

UNIVERZITA HRADEC KRÁLOVÉ  
PEDAGOGICKÁ FAKULTA

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Univerzita Hradec Králové

Pedagogická fakulta

Katedra základů techniky

# **Kompendium a pracovní listy pro předmět elektrotechnika, část 2**

Diplomová práce

Autor: Bc. Jakub Mikoláš  
Studijní program: N7504 Specializace v pedagogice  
Studijní obor: Základy techniky se zaměřením na vzdělávání  
Tělesná výchova se zaměřením na vzdělávání  
Vedoucí práce: doc. PaedDr. René Drtina, Ph.D.

**Podklad pro zadání DIPLOMOVÉ práce studenta**

PŘEDKLÁDÁ:	ADRESA	OSOBNÍ ČÍSLO
Mikoláš Jakub	Kpt. Stránského 961, Praha - Černý Most	P17P0653

**TÉMA ČESKY:**

Kompendum a pracovní listy pro předmět elektrotechnika, část 2

**TÉMA ANGLICKY:**

Compendium and Worksheets for the Subject Electrical Engineering, Part 2

**VEDOUCÍ PRÁCE:**

doc. PaedDr. René Drtina, Ph.D. - KTP

**ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

Cílem diplomové práce je vytvoření souborného tematického přehledu pro předmět silnoproudá elektrotechnika na úrovni SOU a SOŠ. Materiál bude doplněn pracovními listy ke každému tématu. Zpracování témat bude provedeno v elektronické podobě s možným využitím interaktivních prvků, při současné možnosti přesně definovaného tiskového výstupu. Předpokládá se ověření použitelnosti materiálu i pracovních listů v rámci souvislé pedagogické praxe na SOU a SOŠ elektrotechnických.

Struktura práce:

1. Elektrické měřicí přístroje - základní pojmy, přesnost a chyby měření
2. Měření proudu a napětí
3. Měření výkonu střídavého proudu
4. Zvětšování rozsahu měřících přístrojů
5. Transformátor - princip činnosti, náhr. schémata, ztráty a účinnost
6. Trojfázový transformátor - spojení vinutí, hodinový úhel. Paralelní chod. Autotransformátor
7. Stejnoseměrné stroje - princip činnosti, indukované a svorkové napětí. Reakce kotvy. Komutace
8. Dynamo - provozní vlastnosti, charakteristiky
9. Stejnoseměrné motory - vznik momentu. Provozní vlastnosti, charakteristiky
10. Asynchronní stroje - princip činnosti, skluz, otáčky, ztráty, účinnost, mechanický moment, spouštění, regulace
11. Regulace otáček trojfázových asynchronních motorů
12. Jednofázový a dvojfázový asynchronní motor
13. Synchronní stroje - princip činnosti, spouštění a provozní vlastnosti synchronního motoru

**SEZNAM DOPORUČENÉ LITERATURY:**

- Lokvenc, J. Elektrotechnika I., II. Rukopis přednášek pro studenty oboru ZT. Revidovaná verze 2012.  
Vladař, J., Zelenka, J. Elektrotechnika a silnoproudá elektronika. SNTL Praha 1986.  
Voženílek, L. Kurz elektrotechniky. SNTL Praha 1976.  
Trnka, Z. Teoretická elektrotechnika. SNTL Praha 1972.  
Blahovec, A. Elektrotechnika II. Praha: Informatorium. 2005. ISBN 80-7333-044-X.  
Blahovec, A. Elektrotechnika III. (příklady a úlohy). Praha: Informatorium. 2005. ISBN 80-7333-045-8.  
Drtina, R., Lokvenc, J., Maněna, V. Doplnující materiály k předmětu Technická praktika elektro. In Media4u Magazine X2/2009.  
Drtina, R., Lokvenc, J., Maněna, V. Příručka k předmětu Technická praktika elektro Elektrické rozvody v praxi. In Media4u Magazine X4/2009.  
Novák M., Sbirka příkladů z elektrotechniky, elektroniky a elektrických strojů a pohonů. Praha: ČVUT. 2010. ISBN 978-80-01-04659-3.  
Dvořáková, I. Teoretická elektrotechnika: cvičení. Olomouc: UP. PřF. 2001. ISBN 80-244-0168-1.  
Vladař, J., Zelenka, J. Elektrotechnika a silnoproudá elektronika. SNTL Praha 1986.  
Voženílek, L. Kurz elektrotechniky. SNTL Praha 1976.  
Trnka, Z. Teoretická elektrotechnika. SNTL Praha 1972.  
Haasz, V. Elektrická měření: přístroje a metody. Praha: ČVUT. 2003. ISBN 80-01-02731-7.

Ďaďo, S. Číslicové měření: přístroje a metody. Praha: ČVUT. 2002. ISBN 80-01-02492-X.  
Uhlíř, I. Elektrické stroje a pohony. Praha: ČVUT. 2007. ISBN 978-80-01-03888-8.  
Faktor, Z. Transformátory a tlumivky pro spínané napájecí zdroje. Praha: BEN. 2002. ISBN 80-86056-91-0.

Podpis studenta: .....

Datum: .....

Podpis vedoucího práce: .....

Datum: .....

**Prohlášení:**

*Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně a uvedl všechny použité prameny a literaturu.*

*V Hradci králové dne .....*

## **Anotace:**

Mikoláš, J. *Kompendium a pracovní listy pro předmět elektrotechnika, část 2*. Hradec Králové: Pedagogická fakulta Univerzity Hradec Králové, 2018, 69 s. Diplomová práce.

Cílem diplomové práce je vytvoření souborného tematického přehledu pro předmět silnoproudá elektrotechnika na úrovni SOU a SOŠ. Materiál je doplněn pracovními listy ke každému tématu. Zpracování témat bude provedeno v elektronické podobě s možným využitím interaktivních prvků, při současné možnosti přesně definovaného tiskového výstupu. Ověření použitelnosti materiálu i pracovních listů proběhlo v rámci souvislé praxe na SPŠST Panská.

**Klíčová slova:** kompendium, pracovní listy, elektrotechnika, měřicí přístroj, transformátor, točivé stroje, motor, generátor

## **Annotation:**

Mikoláš, J. *Compendium and Worksheets for the Subject Electrical Engineering, Part 2*. Hradec Králové: Faculty of Education, University of Hradec Králové, 2016, 69 s. Bachelor Degree Thesis.

The aim of the thesis is to create a comprehensive thematic overview for the subject of heavy current electrical engineering at vocational schools and secondary technical schools. The material is supplemented by worksheets for each topic. The theses will be processed in electronic form with possible using of interactive elements, including the possibility of precisely defined printing output. It was verified the usage of the material and the worksheets in the context of the continuous practice at SPŠST Panská.

Key words: compendium, worksheets, electrotechnics, measuring instruments, transformer, rotating machines, engine, generator

## OBSAH

	SEZNAM OBRÁZKŮ	9
	SEZNAM TABULEK	11
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	12
	ÚVOD	13
1	ELEKTRICKÉ MĚŘICÍ PŘÍSTROJE	15
1.1	Rozdělení přístrojů	16
1.1.1	Indikace - princip	16
1.1.2	Umístění (poloha)	16
1.1.3	Odečítání veličiny	16
1.1.4	Přesnost měřícího přístroje (třídy přesnosti)	16
1.1.5	Ručkové přístroje podle měřící soustavy	17
1.1.6	Parametry ručkových přístrojů	17
1.1.7	Citlivost, konstanta	17
1.1.8	Chyby měřících přístrojů	18
1.2	Dva základní principy číslicových přístrojů - převod analogové veličiny na číslo	19
1.2.1	Komparační (časový)	19
1.2.2	Kompenzační - vyrovnávací	20
1.3	Principy ručkových přístrojů	21
1.4	Přístroje používané v elektrotechnice	30
1.4.1	Voltmetr	30
1.4.2	Ampérmetr	33
1.4.3	Wattmetr	34
1.4.4	Elektroměr	35
1.4.5	Wheatstonův můstek (odporový můstek)	36
1.5.1	Sériový ohmmetr	37
1.5.2	Výpočet předřadného odporu (předřadníku) voltmetru	38
1.5.3	Výpočet bočnicku ampérmetru	39
1.5.4	Další značky na stupnicích přístrojů	40
2	TRANSFORMÁTORY	41
2.1	Jednofázový transformátor	41
2.2	Autotransformátor	43
2.3	Svářecí transformátor	44
3	TŘÍFÁZOVÉ TRANSFORMÁTORY	46
4	TOČIVÉ STROJE	48
5	MOTORY	52
5.1	Asynchronní motory	54
5.1.1	Trojfázový indukční motor	54
5.2	Synchronní motory	58
5.2.1	Alternátory	58
6	PRACOVNÍ LISTY	61
6.1	Pracovní list - měřící přístroje	61
6.2	Pracovní list - transformátory	64
6.3	Pracovní list - motory	66
	ZÁVĚR	68
	POUŽITÉ ZDROJE	69



## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr.1	Korekce	19
Obr.2	Přístroj kompenzační časový	19
Obr.3	Přístroj kompenzační vyrovnávací	20
Obr.4	Měřicí ústrojí s otočným magnetem	21
Obr.5	Magnetoelektrické měřicí ústrojí	21
Obr.6	Měřicí ústrojí Deprézské poměrové	24
Obr.7	Elektromagnetické měřicí ústrojí	24
Obr.8	Elektrodynamické měřicí ústrojí	25
Obr.9	Ferodynamické měřicí ústrojí	26
Obr.10	Indukční měřicí ústrojí	27
Obr.11	Tepelné měřicí ústrojí	29
Obr.12	Rezonanční měřicí ústrojí	30
Obr.13	Elektrostatické měřicí ústrojí	30
Obr.14	Voltmetr	30
Obr.15	Zapojení voltmetru do obvodu	31
Obr.16	Parametry vlastního měřicího ústrojí	31
Obr.17	Návrh střídavého rozsahu voltmetru	32
Obr.18	Střední hodnota napětí	33
Obr.19	Zapojení ampérmetru do obvodu	34
Obr.20	Parametry vlastního měřicího ústrojí	34
Obr.21	Wattmetr	35
Obr.22	Elektroměr	36
Obr.23	Wheatstonův můstek	36
Obr.24	Sériový ohmmetr	37
Obr.25	Stupnice	37
Obr.26	Předřadný odpor	38
Obr.27	Bočník	39
Obr.28	Transformátor	41
Obr.29	Náhradní schéma transformátoru	41
Obr.30	Jádrový transformátor	42
Obr.31	Plášťový transformátor	42
Obr.32	Válcové vinutí	42
Obr.33	Kotoučové vinutí	42
Obr.34	Transformátor naprázdno	43
Obr.35	Transformátor zatížený odporem	43
Obr.36	Převod dolů	43
Obr.37	Převod nahoru	44
Obr.38	Charakteristika oblouku	44
Obr.39	Svářecí transformátor	45
Obr.40	Třífázový transformátor	46
Obr.41	Zapojení cívek do hvězdy	46
Obr.42	Zapojení cívek do trojúhelníku	46
Obr.43	Zapojení cívek do lomené hvězdy	47
Obr.44	Princip komutátoru	48
Obr.45	Stejnoseměrný stroj	49
Obr.46	Reakce kotvy	49
Obr.47	Dynamo s cizím buzením	50

Obr.48 Dynamo derivační	50
Obr.49 Dynamo sériové	51
Obr.50 Dynamo kompaundní	51
Obr.51 Princip motoru	52
Obr.52 Derivační motor	52
Obr.53 Momentová charakteristika derivačního motoru	53
Obr.54 Sériový motor	53
Obr.55 Momentová charakteristika sériového motoru	54
Obr.56 Vírová kotva	55
Obr.57 Vlnitá kroužková kotva	55
Obr.58 Model činnosti motoru	56
Obr.59 Motor s kroužkovou kotvou	57
Obr.60 Jednofázový indukční motor	57
Obr.61 Princip alternátoru	58
Obr.62 Schéma synchronního motoru	59
Obr.63 Jednofázový synchronní motor	60

## SEZNAM TABULEK

Tab.1	Měření napětí a proudu na pasivních součástkách a jejich vztah	15
Tab.2	Rozdělení zdrojů	15
Tab.3	Značky měřicích přístrojů	17
Tab.4	Značky na stupnicích přístrojů	40
Tab.5	Značky stejnosměrných strojů	49

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

$\alpha$	teplotní koeficient odporu, výchylka
$\Delta_u$	absolutní chyba
$\eta$	účinnost
$\mu$	permeabilita
$\Phi$	magnetický tok
$\varphi$	rovinný úhel, fázový úhel
$\Psi$	fázový posuv mezi magnetickými toky, indukční tok
$\omega$	kruhová frekvence
$\delta_p$	chyba přístroje
$\delta_u$	proměnná chyba údaje
A/D	analog/digitál
$A_n$	naměřená hodnota
$A_m$	plná hodnota rozsahu
$A_s$	skutečná hodnota
B	magnetická indukce
C	kapacita
$C_i$	citlivost
D/A	digitál/analog
F	síla
f	frekvence
G	generátor
Hz	hertz
I	proud
$K_i$	konstanta
$K_p$	výchylka přístroje
L	indukčnost
l	délka
M	moment
N	počet závitů
n	otáčky
P	výkon
S	spínač
$S_{Fe}$	plocha železa
ss	stejnoseměrný
st	střídavý
R	odpor
U	napětí
$U_{ef}$	efektivní hodnota napětí
$U_m$	maximální hodnota napětí
$U_s$	střední hodnota napětí

## ÚVOD

Diplomovou práci jsem si vybral z osobního zájmu o elektrotechniku. Na trhu je mnoho dostupné literatury z elektrotechniky, ne však v takové podobě, jakou bychom potřebovali k výuce silnoproudé elektrotechniky na SOU a SOŠ. Proto jsem se rozhodl vytvořit učební materiál pro výuku předmětu na vybraných školách.

Učební podpora je vytvořena jako přehledová učebnice elektrotechniky, která by měla studentům pomoci k pochopení základů silnoproudé elektrotechniky a k procvičování již získaných vědomostí. Podmínkou pochopení dané problematiky je však znalost předmětů v předchozím studiu jako je například matematika a fyzika.

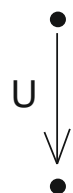


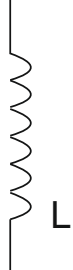
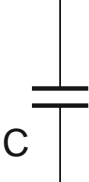
Jako základní zdroj při tvorbě textu jsem použil rukopis přednášek doc. Ing. Jaroslava Lokvence, CSc., a to s jeho souhlasem. Ty jsou stavebním kamenem diplomové práce, která je doplněna dalšími tituly uvedenými v seznamu použitých zdrojů.

Cílem práce není vytvořit obsáhlou knihu plnou informací, ale obsáhlý přehled k jednotlivým tématům doplněný vhodně zvolenými obrázky. V práci jsou uvedeny i příklady sloužící k opakování učiva.

# 1 ELEKTRICKÉ MĚŘICÍ PŘÍSTROJE

## Měření napětí a proudu na pasivních součástkách a jejich vztah

Tab.1 Měření napětí a proudu na pasivních součástkách a jejich vztah

obrázek					
název	napětí	proud	rezistor (odpor)	cívka (indukčnost)	kondenzátor
druh proudu	ss-st	ss-st	ss-st	ss-st	st
přístroj	voltmetr	ampérmetr	ohmmetr	měřič indukčnosti	měřič kapacity
jednotka	volt	ampér	ohm	henry	farad
vzorec			$U = RI$	$U = I\omega L$	$U = I \frac{1}{\omega C}$

## Vlastnosti stejnosměrného a střídavého napětí a proudu

Tab.2 Rozdělení zdrojů

zdroje	stejnoseměrné (baterie, dynamo)	střídavé (alternátory)		
vlastnost	polarita, směr	tvar, nesymetrie	frekvence, perioda	charakteristické hodnoty (maximální, efektivní a střední hodnota)
přístroj	volt-ampérmetr	střídavý volt-ampérmetr, osciloskop	čítač	speciální přístroje

## Součet stejnosměrného a střídavého napětí nebo proudu

- 1) Měří se přístrojem, který reaguje jen na příslušnou složku
- 2) Zobrazí se na osciloskopu a odečet hodnot se provede graficky nebo z číslcového kurzoru

## Základní metody měření

- 1) přímá
- 2) srovnávací
- 3) kompenzační

## Měřicí soustavy

- 1) elektromechanický měřicí systém EMS (indikátor)
- 2) elektronický zesilovač + EMS
- 3) digitální měřicí systém DMS ( displej)
- 4) A/D převodník (karta) + počítač

## Realizace měřicího přístroje z hlediska použití

Typ	uživatel	
- amatérská	- jednotlivce	↑ nárůst pořizovací ceny ↓
- komerční	- spotřebitel	
- specializovaná	- odborný uživatel	
- profesní	- firma	
- špičkový prototyp	- vědecké pracoviště	

## 1.1 Rozdělení přístrojů

### 1.1.1 Indikace - princip

- 1) Výchylkové (ručkový) - mechanické ústrojí - měřená veličina vyvolá mechanický moment
  - spirálové pružiny působící proti momentu
- 2) číslicové (digitální) - veličina se vhodným převodníkem převede obvykle na střídavé napětí, a to pomocí převodníku na číslo
  - měření se opakuje po určitých časových úsecích (taktovací frekvence 25 až několik tisíc/s) - zobrazuje se 0,5-5/s. Lze měřit i jednorázově, indikátor má většinou paměť
  - mohou měřit i velmi rychle se měnící veličiny

### 1.1.2 Umístění (poloha)

- a) panelové
- b) rozvaděčové
- c) přenosné

### 1.1.3 Odečítání veličiny

- Ručičkové - ručkové - mechanická stupnice
  - zapisující - mechanická stupnice + pisátko + pás papíru
- Digitální - stav počítadla - indikátoru/číselný
  - zápis stavu indikátoru






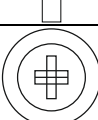




### 1.1.4 Přesnost měřicího přístroje (třídy přesnosti)

Ručkové 0,1; 0,2; 0,5; 1; 1,5; 2,5; 5 [%] z plné výchylky rozsahu

Digitální 0,005-0,1 [%] a udává se z rozsahu nebo z měřené hodnoty

### 1.1.5 Ručkové přístroje podle měřicí soustavy

Tab.3 Značky měřicích přístrojů

s otočným magnetem	
magnetoelektrický (Deprézský)	
poměrové Deprézské	
feromagnetické	
elektrodynamické	
ferodynamické	
indukční	
tepelné	
rezonanční	
elektrostatické	

### 1.1.6 Parametry ručkových přístrojů

- 1) výrobce, výrobní číslo, typ
- 2) jednotka měřicí veličiny
- 3) třída přesnosti
- 4) druh proudu
- 5) měřicí soustava
- 6) zkušební napětí
- 7) rozsah
- 8) přetížitelnost
- 9) vlastní spotřeba

### 1.1.7 Citlivost, konstanta

Konstanta - velikost změny měřené veličiny po změně výchylky o 1 dílek. Například pro proud

$$I = \alpha \cdot K_i \text{ [A; d, A/d]} \quad (1)$$

Početně můžeme konstantu stanovit

$$K_i = \frac{\text{jmenovitý rozsah}}{\text{počet dílků stupnice}} \quad (2)$$



Konstantu udáváme v jednotkách měřené veličiny vztaženou na jeden dílek stupnice (například 0,005 A/1 d).

Citlivost - změna výchylky při změně měřené veličiny o jednotku

$$\frac{1}{K_i} = C_i \Rightarrow C_i = \frac{1}{K_i} \text{ [d/A]} \quad (3)$$

Jinými slovy citlivost je převrácená hodnota konstanty.

U nelineárních systémů není  $C_i$  konstantní, ale mění se v závislosti na frekvenci.

Když je dělení na dílky, je dáno funkcí  $\alpha = f(A)$ , kde  $A$  je měřená veličina, rovnice (3) platí nadále.

### 1.1.8 Chyby měřících přístrojů

$$\Delta_u = A_n - A_s \quad (4)$$

$A_n$  - naměřená hodnota

$A_s$  - skutečná hodnota

Měřenou veličinu nikdy nelze 100% stanovit, proto ji pro výpočet nahrazujeme konvenční pravou hodnotou (hodnota zjištěná přesnějším měřením). Absolutní chyba může být kladná, záporná a její jednotkou je jednotka příslušné měřené veličiny [1, 2, 3, 4].

$$\delta_u = \frac{\Delta_u}{A_n} \cdot 100 \% = \frac{A_n - A_s}{A_n} \cdot 100 \% \quad (5)$$

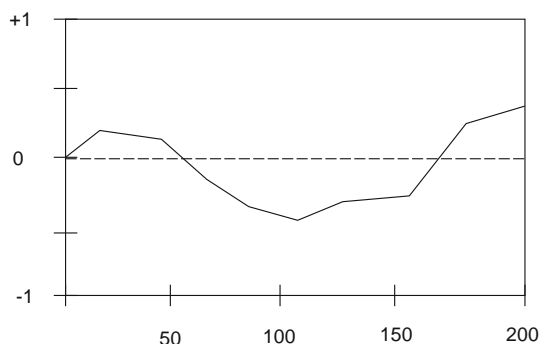
Je to velikost absolutní chyby vztažená ke skutečné hodnotě měřené veličiny. Při měření obvykle dáváme přednost proměnné chybě údaje.

$$\delta_p = \frac{\Delta_u}{A_m} \cdot 100 \% = \frac{A_n - A_s}{A_m} \cdot 100 \% \quad (6)$$

$A_m$  - plná hodnota rozsahu

Korekce - u přesnějších přístrojů je korekce přiložena (obr.1)

$$A_s = A_n + K \Rightarrow K = -\Delta_u \quad (7)$$

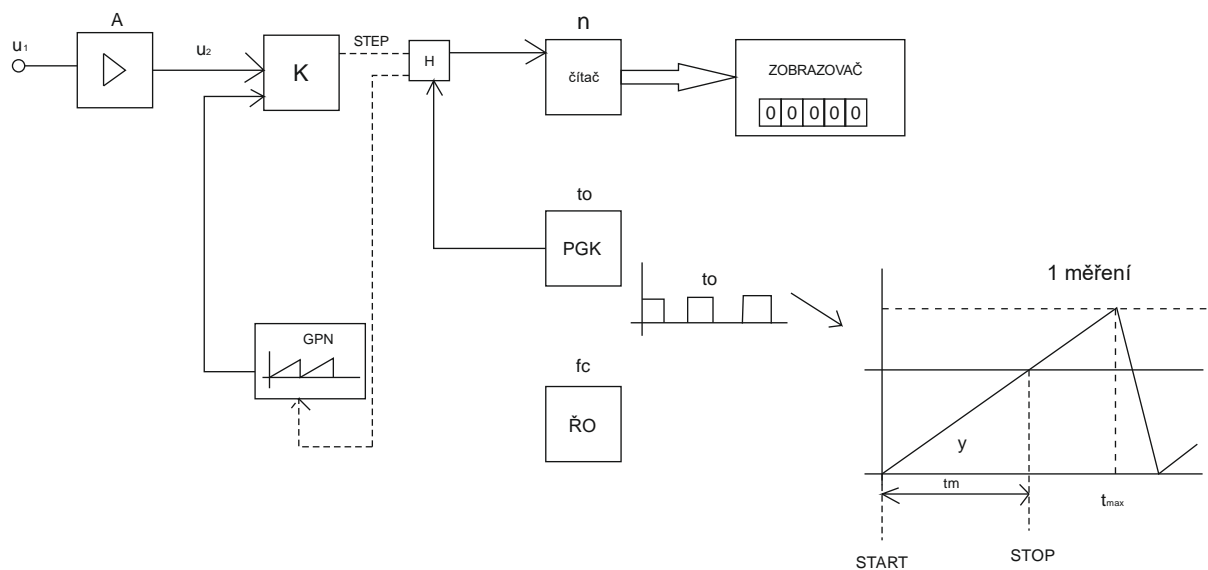


Obr.1 Korekce

## 1.2 Dva základní principy číslicových přístrojů - převod analogové veličiny na číslo

### 1.2.1 Komparační (časový)

V některých případech se také nazývá paralelní A/D převodník. Komparační A/D převodník je nejrychlejším typem převodníku, protože převod probíhá v jednom časovém okamžiku. Kvantování vstupního signálu se vyjadřuje v komparátorech, které porovnávají vstupní napětí s odstupňovaným referenčním napětím. Vzorkování vstupního signálu probíhá zápisem stavu výstupů komparátorů do klopných obvodů (příchodem hodinového impulsu). Dekodér je kombinační obvod, který převádí informaci o výstupech komparátorů na určitý kód.



Obr.2 Přístroj kompenzační časový

$$y = K_G t \quad (8)$$

$$u_2 = A u_1 \quad (9)$$

$$y = u_2(t = t_m) \quad (10)$$

$$K_G t_m = A u_1 \quad (11)$$

$$t_m = \frac{A}{K_G} u_1 \quad (12)$$

$$u = f_o t_m \quad (13)$$

$$u = \frac{A}{K_G} f_o u_1 \quad (14)$$

$$K_U = \frac{A}{K_G} f_o \quad (15)$$

$$u = K_U u_1 \quad (16)$$

A - zesilovač se zesílením A

K - komparátor - porovnávač 2 napětí

H - hradlo (START - propouští  $f_o$ , STOP - nepropouští  $f_o$ )

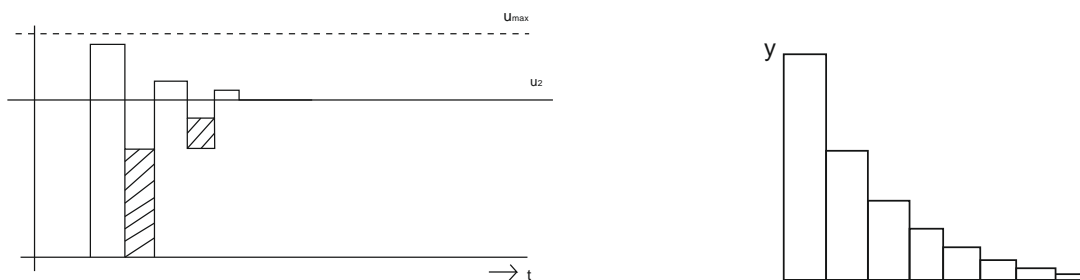
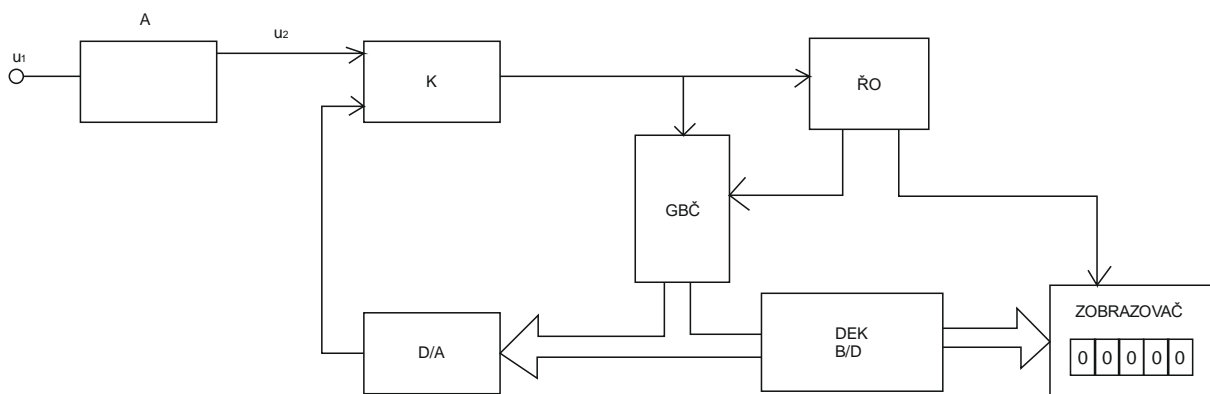
PKG - přesný generátor kmitočtu  $f_o$

GPN - generátor pilového napětí

ŘO - řídicí obvod (opakuje měření  $f_e \times$  za vteřinu)

### 1.2.2 Kompenzační - vyrovnávací

V podstatě jsou to automatické kompenzátory napětí. Porovnávají vstupní napětí s hodnotou zpětnovazebního napětí, získaného pomocí D/A převodníku z výstupního číslicového slova. Výstup se mění tak dlouho, dokud není rozdíl obou napětí minimální, a poté se A/D převod ukončí. Podle toho, jakým způsobem se řídí změna výstupního slova, rozdělujeme kompenzační převodníky na sledovací, čítačí a s postupnou aproximací. Kompenzační převodníky patří mezi nejpoužívanější, protože jsou relativně rychlé a konstrukčně jednoduché.

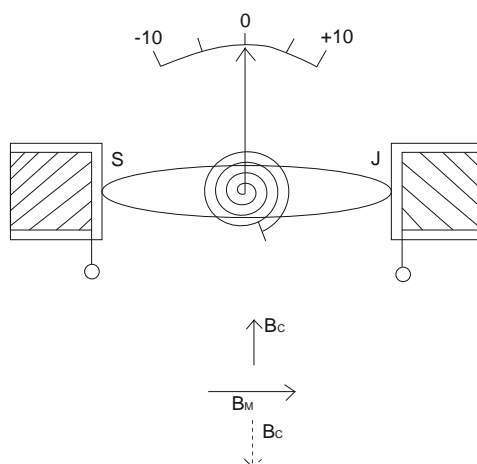


Obr.3 Příklad kompenzačního vyrovnávacího

## 1.3 Principy ručkových přístrojů

### 1) s otočným magnetem

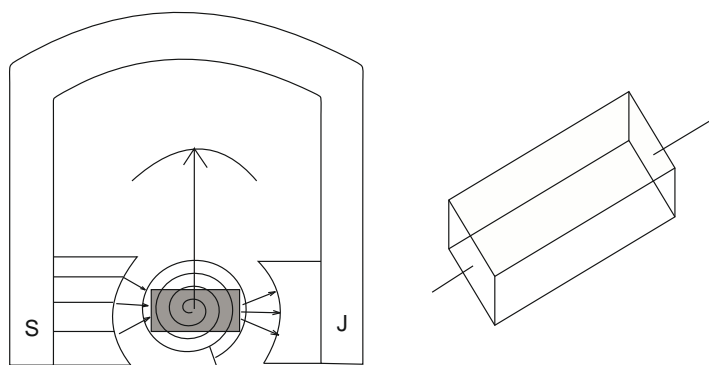
Měřicí přístroje s otočným magnetem patří mezi nejstarší typy (obr.4). V dutině cívky se nachází malý trvalý otočný magnet. Přivedeme-li do cívky proud, cívka vytvoří magnetické pole, které následně vychýlí trvalý magnet a ručka (upevněna na magnetu) ukáže na stupnici výchylku. Užívá se vzduchové tlumení. Jelikož se v soustavě nachází trvalý magnet, může být přístroj rušen okolními magnetickými poli. Soustava je také náchylná na teplotní vlivy. Tyto měřicí přístroje se používají pouze k měření stejnosměrného proudu a stejnosměrného napětí. Jelikož jsou přístroje náchylné na působení zemského magnetického pole, jsou používány velice zřídka, a to pro měření proudu a u galvanometrů (mají velkou citlivost) [1, 2, 5, 6].



Obr.4 Měřicí ústrojí s otočným magnetem

### 2) magnetoelektrické (Deprézské)

Magnetoelektrické měřicí přístroje pracují na principu permanentního magnetu. Na magnet jsou připevněny dva pólové nástavce. V dutině mezi pólovými nástavci je vložen železný váleček. Ve vzniklé vzduchové mezeře mezi pólovými nástavci a válečkem se nachází otočná cívka se závity z tenkého měděného drátu (obr.5).



Obr.5 Magnetoelektrické měřicí ústrojí

Princip činnosti těchto měřících přístrojů je založen na využití sil působících v magnetickém poli na vodiče cívky, kterými protéká stejnosměrný proud. Cívka se nachází ve vzduchové

mezeře mezi válcovým jádrem a pólovými nástavci. V mezeře vzniká radiální magnetické pole (pole kolmé k závitům cívky) vytvořené permanentním magnetem. Pokud se vodič, kterým protéká elektrický proud, nachází v magnetickém poli, pak na něj působí síla

$$F_1 = BIl \quad (17)$$

B - magnetická indukce pole

I - proud tekoucí vodičem

l - aktivní délka vodiče (délka vodiče, kterou se nachází v magnetickém poli)

Na jednu stranu cívky s N závitů působí celková síla

$$F = NF_1 = NBIl \quad (18)$$

Na druhou stranu cívky působí stejně velká síla, pouze zde působí v opačném směru. Cívka se nachází na hřídelce, která prochází její osou. Na cívku zde působí dvojice sil vytvářející otočný moment

$$M = 2Fr = 2NBllr \quad (19)$$

kde r je poloměr cívky.

Díky momentu sil dojde k natočení cívky. Natočení cívky způsobí natočení ručky a výchylku na stupnici (protože ručka měřícího přístroje je pevně spojená s hřídelkou). Je-li magnetická indukce ve vzduchové mezeře konstantní, můžeme moment vyjádřit

$$M = k_p I \quad (20)$$

$$\text{kde } k_p = 2Blr \quad (21)$$

Z toho můžeme odvodit, že výchylka přístroje je přímo úměrná velikosti proudu protékajícího cívku. To znamená, že stupnice bude rovnoměrná. To platí pro voltmetry i ampérmetry. Magnetoelektrické přístroje lze použít pouze na měření stejnosměrných veličin, protože přivedeme-li proud s opačnou polaritou, bude na cívku působit moment opačným směrem a přístroj bude mít zápornou výchylku.

Magnetoelektrické přístroje se používají pro měření stejnosměrného napětí a stejnosměrného proudu v rozsahu  $\mu\text{A}$ -kA,  $\mu\text{V}$ -kV. Tyto přístroje jsou velice přesné (třída přesnosti až 0,1) a mají malou vlastní spotřebu. Velké změny okolní teploty mohou způsobit zkreslení naměřených výsledků. Dále může zkreslení být vyvoláno více měřícími přístroji vedle sebe, proto se doporučuje mít přístroje od sebe vzdálené minimálně 30 cm. Tyto přístroje dobře snášejí krátkodobá přetížení a také patří mezi nejpoužívanější měřící soustavy [1, 2, 6, 7].

### 3) Deprézské poměrové měřící přístroje

Měřící přístroje používáme k měření poměru dvou veličin (obr.6). Od ostatních měřících přístrojů se odlišují tím, že neobsahují žádné pružiny vyvozující direktivní moment. Dvě měřené veličiny vyvodí rovnováhu dvou pohybových momentů a tím ustálí výchylku.

Když si jsou oba pohybové momenty rovny, otočné ústrojí se zastaví. Platí tedy

$$M_{p1} + M_{p2} = 0 \quad (22)$$

Pohybové momenty jsou funkcí výchylky  $\alpha$  a funkcí měřených veličin (vzduchová mezera není konstantní). Pro pohybové momenty platí

$$M_{p1} = f_1(\alpha) \cdot F_1(X) \quad (23)$$

$$M_{p2} = f_2(\alpha) \cdot F_2(Y) \quad (24)$$

Po dosazení dostaneme vztah pro ustálenou výchylku

$$f_1(\alpha_{ust})F_1(X) + f_2(\alpha_{ust})F_2(Y) = 0 \Rightarrow -\frac{f_2(\alpha_{ust})}{f_1(\alpha_{ust})} = \frac{F_1(X)}{F_2(Y)} \quad (25)$$

$$\alpha_{ust} = f\left[\frac{F_1(X)}{F_2(Y)}\right] \quad (26)$$

Závislosti pohybových momentů na měřených veličinách jsou buď kvadratické nebo lineární.

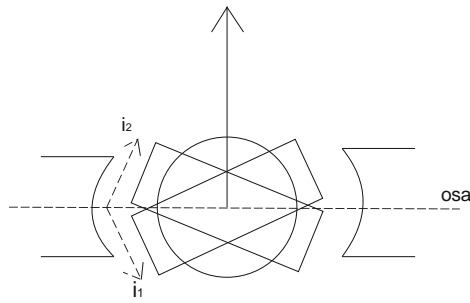
$$\left[\frac{F_1(X)}{F_2(Y)}\right] = F\left(\frac{X}{Y}\right) \quad (27)$$

Proto je ustálená výchylka funkcí podílu veličin X a Y

$$\alpha_{ust} = f\left(\frac{X}{Y}\right) \quad (28)$$

Nejběžnějším ústrojím pro poměrové měřicí přístroje je magnetoelektrické ústrojí. Má dvě zkřížené otočné cívky pootočené o daný úhel. Vzduchová mezera je nerovnoměrná, aby se dosáhlo potřebné závislosti výchylky na pohybovém momentu. Proud se k cívkám přivádí pomocí jemných bronzových pásků nevyvíjejících direktivní moment. Umístění cívek je takové, aby pohybové momenty působily proti sobě (proud protéká opačným směrem). Připojíme-li měřicí přístroj do obvodu, začne cívkami protékat proud a ústrojí se natočí na stranu většího pohybového momentu. Cívka vytvářející větší pohybový moment se natočí do části se slabším magnetickým polem a díky tomu se její točivý moment zmenšuje. Naopak cívka, která vytváří menší pohybový moment, se natočí do části se silnějším magnetickým polem a díky tomu se její točivý moment zvětšuje. Ručka měřicího přístroje se ustálí v poloze, kdy jsou oba momenty vyrovnány [1, 2, 5].

Nejčastěji se magnetoelektrické poměrové měřicí přístroje používají jako ohmmetry. Výhodou magnetoelektrických poměrových ohmmetrů je nezávislost údaje na změnách napájecího napětí. Napájecí napětí nemůže být příliš malé, pak by byly pohybové momenty ovlivňovány rušivými momenty. Napájecí napětí nemůže být ani příliš vysoké, aby nedošlo k přetížení obou cívek. Poměrové měřicí přístroje mají třídu přesnosti do 0,5. Magnetoelektrické ohmmetry se vyrábějí pro rozsahy  $m\Omega$ - $M\Omega$ . Ostatní poměrové soustavy (ferodynamické, feromagnetické a elektrodynamické) se vyrábějí jako fázoměry a kmitoměry.



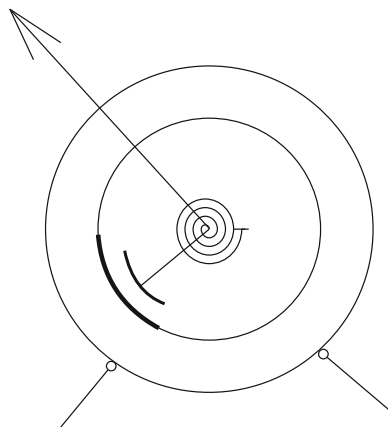
**Obr.6 Deprézské poměrové měřicí ústrojí**

#### 4) feromagnetické (elektromagnetické)

Feromagnetické měřicí přístroje pracují díky silovému působení dvou feromagnetických plechů umístěných v magnetickém poli cívky. Přístroje se skládají z pevné válcové cívky, která má na vnitřní straně připevněný plíšek. Dále je zde otočná hřídelka s pohyblivým plíškem, která má hrotové uložení. Připojíme-li k cívce proud, oba plíšky se působením magnetického pole zmagnetizují souhlasně. Pohyblivý plíšek se začne odpuzovat a tím natáčí ručičku měřicího přístroje (obr.7).

Stupnice elektromagnetických přístrojů je nerovnoměrná. Počátek stupnice má zhuštěné dílky, a proto nelze odečíst malé výchylky (do 1/10-1/5 rozsahu). Zbytek stupnice je téměř rovnoměrný. Úpravou tvaru pólů lze upravit průběh stupnice, například zahuštění maximálních hodnot pro povolené překročení rozsahu.

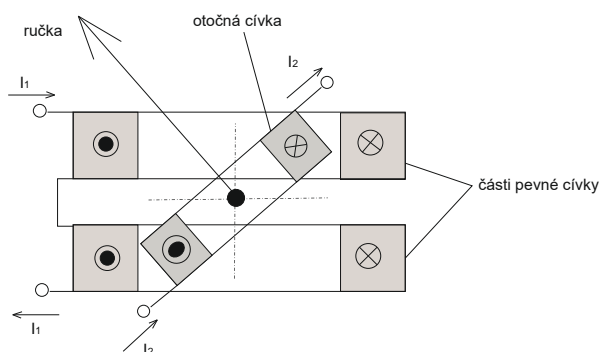
Feromagnetické měřicí přístroje měří pouze efektivní hodnotu napětí a proudu. Přístroje mají menší přesnost při měření stejnosměrných veličin (pro ty je vhodnější použít magnetoelektrické přístroje), proto je používáme spíše pro měření střídavých veličin. Vyrábějí se pro měření napětí a proudů v rozsahu 0-600 V; 0,1-100 A. Feromagnetické měřicí přístroje mají větší spotřebu a menší přesnost než magnetoelektrické měřicí přístroje (třída přesnosti 0,5-1), lze však vyrobit laboratorní přístroje s třídou přesnosti 0,1-0,2. Patří mezi nejpoužívanější přístroje pro měření střídavých veličin díky jednoduchosti, relativně levné výrobě, odolnosti a velké přetížitelnosti. Používají se pro frekvence do stovek Hz. Změna rozsahu voltmetru se mění předřadníky a změna rozsahu ampérmetru se provádí změnou počtu závitů měřicí cívky [1, 2, 4].



**Obr.7 Elektromagnetické měřicí ústrojí**

## 5) elektrodynamické

Elektrodynamické měřicí přístroje (obr.8) pracují na podobném principu jako magneto-elektrické měřicí přístroje. Také zde je otočná cívka s pružinami k vyvození direktivního momentu a přívodu elektrického proudu do cívky. Působícími silami v magnetickém poli na vodiče cívky vzniká pohybový moment. Jediný rozdíl mezi elektrodynamickými a magnetoelektrickými měřicími přístroji je v tom, že otočná cívka se nachází v magnetickém poli vybuzeném pevnou cívkou namísto pole permanentního magnetu. Pevná cívka je rozdělená na poloviny.



Obr.8 Elektrodynamické měřicí ústrojí

Tak, jako je tomu u magnetoelektrických přístrojů, i zde je pohybový moment úměrný proudu procházejícímu otočnou cívkou

$$M_p = k' I_2 \quad (29)$$

Činitel  $k'$  není u elektrodynamických přístrojů konstantní (u magnetoelektrických konstantní je), protože velikost magnetické indukce se zvětšuje (zmenšuje) v závislosti na velikosti proudu protékajícího pevnou cívkou. Pohybový moment bychom mohli vyjádřit jako úměrnost

$$M_p \approx I_1 I_2 \quad (30)$$

kde  $I_1$  je proud pevnou cívkou a  $I_2$  je proud otočnou cívkou.

Elektrodynamickými ampérmetry můžeme měřit jak střídavé, tak i stejnosměrné proudy. Při měření střídavých proudů ukazují přístroje jejich efektivní hodnotu, při měření stejnosměrného proudu nerozlišují polaritu. Elektrodynamické voltmetry mají předřadný odpor zapojen do série s pevnou i otočnou cívkou.

Elektrodynamické ampérmetry a voltmetry se dříve vyráběly jako velice přesné laboratorní zdroje pro ověřování přístrojů s nižší třídou přesnosti nebo pro velice přesná laboratorní měření (třída přesnosti u těchto přístrojů je 0,1 až 0,2). Jejich výroba je však velice náročná a drahá, proto se v současné době prakticky nevyrábějí a nahrazují se feromagnetickými přístroji. Pro představu, cena přístroje se před několika lety pohybovala okolo 20 000 Kč.

Nejčastěji se elektrodynamické přístroje používají k měření výkonu (wattmetr). Otočná cívka se připojí paralelně ke spotřebiči a pevná cívka se zapojí do proudového okruhu. Díky tomu



pevnou cívkou protéká proud  $i_1$  a otočnou cívkou protéká proud  $i_2$ , jehož velikost je dána podílem napětí na zátěži, součtem odporu předradníku a otočné cívky.

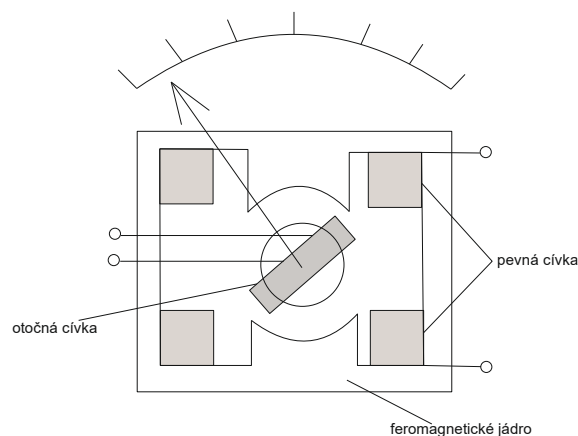
$$\text{Pro pohybový moment platí } M_p \approx i_1 i_2 = i_1 \frac{u}{R_{WN} + R_P} \approx k_W i_1 u \quad (31)$$

Z uvedeného vztahu vyplývá, že výchylka přístroje je úměrná střední hodnotě výkonu elektrického proudu [1, 2, 3, 4].

## 6) ferodynamické

Ferodynamické měřicí přístroje fungují na stejném principu jako elektrodynamické měřicí přístroje, jediný rozdíl je v tom, že je zde magnetický obvod, v jehož vzduchové mezeře se pohybuje otočná cívka (obr.9). Pevná cívka vybudí magnetický tok, který z větší části probíhá ve feromagnetiku a díky tomu se ve vzduchové mezeře dosáhne větší magnetické indukce než u elektrodynamických zařízení. V důsledku toho mají ferodynamické přístroje větší pohybový moment. Feromagnetické jádro způsobí snížení vnějších vlivů na elektromagnetické pole, a proto je můžeme i bez stínění použít pro rozvaděče.

Ferodynamické přístroje se používají k měření výkonu střídavých proudů pro frekvence 50 až 60 Hz, pro měření výkonů stejnosměrných proudů se nepoužívají z důvodu remanence (zbytková magnetizace, která zůstane ve feromagnetickém materiálu, když na něj přestane působit magnetické pole) magnetického obvodu. Vyrábějí se s třídou přesnosti 0,5-1. Díky velkému pohybovému momentu se mohou zabudovávat do registračních přístrojů k záznamu velikosti výkonu na zátěži [1, 2, 6, 7].



**Obr.9 Ferodynamické měřicí ústrojí**

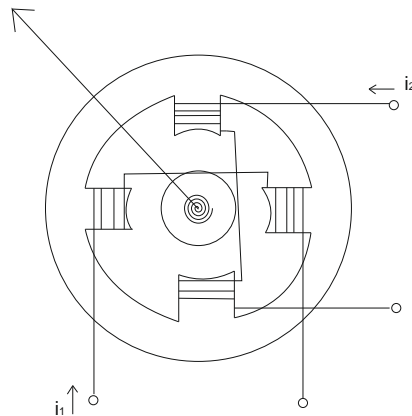
## 7) indukční

Indukční měřicí přístroje jsou založené na tom, že se do otočné části (obvykle z hliníku) indukují proudy pomocí střídavého magnetického toku několika elektromagnetů. Pohybový moment zde vzniká pomocí indukovaných proudů a magnetického pole. Do otočné části nevedou žádné kabely, proud se do něj dostává pouze magnetickou indukcí pevných cívek. Z toho můžeme odvodit, že do přístrojů můžeme přivádět pouze střídavý proud, proto tyto

měřicí přístroje není možné použít v obvodech se stejnosměrnými proudy. Princip indukčního měřicího přístroje máme naznačen na obrázku 10.

Hliníkový kotouč je umístěn ve vzduchových mezerách elektromagnetu  $E_1$  a  $E_2$ . Pro vznik pohybového momentu použijeme vztah pro výpočet velikosti síly působící v magnetickém poli na vodič, ve kterém protéká proud

$$F = BIl \quad (32)$$



**Obr.10 Indukční měřicí ústrojí**

V kotouči se indukuje napětí díky střídavému magnetickému toku  $\Phi_1$  elektromagnetu  $E_1$ . Indukované napětí protlačí kotoučem proudy  $i_{v1}$ , které proudí po drahách rozložených po celé ploše kotouče. Část proudu  $i_{v1}$  protéká pod pólem druhého elektromagnetu, konkrétně v místě, kde kotoučem prochází magnetický tok  $\Phi_2$  elektromagnetu  $E_2$ . Vzniká zde síla  $F_1$  a moment  $m_{p2}$  díky vzájemnému působení proudu  $i_{v1}$  a magnetického toku  $\Phi_2$ . Totéž platí i opačně, magnetický tok  $\Phi_2$  indukuje proud  $i_{v2}$ , který s magnetickým tokem  $\Phi_1$  vytváří sílu  $F_2$  a moment  $m_{p1}$ . Velikosti pohybových momentů  $m_{p1}$  a  $m_{p2}$  jsou úměrné velikosti magnetických toků  $\Phi_1$  a  $\Phi_2$ . Pro výsledný pohybový moment platí (jednotlivé pohybové momenty působí proti sobě)

$$m_p = m_{p1} + m_{p2} \quad (33)$$

Po složitých matematických úpravách bychom zjistili, že v případě souměrnosti obou elektromagnetů platí pro výsledný pohybový moment

$$M_p = k' \omega \Phi_{1m} \Phi_{2m} \sin \Psi \quad (34)$$

$k'$  - konstanta vyjadřující vliv odporu kotouče a konstrukčního uspořádání ústrojí. Velikost této konstanty (i pohybového momentu  $M_p$ ) je přímo úměrná vodivosti kotouče.

$\omega$  - úhlová frekvence obou toků, vypočítáme:  $\omega = 2\pi f$  (35)

$\Phi_{1m}$  - amplituda magnetického toku prvního elektromagnetu

$\Phi_{2m}$  - amplituda magnetického toku druhého elektromagnetu

$\Psi$  - fázový posuv mezi magnetickými toky  $\Phi_{1m}$ ,  $\Phi_{2m}$

Při fázovém posuvu magnetických toků o  $90^\circ$  ( $\Psi = 90^\circ$ ) vzniká největší pohybový moment. Kotouč se nepohybuje (stojí) pokud nevzniká pohybový moment. Tato situace nastane, pokud budou oba magnetické toky ve fázi ( $\Psi = 0^\circ$ ) například při napájení obou cívek z jedné fáze. Budou-li mít oba magnetické toky sinusový průběh, můžeme rovnici pro pohybový moment zjednodušit

$$M_p = k\omega I_{1\max} I_{2\max} \sin\Psi \quad (36)$$

$I_{1\max}$  - amplituda proudu první cívky

$I_{2\max}$  - amplituda proudu druhé cívky

Vyrobíme-li například cívku druhého elektromagnetu jako napět'ovou ( $E_2$ ) - hodně závitů tenkého drátu, bude pro proud  $I_2$  platit (odpor cívky bude zanedbatelný oproti její induktivní reaktanci), že bude za napětím fázově opožděn o  $90^\circ$ . Proud proudové cívky  $E_1$  procházející je k napětí  $U$  zpožděn o úhel  $\varphi$  a k proudu  $I_2$  o úhel

$$\Psi = \varphi - \frac{\pi}{2} \quad (37)$$

Dále máme vzorec pro  $I_2$

$$I_2 = \frac{U}{\omega L} \quad (38)$$

Pokud do rovnice pro pohybový moment dosadíme tyto dva vzorce (pro  $I_2$  a  $\Psi$ ), dostaneme konečnou rovnici pro výpočet pohybového momentu indukčního měřicího přístroje

$$M_p = \frac{k\omega}{\omega L} \frac{UI}{\sqrt{2}\sqrt{2}} \sin\left(\frac{\pi}{2} - \Psi\right) = k_p UI \cos\varphi \quad (39)$$

Z rovnice (39) vyplývá, že pohybový moment je přímo úměrný činnému výkonu střídavého proudu. V současné době se indukční přístroje používají převážně jako měřiče elektrické práce (lze s nimi však měřit i činný a jalový výkon) - měří časový integrál výkonu střídavého proudu. Výhody indukčních měřicích přístrojů při měření elektrické práce jsou v tom, že pohybový moment je nezávislý na poloze kotouče a kotouč se může otáčet bez omezení. Toto u jiných měřicích přístrojů nenalezneme, protože pohyb ručky omezuje maximální úhlová výchylka.

Indukční měřicí přístroje jsou převážně určené pro síťový kmitočet 50 Hz. Vlastní spotřeba ústrojí je velká, pohybuje se okolo 15-20 VA. Proudové obvody přístrojů snesou velkou přetížitelnost, dlouhodobě 100 %, krátkodobě až desetinásobek jmenovitého proudu. Toho je dosaženo tím, že se do otočné části dostává proud pomocí indukce [1, 2, 3].

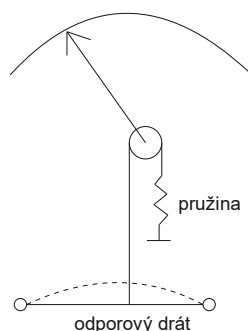
## 8) tepelné

Nejdůležitější částí tepelných měřicích přístrojů jsou spirály z proužků bimetalu.

Bimetal se skládá ze dvou na sebe naválcovaných vrstev (kovů), které mají odlišný součinitel tepelné roztažnosti. Zahřejeme-li bimetalový proužek, ohne se na stranu, kde se nachází vrstva s menším součinitelem tepelné roztažnosti.

Ústrojí tepelných měřicích přístrojů se skládá ze dvou stejných, ale protisměrně navinutých bimetalových spirál. Vnější konce spirál jsou pevně ukotveny. Připojíme-li měřicí přístroj k obvodu, začne první spirálou  $S_1$  protékat proud, spirála se začne zahřívat a poté rozvinovat (nebo svinovat) a natáčet ručku. Druhá spirála  $S_2$  se při zahřátí pohybuje opačným směrem než spirála  $S_1$  a vyrovnává tím vliv změny teploty okolí na výchylku měřicího přístroje. Třetí pružinou  $S_3$  přivádíme proud na vnitřní konec spirály  $S_1$ .

Tepelné měřicí přístroje jsou určeny převážně k měření proudů. Díky velké tepelné setrvačnosti (ustálení výchylky trvá až 10 minut) jsou vhodné pro zaznamenávání průměrné efektivní hodnoty proudu - registrují pouze dlouhotrvající zatížení. Nalezneme je také jako registrační přístroje. Tepelné měřicí přístroje se v praxi používají velice sporadicky [1, 2].



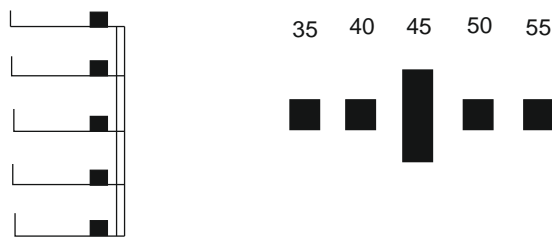
**Obr.11 Tepelné měřicí ústrojí**

## 9) rezonanční

Rezonanční přístroje měří díky rezonanci jedné své části na frekvenci měřené střídavé veličiny. Jazyčkové přístroje měří na stejném principu jako feromagnetické měřicí systémy. Obsahuje řadu ocelových jazyčků, naladěných na kmitočty vlastních mechanických kmitů (obr.12). Střídavý proud (jehož frekvenci chceme změřit) přivádíme do elektromagnetu s cívku umístěnou v blízkosti jazyčků. Přivedeme-li do cívky střídavý proud, začne na jazyčky působit síla se střídavou složkou a dvojnásobným kmitočtem, než je kmitočet měřeného proudu (elektromagnet přitahuje jazyčky při záporné i kladné amplitudě).

Rezonanční měřicí přístroje polarizujeme přidáním permanentního magnetu ke kmitoměru. Polarizace nám u měřicího ústrojí způsobí, že se rozkmitá pouze jazyček, který je naladěný na stejnou frekvenci, jakou má měřený proud (nikoliv na dvojnásobnou frekvenci, jak je tomu u nepolarizovaného ústrojí).

Rezonanční měřicí přístroje se používají pouze pro měření frekvence. Přístroje bývají osazené jednou nebo několika řadami jazyčků, které mají vlastní frekvenci odstupňovanou po 0,5-1 Hz. Běžně se přístroje používají pro měření frekvencí do 120 Hz, mez použití bývá 1 000 Hz. Měřidla mívají třídu přesnosti 0,5. Při měření je třeba dodržovat jmenovité napětí a zapojovat měřiče do obvodu paralelně. Často se přístroje vyrábějí také pro použití v rozvaděčích ve velínech a rozvodnách [1, 2, 6].

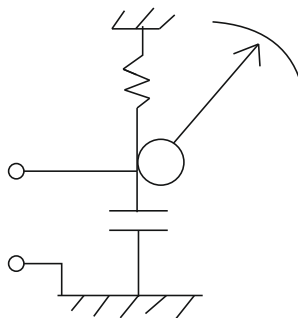


**Obr.12 Rezonanční měřicí ústrojí**

## 10) elektrostatické

Elektrostatické měřicí přístroje pracují na principu silových účinků elektrostatického pole. Měřicí soustava se skládá z pohyblivých a pevných elektrod. Po přivedení napětí do přístroje, začnou na sebe elektrody působit přitažlivou silou. Pohyblivé elektrody se začnou natáčet tak, aby co největší plocha zajela mezi plochy pevných elektrod. Výchylka přístroje se ustálí v momentě, kdy dojde k vyrovnání direktivního a pohybového momentu. Do přístroje zařazujeme paralelně co nejvíc pohyblivých a pevných elektrod, abychom zvýšili pohybový moment ústrojí (obr.13).

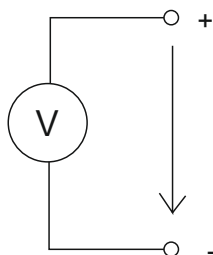
Elektrostatické měřicí přístroje se vyrábějí pouze pro měření stejnosměrného a střídavého napětí do 600 kV s třídou přesnosti 1. U těchto přístrojů dochází k rušení způsobeným elektrostatickým polem (nábojem), které se odstraňuje odstíněním. S přístroji se musí zacházet velice opatrně, protože jsou velmi jemné a choulostivé [1, 2, 4, 5].



**Obr.13 Elektrostatické měřicí ústrojí**

## 1.4 Přístroje používané v elektrotechnice

### 1.4.1 Voltmetr



**Obr.14 Voltmetr**

A) Druh

Stejnoseměrný, střídavý, univerzální, přepínatelný

B) citlivost (rozsah)

Jednotky:  $\mu\text{V}$ ,  $\text{mV}$ ,  $\text{V}$ ,  $\text{kV}$ ,  $\text{MV}$

C) konstrukce

Klasický ručkový (měřicí ústrojí + předřadný odpor)

Elektronický ručkový (stejnoseměrný nebo střídavý zesilovač + měřicí ústrojí)

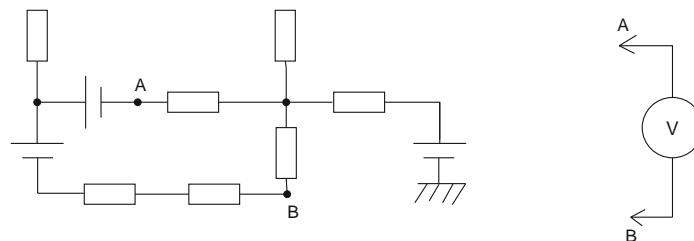
Elektronický číslicový (zesilovač + převodník A/D + číslicový indikátor)

D) Ústrojí ručkových voltmetrů

Magnetoelektrické, feromagnetické, elektrodynamické

E) Zapojení do obvodu

Mezi body paralelně



**Obr.15 Zapojení voltmetru do obvodu**

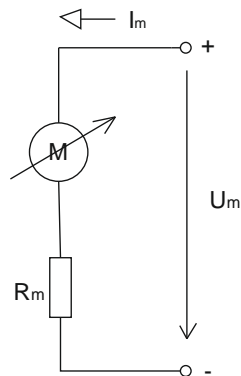
F) Rozsah voltmetru

a) dán krajními polohami ukazatele na stupnici

b) úhlový rozsah ručky obvykle  $90^\circ$  vlevo obvykle  $0^\circ$  vpravo nejvyšší hodnota rozsahu

c) vícerozsahové - přepínání přívodů nebo přepínač

G) Hodnoty - parametry vlastního měřicího ústrojí



**Obr.16 Parametry vlastního měřicího ústrojí**

$$R_m = \frac{U_m}{I_m} \quad (40)$$

$I_m$  - proud odebíraný měřidlem (desítky  $\mu\text{A}$  až několik  $\text{mA}$ )

$U_m$  - rozsah vlastního ústrojí (vadí proti ideálnímu stavu)

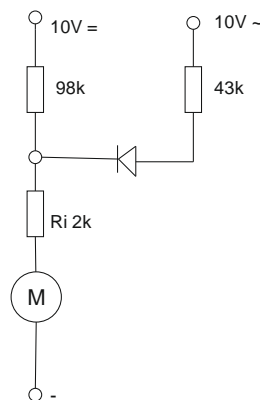
$R_m$  - vnitřní odpor měřidla

H) Přesnost voltmetru

Třída přesnosti 0,1; 0,2; 0,5; 1; 1,5; 2,5 % z plné výchylky, z toho vyplývá, že měříme v poslední třetině stupnice [1, 3, 7].

#### Návrh střídavého rozsahu voltmetru

- 1) Deprézské měřidlo  $R_i = 2 \text{ k}\Omega$ ,  $I_m = 100 \mu\text{A}$ ,  $U_m = 0,2 \text{ V}$
- 2) Zadání rozsahu  $U = 10 \text{ V}$  + rozšíření na  $10 \text{ V}$  střídavých
- 3) Návrh rozsahu  $10 \text{ V}$  stejnosměrných
- 4) Návrh rozsahu  $10 \text{ V}$  střídavých s jednocestným usměrňovačem

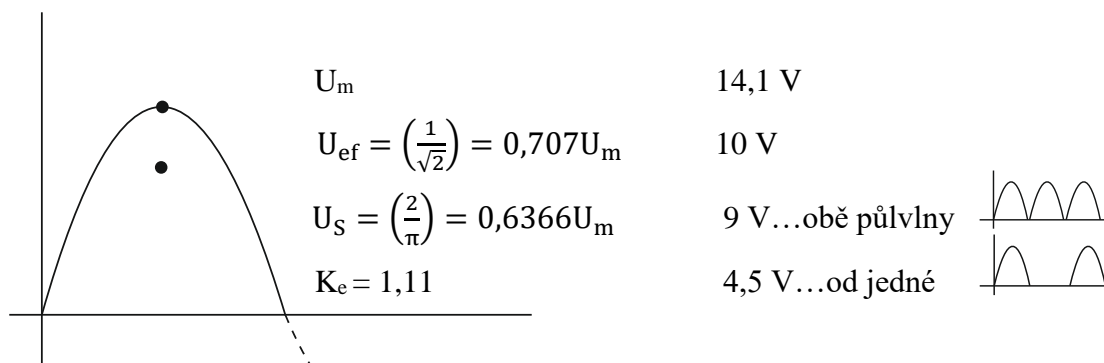


**Obr.17 Návrh střídavého rozsahu voltmetru**

$$n = \frac{U}{U_m} = \frac{10}{0,2} = 50 \quad (41)$$

$$R_p = R_i(n - 1) = 2 \times 10^3(50 - 1) = 98 \text{ k}\Omega \quad (42)$$

Deprézské měřidlo měří střední hodnotu napětí



**Obr.18 St\u0159edn\u00ed hodnota nap\u011bt\u00ed**

odpor se tedy vyd\u011bl\u00ed hodnotou  $2 \times K_e$

$$\left[ I_m = \frac{U_{ss}}{R_{ss}} = \frac{U_{\sim}}{R_{\sim}} \right] \quad (43)$$

Pro jednocestn\u00e9 usm\u011brn\u011bn\u00ed, chceme-li pou\u017eit stejnou stupnici

$$R_{\sim} = R_{ss} \frac{U_{\sim}}{U_{ss}} = 100 \times 10^3 \frac{4,5}{10} = 45 \text{ k}\Omega = 2 \text{ k}\Omega + 43 \text{ k}\Omega \quad (44)$$

- u dvoucestn\u00e9ho usm\u011brn\u011bn\u00ed se celkov\u00fd odpor d\u011bl\u00ed  $1 \times K_e$

#### 1.4.2 Amp\u00e9rmetr

A) Druh

Stejn\u00f3sm\u011brn\u00fd, st\u0159\u00eddavn\u00fd, univerz\u00e1ln\u00ed, p\u0159ep\u00ednateln\u00fd

B) Citlivost (rozsah)

$\mu\text{A}$ ,  $\text{mA}$ ,  $\text{A}$ ,  $\text{kA}$  ( $\text{nA}$ ,  $\text{pA}$ )

C) konstrukce

Klasick\u00fd ru\u00e7kov\u00fd (m\u011b\u0159\u00edc\u00ed \u00fasstroj\u00ed + p\u0159edradn\u00fd odpor)

Elektronick\u00fd ru\u00e7kov\u00fd (stejn\u00f3sm\u011brn\u00fd nebo st\u0159\u00eddavn\u00fd zesilova\u00e7 + m\u011b\u0159\u00edc\u00ed \u00fasstroj\u00ed)

Elektronick\u00fd \u00e7\u00edslicov\u00fd (zesilova\u00e7 + p\u0159evodn\u00edk A/D + \u00e7\u00edslicov\u00fd indik\u00e1tor)

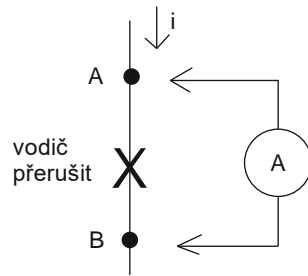
D) \u00fasstroj\u00ed ru\u00e7kov\u00fdch amp\u00e9rmetr\u016f

Magnetoelektrick\u00e9, feromagnetick\u00e9, elektrodynamick\u00e9

E) Zapojen\u00ed do obvodu

S\u00e9riov\u00e9 v\u0159azen\u00ed



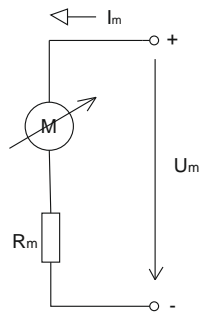


**Obr.19 Zapojení ampérmetru do obvodu**

F) Rozsah ampérmetru

- a) krajními polohami ukazatele na stupnici
- b) úhlový rozsah ručky obvykle 90° vlevo obvykle 0° vpravo nejvyšší hodnota rozsahu
- c) vícerozsahové - přepínání přívodů nebo přepínač

G) Parametry vlastního měřícího ústrojí



**Obr.20 Parametry vlastního měřícího ústrojí**

$$R_m = \frac{U_m}{I_m}$$

(45)

$U_m$  - úbytek napětí na měřidle (desítky až stovky mV)

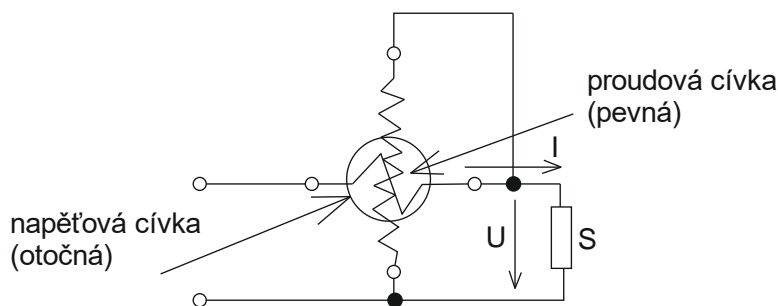
$I_m$  - vlastní proudový rozsah měřidla

$R_m$  - vnitřní odpor měřidla

### 1.4.3 Wattmetr

Obvykle elektrodynamický systém

1) zapojení



Obr.21 Wattmetr

Proudová cívka - málo závitů silného vodiče, měří činný výkon

$P = UI \cos \varphi$  - výchylka úměrná příkonu

Napěťová cívka - hodně závitů slabého vodiče

2) spotřeba systému - napěťová cívka (33  $\Omega/V$ )

- proudová cívka (několik VA, proud 5 až 15 A)

3) rozsahy - napětí obvykle 60, 150, 300, 600 V

- proud obvykle 0,5 až 100 A

4) přesnost - několik jednotek % až 0,1 % podle provedení

5) změna rozsahu - přepínáním jako u voltmetru a ampérmetru [1, 4, 5]

#### 1.4.4 Elektroměr

Integroující měřidlo - měří elektrickou práci v kWh. Umístěn v hlavní domovní skříni nebo odbočné skříni v jednotlivých poschodích. Montáž zajišťuje nemožnost odběru před elektroměrem.

Princip:

Indukční systém s posuvným polem a kotoučovým rotorem. Brždění permanentním magnetem vířivými proudy. Moment systému stejný jako u Ferrarisova.

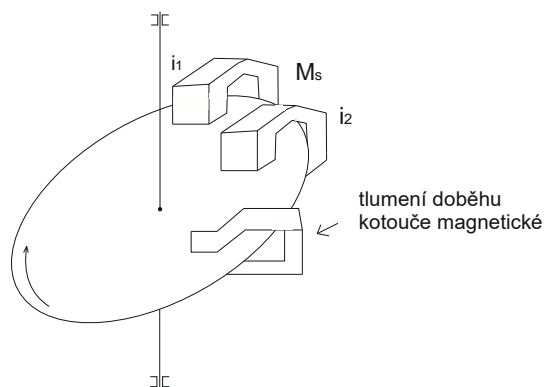
$M_s \sim \omega N_1 N_2 I_1 I_2 \sin \varphi$  - proto musí mít jedna z cívek posun o  $90^\circ$  } pak opět měří  $P = UI \cos \varphi$   
 $M_b \sim \text{konst} \cdot n$  (otáčky)

Z toho vyplývá, že  $N_0 = K_e U I t$

$K_e$  - konstanta elektroměru [ot/1 kWh]

Užití:

Používá se pro frekvence 20-500 Hz a stálé napětí sítě. Úpravami v obvodu magnetů nebo cívek lze dosáhnout měření činného i jalového výkonu.

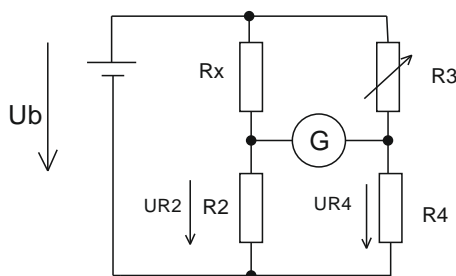


**Obr.22 Elektroměr**

#### 1.4.5 Wheatstonův můstek (odporový můstek)

Měření obvodů o rozsahu  $1-10^6 \Omega$

Princip:



**Obr.23 Wheatstonův můstek**

Je-li můstek vyvážený

$$R_x \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3 \quad (46)$$

$$\frac{R_x}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \quad (47)$$

$$R_x = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_4} \quad (48)$$

pak indikátor (měřidlo - většinou mikroampérmetr) ukazuje nulu.

Nevyvážený můstek  $\Rightarrow R_x \cdot R_4 \neq R_2 \cdot R_3$  a měřidlo ukazuje výchylku vlevo nebo vpravo

Provedení:

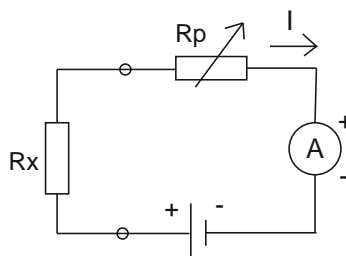
Přenosný, např. OMEGA I, II, vyráběla je Metra Blansko, laboratorně přesný.

indikátor - vestavěný (ruč. měřidlo)  
- vnější (galvanoměr)

Zdroj - baterie  
- střídavý generátor

### 1.5.1 Sériový ohmmetr

Princip:



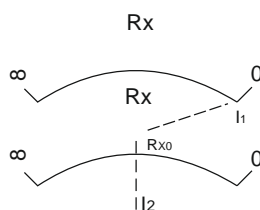
**Obr.24 Sériový ohmmetr**

Před měřením

$$I_1 = \frac{U}{R_p} \Rightarrow \text{nastavíme plnou výchylku}$$

$$I_2 = \frac{U}{R_p + R_x} \Rightarrow \text{stupnice je nelineární, k hodnotám nekonečna zhuštěna}$$

Používá se u většiny přenosových univerzálních V-A- $\Omega$  metrů.



**Obr.25 Stupnice**

$$K_i \cdot \alpha_{\max} = I_1 = \frac{U}{R_p} \quad (49)$$

$$K_i \cdot \alpha = I_2 = \frac{U}{R_p + R_x} \quad (50)$$

obě rovnice podělíme

$$\frac{\alpha_{\max}}{\alpha} = \frac{R_p + R_x}{R_p} \quad (51)$$

$$\frac{\alpha_{\max}}{\alpha} = 1 + \frac{R_x}{R_p} \quad (52)$$

$$\frac{\alpha_{\max}}{\alpha} - 1 = \frac{R_x}{R_p} \quad (53)$$

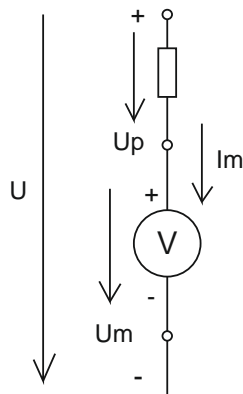
$$R_x = R_p \left( \frac{\alpha_{\max}}{\alpha} - 1 \right) \quad (54)$$

po úpravě

$$\frac{\alpha}{\alpha_{\max}} = \frac{1}{\frac{R_x}{R_p} + 1} \quad \text{- což určuje průběh stupnice} \quad (55)$$

### 1.5.2 Výpočet předřadného odporu (předřadníku) voltmetru

Předřadník užíváme, chceme-li zvětšit měřicí rozsah měřidla. Při měření stejnosměrného napětí nemáme jinou možnost. Předřadný rezistor používáme u všech měřících systémů, pouze u elektrostatické použijeme předřadný kondenzátor [1, 4].



Obr.26 Předřadný odpor

$R_m$  - vnitřní odpor [ $\Omega$ ]

$I_m$  - proud na plnou výchylku [A]

$U_m$  - napětí na plnou výchylku [V]

$$U > U_m$$

$$U = U_m + U_p \quad /: U_m \quad (56)$$

$$\frac{U}{U_m} = 1 + \frac{U_p}{U_m} \quad (57)$$

$$n = \frac{U}{U_m} \quad (58)$$

$$n = 1 + \frac{U_p}{U_m} \quad (59)$$

$$n - 1 = \frac{U_p}{U_m} = \frac{I_m \cdot R_p}{I_m \cdot R_m} \quad (60)$$

$$R_p = R_m(n - 1) \quad (61)$$

$$R_m = \frac{U_m}{I_m} \quad (62)$$

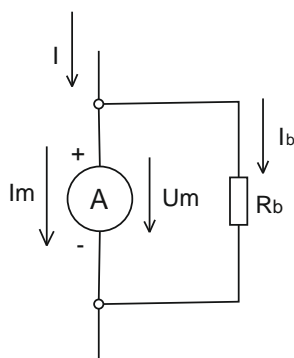
U běžných měřidel  $U_m = 60-250 \text{ mV}$

$I_m = 100 \mu\text{A}-10 \text{ mA}$

$R_m = 60 \Omega-1,5 \text{ k}\Omega$

### 1.5.3 Výpočet bočnicku ampérmetru

Bočník slouží ke zvětšení měřícího rozsahu magnetoelektrických ampérmetrů. Používá se pouze pro měření stejnosměrného proudu [1, 5].



**Obr.27 Bočník**

$$I > I_m$$

$$I = I_m + I_b \quad /: I_m \tag{63}$$

$$\frac{I}{I_m} = 1 + \frac{I_b}{I_m} \tag{64}$$

$$n = \frac{I}{I_m} \tag{65}$$
















$$n - 1 = \frac{I_b}{I_m} = \frac{\frac{U_m}{R_b}}{\frac{U_m}{R_m}} \tag{66}$$

$$R_b = \frac{R_m}{(n - 1)} \tag{67}$$

$$R_m = \frac{U_m}{I_m} \tag{68}$$

#### 1.5.4 Další značky na stupnicích přístrojů

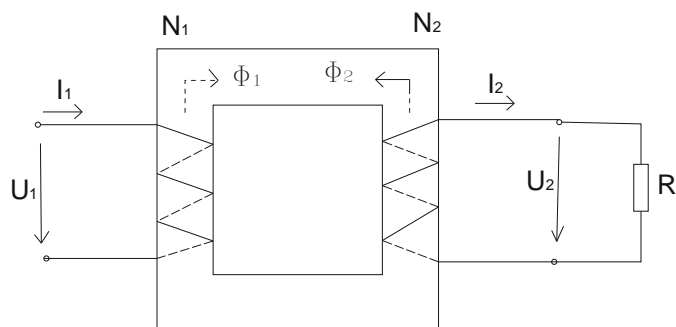
Tab.4 Značky na stupnicích přístrojů

dvojkov - tepelný přístroj	
magnetoelektrický s termočlánkem	
magnetoelektrický s usměrňovačem	
uzemňovací svorka	
magnetické stínění	
elektrostatické stínění	
přístroj svisle	
přístroj vodorovně	
přístroj pod úhlem 60° k vodorovné rovině	
třída přesnosti	1,5
točítka nulové polohy	
stejnsměrné napětí	—
střídavé napětí	~
stejnsměrné i střídavé napětí	— ~
trojfázový	
trojfázový - 1 obvod proud, 1 obvod napětí	
trojfázový se 2 soustavami měřidel	
elektrická pevnost 500 V	
elektrická pevnost 2 kV	

## 2 TRANSFORMÁTORY

### 2.1 Jednofázový transformátor

Princip



Obr.28 Transformátor

$$p = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (69)$$

$$p_1 = p_2 \quad (70)$$

$$U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2 \quad (71)$$

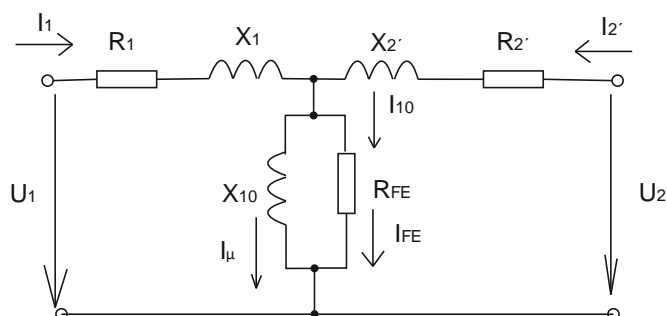
$$R_1 = p^2 \cdot R_2 \quad \text{- impedance se transformuje se čtvercem převodu} \quad (72)$$

$$R_2 = \frac{U_2}{I_2} = \frac{U_1 \cdot I_1}{I_2} = \frac{R_1 \cdot I_1^2}{I_2^2} = \frac{R_1}{p^2} \quad (73)$$

Základní rovnice transformátoru pro výpočty

$$N = \frac{10000U}{4,44BS_{Fe}f} \quad [z; V, T, \text{cm}^2, \text{Hz}] \quad (74)$$

Náhradní schéma:



Obr.29 Náhradní schéma transformátoru

$$U_2' = p \cdot U_2 \quad (75)$$

$$I_2' = I_2 \cdot \frac{1}{p} \quad (76)$$

$$R_2' = p^2 \cdot R_2 \quad (77)$$



$$x_2' = p^2 \cdot x_2 \quad (78)$$

**Konstrukce:**

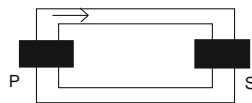
a) Magnetický obvod

2 plechy (Fe + 4 % Si); izolace latexem, papírem nebo fosfátováním

Ztráty 1,1-1,3 W/kgT<sup>-2</sup> - takzvané ztrátové číslo

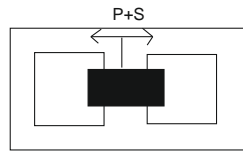
b) tvar obvodu

jádrový: C jádro, UI, VN plechy, toroid



**Obr.30 Jádrový transformátor**

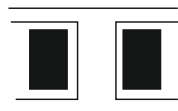
plášťový: EI plechy, M plechy, 2C jádra



**Obr.31 Plášťový transformátor**

c) vinutí

válcové



**Obr.32 Válcové vinutí**

kotoučové - pro rozdělení napětí



**Obr.33 Kotoučové vinutí**

d) chlazení - vzduchové přirozené

- vzduchové umělé

- olejové + chladič

e) Použití:

- staniční trafo - vesnice, města - na rozvodu elektrické energie

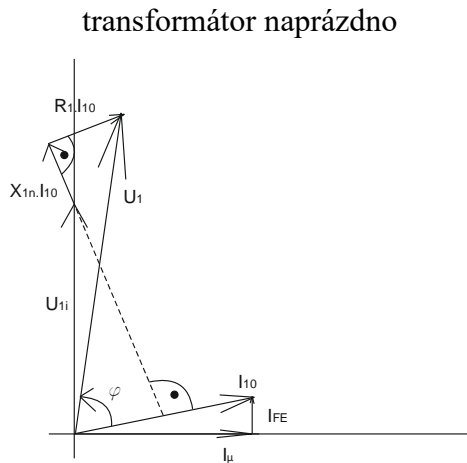
- síťový transformátor - svorky, spotřební elektronika po zdroje - snižuje 230V na potřebnou velikost

- regulační transformátor - plynulá regulace střídavého napětí

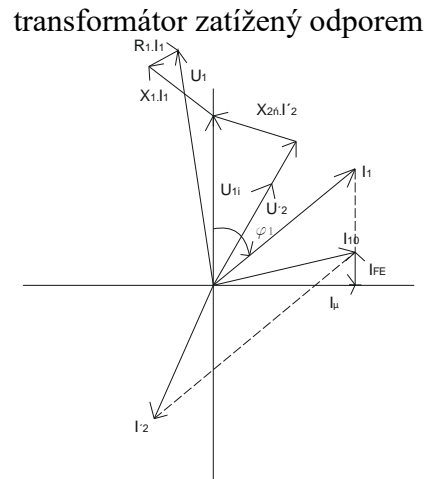
- zvláštní transformátor - autotransformátor

- izolační transformátor - bezpečnostní oddělení sítě, apod.  
většinou 1:1

- torzní
- měřicí - oddělení přístrojů od měřeného obvodu
- svářečí - odporové (1-10 V/100 kA)
  - obloukové (70 V zapalovací napětí, 15-40 V napětí na oblouku, 500-1000 A)

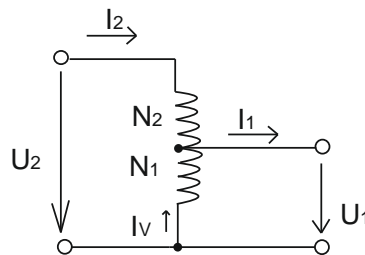


**Obr.34 Transformátor naprázdno**



**Obr.35 Transformátor zatížený odporem**

## 2.2 Autotransformátor



**Obr.36 Převod dolů**

$U_2 < U_1$  převod dolů

$$p = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (79)$$

$$p_p = U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2 \quad (80)$$

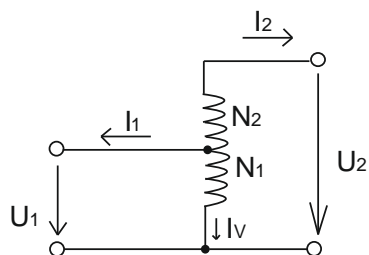
$p_p$  - průchozí výkon

$$p_T = U_2 \cdot I_V = (U_1 - U_2) \cdot I_1 \quad (81)$$

$p_T$  - výkon transformátoru

$$I_V = I_2 - I_1 \quad (82)$$

$$p_p = p_T \cdot \left( \frac{p}{p-1} \right) \quad (83)$$



**Obr.37 Převod nahoru**

$U_2 > U_1$  převod nahoru

$$p = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (84)$$

$$p_p = U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2 \quad (85)$$

$$p_T = U_1 \cdot I_V = (U_2 - U_1) \cdot I_2 \quad (86)$$

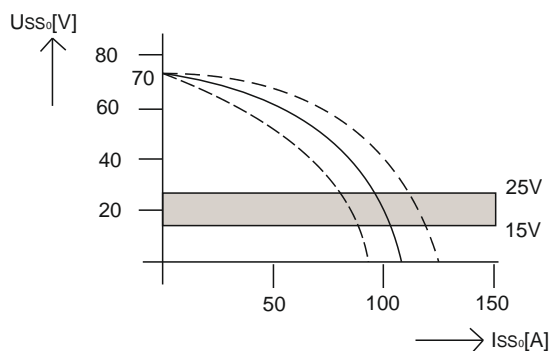
$$I_V = I_1 - I_2 \quad (87)$$

$$p_p = p_T \cdot \left( \frac{1}{1 - p} \right) \quad (88)$$

- a) regulační autotransformátor má odbočku plynule posuvnou
- b) je nebezpečný při záměně svorek - vždy společný vodič na nulák (jinak na výstupu proti zemi dvě fáze)
- c) nebezpečný záměnou svorek jezdce a pevné (přepětí, spálení, úraz) - zejména u posuvných [16, 17, 18, 19, 20, 21].

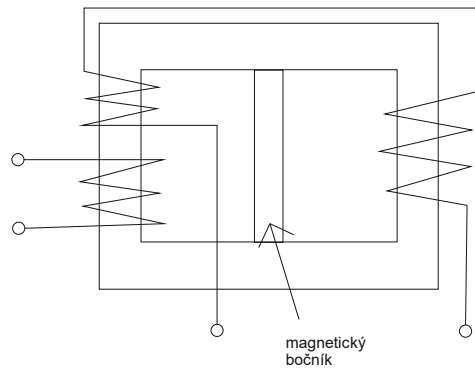
## 2.3 Svářecí transformátor

Charakteristika oblouku



**Obr.38 Charakteristika oblouku**

(magnetický bočník) nebo celé jádro rozptylové - přesycený transformátor



**Obr.39 Svářecí transformátor**

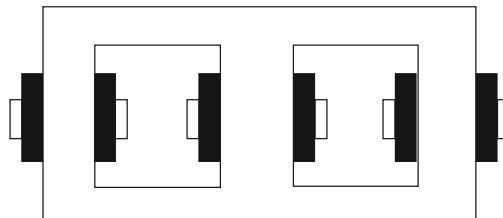
$$P_p = P_T \left( \frac{p}{p-1} \right) \quad p > 1 \text{ převod dolů}$$

$$P_p = P_T \left( \frac{1}{1-p} \right) \quad p < 1 \text{ převod nahoru}$$

### 3 TŘÍFÁZOVÉ TRANSFORMÁTORY

#### Princip:

- Konstrukce
- tři jednofázové
  - společný magnetický obvod
  - v praxi se používá třífázový jádrový



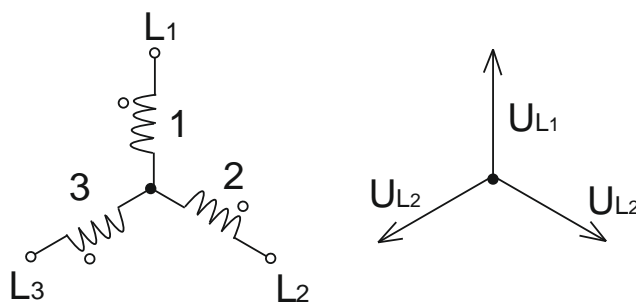
Obr.40 Třífázový transformátor

stejný průřez všech sloupků

primár 3 cívky, sekundár tři cívky

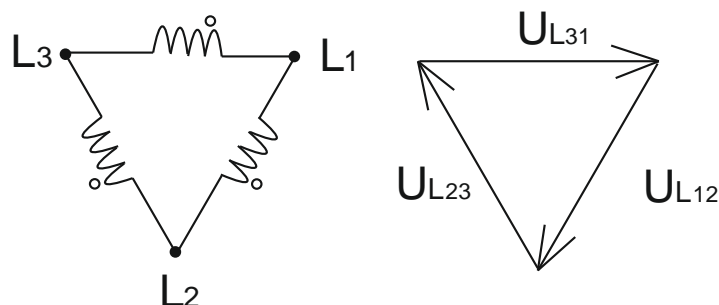
#### Zapojení cívek (primár nebo sekundár):

a) hvězda



Obr.41 Zapojení cívek do hvězdy

b) trojúhelník



Obr.42 Zapojení cívek do trojúhelníku



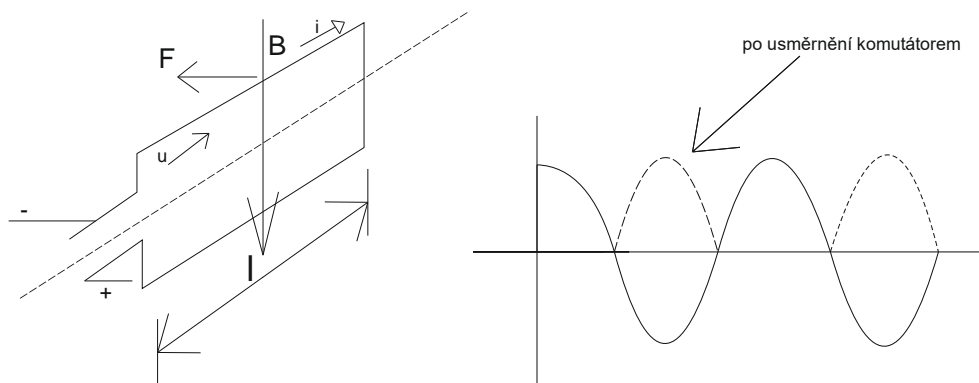
## 4 TOČIVÉ STROJE

### 1) konstrukce

Každý točivý stroj může pracovat jako motor (elektrická energie se převádí na mechanickou práci), nebo jako generátor (mechanická práce se přeměňuje na elektrickou energii).

Každý motor (dynamo) se skládá ze statoru (kostra, pólové nástavce a ladící cívky), rotoru (hřídel, plechy kotvy, vinutí kotvy, komutátor, kartáče) a ostatních (přední a zadní ložiskový štít, ventilátor, řemenice, svorkovnice).

### 2) princip komutátoru



Obr.44 Princip komutátoru

$$\text{Dynamo} \quad u = \omega \cdot r \cdot B \cdot 2l \cdot N = \omega \cdot K_S \quad (89)$$

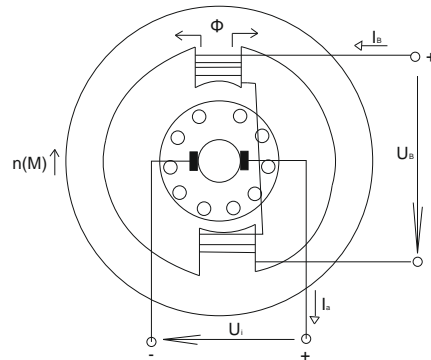
$$\text{Motor} \quad M = I \cdot 2B \cdot r \cdot l \cdot N = I \cdot K_S \quad (90)$$

Komutátor zajišťuje včasné přepínání vinutí (u motoru stálý smysl napětí, u dynama stálý smysl točivého momentu). Ve skutečných strojích je více pólů, více vinutí, více kartáčů a různé propojení cívek.

Kotva je složená z plechů s minimální mezerou (0,2 až 3 mm). Stator má za úkol vytvořit pouze magnetickou indukci B.

- u stejnosměrných strojů je stator plný (např. z ocelolitiny)
- u univerzálních strojů ze vzájemně izolovaných plechů
- na statoru je vinutí nebo permanentní magnet

### 3) obecné rovnice stejnosměrného stroje - značení



**Obr.45 Stejnospměrný stroj**

Indukované napětí dynama  $U_i = C_u \cdot \Phi \cdot n$  [V; min/s,  $W_b, \text{min}^{-1}$ ] (91)

$C_u$  - konstanta dynama daná konstrukcí

$\Phi$  - magnetický tok v mezeře (stroje)

$n$  - obrátky kotvy

točivý moment motoru  $M = C_m \cdot \Phi \cdot I_a$  [ $N_m; -, W_b, A$ ] (92)

$C_m$  - konstanta motoru daná konstrukcí

$\Phi$  - magnetický tok v mezeře

$I_a$  - proud kotvy

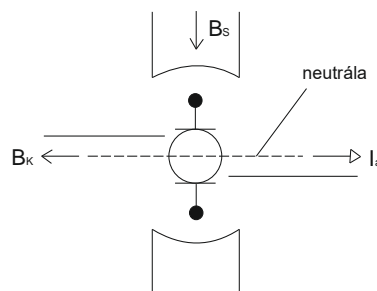
Značky ve schématech:

**Tab.5 Značky stejnosměrných strojů**

stator	
kotva	

### 4) Reakce kotvy:

Kartáče komutátoru musí ležet v neutrále jinak jiskří



**Obr.46 Reakce kotvy**



Kompence reakce kotvy:

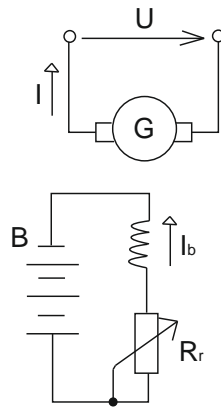
U malých strojů se kompenzuje natočením kartáčů. U velkých strojů se kompenzuje vinutím uloženým v drážkách pólových nástavců hlavních pólů (je zapojeno do série s obvodem kotvy) [1, 8, 9].

## 5) Dynamo

Pojmem dynamo se nazývá generátor stejnosměrného proudu. Dynamo dělíme na (o druhu rozhoduje zapojení budicího vinutí):

### A) s cizím buzením

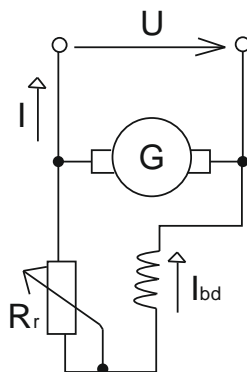
Má budicí vinutí napájené cizím zdrojem. Napětí dynamo je závislé na změně budicího proudu odporem reostatu nebo změnou budicího napětí. Největší výhodou dynamo s cizím buzením je, že patří mezi velmi tvrdé zdroje napětí, protože s rostoucím zatížením se jejich napětí pouze nepatrně snižuje. Budicí proud nezávisí na zatížení a neovlivňuje velikost napětí v budicím vinutí. Dynamo se nejčastěji používají v řízených pohonech, protože jejich napětí lze měnit ve velkém rozsahu.



**Obr.47 Dynamo s cizím buzením**

### B) derivační

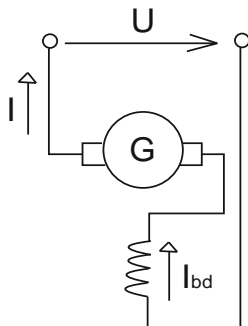
Nepotřebuje externí zdroj budicího proudu. Budicí vinutí se napájí reostatem z vlastních svorek dynamo a odebírá tak jen nepatrné množství z vyrobeného proudu. Sériově s kotvou lze připojit kompenzační a komutační vinutí. Prvním vinutím je omezována závislost napětí na zatížení a druhým je potlačován magnetický vliv kotvy na pole hlavních magnetů.



**Obr.48 Dynamo derivační**

### C) sériová

Budící vinutí je zapojené do série s kotvou, proto zatěžovací proud prochází všemi vinutími. Sériové dynamo lze nabudit pouze při zatížení. Když je dynamo nezatížené, je jeho svorkové napětí rovno nule.

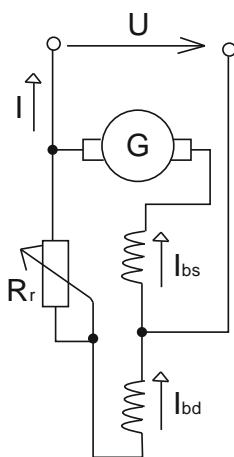


**Obr.49 Dynamo sériové**

### D) kompaundní

Je kombinací derivačního a sériového dynama. Jejich magnetické toky se podporují, protože se na pólech nachází derivační i sériové vinutí. V obvodech derivačního vinutí je umístěn derivační regulátor, který řídí napětí dynama a upravuje zatěžovací charakteristiky. Kompaundní dynamo se používá například v hutích a válcovnách, protože se zde vyskytuje velké kolísání zatížení.

Sériové vinutí můžeme zapojit také tak, že magnetické pole působí proti poli derivačního vinutí. Tím vznikne protikompaundní dynamo. Při zatěžování se jeho napětí snižuje rychleji než derivačnímu dynamu a zmenšuje se velikost zkratového proudu. Protikompaundní dynamo se používají jako svařovací.

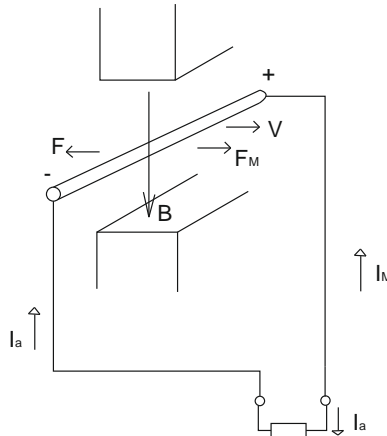


**Obr.50 Dynamo kompaundní**

## 5 MOTORY

### 1) princip - funkce

Jedná se o indukční stroj, který využívá silových účinků magnetického pole.



**Obr.51 Princip motoru**

$$u = vBl \quad (93)$$

$$F = lBI \quad (94)$$

rozběhový proud

$$I_a = \frac{U_M}{R_a} \quad (95)$$

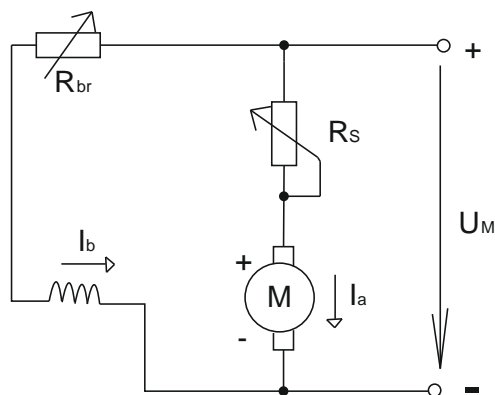
rovnice motoru

$$W_M = W_i + R_a \cdot I_a \quad (96)$$

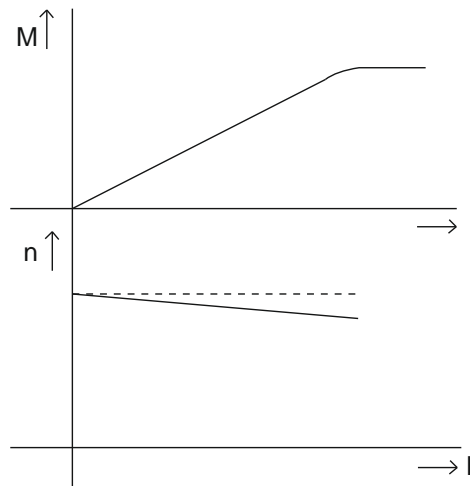
otáčky motoru

$$n = \frac{W_M - R_a \cdot I_a}{\ln \Phi} \quad (97)$$

### 2) Derivační motor



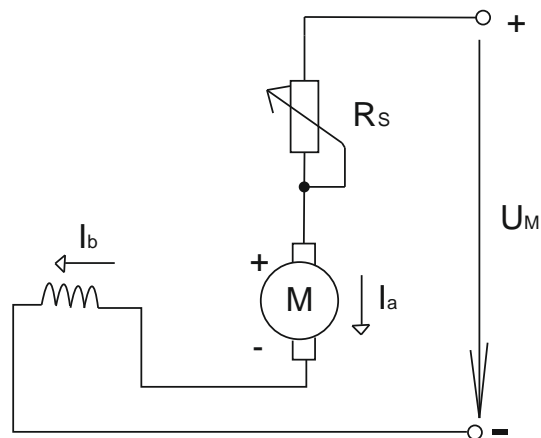
**Obr.52 Derivační motor**



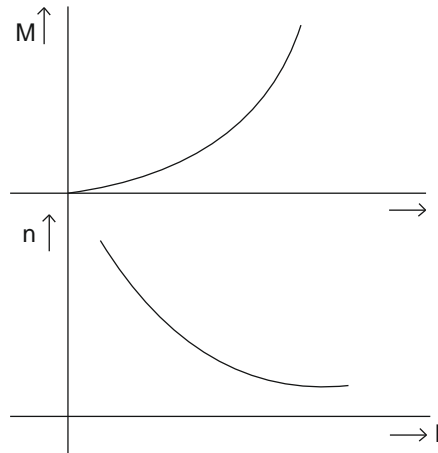
**Obr.53 Momentová charakteristika derivačního motoru**

- a) stálé buzení - mění málo otáčky zatížením
- b) točivý moment úměrný odebíranému proudu
- c)  $R_{br}$  a  $R_s$  slouží ke spouštění u velkých strojů
- d) může brzdít odporem, protiproudem i rekuperací
- e) smysl otáčení se změní přepólováním kotvy nebo statoru
- f) motor vhodný pro pohony díky stálým otáčkám

### 3) Sériový motor



**Obr.54 Sériový motor**



**Obr.55 Momentová charakteristika sériového motoru**

- a) nesmí se pustit naprázdno - zničení
- b) velký záběrný moment v klidu
- c) spouštění přes  $R_s$  (kontrolér)
- d) otáčky se zatížením značně mění
- e) smysl otáčení - přepólováním rotoru nebo statoru
- f) brzdění do odporu při přepólovaném statoru (by se neodbudil)
- g) motor vhodný pro trakci

#### **4) brzdění motorů**

- a) do odporu - odpojíme  $M$  od zdroje napětí a připojíme odpor -  $M$  ve funkci dynama, mění elektrickou energii na teplo (brzdí až do nejnižších otáček)
- b) protiproudem - přes sériový odpor se  $M$  napájí opačným napětím - vše v odporu v teplo
- c) rekuperací - zvýšením otáček přejde  $M$  do  $D$  přes napětí zdroje - energie do sítě  
- při stejných obrátkách přebuzení u statoru (pokud lze přebudít)

## **5.1 Asynchronní motory**

### **5.1.1 Trojfázový indukční motor**

#### **A) Vlastnosti**

- jednoduchý
- provozně spolehlivý
- relativně stálé otáčky

#### **B) Typy**

- s kotvou nakrátko
- s kotvou kroužkovou (vinutá)

### C) Konstrukce

stator - prstencový obvod z plechů tloušťky 0,5mm

- izolace pojí bok drážky vodiče

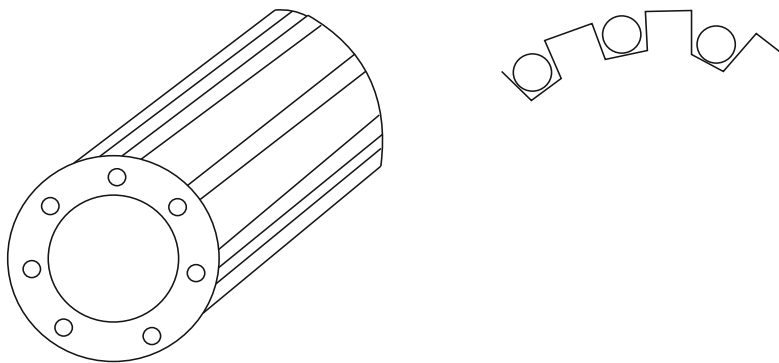
- cívky zapojené do trojúhelníku nebo do hvězdy (točivé magnetické pole)

rotor - plechy a drážky ze slisovaného lutecia - vírová kotva

- třífázová kotva vinutá do trojúhelníku (tři kroužky)

### D) Vírová kotva

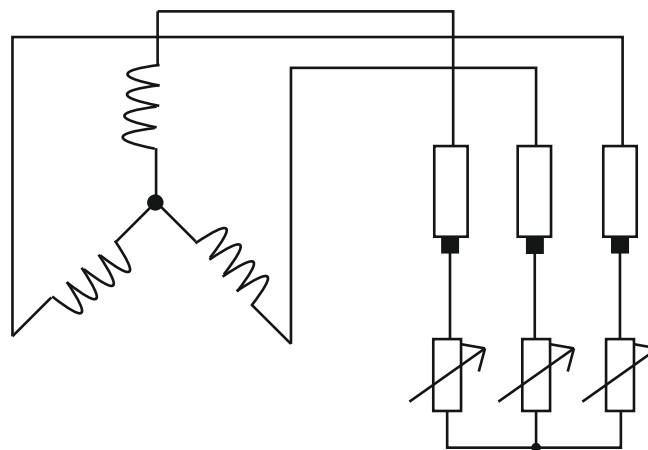
Cu nebo Al tyče uložené v drážkách rotoru a spojené kruhy, je-li klec z materiálu více odporového (např. z mosazi), zvětšuje se záběrný moment motoru.



**Obr.56 Vírová kotva**

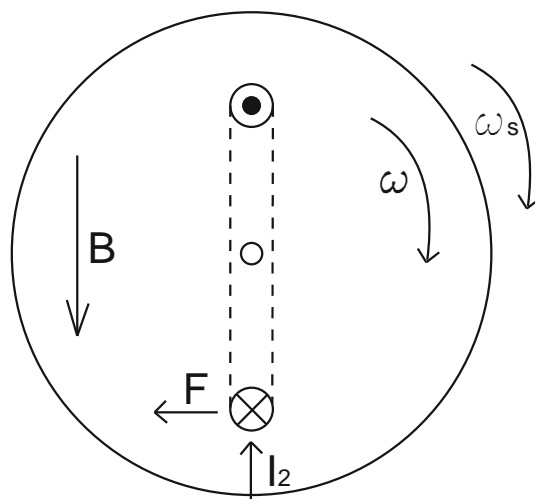
### E) Vinutá kroužková kotva

umožňuje plynule regulovat moment a otáčky motoru



**Obr.57 Vinutá kroužková kotva**

## F) Činnost motoru - model



**Obr.58 Model činnosti motoru**

moment 
$$M = \Phi_s^2 \frac{(\omega_s - \omega)}{R + jX} \quad (98)$$

skluz 
$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100 \% \quad (99)$$

malé motory skluz až 10 % (do 200 kW)

velké motory skluz 1 % i méně (nad 200 kW)

rotor se vždy točí menšími otáčkami, než jsou  $n_s$ , proto se nazývají asynchronní

## G) Otáčky

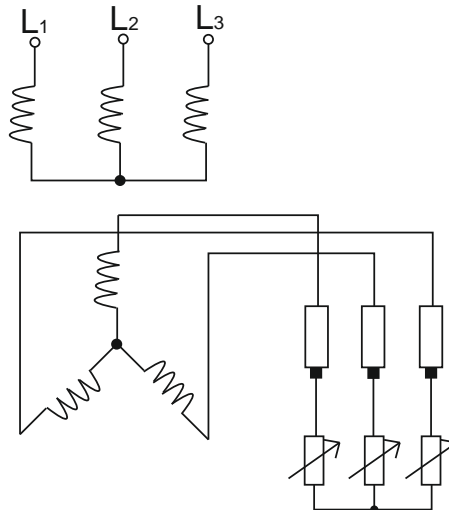
$$n_s = \frac{60 \cdot f_s}{p} \quad (100)$$

motor bez zátěže - téměř synchronní obrátky

motor se zátěží - vzroste skluz a zvýší se odběr

## H) Motor s kroužkovou kotvou

Výhodou těchto motorů je, že mají ideální rozběh, plynulou regulaci otáček a malý proudový náraz po zapnutí. Mezi nevýhody patří jejich složitost a tím i nákladnost na výrobu, provozně jsou méně spolehlivé a regulace je ztrátová.



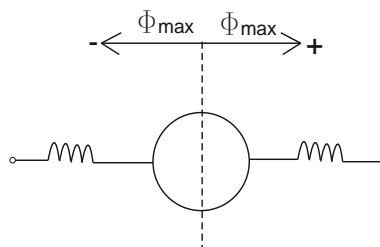
**Obr.59 Motor s kroužkovou kotvou**

Ve skutečných strojích bývají někdy kartáče odklopné a zkrat se provádí mechanickým táhlem.

I) Spouštění indukčních motorů

- a) přímo vypínačem + pojistky nebo jistič s tepelným relé (malé do 3 kW)
- b) stykačem (dvoutlačítkové ovládání)
- c) přepínač hvězda/trojúhelník (nad 3 kW)
- d) spouštěčem (kroužkové)
- e) tyristory (dálkové řízení kroužkových motorů a řízení otáček)

J) Jednofázový indukční motor



**Obr.60 Jednofázový indukční motor**

$$\Phi = \Phi_{max} \cdot \cos\omega t \quad (100)$$

$$\Phi = \frac{\Phi_{max}}{2} (e^{j\omega t} + e^{-j\omega t}) \quad (101)$$

K) Motor s hladkým rotorem

Motory s hladkým rotorem jsou asynchronní, jednofázové nebo třífázové motory s točivým polem (točí se pouze klec). Mají nepatrný moment setrvačnosti. Používají se pro regulační a řídicí techniku. Mají skluz až 50 % a účinnost maximálně 25 % [15, 17, 19, 21].



## 5.2 Synchronní motory

### 5.2.1 Alternátory

#### A) Konstrukce

- trojfázový stator - stejné jako u trojfázového indukčního motoru
- nabuzený rotor - dvou nebo vícepólový elektromagnet napájený stejnosměrným proudem z takzvaného budiče (derivační dynamo) na stejné ose

#### Rotory

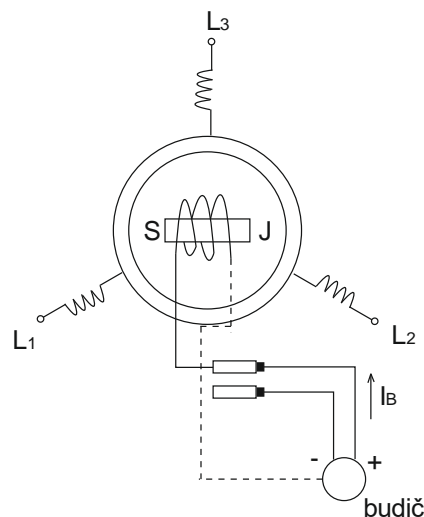
- hladký, průměr 600-1 200 mm, vinutí v drážkách, délka až 12 metrů. Používají se dvoupólové pro parní turbíny (3 000 ot/min).
- s vyniklými póly, průměr 2 000-5 000 mm, vinutí na cívkách, délka 1-3 metry. Používají se čtyř a šestipólové pro vodní turbíny (1 000 ot/min) [12, 13, 14, 15].

#### Pohonný stroj

- parní turbína - hřídel vodorovný - vysoké otáčky (3 000 ot/min)
  - alternátor s hladkým rotorem - společný blok se nazývá turboalternátor
- vodní turbína - Kaplanova - malé otáčky (150-300 ot/min - hřídel svisle)
  - Francisova - střední otáčky (500-750 ot/min - hřídel vodorovně)
  - Peltonova - vysoké otáčky (obvykle do 1 000 ot/min - hřídel vodorovně)
- dieselův motor - nízké otáčky 250-750 ot/min - hřídel vodorovně

#### B) Princip alternátoru

Průběh magnetického toku je sinusový (dán rozložením budícího vinutí na rotoru).



**Obr.61 Princip alternátoru**

$u_s$  - synchronní otáčky rotoru

pak platí

$$u_s = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (103)$$

$p$  - počet párů pólů rotoru

napětí na fázích  $L_1, L_2, L_3$  (sdružené) je 5-35 kV

C) Regulace alternátoru

udržují složité regulátory

- napětí - řídí se změnou budícího proudu

- frekvence - udržuje samočinný regulátor otáček

D) Synchronní motory

a) pracují obráceně než generátor - točivé pole trojfázového statoru unáší synchronní rychlostí nabuzený magnetický rotor

b) rotor se budí stejnosměrným proudem z budiče

c) synchronní motory musíme roztočit na synchronní rychlost

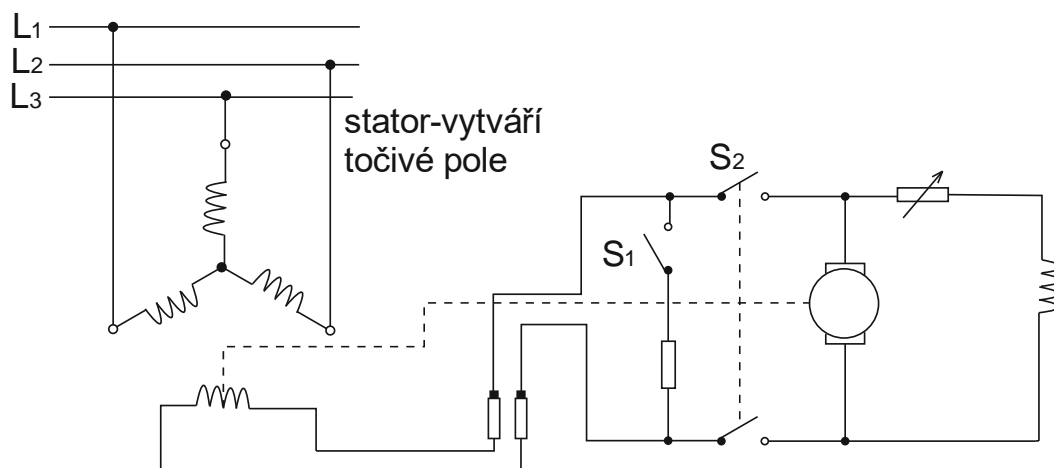
- mechanicky - motorem asynchronním

- asynchronní klecí (skluz pod 5 %)

- vinutí do zkratu

d) přetíží-li se synchronní motory - vypadne ze synchronismu

schéma synchronního motoru



**Obr.62 Schéma synchronního motoru**

Rozběh:  $S_1$  zapnout - roztočení rotoru na asynchronní otáčky

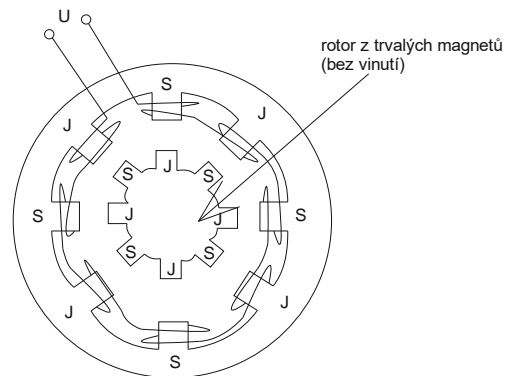
Chod: přepnout ( $S_1$  rozpojit,  $S_2$  zapojit)

Skluz musí být pod 5 % pro zdařilou synchronizaci.

E) Synchronní kompenzátory

Používají se pro zlepšení účinnosti sítě místo kondenzátorů při velkých výkonech (naprázdno běžící přebuzený synchronní motor) [8, 9, 10, 11].

## F) Jednofázový synchronní motor (hodinový)



**Obr.63 Jednofázový synchronní motor**

roztočení mechanicky nebo stíněným polem

$$u_s = \frac{60 \cdot f}{p} \quad (104)$$

p - počet pólových dvojic

f - frekvence

## 6 PRACOVNÍ LISTY

### 6.1 Pracovní list - měřicí přístroje

1) Stupnice nelineárního přístroje je rozdělena na 60 dílků. Rozsah měřícího přístroje je 12 A. Určete citlivost a konstantu.

$$I = K_i \alpha$$
$$K_i = \frac{I}{\alpha} = \frac{12}{60} = 0,2 \text{ A/d}$$
$$C_i = \frac{1}{K_i} = 5 \text{ d/A}$$

2) Univerzální přepínací voltmetr má stupnici rozdělenou na 60 dílků. Stanovte citlivost na rozsahu 3 V.

$$U = K_u \alpha$$
$$K_u = \frac{U}{\alpha}$$
$$C_u = \frac{\alpha}{U} = \frac{60}{3} = 20 \text{ d/V}$$

3) Ampérmetr má třídu přesnosti 2,5 a rozsah 6 A. Stanovte

a) absolutní chybu v ampérech

$$\delta_p = \frac{\Delta u}{A_m} 100 \%$$
$$\Delta u = \frac{\delta_p A_m}{100} = 0,15 \text{ A}$$

b) proměnnou chybu údaje ve 2/3, 1/2, 1/3 a 1/10 stupnice (plné výchylky)

$$\delta_u = \frac{\Delta u}{A_n} 100 \% = \frac{0,15}{6} 100 = 2,5 \%$$

pro 2/3

$$\delta = \frac{0,15}{6 \cdot \frac{2}{3}} 100 = 3,75 \%$$

pro 1/2

$$\delta = \frac{0,15}{6 \cdot \frac{1}{2}} 100 = 5 \%$$

pro 1/3

$$\delta = \frac{0,15}{6 \cdot \frac{1}{3}} 100 = 7,5 \%$$

pro 1/10

$$\delta = \frac{0,15}{\frac{1}{6 \cdot 10}} 100 = 25 \%$$

4) Určete moment magnetoelektrického přístroje, je-li odpor jeho otočné cívky  $1\,000\ \Omega$  a úbytek na cívkce  $200\ \text{mV}$ . Půdorys napěťové cívky má rozměry  $14 \times 20\ \text{mm}$ , indukce  $0,03\ \text{T}$  a počet závitů cívky je  $3\,400$ . Uvažujte moment pro plnou výchylku.

$$I_m = \frac{U_m}{R_m} = 200\ \mu\text{A}$$

$$M_s = 2BrlNI = 2 \cdot 0,03 \cdot 7 \cdot 10^{-3} \cdot 20 \cdot 10^{-3} \cdot 3400 \cdot 200 \cdot 10^{-3} = 5,712 \cdot 10^{-3}$$

5) Určete vnitřní odpor měřicího přístroje  $R_m$ , je-li proud pro plnou výchylku  $0,5\ \text{mA}$  a napětí pro plnou výchylku  $60\ \text{mV}$ . Určete činný příkon systému.

$$R_m = \frac{U_m}{I_m} = 120\ \Omega$$

$$P_m = U_m I_m = 30\ \mu\text{W}$$

6) Stanovte práci, kterou je třeba dodat přístroji s elektrostatickým systémem při měřeném napětí  $2\,000\ \text{V}$ , je-li kapacita systému  $25\ \text{pF}$ .

$$Q = CU$$

$$A = QU$$

$$A = CU^2 = 1 \cdot 10^{-3}\ \text{J}$$

7) Voltmetr má rozsah  $3\ \text{V}$  a vnitřní odpor  $20\ \text{k}\Omega/\text{V}$ . Vypočtěte vstupní odpor voltmetru.

$$R_{\text{vst}} = UR_{1\text{V}}$$

$$R_{\text{vst}} = 3 \cdot 20\ \text{k}\Omega = 60\ \text{k}\Omega$$

8) Úbytek napětí na ampérmetru je  $0,3\ \text{V}$  na rozsahu  $30\ \text{mA}$ . Určete velikost odporu vřazeného do cesty protékajícímu proudu.

$$R = \frac{U_m}{I} = \frac{0,3\ \text{V}}{30\ \text{mA}} = 10\ \Omega$$

## 9) Praktické cvičení v laboratoři - použití voltmetru a ampérmetru v praxi

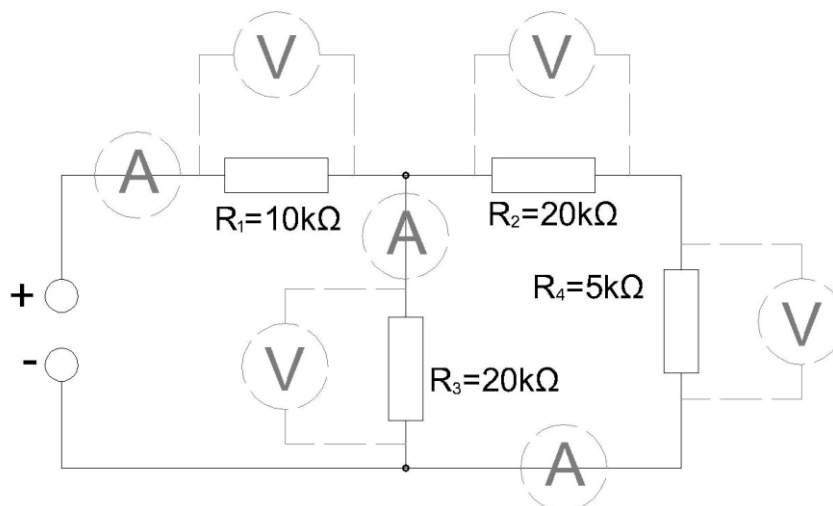
Analýzujte zadaný obvod:

1. Měřením na modelu (vyberte 4 různé rezistory s odporem 1-20 k $\Omega$ , zapojte z nich na nepájivém poli obvod dle schématu a změřte proud všemi rezistory a napětí na nich).
2. Simulací na PC (sestavte stejný obvod jako v bodě 1 v programu Multisim a proveďte v něm stejná měření jako v bodě 1).
3. Výpočtem (provedte výpočet proudů všemi rezistory a napětí na nich).

Náležitosti protokolu z praktického cvičení:

1. Titulní list obsahuje: název školy, jméno a příjmení studenta, který protokol vypracoval, třídu, školní rok, název cvičení a zadání
2. Na dalších listech následuje popis činnosti při cvičení, schéma zapojení, seznam použitých přístrojů, naměřené hodnoty ve formě tabulek
3. Závěr obsahuje zhodnocení praktického cvičení z hlediska ověření dříve získaných vědomostí, nových poznatků, dovedností a podobně [1, 22].

Schéma zapojení:



## 6.2 Pracovní list - transformátory

1) Spočítejte převod pro transformátor 220 V/ 12V.

a) Spočítejte maximální proud primárním vinutím, je-li sekundární vinutí možné zatížit proudem 10 A.

$$p = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = 18,3$$
$$I_1 = \frac{I_2}{p} = 0,545 \text{ A}$$

b) Vypočtěte výkon transformátoru.

$$P = U_1 I_1 = U_2 I_2 = 120 \text{ VA}$$

2) Určete indukované napětí sekundárního vinutí transformátoru při těchto parametrech.

$$f = 400 \text{ Hz}$$

$$N_2 = 50$$

$$S_{\text{železa}} = 4 \text{ cm}^2$$

$$B_{\text{max}} = 1,2 \text{ T}$$

$$U_2 = 4,44 \cdot f N S_{\text{železa}} B_{\text{max}} = 42,624 \text{ V}$$

3) Transformátor s převodem 34,6 je na sekundárním vinutí zatížen odporem 5  $\Omega$ . Na jakou hodnotu se odpor transformuje v primárním vinutí?

$$R_{\text{trans}} = p^2 R_2 = 5985 \Omega$$

4) Praktické měření v laboratoři - praktické ověření funkce transformátoru

Zadání:

1. Změřte reaktanci primárního a sekundárního vinutí transformátoru při frekvenci 50 Hz
2. Z naměřených hodnot vypočtěte indukčnost obou vinutí
3. Změřte celkovou indukčnost sériového spojení obou cívek při frekvenci 50Hz pro souhlasnou i nesouhlasnou orientaci cívek
4. Bod 3 zadání opakujte pro paralelní spojení cívek
5. Z naměřených hodnot indukčností stanovte vzájemnou indukčnost cívek a činitel vazby

Náležitosti protokolu z praktického cvičení:

1. Titulní list obsahuje: název školy, jméno a příjmení studenta, který protokol vypracoval, třídu, školní rok, název cvičení a zadání
2. Na dalších listech následuje popis činnosti při cvičení, schéma zapojení, seznam použitých přístrojů, naměřené hodnoty ve formě tabulek
3. Závěr obsahuje zhodnocení praktického cvičení z hlediska ověření dříve získaných vědomostí, nových poznatků, dovedností a podobně

5) Praktické měření v laboratoři - praktické ověření funkce transformátoru

Zadání:

1. Změřte reaktanci primárního a sekundárního vinutí transformátoru při frekvenci 1 kHz
2. Z naměřených hodnot vypočtete indukčnost obou vinutí
3. Zjistěte převod transformátoru v rozsahu frekvencí 100 Hz - 1 000 Hz (min. 10 hodnot)
4. Zpracujte graf závislosti převodu transformátoru na frekvenci:  $p = f(f)$

Náležitosti protokolu z praktického cvičení:

1. Titulní list obsahuje: název školy, jméno a příjmení studenta, který protokol vypracoval, třídu, školní rok, název cvičení a zadání
2. Na dalších listech následuje popis činnosti při cvičení, schéma zapojení, seznam použitých přístrojů, naměřené hodnoty ve formě tabulek a grafů
3. Závěr obsahuje zhodnocení praktického cvičení z hlediska ověření dříve získaných vědomostí, nových poznatků, dovedností a podobně [1, 22].



### 6.3 Pracovní list - motory

1) Jaká je maximální hodnota indukovaného stejnosměrného napětí dynama, kotva má sekce po 60 závitů vodiče a otáčky 1 500 ot/min. Průměr kotvy je 50 mm, délka 100 mm a indukce statoru je 0,6 T.

$$U = 2Brln2\pi \frac{n}{60} = 28,27 \text{ V}$$

2) Výstupní napětí dynama s cizím buzením, které není zatíženo, je 16 V. Odpor kotvy je 1  $\Omega$ , úbytek napětí na kartáčích je 0,5 V.

a) Jaké je výstupní napětí dynama při zatížení proudem 3 A?

$$U = U_i - R_a I_a - \Delta U = 12,5 \text{ V}$$

b) Vypočtěte zkratový proud, je-li zapojeno jako sériové a odpor obvodu buzení je 5  $\Omega$ .

$$I = \frac{U_i}{R_a + R_{bu}} = 2,6 \text{ A}$$

3) Určete záběrný proud derivačního motoru, pro napětí 12 V, je-li odpor kotvy 1,6  $\Omega$ .

$$I_a = \frac{U_M}{R_a} = 7,5 \text{ A}$$

4) Dvanáctipólový asynchronní motor má skluz 5 %. Určete jeho otáčky v běžné síti.

$$n_s = \frac{60f}{p} = 500 \text{ ot/min}$$
$$n = 500 - \frac{5 \cdot 500}{100} = 475 \text{ ot/min}$$

5) Třífázová přípojka je jištěna samočinnými pojistkami 3  $\times$  25 A. Jaký maximální výkon třífázového motoru lze na přípojce provozovat (zdánlivý)? Použijte jistič 1,5.

$$P_{\max} = 3U_f \frac{I_j n}{6} = 3 \cdot 220 \frac{25 \cdot 1,5}{6} = 4125 \text{ VA}$$

6) Jakou pojistku použijeme pro jištění smyčky, jejíž impedance je  $15 \Omega$ ? Použijte jistič 1,5.

$$Z = \frac{U_f}{I_j n}$$
$$I_j = \frac{U_f}{Z n} = \frac{220}{15 \cdot 1,5} = 9,77 \text{ A}$$

7) Určete induktivní reaktanci elektromagnetu, jehož indukčnost je 200 mH. Elektromagnet je připojen na 220 V s kmitočtem 50 Hz. Dále určete proud.

$$X_L = \omega L = 2\pi f L = 62,8 \Omega$$
$$I = \frac{U}{X_L} = 3,5 \text{ A}$$

8) Jakou kapacitní reaktanci má kondenzátor o kapacitě  $4 \mu\text{F}$ , je-li připojen na střídavé napětí o kmitočtu 50 Hz [1].

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} = 796 \Omega$$

## ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo vytvořit ucelený studijní materiál pro všechny studenty elektro-technických oborů. Materiál je psán jasně a srozumitelně, aby mohl být snadno používán studenty. Práce vychází z předpokladu, že v současnosti není dostupný stručný, a přitom dostatečně obsáhlý materiál, který by obsahoval dostatek informací na jednom místě.

Pro studium tohoto textu je nutná dostatečná znalost matematiky a fyziky. Základní znalost matematiky a fyziky je nezbytná pro pochopení jednotlivých témat, protože není možné se zde zabývat základním učivem, které by měl každý student střední školy znát.

Jednotlivé kapitoly obsahují podrobné vysvětlení dané problematiky a je doplněna o názorné obrázky, aby došlo k co nejlepšímu pochopení látky. Materiál obsahuje příklady, které poslouží studentům k domácímu procvičování studované látky.

Diplomová práce byla ověřena v rámci souvislé praxe na Střední průmyslové škole sdělovací techniky v Praze v Panské ulici v předmětech Elektronické obvody a Silnoproudá zařízení. Diplomová práce se využila jako podklad při tvorbě příprav na hodinu, dále jako studijní materiál pro studenty (domácí samostudium) a také pro zadávání domácích úkolů. Celkové hodnocení studenty i pedagogickými pracovníky bylo pozitivní. Jelikož byl k testování použit pouze malý vzorek respondentů, nedá se výsledek zobecnit. Skupinu respondentů tvořilo 100 studentů (čtyři třídy ve třetím ročníku) a dva učitelé. Po osobních rozhovorech se studenty a učiteli jsem přesvědčen o velkém přínosu diplomové práce mezi ostatními studijními materiály.

## POUŽITÉ ZDROJE

- [1] LOKVENC, J. *Elektrotechnika 2-rukopis přednášek*. Hradec Králové. UHK. 1995.
- [2] KUBICA, L. *Elektrotechnická měření*. Praha. BEN. 2003. ISBN 80-7300-022-9.
- [3] KREJČÍ, V. *Elektrotechnické měřicí přístroje a měření I*. Praha. SNTL. 1964. 45 844/63-II/3.
- [4] MAŤÁTKO, J. *Elektronika*. Praha. Idea servis. 1987. ISBN 80-85970-00-7.
- [5] KRATOCHVÍL, M. *Elektrotechnická měření II*. Praha. Nadas. 1988. 15 589/87-211.
- [6] BLAHOVEC, A. *Elektrotechnika III*. Praha. Informatorium. 2005. ISBN 80-7333-045-8.
- [7] MAŤÁTKO, J. *Elektronika-elektronické součástky a základní obvody*. Praha. SNTL. 1979. 21 867/77-211.
- [8] BALÁK, R. *Silnoproudá zařízení*. Praha. SNTL. 1984. 11 736/83-211.
- [9] JEZERSKI, E. *Transformátory-teoretické základy*. Praha. Academia. 1973. 509-21-875.
- [10] BAŠTA, T. *Teorie elektrických strojů*. Praha. ČSAV. 1957.
- [11] CIGÁNEK, L. *Stavba elektrických strojů*. Praha. SNTL. 1958.
- [12] BAŠTA, T. *Měření na elektrických strojích díl 2*. Praha. SNTL. 1959.
- [13] VLADAŘ, J. *Elektrotechnika a silnoproudá elektronika*. Praha. SNTL. 1986.
- [14] VOŽENÍLEK, L. *Kurz elektrotechniky*. Praha. SNTL. 1976.
- [15] TRNKA, Z. *Teoretická elektrotechnika*. Praha. SNTL. 1972.
- [16] DRTINA, R. - LOKVENC, J. - MANĚNA, V. *Doplňující materiály k předmětu Technická praktika elektro*. In Media4u Magazine X2/2009. Mimořádné vydání.
- [17] DRTINA, R. - LOKVENC, J. - MANĚNA, V. *Příručka k předmětu Technická praktika elektro - elektrické rozvody v praxi*. In Media4u Magazine X4/2009. Mimořádné vydání.
- [18] NOVÁK, M. *Sbírka příkladů z elektrotechniky, elektroniky a elektrických strojů a pohonů*. Praha. ČVUT. 2010. ISBN 978-80-01-04659-3.
- [19] SERAFÍN, Č. *Elektrotechnika 2*. Olomouc. UPOL. 2006.
- [20] KONÍČEK, V. *Elektrické stroje*. Praha. SPŠE. 2007.
- [21] ŠÍPAL, J. *Elektrické stroje 1*. Ostrava. VŠB-TUO. 2009.
- [22] MOUCHA, J. *Praktická cvičení z elektrotechniky*. Praha. SPŠST Panská. 2016.