhu umístíme do roviny II známý nevývažek W_2 . Po stanovení chvění jej vyjmeme.

Nyní máme pomocné rovnice

$$X_{AI} = \alpha_{AI} (N_1 + W_1) + \alpha_{AII} N_2 \quad (11.10)$$

$$X_{BI} = \alpha_{BI} (N_1 + W_1) + \alpha_{BII} N_2 \quad (11.11)$$

$$X_{AII} = \alpha_{AI} N_1 + \alpha_{AII} (N_2 + W_2) \quad (11.12)$$

$$X_{BII} = \alpha_{BI} N_1 + \alpha_{BII} (N_2 + W_2) \quad (11.13)$$

Odečtením rovnic určíme koeficienty

$$(11.10)-(11.8) \quad \alpha_{AI} = \frac{X_{AI} - X_A}{W_1} \quad (11.14)$$

$$(11.12)-(11.8) \quad \alpha_{AII} = \frac{X_{AII} - X_A}{W_2} \quad (11.15)$$

$$(11.11)-(11.9) \quad \alpha_{BI} = \frac{X_{BI} - X_B}{W_1} \quad (11.16)$$

$$(11.13)-(11.9) \quad \alpha_{BII} = \frac{X_{BII} - X_B}{W_2} \quad (11.17)$$

Po výpočtu Maxwellových koeficientů vyjádříme z rovnic (11.8) a (11.9) nevývažky N_1 a N_2 (komplexní čísla)

$$N_1 = \frac{\alpha_{BII}X_A - \alpha_{AII}X_B}{\alpha_{AI}\alpha_{BII} - \alpha_{AII}\alpha_{BI}} \quad (11.18)$$

$$N_2 = \frac{\alpha_{AI}X_B - \alpha_{BI}X_A}{\alpha_{AI}\alpha_{BII} - \alpha_{AII}\alpha_{BI}} \quad (11.19)$$

Po výpočtu nevývažků v určených polohách tyto odebereme nebo do pozice $+180^\circ$ přidáme vývažek $V_1=N_1$ a $V_2=N_2$.

Při kontrolním běhu chvění podstatně klesne. Pokud k tomu nedojde, nejedná se pravděpodobně o lineární soustavu (složitý tvar rotoru). Pak vyvažujeme jednu rovinu nezávisle na druhé. To opakujeme popř. i vícenásobně.

Po vyvážení se udělá zkouška odstředěním. Po dobu 5 min se rotor otáčí rychlostí 120% jmenovité rychlosti. Zvláštní pozornost je třeba věnovat hydrorotorům, kde mohou být průběžné otáčky turbíny (při odlehčení) podle typu i 200% jmenovitých otáček.

Otázky k tématu:



- S rostoucí rychlostí rotoru výchylka jeho vibrací stoupá nebo klesá?
- Nachází se těžiště vždy uvnitř tělesa - rotoru?
- Jak poznáme, že je rotor staticky vyvážen?
- V kolika rovinách se vyvažují tuhé rotory?



Správné odpovědi

- S rostoucí rychlostí rotoru výchylka jeho vibrací stoupá nebo klesá?

11. Vyvažování rotorů

V podkritických rychlostech stoupá, v nadkritických otáčkách pak klesá.

- *Nachází se těžiště vždy uvnitř tělesa - rotoru?*

Zpravidla ano, ale nemusí tomu tak být vždy. Např. dutá hřídel stroje má těžiště lokalizované ve své dutině. Podobně tvar typu “zvon” má těžiště mimo vlastní materiál.

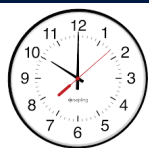
- *Jak poznáme, že je rotor staticky vyvážen?*

Rotor se při odvalování na břitech – pravítkách zastaví v libovolné poloze.

- *V kolika rovinách se vyvažují tuhé rotory?*

Tuhé rotory se vyvažují zpravidla ve dvou rovinách.

12. Diagnostická měření



Předpokládaný čas: 20 min



Po prostudování tématu budete:

- Umět vytipovat vhodné veličiny s velkou vypovídací schopností pro diagnostiku
- Znat kritická místa vzniku poruchy u asynchronních strojů
-

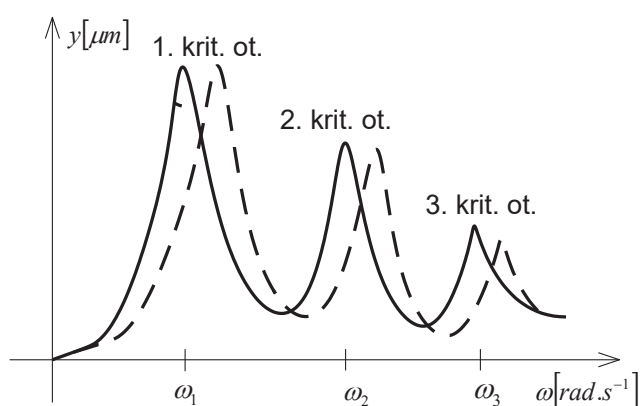
Cílem diagnostických měření je předcházet poruchám včasným rozpoznáním a identifikací změn v chování stroje (elektrického zařízení). Diagnostika je však závislá na vybraných sledovaných veličinách, které musí mít tzv. vypovídací schopnost. V neposlední řadě je nutné získané výsledky správně interpretovat.

Diagnostická měření mohou být

- trvalá (monitorování)
- občasná (měření se opakuje v pravidelných intervalech a provádí se za stejných podmínek)

Sledované veličiny u velkých točivých strojů jsou např.

- chvění ložisek (čepů), závady valivých ložisek
- frekvenční charakteristika při doběhu (změna amplitudy a polohy kritických otáček)



Obr. 12.1. Změna frekvence kritických otáček při uvedení do provozu a při diagnostickém měření po jisté době provozu

- chvění aktivních částí (železo, čela vinutí jsou osazeny piezoelektrickými snímači). Frekvenční analýza může odhalit uvolňování vinutí
- hluk a jeho frekvenční analýza

Uvedené diagnostické testy jsou založeny na porovnávání nových výsledků s dříve naměřenými hodnotami. Při uvedení stroje do provozu se udělá první referenční měření, z něhož se zavedením přípustných odchylek vytvoří maska. S touto maskou se porovnávají později zjištěné hodnoty a sledují se jejich trendy. Jednotlivá měření i výsledky je pak vhodné uchovávat v databázi.

Další diagnostikované veličiny:

- teploty aktivních částí (železo, vinutí a ložisek)
- průtok chladiva (nesmí dojít k ucpání žádné paralelní větve, teplota)
- únik chladiva (voda, vodík)
- částečné výboje (monitorování stavu izolačního systému)
- napěťové izolační zkoušky (při sníženém napětí vzhledem k novému stroji)
- $\tan \delta$
- prosakující proudy
- polarizační index

Jak vyplývá z výše uvedeného, jedná se o soubor měření jak elektrických, tak mechanických parametrů. Pro monitorování elektrických strojů se proto postupem doby vyvinuly speciální diagnostické přístroje, zajišťující sběr i analýzu dat.

Pokročilé monitorovací systémy pro vysokorychlostní sběr a analýzu dat

Systém je zkonstruován tak, aby zachytil a analyzoval data od parních a plynových turbín, vodních turbín, turbogenerátorů, kompresorů, hlavních cirkulačních čerpadel reaktorů, elektrických motorů, ventilátorů, dmychadel a jiných rotačních strojů. Představuje nový standard v monitorování stavu strojů.

Zahrnuje vlastnosti a funkce vícekanálových magnetofonů, spektrálních analyzátorů a osciloskopů. V přenosném provedení při minimální hmotnosti je ideálním systémem pro provozní konzultanty i pro domácí specialisty. Systém bývá označován též jako virtuální instrumentace.

Skládá se z:

- jednoho nebo více zařízení pro sběr dat, které má každé až 32 kanálů,
- programu
- počítačového systému laptop (volitelný).

V průběhu přechodového procesu (rozběh nebo doběh stroje) i při ustáleném režimu provozu se současně vzorkuje od 1 do 32 kanálů dynamických vibračních dat. Automaticky se přepíná režim sběru dat mezi přechodovým procesem a ustáleným provozem podle podmínek. Tato schopnost činí z AMS důležitý nástroj pro strojní specialisty závodu. Navzorkovaná data mohou být dodatečně několikrát zpracována podle různých omezení a to umožňuje, aby analytici upravili data podle svých preferencí pro analýzu. Takovou vlastnost nemají méně výkonné diagnostické systémy.

Zvláštní skupinou měření jsou mechanická měření při ustavování strojů. Pokud nejsou stroje dobře ustaveny, vzniká nadměrné chvění, hluk, opotřebení ložisek, jejich nepřípustné oteplení apod. Tento stav pak způsobuje větší energetické ztráty, nižší účinnost, vyšší poruchovost a v konečném důsledku zkrácení životnosti soustrojí.

Malá soustrojí lze vyrovnat pomocí měrek. V současnosti jsou však k dispozici laserové přístroje pro vyrovnávání hřídelů soustrojí, složeného i z několika velkých strojů.



Obr. 12.2. Příklady ustavování strojů

Přesnost měření je asi $1\mu\text{m}$ do vzdálenosti 120m. Ustavovat lze hřídele a spojky horizontálních i vertikálních soustrojí. Přístroje lze obvykle užít i k ustavování strojů, namontovaných s posunutím, kardanové hřídele, ustavování soustrojí z více částí, měření přímosti, rovinnosti, kolmosti, rovnoběžnosti ploch, termálních deformací. Přesnost měření je až 0,001 mm, resp. 0,02 mm/m kolmosti, rovinnosti a vodováhy. Tak lze ustavovat i velké válcovací a papírenské tratě. Při ustavování hřídelů lze volit možnosti ustavení ložiskových stojanů do přímky nebo průhybové čáry, měření prohnutí základů apod. Při ustavování spojek postačí měření provést pro tři libovolné úhly. Nemusí být tedy dodržena 3-9-12 hodinová metoda měření. Zavedení programu ustavování soustrojí v setinách milimetrů již ušetřilo obrovské částky v podnicích na snížení poruchovosti motorů, čerpadel, atd.

Systém nové generace pro stanovování zbytkové životnosti

Systém je určený pro diagnostiku veškerých tlakových zařízení namáhaných v oblasti únavy. Jedná se zejména o kotlové bubny, parogenerátory, tepelné výměníky, tlakové nádoby v chemickém průmyslu a tlakové zásobníky.

Základní principy systému

- pracuje obvykle na PC pod operačním systémem Windows
- je navržen na základě mechatronického přístupu s využitím metod umělé inteligence
- jádro systému tvoří neuronové sítě stanovující průběh hlavních napětí v kritických místech sledovaného zařízení

Přínos nasazení systému

- zvýšení bezpečnosti provozu zařízení
- zpracování podkladů k žádosti pro dozorné orgány o udělení licence k provozu
- přehled o aktuálním stavu sledovaného zařízení
- optimalizace provozu zařízení na základě zjištěných výsledků
- optimální stanovení termínů odstávek, oprav, výměn součástí a nedestruktivních kontrol

Výhody

- nenáročná obsluha
- několikasetnásobné zrychlení výpočtu napjatosti v kritických místech vzhledem k výpočtům metodou konečných prvků
- vysoká přesnost hodnocení zbytkové životnosti

Varianty nasazení systému

- on-line hodnocení obsluhou provozovatele zařízení
- off-line expertní hodnocení u výrobce
- jako subsystém nadřazeného diagnostického systému

Při nasazení jako subsystém nadřazeného systému lze provádět hodnocení také na

- působení únavy a korozní praskání
- korozní únava
- náhlý lom (křehký, houževnatý)

Měření a expertizy

- Ustavování strojů
- Ustavování spojek
- Prostorová geometrie
- Měření a posouzení velkých soustrojí
- Vibrační diagnostika

- Diagnostika ložisek
- Analýza maziv a mazání

Diagnostika asynchronních strojů

Svojí jednoduchou konstrukcí jsou málo náchylné k poruše, přesto vlivem mnoha vnitřních a vnějších vlivů dochází k jejich degradaci a občasnému selhání. Mnoho úsilí je věnováno hledání příčin takovýchto selhání a návrhu metod, vhodných pro jejich včasné a korektní diagnostikování a provozním stavu.

Ložiska

Jsou zdrojem poruch v 48% případů. Jejich degradace může být způsobena mechanikou závadou (prasklá klec, kulička,...), ale příčinou mohou být i ložiskové proudy. Tyto poruchy nastávají zejména v souvislosti s napájením z frekvenčních měničů a jednotlivé mechanismy degradací nejsou dosud zcela objasněny.

Stator

Je zdrojem asi 25 % poruch. Jde zejména o závitové, mezifázové a zemní zkratky.

Rotor

Je zdrojem asi 8 % poruch. Jedná se např. o přerušenou tyč, přerušený kruh nakrátko, vyosení rotoru, resp. velký průhyb.

Jiné zdroje poruch

Jde o asi 19% poruch. Patří sem např. chybně namontovaný (uvolněný) ventilátor, mechanické závady krytů, kostry, patek, připojovacích svorek apod.

Příklad diagnostiky soustrojí PVE Štěchovice

Vibrodiagnostické zařízení

- Bezdotykový snímač pro měření chvění hřídele v horním vodícím ložisku generátoru, směr X a Y
- Absolutní snímač chvění horního vodícího ložiska, pouze směr X
- Bezdotykový snímač axiální polohy hřídele v závěsném ložisku soustrojí
- Absolutní snímač, axiální chvění závěsného ložiska
- Absolutní snímač chvění statoru generátoru, umístěný na kostře statoru, směr X i Y
- Bezdotykový snímač, chvění hřídele v dolním vodícím ložisku generátoru

- Absolutní snímač chvění dolního vodícího ložiska generátoru, pouze směr X
- Bezdotykový referenční snímač u otáčkového čidla turbíny
- Bezdotykový snímač chvění hřídele vodícího ložiska turbíny, směr X i Y
- Absolutní snímač chvění vodícího ložiska turbíny, směr X

Spojitě provozní parametry

- Činný příkon (výkon) [MW]
- Jalový příkon (výkon) [MVar]
- Otevření rozváděcího kruhu turbíny [%]
- Úroveň hladiny horní nádrže
- Úroveň hladiny dolní nádrže

Binární a reléové vstupy

- Automatický pochod (rozběh, doběh, přechod mezi režimy,...)
- Ustálený čerpadlový provoz
- Reset poruchových hlášení
- Poruchové hlášení – výstraha
- Poruchové hlášení - odstavení



Otázky k tématu:

- Jaké typy diagnostických měření existují?
- Jaké jsou nejčastější typy poruchy u ložisek asynchronních strojů?
- Jaký typ poruchy vinutí statoru je zpravidla prvotní?



Správné odpovědi

- Jaké typy diagnostických měření existují?

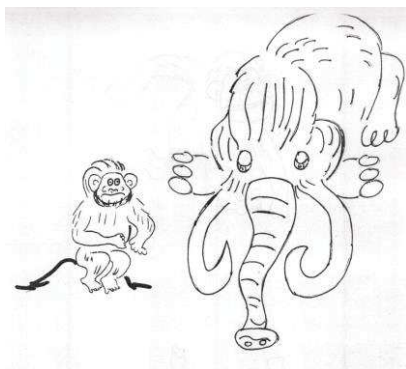
Jsou diagnostická měření trvalá a občasná.

- Jaké jsou nejčastější typy poruchy u ložisek asynchronních strojů?

Prasklá klec nebo valivý element, resp. slehání mazání vlivem ložiskových proudů. .

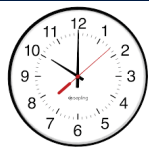
- Jaký typ poruchy vinutí statoru je zpravidla prvotní?

Zpravidla je to mezizávitový zkrat, který se dále šíří až vznikne zkrat na kostru nebo mezifázový zkrat.



Hmm... Asi jsem mu těch přesliček a plavuní naložil moc. Tím zřejmě došlo k přetížení pracovního stroje a jeho poruše.

13. Zatěžování elektrických točivých strojů



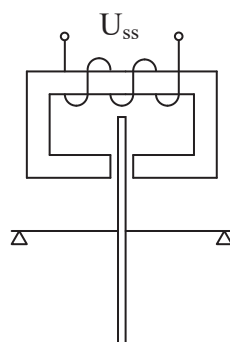
Předpokládaný čas: 15 min



Po prostudování tématu budete:

- Umět popsat zapojení soustrojí pro dva DC stroje různého napětí a stejných otáček
- Umět popsat zapojení soustrojí pro dva podobné DC stroje
- Umět popsat zapojení soustrojí pro dva stejné DC stroje s mechanickým hrazením ztrát
- Umět popsat zapojení soustrojí pro zkoušení monobloků a střídavých strojů

Malé stroje se při typové zkoušce zatěžují na plný výkon. Zatěžování se provádí pomocí dynamometrů nebo vířivých brzd.



Obr. 13.1. Princip vířivé brzdy

Dynamometrem může být ss stroj s cizím buzením, který má výkyvně uložený stator. Moment na hřídeli je dán vztahem

$$M = F \cdot r \quad (13.1)$$

a výkon pak

$$P = M \cdot \omega \quad (13.2)$$

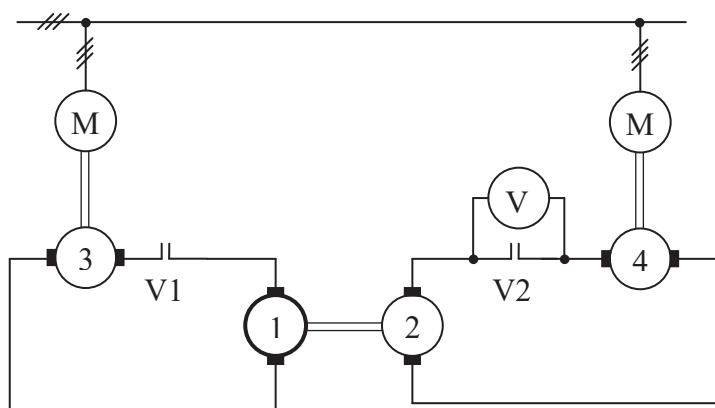
Střední a velké stroje se zatěžují pomocí zapojení, která umožňují rekuperaci energie do sítě. To je z hlediska potřebných výkonů a hospodárnosti vždy žádoucí a tento princip upřednostňujeme před zatěžováním do odporů, včetně vodních.

13. Zatěžování elektrických točivých strojů

Největší stroje na zkušebně zatížit nelze. Dělá se však obvykle zkouška naprázdno a nakrátko, kdy pohon musí postačit na krytí celkových ztrát zkoušenec.

Dva stejnosměrné stroje o různém napětí a stejných otáčkách

Toto schéma zapojení se použije, pokud má zatěžovací stroj stejné nebo vyšší provozní otáčky než zkoušenec a při jmenovitých otáčkách stejný nebo větší výkon než zkoušenec.

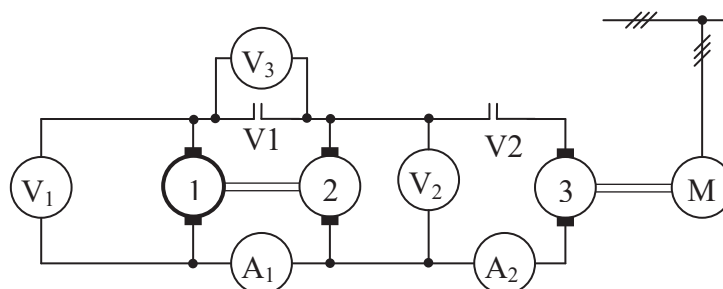


Obr. 13.2. Zapojení pro zatěžování stejnosměrných strojů

Nejprve se spustí soustrojí 3 a 4 při rozpojených spínačích V1 a V2. Stejnosměrné stroje jsou při rozběhu nenabuzeny. Po rozběhu se nabudí nejprve stroj 1 a pak se sepne spínač V1. Nabuzováním stroje 3 se roztočí soustrojí 1 a 2 na požadované otáčky. Stroje 2 a 4 se nabudí na zvolené shodné napětí. Po dosažení naprosté shody se sepne V2. Nyní již má každá změna buzení kteréhokoliv ze strojů 1, 2, 3 a 4 za následek zatěžování strojů. Má-li stroj 1 pracovat jako motor a stroj 2 jako generátor (dynamo), dosáhneme toho např. mírným odbuzením stroje 1. Otáčky doladíme buzením stroje 3.

Nevýhodou zapojení je jeho složitost, potřeba příliš mnoha strojů a značná spotřeba energie. Při zatěžování malých nekompenzovaných ss strojů je nutné věnovat pozornost stabilitě zatěžovacího proudu.

Dva shodné nebo podobné stejnosměrné stroje (s paralelním elektrickým hrazením ztrát)



Obr. 13.3. Zapojení pro zatěžování stejnosměrných strojů

Oba stroje musí mít shodné nebo alespoň podobné svorkové napětí, jmenovitý proud a otáčky. Při spouštění jsou nejprve oba spínače V1 a V2 rozpojeny. Spustíme řídicí soustrojí s dynamem 3, které však není nabuzeno. Pak nabudíme stroj 2 na jmenovitý budící proud naprázdno a posepnutí spínače V2 začínáme nabuzovat stroj 3. Současně se začínají roztáčet stroje 1 a 2. Pokud je smysl otáčení opačný (nežli požadovaný), musíme obrátit buzení stroje 2 nebo 3. Po dosažení jmenovitého napětí by měly mít stroje 1 a 2 také jmenovité otáčky. Pak můžeme začít nabuzovat stroj 1 a na rozdílovém voltmetru kontrolujeme, zda napětí na spínači klesá. Jestliže tomu tak není, musíme stroj 1 budit s opačnou polaritou. Buzení zvyšujeme tak dlouho, až je $U_1 = U_2$ a $U_3 = 0$ na voltmetru V3.

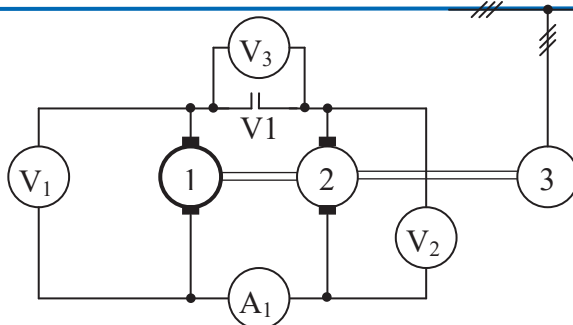
Pak lze sepnout i spínač V1. Pokud má zkoušenec pracovat jako motor, snížíme jeho budící proud. Proud I_l se řídí buzením jednoho ze strojů 1 nebo 2. Otáčky jsou dány buzením stroje 3. Napětí U_l se řídí současným shodným buzením strojů 1, 2 a 3.

Soustrojí se zastavuje opačným postupem než při rozjíždění. Alespoň dva z takto zapojených strojů musí mít stabilní otáčkové charakteristiky. Nelze takto zkoušet kompaundní dynamy a protikompaundní motory. Pro zlepšení stability lze posunout neutrálu kartáčů o polovinu až celou lamelovou rozteč ve směru otáčení stroje (pro motor i dynamo).

Mezi výhody zapojení patří malá energetická náročnost. Stroj 3 totiž musí být výkonově schopen hradit pouze asi dvojnásobek ztrát zkoušence. Napětí stroje 3 musí být shodné s napětím zkoušence. Propojení kotev je většinou velmi krátké, navíc průřez vedení od stroje 3 může být poměrně malý.

Nevýhodou je obtížnější nastavení požadované hodnoty zatížení. Musí se totiž řídit současně buzení všech tří strojů.

Dva shodné stejnosměrné stroje s mechanickým hrazením ztrát



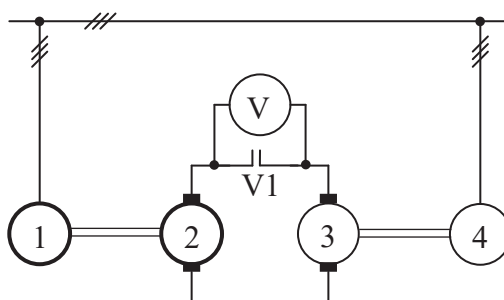
Obr. 13.4. Zapojení pro zatěžování stejnosměrných strojů

Stroj 3 může být na střídavý proud, ale není to nezbytné. Popisované zapojení lze použít ke zkoušení větší série strojů. Na zkušebně jsou stále instalovány stroje 2 a 3, které slouží pro zkoušení série strojů 1. Stroj 2 je pak prvním vyrobeným strojem ze série. Expedován je jako poslední, po střední nebo i generální opravě. Poháněcí stroj 3 musí mít otáčky shodné se zkoušencem a výkonově musí postačit opět na krytí pouze asi dvojnásobku celkových ztrát zkoušence.

Spouštění soustrojí probíhá při rozpojeném spínači V1. Stroje 1 a 2 se nabudí na jmenovité napětí až po dosažení jmenovitých otáček. Sepnutí V1 je možno jen při nulovém napětí U_3 . Zatěžování probíhá změnou buzení jednoho ze strojů 1 nebo 2. Rychlé zastavení nastane odpojením stroje 3 od napájení při plném zatížení strojů 1 a 2.

Zapojení je opět energeticky nenáročné, protože stroj 3 hradí pouze ztráty v soustrojí. Spojové výkonové obvody jsou opět krátké a obsluha je snadná, protože otáčky jsou stálé. Za nevýhodu můžeme považovat nutnost mechanického připojení soustrojí ke stroji 3.

Stejnoseměrný stroj a stroj střídavý na síťový kmitočet



Obr. 13.5. Zapojení pro zatěžování stejnosměrného a střídavého stroje spojených mechanicky

Někdy je třeba zatěžovat přímo celé soustrojí, složené ze ss a st stroje. Může se používat pro Leonardovu skupinu nebo jako zdroj proměnného kmitočtu. Zapojení

13. Zatěžování elektrických točivých strojů

Lze samozřejmě použít i pro zkoušení jednotlivého střídavého nebo stejnosměrného stroje.

Soustrojí je možné spouštět dvěma způsoby.

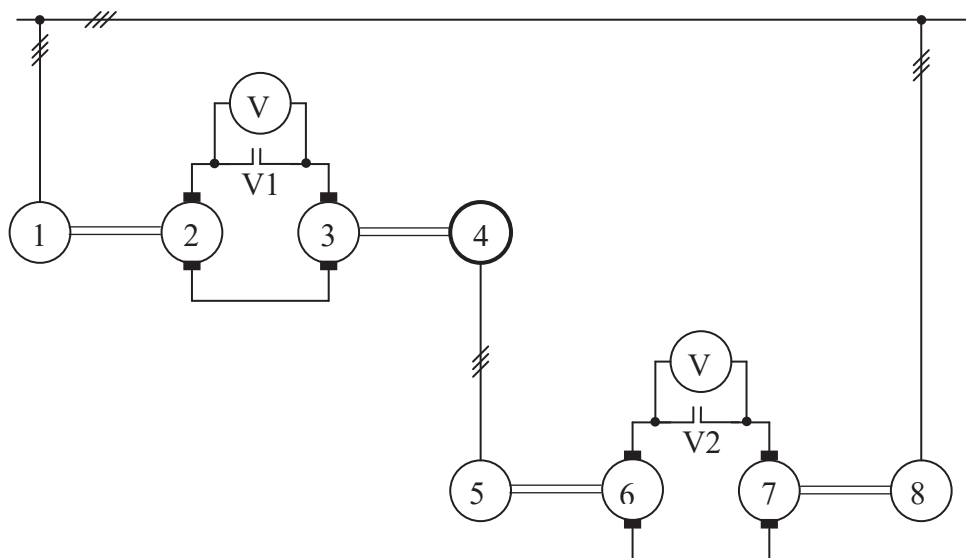
Při rozpojeném spínači V1 a nenabuzených strojích 2 a 3 se spustí střídavé stroje 1 a 4. Pak se nabudí stroje 2 a 3 na shodné napětí (rozdílové napětí $U=0$) a sepne se spínač V1. Zatěžování se děje přibuzením nebo odbuzením jednoho ze strojů 2 nebo 3.

Pokud spouštění jednoho ze střídavých strojů působí potíže (velikost stroje), spustí se při rozpojeném V1 a odbuzených stejnosměrných strojích střídavý stroj druhý. Po rozběhu se nabudí dosud stojící stejnosměrný stroj na jmenovitý budící proud naprázdno a pak se sepne V1. Pak začínáme zvyšovat buzení točícího se stejnosměrného stroje. Druhé soustrojí se začne rozbíhat. Musíme pečlivě zkontrolovat sled fází a směr točení rozbíhaného střídavého stroje. Po dosažení jmenovitých otáček se stroj přifázuje (je-li synchronní) nebo asynchronní se připojí k síti při nulovém skluzu.

Toto zapojení je výhodné, pokud se zkouší celé soustrojí, tvořené stroji 1 a 2. Řízení zatěžování je snadné, protože otáčky jsou stálé. Zatěžovací stroj nemusí mít shodné otáčky.

Nevýhodou je, že na zkušebně musí být k dispozici soustrojí shodného výkonu a jeho stejnosměrný stroj musí mít shodné napětí.

Zatěžování střídavých strojů



Obr. 13.6. Zapojení pro zatěžování střídavých strojů

Zapojení se používá pro zatěžování střídavých strojů s kmitočtem odlišným od síťového. Je náročné na zařízení zkušebny, obsluhu i energetickou spotřebu. Spouštění i zatěžování je shodné jako v předchozím případě, schéma z předchozího

13. Zatěžování elektrických točivých strojů

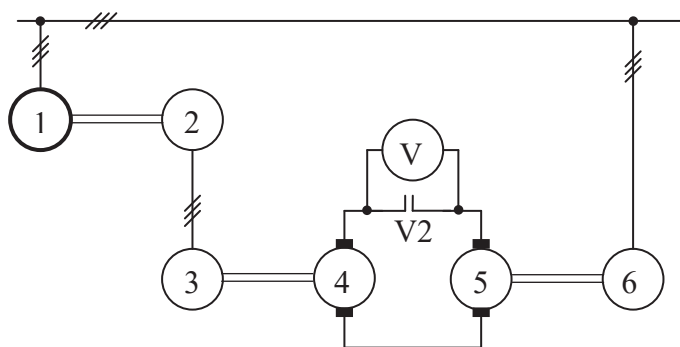
obrázku se však nyní použije dvakrát. Mezi tyto dvě skupiny strojů se včlení stroje 4 a 5, které jsou zkoušencem a zatěžovacím strojem a mají mezi sebou střídavou soustavu o potřebném kmitočtu a napětí, odlišném od síťových hodnot.

U tohoto zapojení lze provést i jednodušší variantu. Výkon odváděný ze stroje 5 pomocí strojů 6, 7 a 8 zpět do sítě lze rekuperovat pouze pomocí stroje 6 do obvodu kotev strojů 2 a 3. Pak tedy odpadají stroje 7 a 8. Podmínkou je, aby napětí stroje 6 bylo shodné s napětím strojů 2 a 3.



Gratulujeme, Bivoji. Vaše zatěžovací zkouška dopadla skvěle!

Dva střídavé stroje shodného výkonu a otáček



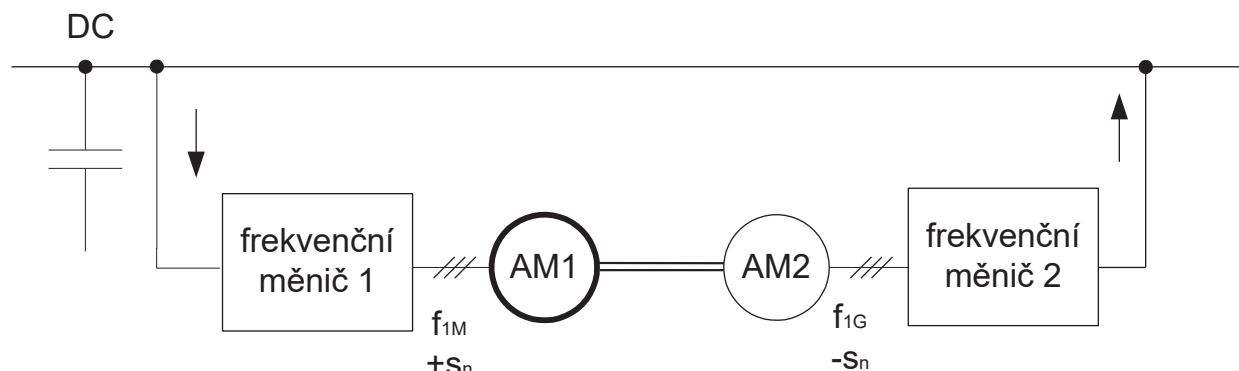
Obr. 13.7. Zapojení pro zatěžování střídavých strojů

Jeden ze strojů musí mít napětí a kmitočet sítě. Je-li stroj 2 asynchronní, musí být stroj 3 synchronní. Po definitivním připojení se kontroluje sled fází a smysl otáčení zkoušence. Při rozpojeném spínači V2 a nenabuzeném stroji 5 se spustí motor 6. Stroje 3 a 4 (i stroj 2, je-li synchronní) se nabudí na jmenovitý budící proud naprázdno a spínač V2 se sepne. Stroj 5 se postupně budí, až se začne roztáčet soustrojí 3 a 4 a po chvíli i soustrojí 1 a 2. Soustrojí 1 a 2 se nemusí vůbec roztáčet, pokud otáčky soustrojí 3 a 4 stoupají příliš rychle, protože při vyšším napájecím kmitočtu klesá záběrný moment. Po dosažení synchronních otáček soustrojí 1 a 2 se stroj 1 přifází na síť (je-li synchronní) nebo prostě připojí k síti (je-li asynchronní). Činné zatížení se řídí buzením strojů 4 a 5, napětí a účiník strojů 2 a 3 buzením obou strojů, účiník stroje 1 (je-li synchronní) jeho buzením.

Výhodu metody je (pokud je zkoušencem stroj 2), že zkoušenec nemusí mít jmenovité napětí odpovídající síťovému.

13. Zatěžování elektrických točivých strojů

Existuje mnoho dalších způsobů zapojení, včetně využití statických regulovaných zdrojů. Jeden z možných způsobů je na následujícím obrázku.



Obr. 13.8. Zapojení pro zatěžování shodných střídavých strojů pomocí frekvenčních měničů.

Zkoušeným strojem je asynchronní motor AM1. Tento stroj je napájen kmitočtem f_{M1} z frekvenčního měniče 1. Stroj je zatěžován shodným asynchronním strojem AM2, takže musí pracovat se skluzem

$$s_n > 0. \quad (13.3)$$

Stroj AM1 v motorickém režimu vyrábí mechanickou energii, kterou stroj AM2 mění na energii elektrickou. Jedná se proto o asynchronní generátor, který je napájen pomocí frekvenčního měniče f_{M2} . Asynchronní generátor musí pracovat se záporným skluzem, takže je jeho skluz

$$s_n > 0. \quad (13.3)$$

$$s_n < 0. \quad (13.4)$$

Toto zapojení je úsporné, příkon do stejnosměrné sítě hradí pouze ztráty obou strojů a měničů. Mělo by se však jednat o tvrdý zdroj napětí s možností přijímání energie při brzdění strojů.

Pro kmitočty frekvenčních měničů platí vztah

$$f_{1G} = \frac{1-s}{1+s} f_{1M} \cong (1-2s) f_{1M}. \quad (13.5)$$

Toto zapojení měničů je velice praktické a pohodlné. Měniče lze zpravidla použít i pro jiné účely.

Pro zajímavost uvedme způsob, jak lze zatěžovat asynchronní stroje (ale i synchronní stroje) bez měničů, pomocí speciální diferenciální planetové převodovky. Tuto převodovku však lze jen obtížně použít pro jiné účely.

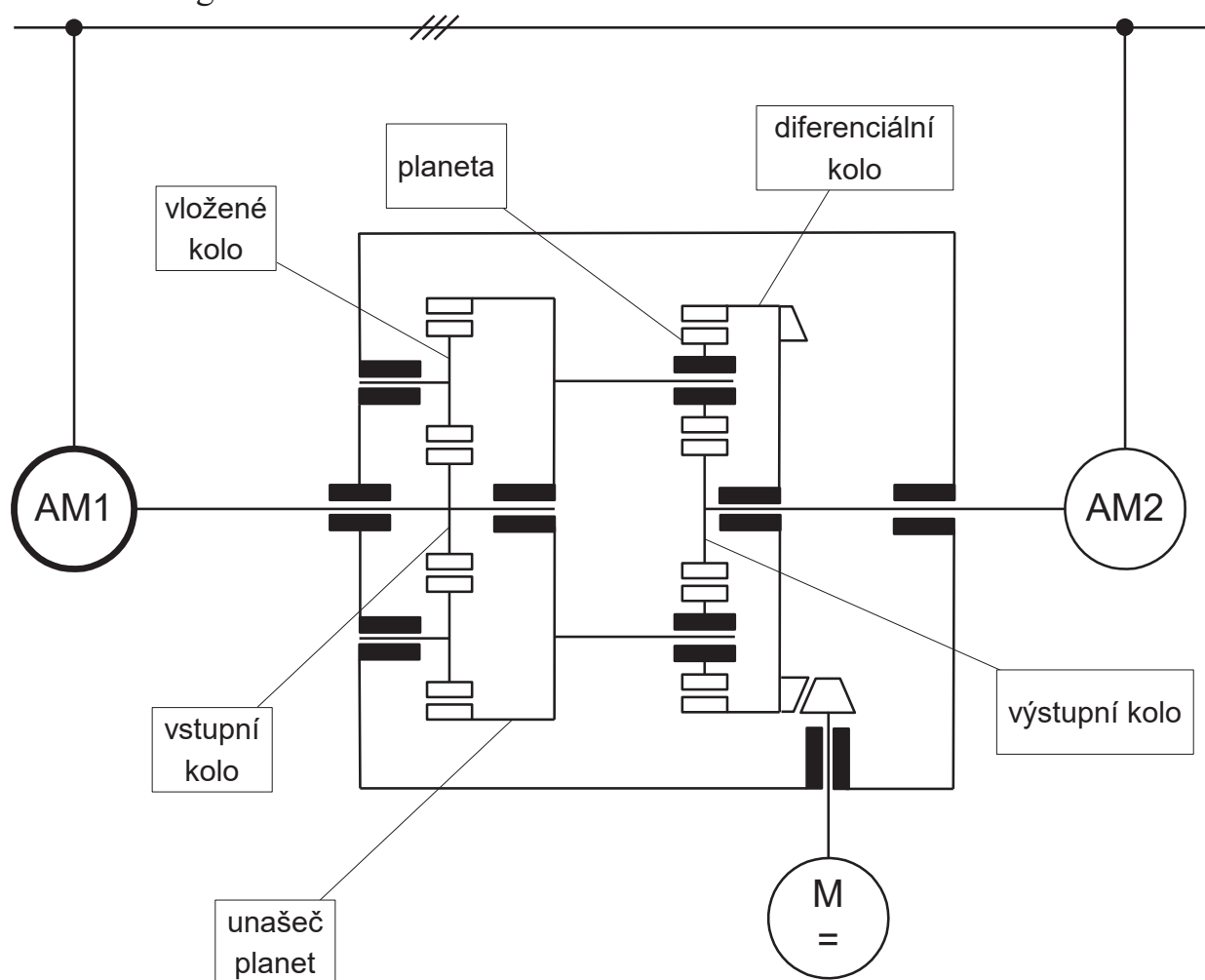
Při zatěžování asynchronních strojů pracuje AM1 jako motor připojený na síť. Jeho otáčky jsou o skluz menší než synchronní. Stejnosměrným řízeným motorem zvětšíme otáčky výstupního hřídele nad synchronní otáčky o skluz. Druhý stroj AM2 připojený na výstupní hřídel a zapojený na síť pracuje jako asynchronní generátor. Ze sítě se kryjí pouze statorové ztráty obou strojů. Ztráty v rotorech

13. Zatěžování elektrických točivých strojů

kryje stejnosměrný motor. Převodovku lze vyrobit při výkonu do 10 MW na $3000 \text{ ot. min}^{-1}$.

Při zatěžování synchronních strojů se ss motor nahradí ručně poháněným převodem. Po přifázování synchronního motoru k síti se ručním natáčením diferenciálního kola sfázuje druhý stroj se sítí. Po připojení druhého stroje k síti se zatížení dosáhne dalším natáčením diferenciálního kola. Při požadovaném zatížení se ruční převod zablokuje.

Zařízení má tu výhodu, že po seřízení zatížení lze jeden stroj odpojovat a opět připojovat do sítě. Zatížení je shodné jako před odpojením. To je výhodné při zkouškách regulátorů.



Obr. 13.9. Zapojení se speciální planetovou převodovkou.

Otázky k tématu:



- Jestliže DC motor neprovozujeme na jmenovité rychlosti, můžeme jej zatěžovat jmenovitým výkonem?
- Pokud použijeme zapojení s elektrickým hrazením ztrát, jaký výkon musí mít napájecí stroj?
- Pokud máme soustrojí pro zkoušení monobloků problem rozběhnout ze strany monobloku, můžeme tak učinit z opačné strany?
- Při zatěžování AC strojů je třeba dodržovat i velikost jalového výkonu?



Správné odpovědi

- Jestliže DC motor neprovozujeme na jmenovité rychlosti, můžeme jej zatěžovat jmenovitým výkonem?

Nemůžeme. Výkon je třeba snížit úměrně jeho rychlosti.

- Pokud použijeme zapojení s elektrickým hrazením ztrát, jaký výkon musí mít napájecí stroj?

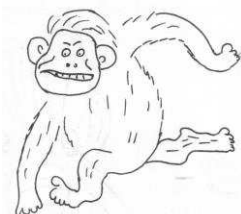
Napájecí stroj musí mít výkon vyšší než jsou ztráty v obou zkoušených strojích.

- Pokud máme soustrojí pro zkoušení monobloků problem rozběhnout ze strany monobloku, můžeme tak učinit z opačné strany?

Ano, můžeme. Pak vyrovnáme buzení napětí v obvodu kotev a při nulovém rozdílu napětí obě kotvy spojíme.

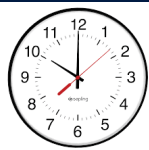
- Při zatěžování AC strojů je třeba dodržovat i velikost jalového výkonu?

Ano, jalový výkon je nezbytný k magnetování testovaného stroje a jeho účinník musíme dodržet.



Krucinál ! Zase jsem předem nezapnul buzení stejnosměrného motoru.

14. Zkoušení stejnosměrných točivých strojů



Předpokládaný čas: 15 min



Po prostudování tématu budete:

- Umět popsat vlivy na komutaci DC stroje
- Popsat princip testování a vyhodnocování pásem temné komutace
- Umět vyjmenovat vady komutátoru
- Umět popsat princip nastavení neutrály kartáčů

Nejdůležitější vlastností stejnosměrných strojů je komutace proudu v cívkách kotvy a průvodní jevy, které vznikají na komutátoru a kartáčích. Ideálním stavem je komutace bez jiskření mezi kartáčem a komutátorem za všech režimů práce stroje.

Na komutaci má vliv

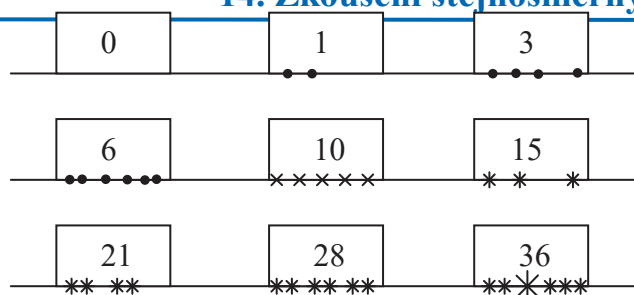
- nastavení magnetického obvodu – mezera pod pomocnými póly $U_{\text{reaktanční}} \approx U_{\text{komutační}}$
- nastavení neutrály kartáčů
- stav sběrného ústrojí (druh kartáče, kartáčové držáky, odpružení, rozteče sad, přesazení kartáčů, zabroušení)
- komutátor (ovalita, dlouhodobá stálost, patina, rýhování komutátoru)

Vyšetřování komutace

Komutace musí být bez jiskření nebo jiskření musí být tak slabé, že ani po dlouhé době provozu nedochází k porušování povrchu komutátoru, ani stykové plochy kartáčů.

Komutace se posuzuje vizuálně, subjektivně. Stroj se zatěžuje až do 150% I_n a pozorují se postupně všechny kartáče, náběhové, někdy i odběhové hrany.

14. Zkoušení stejnosměrných točivých strojů

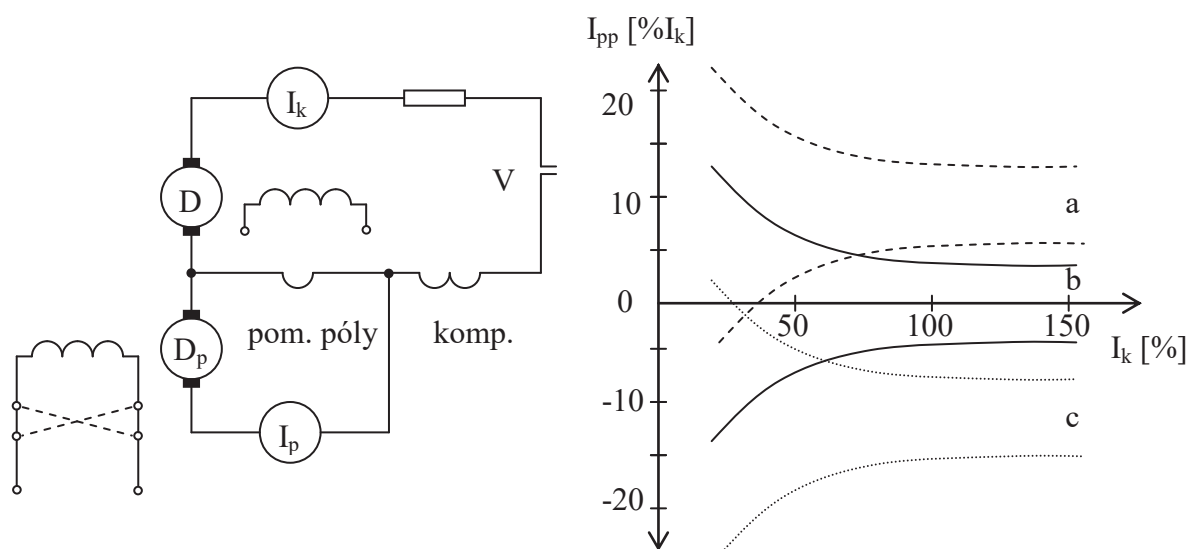


Obr. 14.1. Jeden ze způsobů hodnocení komutace. Při stupni 10 začínají vyletovat paprsky jisker, při stupni 36 se pohybuje po hraně kartáče žhnoucí bod, který ji opaluje

U velkých strojů se zpravidla navíc vyšetřují tzv. pásma temné komutace v motorickém i generátorickém režimu. Princip měření spočívá v proměnném proudu, který prochází vinutím pomocných pólů, popř. i kompenzačním vinutím, pokud není oddělitelné. Při zvolených proudech v kotvě se napájí pomocné póly přidavným proudem souhlasného nebo opačného smyslu, než je proud kotvy. Tímto proudem tedy zvyšujeme (popř. snižujeme) proud ve vinutí pomocných pólů a tím i komutační napětí. V okamžiku, kdy začnou kartáče jiskřit, proud zaznamenáme. Totéž opakujeme i pro opačnou polaritu přidavného proudu. Toto měření se provede pro několik hodnot proudu kotvy.

Změřený přidavný proud, vyjádřený v procentech proudu kotvy, se kreslí do diagramu v závislosti na proudu kotvy. Obdržíme tak dvě křivky, odpovídající počátku jiskření při zvětšování a zmenšování proudu ve vinutí pomocných pólů. Komutace je temná (bezjiskrová) uvnitř mezi oběma křivkami.

Dynamo, které je zdrojem proudu pro pomocné póly, může mít malé napětí (postačí jen několik desítek voltů), ale proudově musí vyhovovat velikosti proudu kotvy vyšetřovaného stroje.



Obr. 14.2. Schéma zapojení pro měření pásem temné komutace

Pásma *a* přísluší slabému vlivu pomocných pólů. Osa souměrnosti *a* pásma leží v místě asi 10% zesílení proudu pomocných pólů. Je třeba zmenšit vzduchovou mezeru pod pomocnými póly vložím železných plechů.

Pásma *b* přísluší správně seřízenému stroji.

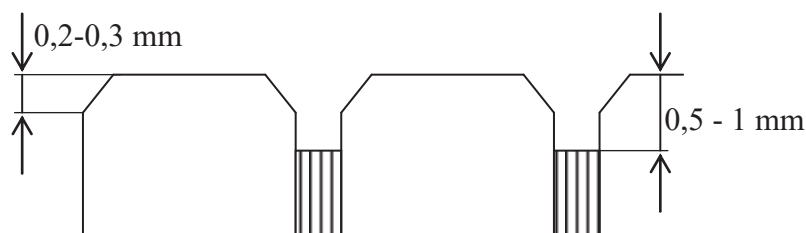
Pásma *c* odpovídá příliš silným pomocným pólům. Jejich proud je třeba zeslabovat pro správnou komutaci. Proto se jejich vliv sníží zvětšením vzduchové mezery.

Mimo této subjektivní metody vyšetřování pásma temné komutace (která je závislá na zkušenostech pozorovatele), existují i objektivní metody. Jedna z nich užívá měření vf napětí, které se objevuje na kotvě při vzniku jiskření a s intenzitou jiskření vzrůstá. Charakteristické frekvence pro jiskření jsou asi 50 kHz.

Od komutátoru se požaduje, aby při všech provozních otáčkách a teplotách zachovával dokonale válcový tvar a aby jeho povrch byl pokryt v souvislé vrstvě oxidy, které příznivě ovlivňují komutaci. Stabilita geometrického tvaru se zajišťuje během výroby vhodnou technologií (statické a dynamické stárnutí).

Při statickém stárnutí se komutátor několikrát ohřívá na teploty asi 150°C a po vychladnutí se pod lisem opět dotahuje. Pak se obrábí pracovní plocha.

Následuje dynamické stárnutí. Komutátor se několikrát ohřívá za rotace při zvýšených zkušebních otáčkách. V teplém stavu i po vychladnutí se měří souosost pracovní plochy. Cykly se několikrát opakují až do ustálení změn. Pak se komutátor dále zpracovává. Na hotovém stroji se stabilita komutátoru opět ověřuje, protože mohlo dojít k jejímu narušení při nasazování komutátoru, pájení vinutí, impregnaci kotvy nebo při montážních manipulacích.



Obr. 14.3. Lamely komutátoru a mezilamelová izolace

Některé vady komutátoru:

- komutátor není souosý
- komutátor nemá válcový povrch
- vystouplé nebo zapadlé jednotlivé lamely nebo jejich skupiny

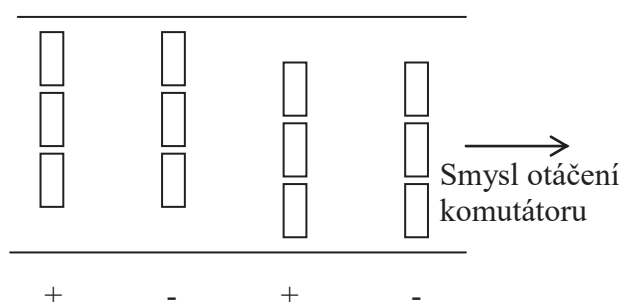
Tyto závady lze odstranit přesoustružením.

- povrch komutátoru je mechanicky poškozen
- vystupuje mezilamelová izolace
- nesražené hrany lamel

Tyto závady se projevují hlukem kartáčů.

- komutátor kmitá vlivem nevyváženosti
- deformace při jmen. otáčkách vlivem velkých vývažků
- deformace za tepla vlivem různého ohřevu lamelového svazku a pouzdra
- rozteče lamel jsou nestejně vlivem špatného výběru lamel a mezilamelové izolace při skládání komutátoru
- lamely nejsou rovnoběžné s osou rotace

Další citlivou částí stejnosměrného stroje jsou kartáče. Jejich úpravě a seřízení je třeba věnovat velkou pozornost. Kartáče mají být všechny stejné a vhodné kvality, mechanicky nepoškozené, pohybující se v držácích volně, ale bez zbytečně velké vůle. Nové kartáče se u malých komutátorů ($r < 500\text{mm}$) zabrušují smirkovým plátnem. Na komutátor se umístí pruh brusného papíru, na který dosedají kartáče. Pootáčením komutátoru se kartáče zabrousí. Dále se kontroluje přesazení kartáčů na sousedních konzolách. Vždy dvě sousední sběradla rozdílné polarity musí mít kartáče v zákrytu, další pár sběradel pak má kartáče o polovinu šířky přesazený.

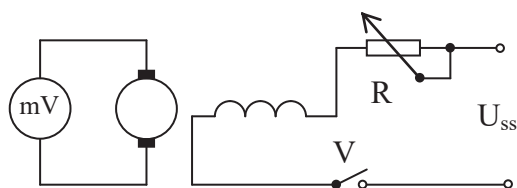


Obr. 14.4. Přesazení kartáčů sousedních párů sběradel

V současné době je technologie výroby kartáčů zvládnuta do takové míry, že kartáče mají životnost shodnou s životností samotného stroje. Proto se u nových stejnosměrných strojů již nemusí věnovat údržbě tak vysoká pozornost.

Seřízení neutrální polohy kartáčů

Použije se schéma dle následujícího obrázku.



Obr. 14.5. Zapojení pro seřizování neutrální polohy sběradel

14. Zkoušení stejnosměrných točivých strojů

Ve vinutí hlavních pólů nastavíme proud na asi $1/3$ jmenovitého budícího proudu. Pak se proud vypínačem zapíná a vypíná a sledujeme výchylku voltmetru. Cílem je nastavit co nejmenší výchylku milivoltmetru při změně proudu v budícím vinutí.

Je-li výchylka ručky patrná, pootočíme kartáče na některou stranu asi o šířku kartáčů. Pak se zkouška opakuje. Pokud se výchylka zvětšila, je třeba kartáče natočit na stranu opačnou od původní polohy. Jestliže se výchylka zmenšila, je třeba v tomto smyslu pokračovat. Jestliže se změnila polarita výchylky (při shodné operaci – zapnutí nebo vypnutí proudu), je třeba sběrací ústrojí pootočit zpět k původní poloze, např. o polovinu původního pootočení.

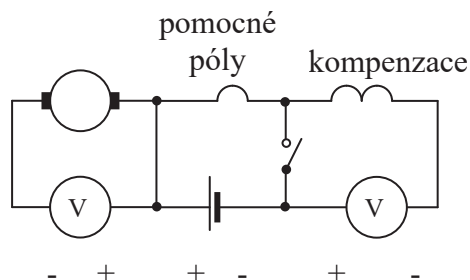
Po konečném seřízení neutrální polohy se tato poloha trvalým způsobem označí (zásek sekáčem).

Jestliže se jedná o stroj, který bude pracovat jen s jedním smyslem otáčení, doporučuje se pootočit potom sběracím ústrojím do tzv. pracovní polohy, tj. asi o $1/2$ šířky lamely komutátoru ve smyslu otáčení. Tím se dosáhne stabilnějších charakteristik u motoru a u dynama se sníží sklon k samobuzení.

U reverzačních strojů se konečná poloha seřizuje až při zatížení¹. Při daném napětí musí být rozdíl otáček v obou polaritách menší než asi 2 %.

Po definitivním nastavení lze provést zkoušku v poli pomocných pólů. Stroj se odbudí a do kotvy se zavede jmenovitý proud. Stroj se nesmí roztočit.

Kontrola zapojení vinutí statoru



Obr. 14.6. Zapojení pro kontrolu spojení vinutí pomocných pólů a kompenzačního vinutí

Na vinutí pomocných pólů se náhle připojí napětí několika voltů z baterie. Musí být dodržena naznačená polarita. Jestliže se voltmetry vychýlí do stupnice, je zapojení správné. Není třeba dvou voltmetrů, stačí pouze jeden a pokus se opakuje po jeho přepojení. Zapojení vychází z faktu, že vinutí pomocných pólů a kompenzace musí působit proti reakci kotvy.

Vyjímečně se vyskytuje závada, že jednotlivé pomocné póly nejsou správně zapojené a na obvodu statoru se nestřídají pravidelně polarita sever a jih. Pak se do pomocných pólů zavede stejnosměrný proud a pomocí kompasu se po obvodu

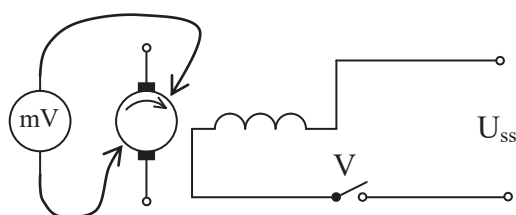
¹ otáčková neutrální zóna

14. Zkoušení stejnosměrných točivých strojů

stroje kontroluje polarita jednotlivých pólů. Lze to též zjistit pomocí cívečky na železném jádře. Jejím přibližováním a oddalováním od pólu se zjistí polarita do ní indukovaného napětí.

Ověřit polaritu vinutí pomocných pólů a kompenzačního vinutí lze též při zatížení stroje. Při nesprávném zapojení se objeví velmi silné jiskření na kartáčích již při malém zatížení.

Kontrola zapojení vinutí hlavních pólů vzhledem ke kotvě v klidu



Obr. 14.7. Kontrola zapojení hlavních pólů

Polarita kartáčů se za běhu shoduje s polaritou, kterou určíme následujícím pokusem. Zkoušené budící vinutí připojíme přes vypínač se správnou polaritou k baterii. Voltmetr připojíme pomocí měřících hrotů na lamely komutátoru. Vybereme lamely, které leží několik lamelových roztečí od dvou sousedních sběradel ve směru otáčení. Při zapnutí vypínače se pozoruje výchylka voltmetru. Za běhu pak bude polarita kartáčů shodná s polaritou zjištěnou tímto způsobem (při zapnutí proudu do budícího vinutí).



Otázky k tématu:

- K čemu je potřeba při vyšetřování pásem temné komutace mít pomocné dynamo?
- Lze opravit vystouplá mezilamelová izolace komutátoru?
- Proč je výhodné si poluhu sběradel označit (trvale barvou) před



Správné odpovědi

- *K čemu je potřeba při vyšetřování pásem temné komutace mít pomocné dynamo?*

Pomocné dynamo zajišťuje zvýšený / snížený proud pomocnými póly. Tím zjistíme jejich vliv a můžeme jej trvale upravit změnou magnetických / nemagnetických vložek pod pomocnými póly. Tím nastavíme vzduchovou mezeru a velikost vlivu pomocných pólů na komutaci.

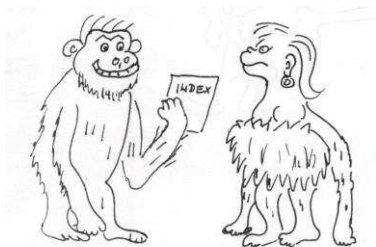
- *Lze opravit vystouplá mezilamelová izolace komutátoru?*

Ano, tato izolace jde odtzsranit jehlovým pilníkem nebo jiným vhodným ostrým nástrojem.

- *Proč je výhodné si polohu sběradel označit (trvale barvou) před demontáží stroje?*

Sběradla jsou někdy držena svorníky, které drží vnější/vnitřní kryt ložiska. Při otevírání ložiska při domazávání se sběradla mohou uvolnit a bez trvalého označení musíme pracně neutrální polohu sběradel hledat a nastavovat.

Pokud děláme zpětnou montáž sběradel, označení nám umožní téměř přesně ustavit sběradla do téže polohy. Tu pak jen kontrolujeme, popř. jemně dostavíme.



Čeká nás skvělá budoucnost – práce nás polidští a zvládneme i zkoušení elektrických zařízení.

15. Zkoušení střídavých točivých strojů



Předpokládaný čas: 15 min



Po prostudování tématu budete:

- Umět popsat prvotní magnetizaci jádra stroje
- Popsat měření reaktancí stroje
- Popsat kusové a typové zkoušky strojů
- Posat měření skluzu asynchronního stroje

Mezi střídavé stroje patří

- synchronní alternátory (turbogenerátory, hydrogenerátory)
- synchronní motory (klasické, s permanentními magnety, reluktanční motory)
- asynchronní motory (kotva vinutá, klec nakrátko)
- asynchronní generátory (vyjímečně samostatný generátor, generátor na síti)

Druhy zkoušek

- mezioperační
- typové
- kusové
- vývojové aj.

Mezioperační zkoušky (zejména u velkých strojů)

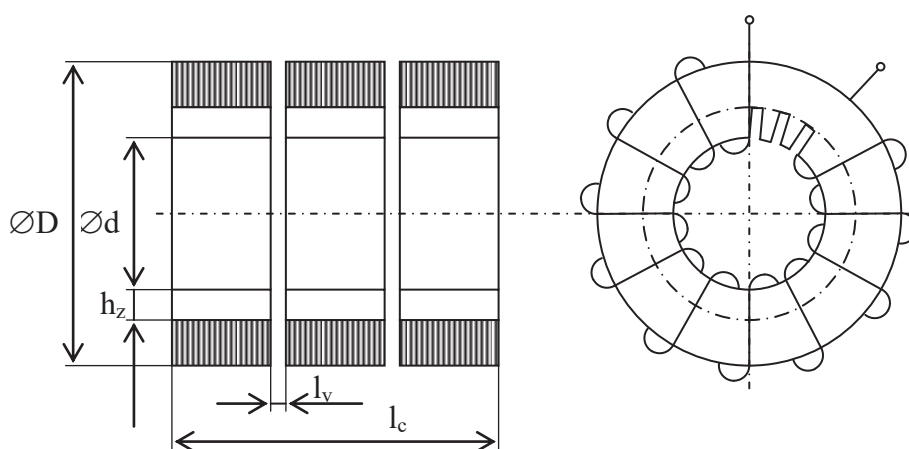
Ještě před sestavením stroje se dělají průběžně zkoušky. Mají odhalit výrobní vady nebo jsou důležité pro stanovení parametrů stroje. Zkoušky statorového železa jsou shodné pro synchronní i asynchronní stroje.

Magnetizace jádra statoru

Cílem této zkoušky je ověření izolace jednotlivých plechů. Při lisování plechů může dojít ke vzniku břitů, které mohou izolaci plechů lakem vodivě překlenout. Rovněž se tak ověří pevnost stažení svazku, přídatné ztráty ve stahovací konstrukci apod. Zkouška se provádí na složeném statoru, těsně před vkládáním vinutí.

Kolem jha aktivního železa se navine provizorně několik závitů vodiče. Toto vinutí se napájí takovým napětím jmenovitého kmitočtu, aby se ve jhu vytvořila

jmenovitá magnetická indukce. Závity se nemají vinout přes konstrukční železo, ale pouze přes aktivní magnetický obvod.



Obr. 15.1. K výpočtu čistého průřezu aktivního železa jha.

$$S = \frac{1}{2}(D - d - 2h_z)(l_c - \sum l_v)$$

Potřebný počet závitů, napájecí napětí a průřez vodiče se určí ze známých vztahů

$$U_{ef} = 4,44 B_{max} S f N \quad (15.1)$$

- kde U_{ef} je efektivní hodnota zkušební napětí. Volí se do 1000V s ohledem na izolaci provizorního vinutí
 B_{max} je maximální indukce ve jhu (dáno výpočtem při návrhu stroje)
 S je čistý průřez aktivního železa
 f je jmenovitý kmitočet
 N je počet závitů pomocného vinutí

Proud se vypočítá z magnetizační charakteristiky použitého materiálu

$$I_{ef} = \frac{H_{max} \pi D_{stř}}{N \sqrt{2}} \quad (15.2)$$

- kde H_{max} je intenzita magnetického pole [A.m⁻¹], příslušná magnetické indukci B_{max} podle magnetizační křivky
 $D_{stř}$ je střední průměr jha aktivního železa [m]

N je počet závitů pomocného vinutí

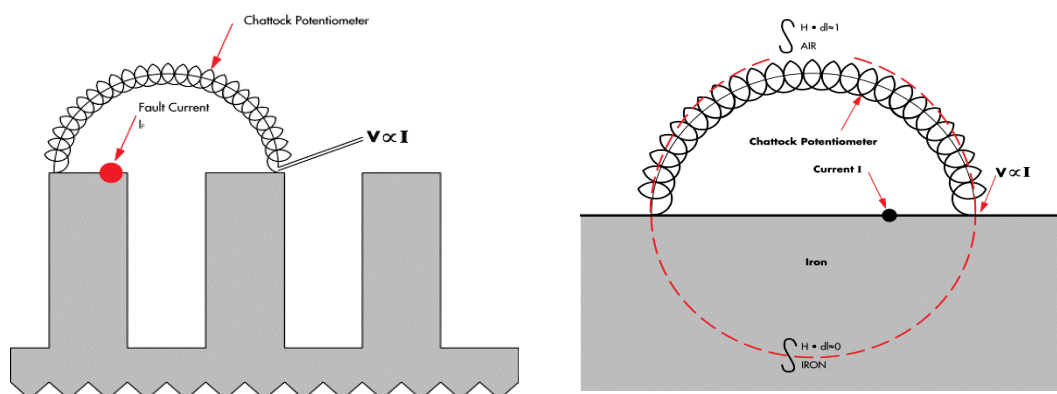
Pro prvotní odhad můžeme použít tabelárně danou magnetizační charakteristiku pro dynamové plechy

B_{max} [T]	1	1,2	1,4
H_{max} [A.m ⁻¹]	300	500	1000

Při zkoušce se nejprve změří magnetizační proud a celkové ztráty v závislosti na magnetické indukci. Tyto charakteristiky se ihned použijí k posouzení nasycení železa. Nejedná se však o ztráty ΔP_{Fe} , které jsou vlivem přídavných ztrát i několikanásobně větší.

Po změření křivek se nastaví napětí na jmenovitou indukci a nechá se působit asi 20 minut. Pak se celá dutina jha prohlédne přístrojem citlivým v infračerveném spektru. Lze použít též přístroj pracující na principu Rogowskiho potenciometru.

Proudy prochází vlivem špatné izolace mezi plechy statorového svazku, na druhé straně se pak uzavírají přes pravítka, na kterých jsou plechy nasazené.



Obr. 15.2. Princip měření chybových proudů ve svazku plechů pomocí Rogowskiho (Chatokova) potenciometru

Těmito metodami zjistíme místa lokální oteplení. Rozlišovací schopnost je řádu desetin stupně. Rozdíl teplot mezi nejteplejším a nejstudenějším zubem je povolen asi 10°C. Pokud je rozdíl větší, musí se nejteplejší zuby opravit vložkami ze štípané slídy za každým asi pátým plechem. Vložka by měla zasahovat asi do 2/3 výšky zubu.

Po opravě se zkouška opakuje. Pokud je oteplení větší než 45°C nebo oprava neúspěšná, musí se celý svazek rozebrat, izolaci opravit a svazek opět složit.

Při zkoušce se ještě sleduje hluk železa, chvění v dělicích rovinách apod. Je vhodné toto provést i při jiných kmitočtech a tak lze případně zjistit vlastní kmitočet svazku. Pokud by mohly vzniknout problémy, je možno ještě zasáhnout do tuhosti svazku, popř. kostry stroje.

Izolační zkoušky

Zkouší se dílčí části vinutí statoru (vůči sobě a proti zemi) před a v průběhu zakládání vinutí. Měří se izolační odpor, dělá se izolační napěťová zkouška, popř. se ještě měří ztrátový činitel $\tan \delta$. Popisu jednotlivých měření se věnuje příslušná kapitola tohoto textu.

Měření reaktancí statoru při vyjmutém rotoru

Stroj bez rotoru napájíme trojfázovým napětím asi $0,2U_n$, 50 Hz (tomu odpovídá přibližně jmenovitý proud ve vinutí) a měříme napětí, proudy a příkon. Ze změřených hodnot můžeme určit tzv. celkovou reaktanci X_c , která je dána rozptylem vinutí statoru a rozptylem přes vrtání statoru.

Chceme-li stanovit samotnou rozptylovou reaktanci X_σ , musíme oddělit rozptylový tok procházející vrtáním. Můžeme to udělat pomocí vzorce

$$X_\sigma = X_c - X_v \quad (15.3)$$

$$X_v = \frac{15 N^2 k_v^2 l f}{p} 10^{-8} \quad [\Omega; -; -; \text{cm}; \text{Hz}; -] \quad (15.4)$$

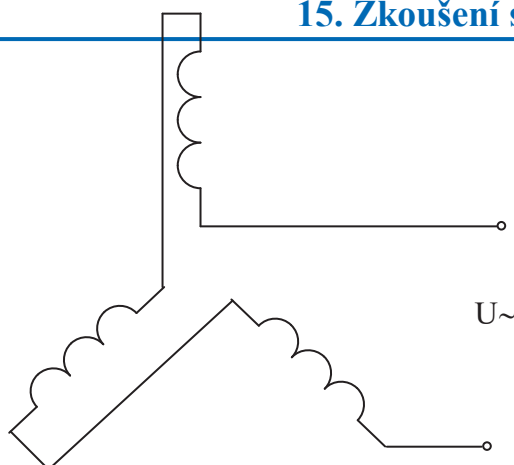
kde l je celková délka železa
 N je počet vodičů jedné fáze spojených v sérii
 k_v je činitel vinutí statoru
 f je kmitočet
 p je počet pólových dvojic

Dále můžeme určit nulovou reaktanci, kterou představuje stroj pro nulové (netočivé) složky proudu při nesouměrném proudovém zatížení. Vinutí musí mít vyvedené začátky i konce fází. Vinutí spojíme do série a napájíme sníženým napětím při jmenovitém kmitočtu tak, aby jím procházel přibližně jmenovitý proud. Měříme napětí, proud a příkon. Nulová impedance se vypočte ze vztahu

$$Z_o = \frac{U}{3I} \approx X_o \quad (15.5)$$

Impedance se rovná přibližně reaktanci, protože činný odpor je malý. Bylo by též možné všechna vinutí zapojit paralelně, pak by však vzorec byl ve tvaru

$$Z_o = \frac{3U}{I} \approx X_o \quad (15.6)$$



Obr. 15.3. Zapojení vinutí při měření netočivé reaktance

Zkoušky samotného rotoru

Jedná se zejména o vyvažování a kontrolu odstředěním při 120% jmenovitých otáček po dobu 2 minut. Vyvažování rotorů je věnována samostatná kapitola.

Kusové zkoušky (točivé stroje)

Měří se zpravidla

- odpory vinutí za studena
- kontrola zapojení a izolačního odporu R_{iz}
- měření naprázdno (charakteristika, případně ztráty), zkouška závitové izolace vinutí přebuzením na 130% U_n
- kontrola mechanického chodu (chvění, vyvážení, teplota ložisek kluzných olejových i valivých), popř. zkouška odstředěním na 120% jmenovitých otáček
- zkouška zvýšenými otáčkami na 120% (odstředění)
- izolační napěťová zkouška ($2xU_n + 1kV$ po dobu 1 min)

Při jmenovitých otáčkách se měří u synchronního generátoru (poháněný stroj) závislosti v režimu naprázdno

- $U_0 = f(I_b)$
- $\Delta P = f(I_b)$

při měření nakrátko se určují charakteristiky

- $I_k = f(I_b)$
- $\Delta P_k = f(I_b)$

U samostatného synchronního motoru (napájený stroj), který je náfázován na síť (a má tudíž jmenovité otáčky), se nastaví I_b tak, aby odpovídal účinníku $\cos \varphi = 1$. Pak se měří závislost

- $U_0 = f(I_0)$

15. Zkoušení střídavých točivých strojů

- Pro měření nakrátko se stroj nejprve rozběhne a pak se odpojí od sítě. Statorové vinutí se spojí dokrátka a pak se stroj nabuzuje a měří charakteristika $I_k=f(I_b)$. Měření se dělá v doběhu stroje. Proud nakrátko je totiž nezávislý na otáčkách stroje podle vztahu

$$I_k = \frac{U_i}{X_d} = \frac{k\omega I_b}{\omega L_d} = f(I_b) \quad (15.7)$$

pokud můžeme zanedbat činný odpor vinutí vzhledem k impedanci.

- Izolační zkouška přiloženým napětím ($2U_n + 1 \div 3 \text{ kV}$)
- Měření izolačního odporu R_{iz}

Také u asynchronního motoru probíhají zkoušky při jmenovitých otáčkách (skluz $s \cong 0$). Měří se naprázdno

- $I_0=f(U)$
- $\Delta P_0=f(U)$
- zkouška mezizávitové izolace indukovaným napětím 130% po dobu 5 minut

U asynchronních strojů s vinutou kotvou se měří navíc

- převod stroje

Zkoušky nakrátko asynchronních strojů (s kotvou nakrátko i vinutou) probíhají při mechanicky zabrzděném rotoru ($n=0$) a jeho spojení nakrátko. Měří se závislosti

- $I_k=f(U)$
- $\Delta P_k=f(U)$

Mezi další kontrolní kusové zkoušky u synchronních strojů patří též

- kontrola sledu fází
- kontrola izolace proti hřídelovým proudům
- určení buzení při zatížení
- zkouška izolace přiloženým napětím

Mezi další kontrolní kusové zkoušky u asynchronních strojů patří též

- měření proudu a ztrát naprázdno
- měření rotorového napětí (u vinutých rotorů)
- zkouška izolace přiloženým napětím

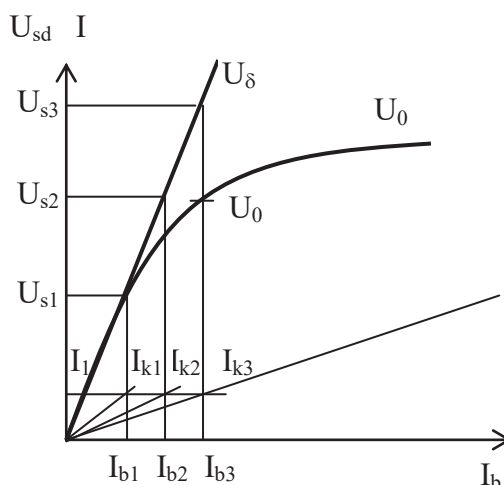
Typové zkoušky

Mezi typové zkoušky patří zejména

- oteplovací zkouška
- měření hluku a chvění

Typové zkoušky synchronních strojů

- měření reaktancí. Z charakteristiky naprázdno a nakrátko se stanoví X_d a X_{dnas} . Na základě zkoušky náhlého zkratu se stanoví X'_d a X''_d a též příslušné časové konstanty. Je možno použít také jiné metody (skluzová, dvojfázové napájení,...)



Obr. 15.4. Určení reaktancí z měření naprázdno a nakrátko na synchronním stroji. I_{k3} znamená třífázový souměrný zkrat, I_{k2} a I_{k1} pak dvojfázový a jednofázový chod nakrátko. U_δ je charakteristika vzduchové mezery.

$$X_d = \frac{U_{s3}}{\sqrt{3}I_1} \quad (15.8)$$

$$X_{dnas} = \frac{U_0}{\sqrt{3}I_1} \quad (15.9)$$

$$X_2 = \frac{U_{s2} - \frac{1}{\sqrt{3}}U_{s3}}{I_1} \quad (15.10)$$

$$X_0 = \frac{\sqrt{3}U_{s1} - U_{s2}}{I_1} \quad (15.11)$$

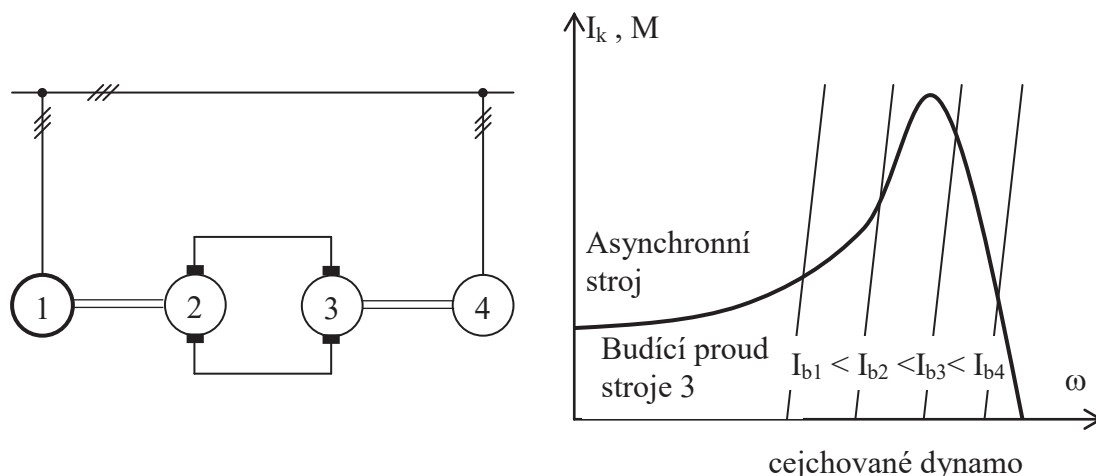
- náhlý zkrat na svorkách. Zkouška se dělá při sníženém napětí (max. 50% U_n). Následuje vyčíslení reaktancí a časových konstant. Provede se kontrola vinutí a mechanické konstrukce, aby bylo jisté, že stroj je odolný proti dynamickým silám.
- měření hřídelových napětí a proudů. Této problematice je věnována samostatná kapitola.

Typové zkoušky asynchronních strojů

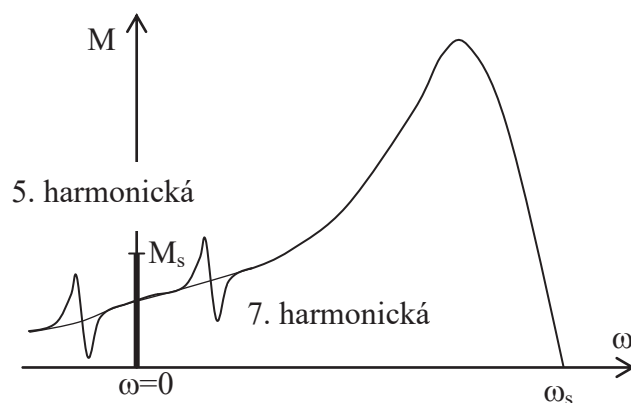
- měření momentové charakteristiky. Statickou momentovou charakteristiku lze určit zatěžováním zkoušence pomocí cejchovaného stejnosměrného stroje nebo na dynamometru.
Velké stroje je však možno měřit pouze za pomoci velkého stejnosměrného stroje. Výhodou následujícího zapojení jsou strmé otáčkové charakteristiky

15. Zkoušení střídavých točivých strojů

cejchovaného stroje (dynama 2), které pracuje při stálém buzení. To odpovídá jmenovitému napětí kotvy při jmenovitých otáčkách. Stroj 3 pracuje s proměnným buzením. Pro každé buzení stroje 3 platí jiná otáčková charakteristika. Zapojení má tu vlastnost, že i v labilní oblasti (po překročení momentu zvratu AM) jsou rychlostní charakteristiky dynama 2 strmější, než momentová charakteristika zkoušence. Takto je dosaženo stability při všech otáčkách.



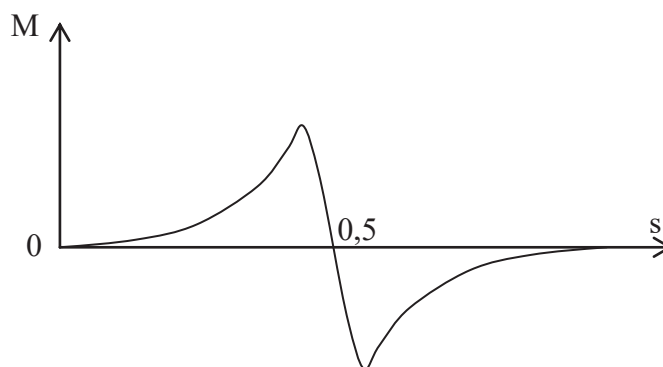
Obr. 15.5. Schéma pro měření momentových charakteristik. 1- zkoušený AM, 2- cejchované dynamo, 3- stejnosměrný motor, 4- synchronní stroj



Obr. 15.6. Asynchronní momentová sedla a synchronní moment při nulové rychlosti

V motorovém režimu se mohou vyskytnout asynchronní momenty harmonických složek 1, 7, 13, 19, ... V režimu brzdy pak momenty složek 5, 11, 17, 23, ... Vlny sudých složek vznikají při nesouměrných vinutích. Nejvýznamnější je Görgešovo sedlo, vzniklé při nesouměrnosti rotoru, např. při přerušení jedné fáze. Pak se totiž vytvoří zpětná složka reakce vinutí. Velikost Görgešova momentu je závislá též na impedanci sítě.

Vznik Görgesova sedla si můžeme vysvětlit také následující úvahou. Klec nakrátko je ideální vinutí, které má všechny činitele (kroku, rozlohy a tudíž i vinutí) rovny jedné. Počet fází je roven počtu drážek rotoru děleného počtem pólů. Zapojeno je vždy p tyčí paralelně. Každá tyč tvoří 1/2 závitu. Jedničkový činitel vinutí je výhodou, ale pouze pro základní harmonickou. Bohužel však platí jednotkový i pro všechny ostatní harmonické. Prostorové harmonické se točí pomaleji, takže se stroj pro tyto harmonické jeví jako vícepólový. Proto vzniká Görgesovo momentové sedlo, které se skládá se základní momentovou charakteristikou.



Obr. 15.7. Görge's moment

Dynamickou momentovou charakteristiku lze určit pomocí rozběhové metody na základě vztahu

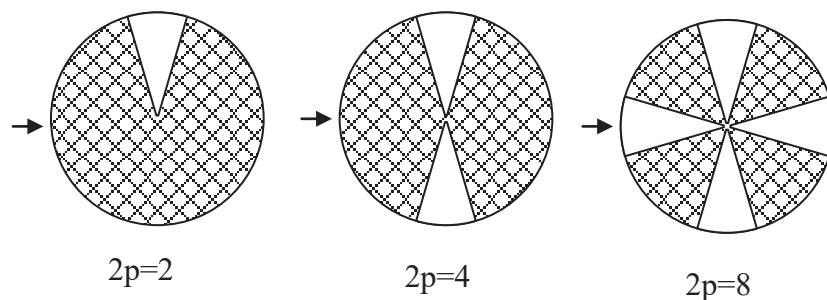
$$M \cong M_a = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (15.12)$$

V tomto případě je nutno znát moment setrvačnosti zkoušence a pak derivovat závislost otáček při rozběhu podle času. Pokud je rozběh příliš rychlý, projevuje se nepříznivý vliv elektromechanických přechodových jevů. Zrychlení rotoru má vliv zejména na moment zvratu. Se zvětšujícím se zrychlením rotoru moment zvratu klesá. Proto se obvykle rozběh zpomaluje buď sníženým napětím nebo přidáním setrvačných hmot. Při příliš dlouhém rozběhu se však zase uplatňují ztráty během rozběhu.

- měření skluzu. Toto měření lze provést pomocí stroboskopu. Na hřídeli je nakreslen počet značek odpovídající počtu pólů. Stroboskop se synchronizuje od napájecí frekvence statoru (např. od sekundárního vinutí napěťového transformátoru). Skluz se měří jen v ustáleném stavu stroje. Stopky se spustí při průchodu první značky vztázným bodem. Pak počítáme (od další značky) počet průchodů za určitý čas. Skluz se pak určí podle vztahu

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100 = \frac{n_{\text{skluzové}}}{n_s} \cdot 100 = \frac{\frac{pz}{60} \frac{60}{f}}{p} \cdot 100 = \frac{pz}{t} \frac{100}{f} = \frac{2 \cdot pz}{t} \quad (15.13)$$

kde pz je počet značek prošlých vztažným bodem za čas t .



Obr. 15.8. Značky na hřídeli pro měření skluzu stroboskopem

Pokud má stroj vinutý rotor, lze jeho otáčky určit z rotorového napětí, které snímáme na kroužkách. Máme-li na rotoru pomocnou snímací cívku, můžeme též z ní snímat napětí pro určení skluzu. Samozřejmě je možno použít bezkontaktní optický otáčkoměr. Není-li stroj napájen z napětového nebo proudového střídače, je také možné snímat např. proud tyče v kleci nakrátko pomocí Rogowskiho kroužku. V případě, že je stroj ze střídače napájen, je tento postup sice principiálně možný, avšak napětí je velmi silně ovlivněno spínáním střídače.

- kružnicový diagram. Sestrojuje se podle měření naprázdno a nakrátko. Platí však dostatečně přesně nejvýše pro stroje kroužkové. U strojů s klecí nakrátko se koncový bod vektoru statorového proudu nepohybuje ani přibližně po kružnici. Kružnicový diagram je významný zejména u největších strojů, které se nedají vůbec zatížit, ale i pro porovnávání parametrů různých strojů (účinník, přetížitelnost, záběrný moment a proud).

Kružnicový diagram platí pro konstantní hodnoty impedancí X a odporů R . Ve skutečnosti jsou tyto veličiny při zatěžování funkcí napětí, proudu a skluzu

$$X, R = f(U_1, I_1, s) \quad (15.14)$$

Konstrukce kružnicového diagramu pro stroj s vinutou kotvou

Vydeme ze známých hodnot

- proudu I_0 a účinníku naprázdno $\cos \varphi_0$ při U_n
- proudu I_k a účinníku nakrátko $\cos \varphi_k$. Měření však proběhlo při sníženém napětí a tak se proud lineárně přepočte na I_{kn} pro napětí jmenovité. O účinníku předpokládáme, že zůstane konstantní i pro proud při jmenovitém napětí.
- odporů statorového R_1 a rotorového R_2 vinutí
- převodu stroje k

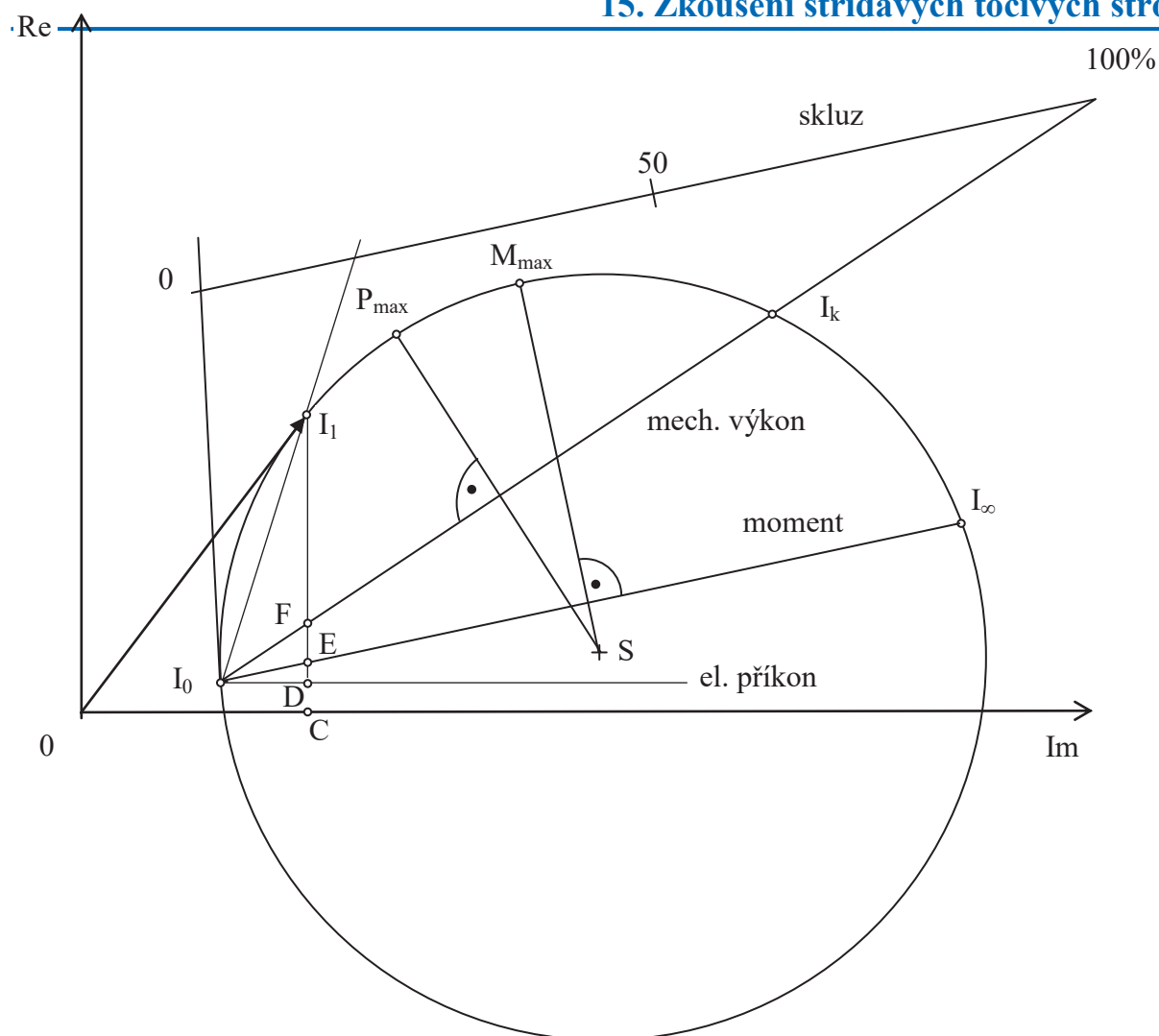
1. Zvolíme vhodně měřítko proudu m_I [A.mm⁻¹]
2. Zakreslíme v měřítku fázory proudů I_0 a I_{kn} , které svírají úhly φ_0 a φ_k s reálnou osou souřadného systému.
3. Nalezneme střed kružnice. Nakreslíme spojnicí koncových bodů fázorů proudu a v jejím středu zkonstruujeme kolmici. Na této kolmici leží střed kružnice. Dále nakreslíme rovnoběžku s reálnou osou v koncovém bodě fázoru proudu I_0 . Bodem A označíme průsečík této rovnoběžky s fázorem proudu I_{kn} . Nakreslíme osu úsečky I_0A . Tato osa je rovnoběžná s imaginární osou souřadného systému. Na průsečíku této přímky a již dříve zkonstruované kolmice leží střed kružnice.
4. Nalezneme na kružnici bod I_∞ . Koncovým bodem fázoru I_0 vedeme rovnoběžku s imaginární osou, koncovým bodem fázoru I_{kn} vedeme rovnoběžku s reálnou osou. Průsečíkem rovnoběžek je bod B. Úsečku mezi koncovým bodem fázoru I_{kn} a bodem B rozdělíme v poměru odporů R_1 a $k^2 R_2$. Spojnice vedená z koncového bodu fázoru I_0 s dělícím bodem protne kružnici v bodě I_∞ .
5. Přímka výkonu je spojnicí koncových bodů fázorů I_0 a I_{kn} .
6. Sestrojíme stupnici skluzu. V koncovém bodě fázoru I_0 se vede tečna ke kružnici. V libovolné vzdálenosti od bodu dotyku tečny s kružnicí nakreslíme rovnoběžku s přímkou momentů. Průsečík s tečnou a protaženou přímkou výkonů určují skluzu 0 a 100 %. Stupnice je lineární.
7. Vypočítáme měřítko výkonu

$$m_p = \sqrt{3} U_s m_I \quad (15.15)$$

8. Vypočítáme měřítko momentu

$$m_M = \frac{m_p}{2\pi \frac{n}{60}} \quad (15.16)$$

15-12



Obr. 15.10. Čtení v kružnicovém diagramu asynchronního stroje

Na kružnici zvolíme bod I_1 .

a) Proud je spojnicí $OI_1.m_I$.

b) Účinník $\cos\varphi$ se určí z úhlu φ , který svírá fázor proudu I_1 s reálnou (svislou) osou souřadného systému.

c) Příkon je svislá úsečka $I_1C.m_p$.

d) Moment je svislá úsečka $I_1E.m_m$.

e) Výkon ve vzduchové mezeře $P_\delta = I_1E.m_p$.

f) Výkon je svislá úsečka je $I_1F.m_p$.

g) Ztráty naprázdno lze určit jako $CD.m_p$.

h) Ztráty v mědi statoru jsou $DE.m_p$.

i) Ztráty v mědi rotoru jsou $EF.m_p$.

j) Skluz se určí pomocí prodloužené spojnice I_1I_0 , která tak protne přímkou skluzu. Skluz se čte na lineární stupnici skluzu.

Maximální výkon P_{max} se nalezne na průsečíku kružnice a kolmice k přímce výkonů. Maximální moment M_{max} se nalezne obdobně, pouze se jedná o kolmici k přímce momentů.

Další typové zkoušky asynchronních strojů jsou

- měření odporů za studena
- měření izolačních odporů (tyto zkoušky se dělají vždy),

popř. ještě

- měření proudu a ztrát naprázdno
- zkouška proudové a momentové přetížitelnosti
- měření záběrného proudu u motoru nakrátko
- oteplovací zkouška
- měření chvění a hluku



Otázky k tématu:

- *Jakým kmitočtem se provádí prvotní magnetizace jádra statoru stroje?*
 - *Patří mezi kusové zkoušky hromadně vyráběných asynchronních strojů take zatěžovací zkouška?*
 - *Jak se provádí měření netočivé reaktance AC stroje?*
-
-



Správné odpovědi

- *Jakým kmitočtem se provádí prvotní magnetizace jádra statoru stroje?*

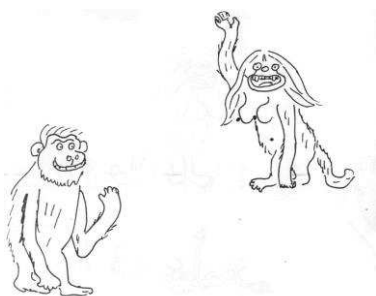
Provádí se jmenovitým kmitočtem. U strojů na 50Hz i 60Hz se provádí vyšším kmitočtem.

- *Patří mezi kusové zkoušky hromadně vyráběných asynchronních strojů take zatěžovací zkouška?*

Nepatří, to je typová zkouška stroje. Kusové zkoušky musejí být levné a rychle proveditelné. Zatěžovací zkouška je finančně i časově náročná.

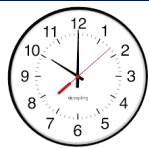
- *Jak se provádí měření netočivé reaktance AC stroje?*

Pokud to lze, spojíme všechny fáze statoru sériově a napájíme je 1f AC proudem, nejvýše jmenovité hodnoty. Pokud je vyveden uzel stroje a nikoliv všech 6 vývodů, spojujeme vinutí paralelně. Není však zaručeno, že se proud rozdělí rovnoměrně do všech fází. Pokud jsou vyvedeny pouze 3 vývody, měření provést nelze.



Rozčiluj se ještě chvíli – vytesám podle tebe výstražnou tabulku „Napětí životu nebezpečné“.

16. Zkoušení transformátorů a tlumivek



Předpokládaný čas: 45 min



Po prostudování tématu budete:

- Umět vyjmenovat mezioperační zkoušky transformátorů
- Umět vyjmenovat typové a kusové zkoušky transformátorů
- Umět měřit hodinový úhel transformátorů
- Umět měřit indukčnost tlumivek
- Umět navrhnout zapojení pro zatěžování transformátorů

Tato kapitola bude mít na zřeteli zejména zkoušky prováděné na velkých třífázových olejových transformátorech. Mimo tyto „normální“ transformátory existuje velké množství speciálních transformátorů (vícefázové, pecní, topné, svařovací, izolační, autotransformátory, měřicí transformátory, osvětlovací, spouštěcí apod.). Mnoho společných vlastností a zkoušek pak mají též tlumivky (vyhlazovací, filtrační, vyrovnávací pro paralelní chod transformátorů; zemní pro odvedení statického náboje z vedení; zhášecí tlumivky a Petersenovy cívky pro omezení kapacitních proudů při zemním spojení vedení s izolovaným uzlem) a reaktory (vzduchové i olejové) pro omezování zkratů v sítích. Břemenové magnety sice pracují na stejnosměrný proud, takže nepatří mezi střídavé stroje, ale jejich výrobní technologie má mnoho společného s technologií výroby netočivých strojů. Technologie výroby netočivých strojů má některé prvky a zkoušky dokonce shodné s výrobou strojů točivých (izolování plechů, zkoušky magnetického obvodu, impregnace).

Zkoušky transformátorů v průběhu výroby

- Magnetizace složeného jádra transformátoru. Princip zkoušky byl popsán v kapitole týkající se střídavých strojů. Rozdíl je v napájení provizorního vinutí. Každé jádro transformátoru má své vlastní vinutí a vinutí jako celek je napájeno třífázově.
- Měření cívek před nasazením na jádra (odpory, reaktance, mezizávitové zkraty)
- Zkouška za sucha se provádí před vložením do nádoby s olejem. Měří se zejména odpory vinutí. Protože má vinutí velkou indukčnost, je potřeba vyčkat

16. Zkoušení transformátorů a tlumivek

dostatečně dlouhou dobu na ustálení stejnosměrného proudu při měření Ohmovou metodou. Časová konstanta je dána vztahem

$$\tau = \frac{L}{R + R_e} = \frac{X}{\omega(R + R_e)} \quad (16.1)$$

kde R je odpor měřeného vinutí

R_e je vnější (předřadný) odpor. Jeho zařazením lze časovou konstantu snížit, ale musíme použít baterii o vyšším napětí.

Kontroluje se spojení – hodinové číslo (Yy0, Dy1, atd.). Měří se převod, a to pro každou odbočku. Udělá se zkouška nakrátko, přičemž se kontroluje oteplení (šroubových) spojů ve vinutí. Pak se dělá táž zkouška naprázdno, ale při sníženém napětí. U vícefázových transformátorů se kontroluje souměrnost a shodnost napětí jednotlivých fází.

- Měření vlastností oleje, jako je průrazná pevnost, množství nečistot, ztrátový činitel $\tan \delta$, atd. Nedostatečná elektrická pevnost oleje odebraného z transformátoru ukazuje zpravidla na přítomnost vlhkosti v transformátoru.

Po uzavření nádoby a vysušení se napustí transformátor olejem. U velkých transformátorů zpravidla následuje filtrace oleje.

Pak následují zkoušky:

- Měření dílčích výbojů (pro transformátory norma udává $<300\text{pC} = Q$)
- Měření izolačních odporů, kontrola spojení a opět měření ztrátového činitele $\tan \delta$
- Při měření naprázdno se oscilografuje proud naprázdno. Při nasycení (bod za kolenem magnetizační charakteristiky) se v něm objeví třetí harmonická. Zákazník obvykle požaduje harmonickou analýzu ve frekvenčním pásmu $50 \div 1000$ Hz. Pomocí analyzátorů výkonu (Tettex, Norma) se měří ztráty naprázdno.
- Měření hluku transformátoru. Může být způsoben nedokonalým stažením magnetického obvodu a magnetostrikcí, nebo při nuceném chlazení ventilátory.
- Zkouška závitové izolace při napětí $130\%U_n$ až $2 U_n$
- Při měření nakrátko se ověřuje poměrné napětí nakrátko a stanovují ztráty

Typové a kusové (x) zkoušky

Název zkoušky	Kontrolní kusová zkouška
Dílčí výboje a jejich lokalizace	X
Odpory, kontrola spojení, převod	X
Měření naprázdno	X
• proud I_0 (nesinusový, obsahuje 3. harmonickou) • ztráty (malý účinník, užít jalové wattmetry s $\cos \varphi = 0,1$) • převod	

- zkouška závitové izolace $130\%U_n$ až $2U_n$. Vinutí nižšího napětí se připojí ke zdroji regulovatelného napětí o alespoň dvojnásobném kmitočtu, protože zkušební napětí je předepsáno asi dvojnásobné. Zvýšený kmitočet se musí užít, aby se magnetický obvod transformátoru dvojnásobným napětím nepřesýtil. Ověřuje se vnitřní izolace transformátoru.

- měření hluku

Měření nakrátko

X

- poměrné napětí nakrátko u_k
- ztráty nakrátko

Měření reaktancí

- rozptylových X_σ
- netočivá reaktance X_0

Oteplovací zkouška

- přímé zatížení (jen pro malé transformátory)
- náhradní (úsporné) zatížení – s pomocí dalšího transformátoru. Může se použít též chodu nakrátko s mírně zvýšenými proudy. Tak se dosáhne celkových ztrát ($\Delta P_0 + \Delta P_k$), protože ztráty v železe jsou téměř nulové.

Izolační zkoušky

X

- zkouška rázovým napětím
- přiloženým napětím. Použije se cizí zdroj napětí. Ověřuje se elektrická pevnost vnější izolace a průchodek.
- Zkouška závitové izolace indukovaným napětím. Dělá se v rámci měření naprázdno.
- Zkouška zkratové odolnosti (značné proudy způsobují velké silové namáhání vodičů cívek. Po zkoušce se kontroluje vinutí a vývody vizuálně, po vytažení transformátoru z nádoby. Hrozí nebezpečí výbuchu olejových par, Buchholtzova ochrana)

Zkoušení malých transformátorků

Někdy může být nutné provést zkoušení malého napájecího transformátorku. Na těchto výrobcích se provádějí poněkud jiné zkoušky.

Jedná se transformátorky napájené výhradně z rozvodné sítě (50, popř. 60 Hz), povolené kolísání napětí $\pm 10\%$ a kmitočtu $\pm 1\%$. Malé- transformátorky se uvažují do výkonu 6,3 kVA, jednofázové i trojfázové.

Teplota okolí a vznikající teplo v transformátoru zvyšují rozměry a hmotnost transformátoru pro požadovaný výkon. Zvyšování přípustného oteplení zvyšuje

16. Zkoušení transformátorů a tlumivek

nároky na izolaci a tím i cenu transformátoru. Pokud transformátor pracuje při nižší teplotě okolí, může přenášet vyšší výkon a naopak.

teplota okolí [°C]	25	40	45	50	55	60	65	70
koef. snížení výkonu	1,14	1,00	0,93	0,87	0,80	0,73	0,67	0,60

Malé transformátorky musí vyhovovat těmto podmínkám a zkouškám:

- pracovní teplota $-10 \div +60$ °C (měřeno 1 cm od jádra)
- skladovací teplota $-20 \div +80$ °C
- $R_{iz} > 500 \text{ M}\Omega$ (měřeno $U_{ss} = 500\text{V}$)
- elektrická pevnost vinutí - jádro $1\text{kV}_{st} / 1\text{mm}$
- elektrická pevnost mezi vinutími dle jejich napětí
- klimatický test dle IEC 68-2-2 Ca 21 21 dnů při relativní vlhkosti 96% a 40 °C
- klimatický test dle IEC 68-2-2 Ba 96 hodin ve 100 °C
- klimatický test dle IEC 68-2-1 Aa 96 hodin v teplotě -25 °C
- klimatický test dle IEC 68-2-14 obsahuje 10 teplotních cyklů mezi $-25 \div +100$ °C
- mechanické testy dle IEC 68-2-34 obsahují vibrace od 10 Hz do 50 Hz o amplitudě 0,35 mm ve třech osách po dobu 30 min
- mechanický testy dle IEC 68-2-29 je 500 pádů se zrychlením 15g
- test nehořlavosti dle IEC 65 14.4.1
- test pájitelnosti špiček dle IEC 68-2-20
- životnostní test po dobu 1000h při napájení maximálním napětím a při plné zátěži

Zlepšení účinnosti je možné za cenu vyšších nákladů na výrobu (např. zvětšení velikosti - pokles indukce a proudové hustoty).

Napájecí transformátorky musí pracovat i za mezních stavů napájecí sítě. Za těchto podmínek (max. napětí, min. frekvence, min. průřez) by neměla mag. indukce dosáhnout nepřipustně vysokých hodnot a výrazněji přesytit jádro transformátoru.

Měření hodinového čísla

Zpoždění napětíového fázoru strany nižšího napětí za napětíovým fázorem strany vyššího napětí je vyjadřováno tzv. hodinovým číslem, protože může nabývat pouze celých násobků 30°.

Při jeho měření se galvanicky propojí primární vinutí se sekundárním (obr. 16.1.) a měří se napětí nejen sdružená na každé straně (např. U_{ab} , U_{bc}), ale i napětí mezi jednotlivými fázemi primáru a sekundáru (např. U_{bB} , U_{bC}). Pokud změříme všechny kombinace napětí, některá měření budou nadbytečná. Pak se sestrojí fázorové hvězdice primáru a sekundáru a ve směru sledu fází se odměří hodinový úhel od napětí vyššího směrem k napětí nižšímu stejnojmenné fáze. Proto musíme do trojúhelníků (měříme vždy sdružená napětí) nakreslit hvězdy fázových napětí.

16. Zkoušení transformátorů a tlumivek

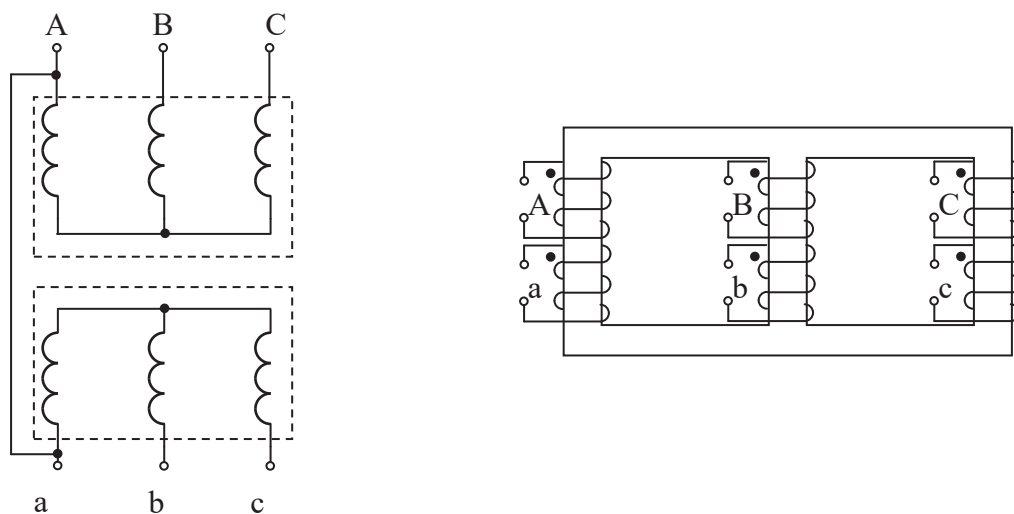
Pokud budeme dodržovat podmínky

- vinutí stejnojmenných fází jsou na jednom jádře (sloupku)
- všechna vinutí mají shodný smysl
- nekřížíme vývody pod víkem transformátoru

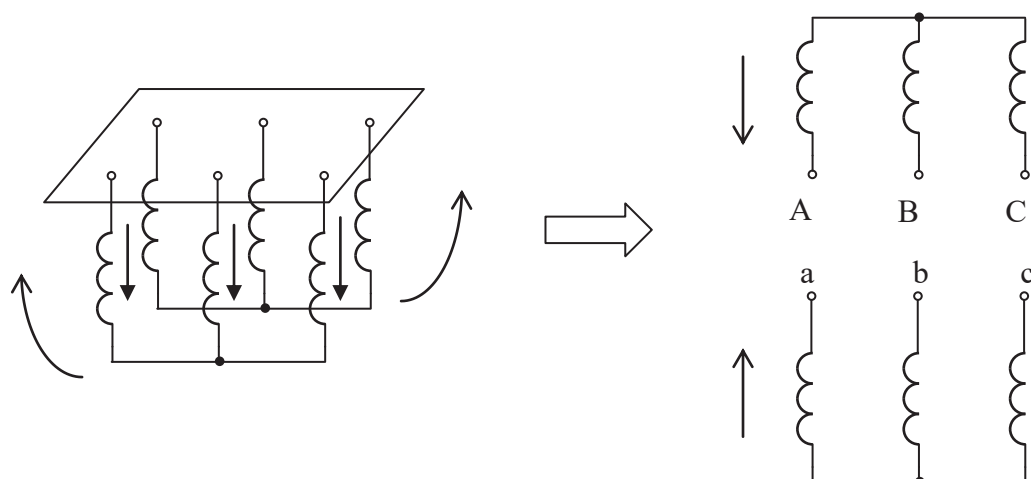
jsou možné pouze následující hodnoty hodinových čísel:

Y	y	0		6					
	d	1		5		7		11	
	z	1		5		7		11	
D	y	1		5		7		11	
	d	0	2	4	6	8	10		
	z	0	2	4	6	8	10		

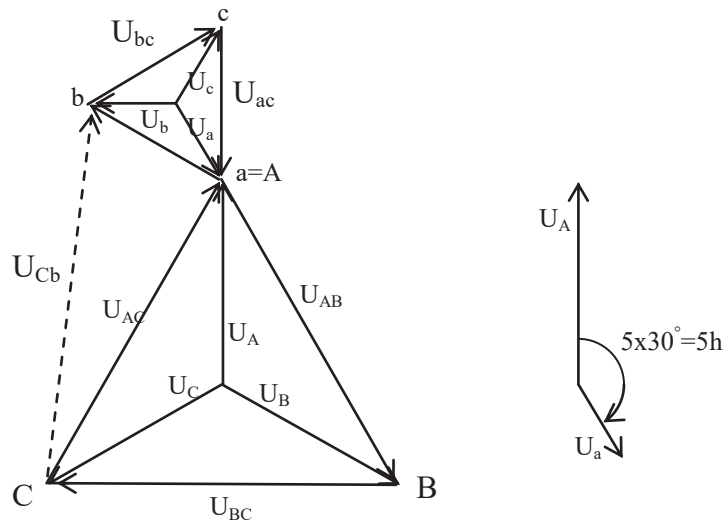
Velké písmeno značí stranu vyššího, malé stranu nižšího napětí. Zapojení do lomené hvězdy (Z) na straně vyššího napětí se z napěťových důvodů (náročné na izolaci) nepoužívá.



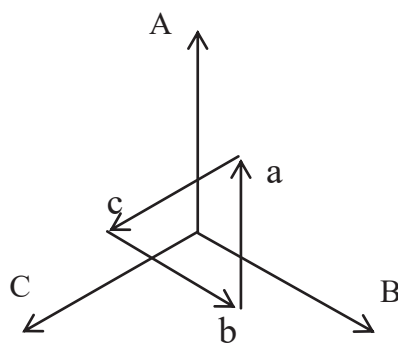
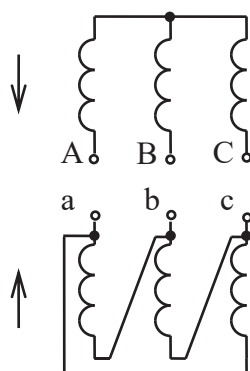
Obr. 16.1. Zapojení pro měření hodinového čísla a znázornění podmínek platnosti uvedených kombinací hodinových čísel



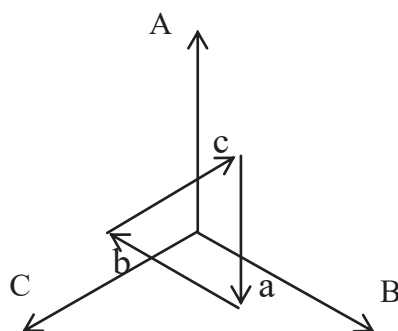
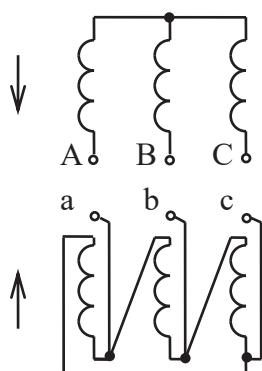
Obr. 16.2. Princip přechodu na zobrazení vinutí a jeho spojení v rovině



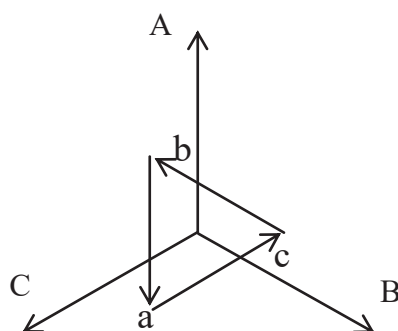
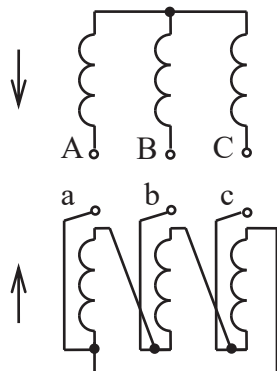
Obr. 16.3. Konstrukce diagramu a odměření hodinového úhlu



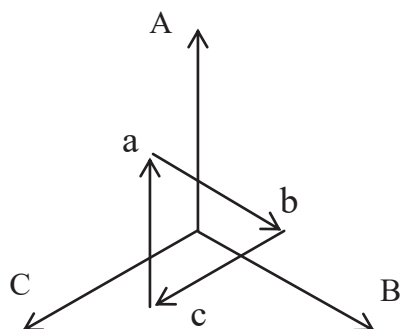
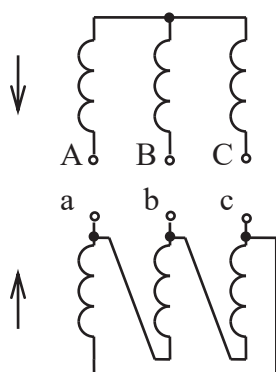
Yd5



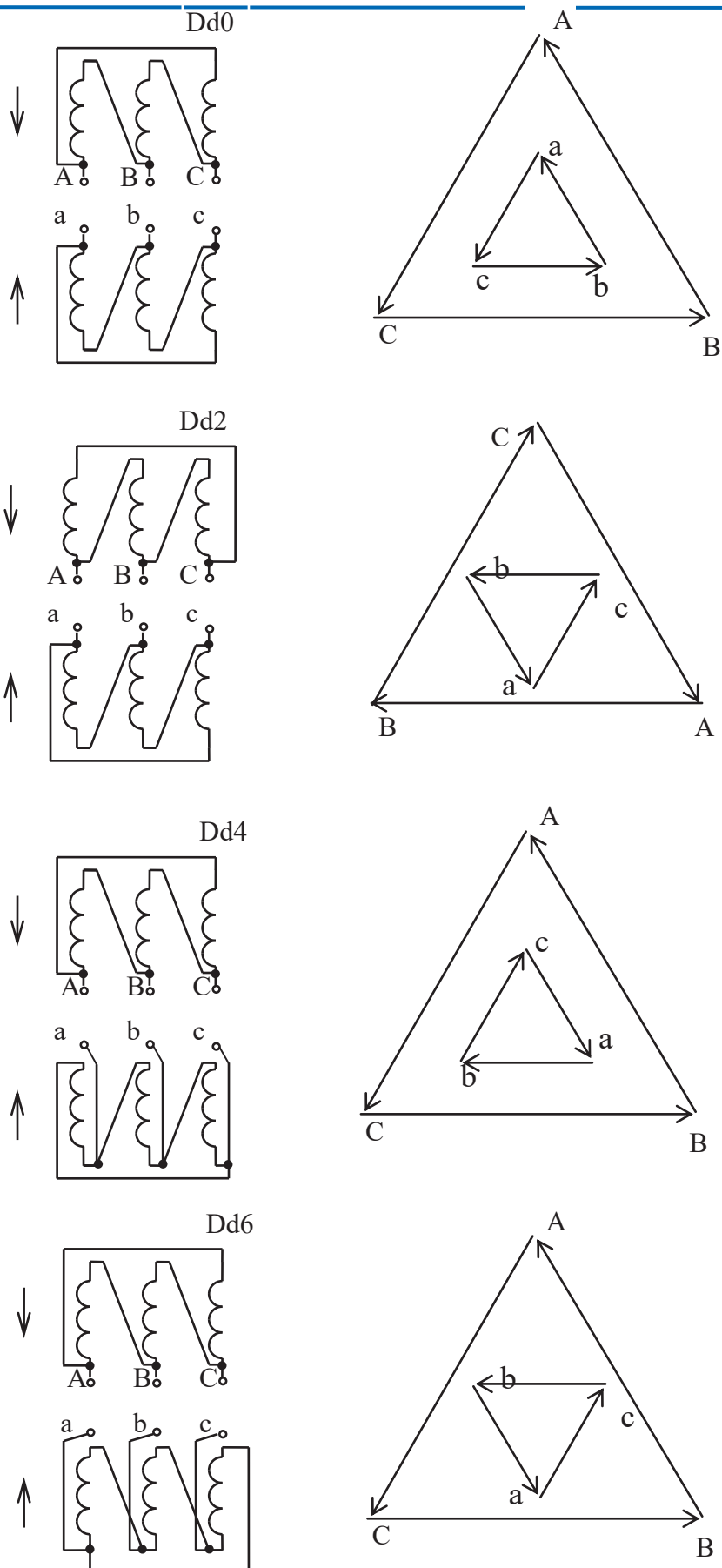
Yd7



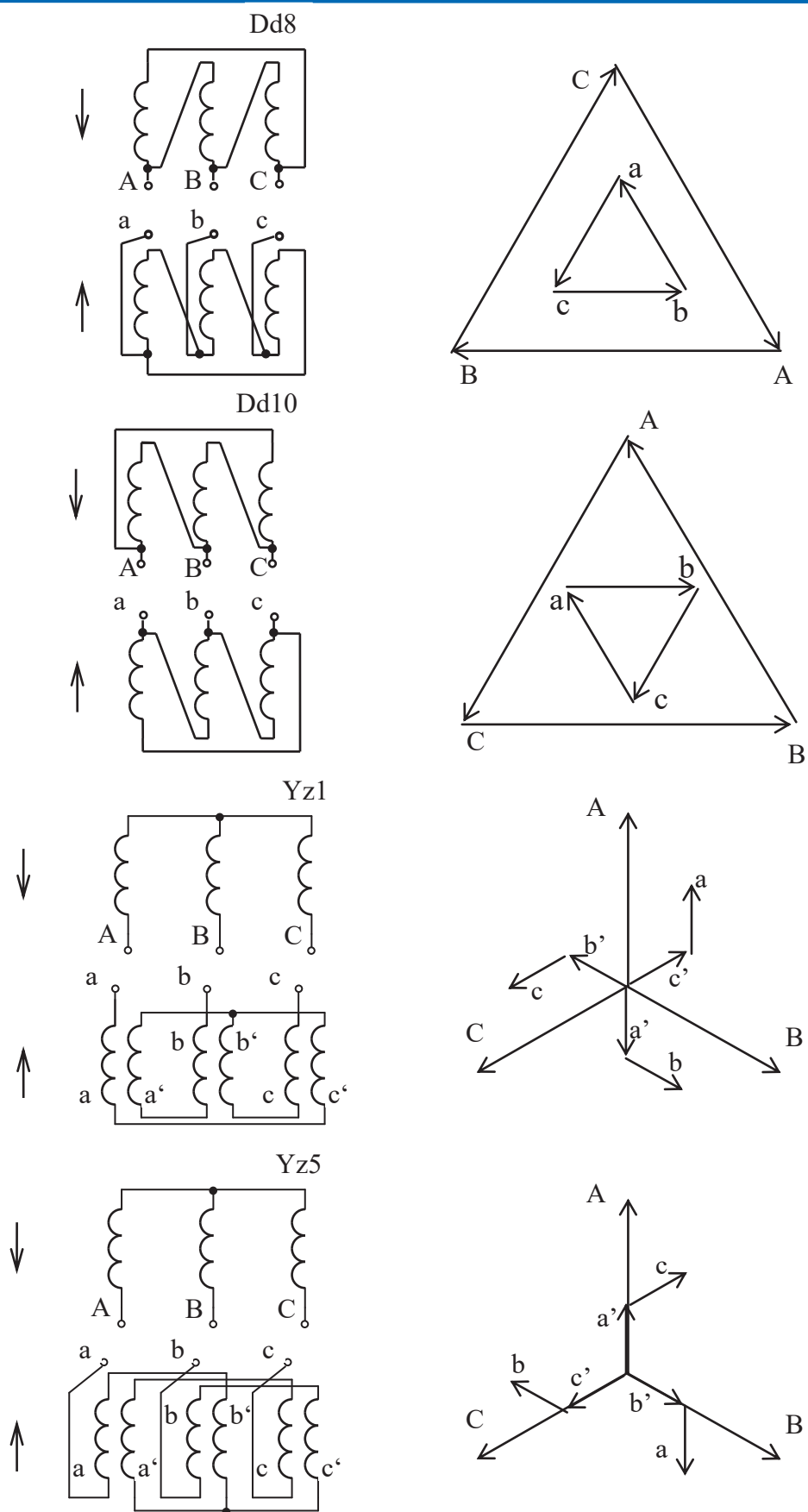
Yd11



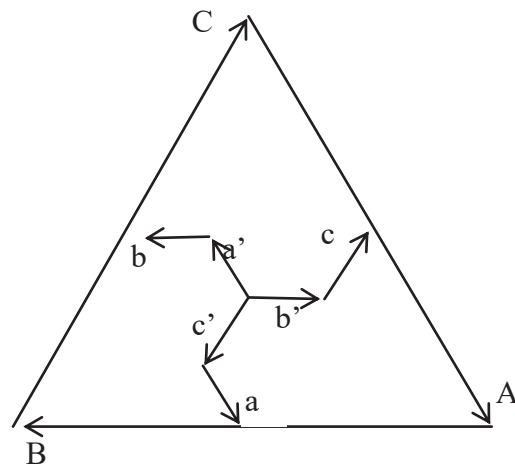
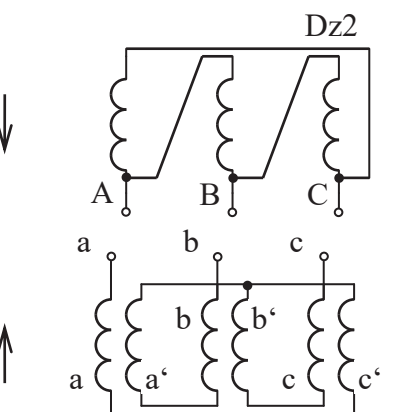
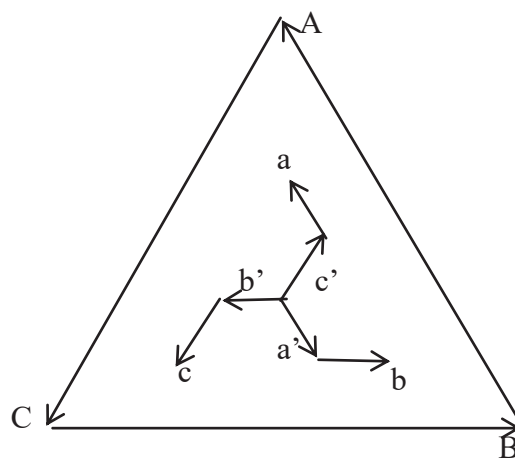
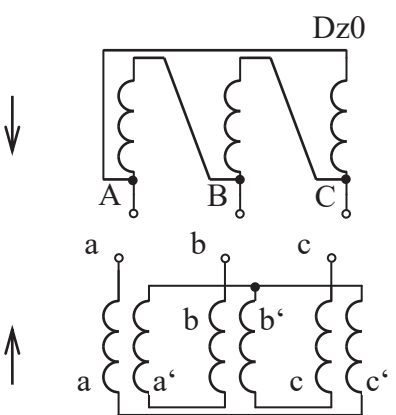
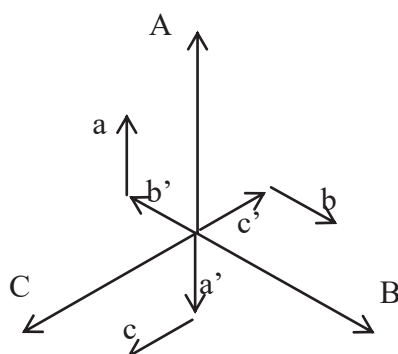
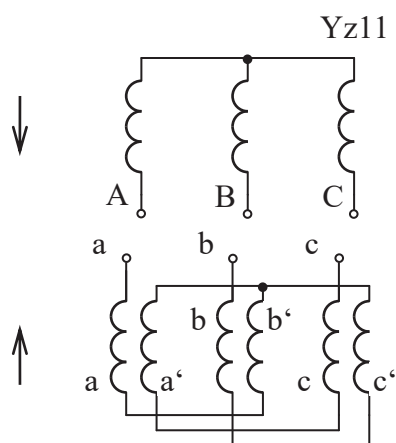
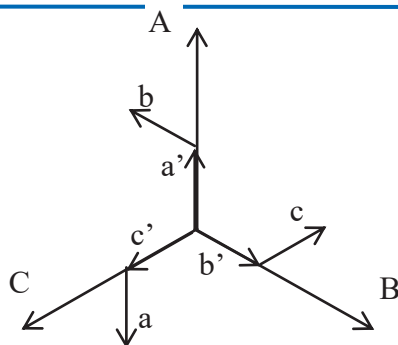
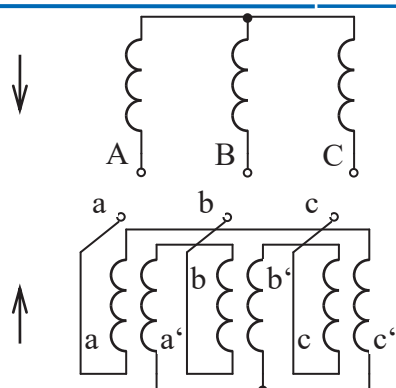
Obr. 16.4. Hodinová čísla Yd



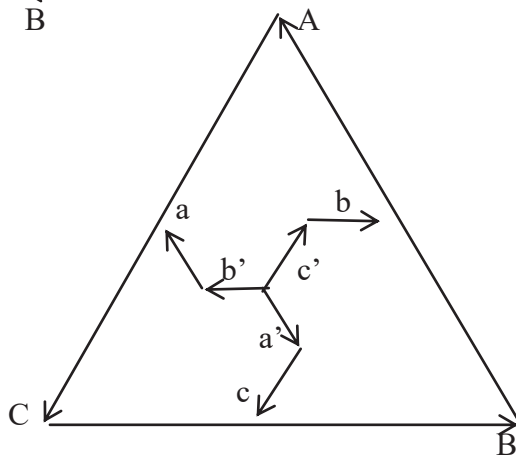
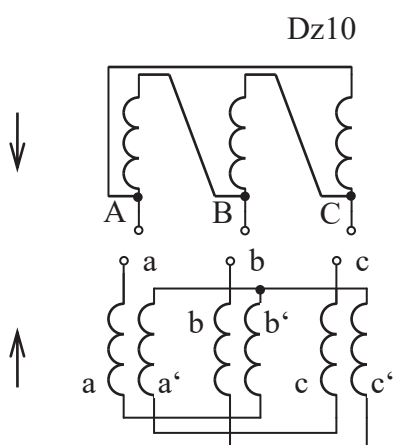
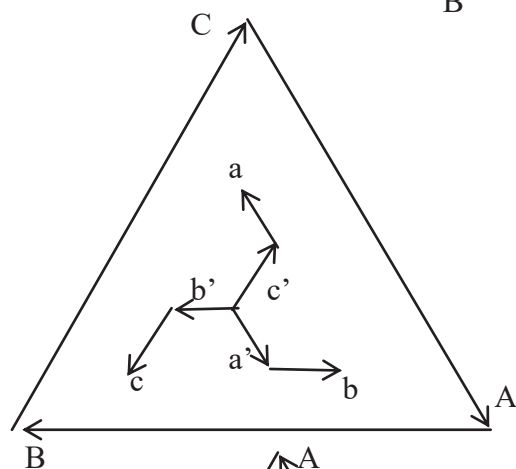
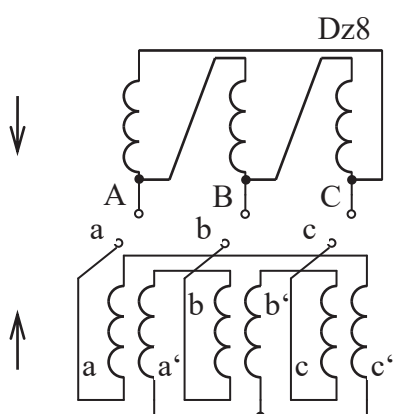
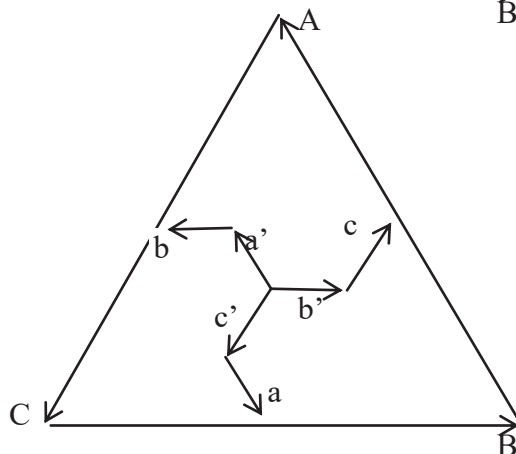
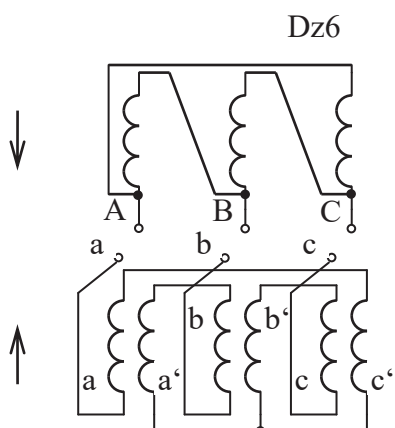
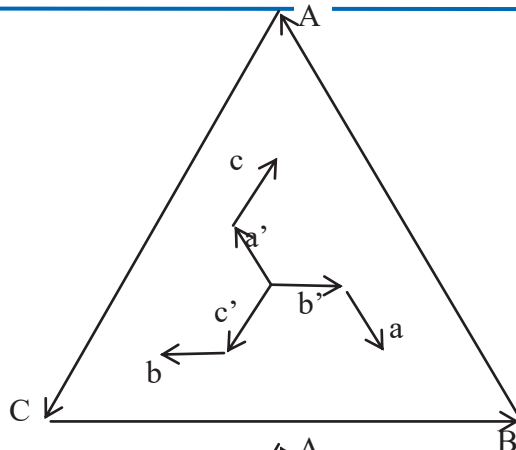
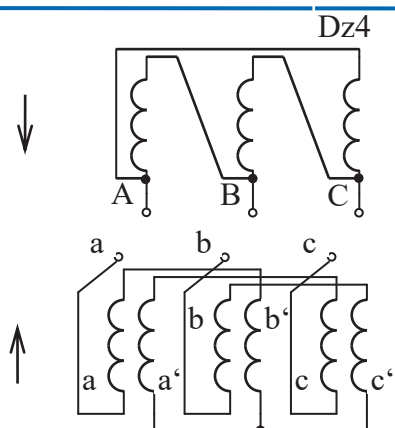
Obr. 16.5. Hodinová čísla Dd0 - Dd6



Obr. 16.6. Hodinové číslo Dd8, Dd10, Yz1 a Yz5



Obr. 16.7. Hodinová čísla Yz7, Yz11, Dz0 a Dz2



Obr. 16.8. Hodinová čísla Dz 4, Dz6, Dz8 a Dz10

Měření tlumivek

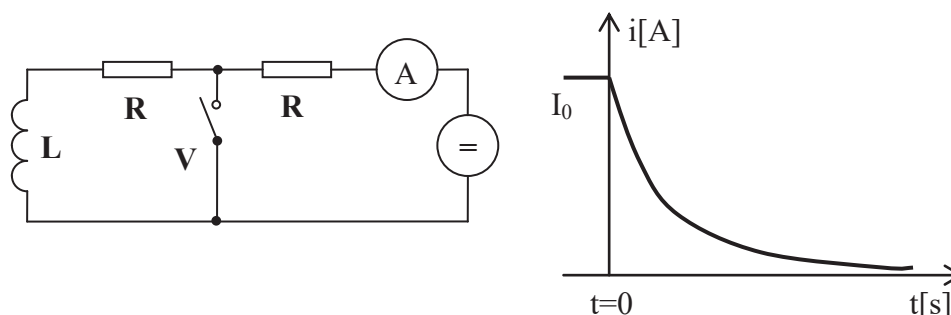
V moderních polovodičových pohonech se používají tlumivky se železným jádrem a vzduchovou mezerou k vyhlazení usměrněného proudu, popř. k filtraci rušivých vyšších harmonických.

Provádějí se měření

- odporů
- izolační stav
- oteplení (stejnosměrným, popř. zvlněným proudem)
- zkratová odolnost
- izolační napěťové zkoušky rázové a přiloženým napětím
- měření indukčnosti

Měření podle statické definice

Princip tohoto měření byl popsán v kapitole věnované měření magnetických a elektrických veličin. Zde doplníme jen několik vysvětlujících vztahů.



Obr. 16.9. Schéma zapojení pro měření a zanikající proud

$$Ri + \frac{d\Psi}{dt} = 0 \quad (16.2)$$

$$Ridt + d\Psi = 0 \quad (16.3)$$

$$\int_0^{\infty} Ridt + \int_0^{\infty} d\Psi = 0 \quad (16.4)$$

a protože

$$\Psi = L(i).i \quad (16.5)$$

tak dostaneme

$$\int_0^{\infty} d\Psi = \int_{I_0}^0 L di = [Li]_{I_0}^0 = -LI_0 \quad (16.6)$$

$$R \int_0^{\infty} i dt - LI_0 = 0 \quad (16.7)$$

a tak vyjádříme

$$L = \frac{R}{I_0} \int_0^{\infty} i dt \quad (16.8)$$

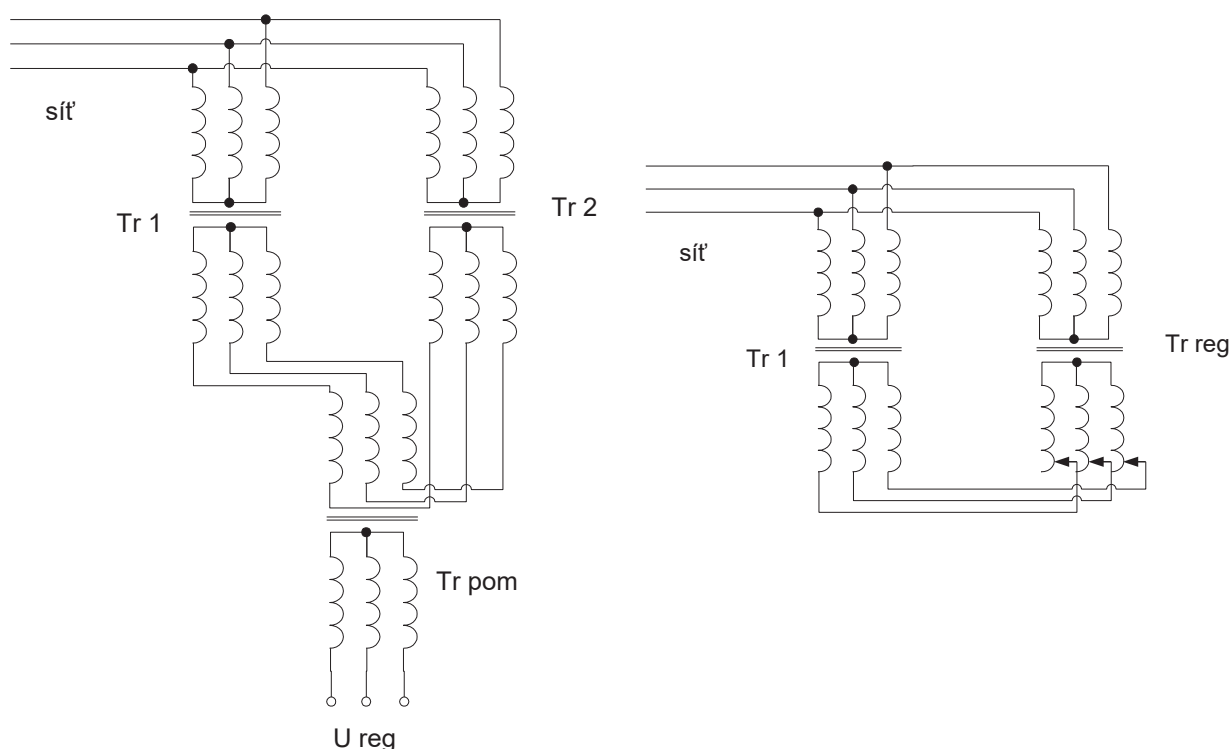
Měření podle dynamické definice

V praxi se většinou postupuje tak, že se nastaví požadovaná frekvence a požadované zvlnění proudu. Pak se provede harmonická analýza a stanoví se obsah 1. harmonických napětí a proudu. Z těchto hodnot se pak vypočte dynamická indukčnost.

Oteplovací zkouška transformátorů

Oteplovací zkouškou se určuje oteplení vinutí a oleje vzhledem k vstupujícímu chladicímu médiu. Použití velkých výkonů při oteplovací zkoušce je možné jen výjimečně (např. u blokového transformátoru), byla vypracována celá řada umělých zapojení, při nichž se odebírá ze sítě pouze výkon odpovídající ztrátám, resp. dvojnásobným ztrátám. V praxi se používají obvykle dva z těchto způsobů:

- u transformátorů do 1 000 kVA tzv. úsporné zapojení
- u transformátorů nad 1 000 kVA metoda spojení nakrátko



Obr. 16.10. Schéma úsporného zapojení pro zatěžování transformátorů.



Otázky k tématu:

- *Která zařízení se zkoušejí podobně jako transformátory?*
- *Měří se hodinové číslo také u 1f transformátorů?*
- *Je potřeba znát odpor vinutí tlumivky, pokud měříme její indukčnost stejnosměrnou metodou?*



Správné odpovědi

- *Která zařízení se zkoušejí podobně jako transformátory?*

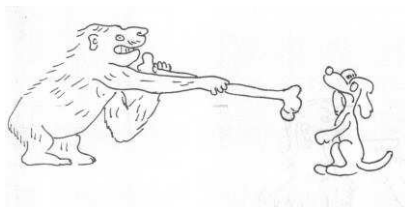
Podobně se zkoušení i všechny druhy tlumivek a břemenové magnety, i když jsou na DC proud.

- *Měří se hodinové číslo také u 1f transformátorů?*

Ano, hodinový úhel se pak značí li 0 nebo li6.

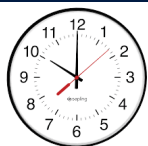
- *Je potřeba znát odpor vinutí tlumivky, pokud měříme její indukčnost stejnosměrnou metodou?*

Ano, odpor je potřeba znát a nejen odpor vlastní tlumivky, ale také celého obvodu včetně vodičů.



Elektrických předmětů pod napětím se dotýkáme zásadně suchou nevodivou mamutí kostí.

17. Zkoušky dalších elektrických zařízení



Předpokládaný čas: 15 min



Po prostudování tématu budete:

- Mít základní náhled na životnostní zkoušky
- Mít základní přehled o zkouškách složitějších pohonů

1. Elektrické spínací přístroje

Zkoušky závisí na napětové hladině a druhu přístroje (např. vypínač vvn, vn, spínače a stykače nn)

Zpravidla se provádí

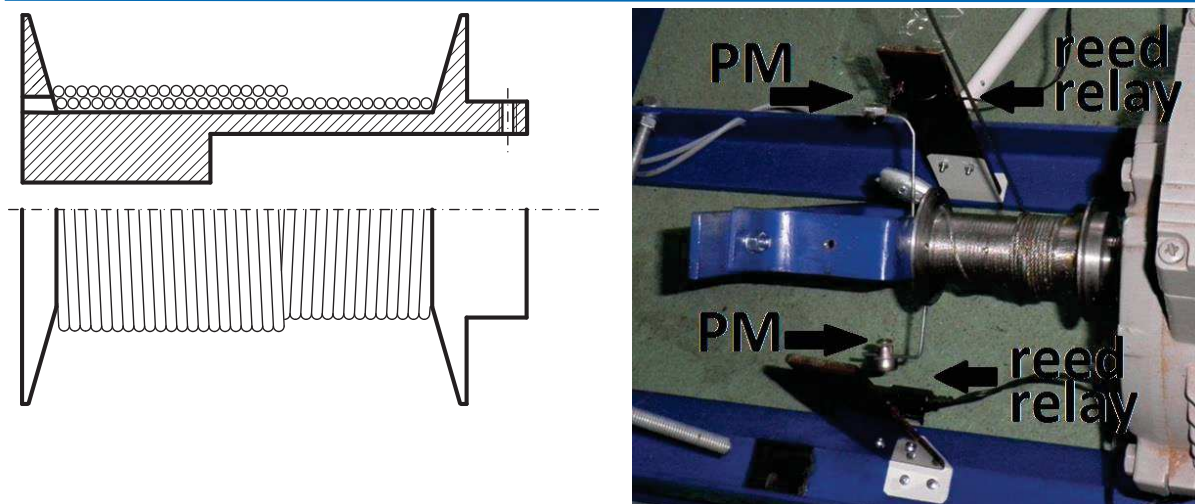
- kontrola a nastavení mechanického spínání (tlaky, rychlosti pohybu, časy)
- výkonové vypínací zkoušky (max. vypínací proud, vypínání malých proudů do indukčností apod.)
- zkouška vytrvalostní (3 – 5 tis. sepnutí), popř. životnostní zkouška (do poruchy)
- izolační napětové zkoušky

Příkladem může být životnostní zkouška sběrače – pantografu. Parametry zkoušky se liší podle typu sběrače. Může být např. testován 75 000 zdvihnutí a spuštění, rychlostí 0,1m/s, což vyžaduje trvalý test po 3 měsíce. Test smí být přerušován pouze servisními zásahy (např. výměna tahového lanka). Během testu musí být pravidelně sledována teplota a vlhkost prostředí, počet cyklů v čase, vodivost a vzhled pletencových spojek sběrače, servisní zásahy na testovací technologii a všechna přerušení testu. V případě přerušení testu musí být uveden důvod, začátek a konec přerušení.

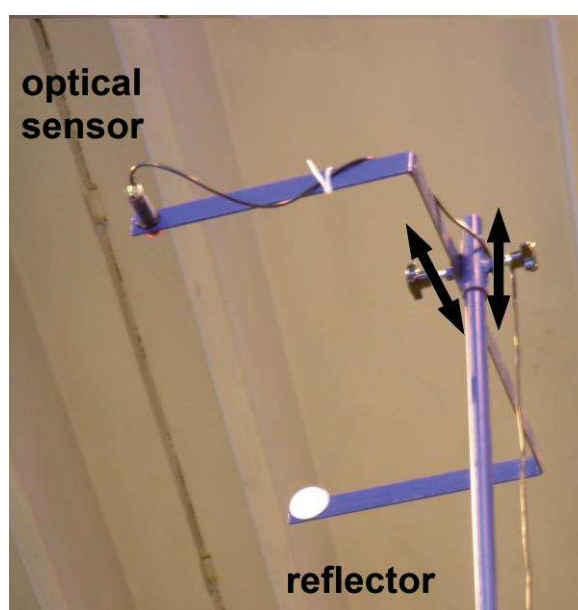
Tab. 17-1 – Doba zdvihu a stažení při testu

time	standart [s]	measurement [s]	error [-]
up direction	30	27,8	-0,073
down direction	30	31,8	0,060
1 cycle	60	59,6	-0,007
7 cycles	420	419	-0,002

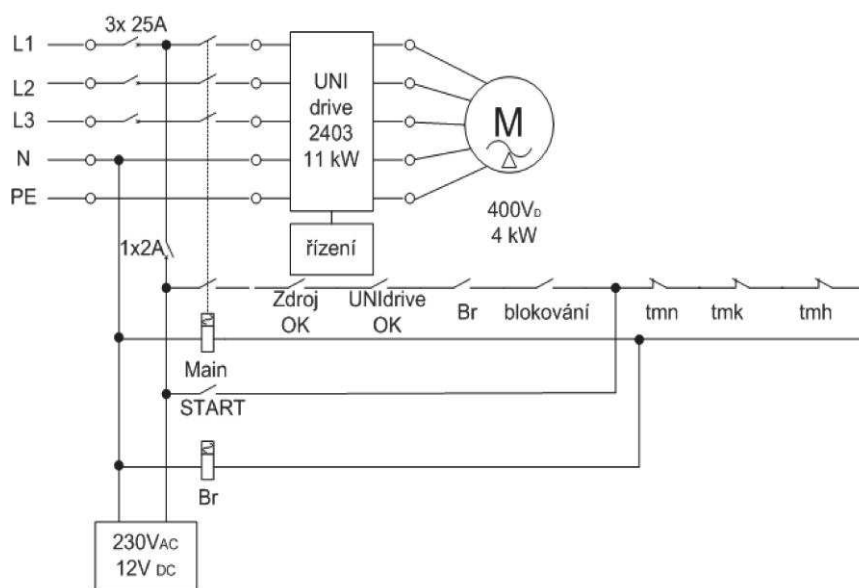
17. Zkoušky dalších elektrických zařízení



Obr. 17-1. The special pulley and service + emergency brake.



Obr. 17-2. The optical sensor and its mechanical holder



Obr. 17-3. The power circuit and control circuit 400/230V.

17. Zkoušky dalších elektrických zařízení

Tab 17-2

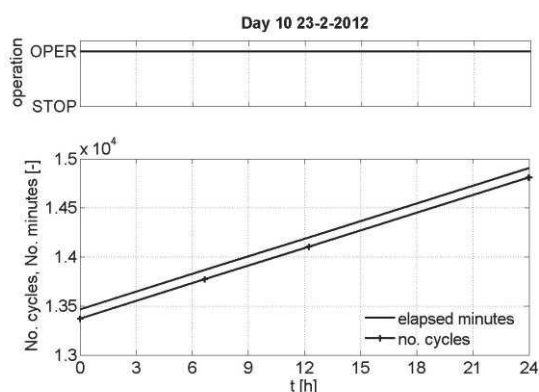
Day No.	dd.mm.yyyy	hh:mm	performed cycles	elapsed minutes
0	13.02.2012	15:35	0	0
0	13.02.2012	16:21	46	46
0	13.02.2012	16:22	46	47
1	14.02.2012	18:05	1559	1590
2	15.02.2012	8:08	2402	2433
...				
48	1.04.2012	17:41	68958	69186
49	2.04.2012	8:02	69819	70047
50	3.04.2012	7:12	71209	71437
50	3.04.2012	9:05	71322	71550
51	4.04.2012	7:01	72638	72866
52	5.04.2012	8:29	74166	74394
52	5.04.2012	22:23	75000	75228

17. Zkoušky dalších elektrických zařízení

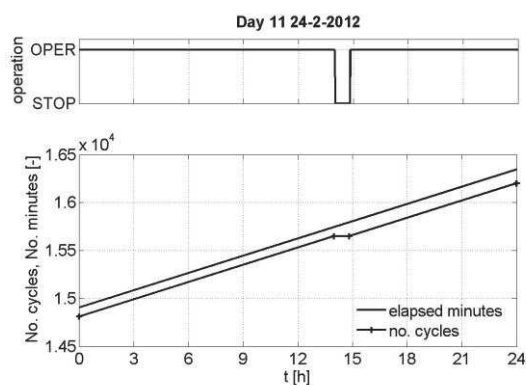
Tab. 17-3 – Provozní deník

date day No.	time	main counter	status	SIGMA		temp. °C	elemental operation	worker
				start	daily km			
				stop	daily time			
				check	total km			
15.2.	Wed 2	2852			69,88	69,9	22,0	Sk
					5:52	5:52		
			x		548	561,9		
16.2.	Thu 3	3808			260,2	260,24	22,0	Sk Ki
					21:48	1:49		
			x		739	752,3		
16.2.	Thu 3	3842			266,15	266,16		Sk
					22:18	2:18		
			x		745	758,2		
16.2.	Thu 3	4445			387,24	387,41		Pe
			x					
17.2.	Fri 4	5202			538,8	539,17	23,0	Sk
					45:01	5:01		
			x		1017	1031,2		
17.2.	Fri 4	5654			628,94	629,83		Sk
			x		52:32	2:33		
					1107	1121,8		
17.2.	Fri 4	5655	x		0	0		Sk
					0:00	0:00		
					1107	1121,9		
18.2.	Sat 5	7176			308,8	308,78	21,5	Sk
					25:14	5:14		
			x		1416	1430,8		
18.2.	Sat 5	7198			312,91	312,9		Sk
					25:35	5:36		
			x		1420	1434,9		
19.2.	Sun 6	8576			567,6	567,5	21,0	Sk
					48:33	8:33		
			x		1675	1689,4		
20.2.	Mon 7	9467			730,85	730,8	20,0	Sk
					63:15	3:15		
			x		1838	1853,8		
20.2.	Mon 7	9840			802,6	802,6	21,0	Ki
			x					
20.2.	Mon 7	9982			827	827,9		Sk
					71:59	1:59		
			x		1935	1949,9		
21.2.	Tue 8	11005			1016,6	16,49	21,5	Sk
					89:02	9:02		
			x		2124	2138,5		
21.2.	Tue 8	11415			1091,8	91,88		Sk
					95:51	5:51		
			x		2199	2213,8		
21.2.	Tue 8	11417			1092,6	92,61		Sk Ki
			x		95:54	5:55		
					2200	2114,5		
21.2.	Tue 8	11418	x		0	0		Sk Ki
					0	0		
					2200	2114,8		
22.2.	Wed 9	12302			160,36	161,08	22,0	Sk
					14:44	4:45		
			x		2361	2375,8		

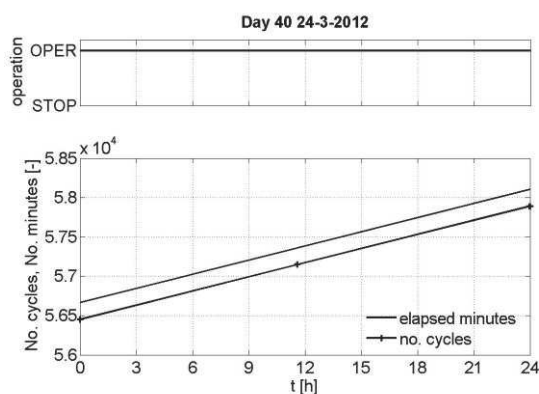
17. Zkoušky dalších elektrických zařízení



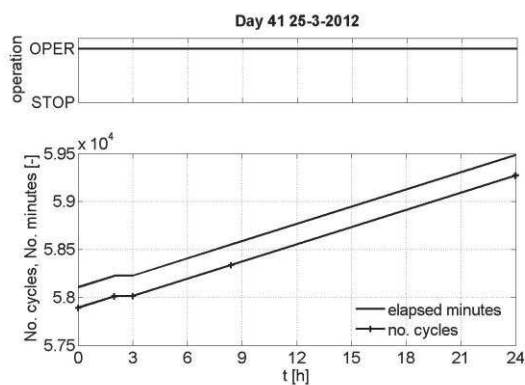
Obr. 17-4 Day No. 10



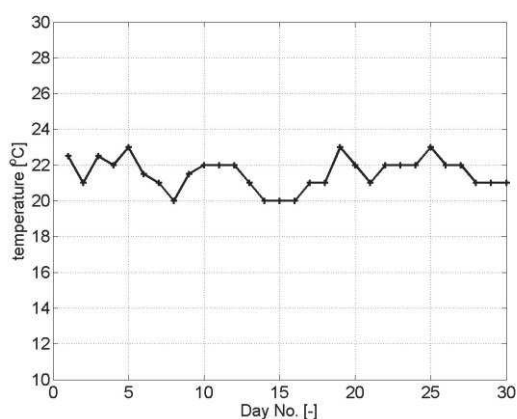
Obr. 17-5 Day No. 11. new steel rope, pc. 5, type 1



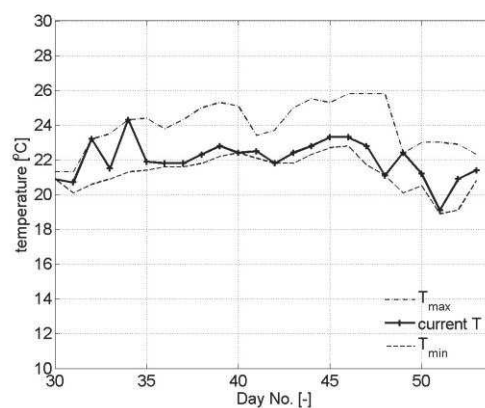
Obr. 17-6 Day No. 40



Obr. 17-7 Day No. 41
UTC/GMT +1h ->UTC/GMT +2h



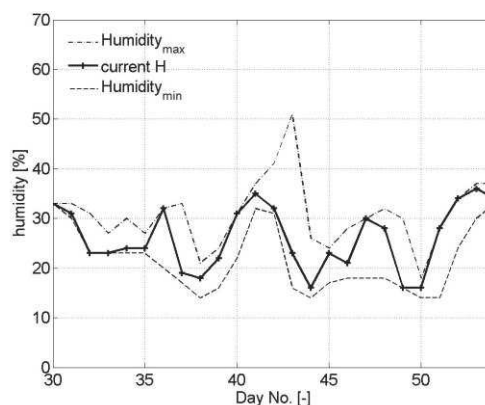
Obr. 17-8 Temperature, overview 1/2



Obr. 17-9 Temperature, overview 2/2

17. Zkoušky dalších elektrických zařízení

blank space



Obr. 17-10 The humidity for a ½ was not measured

Obr. 17-11 Humidity, overview 2/2

Tab. 17-4 Tabulka přerušení testu

date day No.	time	main counter	delay [min]	elemental operation	worker
13.2. Po 0	16:22	46	2	watch dog emergency STOP. Time relay set to right value.	Sk
13.2. Po 0	17:04	86	8	new rubber under steel rope	Sk
14.2. Ut 1	9:03	1037	16	setting of the back-up counters SIGMA and AUTHOR	Sk Ki
14.2. Ut 1	18:00	1558	4	new rubber under steel rope	Pe
15.2. St 2	9:45	2498	24	new steel rope, pc. 2, type 1	Sk
17.2. Pa 4	14:45	5654	20	new steel rope, pc.3, type 1	Sk
21.2. Ut 8	15:08	11417	20	new steel rope, pc.4, type 1	Sk Ki
24.2. Pa 11	14:00	15649	50	new steel rope, pc. 5, type 1	Ki
5.3. Po 21	15:20	30079	16	new steel rope, pc.6, type1	Sk Ki Pe
15.3. Ct 31	15:21	44464	32	new steel rope, pc.7, type 2	Sk
23.3. Pa 39	9:10	55581	20	new steel rope, pc.8, type 1	Ki Pe
1.4. Ne 48	17:28	68957	16	new steel rope, pc.9, type 1	Sk
5.4. Ct 52	22:23	75000	0	waiting to the end of the endurance test	Sk



Obr. 17-12 Lobe. Day No.52, cycle No. 75000, date April 5, 2012.



Obr. 17-13 Overview. Day No.52, cycle No. 75000, date April 5, 2012.

2. Elektronické obvody a pohony, měniče

Vyžadují technické znalosti a zkušenosti, systematický přístup. Univerzální postup zkoušení a uvádění do provozu neexistuje.

Zpravidla se dělá

- kontrola zapojení (automaty na kontrolu elektronických obvodů, izolační odpor dílčích obvodů)
- oživování a nastavování dílčích obvodů
- zkoušky měniče do náhradní zátěže
- oživení a zkoušky silového obvodu
- postupné zavádění zpětných vazeb a regulační smyček
- zkouška přechodových stavů – optimalizace nastavení regulátorů
- nastavení ventilace (rozvaděče), popř. kapalinového chlazení polovodičových prvků
- oteplovací zkoušky
- zkouška na hluk

3. Zkoušky elektrických pecí

Odporové pece

- kontrola zapojení
- měření odporů topných článků
- oteplovací zkoušky
- elektroizolační zkoušky

17. Zkoušky dalších elektrických zařízení

V průmyslových těžkých provozech se klade důraz na izolační bezpečnost, pospojování apod. Důležitým podkladem je výchozí revizní zpráva od revizního technika. Během provozu se provádějí pravidelné revize.

Indukční pece

U těchto zařízení se provádějí navíc:

- rezonanční zkouška – nastavení optimální kapacity pro dané zatížení (kompenzace účinníku, rezonanční režim)
- u nových pecí se mění frekvence statického měniče podle zatížení

Obloukové pece

- pecní transformátor, přívody k elektrodám
- měření impedancí, symetrizace
- oteplovací zkouška nakrátko

Technologické zkoušky (elektrických pecí všeobecně)

- provozní zkoušky doby ohřevu a doby tavby
- stanovení měrné spotřeby elektrické energie



Otázky k tématu:

- *Je potřeba u životnostních a dlouhodobých testů psát provozní deník a co by měl obsahovat?*
- *Proč se prvotní testy měničů provádějí do náhradní zátěže a bez zpětných vazeb?*



Správné odpovědi

-
-
- *Je potřeba u životnostních a dlouhodobých testů psát provozní deník a co by měl obsahovat?*

Deník je povinnou záležitostí. Uvádět se musí datum zásahu, jméno pracovníka, parametry testu (veličiny se liší dle druhu testu), parametry okolí (napětí, teplota, vlhkost apod.) a všechny ostatní relevantní údaje.

- *Proč se prvotní testy měničů provádějí do náhradní zátěže a bez zpětných vazeb?*

Zkoušky do náhradní zátěže jsou často rychlejší, bezpečnější, levnější a snáze vyhodnotitelné. Zpětné vazby zavádíme do přednastaveného a odzkoušeného pohonu až při nasazení na kontrétní technologické zařízení, abychom nepřesahovali např. povolené rozsahy pohybů mechanism, teploty, tlaky, rychlosti apod.