

Univerzita Hradec Králové

Přírodovědecká fakulta

Katedra fyziky

Inovace Fyzikálního praktika 2

Bakalářská práce

Autor:	Jiří Kos
Studijní program:	B1701 Fyzika
Studijní obor:	Fyzika se zaměřením na vzdělávání
Vedoucí práce:	Ing. Karol Radocha, Ph.D.

Hradec Králové

duben 2020



Zadání bakalářské práce

Autor: Jiří Kos
Studium: S17FY006BP
Studijní program: B1701 Fyzika
Studijní obor: Fyzika se zaměřením na vzdělávání, Informatika se zaměřením na vzdělávání

Název bakalářské práce: **Inovace Fyzikálního praktika 2**

Název bakalářské práce Innovation of Physical Practice 2
AJ:

Cíl, metody, literatura, předpoklady:

Práce obsahuje návrh, měření a návody na úlohy z elektromagnetizmu. Součástí práce je kompletní zpracování úloh, které obsahuje navržení úloh, teoretický úvod, proměření úloh se zpracováním výsledků měření a návrh postupu pro studenty.

BROŽ, J. aj.: Základy fyzikálních měření I., 1. vyd., Praha, Státní pedagogické nakladatelství n.p., 1967. FUKA, J. - HAVELKA, B.: Elektřina a magnetismus, Praha, SPN, 1979. VOŽENÍLEK: Kurs elektrotechniky. 1. vyd. a kterékoli další, Praha, SNTL, 1976. SEDLÁK, B. ŠTOLL, I.: Elektřina a magnetismus. Vyd. 3., V nakl. Karolinum 2. Praha: Karolinum, 2012. ISBN 978-80-246-2198-2
ENGLISH, J.: Úvod do praktické fyziky I: Zpracování výsledků měření. 1. vyd. Praha: Matfyzpress, 2006, 145 s. ISBN 80-86732-93-2

Garantující pracoviště: Katedra fyziky,
Přírodovědecká fakulta

Vedoucí práce: Ing. Karol Radocha, Ph.D.

Oponent: doc. RNDr. Josef Hubeňák, CSc.

Datum zadání závěrečné práce: 4.4.2019

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně a že jsem v seznamu použité literatury uvedl všechny prameny, ze kterých jsem vycházel.

V Hradci Králové dne 28. 4. 2020



Jiří Kos

Poděkování

Děkuji panu Ing. Karolu Radochovi, Ph.D. za odbornou pomoc, cenné rady, mimořádně přátelský přístup a za čas, který mi v průběhu vedení práce věnoval.

Anotace

KOS, Jiří. Inovace *Fyzikálního praktika 2*. Hradec Králové, 2020. Bakalářská práce na Přírodovědecké fakultě Univerzity Hradec Králové. Vedoucí bakalářské práce Karol Radocha. 118 s.

Bakalářská práce obsahuje návrh 8 laboratorních cvičení z elektřiny a magnetismu. Součástí práce je kompletní dokumentace experimentů včetně teoretického úvodu, návrhu postupu pro studenty, fotodokumentace a vzorového řešení. Tyto experimenty se stanou nedílnou součástí předmětu Fyzikální praktikum 2, který experimentálně doplňuje kompendium znalostí studentů z oboru elektromagnetismu.

Klíčová slova

fyzikální praktikum, laboratorní cvičení, elektřina, magnetismus

Annotation

KOS, Jiří. *Innovation of Physical Practice 2*. Hradec Králové, 2020. Bachelor Thesis at Faculty of Science University of Hradec Králové. Theses Supervisor Karol Radocha. 118 p.

The Bachelor thesis contains draft of 8 laboratory exercises from electricity and magnetism. The part of the bachelor thesis is a complete documentation of experiments including theoretical introduction, design of process for students, photo documentation and an exemplary solution. These experiments will become an indivisible part of Physical Practice 2 course, which experimentally complements the compendium of students knowledge from the field of electromagnetism.

Keywords

physical practice, laboratory exercises, electricity, magnetism

Obsah

Úvod	11
1 TEPLOTNÍ ZÁVISLOST	12
1.1 Teorie	12
1.2 Úkol č. 1 – Měření pomocí ohmmetru.....	14
1.2.1 Zadání úkolu	14
1.2.2 Postup měření.....	14
1.2.3 Tabulky vhodné pro zpracování výsledků měření	15
1.2.4 Fotodokumentace úkolu.....	16
1.3 Úkol č. 2 – Měření pomocí voltmetru a ampérmetru	16
1.3.1 Zadání úkolu	16
1.3.2 Postup měření.....	16
1.3.3 Tabulky vhodné ke zpracování výsledků měření.....	17
1.3.4 Fotodokumentace úkolu.....	17
1.4 Zpracování dat měření.....	18
1.4.1 Úkol č. 1.....	18
1.4.2 Úkol č. 2.....	21
1.4.3 Závěr laboratorního cvičení	23
2 FARADAYOVA KONSTANTA	24
2.1 Teorie.....	24
2.2 Úkol č. 1 – Elektrolýza vody.....	26
2.2.1 Zadání úkolu	26
2.2.2 Postup měření.....	26
2.2.3 Fotodokumentace úkolu.....	27
2.3 Úkol č. 2 – Elektrolýza roztoku CuSO_4	28
2.3.1 Zadání úkolu	28
2.3.2 Postup měření.....	28
2.3.3 Fotodokumentace úkolu.....	29
2.4 Zpracování dat měření.....	30
2.4.1 Úkol č. 1.....	30
2.4.2 Úkol č. 2.....	30
2.4.3 Závěr laboratorního cvičení	31
3 HOMOGENNÍ ELEKTRICKÉ POLE.....	32
3.1 Teorie.....	32

3.2	Úkol č. 1 – Závislost intenzity el. pole na vzdálenosti desek	34
3.2.1	Zadání úkolu	34
3.2.2	Postup měření.....	34
3.2.3	Tabulky vhodné pro zpracování výsledků měření	35
3.2.4	Fotodokumentace úkolu.....	36
3.3	Úkol č. 2 – Závislost intenzity el. pole na napětí vnějšího zdroje	36
3.3.1	Zadání úkolu	36
3.3.2	Postup měření.....	36
3.3.3	Tabulky vhodné pro zpracování výsledků měření	36
3.3.4	Fotodokumentace úkolu.....	37
3.4	Úkol č. 3 – Měření hladin potenciálů.....	37
3.4.1	Zadání úkolu	37
3.4.2	Postup měření.....	37
3.4.3	Tabulky vhodné pro zpracování výsledků měření	38
3.4.4	Fotodokumentace úkolu.....	39
3.5	Zpracování dat měření.....	40
3.5.1	Úkol č. 1.....	40
3.5.2	Úkol č. 2.....	41
3.5.3	Úkol č. 3.....	43
3.5.4	Závěr laboratorního cvičení	44
4	PERMITIVITA.....	45
4.1	Teorie.....	45
4.2	Úkol č. 1 – Stanovení permitivity vakua	47
4.2.1	Zadání úkolu	47
4.2.2	Postup měření.....	47
4.2.3	Tabulky vhodné pro zpracování výsledků měření	49
4.2.4	Fotodokumentace úkolu.....	49
4.3	Úkol č. 2 – Určení relativní permitivity vybraných materiálů	50
4.3.1	Zadání úkolu	50
4.3.2	Postup měření.....	50
4.3.3	Tabulky vhodné pro zpracování výsledků měření	50
4.3.4	Fotodokumentace úkolu.....	51
4.4	Zpracování dat měření.....	52
4.4.1	Úkol č. 1.....	52
4.4.2	Úkol č. 2.....	53

4.4.3	Závěr laboratorního cvičení	54
5	TRANSFORMÁTOR.....	55
5.1	Teorie.....	55
5.2	Úkol č. 1 – Zapojení transformátoru naprázdno	57
5.2.1	Zadání úkolu	57
5.2.2	Postup měření.....	57
5.2.3	Fotodokumentace úkolu.....	59
5.3	Úkol č. 2 – Zapojení transformátoru nakrátko.....	59
5.3.1	Zadání úkolu	59
5.3.2	Postup měření.....	59
5.3.3	Tabulky vhodné pro zpracování výsledků měření	60
5.3.4	Fotodokumentace úkolu.....	61
5.4	Zpracování dat měření.....	62
5.4.1	Úkol č. 1.....	62
5.4.2	Úkol č. 2.....	64
5.4.3	Závěr laboratorního cvičení	66
6	MAGNETICKÁ INDUKCE.....	67
6.1	Teorie.....	67
6.2	Úkol č. 1 – Měření indukovaného napětí	71
6.2.1	Zadání úkolu	71
6.2.2	Postup měření.....	71
6.2.3	Tabulky vhodné pro zpracování výsledků měření	73
6.2.4	Fotodokumentace úkolu.....	73
6.3	Úkol č. 2 – Měření relativní permeability vzduchu	74
6.3.1	Zadání úkolu	74
6.3.2	Postup měření.....	74
6.3.3	Tabulky vhodné pro zpracování výsledků měření	74
6.3.4	Fotodokumentace úkolu.....	74
6.4	Zpracování dat měření.....	75
6.4.1	Úkol č. 1.....	75
6.4.2	Úkol č. 2.....	82
6.4.3	Závěr laboratorního cvičení	84
7	SOLÁRNÍ ČLÁNEK.....	85
7.1	Teorie.....	85
7.2	Úkol č. 1 – Intenzita ozáření	88

7.2.1	Zadání úkolu	88
7.2.2	Postup měření.....	88
7.2.3	Tabulky vhodné ke zpracování výsledků měření.....	89
7.2.4	Fotodokumentace úkolu.....	89
7.3	Úkol č. 2 – Stanovení proudu nakrátko a napětí naprázdno	89
7.3.1	Zadání úkolu	89
7.3.2	Postup měření.....	89
7.3.3	Tabulky vhodné ke zpracování výsledků měření.....	91
7.3.4	Fotodokumentace úkolu.....	91
7.4	Úkol č. 3 – Proměření VA charakteristiky solárního článku.....	91
7.4.1	Zadání úkolu	91
7.4.2	Postup měření.....	91
7.4.3	Tabulky vhodné ke zpracování výsledků měření.....	93
7.4.4	Fotodokumentace úkolu.....	93
7.5	Úkol č. 4 – Tvar VA charakteristiky v závislosti na teplotě.....	94
7.5.1	Zadání úkolu	94
7.5.2	Postup měření.....	94
7.5.3	Fotodokumentace úkolu.....	94
7.6	Zpracování dat měření.....	95
7.6.1	Úkol č. 1.....	95
7.6.2	Úkol č. 2.....	96
7.6.3	Úkol č. 3.....	97
7.6.4	Úkol č. 4.....	101
7.6.5	Závěr laboratorního cvičení	102
8	MAGNETICKÁ HYSTEREZE	103
8.1	Teorie.....	103
8.2	Úkol č. 1 – Masivní železné jádro	107
8.2.1	Zadání úkolu	107
8.2.2	Postup měření.....	107
8.2.3	Fotodokumentace úkolu.....	112
8.3	Úkol č. 2 – Železné jádro z navzájem izolovaných plechů	113
8.3.1	Zadání úkolu	113
8.4	Postup měření	113
8.4.1	Fotodokumentace úkolu.....	113
8.5	Zpracování dat měření.....	114

8.5.1	Úkol č. 1.....	114
8.5.2	Úkol č. 2.....	115
8.5.3	Závěr laboratorního cvičení.....	115
	Závěr	116
	Seznam použité literatury.....	117

Úvod

Fyzikální měření lze rozdělit do třech po sobě jdoucích etap. Úvodní etapou je fáze přípravná, přípravu následuje druhá etapa, tj. vlastní měření. Vlastním měřením získáváme data, které je posléze potřeba vhodně zpracovat, tím se dostáváme do třetí a poslední etapy.

Cílem bakalářské práce je navrhnout 8 laboratorních cvičení z elektromagnetismu a vytvořit textovou oporu, která by byla nápomocna ve všech třech již zmiňovaných etapách měření.

Vytvořené úlohy od akademického roku 2020/21 nahradí některé starší úlohy, které dosud studenti druhých ročníků bakalářských studijních programů katedry fyziky absolvovali v rámci předmětu Fyzikální praktikum 2.

Téma jsem si vybral, neboť mě vždy bavila experimentální činnost ve fyzice. Experimenty považuji za jeden z nejefektivnějších způsobů, jak přiblížit fyziku co nejširší mase lidí a jak v lidech probudit zájem o další vzdělávání na poli přírodních věd. Navíc jsem nejednou narazil na neoblíbenost předmětů fyzikálního praktika, v práci jsem proto viděl příležitost, jak mladším studentům studium zpříjemnit. Téma pro mě navíc představovalo možnost pracovat s drahým experimentálním vybavením, což je příležitost, která se nenaskytá každý den.

1 TEPLOTNÍ ZÁVISLOST

1.1 Teorie

a) dělení pevných látek podle konduktivity

Dle konduktivity (též měrná elektrická vodivost, zn. γ) rozdělujeme látky do tří skupin [1]. Dělení je uvedeno v tabulce č. 1-1.

Tabulka č. 1-1: Rozdělení pevných látek podle konduktivity

Skupina pevných látek	$\frac{\gamma}{\text{S} \cdot \text{m}^{-1}}$	Příklady látek
vodiče	$10^6 - 10^7$	většina kovů
polovodiče	$10^6 - 10^{-8}$	C (grafit), Si, Ge
dielektrika (izolanty)	menší než 10^{-8}	vzduch, plasty, keramika

b) teplotní závislost odporu

U vodičů i u polovodičů lze experimentálně pozorovat závislost odporu na teplotě. Zatímco u vodičů odpor se zvyšující se teplotou roste, u polovodičů je to přesně naopak (s rostoucí teplotou klesá odpor) [2].

Obecně tvrdíme, že závislost odporu na teplotě je přibližně exponenciální. Pro malý rozsah teplot, tj. pro interval od 0 °C až do 100 °C, lze však na základě přesných měření závislost považovat za lineární [2]. Empirický vztah má tedy tvar

$$R_t = R_0 [1 + \alpha(t - t_0)], \quad (1-1)$$

kde α je teplotní součinitel odporu (konstanta charakterizující zkoumaný materiál), R_t je odpor tělesa při teplotě t a R_0 je odpor při počáteční teplotě t_0 .

Odtud úpravou získáváme vztah pro teplotní součinitel odporu

$$\alpha = \frac{1}{R_0} \cdot \frac{R_t - R_0}{(t - t_0)}. \quad (1-2)$$

c) elektrický proud ve vodičích, závislost jejich odporu na teplotě

Z teorie elektronové vodivosti kovů je známa představa chaoticky se pohybujících elektronů uvnitř vodiče (hovoříme o tzv. elektronovém plynu), jejichž střední rychlost je snižována nárazy elektronů do krystalové mřížky kovu. Je-li střední rychlost elektronů snížena, přeneše se vodičem za jednotku času menší náboj (vodičem protéká menší proud). K popisu tohoto jevu se zavádí fyzikální veličina elektrický odpor, jejíž značka je R a jednotkou jest ohm (Ω). Zahříváním vodiče dochází ke zvyšování rychlosti chaotického pohybu, čímž roste počet srážek s krystalickou mřížkou (tudíž roste odpor). Z matematického hlediska je zřejmé, že koeficient α nabývá kladné hodnoty, aby závislost popsaná vztahem (1-1) byla rostoucí.

d) elektrický proud v polovodičích, závislost jejich odporu na teplotě

Budeme-li hovořit o vlastních polovodičích (koncentrace příměsí je menší než 10^{-9}), je třeba si uvědomit, že vedení elektrického proudu je zprostředkováváno elektrony

a děrami, které vznikly uvolňováním elektronů z jednotlivých atomů [1]. Vlastní polovodiče jsou při teplotě absolutní nuly téměř nevodivé, jelikož se žádný elektron nevytrhnul z vazby, tudíž v látce nejsou žádní volní nositelé náboje [3]. Aby došlo k ionizaci (uvolnění elektronu z vazby), je nezbytné dodat ionizační energii. Zmiňovaná ionizační energie může být dodána ve formě tepla. Je tedy zřejmé, že zvyšováním teploty roste počet uvolněných elektronů, respektive počet vzniklých děr, tudíž roste vodivost (klesá odpor). Koeficient α nabývá záporné hodnoty. Tato skutečnost platí i pro polovodiče s příměsovou vodivostí.

e) rezistory

Rezistory jsou jednou z nejpoužívanějších součástek v elektronice. Předpokládá se, že napětí na svorkách je přímo úměrné protékajícímu proudu. Cílem výroby rezistorů je proto snaha eliminovat negativní závislosti odporu (například na napětí, na teplotě...), což je u některých druhů rezistorů relativně dobře splněno. Rezistory mohou být vyrobeny jak z vodičů, tak z polovodičů.

f) termistor

Termistor je polovodičový odporový senzor vyráběný z práškových oxidů kovů a dalších příměsí, jehož hodnota ohmického odporu je značně závislá na teplotě [4]. Díky nemalé teplotní závislosti odporu lze termistory využívat například k přesnému měření teploty, určení rychlosti proudící kapaliny...

Podle charakteru teplotního součinitele odporu α lze termistory rozdělit na dvě skupiny – pozistory a negastory. Pozistory (označení PTC) mají kladný koeficient α , čili odpor roste s teplotou. Naopak u negastorů (označení NTC) je koeficient α záporný (s rostoucí teplotou klesá odpor). Průběh funkce $R = f(T)$ je velmi nelineární.

g) diody

Diody jsou polovodičové součástky se dvěma oblastmi s různou vodivostí – jedna oblast je typu P (majoritními částicemi jsou v této oblasti díry, jejichž náboj je kladný) a druhá typu N (elektrický proud vedou převážně elektrony), spoj těchto dvou oblastí se nazývá hradlová vrstva (zde dochází k rekombinaci elektronů a děr, přechod PN je téměř nevodivý a vzniká zde elektrické pole) [3].

Na základě této struktury mají diody jednu zásadní vlastnost, díky níž se používají jako usměrňovače – vodivost diody závisí na polaritě připojeného vnějšího zdroje. Připojíme-li diodu v propustném směru, tj. kladnou svorku na polovodič typu N a zápornou svorku na polovodič P, vede elektrický proud velmi dobře. Zapojení v propustném směru je schematicky naznačeno na obr. 1-1a. Naopak v závěrném směru je vodivost diody téměř nulová (obr. 1-1b). Fyzikální vysvětlení spočívá v rozšiřování/zužování hradlové vrstvy.



Obr. 1-1: Dioda zapojená v: a) propustném směru, b) závěrném směru

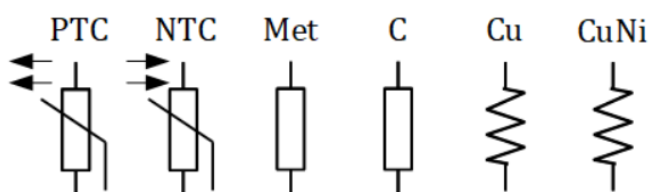
1.2 Úkol č. 1 – Měření pomocí ohmmetru

1.2.1 Zadání úkolu

Proměřte teplotní závislost odporu jednoho vybraného rezistoru a jednoho vybraného termistoru pomocí ohmmetru.

1.2.2 Postup měření

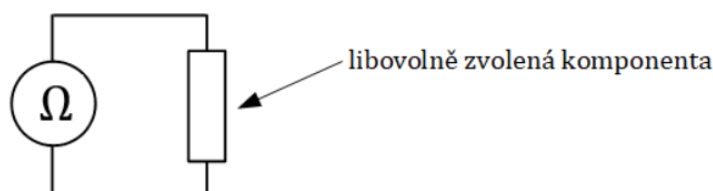
a) Pro měření si vyberte jeden rezistor (kovový filmový rezistor Met, uhlíkový filmový rezistor C, drátový rezistor Cu vyrobený z mědi nebo drátový rezistor CuNi z konstantanu) a jeden termistor (NTC nebo PTC). Značení, které naleznete na sadě ponorných sond, je vyobrazeno na obr. 1-2.



Obr. 1-2: Značení rezistorů na sadě ponorných sond

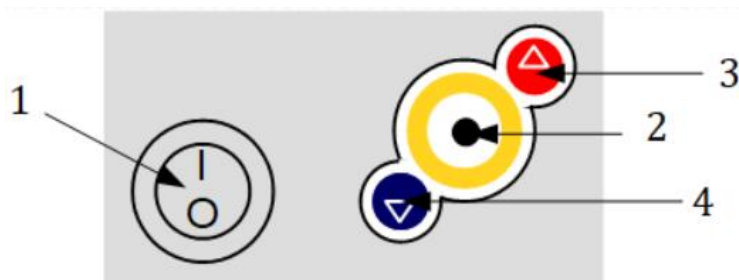
b) Připravte soupravu k měření – sadu ponorných sond uložte do voděodolného plastového sáčku a umístěte ji do připravené plastové nádoby, ke stěně nádoby upevněte termostat. Do nádoby nalijte vodu tak, aby byly sondy i termostat celé ponořené.

c) Zapojte obvod s ohmmetrem podle obr. 1-3 a nechte si zapojení zkontrolovat od vedoucího praktika. Pozor, jako ohmmetr použijte digitální multimetr PeakTech 2005, očekávejte hodnoty odporu v řádu stovek ohmů!



Obr. 1-3: Schéma zapojení pro úkol č. 2

d) Na termostatu nastavte teplotu 30 °C. Nastavení proved'te takto – zapněte termostat LAUDA (tlačítko 1 na obr. 1-4 přepněte do polohy I), dvakrát stiskněte žluté tlačítko (tlačítko 2) a pomocí modrého a červeného tlačítka (tlačítka 3 a 4) nastavte požadovanou teplotu, zvolenou teplotu potvrďte stisknutím žlutého tlačítka.



Obr. 1-4: Ovládání termostatu

e) Po ustálení teploty na termostatu запиšte do připravených tabulek hodnotu odporu, kterou odečtete na ohmmetru. Pozor, doporučuji provést měření jak pro rezistor, tak pro

termistor při jednom nastavení teploty přepojením ohmmetru ze zdířky pro rezistor na zdířku termistoru! Pro rezistor použijte tabulku č. 1-2, pro termistor tabulku č. 1-3.

f) Zjistěte hodnoty odporů i pro teploty 40 °C, 50 °C, 60 °C, 70 °C a 80 °C, opět je zaznamenejte do připravené tabulky.

g) Zpracujte data získaná měření na rezistoru

- Pomocí vzorce (1-2) vypočítejte koeficient α pro každou naměřenou hodnotu odporu získanou v bodě f). Určete průměrnou hodnotu koeficientu α . Za počáteční hodnotu odporu R_0 pro výpočet považujte odpor naměřený při teplotě $t_0 = 30$ °C!
- Z naměřených hodnot sestavte bodový graf $R = f(t)$, do grafu vložte spojnicí trendu a rozhodněte, zda vámi určený průběh odpovídá poznatkům z teoretické části, odpověď zdůvodněte.
- Z rovnice lineární regrese v obecném tvaru $y = kx + q$ určete teplotní součinitel odporu. S přihlédnutím ke vztahu (1-2) je evidentní, že má koeficient α význam podílu k/q .
- Vypočtené hodnoty teplotních součinitelů odporu vzájemně porovnejte, proveďte komparaci s tabulkovými hodnotami a své výsledky okomentujte.

h) Zpracujte data získaná měření na termistoru

- Z naměřených hodnot sestavte spojnicový graf $R = f(t)$. Rozhodněte, zda vámi určený průběh odpovídá poznatkům z teoretické části, odpověď zdůvodněte.

1.2.3 Tabulky vhodné pro zpracování výsledků měření

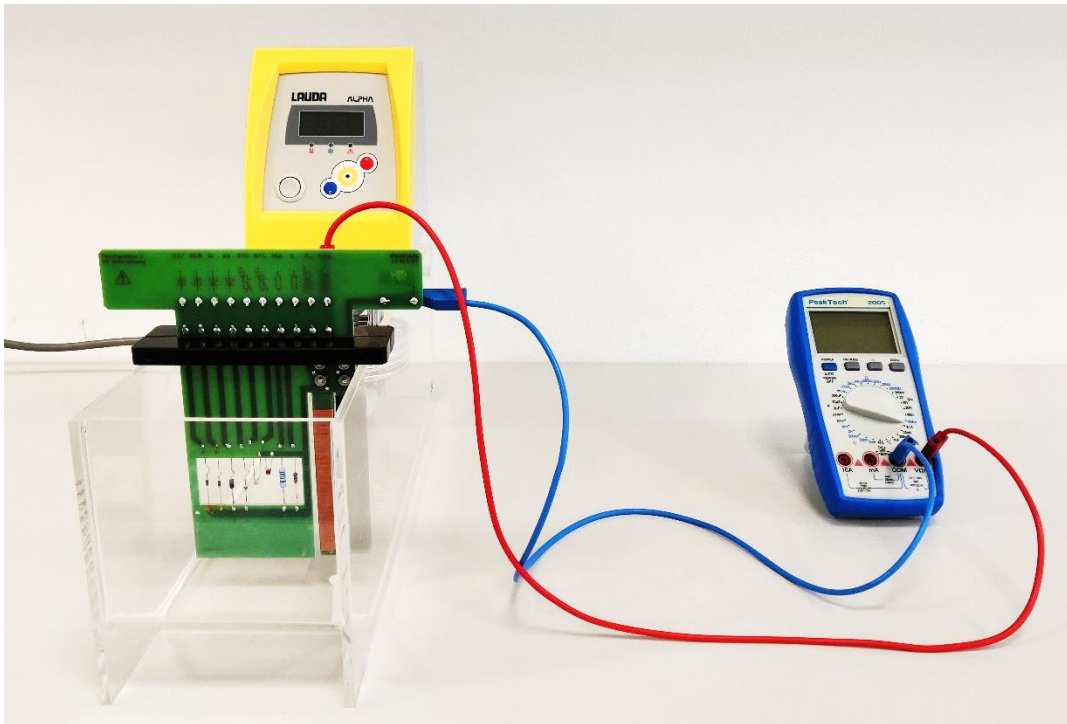
Tabulka č. 1-2: Tabulka pro zaznamenání hodnot měření rezistoru

zvolený rezistor			
i	$\frac{t_i}{\text{°C}}$	$\frac{R_t}{\Omega}$	$\frac{\alpha_i}{\text{K}^{-1}}$
0	30		–
	⋮		
5	80		
–	–	–	$\bar{\alpha} = \text{K}^{-1}$

Tabulka č. 1-3: Tabulka pro zaznamenání hodnot měření termistoru

zvolený termistor	
$\frac{t}{\text{°C}}$	$\frac{R_t}{\Omega}$
30	
⋮	
80	

1.2.4 Fotodokumentace úkolu



Obr. 1-5: Sestava pro měření s ohmmetrem

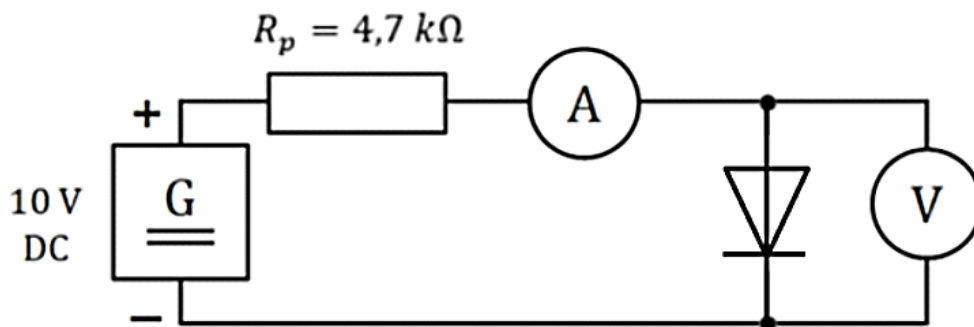
1.3 Úkol č. 2 – Měření pomocí voltmetru a ampérmetru

1.3.1 Zadání úkolu

Proměřte teplotní závislost odporu jedné vybrané diody v propustném směru pomocí dvou digitálních multimetrů.

1.3.2 Postup měření

- Pro měření si vyberte jednu diodu – křemíkovou (na sadě sond označeno Si) nebo germaniovou (označeno Ge).
- Připravte soupravu k měření stejným postupem, jako tomu bylo u úkolu č. 1.
- Zapojte obvod se dvěma digitálními multimetry podle obr. 1-6, na zdroji nastavte stejnosměrné napětí 10 V a proud 2 A. Nechte si zapojení zkontrolovat od vedoucího praktika. Pozor, diodu zapojte v propustném směru!



Obr.1-6: Schéma zapojení pro úkol č. 2

- Na termostatu nastavte teplotu 30 °C. Nastavení proved'te jako v úkolu č. 1.

e) Po ustálení teploty na termostatu zapište do připravené tabulky (tabulka č. 1-4) hodnoty proudů a napětí, které určíte pomocí multimetrů.

f) Zjistěte hodnoty proudů a napětí i pro teploty 40 °C, 50 °C, 60 °C, 70 °C a 80 °C, opět je zaznamenejte do připravené tabulky.

g) Pomocí Ohmova zákona vypočtete odpory diody pro jednotlivé teploty, hodnoty taktéž zaznamenejte do tabulky č. 1-4.

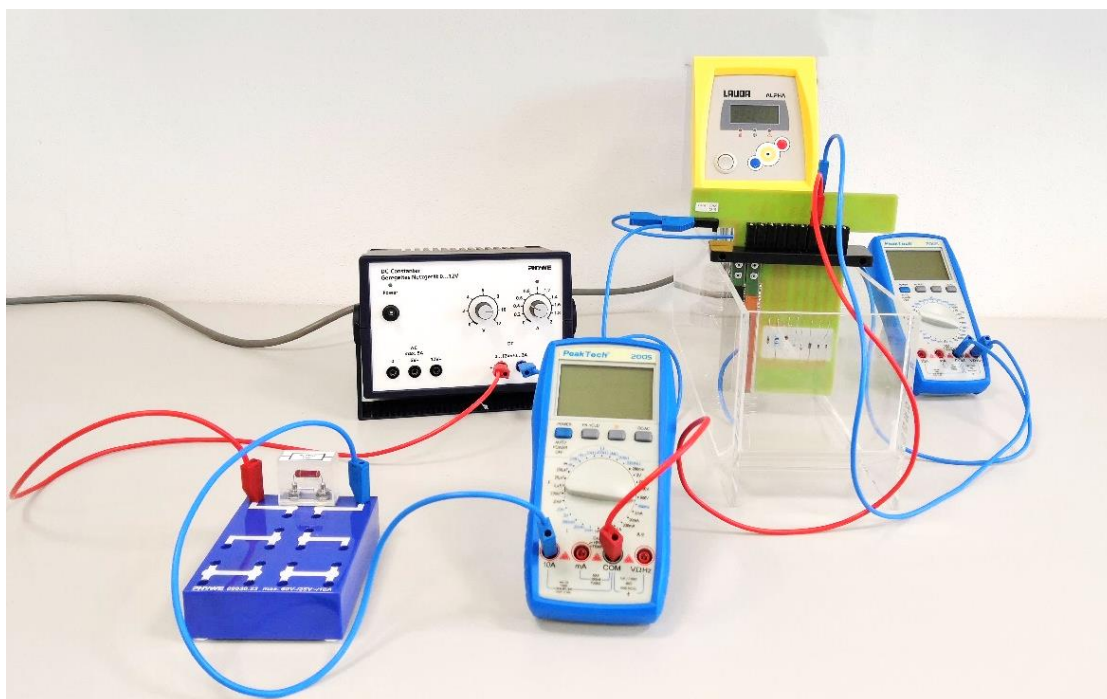
h) Z naměřených hodnot sestavte spojnicový graf $R = f(t)$ a rozhodněte, zda vámi určený průběh odpovídá poznatkům z teoretické části, odpověď zdůvodněte.

1.3.3 Tabulky vhodné ke zpracování výsledků měření

Tabulka č. 1-4: Tabulka pro zaznamenání hodnot měření diody

zvolená dioda			
$\frac{t}{\text{°C}}$	$\frac{I_t}{\text{mA}}$	$\frac{U_t}{\text{V}}$	$\frac{R_t}{\Omega}$
30			
⋮			
80			

1.3.4 Fotodokumentace úkolu



Obr. 1-7: Sestava pro měření odporu se dvěma multimetry

1.4 Zpracování dat měření

1.4.1 Úkol č. 1

a) rezistory

Přeindexováním vzorce (1-2) získáváme vztah

$$\alpha_i = \frac{R_i - R_0}{R_0(t_i - t_0)} \quad (1-3)$$

Tabulka č. 1-5: Naměřené a vypočítané hodnoty pro rezistor CuNi

CuNi			
i	$\frac{t_i}{^\circ\text{C}}$	$\frac{R_t}{\Omega}$	$\frac{\alpha_i}{\text{K}^{-1}}$
0	30	172	-
1	40	172	0
2	50	172	0
3	60	172	0
4	70	173	0,000145
5	80	173	0,000116
-	-	-	$\bar{\alpha} = 5,23 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$

$$y = 0,0229x + 172,08 \quad (1-4)$$

$$\alpha = \frac{0,0229}{172,08} = 0,133 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1} \quad (1-5)$$

Tabulka č. 1-6: Naměřené a vypočítané hodnoty pro rezistor Cu

Cu			
i	$\frac{t_i}{^\circ\text{C}}$	$\frac{R_t}{\Omega}$	$\frac{\alpha_i}{\text{K}^{-1}}$
0	30	362	-
1	40	374	0,003315
2	50	387	0,003453
3	60	401	0,003591
4	70	415	0,003660
5	80	428	0,003646
-	-	-	$\bar{\alpha} = 0,003533 \text{ K}^{-1}$

$$y = 1,3343x + 321,11 \quad (1-6)$$

$$\alpha = \frac{1,3343}{321,11} = 4,16 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1} \quad (1-7)$$

Tabulka č. 1-7: Naměřené a vypočítané hodnoty pro rezistor C

C			
i	$\frac{t_i}{^\circ\text{C}}$	$\frac{R_t}{\Omega}$	$\frac{\alpha_i}{\text{K}^{-1}}$
0	30	979	-
1	40	979	0
2	50	979	0
3	60	979	0
4	70	979	0
5	80	978	$-2 \cdot 10^{-5}$
-	-	-	$\bar{\alpha} = -4,1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$

$$y = -0,0143x + 979,62 \quad (1-8)$$

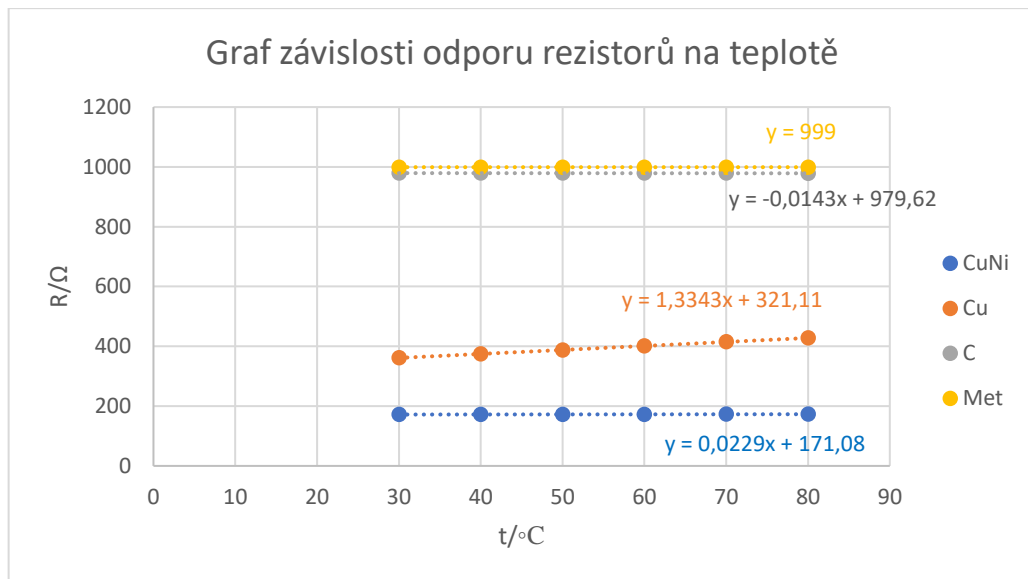
$$\alpha = \frac{-0,0143}{979,62} = -0,0146 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1} \quad (1-9)$$

Tabulka č. 1-8: Naměřené a vypočítané hodnoty pro rezistor Met

Met			
i	$\frac{t_i}{^\circ\text{C}}$	$\frac{R_t}{\Omega}$	$\frac{\alpha_i}{\text{K}^{-1}}$
0	30	999	-
1	40	999	0
2	50	999	0
3	60	999	0
4	70	999	0
5	80	999	0
-	-	-	$\bar{\alpha} = 0 \text{ K}^{-1}$

$$y = 999 \quad (1-10)$$

$$\alpha = \frac{0}{999} = 0 \text{ K}^{-1} \quad (1-11)$$



Obr. 1-8: Graf závislosti odporu rezistorů na teplotě

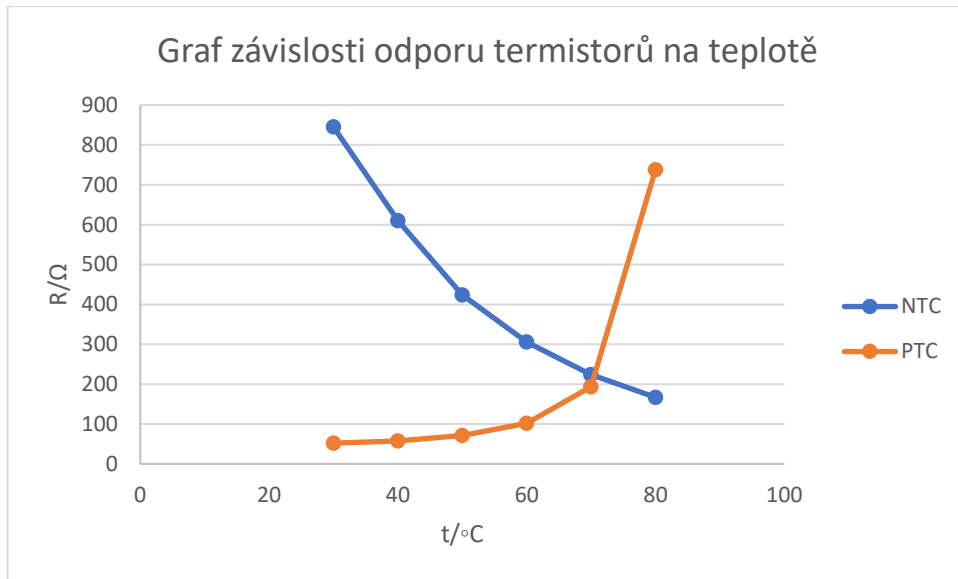
b) termistory

Tabulka č. 1-9: Naměřené hodnoty odporů termistoru NTC

NTC	
t °C	R_t Ω
30	845
40	610
50	424
60	306
70	224
80	167

Tabulka č. 1-10: Naměřené hodnoty odporů termistoru PTC

PTC	
t °C	R_t Ω
30	52
40	58
50	71
60	102
70	193
80	738



Obr. 1-9: Graf závislosti odporu termistorů na teplotě

1.4.2 Úkol č. 2

Z Ohmova zákona plyne pro odpor vztah

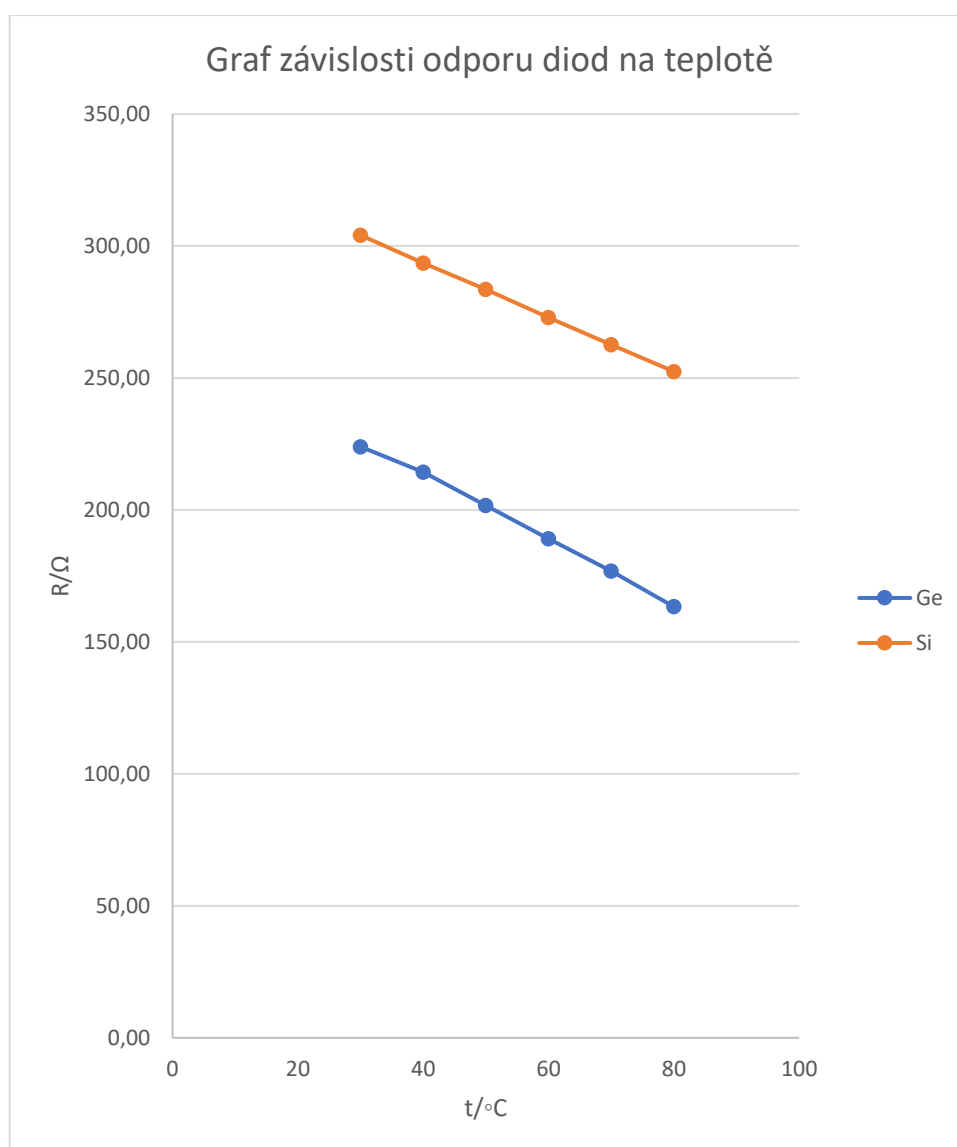
$$R_t = \frac{U_t}{I_t} \quad (1-12)$$

Tabulka č. 1-11: Naměřené a vypočtené hodnoty pro germaniovou diodu

Ge			
t °C	I_t mA	U_t V	R_t Ω
30	2,072	0,464	223,94
40	2,077	0,445	214,25
50	2,083	0,420	201,63
60	2,089	0,395	189,09
70	2,093	0,370	176,78
80	2,1	0,343	163,33

Tabulka č. 1-12: Naměřené a vypočtené hodnoty pro křemíkovou diodu

Si			
t °C	I_t mA	U_t V	R_t Ω
30	2,039	0,62	304,07
40	2,044	0,60	293,54
50	2,049	0,58	283,55
60	2,052	0,56	272,90
70	2,057	0,54	262,52
80	2,060	0,52	252,43



Obr. 1-10: Graf závislosti odporu diod na teplotě

1.4.3 Závěr laboratorního cvičení

Splnil jsem zadání laboratorního cvičení. Regresní křivky všech bodových grafů závislosti odporu rezistorů na teplotě přibližně odpovídají lineárnímu průběhu, což odpovídá poznatkům z teoretické části. Co se týče hodnot teplotních součinitelů odporu, lze konstatovat, že nelze zcela jednoznačně rozhodnout, která metoda určování teplotního koeficientu odporu je přesnější, neboť hodnoty získané oběma metodami relativně odpovídají hodnotám získaným z katalogových listů a z matematicko-fyzikálních a chemických tabulek (srovnání ukazuje tabulka 1-13). Poměrně malé hodnoty koeficientů u některých rezistorů jsou dány způsobem výroby daných rezistorů, která má eliminovat negativní závislosti způsobující nelinearitu funkce $U = f(I)$.

Spojnicové grafy vyjadřující teplotní závislost odporu termistorů taktéž odpovídají teoretické části úlohy. Průběhy funkcí $R = f(t)$ jsou skutečně značně nelineární. U pozistoru je funkce rostoucí, u negastoru naopak.

Měření jak křemíkové, tak germaniové diody potvrdilo, že odpor polovodičů s rostoucí teplotou klesá, což je jednou z charakteristických vlastností polovodičů. Závislost $R = f(t)$ se díky regresi ukázala být lineární, a proto by bylo možné určovat hodnoty koeficientu α stejně, jako tomu bylo v úkolu č. 1 u rezistorů.

Tabulka č. 1-13: Srovnání koeficientů teplotní závislosti odporu

látká	výpočet $\frac{\alpha}{10^{-3} \text{ K}^{-1}}$	regrese $\frac{\alpha}{10^{-3} \text{ K}^{-1}}$	MFChT a katalogové listy $\frac{\alpha}{10^{-3} \text{ K}^{-1}}$
CuNi	0,053	0,133	0,05
Cu	3,54	4,16	4
C	-0,004	-0,0146	-0,24
Met	0	0	blížící se 0

2 FARADAYOVA KONSTANTA

2.1 Teorie

a) elektrolýza, Faradayovy zákony elektrolýzy

Elektrolýzou rozumíme děj, při kterém průchodem stejnosměrného elektrického proudu elektrolytem, tj. elektricky vodivým roztokem, dochází k chemickým změnám v tomto roztoku a k vylučování látek na elektrodách [3]. Kvantitativně popisují vylučování látek na elektrodách Faradayovy zákony elektrolýzy.

První Faradayův zákon popisuje, jak závisí množství vyloučené látky na elektrodě s množstvím přeneseného náboje Q . Pro hmotnost vyloučené látky m platí

$$m = AQ = AIt, \quad (2-1)$$

kde A je elektrochemický ekvivalent a I je proud protékající elektrolytem po dobu t .

Ze vztahu (2-1) plyne, že závislost mezi hmotností vyloučené látky a prošlým nábojem má lineární průběh.

Druhý Faradayův zákon objasňuje, jak určit elektrochemický ekvivalent, platí

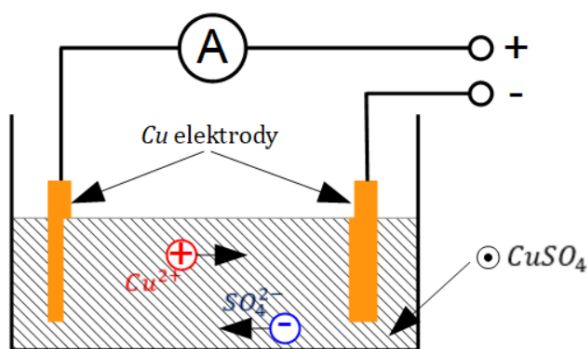
$$A = \frac{M_m}{F\nu}, \quad (2-2)$$

kde M_m značí molární hmotnost, ν je vaznost (neboli valence) a F je Faradayova konstanta ($F = 9,649 \cdot 10^4 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$).

Dosadíme-li ze vztahu (2-2) do vztahu (2-1) a vyjádříme Faradayovu konstantu, obdržíme vztah

$$F = \frac{M_m It}{m\nu}. \quad (2-3)$$

b) elektrolýza roztoku CuSO_4 pomocí měděných elektrod

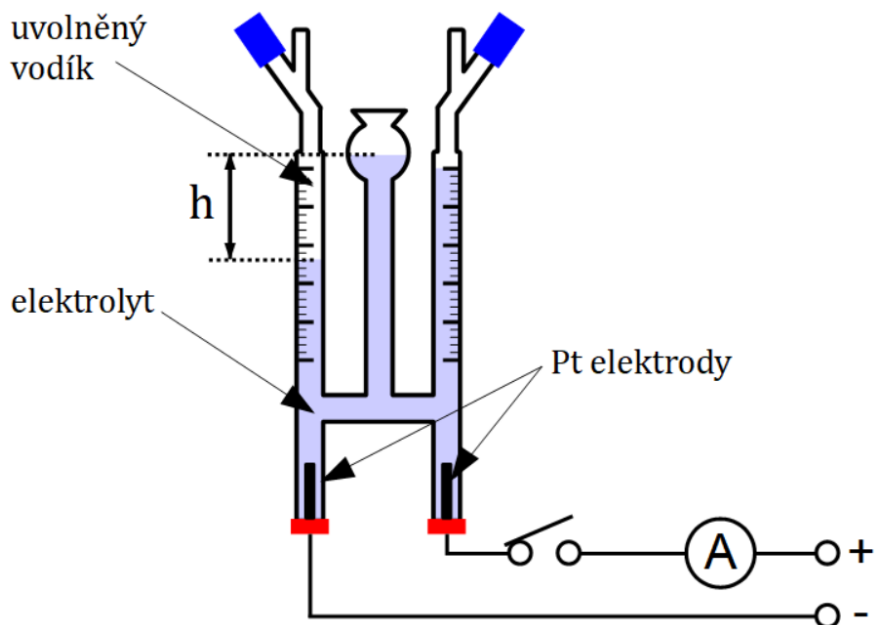


Obr. 2-1: Elektrolýza roztoku síranu měďnatého

Naplníme-li skleněnou vaničku roztokem CuSO_4 , jako elektrody použijeme dva měděné pláty a obvodem necháme protékat stejnosměrný proud, začne po určité době anoda ubývat a měď se vyloučí podle Faradayových zákonů na katodě. Roztok CuSO_4 totiž disociuje na kationty Cu^{2+} a anionty SO_4^{2-} . Kationty putují ke katodě, přebírají od ní dva elektrony a vylučují se na ní jako atomy mědi. Anionty SO_4^{2-} reagují s anodou, vzniká opět CuSO_4 . Děj je schematicky znázorněn na obr. 2-1.

c) Hofmannův přístroj

Hofmannův přístroj je přístroj s platinovými elektrodami používající se k elektrolýze vody, respektive slabě okyselené vody [5].



Obr. 2-2: Hofmannův přístroj

Průchodem elektrického proudu se začne na katodě vylučovat vodík a na anodě kyslík. Kyslík je pohlcován vodou, a proto je vhodné se zaměřit na vyloučený vodík, pro jehož hmotnost též platí vztah (2-1). Vzhledem k tomu, že se ale jedná o uvolněný plyn ve skleněné trubici s elektrolytem, je poměrně obtížné jej zvážit. Hofmannův přístroj je však opatřen stupnicí, díky níž lze odečíst objem vyloučeného vodíku. Ujijeme-li stavovou rovnici (2-4), lze hmotnost vodíku vypočítat. Stavová rovnice má tvar

$$pV = \frac{mRT}{M_m}, \quad (2-4)$$

kde V je objem plynu odečtený z Hofmannova přístroje, R je molární plynová konstanta ($R = 8,314 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$) a p je tlak uvolněného vodíku při termodynamické teplotě T .

Tlak uvolněného vodíku lze určit z elementární úvahy o rozložení plynu v Hoffmanově přístroji a z Raoultova zákona. Platí pro něj rovnice

$$p = p_b + h\rho g + x \cdot E, \quad (2-5)$$

kde p_b je barometrický tlak, ρ hustota elektrolytu, h je vzdálenost hladin v nádobě a v rameni s uvolněným vodíkem (viz obr. 2-2), g je tíhové zrychlení, x je molární zlomek popisující složení elektrolytu a E je napětí nasycených par nad elektrolytem [6].

2.2 Úkol č. 1 – Elektrolýza vody

2.2.1 Zadání úkolu

Stanovte Faradayovu konstantu pomocí elektrolýzy vody okyselené kyselinou sírovou.

2.2.2 Postup měření

a) Sestavte aparaturu podle obr. 2-2, jako zdroj použijte zdroj SZ 3.81.

b) Před měřením zkontrolujte Hofmannův přístroj

- Zkontrolujte, že je v obou ramenech přístroje dostatek elektrolytu a že je prostřední baňka přístroje asi do jedné třetiny plná.
- Dále ověřte, že jsou kohouty aparatury uzavřeny.

c) Splnění bodů a) a b) nechte zkontrolovat od vedoucího praktika.

d) Připravte Hofmannův přístroj k měření

- Na zdroji stejnosměrného proudu nastavte hodnotu proudu 0,1 A.
- Nechte probíhat elektrolýzu, dokud hladina v rameni s katodou neklesne na měřitelnou hodnotu, tj. dokud neklesne tak, aby bylo možné odečítat objem roztoku na stupnici.
- Hladinu nechte několik minut ustálit. Uvědomte si, že později budete zjišťovat, jaký objem vodíku se uvolnil. Je proto dobré si poznamenat, na jakém dílku stupnice se hladina ustálila.

e) Proved'te elektrolýzu při proudu 0,1 A

- Znovu sepněte obvod.
- Elektrolýzu nechte probíhat 20 minut.
- Po 20 minutách rozpojte obvod a odečtěte ze stupnice Hofmannova přístroje objem uvolněného vodíku V (rozdíl mezi hodnotou objemu před elektrolýzou a po ní).
- Vhodným měřítkem určete vzdálenost hladin h .
- Z připravené meteostanice odečtěte hodnotu barometrického tlaku p_b a teplotu T v místnosti.

f) Proved'te elektrolýzu při proudu 0,2 A. Postupujte jako v bodě e).

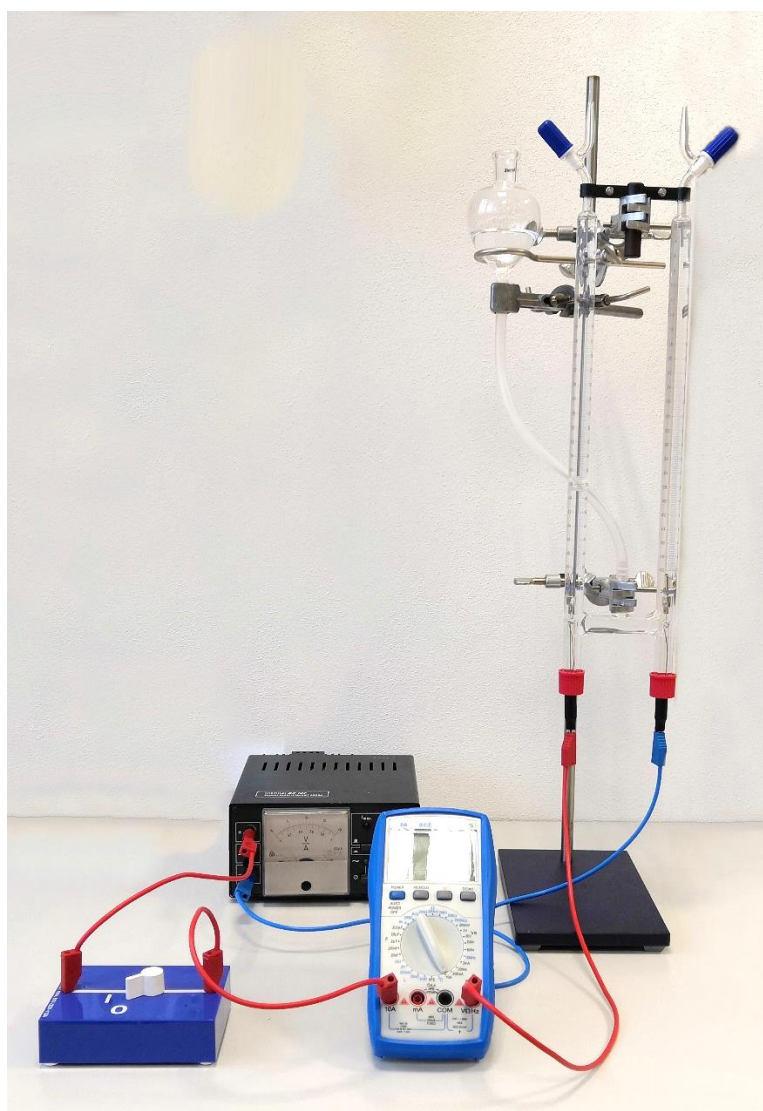
g) Zpracujte data měření

- Z naměřených hodnot pomocí rovnic (2-3), (2-4) a (2-5) vypočtete hodnoty Faradayovy konstanty (zvlášť pro hodnotu proudu 0,1 A a zvlášť pro proud 0,2 A).
- Stanovené hodnoty Faradayovy konstanty s porovnejte s tabulkovou hodnotou. Rozdíly okomentujte, zaměřte se zejména na zdroje chyb.
- Při zpracování dat budete potřebovat několik informací. Použitý elektrolyt byl 20% vodný roztok kyseliny sírové ($\rho = 1139 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, $x = 0,8$) s vazností $\nu = 2$. Hodnotu tenze nasycených par použitého elektrolytu pro stanovenou hodnotu teploty najdete v tabulce č. 2-1.

Tabulka č. 2-1: Hodnoty tenzí par nad hladinou elektrolytu v závislosti na teplotě [6]

t °C	$\frac{E}{\text{Pa}}$	t °C	$\frac{E}{\text{Pa}}$
17	1932	24	2985,92
18	2066,15	25	3172,54
19	2199,45	26	3359,16
20	2332,75	27	3559,11
21	2466,05	28	3772,39
22	2639,34	29	3999
23	2812,63	30	4238,94

2.2.3 Fotodokumentace úkolu



Obr. 2-3: Sestava pro elektrolýzu vody

2.3 Úkol č. 2 – Elektrolýza roztoku CuSO_4

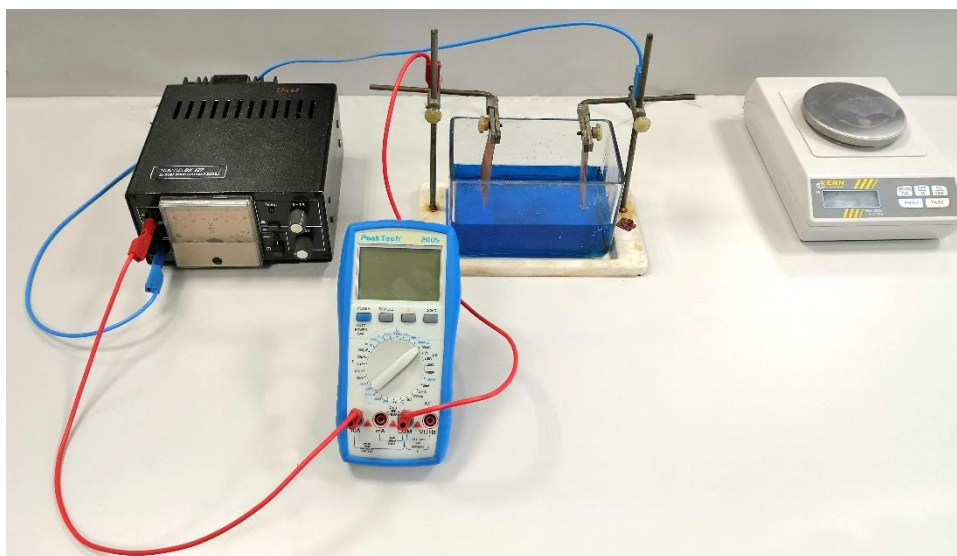
2.3.1 Zadání úkolu

Stanovte Faradayovu konstantu pomocí elektrolýzy roztoku CuSO_4 a měděných elektrod.

2.3.2 Postup měření

- a) Do připravené skleněné vaničky s roztokem CuSO_4 zaveďte dvě měděné elektrody.
- b) Vyberte jednu z elektrod, pomocí pravítka stanovte rozměry ponořené části elektrody a z těchto hodnot vypočtete její obsah. Pozor, elektroda byla ponořena v kyselině, pracujte s ní opatrně!
- c) Vámi zvolenou elektrodu pečlivě obrušte smirkovým papírem, omyjte ji vodou a opláchněte alkoholem. Posléze ji dobře osušte.
- d) Elektrodu zvažte na přesných digitálních laboratorních vahách, její hmotnost označte m_1 .
- e) Elektrodu opět zaveďte zpět do roztoku.
- f) Sestavte obvod podle obr. 2-1. Zváženou elektrodu použijte jako katodu (připojte ji k záporné svorce zdroje), jako zdroj použijte stabilizovaný zdroj SZ 3.81.
- g) Zapojení nechte zkontrolovat od vedoucího praktika.
- h) Obvodem nechte po dobu 20 minut protékat proud, jehož hodnotu stanovte tak, aby hustota proudu byla 0,01 A na 1 cm² plochy ponořené části elektrody.
- ch) Po 20 minutách vypněte zdroj, vyjměte katodu, omyjte ji vodou a usušte ji. Znovu ji zvažte, hmotnost označte m_2 .
- i) Zpracujte získaná data
 - Určete rozdíl hmotností m_1 a m_2 , označte jej jako m . Tato hmotnost představuje hmotnost mědi, která se na katodě vyloučila.
 - Určenou hmotnost vyloučené mědi m dosad'te do vzorce (2-3).
 - Za molární hmotnost mědi dosad'te $M_m(\text{Cu}) = 63,57 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$, vaznost mědi je $\nu(\text{Cu}) = 2$.
 - Stanovenou hodnotu Faradayovy konstanty porovnejte s tabulkovou hodnotou a s hodnotou, kterou jste stanovili v úkolu č. 1.

2.3.3 Fotodokumentace úkolu



Obr. 2-4: Sestava pro elektrolýzu roztoku síranu měďnatého

2.4 Zpracování dat měření

2.4.1 Úkol č. 1

Ze vzorců (2-3), (2-4) a (2-5) plyne pro Faradayovu konstantu vztah

$$F = \frac{ItRT}{Vv(p_b + h\rho g + x \cdot E)} \quad (2-6)$$

Při proudu $I = 0,1$ A bylo po $t = 1200$ s vyloučeno $V = 18$ ml vodíku. Rozdíl hladin činil $h = 0,19$ m. V místnosti byla teplota vzduchu $T = (24,6 + 273,15)$ K a barometrický tlak činil $p_b = 102800$ Pa. Dosazením do (2-6)

$$F = \frac{0,1 \cdot 1200 \cdot 8,314 \cdot (24,6 + 273,15)}{(18 \cdot 10^{-6}) \cdot 2 \cdot (102800 + 0,19 \cdot 1139 \cdot 9,81 + 0,8 \cdot 3172,54)} \quad (2-7)$$

$$F = 7,687 \cdot 10^4 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}. \quad (2-8)$$

V případě proudu $I = 0,2$ A vzniklo $V = 29$ ml vodíku, rozdíl hladin jsem stanovil $h = 0,29$ m. Ostatní hodnoty zůstaly nezměněny. Opětovným dosazením do (2-6)

$$F = \frac{0,2 \cdot 1200 \cdot 8,314 \cdot (24,6 + 273,15)}{(29 \cdot 10^{-6}) \cdot 2 \cdot (102800 + 0,29 \cdot 1139 \cdot 9,81 + 0,8 \cdot 3172,54)} \quad (2-9)$$

$$F = 9,434 \cdot 10^4 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}. \quad (2-10)$$

2.4.2 Úkol č. 2

Pomocí pravítka jsem stanovil plochu katody $S = 19,6 \text{ cm}^2$. Na elektrolýzu bude tedy potřeba proud $I = 19,6 \cdot 0,01 \text{ A} = 0,196 \text{ A}$. Hmotnost katody před zahájením elektrolýzy je $m_1 = 15,04 \text{ g}$.

Elektrolýzu jsem nechal probíhat po dobu $t = 1200$ s, hmotnost elektrody pak byla $m_2 = 15,13 \text{ g}$. Hmotnost vyloučené mědi tedy činí $m = m_2 - m_1 = 0,09 \text{ g}$.

Dosazením do (2-3) získáváme Faradayovu konstantu

$$F = \frac{M_m It}{mv} = \frac{(63,57 \cdot 10^{-3}) \cdot 0,196 \cdot 1200}{(0,09 \cdot 10^{-3}) \cdot 2} = 8,333 \cdot 10^4 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}. \quad (2-11)$$

2.4.3 Závěr laboratorního cvičení

Splnil jsem zadání laboratorního cvičení a nedopustil jsem se žádných hrubých chyb. Stanovil jsem hodnoty Faradayovy konstanty, jejichž přehled udává tabulka č. 2-2.

V případě Hofmannova přístroje hraje nemalou roli systematická chyba – způsob měření rozdílu hladin bohužel není ideální. Vzhledem k výsledkům měření se nabízí otázka, zda vyšší proud v obvodu s Hofmannovým přístrojem zvyšuje přesnost.

V případě úkolu č. 2 přisuzuji chybu nepřesnému měření rozměrů elektrod (elektrody jsou již opotřebený a jejich tvar již není dokonalý obdélník) a nepřesnému vážení, neboť u takto malých hmotností má vliv i malá absolutní nepřesnost. Pro zvýšení přesnosti by možná pomohlo provádět elektrolýzu delší dobu, čímž by hmotnost vyloučené látky vzrostla a relativní chyba měření by byla menší.

Tabulka č. 2-2: Porovnání naměřených a tabulkových hodnot

	$\frac{F}{\text{C} \cdot \text{mol}^{-1}}$
elektrolýza CuSO_4	$8,333 \cdot 10^4$
Hofmannův přístroj, $I = 0,1 \text{ A}$	$7,687 \cdot 10^4$
Hofmannův přístroj, $I = 0,2 \text{ A}$	$9,434 \cdot 10^4$
MFChT	$9,649 \cdot 10^4$

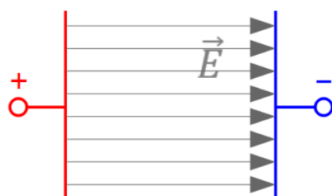
3 HOMOGENNÍ ELEKTRICKÉ POLE

3.1 Teorie

a) elektrické pole

Elektrické pole je podle klasické fyziky (stejně jako ostatní druhy polí) formou hmoty (druhou formou hmoty je látka) projevující se elektrickými silami [7]. Vylíšujeme dva zvláštní druhy polí – radiální a homogenní, což platí i pro pole elektrická. Pro popis elektrického pole zavádíme novou fyzikální veličinu – intenzitu elektrického pole \vec{E} , jejíž v praxi nejběžnější jednotkou je volt na metr ($V \cdot m^{-1}$).

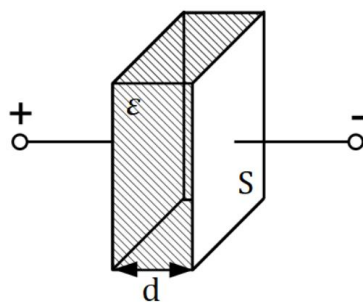
Homogenní elektrické pole je pole, jehož intenzita má ve všech místech stejnou velikost i směr ($\vec{E} = \overrightarrow{\text{konst.}}$). Příkladem je pole mezi dvěma rovnoběžnými deskami s opačnou polaritou (viz obr. 3-1).



Obr. 3-1: Ukázka homogenního elektrického pole

b) kondenzátor, kapacita

Kondenzátorem označujeme dvě vzájemně odizolovaná tělesa, mezi nimiž je napětí. Charakteristickou vlastností kondenzátoru je schopnost pojmout určité množství náboje. Pro kvantitativní vyjádření této vlastnosti zavádíme novou fyzikální veličinu – kapacitu (značka C), která má na počest Michaela Faradaye jednotku nazvanou farad. Existuje několik typů kondenzátoru, které se vzájemně liší konstrukcí, nejjednodušším je však kondenzátor deskový, který definujeme jako dvě rovnoběžné vodivé desky o ploše S , jež jsou od sebe ve vzdálenosti d a jež mezi sebou mají dielektrikum o absolutní permitivitě ϵ . Každá deska je připojena k jiné svorce zdroje napětí U (viz obr. 3-2).



Obr. 3-2: Schéma deskového kondenzátoru

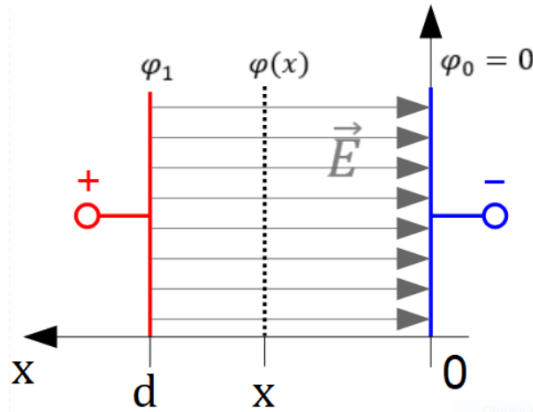
Mezi deskami vzniká homogenní elektrické pole o intenzitě \vec{E} (obr. 3-1), pro které platí vztah

$$E = \frac{U}{d}. \quad (3-1)$$

Napětí definujeme jako rozdíl dvou potenciálů, je proto zřejmé, že má každá deska kondenzátoru jiný potenciál. Potenciál desky připojené k záporné svorce zdroje je $\varphi_0 = 0$, kdežto kladně nabitá deska má potenciál $\varphi_1 = U$.

Zvolíme-li uvnitř kondenzátoru libovolnou rovinu rovnoběžnou s rovinou záporné desky kondenzátoru ve vzdálenosti x , platí pro její potenciál φ (námi zvolená rovina tvoří ekvipotenciální plochu, tj. plochu se stejným potenciálem) následující lineární vztah [7]

$$\varphi(x) = \varphi_0 + Ex. \quad (3-2)$$



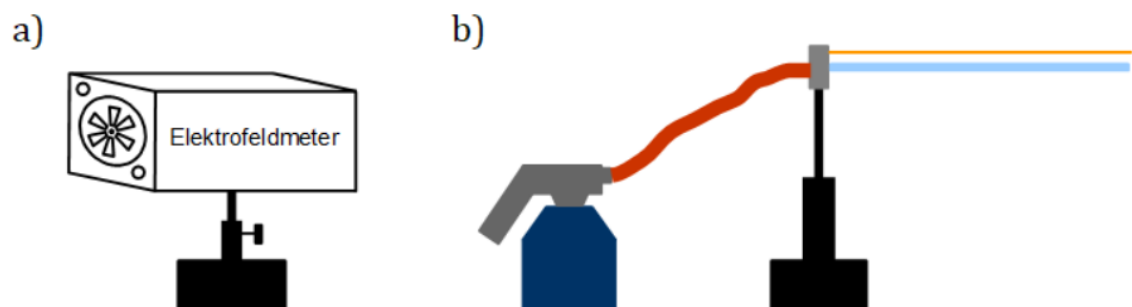
Obr. 3-3: Deskový kondenzátor – intenzita a ekvipotenciální vrstvy

c) měřič elektrického pole (MEP) [5]

Měřič elektrického pole (německy Elektrofelfmeter) je přístroj, který se používá ke stanovení veličin popisující elektrické pole pomocí měření, tj. k měření intenzity homogenního elektrického pole a ke stanovení hodnot potenciálů ekvipotenciálních ploch.

Princip měření intenzity je následující. Elektrické pole indukuje náboj na povrchu vodiče (v našem případě na povrchu desky kondenzátoru). MEP je schopen tato data získaná měřicí sondou převést na výstup v podobě napětí (napětí následně pomocí převodních vztahů uvedených na MEP převedeme na hodnoty intenzity elektrického pole).

Měření potenciálů probíhá prostřednictvím speciální elektrody, na jejíž špičce se indukuje náboj o velké hustotě (plošná hustota náboje je největší na ostrých místech). Tento náboj však musíme kompenzovat, a proto je ke konci elektrody přiváděn skleněnou kapilárou propan-butan, díky němuž můžeme u špičky elektrody zapálit plamen, který ionizuje vzduch v jeho okolí, a tím kompenzujeme povrchový náboj elektrody. Elektroda je spojena s MEP, který opět převede naměřené hodnoty na hodnoty napětí, které jsou měřitelné digitálním multimetrem.



Obr. 3-4: Schématické vyobrazení: a) MEP, b) sondy pro stanovení ekvipotenciálních ploch

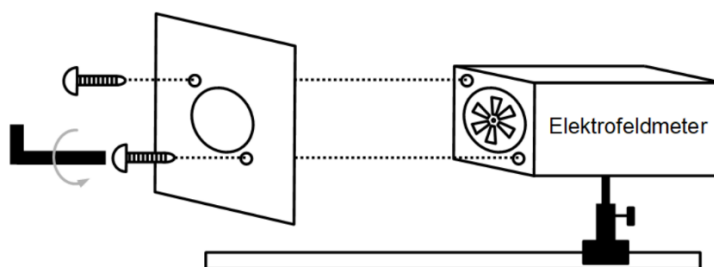
3.2 Úkol č. 1 – Závislost intenzity el. pole na vzdálenosti desek

3.2.1 Zadání úkolu

Proměřte závislost intenzity homogenního elektrického pole uvnitř deskového kondenzátoru na vzdálenosti desek kondenzátoru.

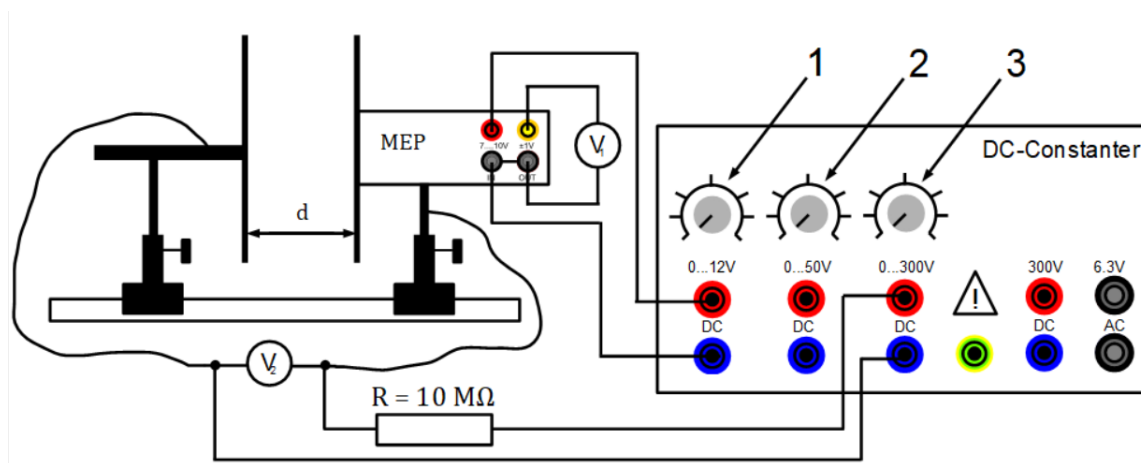
3.2.2 Postup měření

a) Sestavte kondenzátor. K jedné desce kondenzátoru připojte MEP – sondu přístroje (pozlacená kruhová elektroda s rotujícím diskem, který obsahuje několik výřezů) zasuňte do kruhového výřezu na desce kondenzátoru. Příklad upevnění pomocí šroubů. Postup je znázorněn na obr. 3-5.



Obr. 3-5: Schéma ukotvení čtecí hlavy MEP k desce kondenzátoru

b) Zapojte obvod podle obr. 3-6 (vzdálenost nastavte $d = 10\text{ cm}$). Nezapomeňte zkontrolovat, jestli je zdroj napětí vypnutý, tj. jestli jsou nastavovací knoflíky zdroje nastaveny na minimum (nastavovací knoflíky jsou na obr. 3-6 označeny čísly 1, 2 a 3). Zapojení nechte zkontrolovat od vedoucího praktika.



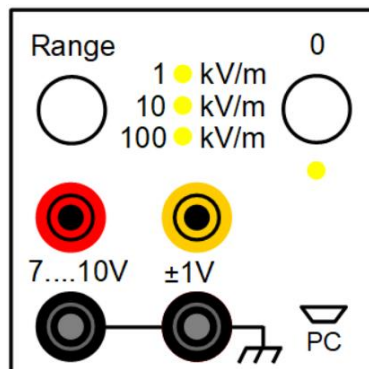
Obr. 3-6: Schéma zapojení obvodu k měření intenzity elektrického pole.

c) Připravte MEP k měření

- Zkratujte desky kondenzátoru – volným vodičem propojte obě kovové desky, tím dojde k vyrovnání náboje na obou deskách.
- Zapněte MEP, tj. otočný knoflík pro výstupní napětí 0 ... 12 V (otočný knoflík č. 1 na obr. 3-6) nastavte na hodnotu 10 V.
- Příklad kalibrace – jakmile se na přístroji rozsvítí zelená kontrolka u rozsahu 1 kV/m, stiskněte na čelním panelu MEP tlačítko s označením „0“ – diody u měřicích rozsahů začnou střídavě blikat (viz obr. 3-7). Neprodleně po zahájení probíhávání

diod stiskněte a krátce přidržíte tlačítko „0“. Nejprve několikrát zabliká první dioda, následně několikrát zabliká druhá dioda a konečně i třetí dioda. Provede-li se nastavení úspěšně, přestanou všechny diody blikat a opět se rozsvítí zelená kontrolka u rozsahu 1 kV/m.

- Změňte pomocí tlačítka s označením „Range“ rozsah na hodnotu 10 kV/m.



Obr. 3-7: Čelní panel MEP

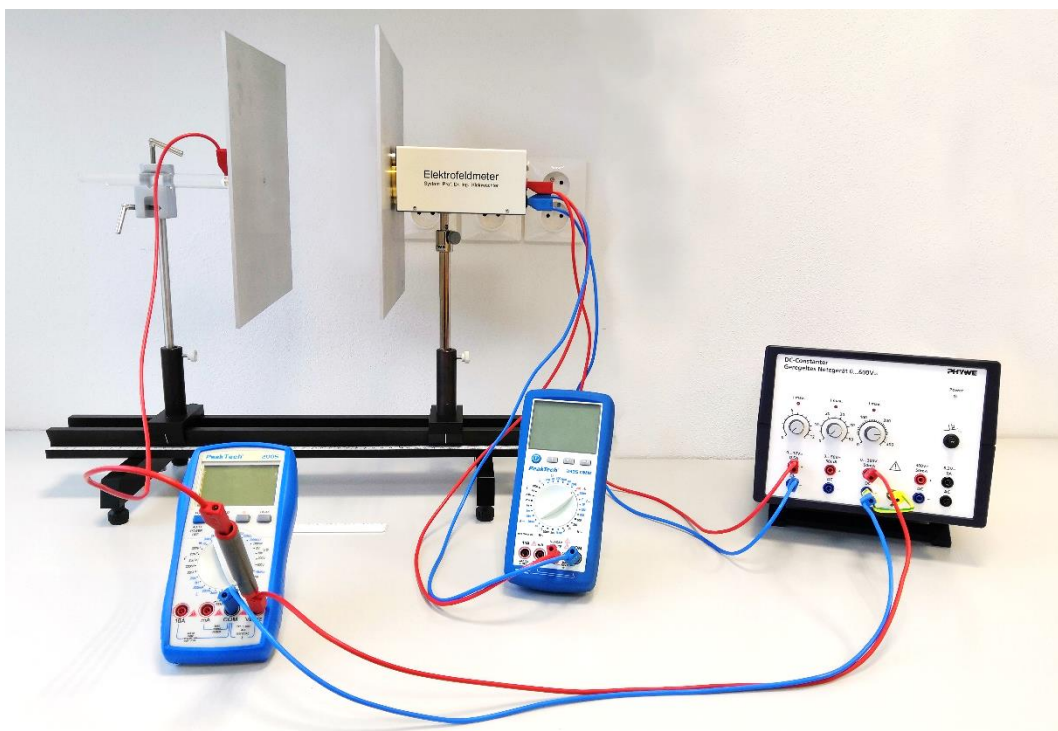
- Odstraňte zkratovací vodič, který propojuje desky kondenzátoru!
- Na zdroji nastavte na svorkách 0 ... 300V hodnotu napětí $U_2 = 200$ V (pomocí otočného knoflíku 3 na obr. 3-6), hodnotu zkontrolujte na digitálním multimetru.
- Proměřte závislost napětí U_1 na vzdálenosti desek. Vzdálenost desek d volte 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 a 18 cm. Během celého měření ponechte hodnotu napětí U_2 konstantní! Změřená napětí U_1 zapisujte do tabulky č. 3-1.
- V tabulce přepočítejte naměřené hodnoty napětí na hodnoty intenzity elektrického pole (v tabulce označeno jako E_n). Klíč pro zvolený rozsah je následující: 1 V na voltmetru odpovídá intenzitě $10 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$.
- Intenzity elektrického pole pro dané vzdálenosti vypočítejte pomocí vztahu (3-1) z teoretické části, taktéž je zaznamenejte do tabulky č. 3-1 (označeno E_v).
- Zpracujte získaná data
 - Sestavte bodové grafy $E_n = f(d)$ a $E_v = f(d)$, proveďte vhodnou regresi a průběhy vložených křivek porovnejte.
 - Naměřené a vypočtené hodnoty v závěru porovnejte a rozdíly okomentujte.

3.2.3 Tabulky vhodné pro zpracování výsledků měření

Tabulka č. 3-1: Tabulka pro zaznamenání hodnot měření při konstantním napětí U_2

$\frac{d}{\text{cm}}$	$\frac{U_1}{\text{V}}$	$\frac{E_n}{\text{kV} \cdot \text{m}^{-1}}$	$\frac{E_v}{\text{kV} \cdot \text{m}^{-1}}$
2			
⋮			
18			

3.2.4 Fotodokumentace úkolu



Obr. 3-8: Sestava pro určení závislosti intenzity el. pole na vzdálenosti desek

3.3 Úkol č. 2 – Závislost intenzity el. pole na napětí vnějšího zdroje

3.3.1 Zadání úkolu

Proměřte závislost intenzity homogenního elektrického pole uvnitř deskového kondenzátoru na velikosti napětí vnějšího zdroje.

3.3.2 Postup měření

- Znovu proveďte body a) až f) z úkolu č. 1, pouze rozsah změňte na 100 kV/m.
- Proměřte závislost napětí U_1 na napětí vnějšího zdroje U_2 při konstantní vzdálenosti desek $d = 10$ cm. Napětí vnějšího zdroje postupně nastavujte v intervalu od 50 do 300 V s krokem 25 V. Hodnoty napětí U_1 zaznamenávejte do tabulky č. 3-2.
- Proveďte přepočítání U_1 na intenzitu elektrického pole (1 V na výstupu MEP odpovídá intenzitě 100 kV/m), podle vztahu (3-1) vypočítejte teoretickou hodnotu intenzity E_v . Sestavte bodové grafy $E_v = f(U_2)$ a $E_n = f(U_2)$, proveďte regresi, výsledky okomentujte.

3.3.3 Tabulky vhodné pro zpracování výsledků měření

Tabulka č. 3-2: Tabulka pro zaznamenání hodnot měření při konstantní vzdálenosti desek

$\frac{U_2}{V}$	$\frac{U_1}{V}$	$\frac{E_n}{\text{kV} \cdot \text{m}^{-1}}$	$\frac{E_v}{\text{kV} \cdot \text{m}^{-1}}$
50			
⋮			
300			

3.3.4 Fotodokumentace úkolu

Zapojení odpovídá fotodokumentaci u předchozího úkolu (viz obr. 3-8).

3.4 Úkol č. 3 – Měření hladin potenciálů

3.4.1 Zadání úkolu

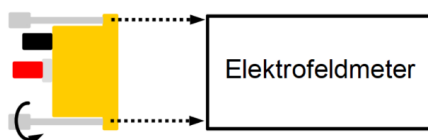
Pomocí speciální sondy proměřte ekvipotenciální plochy uvnitř homogenního elektrického pole.

3.4.2 Postup měření

a) Sestavte kondenzátor. Tentokrát použijte dvě totožné desky (čili bez otvoru pro umístění MEP). Mezi deskami nastavte vzdálenost $d = 10$ cm a desky zkratujte.

b) Připravte MEP k měření

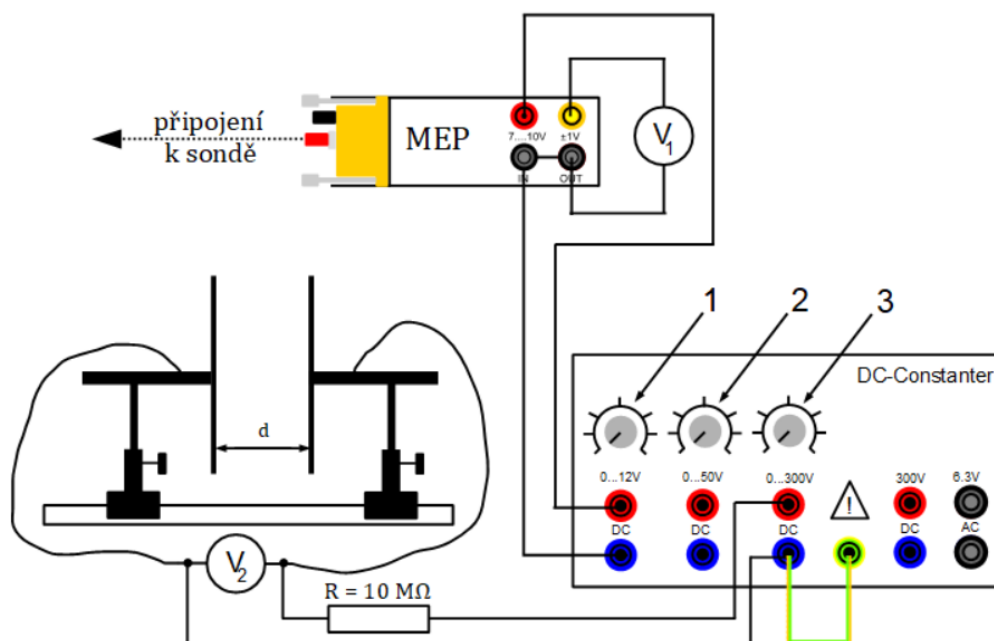
- Nejprve na MEP upevněte pomocí šroubů speciální kruhovou krytku zlaté barvy, která má dva barevně odlišené konektory (viz obr. 3-9).



Obr. 3-9: Montáž speciální měřicí hlavy MEP

- Kromě samotného MEP bude potřeba zvláštní sonda – kovový vodič je upevněn ke skleněné trubičce, do které je pomocí gumové hadičky přiváděn propan-butan (viz obr. 3-4b).
- Vodičem propojte kovovou sondu s červenou zdírkou na kruhové hlavě MEP.

c) Sestavte obvod podle obr. 3-10, zdroj ponechte vypnutý!



Obr. 3-10: Zapojení MEP pro stanovení potenciálů.

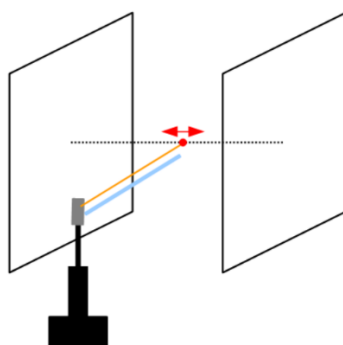
d) Sondu umístěte mezi desky kondenzátoru. Pozor, sonda se nikdy nesmí dotknout desek!

e) Nechte zapojení zkontrolovat a zapněte MEP, nastavte na něm nulovou hodnotu a rozsah 100 kV/m. Postupujte podle návodu u úkolů 1 a 2! Sondy vyjměte z kondenzátoru.

f) Na zdroji napětí nastavte na svorkách 0 ... 300V hodnotu napětí $U_2 = 250 \text{ V}$ (pomocí otočného knoflíku 3 na obr. 3-10), hodnotu překontrolujte na digitálním multimetru V_2 a dále ji v průběhu měření neměňte!

g) Jemně pootevřete ventil na bombičce propan-butanu a u konce skleněné tyčinky sondy opatrně zapalte plamen. Pomocí ventilu zkorrigujte jeho velikost asi na 4 mm.

h) Konec sondy s plamenem vložte mezi nabitě desky kondenzátoru a nastavte ji tak, aby byl plamen vzdálen 1 cm od desky připojené k záporné svorce zdroje napětí. Pozor, po celou dobu se snažte, aby se špička sondy pohybovala po společné ose obou desek (viz obr. 3-11). Zapište hodnotu napětí U_1 . Totéž proveďte pro hodnoty vzdálenosti sondy 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 a 9 centimetrů. Výsledky měření zaznamenávejte do tabulky č. 3-3.



Obr. 3-11: Umístění sondy mezi desky

ch) Pomocí převodního vztahu přepočtete hodnotu napětí U_1 ve vzdálenosti x na hodnotu potenciálu φ_n v dané vzdálenosti. Klíč je následující: 1 V na voltmetru odpovídá hodnotě potenciálu 1000 V.

i) V uvažovaných vzdálenostech dopočtete podle vztahu (3-2) hodnoty potenciálů φ_v . Hodnotu intenzity, kterou budete ve výpočtu potřebovat, získáte ze vztahu (3-1).

j) Zpracujte data měření:

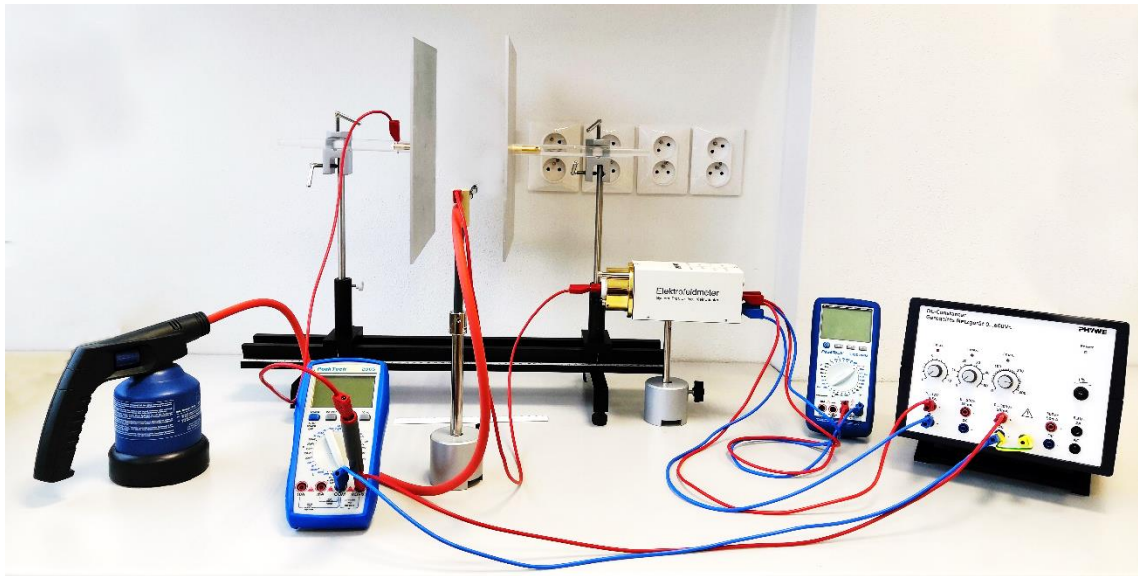
- Sestavte bodové grafy $\varphi_n = f(x)$ a $\varphi_v = f(x)$, proveďte vhodnou regresi a průběhy vložených křivek porovnejte.
- Z regresní křivky grafu $\varphi_n = f(x)$ určete, jaký potenciál má podle vámi získaných hodnot potenciálů kladně nabitá deska.
- Naměřené a vypočtené hodnoty v závěru porovnejte a rozdíly okomentujte.

3.4.3 Tabulky vhodné pro zpracování výsledků měření

Tabulka č. 3-3: Tabulka pro zaznamenání hodnot měření potenciálů

$\frac{x}{\text{cm}}$	$\frac{U_1}{\text{V}}$	$\frac{\varphi_n}{\text{V}}$	$\frac{\varphi_v}{\text{V}}$
1			
⋮			
9			

3.4.4 Fotodokumentace úkolu



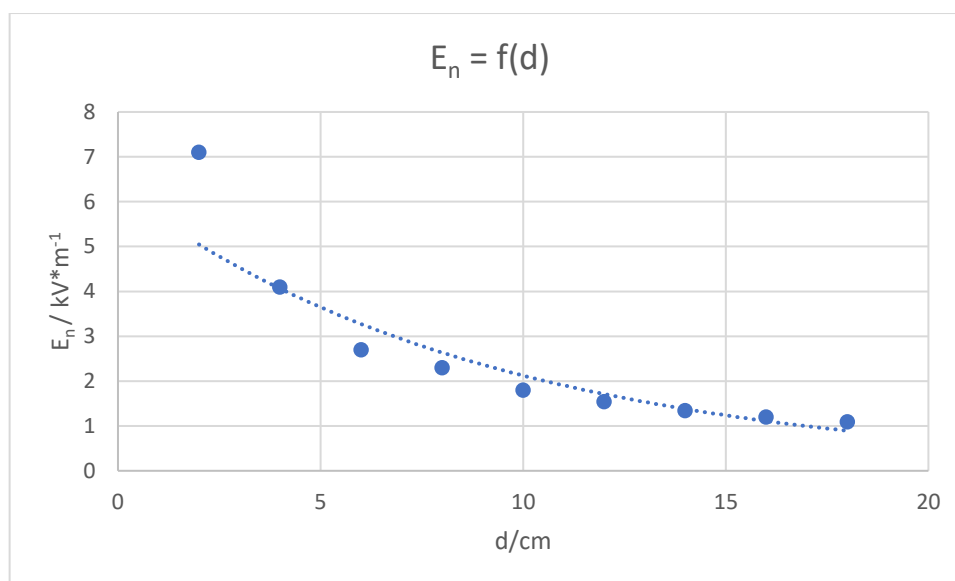
Obr. 3-12: Sestava pro určení ekvipotenciálních ploch uvnitř deskového kondenzátoru

3.5 Zpracování dat měření

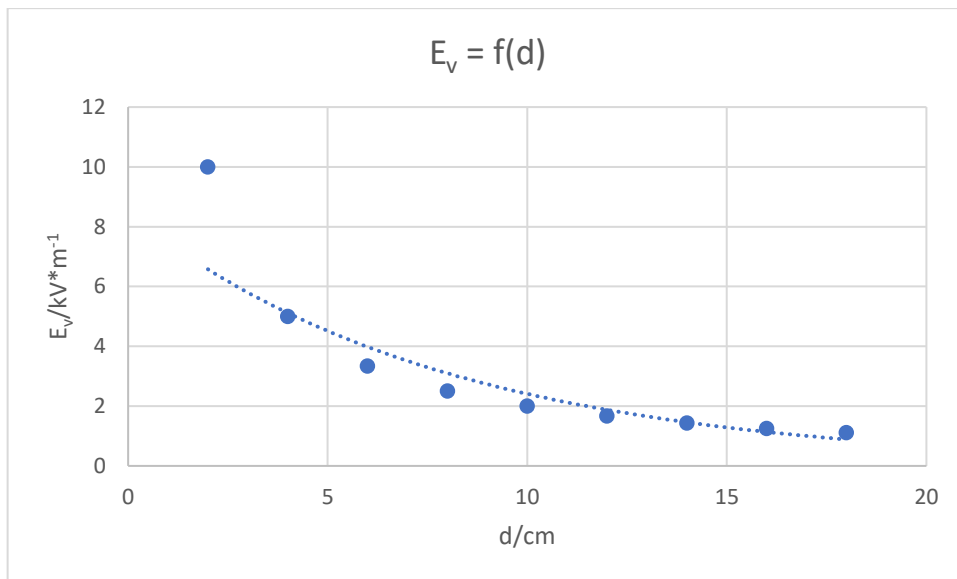
3.5.1 Úkol č. 1

Tabulka č. 3-4: Hodnoty pro určení závislosti intenzity na vzdálenosti desek

$\frac{d}{\text{cm}}$	$\frac{U_1}{\text{V}}$	$\frac{E_n}{\text{kV} \cdot \text{m}^{-1}}$	$\frac{E_v}{\text{kV} \cdot \text{m}^{-1}}$
2	0,71	7,10	10,00
4	0,41	4,10	5,00
6	0,27	2,70	3,34
8	0,23	2,30	2,50
10	0,18	1,80	2,00
12	0,16	1,54	1,67
14	0,14	1,34	1,43
16	0,12	1,20	1,25
18	0,11	1,09	1,11



Obr. 3-13: Závislost naměřených hodnot intenzity na vzdálenosti desek

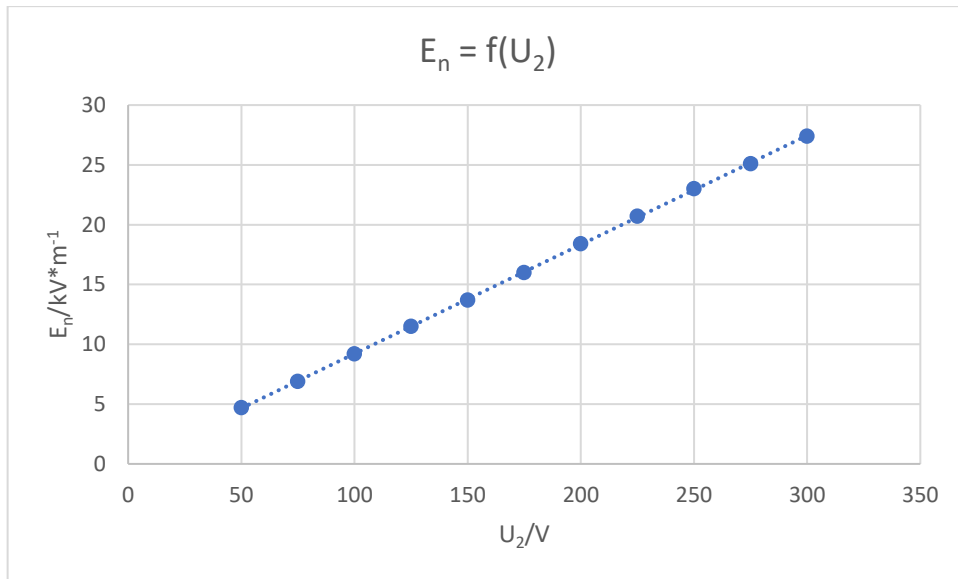


Obr. 3-14: Závislost vypočtených hodnot intenzity na vzdálenosti desek

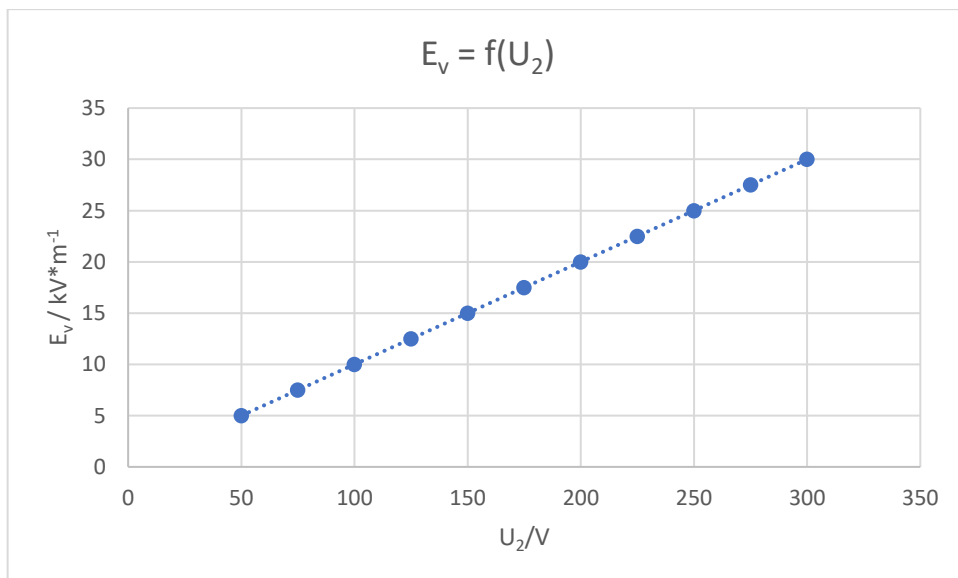
3.5.2 Úkol č. 2

Tabulka č. 3-5: Hodnoty pro určení závislosti intenzity na napětí vnějšího zdroje

$\frac{U_2}{V}$	$\frac{U_1}{V}$	$\frac{E_n}{kV \cdot m^{-1}}$	$\frac{E_v}{kV \cdot m^{-1}}$
50	0,047	4,7	5,0
75	0,069	6,9	7,5
100	0,092	9,2	10,0
125	0,115	11,5	12,5
150	0,137	13,7	15,0
175	0,160	16,0	17,5
200	0,184	18,4	20,0
225	0,207	20,7	22,5
250	0,230	23,0	25,0
275	0,251	25,1	27,5
300	0,274	27,4	30,0



Obr. 3-15: Závislost naměřených hodnot intenzity na vnějším napětí

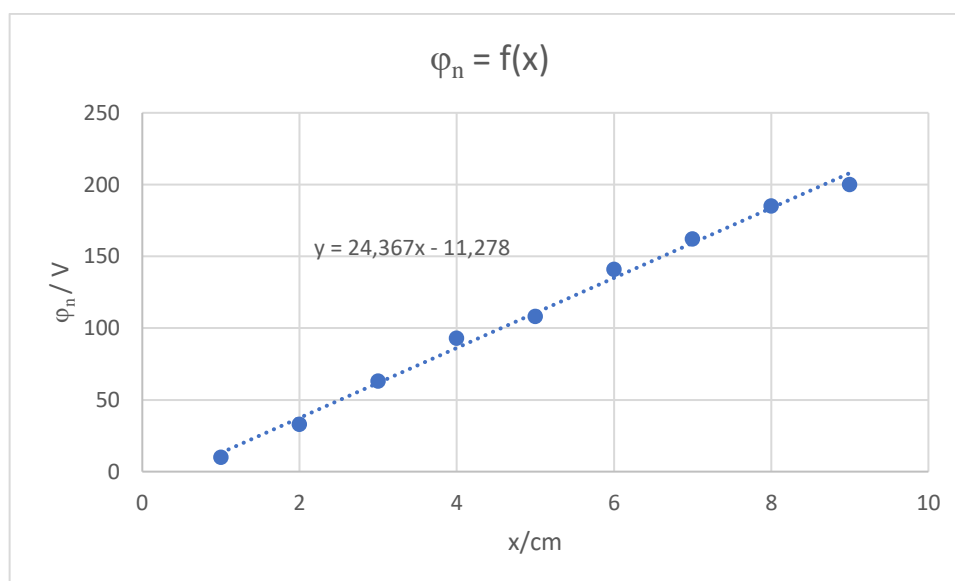


Obr. 3-16: Závislost vypočtených hodnot intenzity na vnějším napětí

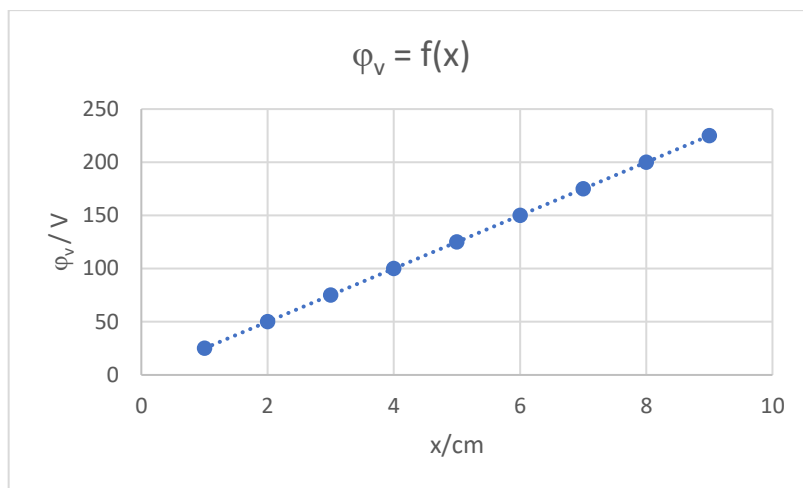
3.5.3 Úkol č. 3

Tabulka č. 3-6: Hodnoty pro stanovení potenciálů ekvipotenciálních ploch

$\frac{x}{\text{cm}}$	$\frac{U_1}{\text{V}}$	$\frac{\varphi_n}{\text{V}}$	$\frac{\varphi_v}{\text{V}}$
1	0,010	10	25
2	0,033	33	50
3	0,063	63	75
4	0,093	93	100
5	0,108	108	125
6	0,141	141	150
7	0,162	162	175
8	0,185	185	200
9	0,200	200	225



Obr. 3-17: Závislost naměřených potenciálů na vzdálenosti sondy



Obr. 3-18: Závislost vypočtených potenciálů na vzdálenosti sondy

Potenciál kladné svorky určený z regrese

- rovnice regresní křivky

$$y = 24,367x - 11,278 \quad (3-3)$$

- přeznačením

$$\varphi_n = 24,367x - 11,278 \quad (3-4)$$

- kladná deska je od záporné ve vzdálenosti $x = 10 \text{ cm}$, a proto

$$\varphi_{n1} = 24,367 \cdot 10 - 11,278 = 232,4 \text{ V} \quad (3-5)$$

3.5.4 Závěr laboratorního cvičení

Splnil jsem zadání laboratorního cvičení. V úkolu č. 1 jsem proměřil závislost intenzity elektrického pole. Průběh funkce $E_n = f(d)$ odpovídá teoretickému vztahu (3-1), což je zřejmé porovnáním grafu s grafem $E_v = f(d)$. Totéž lze tvrdit i o grafech závislosti intenzity elektrického pole na napětí vnějšího zdroje z úkolu č. 2. Bohužel se v úkolu č. 1 ukázala nevhodnost programu Excel pro sestavování grafů nepřímé úměry. V úkolu č. 3 jsem proměřil ekvipotenciální plochy uvnitř deskového kondenzátoru, čímž došlo k ověření teoretického vztahu (3-2). Z rovnice regresní křivky funkce $\varphi_n = f(x)$ jsem stanovil hodnotu potenciálu kladné desky $\varphi_{n1} = 232,4 \text{ V}$.

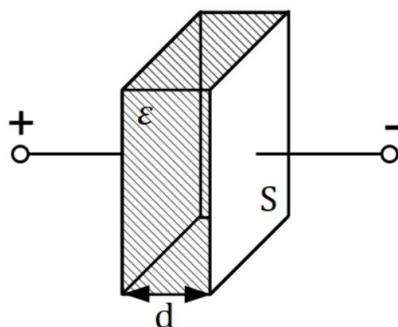
Ve všech třech úkolech lze konstatovat, že jsou naměřené hodnoty o něco nižší než hodnoty teoretické. Chyba dle mého mohla vzniknout v předpokladu – soustava desek byla považována za ideální homogenní elektrické pole, a proto bylo předpokládáno rovnoměrné rozložení náboje na deskách. Osobně se přikláním k tomu, že v místě, kde probíhalo měření, byla hustota náboje nižší, kdežto na hranách desek docházelo k jeho hromadění. Nevylučuji však ani špatnou kalibraci MEPu.

4 PERMITIVITA

4.1 Teorie

a) deskový kondenzátor a jeho kapacita

Hovoříme-li o deskovém kondenzátoru, máme na mysli dvě rovnoběžné vodivé desky o ploše S ve vzdálenosti d od sebe, přičemž mezi deskami je určitá dielektrická látka, která je charakterizována konstantou ε . Mezi deskami, necht' je měřitelné napětí U . Deskový kondenzátor je schematicky uveden na obr. 4-1.



Obr. 4-1: Schéma deskového kondenzátoru

Kondenzátory mají typickou vlastnost, tj. schopnost pojmou určité množství náboje. Tuto vlastnost lze popsat díky skalární fyzikální veličině – kapacitě (značka C) s jednotkou farad (značka F). V případě deskového kondenzátoru pro kapacitu platí

$$C = \frac{\varepsilon S}{d}, \quad (4-1)$$

kde

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r, \quad (4-2)$$

přičemž ε nazýváme absolutní permitivitou dielektrika, ε_0 nese název permitivita vakua ($\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$) a ε_r je relativní permitivita látky, jež je umístěna mezi deskami (pro vzduch $\varepsilon_r \rightarrow 1$).

Mezi napětím U a nábojem Q na deskách kondenzátoru platí přímá úměrnost, přičemž konstantou úměrnosti je právě kapacita [7]. Vztah platí obecně pro všechny kondenzátory a matematicky jej lze zapsat jako

$$Q = CU. \quad (4-3)$$

b) dielektrikum v elektrickém poli

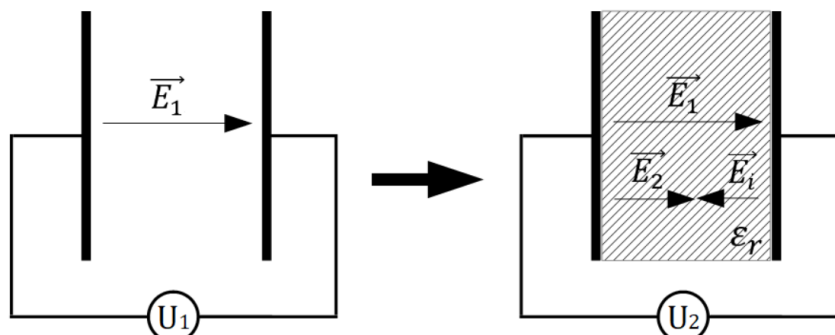
Mějme vzduchový deskový kondenzátor, mezi jeho deskami naměříme napětí U_1 . Vložíme-li mezi desky kondenzátoru nevodivou látku, naměříme napětí o něco nižší, označme jej U_2 .

Příčinou tohoto jevu jsou vázané náboje na povrchu dielektrika – díky nim v dielektriku vzniká elektrické pole o intenzitě \vec{E}_1 opačného směru, než je směr intenzity původního pole \vec{E}_1 , výsledné pole uvnitř kondenzátoru je proto v důsledku slabší a napětí na svorkách menší [1]. Celou situaci lze pozorovat na obr. 4-2.

Platí

$$\varepsilon_r = \frac{U_1}{U_2} = \frac{E_1 d}{E_2 d} = \frac{E_1}{E_2}, \quad (4-4)$$

kde ε_r je již zmiňovaná relativní permitivita a d je vzdálenost desek.



Obr. 4-2: Zeslabení elektrického pole vlivem dielektrika uvnitř kondenzátoru

c) měření kapacity pomocí kondenzátoru se známou kapacitou

Nejprve nabijeme kondenzátor o neznámé kapacitě C napětím U (viz obr. 4-3a) a posléze vnější zdroj odpojíme. Připojíme-li k nabitému kondenzátoru C kondenzátor o známé kapacitě C_0 , přičemž víme, že $C \ll C_0$, lze dost dobře předpokládat, že se bude na kondenzátoru C_0 indukovat náboj Q , který bude mít stejnou velikost jako náboj na kondenzátoru C [5]. Přenos náboje je znázorněn na obr. 4-3b).

Pro indukovaný náboj na kondenzátoru C_0 bude platit vztah (4-3), přeindexováním

$$Q = C_0 U_0, \quad (4-5)$$

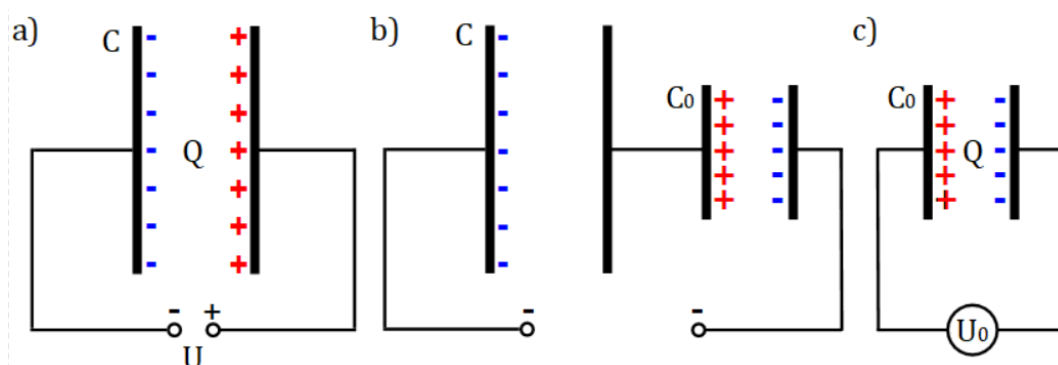
kde U_0 je napětí na kondenzátoru C_0 (viz obr. 4-3c).

S využitím rovnosti nábojů kondenzátorů C a C_0 získáváme pro kapacitu C porovnáním vztahů (4-3) a (4-5) výraz

$$C = \frac{C_0 U_0}{U}. \quad (4-6)$$

Dosazením za C podle vztahu (4-1) do vztahu (4-6) získáváme pro absolutní permitivitu

$$\varepsilon = \frac{C_0 U_0 d}{S U}. \quad (4-7)$$



Obr. 4-3: K měření kapacity

4.2 Úkol č. 1 – Stanovení permitivity vakua

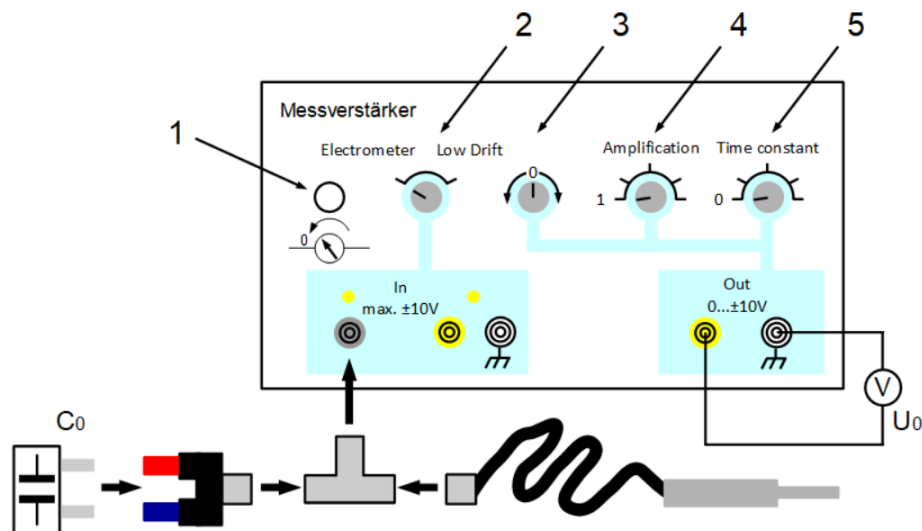
4.2.1 Zadání úkolu

Určete hodnotu permitivity vakua pomocí deskového kondenzátoru.

4.2.2 Postup měření

a) Sestavte měřicí aparaturu – měření bude probíhat pomocí kondenzátoru se známou kapacitou tak, jak je to uvedeno v teoretické části.

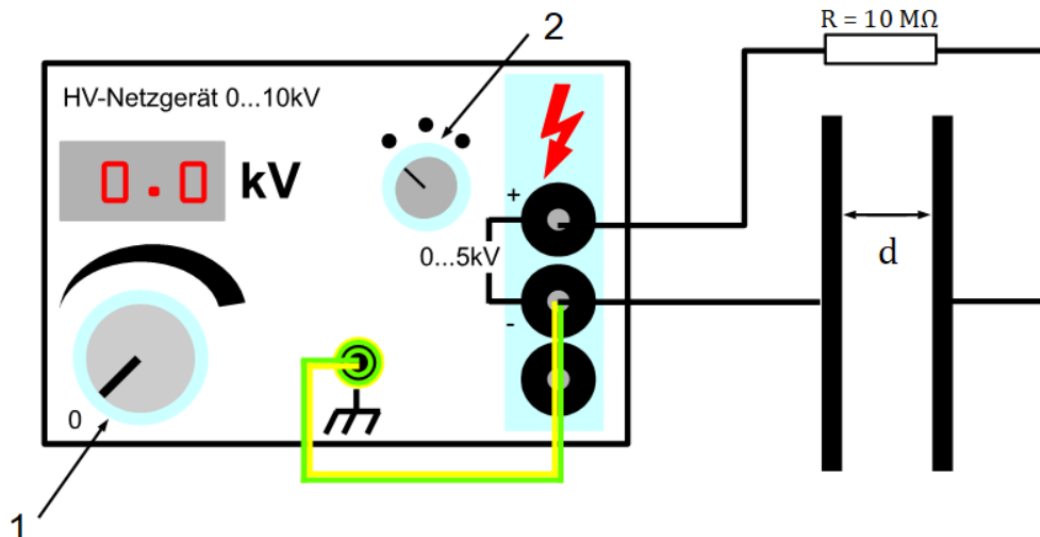
- Zkontrolujte, že je měřicí zesilovač (německy Messverstärker) vypnutý (vypínač je zezadu přístroje).
- Ke koaxiálnímu vstupu měřicího zesilovače připojte pomocí konektoru ve tvaru písmene T a speciální redukce koaxiál-dvojlinka kondenzátor o známé kapacitě $C_0 = 220 \text{ nF}$. Ke druhému vstupu T-redukce připojte pomocí koaxiálního kabelu adaptér pro připojení deskového kondenzátoru. Postup je schematicky na obr. 4-4.
- K výstupu měřicího zesilovače připojte ručičkový voltmetr.
- Měřicí zesilovač přepněte do režimu elektrometru (přepínač 2 na obr. 4-4 přepněte do pozice „Electrometer“), otočné tlačítko 3 natočte tak, aby byl ukazatel přibližně na polovině stupnice, zesílení nastavte na hodnotu 1 (tlačítko 4 s označením „Amplification“ přepněte do polohy 10^0), časovou konstantu volte 0 (na tlačítku 5 s označením „Time“ constant nastavte 0).



Obr. 4-4: Zapojení měřicího zesilovače

b) Sestavte soupravu pro nabíjení kondenzátoru C podle obr. 4-5.

- Zkontrolujte, zda je zdroj vysokého napětí vypnutý (německy HV-Netzgerät)!
- Na vzdálenosti desek zatím nezáleží, pouze dbejte na to, aby se nedotýkaly!
- Otočný knoflík 1 (z obr. 4-5) nastavte na minimum, otočný knoflík 2 nastavte na levou krajní hodnotu (viz nastavená hodnota na obr. 4-5)
- Pozor, kladnou svorku zdroje připojte k desce kondenzátoru, která je vysoce odizolovaná (desku poznáte tak, že mezi ní a vlastním tělem kondenzátoru uvidíte široký pás průhledného plastu)!



Obr. 4-5: Schéma zapojení obvodu pro nabíjení kondenzátoru

c) Nechte si zapojení zkontrolovat od vedoucího praktika! Elektrometr i zdroj napětí následně zapněte.

d) Nastavte vzdálenost desek $d = 1$ mm. Pomocí otočného knoflíku 1 z obr. 4-5 nastavte na zdroji hodnotu napětí $U = 1,5$ kV. Kondenzátor nechte nejméně 60 s nabíjet. Posléze odpojte od kondenzátoru kladnou svorku zdroje a ke kladné desce připojte konektor elektrometru, odečtěte hodnotu U_0 z voltmetru.

- Vždy, než připojíte elektrometr ke kondenzátoru, je třeba vynulovat voltmetr. Toho docílíte tak, že na měřicím zesilovači přidržíte nulovací tlačítko (čili tlačítko 1 na obr. 4-4)!
- Pozor, hodnotu U_0 je třeba odečíst neprodleně po ukázání výchylky, tj. předtím, než se začne kondenzátor vybíjet (hodnota napětí klesat). Uvědomte si, že měříte s analogovým přístrojem, a proto je třeba výchylku měřáku přepočíst podle zvoleného rozsahu (poslední hodnota na stupnici odpovídá hodnotě nastaveného rozsahu, ostatní hodnoty lze vypočíst pomocí přímé úměry). V případě nejasností kontaktujte vedoucího praktika.
- Hodnotu napětí U_0 si zaznamenejte do tabulky č. 4-1.

e) Opakujte měření podle postupu v předchozím bodě i pro vzdálenosti desek kondenzátoru $d = 1,5; 2; 2,5; 3$ a $3,5$ mm. Nezapomeňte pokaždé nechat kondenzátor 60 s nabíjet!

f) Nyní proveďte obdobné měření – tentokrát při konstantní vzdálenosti $d = 2$ mm. Napětí vnějšího zdroje U měňte od hodnoty $0,5$ kV do hodnoty 4 kV s krokem $0,5$ kV. Naměřené hodnoty U_0 zaznamenávejte do tabulky č. 4-2.

g) Zpracujte data získaná měření

- Pomocí vztahů (4-2) a (4-7) dopočtete v tabulkách č. 4-1 a 4-2 hodnoty permitivity vakua ϵ_0 . Uvědomte si, že měření probíhalo na vzduchovém kondenzátoru, a proto dosaďte $\epsilon_r = 1$. Plocha desek kondenzátoru je $S = 0,0531$ m².
- Vypočtete chyby měření a získané hodnoty ϵ_0 porovnejte s tabulkovou hodnotou. Okomentujte přesnost svého měření.

4.2.3 Tabulky vhodné pro zpracování výsledků měření

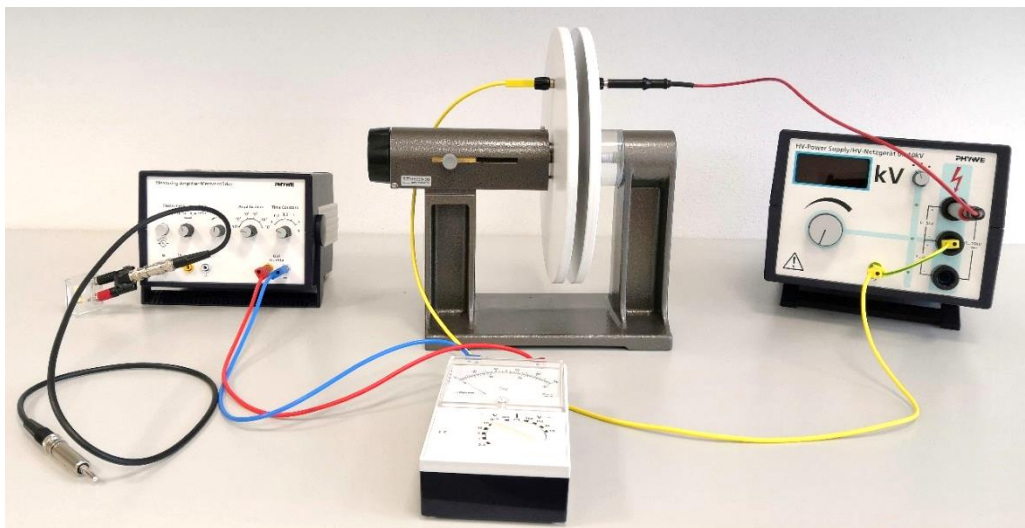
Tabulka č. 4-1: Tabulka pro zaznamenání hodnot měření při konstantním napětí U

i	$\frac{d}{\text{mm}}$	$\frac{U_0}{\text{V}}$	$\frac{\varepsilon_0}{\text{F} \cdot \text{m}^{-1}}$	$\frac{\Delta\varepsilon_0}{\text{F} \cdot \text{m}^{-1}}$	$\frac{\Delta^2\varepsilon_0}{\text{F}^2 \cdot \text{m}^{-2}}$
1	1,0				
⋮	⋮				
6	3,5				
-	-	-	$\bar{\varepsilon}_0$	$\sum_i \Delta\varepsilon_0$	$\sum_i \Delta^2\varepsilon_0$

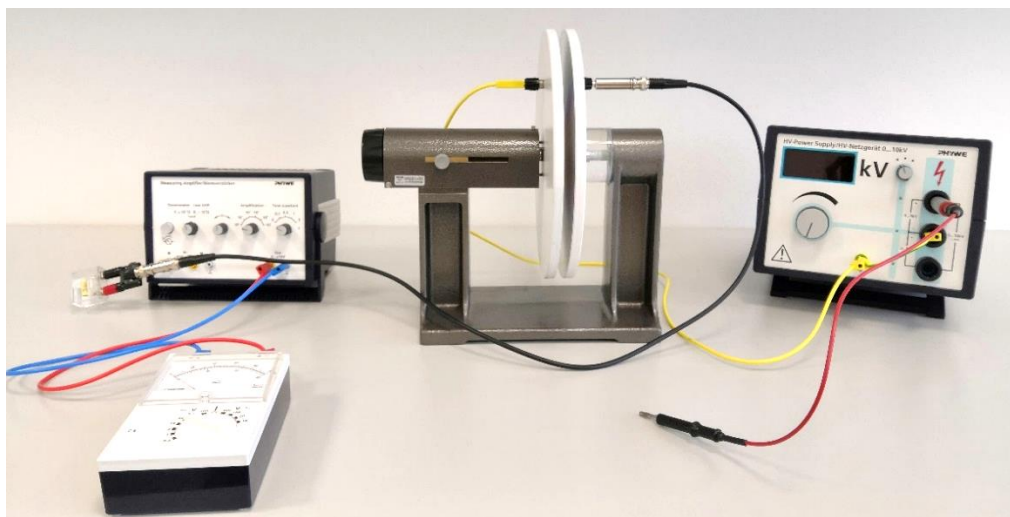
Tabulka č. 4-2: Tabulka pro zaznamenání hodnot měření při konstantní vzdálenosti d

i	$\frac{U}{\text{kV}}$	$\frac{U_0}{\text{V}}$	$\frac{\varepsilon_0}{\text{F} \cdot \text{m}^{-1}}$	$\frac{\Delta\varepsilon_0}{\text{F} \cdot \text{m}^{-1}}$	$\frac{\Delta^2\varepsilon_0}{\text{F}^2 \cdot \text{m}^{-2}}$
1	0,5				
⋮	⋮				
8	4,0				
-	-	-	$\bar{\varepsilon}_0$	$\sum_i \Delta\varepsilon_0$	$\sum_i \Delta^2\varepsilon_0$

4.2.4 Fotodokumentace úkolu



Obr. 4-6: Sestava pro nabíjení deskového kondenzátoru



Obr. 4-7: Připojení elektrometru k deskovému kondenzátoru

4.3 Úkol č. 2 – Určení relativní permitivity vybraných materiálů

4.3.1 Zadání úkolu

Stanovte hodnotu relativní permitivity vybraných materiálů pomocí deskového kondenzátoru.

4.3.2 Postup měření

a) Měření uskutečňte obdobně jako v úkolu č. 1. Ale tentokrát mezi desky kondenzátoru vložte nejprve plastovou desku, a poté desku skleněnou. Hodnoty napětí U měňte taktéž od hodnoty 0,5 kV do hodnoty 4 kV s krokem 0,5 kV. Naměřené hodnoty U_0 pro plast zaznamenávejte do tabulky č. 4-3, pro sklo do tabulky č. 4-4.

b) Zpracujte získaná data

- Pomocí vztahů (4-2) a (4-7) v tabulkách č. 4-3 a 4-4 stanovte hodnoty relativní permitivity ϵ_r jednotlivých materiálů. Za permitivitu vakua dosaďte tabulkovou hodnotu. Tloušťka obou desek je $d = 1$ cm.
- Vypočtěte chyby měření, hodnoty porovnejte s MFChT, okomentujte.

4.3.3 Tabulky vhodné pro zpracování výsledků měření

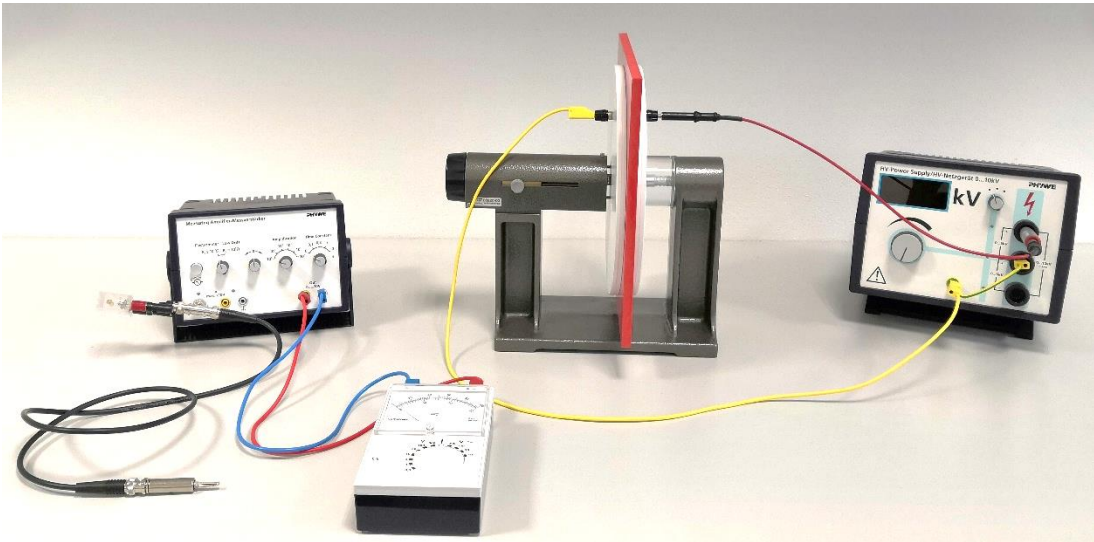
Tabulka č. 4-3: Tabulka pro zaznamenání hodnot měření ϵ_r plastové desky

Plastová deska					
i	$\frac{U}{\text{kV}}$	$\frac{U_0}{\text{V}}$	$\frac{\epsilon_r}{\text{bezrozměrné}}$	$\frac{\Delta\epsilon_r}{\text{bezrozměrné}}$	$\frac{\Delta^2\epsilon_r}{\text{bezrozměrné}}$
1	0,5				
⋮	⋮				
8	4,0				
-	-	-	$\bar{\epsilon}_r$	$\sum_i \Delta\epsilon_r$	$\sum_i \Delta^2\epsilon_r$

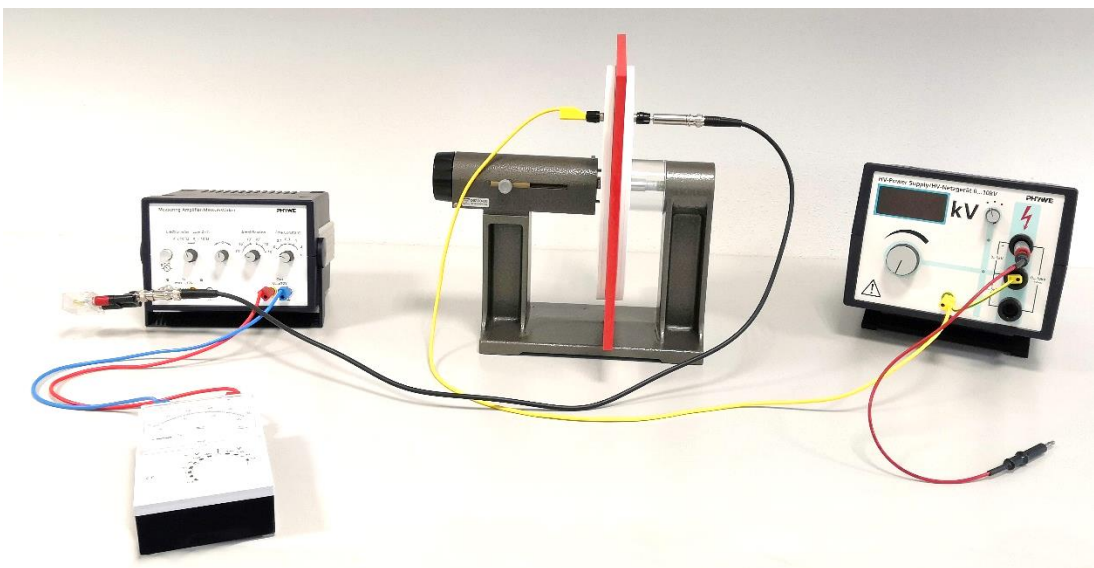
Tabulka č. 4-4: Tabulka pro zaznamenání hodnot měření ϵ_r skleněné desky

Skleněná deska					
i	$\frac{U}{\text{kV}}$	$\frac{U_0}{\text{V}}$	$\frac{\epsilon_r}{\text{bezrozměrné}}$	$\frac{\Delta\epsilon_r}{\text{bezrozměrné}}$	$\frac{\Delta^2\epsilon_r}{\text{bezrozměrné}}$
1	0,5				
⋮	⋮				
8	4,0				
-	-	-	$\bar{\epsilon}_r$	$\sum_i \Delta\epsilon_r$	$\sum_i \Delta^2\epsilon_r$

4.3.4 Fotodokumentace úkolu



Obr. 4-8: Sestava pro nabíjení deskového kondenzátoru s dielektrikem mezi deskami



Obr. 4-9: Připojení elektrometru ke kondenzátoru s dielektrikem mezi deskami

4.4 Zpracování dat měření

4.4.1 Úkol č. 1

Tabulka č. 4-5: Hodnoty měření při konstantním napětí $U = 1,5$ kV

i	$\frac{d}{\text{mm}}$	$\frac{U_0}{\text{V}}$	$\frac{\varepsilon_0}{\text{F} \cdot \text{m}^{-1}}$	$\frac{\Delta\varepsilon_0}{\text{F} \cdot \text{m}^{-1}}$	$\frac{\Delta^2\varepsilon_0}{\text{F}^2 \cdot \text{m}^{-2}}$
1	1,0	2,90	$8,010 \cdot 10^{-12}$	$-1,064 \cdot 10^{-12}$	$1,1309 \cdot 10^{-24}$
2	1,5	1,94	$8,038 \cdot 10^{-12}$	$-1,036 \cdot 10^{-12}$	$1,0729 \cdot 10^{-24}$
3	2,0	1,65	$9,115 \cdot 10^{-12}$	$0,042 \cdot 10^{-12}$	$0,0017 \cdot 10^{-24}$
4	2,5	1,35	$9,322 \cdot 10^{-12}$	$0,249 \cdot 10^{-12}$	$0,0617 \cdot 10^{-24}$
5	3,0	1,16	$9,612 \cdot 10^{-12}$	$0,539 \cdot 10^{-12}$	$0,2901 \cdot 10^{-24}$
6	3,5	1,07	$10,344 \cdot 10^{-12}$	$1,271 \cdot 10^{-12}$	$1,6144 \cdot 10^{-24}$
-	-	-	$\bar{\varepsilon}_0 = 9,074 \text{ pF} \cdot \text{m}^{-1}$	$\sum_i \Delta\varepsilon_0 = 0 \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$	$\sum_i \Delta^2\varepsilon_0 = 4,18 \cdot 10^{-24} \text{ F}^2\text{m}^{-2}$

$$\overline{s_{\varepsilon_0}} = \sqrt{\frac{\sum \Delta^2\varepsilon_0}{n(n-1)}} = 3,732801 \cdot 10^{-13} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1} \quad (4-8)$$

$$\varepsilon_0 = (9,08 \pm 0,38) \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1} \quad (4-9)$$

Tabulka č. 5-6: Hodnoty měření při konstantní vzdálenosti $d = 2$ mm

i	$\frac{U}{\text{kV}}$	$\frac{U_0}{\text{V}}$	$\frac{\varepsilon_0}{\text{F} \cdot \text{m}^{-1}}$	$\frac{\Delta\varepsilon_0}{\text{F} \cdot \text{m}^{-1}}$	$\frac{\Delta^2\varepsilon_0}{\text{F}^2 \cdot \text{m}^{-2}}$
1	0,5	0,62	$10,28 \cdot 10^{-12}$	$14,850 \cdot 10^{-13}$	$220,560 \cdot 10^{-26}$
2	1,0	1,08	$8,949 \cdot 10^{-12}$	$1,593 \cdot 10^{-13}$	$2,5381 \cdot 10^{-26}$
3	1,5	1,59	$8,784 \cdot 10^{-12}$	$-0,064 \cdot 10^{-13}$	$0,0041 \cdot 10^{-26}$
4	2,0	2,03	$8,411 \cdot 10^{-12}$	$-3,793 \cdot 10^{-13}$	$14,387 \cdot 10^{-26}$
5	2,5	2,60	$8,618 \cdot 10^{-12}$	$-1,722 \cdot 10^{-13}$	$2,9632 \cdot 10^{-26}$
6	3,0	3,13	$8,646 \cdot 10^{-12}$	$-1,446 \cdot 10^{-13}$	$2,0885 \cdot 10^{-26}$
7	3,5	3,44	$8,145 \cdot 10^{-12}$	$-6,457 \cdot 10^{-13}$	$41,685 \cdot 10^{-26}$
8	4,0	4,10	$8,494 \cdot 10^{-12}$	$-2,965 \cdot 10^{-13}$	$8,7872 \cdot 10^{-26}$
-	-	-	$\bar{\varepsilon}_0 = 8,79 \text{ pF} \cdot \text{m}^{-1}$	$\sum_i \Delta\varepsilon_0 = 0 \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$	$\sum_i \Delta^2\varepsilon_0 = 3,67 \cdot 10^{-25} \text{ F}^2\text{m}^{-2}$

$$\overline{s_{\varepsilon_0}} = \sqrt{\frac{\sum \Delta^2 \varepsilon_0}{n(n-1)}} = 8,09542 \cdot 10^{-14} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1} \quad (4-10)$$

$$\varepsilon_0 = (8,79 \pm 0,08) \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1} \quad (4-11)$$

4.4.2 Úkol č. 2

Tabulka č. 4-7: Hodnoty pro určení ε_r plastové desky

Plastová deska					
i	$\frac{U}{\text{kV}}$	$\frac{U_0}{\text{V}}$	$\frac{\varepsilon_r}{\text{bezrozměrné}}$	$\frac{\Delta \varepsilon_r}{\text{bezrozměrné}}$	$\frac{\Delta^2 \varepsilon_r}{\text{bezrozměrné}}$
1	0,5	0,51	4,77297	0,14711	0,02164
2	1,0	1,04	4,86656	0,24070	0,05793
3	1,5	1,40	4,36742	- 0,25844	0,06679
4	2,0	1,89	4,42202	- 0,20385	0,04155
5	2,5	2,59	4,84784	0,22198	0,04927
6	3,0	2,90	4,52340	- 0,10246	0,01050
7	3,5	3,64	4,86656	0,24070	0,05793
8	4,0	3,71	4,34013	- 0,28573	0,08164
-	-	-	$\bar{\varepsilon}_r = 4,626$	$\sum_i \Delta \varepsilon_r = 0$	$\sum_i \Delta^2 \varepsilon_r = 0,04841$

$$\overline{s_{\varepsilon_r}} = \sqrt{\frac{\sum \Delta^2 \varepsilon_r}{n(n-1)}} = 0,029402 \quad (4-12)$$

$$\varepsilon_r = (4,62 \pm 0,03) \quad (4-13)$$

Tabulka č. 4-8: Hodnoty pro určení ε_r skleněné desky

Skleněná deska					
i	$\frac{U}{\text{kV}}$	$\frac{U_0}{\text{V}}$	$\frac{\varepsilon_r}{\text{bezrozměrné}}$	$\frac{\Delta\varepsilon_r}{\text{bezrozměrné}}$	$\frac{\Delta^2\varepsilon_r}{\text{bezrozměrné}}$
1	0,5	1,2	11,23052	-1,70881	2,92003
2	1,0	2,7	12,63434	-0,30500	0,09302
3	1,5	4,3	13,41423	0,47490	0,22553
4	2,0	6	14,03815	1,09882	1,20740
5	2,5	7	13,10227	0,16294	0,02655
6	3,0	8,5	13,25825	0,31892	0,10171
7	3,5	9,7	12,96858	0,02925	0,00086
8	4,0	11	12,86830	-0,07103	0,00504
-	-	-	$\bar{\varepsilon}_r = 12,9394$	$\sum_l \Delta\varepsilon_r = 0$	$\sum_l \Delta^2\varepsilon_r = 0,57252$

$$\overline{s_{\varepsilon_r}} = \sqrt{\frac{\sum \Delta^2 \varepsilon_0}{l(l-1)}} = 0,1011 \quad (4-14)$$

$$\varepsilon_r = (12,9 \pm 0,1) \quad (4-15)$$

4.4.3 Závěr laboratorního cvičení

Splnil jsem zadání laboratorního cvičení a vyvaroval jsem se hrubých chyb. Určil jsem permitivitu vakua i relativní permitivitu dvou dielektrik. Chyby měření jsou relativně malé a určené hodnoty odpovídají hodnotám z matematicko-fyzikálních a chemických tabulek (viz tabulka č. 4-9). Chyby mohly vzniknout zejména při odečítání hodnot z analogového multimetru, případně špatným vybitím kondenzátoru o známé kapacitě. Určení permitivity pomocí zvolené metody se proto jeví jako poměrně přesná metoda.

Tabulka č. 4-9: Porovnání naměřených a tabulkových hodnot

	Stanovené hodnoty	MFChT
$\frac{\varepsilon_0}{F \cdot m^{-1}}$	$(9,08 \pm 0,38) \cdot 10^{-12}$ $(8,79 \pm 0,08) \cdot 10^{-12}$	$8,854 \cdot 10^{-12}$
$\frac{\varepsilon_r(\text{plast})}{\text{bezrozměrné}}$	$4,62 \pm 0,03$	3 – 6
$\frac{\varepsilon_r(\text{sklo})}{\text{bezrozměrné}}$	$13,9 \pm 0,1$	4 – 19

5 TRANSFORMÁTOR

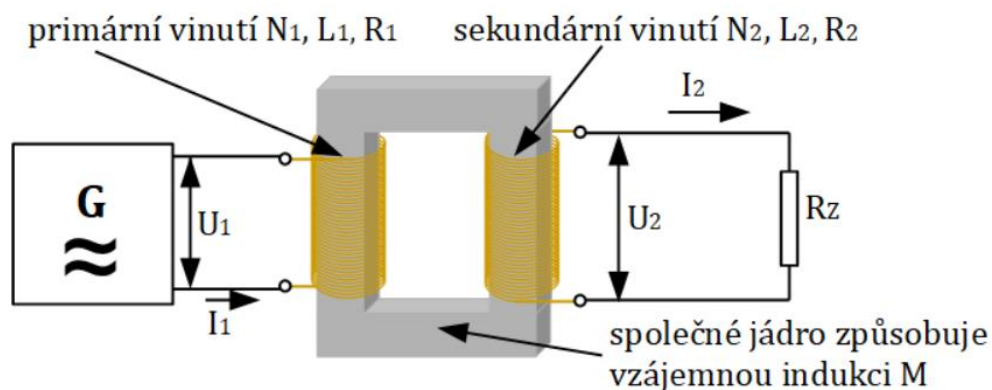
5.1 Teorie

a) transformátor

Jedná se o netočivé elektrické zařízení, které mění střídavé napětí, přičemž změna probíhá pomocí elektromagnetické indukce a nemění se frekvence [2]. Jednofázový transformátor je tvořen dvěma vinutími (primárním a sekundárním) a magnetickým obvodem (společným jádrem).

b) princip činnosti

Uvažujme zapojení s jednofázovým transformátorem podle obr. 5-1. Primárním vinutím označme cívku s N_1 závitů o indukčnosti L_1 a ohmickém odporu R_1 , jež je připojena ke zdroji harmonického napětí U_1 a kterou protéká proud I_1 . Sekundární vinutí je cívka s N_2 závitů o indukčnosti L_2 a odporem vinutí R_2 , k níž je připojen zatěžovací rezistor o odporu R_z . Zatěžovacím odporem protéká proud I_2 a lze na něm měřit napětí U_2 .



Obr. 5-1: Schéma zapojení pro popis činnosti transformátoru.

Z obr. 5-1 je patrné, že transformátor skutečně pracuje na principu elektromagnetické indukce, jelikož jsou oba obvody vzájemně galvanicky oddělené. Prochází-li primární cívku střídavý proud, vzniká ve společném jádru proměnný magnetický indukční tok a na sekundární cívce se indukuje napětí.

c) transformační poměr

Transformátor lze popsat pomocí symbolické metody, čímž získáme několik rovnic. Budeme-li uvažovat nejobecnější případ, bude řešení rovnic poměrně obtížné.

Pro zjednodušení tedy budeme uvažovat ideální transformátor – čili transformátor, jehož vinutí mají nulový ohmický odpor, vzájemná indukčnost cívek je maximální (magnetický indukční tok procházející primárním vinutím je též, jako je magnetický indukční tok procházející cívku sekundární – nevznikají vířivé proudy, rozptylové toky...).

Navíc se zaměříme pouze na dva speciální případy, které popíšeme matematicky – transformátor naprázdno (tj. $I_2 = 0$) a transformátor nakrátko (sekundární vinutí zkratované).

d) chod naprázdno

Je-li proud v sekundárním vinutí transformátoru roven nule (chod naprázdno), získáme z již zmiňovaných rovnic vzorec (5-1), jenž objasňuje vztah mezi poměrem napětí a poměrem počtu závitů cívek. Transformační poměr označíme k a platí pro něj

$$k = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}. \quad (5-1)$$

Odtud vyjádříme sekundární napětí U_2 . Upravený výraz má tvar

$$U_2 = U_1 \frac{N_2}{N_1}, \quad (5-2)$$

z čehož plyne, že sekundární napětí je funkcí primárního napětí a počtu závitů obou vinutí.

e) chod nakrátko

Zkratováním svorek sekundárního vinutí získáváme druhý speciální případ – chod nakrátko. Opět odvodíme vztah pro transformační poměr, platí

$$k = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1}. \quad (5-3)$$

Úpravou vztahu (5-3) získáváme pro sekundární proud výraz

$$I_2 = I_1 \frac{N_1}{N_2}. \quad (5-4)$$

Sekundární proud je tedy funkcí proudu primárního a počtu závitů obou cívek.

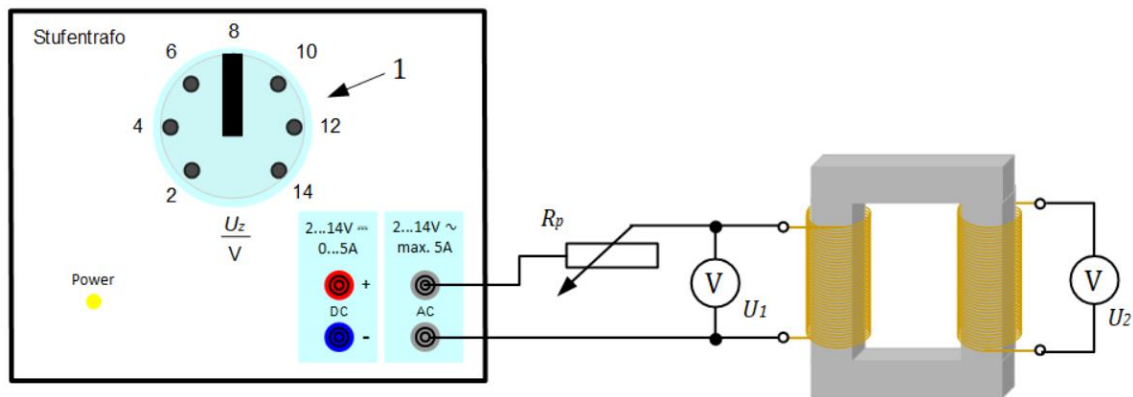
5.2 Úkol č. 1 – Zapojení transformátoru naprázdno

5.2.1 Zadání úkolu

Měřením ověřte chování transformátoru zapojeného naprázdno.

5.2.2 Postup měření

a) Sestavte obvod podle obr. 5-2. Zapojení si nechte zkontrolovat od vedoucího praktika. Poznámka – v průběhu celého úkolu používejte jako voltmetry digitální multimetry značky APPA, vhodným rozsahem je rozsah pro měření v řádu jednotek voltů.



Obr. 5-2: Schéma zapojení transformátoru naprázdno

b) Ověřte platnost vztahu (5-1)

- Nastavte následující hodnoty: $U_Z = 6\text{ V}$, $N_1 = 14\text{ z.}$, $N_2 = 140\text{ z.}$ Napětí U_Z na zdroji se nastavuje pomocí svorky 1 z obr. 5-2!
- Na předřadném reostatu nastavte odpor $R_p = 10\ \Omega$ – toho docílíte tak, že jezdec reostatu posunete do krajní polohy dále od svorek (na reostatu označeno jako poloha 1).
- Změřte primární a sekundární napětí na transformátoru.
- Hodnoty U_1 , U_2 , N_1 a N_2 dosad'te do vztahu (5-1). Ověřte, zda daná rovnost skutečně platí.

c) Proměřte závislost $U_2 = f(N_1)$

- Na zdroji nastavte napětí $U_Z = 6\text{ V}$ a na sekundární cívce zapojte $N_2 = 140\text{ z.}$ Tyto parametry ponechte po celou dobu měření v rámci úkolu c) konstantní.
- Na primární cívce zapojte $N_1 = 140\text{ z.}$, změřte primární i sekundární napětí a zaznamenejte je do tabulky č. 5-1.
- Postupně snižujte počet závitů N_1 primární cívky (112, 84 a 42 závitů), přičemž upravujte odpor reostatu tak, aby primární napětí zůstávalo konstantní. Při každém snížení počtu závitů primární cívky zanechte do tabulky č. 5-1 hodnoty U_1 a U_2 . Pozor, neproměřujte $N_1 = 14$ závitů, jinak dojde k poškození měřeného vybavení (nastavíte-li odpor reostatu nízký a zároveň zapojíte malý počet závitů primární cívky, dojde ke zkratu)!
- Sestavte bodový graf $U_2 = f(N_1)$, proveďte vhodnou regresi a okomentujte, zda průběh odpovídá teoretickým poznatkům – tj. vztahu (5-2).

d) Proměřte závislost $U_2 = f(N_2)$

- Konstantní parametry obvodu: $U_Z = 6 \text{ V}$, $N_1 = 140 \text{ z.}$, $R_P = 10 \Omega$.
- Proměřte sekundární napětí pro různý počet závitů N_2 sekundární cívky – postupně nastavte 14, 42, 84, 112 a 140 závitů. Hodnoty zanepte do tabulky č. 5-2.
- Sestavte bodový graf $U_2 = f(N_2)$ s vhodnou regresní křivkou, průběh funkce okomentujte.

e) Proměřte závislost $U_2 = f(U_1)$

- Zapojte cívky tak, aby $N_1 = 140 \text{ z.}$, $N_2 = 140 \text{ z.}$, dále tyto hodnoty neměňte.
- Na zdroji postupně nastavte napětí U_Z zdroje na hodnoty 2, 4, 6, 8, 10, 12 a 14 V. Změnou napětí na zdroji docílíte i změny primárního napětí.
- Proměřte jak primární, tak sekundární napětí. Pro naměřené hodnoty užíjte tabulku č. 5-3.
- Sestavte bodový graf $U_2 = f(U_1)$, graf ohodnoťte komentářem. Taktéž proveďte regresi.

7.1.1. Tabulky vhodné pro zpracování výsledků měření

Tabulka č. 5-1: Tabulka pro zaznamenání závislosti $U_2 = f(N_1)$

$\frac{N_1}{\text{závit}}$	$\frac{U_1}{\text{V}}$ konst.!	$\frac{U_2}{\text{V}}$
140		
⋮		
42		

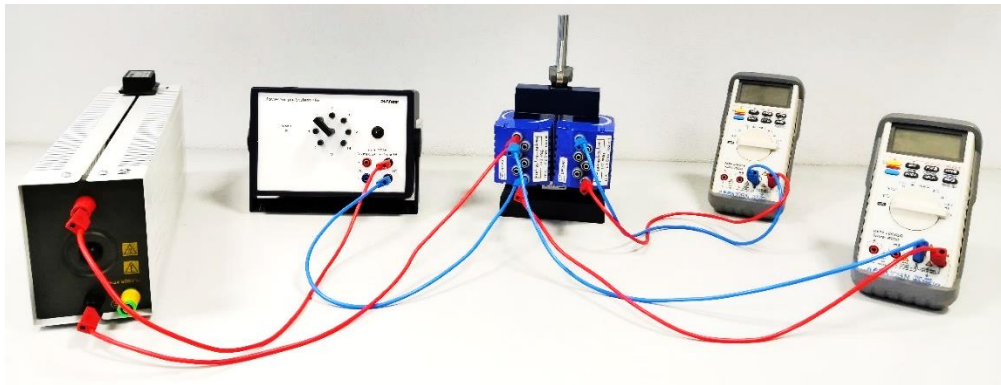
Tabulka č. 5-2: Tabulka pro zaznamenání závislosti $U_2 = f(N_2)$

$\frac{N_2}{\text{závit}}$	$\frac{U_2}{\text{V}}$
14	
⋮	
140	

Tabulka č. 5-3: Tabulka pro zaznamenání závislosti $U_2 = f(U_1)$

$\frac{U_Z}{\text{V}}$	$\frac{U_1}{\text{V}}$	$\frac{U_2}{\text{V}}$
2		
⋮		
14		

5.2.3 Fotodokumentace úkolu



Obr. 5-3: Sestava pro měření transformátoru naprázdno

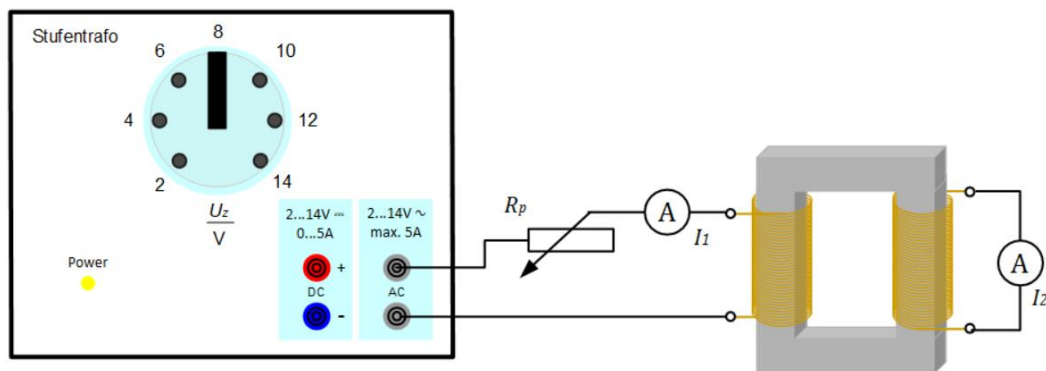
5.3 Úkol č. 2 – Zapojení transformátoru nakrátko

5.3.1 Zadání úkolu

Svámi pokusy ověřte, zda teoretické poznatky o transformátoru, který má zkratované svorky sekundární cívky, odpovídají skutečnosti.

5.3.2 Postup měření

a) Sestavte obvod podle obr. 5-4. Zapojení následně nechte zkontrolovat od vedoucího praktika. Doporučení – jako ampérmetry používejte digitální multimetry APPA (jelikož mají poměrně vysokou přesnost, používejte rozsah pro měření proudu v řádu jednotek ampér, nikoli miliampér).



Obr. 5-4: Schéma zapojení transformátoru nakrátko

b) Dokažte rovnost danou vztahem (5-3)

- Nastavte následující hodnoty: $U_Z = 6 \text{ V}$, $N_1 = 14 \text{ z.}$, $N_2 = 140 \text{ z.}$, $R_p = 10 \Omega$. Napětí na zdroji a odpor na reostatu se nastavují stejně jako v předchozím úkolu.
- Změřte proud protékající primárním a sekundárním obvodem.
- Hodnoty I_1 , I_2 , N_1 a N_2 dosad'te do vztahu (5-3) a rovnost ověřte.

c) Proměřte závislost $I_2 = f(N_1)$

- Konstantní parametry v této části úkolu: $U_Z = 6 \text{ V}$, $N_2 = 140 \text{ z.}$, $R_p = 10 \Omega$.
- Postupně měňte počet závitů primární cívky (14, 42, 84, 112 a 140 závitů), vždy měřením určete proud I_2 a hodnoty zaznamenejte do tabulky č. 5-4.

- Sestavte bodový graf $U_2 = f(N_1)$ a uveďte, zda koresponduje tvar regresní funkce se vztahem (5-4).

d) Proměřte závislost $I_2 = f(N_2)$

- Nastavte $U_Z = 6\text{ V}$ a $R_p = 10\ \Omega$, zapojte $N_1 = 140$ z.
- Proměřte I_2 pro různý počet závitů sekundární cívky – postupně nastavte 14, 42, 84, 112 a 140 závitů. Hodnoty zanešte do tabulky č. 5-5.
- Sestavte bodový graf $I_2 = f(N_2)$, proveďte regresi a připojte svůj komentář jejího průběhu.

e) Závislost $I_2 = f(I_1)$

- Na obou cívkách zapojte 140 závitů, na zdroji nastavte $U_Z = 6\text{ V}$
- Na reostatu nastavte $R_p = 10\ \Omega$, zapište do tabulky č. 5-6 hodnoty I_1 a I_2 . Postupně snižujte odpor na reostatu (tím upravujete primární proud) a obdobně naměřte alespoň pět dalších hodnot.
- Sestavte bodový graf $I_2 = f(I_1)$ s vhodnou regresní křivkou, okomentujte.

5.3.3 Tabulky vhodné pro zpracování výsledků měření

Tabulka č. 5-4: Tabulka pro zaznamenání závislosti $I_2 = f(N_1)$

$\frac{N_1}{\text{závit}}$	$\frac{I_2}{\text{A}}$
14	
⋮	
140	

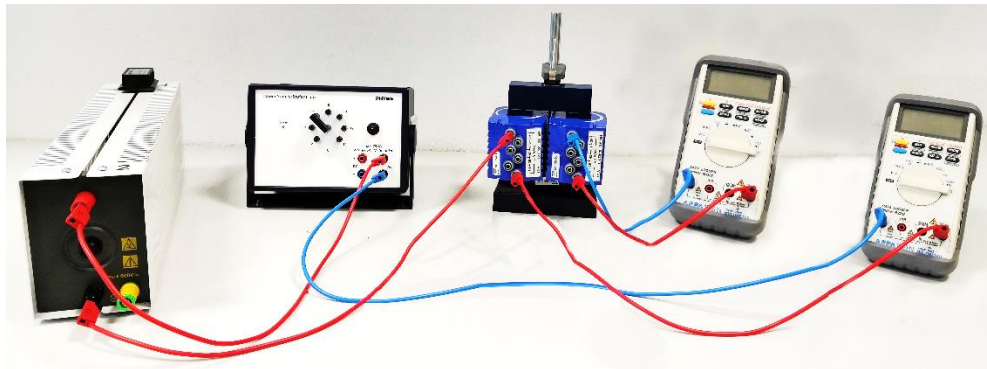
Tabulka č.5-5: Tabulka pro zaznamenání závislosti $I_2 = f(N_2)$

$\frac{N_2}{\text{závit}}$	$\frac{I_2}{\text{A}}$
14	
⋮	
140	

Tabulka č. 5-6: Tabulka pro zaznamenání závislosti $I_2 = f(I_1)$

číslo měření i	$\frac{I_1}{\text{A}}$	$\frac{I_2}{\text{A}}$
1		
⋮		
6		

5.3.4 Fotodokumentace úkolu



Obr. 5-5: Sestava pro měření transformátoru nakrátko

5.4 Zpracování dat měření

5.4.1 Úkol č. 1

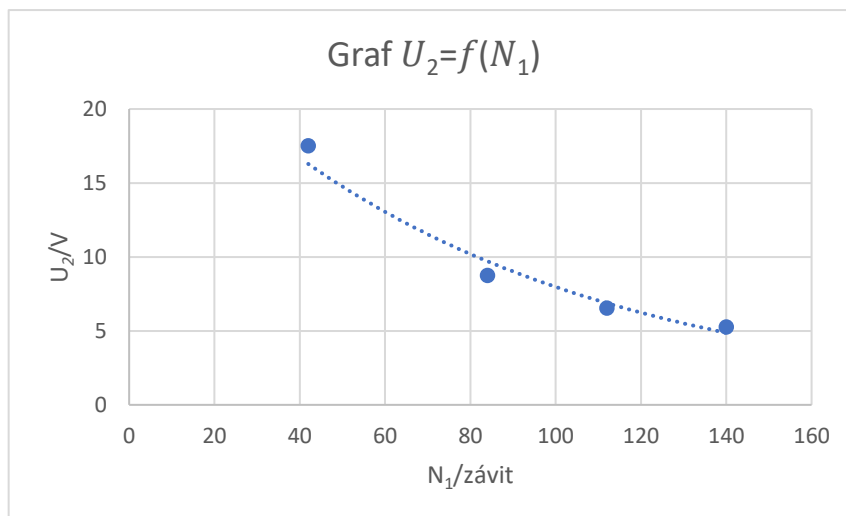
a) ověření platnosti vztahu (5-1)

- nastaveno: $U_z = 6 \text{ V}$; $R_p = 10 \text{ } \Omega$; $N_1 = 14 \text{ z.}$; $N_2 = 140 \text{ z.}$
- naměřeno: $U_1 = 0,13 \text{ V}$; $U_2 = 1,429 \text{ V}$
- dosazením hodnot do vztahu (5-1) zjišťujeme, že rovnost přibližně platí

b) závislost $U_2 = f(N_1)$

Tabulka č. 5-7: Hodnoty pro stanovení závislosti $U_2 = f(N_1)$

$\frac{N_1}{\text{závit}}$	$\frac{U_1}{\text{V}}$ konst.!	$\frac{U_2}{\text{V}}$
140	5,41	5,28
112	5,41	6,54
84	5,41	8,75
42	5,41	17,53

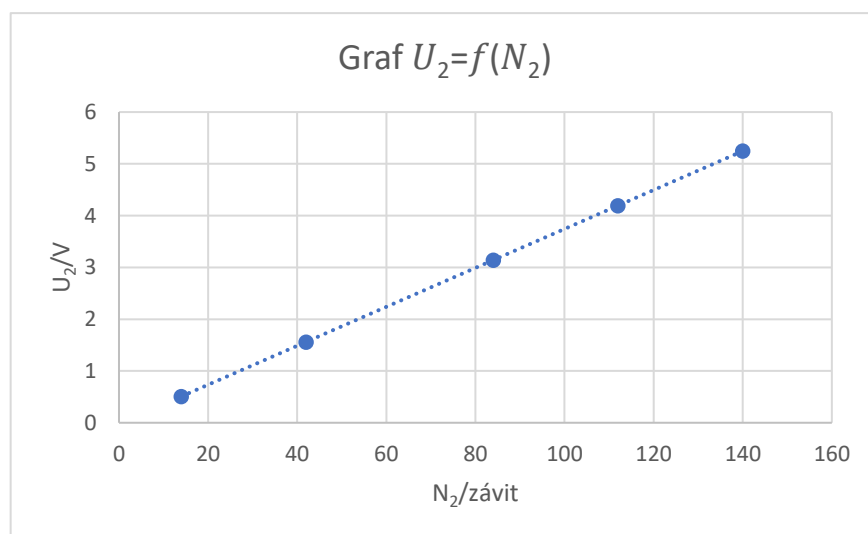


Obr. 5-6: Graf závislosti $U_2 = f(N_1)$

c) závislost $U_2 = f(N_2)$

Tabulka č. 5-8: Hodnoty pro stanovení závislosti $U_2 = f(N_2)$

$\frac{N_2}{\text{závit}}$	$\frac{U_2}{\text{V}}$
14	0,51
42	1,56
84	3,14
112	4,19
140	5,25

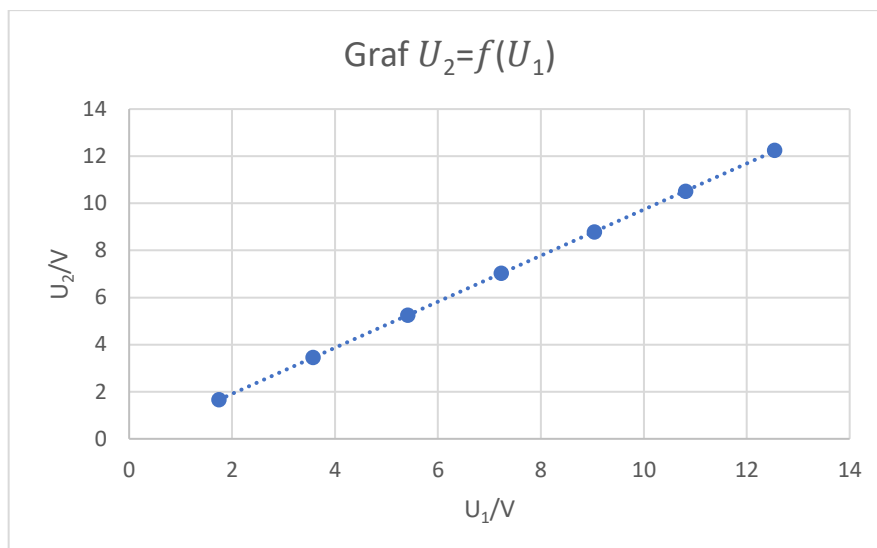


Obr. 5-7: Graf závislosti $U_2 = f(N_2)$

d) závislost $U_2 = f(U_1)$

Tabulka č. 5-9: Hodnoty pro stanovení závislosti $U_2 = f(U_1)$

$\frac{U_2}{\text{V}}$	$\frac{U_1}{\text{V}}$	$\frac{U_2}{\text{V}}$
2	1,74	1,66
4	3,57	3,45
6	5,41	5,24
8	7,23	7,03
10	9,04	8,78
12	10,81	10,51
14	12,54	12,24



Obr. 5-8: Graf závislosti $U_2 = f(U_1)$

5.4.2 Úkol č. 2

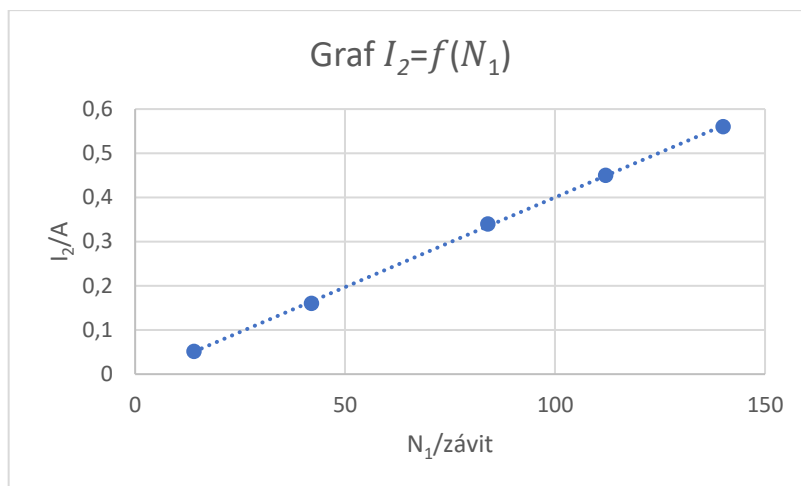
a) ověření platnosti vztahu (5-3)

- nastaveno: $U_z = 6\text{ V}$; $R_p = 10\ \Omega$; $N_1 = 14\text{ z.}$; $N_2 = 140\text{ z.}$
- naměřeno: $I_1 = 0,63\text{ A}$; $I_2 = 0,0517\text{ A}$
- dosazením hodnot do vztahu (5-3) zjišťujeme, že rovnost přibližně platí

b) závislost $I_2 = f(N_1)$

Tabulka č. 5-10: Hodnoty pro stanovení závislosti $I_2 = f(N_1)$

$\frac{N_1}{\text{závit}}$	$\frac{I_2}{\text{A}}$
14	0,0517
42	0,16
84	0,34
112	0,45
140	0,56

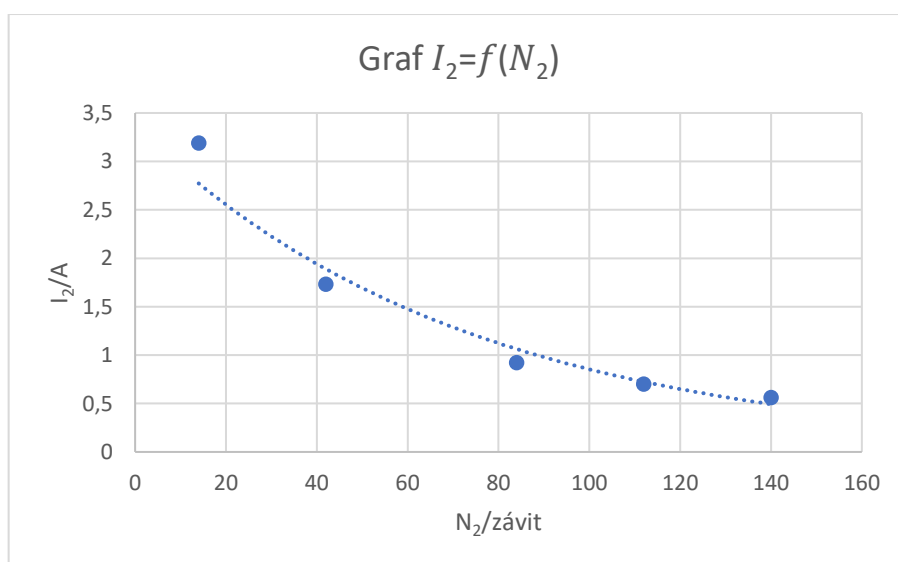


Obr. 5-9: Graf závislosti $I_2 = f(N_1)$

c) závislost $I_2 = f(N_2)$

Tabulka č. 5-11: Hodnoty pro stanovení závislosti $I_2 = f(N_2)$

$\frac{N_2}{závit}$	$\frac{I_2}{A}$
14	3,19
42	1,73
84	0,92
112	0,70
140	0,56

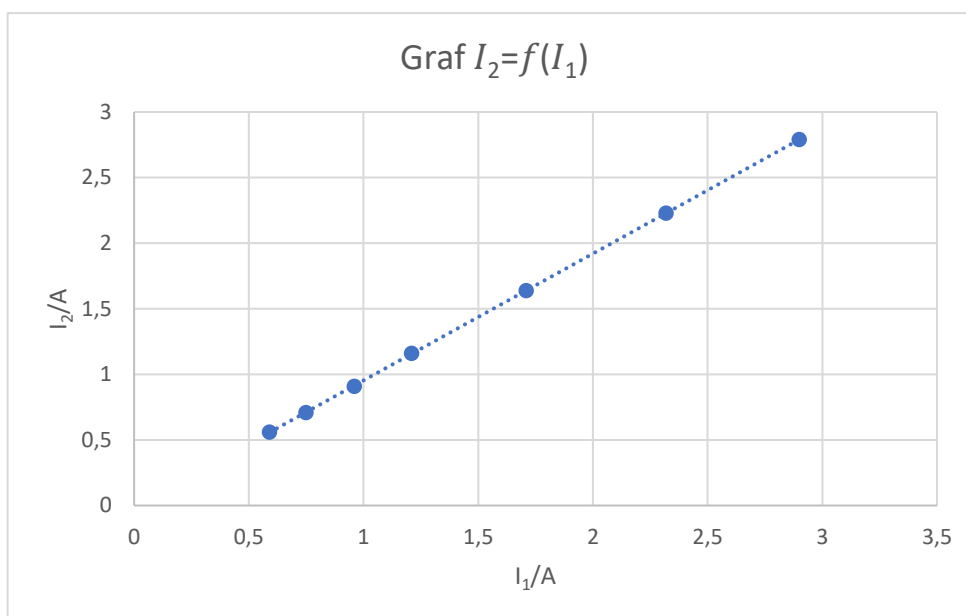


Obr. 5-10: Graf závislosti $I_2 = f(N_2)$

d) závislost $I_2 = f(I_1)$

Tabulka č. 5-12: Hodnoty pro stanovení závislosti $I_2 = f(I_1)$

číslo měření i	$\frac{I_1}{A}$	$\frac{I_2}{A}$
1	0,59	0,56
2	0,75	0,71
3	0,96	0,91
4	1,21	1,16
5	1,71	1,64
6	2,32	2,23



Obr. 5-11: Graf závislosti $I_2 = f(I_1)$

5.4.3 Závěr laboratorního cvičení

Splnil jsem zadání laboratorního cvičení. Platnost vztahů (5-1) a (5-3) byla experimentálně potvrzena, díky čemuž jsem mohl přistoupit k dalšímu měření. Sestavené grafy a jejich následné regrese odpovídají poznatkům z teoretické části laboratorního cvičení. U závislostí $U_2 = f(N_2)$, $U_2 = f(U_1)$, $I_2 = f(N_1)$ a $I_2 = f(I_1)$ má regresní křivka tvar přímky (tudíž se jedná o přímou závislost). Regrese grafů $U_2 = f(N_1)$ a $I_2 = f(N_2)$ odpovídá nepřímé úměrnosti.

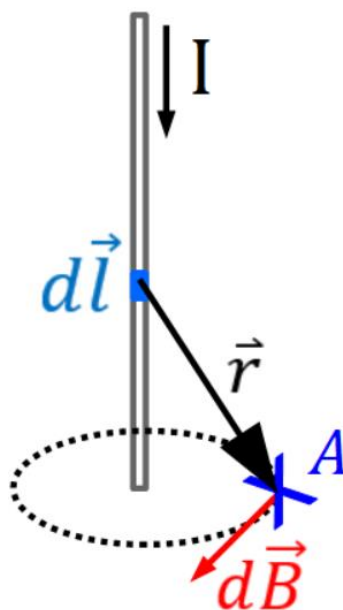
6 MAGNETICKÁ INDUKCE

6.1 Teorie

a) magnetické pole, vektor magnetické indukce

V roce 1820 prokázal profesor Hans Christian Oersted, že v blízkosti vodiče s proudem existuje magnetické pole [7]. Pro kvantitativní popis magnetického pole nejčastěji používáme fyzikální veličinu, která byla pro tento účel zavedena – vektor magnetické indukce \vec{B} s jednotkou 1 tesla (značka T).

Magnetickou indukci v okolí vodiče jakéhokoli tvaru popisuje Biotův-Savartův-Laplaceův zákon. Mějme vodič o délce l , rozdělme jej na malé části o délce dl , které označíme za vektory $d\vec{l}$, jimž přiřadíme směr proudu ve vodiči (viz obr. 6-1).



Obr. 6-1: K odvození Biotova-Savartova-Laplaceova zákona

Příspěvek magnetické indukce $d\vec{B}$ v bodě A, jehož polohu určuje polohový vektor \vec{r} , bude dána vztahem

$$d\vec{B} = \frac{\mu}{4\pi} \cdot \frac{I}{r^3} (d\vec{l} \times \vec{r}), \quad (6-1)$$

přičemž

$$\mu = \mu_0 \mu_r, \quad (6-2)$$

kde μ nese název permeabilita a μ_r je relativní permeabilita látky (pro vzduch $\mu_r \rightarrow 1$). Symbolem μ_0 označujeme permeabilitu vakua. V literatuře se běžně uvádí její hodnota jako $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N} \cdot \text{A}^{-2}$. Za zmínku však stojí, že po redefinici fyzikálních jednotek SI z roku 2019 není tato hodnota přesná, přesná hodnota je $\mu_0 = 12,56\ 637\ 062\ 12 \cdot 10^{-6} \text{ N} \cdot \text{A}^{-2}$ [8]. Rozdíl se však projeví až na osmém desetinném místě, a proto můžeme pro zjednodušení nadále uvažovat hodnotu běžně uváděnou v literatuře.

Stejně jako permitivita popisuje vliv látky na elektrické pole, popisuje permeabilita vliv látky na pole magnetické [1].

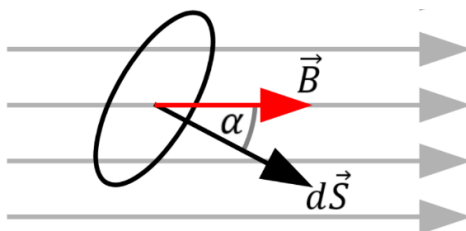
b) magnetický indukční tok

Další veličinou popisující magnetické pole je magnetický indukční tok Φ s jednotkou 1 Wb (weber). Magnetický indukční tok má význam toku vektoru magnetické indukce B plochou [1].

Pro magnetický indukční tok jdoucí elementární ploškou platí

$$d\Phi = B \cdot \cos \alpha \cdot dS, \quad (6-3)$$

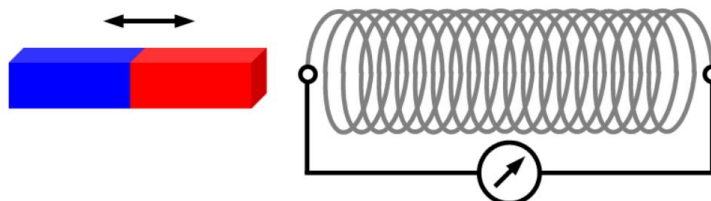
kde α je úhel, který svírá vektor magnetické indukce \vec{B} s normálou k ploše dS , tj. s vektorem $d\vec{S}$ (viz obr. 6-2).



Obr. 6-2: Magnetický indukční tok jdoucí elementární ploškou

c) elektromagnetická indukce, Faradayův zákon elektromagnetické indukce

Představme si experiment (viz obr. 6-3). K cívice je připojen galvanometr. Při opakovaném zasouvání a vysouvání magnetu do dutiny cívky galvanometr ukazuje výchylku. Je-li magnet v klidu, výchylka se neukazuje.



Obr. 6-3: Jev elektromagnetická indukce

Vysvětlení tohoto jevu se snažil podat Michael Faraday, který tak objasnil, za jakých podmínek může magnetické pole vyvolat elektrický proud [7]. Při časových změnách magnetického pole (magnetického indukčního toku) vzniká na vodiči uvnitř tohoto pole indukované napětí podle vzorce

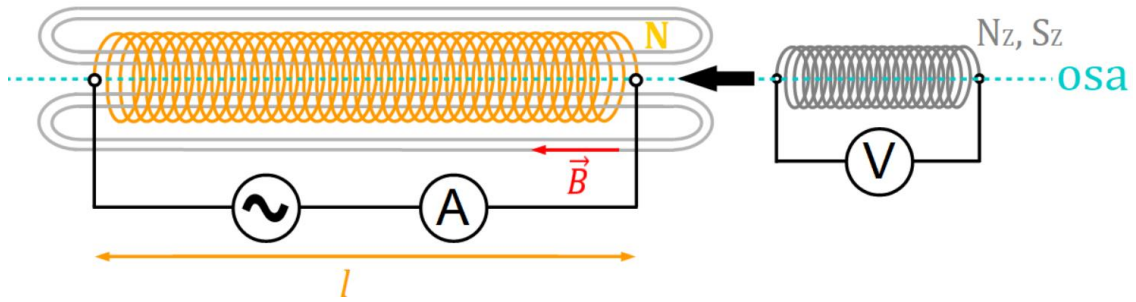
$$U_i = - \frac{d\Phi}{dt}, \quad (6-4)$$

který nese označení Faradayův zákon elektromagnetické indukce, neboť děj, při kterém indukované napětí vzniká, se nazývá elektromagnetická indukce.

d) indukované napětí na cívice uvnitř solenoidu připojeného ke střídavému proudu

Předně je nutné objasnit pojem solenoid – jedná se o hustě vinutou cívku, jejíž délka je mnohem větší, než je průměr vinutí [9].

Nyní uvažme experiment. Do dutiny solenoidu o délce l , který má N závitů, zasuneme zkušební cívku L_z tak, aby osy obou cívek splývaly. Zkušební cívka má N_z závitů a průřez o ploše S_z . Solenoid připojíme ke zdroji střídavého proudu a ke zkušební cívce připojíme voltmetr. V obvodu solenoidu měříme proud.



Obr. 5-4: Experiment k určení indukovaného napětí na cívce uvnitř solenoidu

Vydeme-li z Biotova-Savartova-Laplaceova zákona, platí pro magnetickou indukci uvnitř solenoidu (po zjednodušení) vztah

$$B = \mu_0 \mu_r \frac{NI}{l}, \quad (6-5)$$

Jelikož osy obou cívek splývají, platí pro magnetický indukční tok, který projde zkušební cívkou, vzhledem ke vztahu (6-3) výraz

$$\Phi = BS_z. \quad (6-6)$$

Dosazením z (6-5) do (6-6) získáváme pro magnetický indukční tok

$$\Phi = S_z \mu_0 \mu_r \frac{NI}{l}. \quad (6-7)$$

Solenoid je připojen ke zdroji střídavého proudu, veličina I má proto význam okamžité hodnoty proudu, označíme ji i .

Pro okamžitou hodnotu proudu platí

$$i = I_m \cdot \sin(2\pi ft), \quad (6-8)$$

kde I_m je amplituda proudu, který protéká solenoidem, f je frekvence střídavého proudu a t je čas.

Dosazením (6-8) do (6-7)

$$\Phi = S_z \mu_0 \mu_r \frac{N}{l} I_m \sin(2\pi ft). \quad (6-9)$$

Na zkušební cívce s N_z závitů se indukuje podle Faradayova zákona elektromagnetické indukce střídavé napětí, pro jehož okamžitou hodnotu platí upravený výraz (6-4), tedy

$$u = -N_z \frac{d\Phi}{dt}, \quad (6-10)$$

Dosazením (6-9) do vztahu (6-10) získáváme pro amplitudu indukovaného napětí po nezbytném přeindexování vztah

$$u = -N_z \cdot \frac{d}{dt} \left[S_z \mu_0 \mu_r \frac{N}{l} I_m \sin(2\pi ft) \right]. \quad (6-11)$$

Po derivaci

$$u = -2\pi f \cdot \mu_0 \mu_r \cdot \frac{NN_z S_z}{l} \cdot I_m \cos(2\pi ft). \quad (6-12)$$

Pro okamžitou hodnotu indukovaného střídavého napětí na solenoidu taktéž platí

$$u = -U_m \cdot \cos(2\pi ft), \quad (6-13)$$

kde U_m je amplituda napětí.

Porovnáním pravých stran výrazů (6-12) a (6-13)

$$-2\pi f \cdot \mu_0 \mu_r \cdot \frac{NN_Z S_Z}{l} \cdot I_m \cos(2\pi ft) = -U_m \cdot \cos(2\pi ft), \quad (6-14)$$

$$U_m = 2\pi f \cdot \mu_0 \mu_r \cdot \frac{NN_Z S_Z}{l} \cdot I_m \quad (6-15)$$

Jak již bylo zmíněno, veličiny U_m a I_m mají význam amplitud. Běžné digitální multimetry však obvykle měří efektivní hodnoty střídavého proudu a napětí, proto je nezbytné provést úpravu

$$\sqrt{2}U_{ef} = 2\sqrt{2}\pi f \cdot \mu_0 \mu_r \cdot \frac{NN_Z S_Z}{l} \cdot I_{ef} \quad (6-16)$$

kde U_{ef} je efektivní hodnota indukovaného napětí na zkušební cívce a I_{ef} je efektivní hodnota proudu, který protéká solenoidem.

Po vykrácení $\sqrt{2}$ získáváme konečný vztah pro indukované napětí na zkušební cívce uvnitř solenoidu.

$$U_{ef} = 2\pi f \cdot \mu_0 \mu_r \cdot \frac{NN_Z S_Z}{l} \cdot I_{ef} \quad (6-17)$$

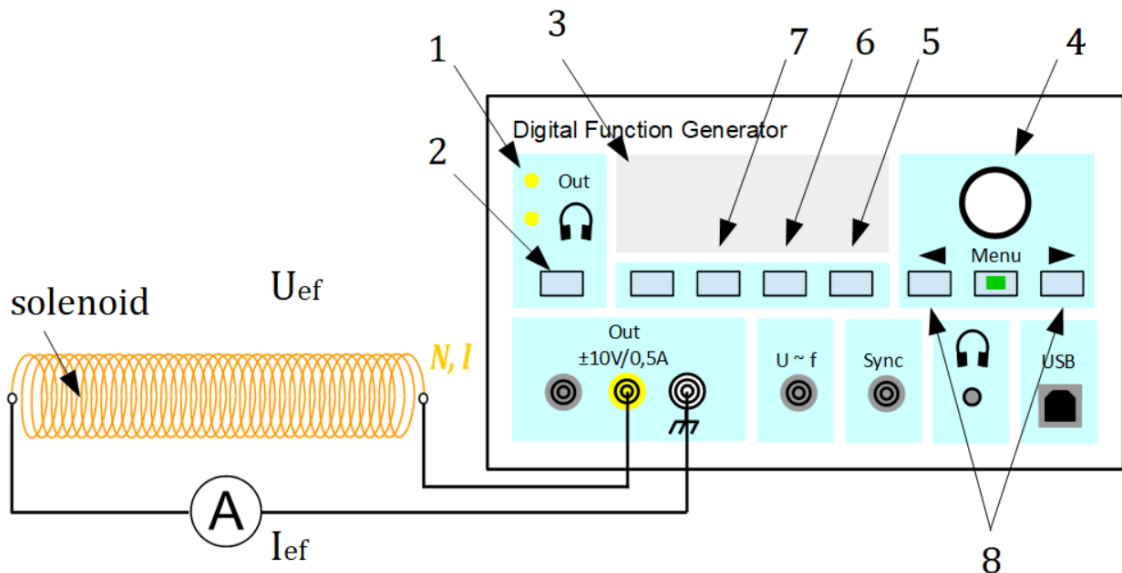
6.2 Úkol č. 1 – Měření indukovaného napětí

6.2.1 Zadání úkolu

Proměřte indukované napětí na zkušební cívce v závislosti na proudu protékajícím v solenoidu.

6.2.2 Postup měření

a) Zapojte obvod se solenoidem podle obr. 6-5.

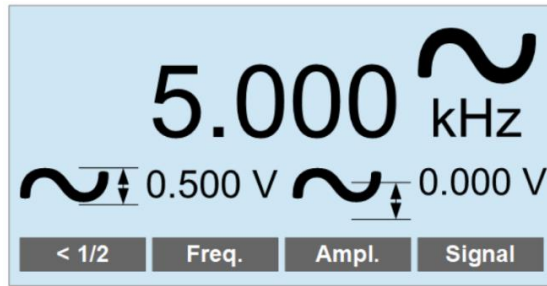


Obr. 6-5: Zapojení obvodu se solenoidem

b) Nechte si zapojení zkontrolovat od vedoucího praktika.

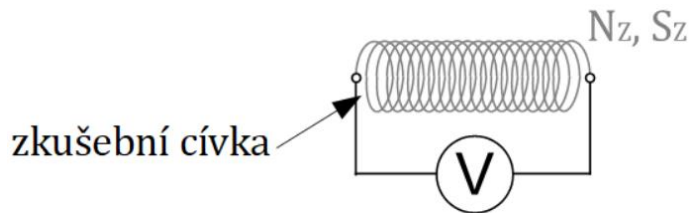
c) Připravte zdroj napětí k měření

- Zkontrolujte, zda svítí dioda výstupu (dioda 1 na obr. 6-5), případné změny docílíte tlačítkem č. 2 z obr. 6-5.
- Ujistěte se, že je na zdroji nastaven sinusový průběh napětí (na displeji 3 z obr. 6-5 naleznete v pravém horním rohu symbol „~“). Případné změny docílíte stiskem tlačítka „Signal“ (tlačítko 5 z obr. 6-5) a následným otáčením otočného knoflíku č. 4 (obr. 6-5), následně svoji volbu potvrďte stiskem tlačítka „OK“ (5 na obr. 6-5).
- Na displeji (3 na obr. 6-5) odečtěte frekvenci. Po celou dobu měření budete pracovat s hodnotou $f = 5 \text{ kHz}$. V případě potřeby stiskněte tlačítko „Freq.“ (tlačítko 7 na obr. 6-5) a pomocí otočného knoflíku 4 a pomocí tlačítek 8 z obr. 6-5 nastavte potřebnou hodnotu frekvence. Volbu potvrďte tlačítkem „OK“ (5 na obr. 6-5). Dále frekvenci neměňte!
- Tlačítkem „Ampl.“ nastavte amplitudu napětí $V_{pp} = 0,5 \text{ V}$ (tj. tlačítkem 6 z obr. 6-5). Princip nastavování je shodný s nastavováním frekvence.
- Znovu ověřte, že se nastavení na displeji shoduje s nastavením na obr. 6-6.



Obr. 6-6: Potřebné hodnoty nastavené na displeji zdroje napětí

d) Podle obr. 6-7 připravte obvod zkušební cívky. Použijte cívku se 300 závitů o průměru dutiny 33 mm. Uvědomte si, že měříte obvod střídavého proudu, správně nastavte digitální multimetr!



Obr. 6-7: Zapojení zkušební cívky

e) Zasuňte zkušební cívku do dutiny solenoidu.

f) Postupně měňte hodnotu V_{PP} v intervalu 0,5 V až 10 V s krokem 0,5 V (tím docílíte změnu proudu tekoucího solenoidem). Při každém nastavení amplitudy odečtěte z digitálních multimetrů hodnoty I_{ef} a U_{ef} , zaznamenejte je do tabulky č. 6-1.

g) Totéž měření opakujte i pro cívky

- se 300 závitů a průměrem dutiny $d_z = 26$ mm
- se 300 závitů a průměrem dutiny $d_z = 41$ mm
- se 75 závitů a průměrem dutiny $d_z = 26$ mm
- se 150 závitů a průměrem dutiny $d_z = 26$ mm

h) Zpracujte data měření

- Z naměřených hodnot sestavte bodové grafy $U_{ef} = f(I_{ef})$, v nich proveďte vhodnou regresi
 - Do jednoho grafu vložte průběhy pro cívky s $N_z = 300$ z. V grafu řádně označte, jaká křivka v grafu odpovídá konkrétní cívce (tj. která křivka je pro cívku s průměrem dutiny 33 mm, která popisuje cívku s $d_z = 26$ mm a která cívku o $d_z = 41$ mm). Okomentujte, jak průřez dutiny zkušební cívky ovlivňuje průběh funkce $U_{ef} = f(I_{ef})$.
 - Do druhého grafu zanechte průběhy funkcí pro cívky se shodným průměrem dutiny $d_z = 26$ mm. V legendě grafu uveďte, které cívce daná křivka odpovídá (analogie s předchozím grafem). Opět uveďte, jaký vliv má zkoumaný parametr obvodu na indukované napětí.

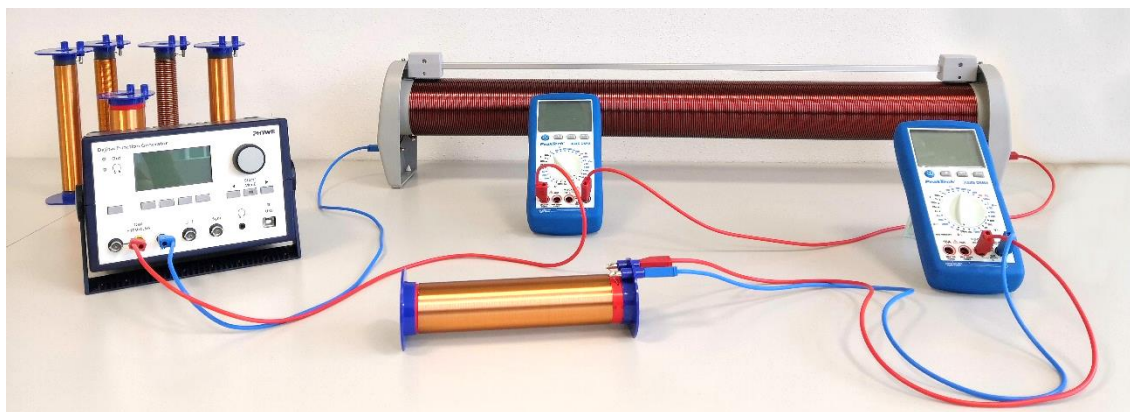
- Z naměřených hodnot proudu vypočtete pomocí vztahu (6-17) teoretickou hodnotu indukovaného napětí pro všechny cívky. Z těchto vypočtených hodnot sestavte tytéž grafy, jako v předchozím bodu.
- Při zpracování dat budete potřebovat ještě několik informací. Délka použitého solenoidu je $l = 0,75$ m. Za počet závitů solenoidu dosadíte $N = 364$ z.
- Okomentujte, jak korespondují grafy sestavené z naměřených hodnot a grafy z vypočtených hodnot.

6.2.3 Tabulky vhodné pro zpracování výsledků měření

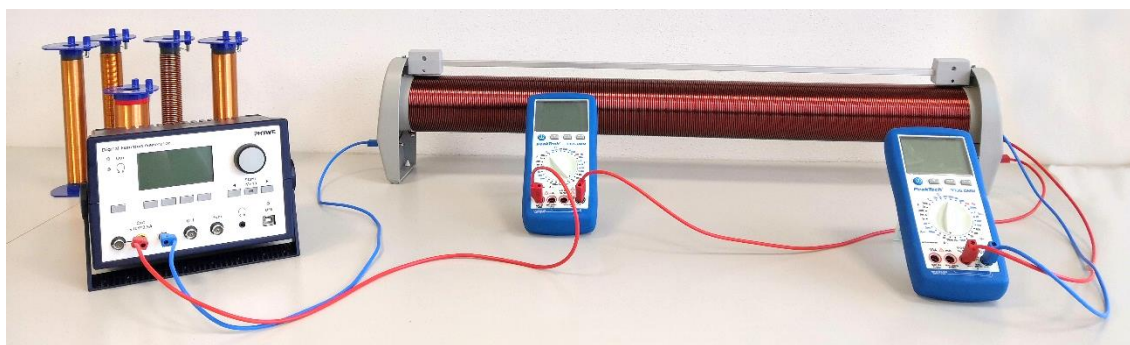
Tabulka č. 6-1: Tabulka pro zpracování hodnot měření indukovaného napětí

$N_z = \underline{\hspace{2cm}}$ $d_s = \underline{\hspace{2cm}}$ mm			
$\frac{V_{PP}}{V}$	$\frac{I_{ef}}{mA}$	$\frac{U_{ef}(\text{naměřené})}{mV}$	$\frac{U_{ef}(\text{vypočtené})}{mV}$
0,5			
⋮			
10,0			

6.2.4 Fotodokumentace úkolu



Obr. 6-8: Sestava pro měření indukovaného napětí před umístěním zkušební cívky do dutiny solenoidu



Obr. 6-9: Sestava pro měření indukovaného napětí po umístění zkušební cívky do dutiny solenoidu

6.3 Úkol č. 2 – Měření relativní permeability vzduchu

6.3.1 Zadání úkolu

Proměřte indukované napětí na zkušební cívce v závislosti na proudu protékajícím v solenoidu, z těchto hodnot stanovte relativní permeabilitu vzduchu.

6.3.2 Postup měření

a) Opakujte měření podle návodu u úkolu č. 1, tentokrát však proměřte cívky

- se 200 závitů a průměrem dutiny $d_z = 41$ mm
- se 100 závitů a průměrem dutiny $d_z = 41$ mm

b) Naměřená data zapisujte do tabulky č. 6-2.

c) Zpracujte získaná data

- Ze vztahu (6-17) vyjádřete relativní permeabilitu μ_r .
- Z jednotlivých hodnot U_{ef} a I_{ef} vypočtete z upraveného vzorce (6-17) relativní permeabilitu vzduchu. Výpočet provádějte pro každou cívku zvlášť.
- Stanovte chyby měření, stanovené hodnoty porovnejte s tabulkovou hodnotou a rozdíly patřičně okomentujte.

6.3.3 Tabulky vhodné pro zpracování výsledků měření

Tabulka č. 6-2: Tabulka pro zpracování hodnot měření relativní permeability

$N_z = \underline{\hspace{2cm}}$ $d_s = \underline{\hspace{2cm}}$ mm						
i	$\frac{V_{PP}}{V}$	$\frac{I_{ef}}{mA}$	$\frac{U_{ef}}{mV}$	$\frac{\mu_r}{\text{bezrozměrné}}$	$\frac{\Delta\mu_r}{\text{bezrozměrné}}$	$\frac{\Delta^2\mu_r}{\text{bezrozměrné}}$
1	0,5					
⋮	⋮					
20	10,0					
-	-	-	-	$\overline{\mu_r}$	$\sum_i \Delta\mu_r$	$\sum_i \Delta^2\mu_r$

6.3.4 Fotodokumentace úkolu

Zapojení odpovídá fotodokumentaci u předchozího úkolu (viz obr. 6-8 a 6-9).

6.4 Zpracování dat měření

6.4.1 Úkol č. 1

Do vzorce (6-17) musíme dosadit za průřez zkušební cívky. Jelikož je průřez kruhového tvaru, platí

$$S_Z = \pi \left(\frac{d_Z}{2} \right)^2 = \frac{\pi d_Z^2}{4}. \quad (6-18)$$

Tedy

$$U_{ef} = 2\pi f \cdot \mu_0 \mu_r \cdot \frac{N N_Z \frac{\pi d_Z^2}{4}}{l} \cdot I_{ef}. \quad (6-19)$$

Tabulka č. 6-3: Hodnoty indukovaného napětí pro cívku $N_Z = 300$ z. a $d_Z = 33$ mm

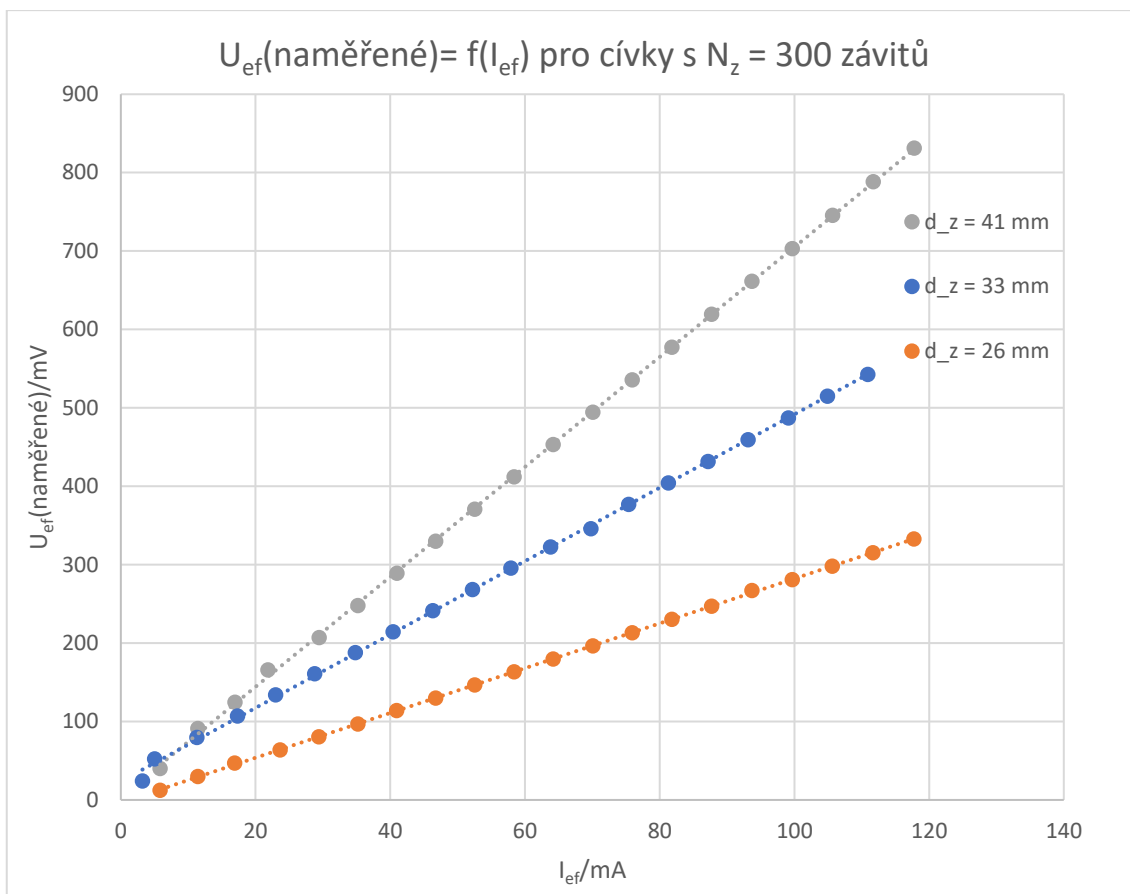
$N_Z = 300$ z. $d_Z = 33$ mm			
$\frac{V_{PP}}{V}$	$\frac{I_{ef}}{mA}$	$\frac{U_{ef}(\text{naměřené})}{mV}$	$\frac{U_{ef}(\text{vypočtené})}{mV}$
0,5	3,2	23,9	15,73
1,0	5,0	52,1	24,58
1,5	11,3	79,7	55,55
2,0	17,3	106,9	85,05
2,5	23,0	134,0	113,08
3,0	28,8	160,7	141,59
3,5	34,8	187,9	171,09
4,0	40,4	214,4	198,62
4,5	46,3	241,1	227,62
5,0	52,2	268,3	256,63
5,5	57,9	295,4	284,65
6,0	63,8	322,4	313,66
6,5	69,8	345,9	343,16
7,0	75,4	376,7	370,69
7,5	81,3	404,1	399,70
8,0	87,2	431,6	428,70
8,5	93,1	459,3	457,71
9,0	99,1	487,1	487,21
9,5	104,9	514,9	515,72
10,0	110,9	542,7	545,22

Tabulka č. 6-4: Hodnoty indukovaného napětí pro cívku $N_Z = 300$ z. a $d_Z = 26$ mm

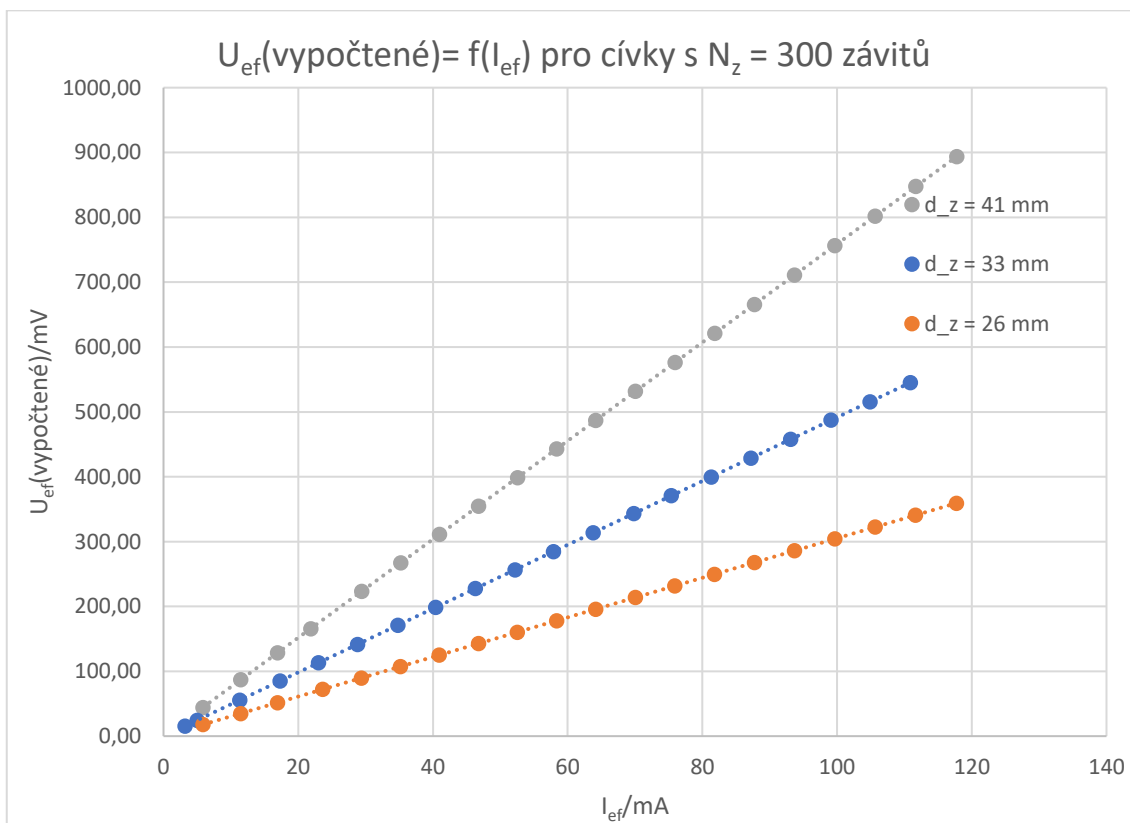
$N_Z = 300$ z. $d_Z = 26$ mm			
$\frac{V_{PP}}{V}$	$\frac{I_{ef}}{mA}$	$\frac{U_{ef}(\text{naměřené})}{mV}$	$\frac{U_{ef}(\text{vypočtené})}{mV}$
0,5	5,85	12,4	17,84
1,0	11,45	29,9	34,95
1,5	16,92	46,8	51,63
2,0	23,64	63,6	72,14
2,5	29,40	80,4	89,72
3,0	35,18	96,8	107,36
3,5	40,95	113,9	124,97
4,0	46,75	129,7	142,67
4,5	52,53	146,6	160,31
5,0	58,37	163,2	178,13
5,5	64,17	179,7	195,83
6,0	70,07	196,5	213,84
6,5	75,92	213,3	231,69
7,0	81,81	230,1	249,67
7,5	87,72	246,9	267,70
8,0	93,67	266,9	285,86
8,5	99,66	280,9	304,14
9,0	105,64	297,9	322,39
9,5	111,66	315,3	340,77
10,0	117,74	332,6	359,32

Tabulka č. 6-5: Hodnoty indukovaného napětí pro cívku $N_Z = 300$ z. a $d_Z = 41$ mm

$N_Z = 300$ z. $d_Z = 41$ mm			
$\frac{V_{PP}}{V}$	$\frac{I_{ef}}{mA}$	$\frac{U_{ef}(\text{naměřené})}{mV}$	$\frac{U_{ef}(\text{vypočtené})}{mV}$
0,5	5,85	12,4	17,84
1,0	11,46	29,9	34,95
1,5	16,92	46,8	51,63
2,0	23,64	63,6	72,14
2,5	29,40	80,4	89,72
3,0	35,18	96,8	107,36
3,5	40,95	113,9	124,97
4,0	46,75	129,7	142,67
4,5	52,53	146,6	160,31
5,0	58,37	163,2	178,13
5,5	64,17	179,7	195,83
6,0	70,07	196,5	213,84
6,5	75,92	213,3	231,69
7,0	81,81	230,1	249,67
7,5	87,72	246,9	267,70
8,0	93,67	266,9	285,86
8,5	99,66	280,9	304,14
9,0	105,64	297,9	322,39
9,5	111,66	315,3	340,77
10,0	117,74	332,6	359,32



Obr. 6-10: Graf závislosti $U_{ef}(\text{naměřené}) = f(I_{ef})$ pro cívky s $N_z = 300$ z.



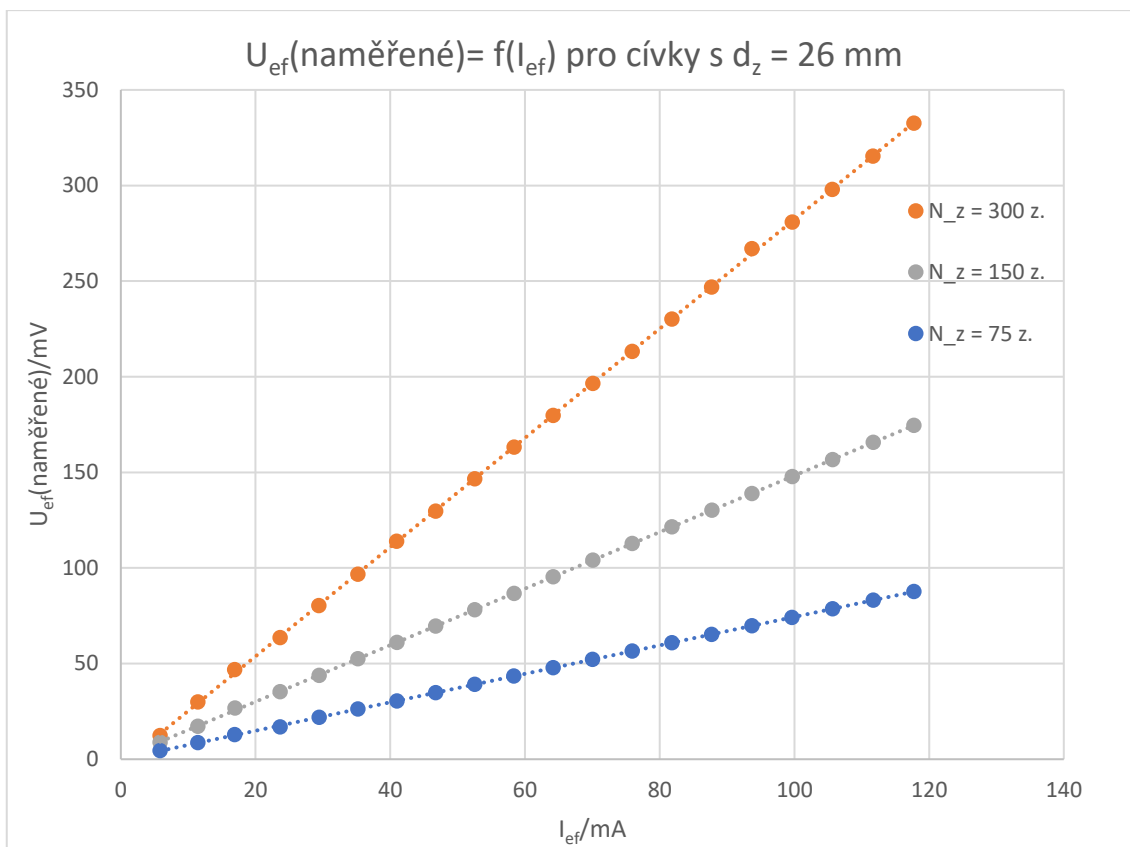
Obr. 6-11: Graf závislosti $U_{ef}(\text{vypočtené}) = f(I_{ef})$ pro cívky s $N_z = 300$ z.

Tabulka č. 6-6: Hodnoty indukovaného napětí pro cívku $N_Z = 75$ z. a $d_Z = 26$ mm

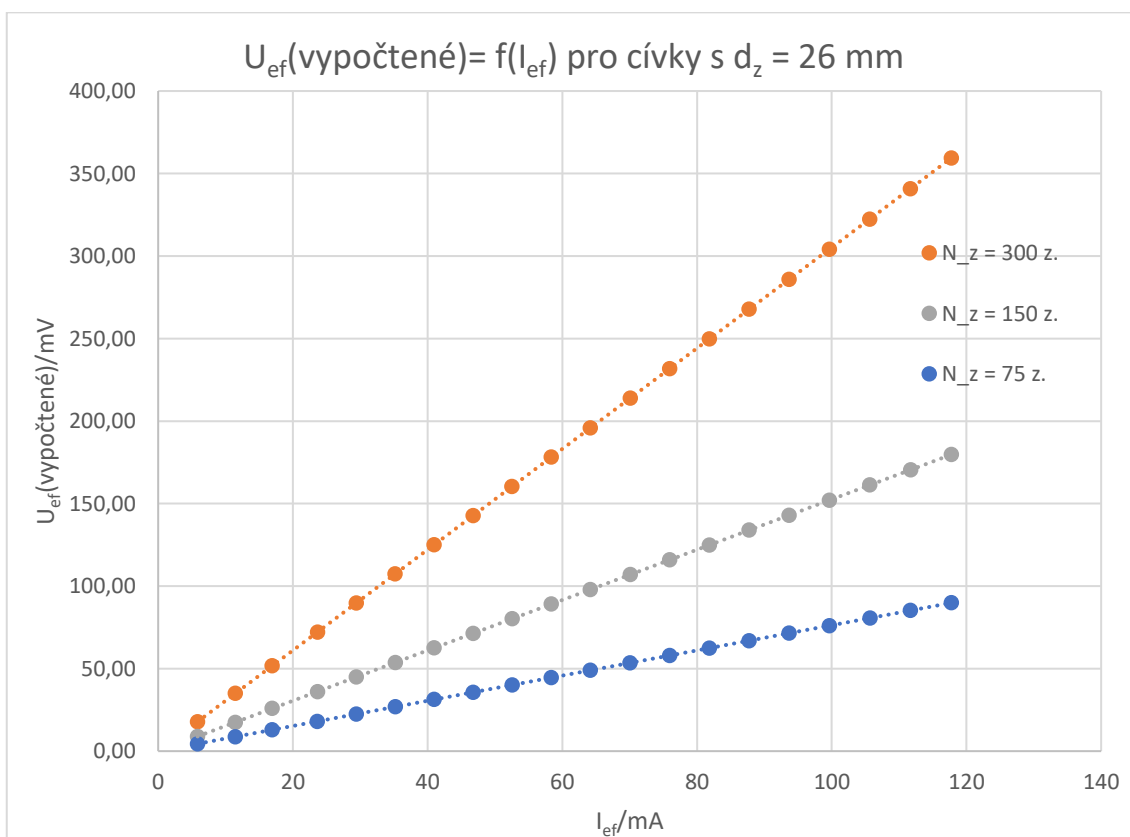
$N_Z = 75$ z. $d_Z = 26$ mm			
$\frac{V_{PP}}{V}$	$\frac{I_{ef}}{mA}$	$\frac{U_{ef}(\text{naměřené})}{mV}$	$\frac{U_{ef}(\text{vypočtené})}{mV}$
0,5	5,85	4,51	4,46
1,0	11,45	8,71	8,73
1,5	16,92	12,80	12,91
2,0	23,63	16,83	18,03
2,5	29,42	21,92	22,45
3,0	35,19	26,21	26,85
3,5	40,97	30,50	31,26
4,0	46,75	34,82	35,67
4,5	52,54	39,12	40,09
5,0	58,35	43,45	44,52
5,5	64,16	47,80	48,95
6,0	70,04	52,18	53,44
6,5	75,92	56,50	57,92
7,0	81,81	60,90	62,42
7,5	87,71	65,31	66,92
8,0	93,67	69,73	71,47
8,5	99,64	74,16	76,02
9,0	105,67	78,64	80,62
9,5	111,69	83,11	85,21
10,0	117,75	87,64	89,84

Tabulka č. 6-7: Hodnoty indukovaného napětí pro cívku $N_Z = 150$ z. a $d_Z = 26$ mm

$N_Z = 150$ z. $d_Z = 26$ mm			
$\frac{V_{PP}}{V}$	$\frac{I_{ef}}{mA}$	$\frac{U_{ef}(\text{naměřené})}{mV}$	$\frac{U_{ef}(\text{vypočtené})}{mV}$
0,5	5,85	8,88	8,91
1,0	11,45	17,16	17,46
1,5	16,93	26,69	25,82
2,0	23,65	35,29	36,09
2,5	29,42	43,88	44,89
3,0	35,20	52,46	53,71
3,5	40,98	61,01	62,53
4,0	46,76	69,57	71,35
4,5	52,55	78,12	80,19
5,0	58,37	86,73	89,07
5,5	64,17	95,37	97,92
6,0	70,07	104,04	106,92
6,5	75,93	112,72	115,86
7,0	81,82	121,44	124,85
7,5	87,73	130,18	133,87
8,0	93,68	138,99	142,95
8,5	99,66	147,86	152,07
9,0	105,66	156,74	161,23
9,5	111,70	165,68	170,44
10,0	117,76	174,64	179,69



Obr. 6-12: Graf závislosti $U_{ef}(\text{naměřené}) = f(I_{ef})$ pro cívky s $d_z = 26$ mm



Obr. 6-13: Graf závislosti $U_{ef}(\text{vypočtené}) = f(I_{ef})$ pro cívky s $d_z = 26$ mm

6.4.2 Úkol č. 2

Ze vzorce (6-19) vyjádříme relativní permeabilitu

$$\mu_r = \frac{2IU_{ef}}{\pi^2 f \mu_0 N N_z d_z^2 I_{ef}} \quad (6-20)$$

Tabulka č. 6-8: Indukovaného napětí pro cívku $N_z = 200$ z. a $d_z = 41$ mm a dopočtená relativní permeabilita vzduchu

$N_z = 200$ z. $d_z = 41$ mm						
i	$\frac{V_{PP}}{V}$	$\frac{I_{ef}}{mA}$	$\frac{U_{ef}}{mV}$	$\frac{\mu_r}{\text{bezrozměrné}}$	$\frac{\Delta\mu_r}{\text{bezrozměrné}}$	$\frac{\Delta^2\mu_r}{\text{bezrozměrné}}$
1	0,5	5,84	24,7	0,878	0,087	0,007527
2	1,0	11,45	53,2	0,965	0,000	$1,973 \cdot 10^{-7}$
3	1,5	16,93	81,1	0,995	-0,030	$90,1 \cdot 10^{-5}$
4	2,0	23,63	108,4	0,953	0,012	$14,7 \cdot 10^{-5}$
5	2,5	29,43	136,0	0,960	0,005	$2,617 \cdot 10^{-5}$
6	3,0	35,21	163,2	0,963	0,002	$4,961 \cdot 10^{-6}$
7	3,5	40,99	190,5	0,965	0,000	$1,248 \cdot 10^{-7}$
8	4,0	46,76	217,8	0,967	-0,003	$6,265 \cdot 10^{-6}$
9	4,5	52,56	245,0	0,968	-0,003	$1,045 \cdot 10^{-5}$
10	5,0	58,38	272,4	0,969	-0,004	$1,761 \cdot 10^{-5}$
11	5,5	64,21	299,8	0,970	-0,005	$2,338 \cdot 10^{-5}$
12	6,0	70,08	327,5	0,970	-0,006	$3,251 \cdot 10^{-5}$
13	6,5	75,94	355,1	0,971	-0,006	$3,956 \cdot 10^{-5}$
14	7,0	81,84	382,9	0,972	-0,007	$4,659 \cdot 10^{-5}$
15	7,5	87,73	410,3	0,971	-0,006	$4,165 \cdot 10^{-5}$
16	8,0	93,71	438,4	0,972	-0,007	$4,552 \cdot 10^{-5}$
17	8,5	99,68	466,4	0,972	-0,007	$4,753 \cdot 10^{-5}$
18	9,0	105,70	494,7	0,972	-0,007	$5,119 \cdot 10^{-5}$
19	9,5	111,73	523,0	0,972	-0,007	$5,329 \cdot 10^{-5}$
20	10,0	117,80	551,4	0,972	-0,007	$5,296 \cdot 10^{-5}$
-	-	-	-	$\bar{\mu}_r = 0,96476$	$\sum_i \Delta\mu_r = 0$	$\sum_i \Delta^2\mu_r = 0,1$

$$\overline{s_{\mu_r}} = \sqrt{\frac{\sum \Delta^2 \mu_r}{n(n-1)}} = 0,016223$$

$$\mu_r = (0,965 \pm 0,016)$$

Tabulka č. 6-9: Indukovaného napětí pro cívku $N_Z = 100$ z. a $d_Z = 41$ mm a dopočtená relativní permeabilita vzduchu

$N_Z = 100$ z. $d_Z = 41$ mm						
i	$\frac{V_{PP}}{V}$	$\frac{I_{ef}}{mA}$	$\frac{U_{ef}}{mV}$	$\frac{\mu_r}{\text{bezrozměrné}}$	$\frac{\Delta\mu_r}{\text{bezrozměrné}}$	$\frac{\Delta^2\mu_r}{\text{bezrozměrné}}$
1	0,5	5,85	12,13	0,862	0,124	0,015273767
2	1,0	11,45	29,95	1,087	-0,101	0,010250002
3	1,5	16,93	42,90	1,053	-0,067	0,004493158
4	2,0	23,69	56,71	0,994	-0,009	$7,584 \cdot 10^{-5}$
5	2,5	29,44	70,44	0,994	-0,008	$6,758 \cdot 10^{-5}$
6	3,0	35,21	84,13	0,992	-0,007	$4,701 \cdot 10^{-5}$
7	3,5	40,99	97,84	0,991	-0,006	$3,407 \cdot 10^{-5}$
8	4,0	46,75	111,53	0,991	-0,005	$2,826 \cdot 10^{-5}$
9	4,5	52,55	125,22	0,990	-0,004	$1,727 \cdot 10^{-5}$
10	5,0	58,38	139,00	0,989	-0,003	$1,127 \cdot 10^{-5}$
11	5,5	64,18	152,78	0,989	-0,003	$1,003 \cdot 10^{-5}$
12	6,0	70,07	166,68	0,988	-0,002	$5,994 \cdot 10^{-6}$
13	6,5	75,93	180,52	0,987	-0,002	$3,624 \cdot 10^{-6}$
14	7,0	81,83	194,47	0,987	-0,002	$2,289 \cdot 10^{-6}$
15	7,5	87,73	205,10	0,971	0,015	0,000211485
16	8,0	93,67	218,30	0,968	0,018	0,000309338
17	8,5	99,65	232,20	0,968	0,018	0,000314716
18	9,0	105,65	246,60	0,969	0,016	0,000258979
19	9,5	111,66	260,80	0,970	0,015	0,000238805
20	10,0	117,74	275,20	0,971	0,015	0,000217584
-	-	-	-	$\overline{\mu_r} = 0,98552$	$\sum_i \Delta\mu_r = 0$	$\sum_i \Delta^2\mu_r = 0,03$

$$\overline{s_{\mu_r}} = \sqrt{\frac{\sum \Delta^2 \mu_r}{n(n-1)}} = 0,00889$$

$$\mu_r = (0,986 \pm 0,009)$$

6.4.3 Závěr laboratorního cvičení

Splnil jsem zadání laboratorního cvičení a nedopustil jsem se žádných hrubých chyb. V úkolu č. 1 jsem proměřil závislost indukovaného napětí na elektrickém proudu. Z grafů pro naměření hodnoty je evidentní, že směrnice lineární regrese skutečně závisí na zkoumaných parametrech zkušební cívky (tj. na jejím počtu závitů a na průměru kostry). Vztah (6-17) byl navíc potvrzen i porovnáním grafů pro naměřené a vypočtené hodnoty. Grafy se pouze mírně liší, a to ve strmosti spojnic trendu. Odpověď na tuto nepřesnost dává úloha č. 2. V druhé úloze byla stanovena relativní permeabilita materiálu uvnitř solenoidu. Hodnoty μ_r jsou o něco nižší, než se uvádí v matematicko-fyzikálních a chemických tabulkách (přehled výsledků včetně porovnání s MFChT ukazuje tabulka č. 6-10). Výsledek lze interpretovat následovně – úvaha provedená v teoretické části (a následně použita v úkolu č. 1) byla do jisté míry zavádějící. Uvnitř solenoidu totiž není pouze vzduch, ale i zkušební cívka, jejíž materiál evidentně zeslabil magnetické pole solenoidu. Použití hodnoty $\mu_r = 1$ proto v úloze č. 1 mírně ovlivnilo směrnice funkcí. Vztah pro magnetickou indukci uvnitř solenoidu, tj. vztah (6-5), byl navíc zjednodušen. Možná by pomohlo použít vztah přesně pro střed solenoidu, viz [7].

Tabulka č. 6-10: Porovnání naměřených a tabulkových hodnot

použitá cívka	Stanovené hodnoty	MFChT
$N_Z = 200$ z. a $d_Z = 41$ mm	$\mu_r = (0,965 \pm 0,016)$	$\mu_r = 1,0000003$
$N_Z = 100$ z. a $d_Z = 41$ mm	$\mu_r = (0,986 \pm 0,009)$	

7 SOLÁRNÍ ČLÁNEK

7.1 Teorie

a) polovodiče

Polovodiče jsou látky, jejichž měrná elektrická vodivost (konduktivita) náleží intervalu $\gamma = (10^6 - 10^{-8}) \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ a jejichž vodivost zprostředkovávají elektrony a díry, které vznikly vytrhnutím elektronů z vazby dodáním energie (teplené, světelné...) [1].

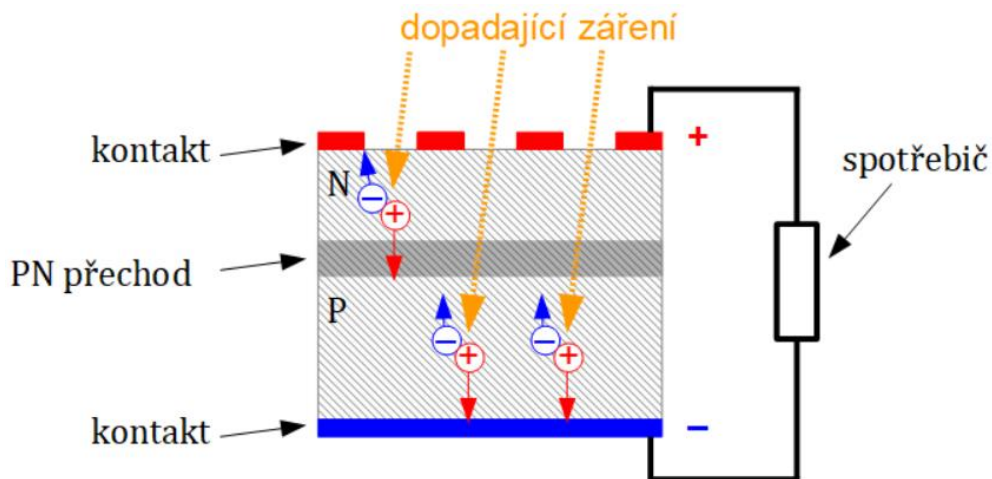
Počet elektronů a děr lze zvýšit přidáním příměsi. Na základě použité příměsi rozlišujeme dva druhy příměsových (nevládní) vodivosti – převládají-li použitím příměsi ve vzorku volné elektrony, označujeme vodivost jako vodivost typu N (negativní). Naopak při převládajícím počtu děr se jedná o vodivost typu P (pozitivní).

Přiložíme-li k sobě dva vzorky s různou příměsovou vodivostí (jeden vzorek P a druhý N), vzniká zde spoj, který se nazývá hradlová vrstva (v hradlové vrstvě dojde k rekombinaci elektronů a děr, přechod PN je téměř nevodivý a vzniká v něm elektrické pole).

b) fotoelektrický článek (fotočlánek)

Fotočlánek je polovodičová součástka sloužící k přímé přeměně energie slunečního záření na elektrickou energii [2].

Fotočlánek je tvořen dvěma vzorky polovodičů s různou příměsovou vodivostí, ke každému z těchto vzorků jsou připojeny kontakty. Dopadá-li sluneční záření (tj. fotony) na takto vytvořený fotočlánek, předávají fotony svoji energii vzorkům polovodiče a dochází ke vzniku volných elektronů a děr. V oblasti P je přebytek děr, v oblasti N naopak přebytek elektronů. V důsledku rozdílných potenciálů v obou oblastech vzniká mezi kontakty napětí. Uzavřením obvodu protéká elektrický proud. [10]



Obr. 7-1: Princip fotočlánku

c) popis fotočlánku [5] [11] [12]

Fotočlánek je charakterizován různými fyzikálními veličinami, přičemž některé z nich lze odečíst z voltampérové charakteristiky (často se pro voltampérovou charakteristiku užívá zkrácený název VA charakteristika).

Jednou z nejzákladnějších veličin je proud nakrátko, který bývá označován I_{SC} (z anglického short-circuit current), tj. proud, který protéká obvodem, je-li zkratován (spotřebič zapojený v obvodu má nulový odpor).

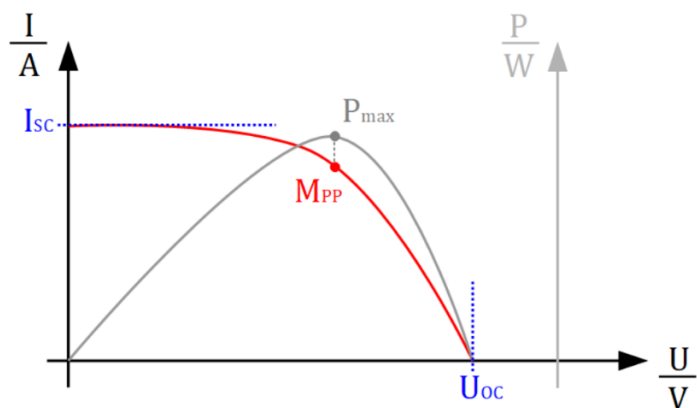
Dále zjišťujeme napětí naprázdno U_{OC} (open circuit voltage), tj. napětí, při kterém obvodem neprochází žádný proud (spotřebič zapojený v obvodu má nekonečně velký odpor).

Jako M_{PP} označujeme bod maximálního výkonu (maximal power point), tj. bod VA charakteristiky, ve kterém fotočlánek dosahuje maximálního výkonu P_{max} .

Kromě uvedených fyzikálních veličin má význam i proud protékající článkem při napětí 450 mV, účinnost fotočlánku, sériový odpor, paralelní odpor atd.

Všechny tyto veličiny popisující fotočlánek (respektive jeho voltampérová charakteristika) značně závisí na nejrůznějších faktorech – např. intenzitě dopadajícího záření, na teplotě, na stáří fotočlánku apod.

Typický průběh VA charakteristiky fotočlánku představuje obr. 7-2, ve kterém jsou vyznačeny některé již zmíněné významné fyzikální veličiny.



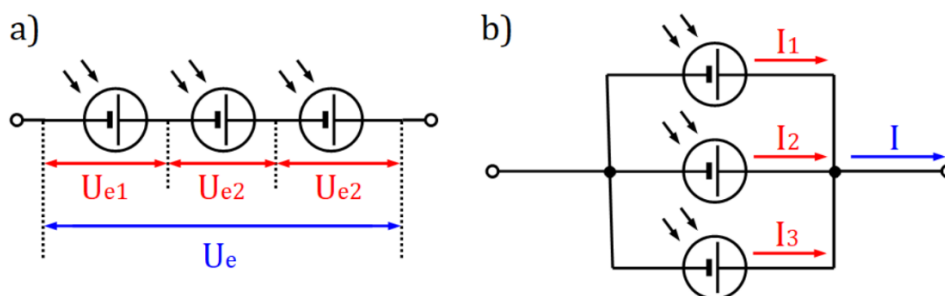
Obr. 7-2: VA charakteristika fotočlánku

d) solární baterie

Fotočlánky se spojují do solárních baterií (fotovoltaiických článků, solárních článků). Pro spojování fotočlánků platí stejná pravidla jako pro spojování běžných zdrojů.

Použijeme-li sériové zapojení několika fotočlánků (viz obr. 7-3a), získáme solární baterii, jejíž výsledné elektromotorické napětí bude dáno součtem elektromotorických napětí jednotlivých fotočlánků.

Paralelní kombinaci fotočlánků (obráz. 7-3b) používáme pro zvýšení proudu v obvodu.



Obr. 7-3: Spojování fotočlánků do solárních baterií

e) radiometrie [13] [14] [15]

Sluneční záření je záření elektromagnetické povahy, které do prostoru přenáší zářivou energii Q_e .

Je účelné zavést zářivý tok Φ_e , jenž má význam výkonu plochou přenesené zářivé energie za jednotku času. Vzhledem k definici je jednotkou zářivého toku watt.

Zářivost bodového zdroje je podíl zářivého toku vysílaného zdrojem do malého prostorového úhlu $d\omega$ a tohoto úhlu (viz obr. 7-4), tedy

$$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\omega}. \quad (7-1)$$

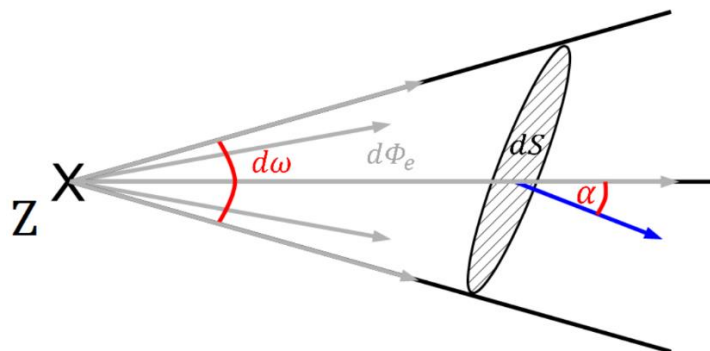
Intenzitu ozáření E_e pak definujeme jako podíl zářivého toku, který dopadá na elementární plochu dS (kolmou ke směru šíření záření), a této plochy. Intenzita ozáření má jednotku $W \cdot m^{-2}$ a platí pro ni

$$E_e = \frac{d\Phi_e}{dS}. \quad (7-2)$$

Mezi intenzitou ozáření a zářivostí zdroje existuje vztah

$$E_e = \frac{I_e}{d^2} \cos \alpha, \quad (7-3)$$

kde α je úhel, který svírá dopadající záření s normálou plochy a d je vzdálenost ozařované plochy od zdroje (viz obr. 7-4).



Obr. 7-4: K objasnění některých radiometrických veličin

7.2 Úkol č. 1 – Intenzita ozáření

7.2.1 Zadání úkolu

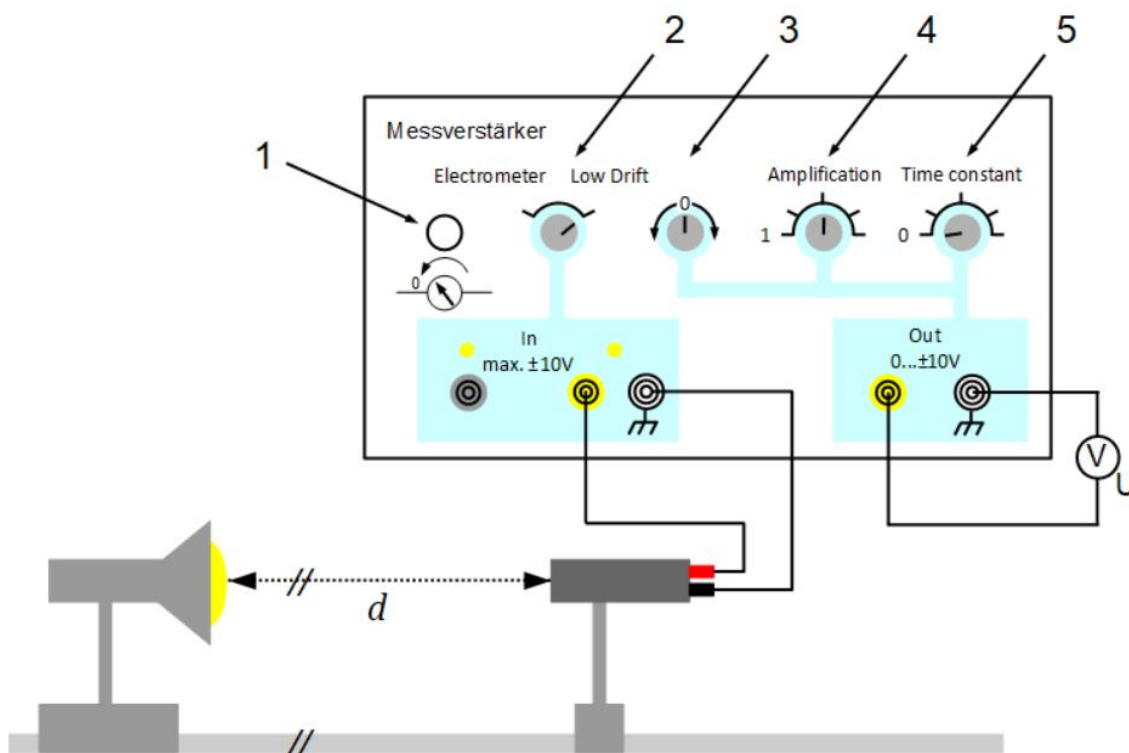
Proměřte, jak závisí intenzita ozáření E_e na vzdálenosti od zdroje záření.

7.2.2 Postup měření

a) Na jednu stranu optické lavice umístěte zdroj záření (lampu) a na druhý konec umístěte termočlánek. Je nezbytné, aby osy lampy a termočlánu ležely na jedné přímce rovnoběžné s optickou lavicí (viz obr. 7-5)

b) Termočlánek připravte k měření

- Zkontrolujte, že je měřicí zesilovač (Messverstärker) vypnutý (tlačítko je na zadní straně přístroje).
- Termočlánek připojte na vstupní svorky měřicího zesilovače, na výstup připojte voltmetr (zapojení je znázorněno na obr. 7-5).
- Měřicí zesilovač přepněte do režimu vhodného pro měření malých napětí (přepínač 2 na obr. 7-5 přepněte do pozice Low Drift), otočný knoflík 3 natočte tak, aby byl ukazatel přibližně na polovině stupnice, zesílení nastavte na hodnotu 100 (tlačítko 4 s označením Amplification přepněte do polohy 10^2), časovou konstantu volte 0 (na tlačítku 5 s označením Time constant nastavte 0).



Obr. 7-5: Zapojení termočlánu pro měření intenzity ozáření

c) Proměřte závislost $E_e = f(d)$, kde d je vzdálenost zdroje světla od termočlánu

- Zapněte zdroj světla.
- Vzdálenost termočlánu od zdroje světla d volte v intervalu 50 až 100 cm s krokem 5 cm.

- V každé vzdálenosti odečtete hodnotu napětí na voltmetru. Hodnoty zanášejte do tabulky č. 7-1
- Vypočtete intenzitu ozáření pro dané vzdálenosti, vypočtené hodnoty intenzity doplňte do tabulky č. 7-1. Mezi intenzitou ozáření a naměřeným napětím je vztah

$$E_e = \frac{U}{100 \cdot S \cdot C'} \quad (7-4)$$

kde S je obsah plochy termočlánku ($S = 4,909 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$) a C je tzv. citlivost termočlánku na napětí ($C = 0,16 \text{ V} \cdot \text{W}^{-1}$). Koeficient 100 má význam zvoleného zesílení.

d) Vypněte zdroj světla.

e) Zpracujte získaná data

- Sestavte bodový graf $E_e = f(d)$.
- Proveďte vhodnou regresi sestaveného grafu a okomentujte, zda průběh regresní funkce odpovídá teoretickému vztahu (7-3), tj. jestli intenzita ozáření klesá nepřímo úměrně s druhou mocninou vzdáleností od zdroje.

7.2.3 Tabulky vhodné ke zpracování výsledků měření

Tabulka č. 7-1: Tabulka pro zpracování hodnot měření intenzity ozáření

$\frac{d}{\text{cm}}$	$\frac{U}{\text{V}}$	$\frac{E_e}{\text{W} \cdot \text{m}^{-2}}$
50		
⋮		
100		

7.2.4 Fotodokumentace úkolu



Obr. 7-6: Sestava pro stanovení intenzity ozáření pomocí termočlánku

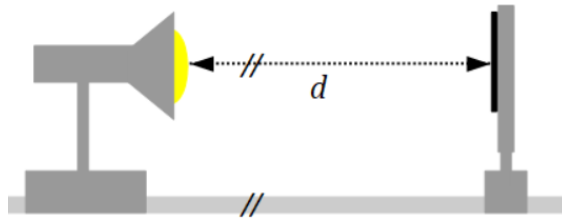
7.3 Úkol č. 2 – Stanovení proudu nakrátko a napětí naprázdno

7.3.1 Zadání úkolu

Určete hodnoty proudu nakrátko a napětí na prázdko při různém osvětlení.

7.3.2 Postup měření

a) Sestavte aparaturu podle obr. 7-7. Ke svorkám solárního článku připojte digitální multimetr.



Obr. 7-7: Souprava zdroje světla a solárního článku

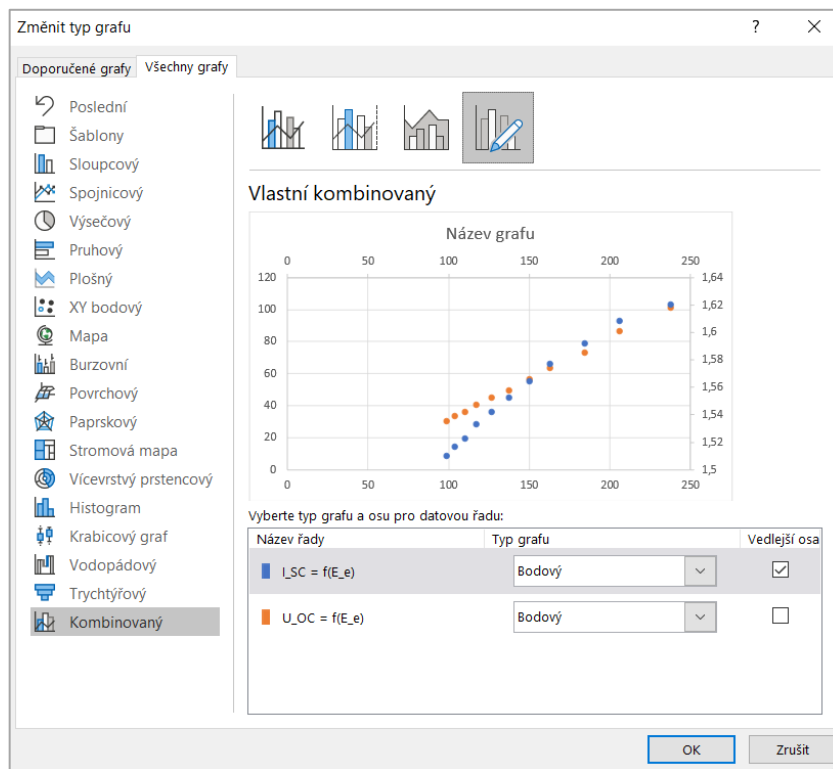
b) Proměřte závislost $I_{SC} = f(d)$ a $U_{OC} = f(d)$, kde d je vzdálenost zdroje světla od solárního článku.

- Zapněte zdroj světla.
- Vzdálenost solárního panelu od zdroje světla d volte v intervalu 50 až 100 cm s krokem 5 cm.
- V každé vzdálenosti stanovte proud nakrátko a napětí na prázdko, hodnoty zaznamenejte do tabulky č. 7-2. Hodnoty intenzity ozáření použijte z úkolu č. 1.

c) Vypněte zdroj světla, aby se souprava zbytečně nezahřívala.

d) Sestavte v Excelu graf se dvěma osami y

- Nejprve sestavte bodový graf a vyneste do něj dvě řady. První řada necht' je závislost $I_{SC} = f(E_e)$, druhá řada pak $U_{OC} = f(E_e)$.
- Rozklikněte záložku „Návrh grafu“, zde vyberte ikonu „Změnit typ grafu“, otevře se okno, ve kterém vyberte možnost kombinovaný graf.
- Parametry kombinovaného grafu nastavte podle obr. 7-8 a nastavení potvrďte stiskem tlačítka „OK“.



Obr. 7-8: Nastavení kombinovaného grafu v úkolu č. 2

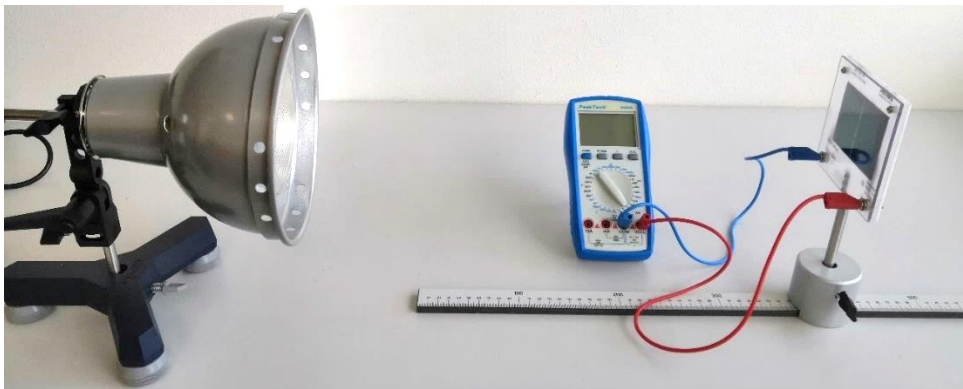
- Obě řady proložte vhodnou regresní křivkou.
- Graf opatřete řádnými popisky, legendou apod.

7.3.3 Tabulky vhodné ke zpracování výsledků měření

Tabulka č. 7-2: Tabulka pro zpracování hodnot měření proudu nakrátko a napětí na prázdko

$\frac{d}{\text{cm}}$	$\frac{E_e}{\text{W} \cdot \text{m}^{-2}}$	$\frac{I_{SC}}{\text{mA}}$	$\frac{U_{OC}}{\text{V}}$
50			
:			
100			

7.3.4 Fotodokumentace úkolu



Obr. 7-9: Sestava pro stanovení proudu nakrátko a napětí naprázdno solárního článku

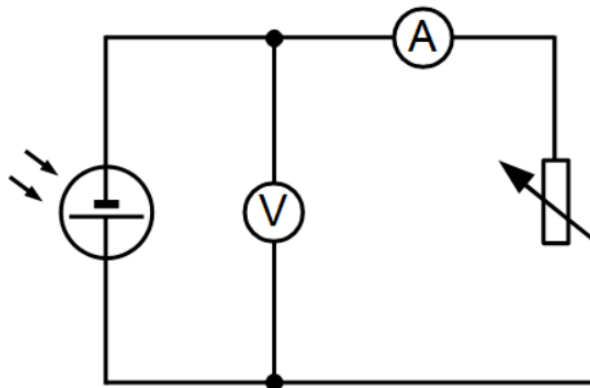
7.4 Úkol č. 3 – Proměření VA charakteristiky solárního článku

7.4.1 Zadání úkolu

Proměřte VA charakteristiku solárního článku při různých intenzitách ozáření, na jedné VA charakteristice určete bod maximálního výkonu M_{PP} .

7.4.2 Postup měření

a) Zapojte obvod podle obr. 7-10. Sestava zdroje světla a solárního článku je stejná jako v předchozím úkolu (viz obr. 7-7). Reostat nastavte do polohy 1 (vyznačeno na reostatu).



Obr. 7-10: Obvod pro měření VA charakteristiky

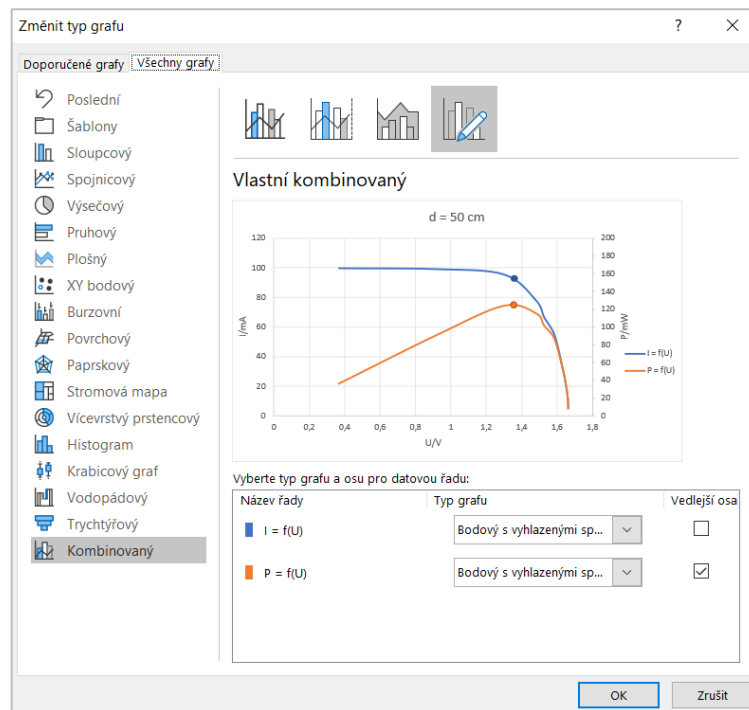
b) Proměřte VA charakteristiku

- Vzdálenost solárního článku od zdroje světla volte $d = 50$ cm.
- Z úkolu č. 1 doplňte, jaká intenzita ozáření této vzdálenosti odpovídá.
- Zapněte zdroj světla.
- Pomocí jezdce reostatu měňte jeho odpor. Mezi polohou 1 a polohou 2 jezdce vyberte alespoň 15 hodnot. V každé pozici odečtěte z digitálních multimetrů hodnoty napětí a proudu, ty zanepte do tabulky č. 7-3.
- Do tabulky č. 7-3 taktéž zaznamenejte teplotu, při které měření probíhalo.
- Tentýž postup opakujte pro vzdálenost $d = 60$ cm a $d = 70$ cm.

c) Opět vypněte zdroj světla.

d) Zpracujte data měření

- Sestavte bodový graf $I = f(U)$ s vyhlazenými spojnici, který bude mít 3 řady. Necht' každá řada představuje VA charakteristiku pro jednu intenzitu ozáření fotočlánku.
- Graficky doplňte průběh funkcí tam, kde se vám ji nepodařilo proměřit, tj. graficky doplňte hodnoty proudu nakrátko a napětí naprázdno.
- Průběhy funkcí okomentujte s přihlédnutím k teoretické části.



Obr. 7-11: Nastavení kombinovaného grafu v úkolu č. 3

e) Na jedné již sestavené VA charakteristice určete bod maximálního výkonu M_{PP}

- Vyberte si jednu libovolnou VA charakteristiku.
- Data, ze kterých byla tato VA charakteristika vytvořena, přepište do tabulky č. 7-4 a v tabulce dopočtete hodnoty výkonu podle vztahu $P = UI$.

- Sestavte v Excelu graf se dvěma osami y . Nejprve sestavte bodový graf a vyneste do něj dvě řady. První řada necht' je závislost $I = f(U)$, druhá řada pak $P = f(U)$. Rozklikněte záložku „Návrh grafu“, zde vyberte ikonu „Změnit typ grafu“, otevře se okno, ve kterém vyberte možnost kombinovaný graf. Parametry kombinovaného grafu nastavte podle obr. 7-11 a nastavení potvrďte stiskem tlačítka „OK“. Graf vhodně naformátujte a graficky vyznačte bod maximálního výkonu M_{PP} (viz teoretická část).

7.4.3 Tabulky vhodné ke zpracování výsledků měření

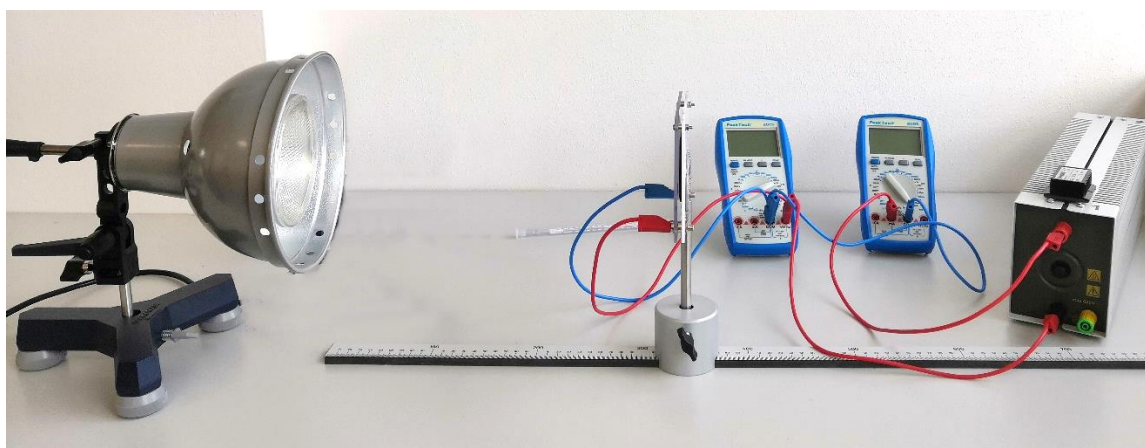
Tabulka č. 7-3: Tabulka pro zpracování hodnot měření VA charakteristiky solárního článku

$d = \text{_____ cm}; \quad E_e = \text{_____ W} \cdot \text{m}^{-2}; \quad t = \text{_____ } ^\circ\text{C}$		
i	$\frac{U}{\text{V}}$	$\frac{I}{\text{mA}}$
1		
⋮		
15		

Tabulka č. 7-4: Tabulka pro výpočet výkonu solárního článku

$d = \text{_____ cm}; \quad E_e = \text{_____ W} \cdot \text{m}^{-2}; \quad t = \text{_____ } ^\circ\text{C}$			
i	$\frac{U}{\text{V}}$	$\frac{I}{\text{mA}}$	$\frac{P}{\text{mW}}$
1			
⋮			
15			

7.4.4 Fotodokumentace úkolu



Obr. 7-12: Sestava pro měření VA charakteristiky solárního článku

7.5 Úkol č. 4 – Tvar VA charakteristiky v závislosti na teplotě

7.5.1 Zadání úkolu

Proměřte VA charakteristiku solárního článku při teplotě překračující teplotu v místnosti.

7.5.2 Postup měření

a) Použijte zapojení z předchozího úkolu.

b) Proměřte VA charakteristiku solárního článku ve vzdálenosti $d = 50$ cm od zdroje světla. Postup měření je totožný jako v předchozím úkolu. Tentokrát ale solární článek zahřívejte přiloženým fénem. Nejprve fén zapněte na nejvyšší výkon (přepínač na fénu dejte do polohy III), tím začne rychle růst teplota. Během ohřevu teplotu průběžně kontrolujte přiloženým teploměrem. Jakmile dosáhne přibližně 40 °C, přepněte fén na střední výkon (poloha II) a proměřte VA charakteristiku (ke zpracování měření použijte tabulku č. 7-3). Pozor, teplotu udržujte po celou dobu měření přibližně konstantní (pokud v průběhu měření uvidíte, že teplota klesá, opět dočasně zvyšte výkon fénu).

c) Zpracujte data měření

- Sestavte bodový graf $I = f(U)$ s vyhlazenými spojnicemi, který bude mít 2 řady. Jedna řada necht' představuje průběh VA charakteristiky bez použití fénu (tj. při teplotě okolí). Druhou řadu sestavte z dat naměřených při použití fénu.
- Graficky doplňte průběh funkcí tam, kde se vám ji nepodařilo proměřit, tj. graficky doplňte hodnoty proudu nakrátko a napětí naprázdno.
- Okomentujte, jak závisí průběh VA charakteristiky na teplotě.

7.5.3 Fotodokumentace úkolu



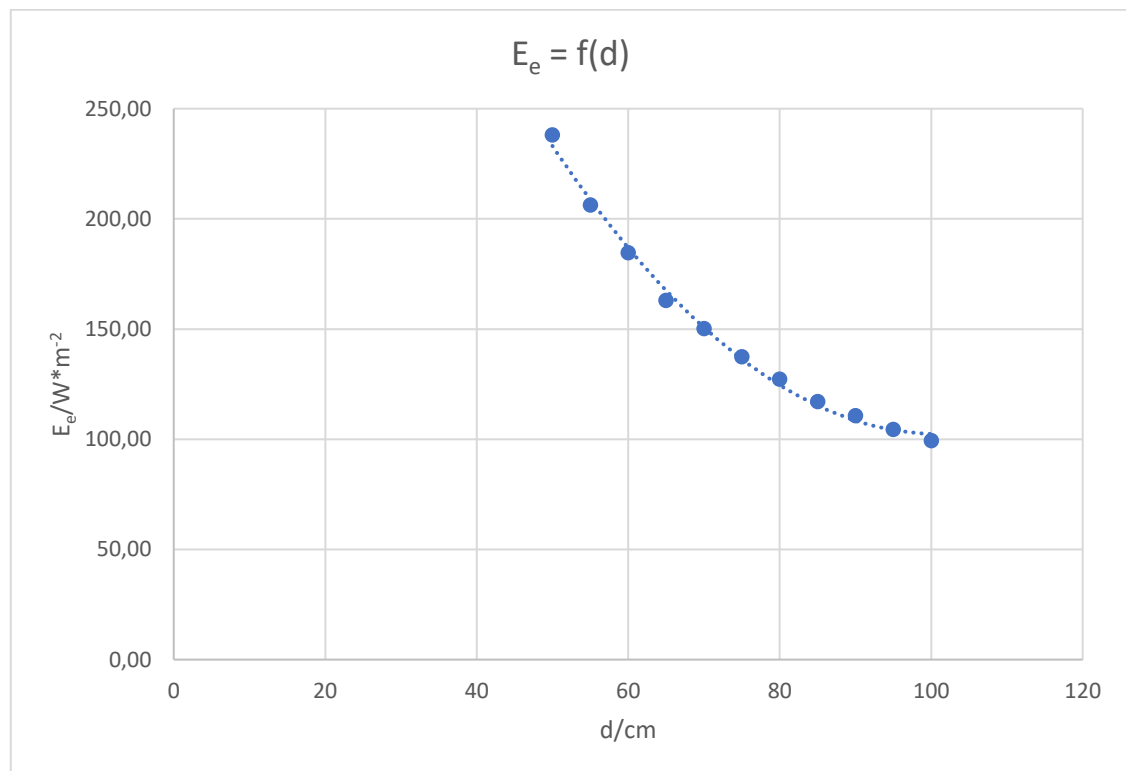
Obr. 7-13: Sestava pro stanovení VA charakteristiky solárního článku v závislosti na teplotě

7.6 Zpracování dat měření

7.6.1 Úkol č. 1

Tabulka č. 7-5: Měření intenzity ozáření

$\frac{d}{\text{cm}}$	$\frac{U}{\text{V}}$	$\frac{E_e}{\text{W} \cdot \text{m}^{-2}}$
50	1,87	238,08
55	1,62	206,25
60	1,45	184,61
65	1,28	162,97
70	1,18	150,23
75	1,08	137,50
80	1,00	127,32
85	0,92	117,13
90	0,87	110,77
95	0,82	104,40
100	0,78	99,31

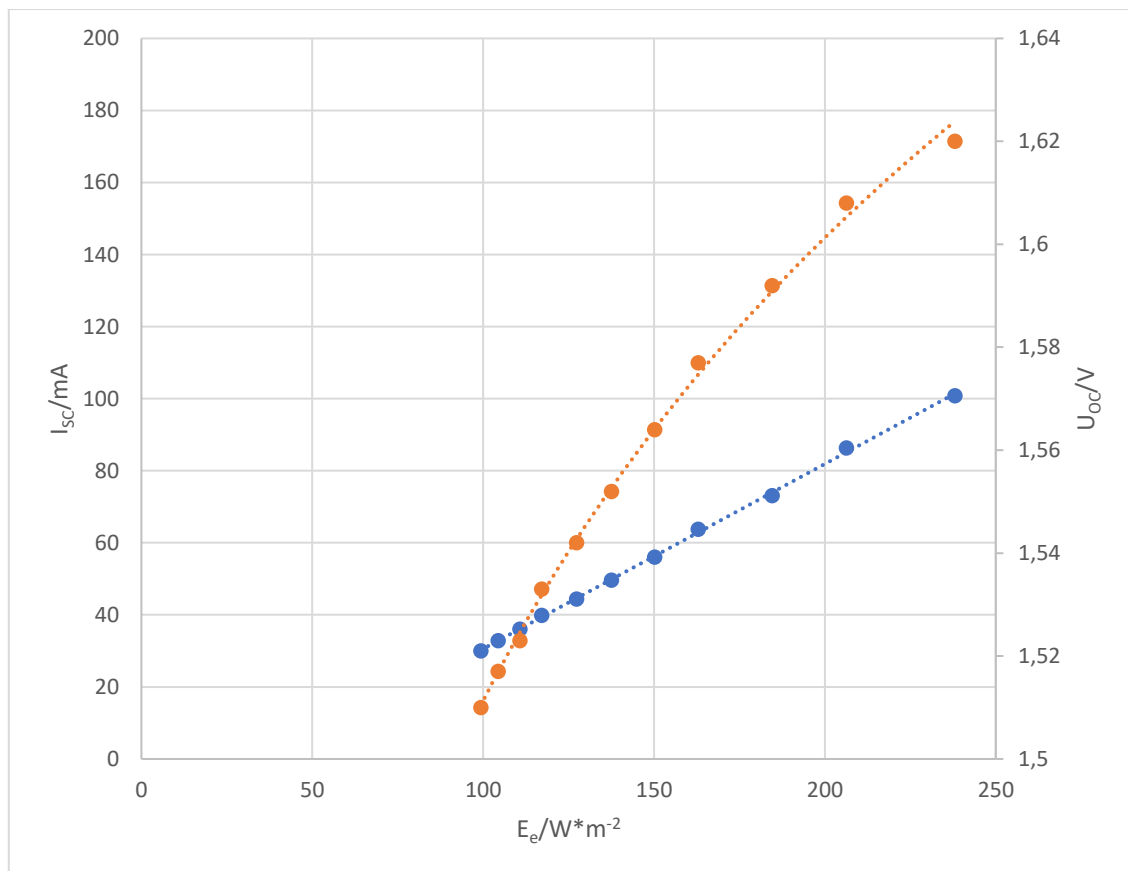


Obr. 7-14: Závislost $E_e = f(d)$

7.6.2 Úkol č. 2

Tabulka č. 7-6: Měření proudu nakrátko a napětí naprázdno

$\frac{d}{\text{cm}}$	$\frac{E_e}{\text{W} \cdot \text{m}^{-2}}$	$\frac{I_{SC}}{\text{mA}}$	$\frac{U}{\text{V}}$
50	238,08	1,620	100,8
55	206,25	1,608	86,3
60	184,61	1,592	73,1
65	162,97	1,577	63,8
70	150,23	1,564	56,0
75	137,50	1,552	49,6
80	127,32	1,542	44,4
85	117,13	1,533	39,9
90	110,77	1,523	36,0
95	104,40	1,517	32,8
100	99,31	1,510	30,0



Obr. 7-15: Závislost $I_{SC} = f(E_e)$ a $U_{OC} = f(E_e)$

7.6.3 Úkol č. 3

Tabulka č. 7-7: Hodnoty pro stanovení VA charakteristiky ve vzdálenosti $d = 50$ cm

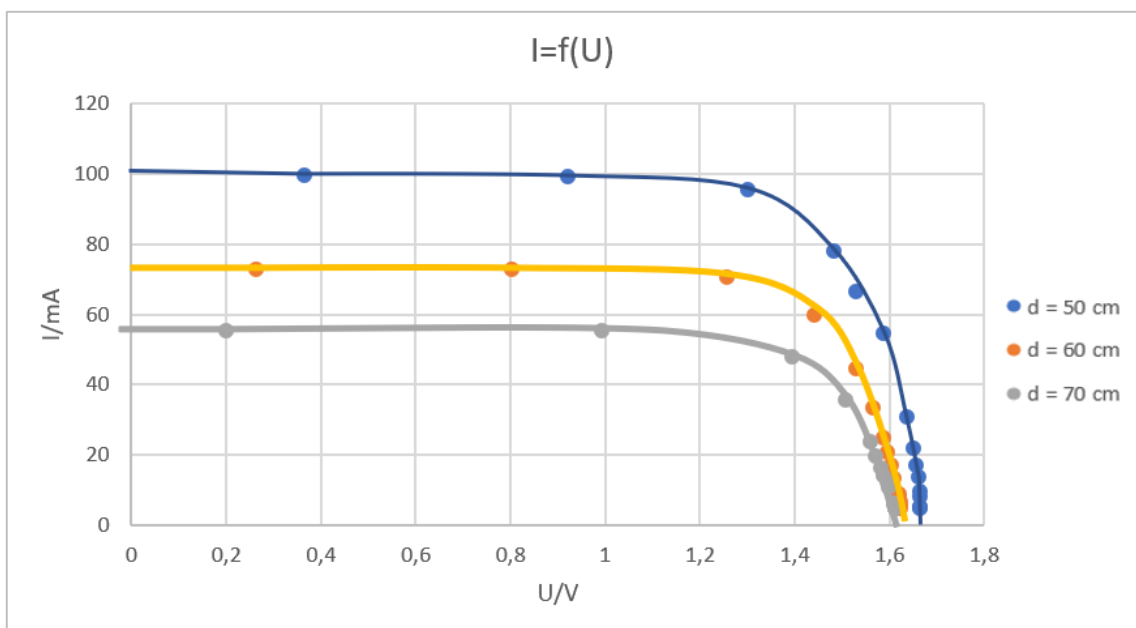
$d = 50$ cm; $E_e = 238,08 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$; $t = 22$ °C		
i	$\frac{U}{V}$	$\frac{I}{\text{mA}}$
1	0,365	99,7
2	0,922	99,1
3	1,301	95,5
4	1,482	78,0
5	1,529	66,4
6	1,587	54,5
7	1,636	30,7
8	1,650	22,0
9	1,657	17,0
10	1,660	13,8
11	1,663	9,6
12	1,664	8,1
13	1,664	5,3
14	1,664	5,1
15	1,664	5,0

Tabulka č. 7-8: Hodnoty pro stanovení VA charakteristiky ve vzdálenosti $d = 60$ cm

$d = 60$ cm; $E_e = 184,61 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$; $t = 22$ °C		
i	$\frac{U}{V}$	$\frac{I}{\text{mA}}$
1	0,264	73,0
2	0,802	72,8
3	1,258	70,5
4	1,442	59,7
5	1,529	44,5
6	1,564	33,6
7	1,586	24,9
8	1,595	20,9
9	1,603	17,2
10	1,610	13,3
11	1,619	9,0
12	1,620	8,1
13	1,622	6,6
14	1,623	5,6
15	1,624	4,9

Tabulka č. 7-9: Hodnoty pro stanovení VA charakteristiky ve vzdálenosti $d = 70$ cm

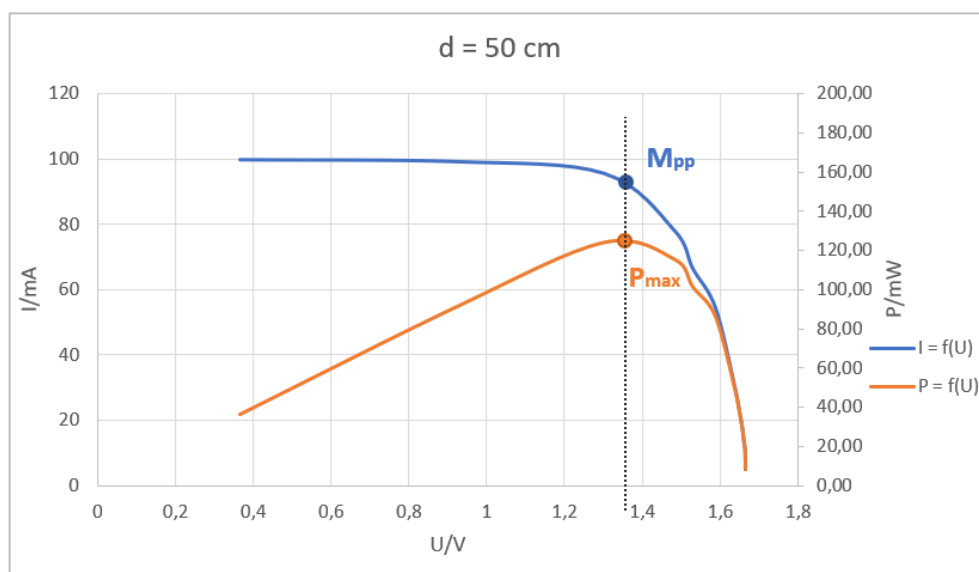
$d = 70$ cm; $E_e = 150,23 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$; $t = 22 \text{ }^\circ\text{C}$		
i	$\frac{U}{\text{V}}$	$\frac{I}{\text{mA}}$
1	0,200	55,3
2	0,992	55,4
3	1,395	47,9
4	1,506	35,7
5	1,559	23,8
6	1,570	19,6
7	1,581	16,4
8	1,588	14,2
9	1,594	12,1
10	1,598	10,7
11	1,609	6,4
12	1,610	5,8
13	1,611	5,4
14	1,612	4,9
15	1,612	4,8



Obr. 7-16: VA charakteristiky solárního článku ve 3 polohách

Tabulka č. 7-10: Hodnoty pro stanovení bodu maximálního výkonu solárního článku ve vzdálenosti $d = 50 \text{ cm}$

$d = 50 \text{ cm}; \quad E_e = 238,08 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}; \quad t = 22 \text{ }^\circ\text{C}$			
i	$\frac{U}{\text{V}}$	$\frac{I}{\text{mA}}$	$\frac{P}{\text{mW}}$
1	0,365	99,7	36,39
2	0,922	99,1	91,37
3	1,301	95,5	124,25
4	1,482	78,0	115,60
5	1,529	66,4	101,53
6	1,587	54,5	86,49
7	1,636	30,7	50,23
8	1,650	22,0	36,30
9	1,657	17,0	28,17
10	1,660	13,8	22,91
11	1,663	11,4	18,96
12	1,664	8,1	13,48
13	1,664	5,3	8,82
14	1,664	5,1	8,49
15	1,664	5,0	8,32

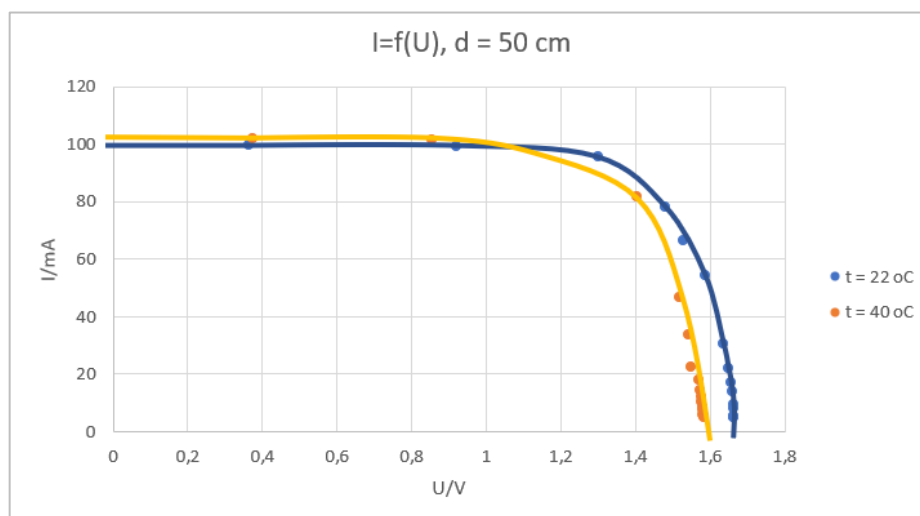


Obr. 7-17: Určení bodu maximálního výkonu

7.6.4 Úkol č. 4

Tabulka č. 7-11: Hodnoty pro stanovení VA charakteristiky ve vzdálenosti $d = 50$ cm za použití fénu

$d = 50$ cm; $E_e = 238,08$ W · m ⁻² ; $t = 40$ °C		
i	$\frac{U}{V}$	$\frac{I}{mA}$
1	0,373	101,8
2	0,856	101,5
3	1,405	81,5
4	1,519	46,6
5	1,544	33,8
6	1,551	22,6
7	1,570	18,0
8	1,574	14,5
9	1,576	12,2
10	1,578	10,3
11	1,580	8,5
12	1,581	7,5
13	1,582	6,0
14	1,583	5,2
15	1,583	4,8



Obr. 7-18: Tvar VA charakteristiky v závislosti na teplotě

7.6.5 Závěr laboratorního cvičení

Splnil jsem zadání laboratorního cvičení a nedopustil jsem se žádných hrubých chyb. V úkolu č. 1 jsem proměřil závislost intenzity ozáření na vzdálenosti ozařované plochy od zdroje. Graf $E_e = f(d)$ jednoznačně potvrzuje správnost vztahu (7-3) z teoretické části (intenzita ozáření klesá nepřímo úměrně s druhou mocninou vzdálenosti). Závislost zkratového proudu na intenzitě ozáření $I_{SC} = f(E_e)$ je zcela evidentně lineární. Závislost funkce $U_{OC} = f(E_e)$ je analyticky těžko interpretovatelná, každopádně lze konstatovat, že s rostoucí intenzitou ozáření roste i napětí naprázdno. VA charakteristiky se při různé intenzitě ozáření vzájemně liší, avšak vždy dodržují průběh, který byl očekávám na základě informací z teoretické části. U jedné z těchto VA charakteristik jsem stanovil hodnotu maximálního výkonu, který svojí polohou opět odpovídá teoretické části. Měření v rámci úkolu č. 4 prokázalo, že průběh VA charakteristiky nezáleží jenom na intenzitě ozáření, ale i na teplotě.

8 MAGNETICKÁ HYSTEREZE

8.1 Teorie

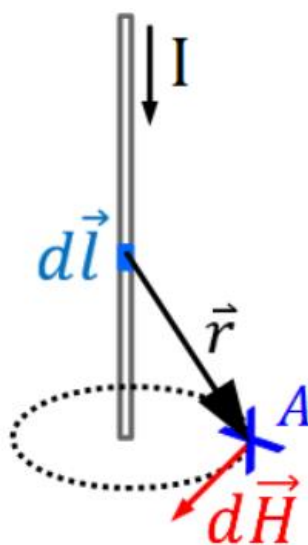
a) magnetické pole, jeho popis

Stejně jako v případě elektrického pole, potřebujeme i u magnetického pole jednoznačně popsat jeho silové účinky.

Definujeme proto novou vektorovou fyzikální veličinu – intenzitu magnetického pole \vec{H} , jejíž jednotkou je $A \cdot m^{-1}$ [7]. Lze ji určit pomocí Biotova-Savartova-Laplaceova zákona [16]. Uvažme vodič a na něm vyberme proudový element $I d\vec{l}$, kde $d\vec{l}$ je vektor, který vznikne tak, že vodič rozdělíme na části malé délky dl a směr zvolíme rovnoběžně se směrem elektrického proudu I ve vodiči. Pro příspěvek intenzity magnetického pole v bodě A pak platí

$$d\vec{H} = \frac{I}{4\pi r^3} (d\vec{l} \times \vec{r}), \quad (8-1)$$

kde \vec{r} je polohový vektor určující polohu bodu A vůči proudovému elementu $I d\vec{l}$. Úvaha je graficky znázorněna na obr. 8-1.



Obr. 8-1: K odvození přírůstku intenzity magnetického pole v bodě A

Mnohem častěji používanou fyzikální veličinou pro popis silových účinků magnetického pole je však vektor magnetické indukce \vec{B} s jednotkou T (tesla). Vztah mezi magnetickou indukcí a intenzitou magnetického pole je

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H}, \quad (8-2)$$

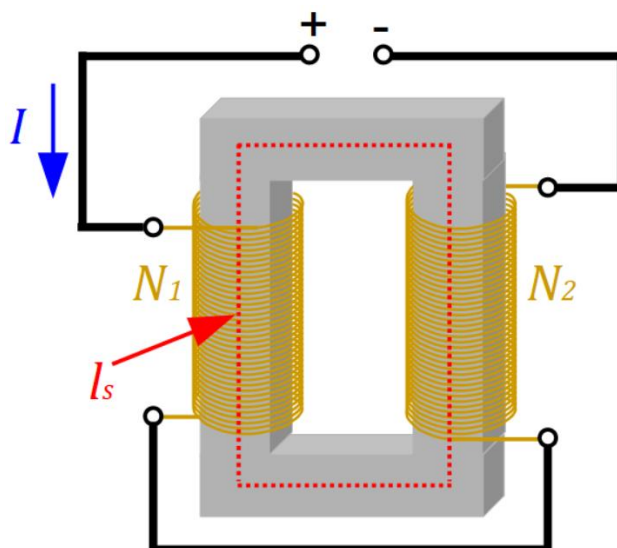
kde μ_r je relativní permeabilita látky (pro vzduch $\mu_r \rightarrow 1$) a μ_0 je permeabilita vakua. V literatuře se pro permeabilitu vakua běžně uvádí hodnota $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} N \cdot A^{-2}$. Po redefinici fyzikálních jednotek SI z roku 2019 však není tato hodnota přesná, v současné době je uznávaná hodnota $\mu_0 = 12,56 637 062 12 \cdot 10^{-6} N \cdot A^{-2}$ [8]. Rozdíl se však projeví až na osmém desetinném místě, a proto můžeme pro zjednodušení nadále uvažovat hodnotu běžně uváděnou v literatuře.

Relativní permeabilita μ_r charakterizuje vliv prostředí na magnetické pole. Některé látky magnetické pole zeslabují, jiné jej naopak zesilují.

Výhodou magnetické indukce je to, že je přímo měřitelná pomocí teslametru.

b) magnetické pole dvou sériově spojených cívek na společném jádře [1] [5]

Uvažme následující obvod. Dvě cívky jsou umístěny na společném uzavřeném jádře. Cívky jsou spojeny sériově a jsou připojeny ke zdroji stejnosměrného napětí. Situace je znázorněna na obr. 8-2.



Obr. 8-2: Dvě sériově spojené cívky na společném jádře

Intenzita pole vně jádra bude téměř nulová. Přihlédneme-li ke vztahu (8-1), platí pro velikost intenzity magnetického pole uvnitř jádra po zjednodušení vztah

$$H = \frac{NI}{l_s}, \quad (8-3)$$

kde N je součet počtu závitů obou cívek, I je proud protékající obvodem a l_s je délka střední siločáry, tj. délka obdélníku procházejícího středem jádra.

c) dělení látek podle relativní permeability

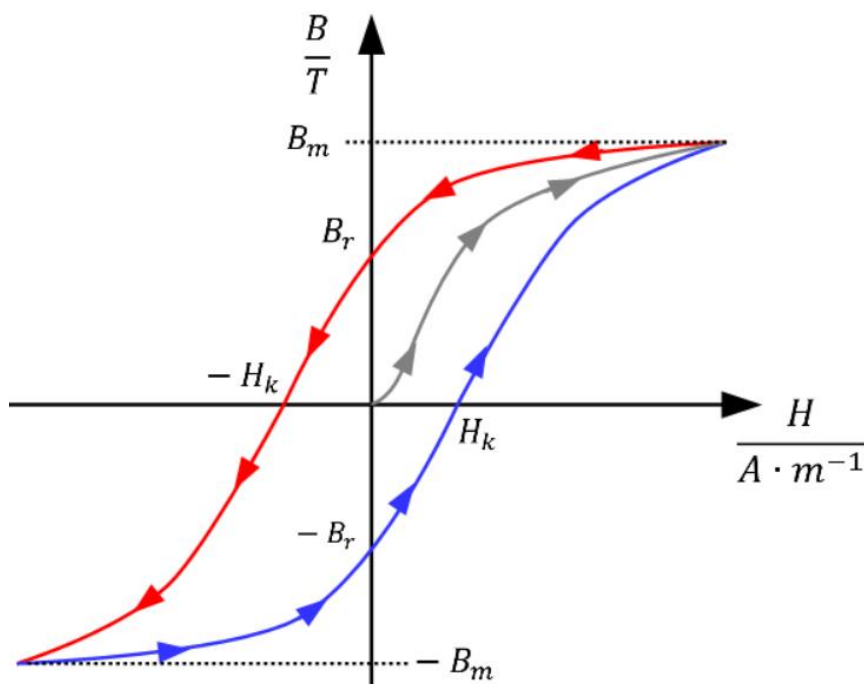
Tabulka č. 8-1: Rozdělení látek podle relativní permeability

Skupina	$\frac{\mu_r}{\text{bezrozměrné}}$	Příklady látek	Účinky na magnetické pole
paramagnetické látky	o něco větší než 1	hliník, sodík, uran, platina, kyslík	mírně zesilují
diamagnetické látky	o něco menší než 1	měď, voda, bismut	mírně zeslabují
feromagnetické látky	mnohem větší než 1	železo, kobalt, nikl	velmi zesilují

d) magnetizace silně magnetických látek, hysterezní smyčka

Nyní podrobíme bližšímu rozboru vzorec (8-2). Zcela evidentně jej lze interpretovat takto – vektor magnetické indukce přímo závisí na intenzitě magnetického pole, konstantou je absolutní permeabilita látky.

Tato představa je do určité míry správná. U látek s relativní permeabilitou blízké jedničky to skutečně platí. U silně magnetických látek však není relativní permeabilita konstantní. Průběh závislosti $B = f(H)$ je tedy značně nelineární, navíc závisí na předchozím stavu magnetizace vzorku [3].



Obr. 8-3: Komutační křivka a hysterezní smyčka

Uvažme vzorek, který není zmagnetovaný. Budeme-li zvyšovat intenzitu magnetického pole, bude magnetování probíhat po tzv. komutační (magnetizační) křivce (šedá křivka na obr. 8-3). Dojdeme až k hodnotě maximální indukce B_m . Začneme-li intenzitu snižovat, bude klesat i magnetická indukce, avšak ne po komutační křivce, vznikne křivka nová (červená křivka na obr. 8-3). Až dosáhneme nulové intenzity magnetického pole, magnetická indukce nulová nebude, indukci při nulové intenzitě říkáme *remanentní indukce* B_r . Dalšího snižování intenzity magnetického pole docílíme přiložením pole opačné polarity. Zvyšováním intenzity magnetického pole v záporných hodnotách dosáhneme tzv. *koercitivní intenzity* $-H_k$, kdy je magnetická indukce nulová. Při dalším zvyšování intenzity magnetického pole v záporných hodnotách získáme maximální indukci opačné polarity $-B_m$. Nyní začneme snižovat intenzitu magnetického pole. Závislost magnetické indukce na intenzitě magnetického pole však opět neopíše již vytvořenou křivku, nýbrž bude postupovat po křivce nové (modrá křivka na obr. 8-3) Po dosažení hodnoty B_m uzavřeme smyčku, kterou nazveme smyčkou hysterezní. Další magnetování a odmagnetování probíhá po této smyčce. [3]

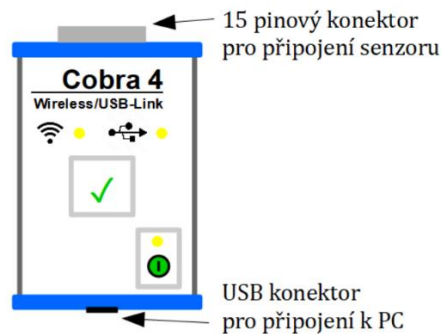
Obsah plochy, kterou uzavírá hysterezní smyčka odpovídá práci, kterou vykoná magnetické pole při jednom magnetizačním cyklu v jednotkovém objemu materiálu. Energie dodaná pro vykonání této práce se zpravidla přeměňuje na teplo a již nelze získat

zpátky ve formě elektrické energie, a proto pro nás velmi často představuje ztráty. Jádra proto konstruujeme tak, aby byla jejich magnetizační křivka co nejužší a ztrátám se tak zamezilo, tedy z magneticky měkkých feromagnetických látek. [1]

e) Cobra 4

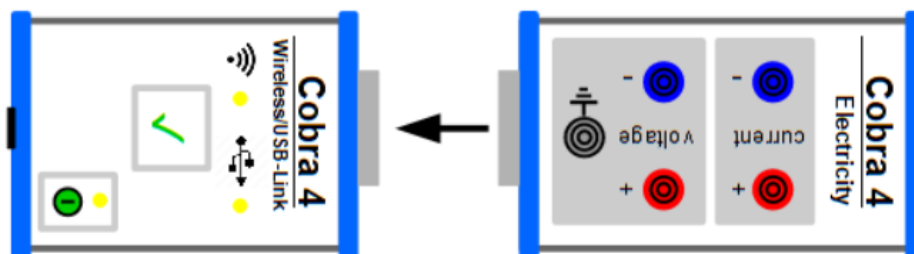
Cobra 4 je označení pro sadu měřicích přístrojů firmy PHYWE určených pro zpracování výsledků měření na PC za použití specializovaného softwaru [5].

Základem každého měření je interface „Cobra4 Wireless/USB-Link“ sloužící k propojení měřicího senzoru a počítače pomocí USB portu, případně bezdrátově.



Obr. 8-4: Interface „Cobra4 Wireless/USB-Link“

Měřicích senzorů, které je možné 15 pinovým konektorem k základní jednotce připojit, je velké množství. My budeme pracovat se senzorem „Electricity“, který lze použít pro měření proudu a napětí, a se senzorem „Tesla“, který plní funkci teslametru pro měření magnetické indukce. Lze však dokoupit i senzory pro měření teploty, odporu, biologických signálů a další [5].



Obr. 8-5: Připojení senzoru „Electricity“ k základní jednotce

Data jsou zpracována pomocí softwaru „PHYWE Measure“, který automaticky rozpozná připojený senzor.

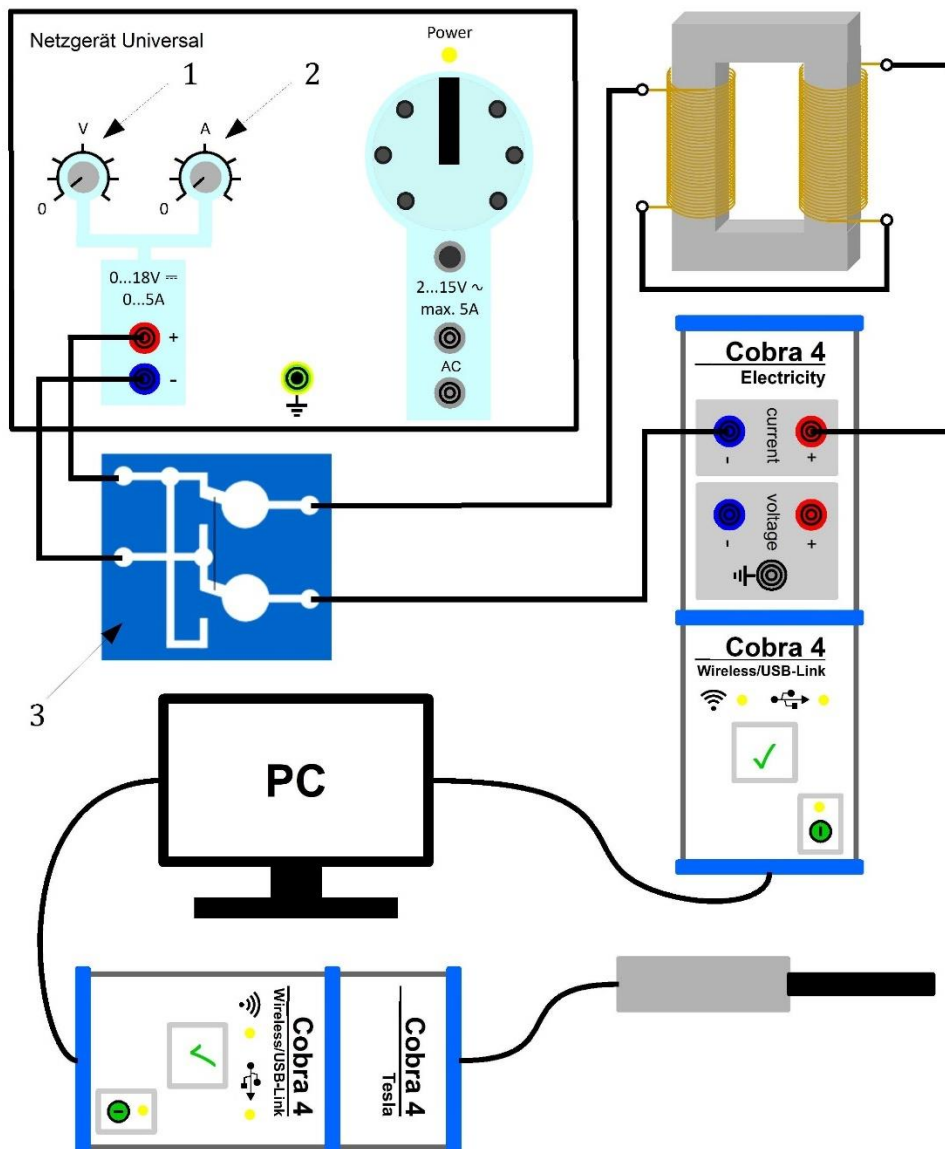
8.2 Úkol č. 1 – Masivní železné jádro

8.2.1 Zadání úkolu

Pomocí měřicí soupravy Cobra 4 proměřte magnetizační křivku a hysterezní smyčku masivního železného jádra.

8.2.2 Postup měření

a) Sestavte obvod podle obr. 8-6, jako jádro použijte masivní železné jádro (masivní jádro pro měření poznáte podle jeho šedé barvy). Zkontrolujte, že je zdroj vypnutý (pomocí vypínače na zadní straně zdroje).











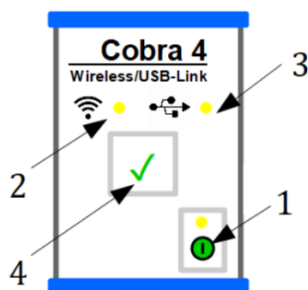
Obr. 8-6: Schéma zapojení obvodu se senzory Cobra 4

b) Napětí a proud na zdroji nastavte na nulu (tj. otočné knoflíčky 1 a 2 z obr. 8-6 nastavte na nulu) a křížový přepínač 3 z obr. 8-6 přepněte do polohy 1 (poloha je vyznačena na křížovém přepínači, zároveň se jedná o polohu, ve které je křížový přepínač vyobrazen na obr. 8-6).

c) Zapněte počítač a spusťte aplikaci „PHYWE Measure“, která je umístěna na ploše.

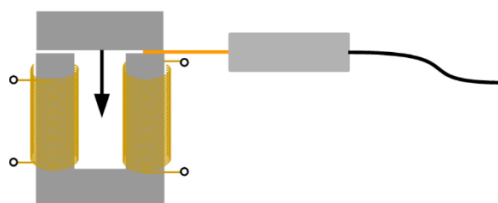
d) Zapněte senzor „Elektricitý“ i senzor „Tesla“, postup je totožný

- Stiskněte tlačítko  (tlačítko 1 na obr. 8-7), chvíli vyčkejte.
- Postupně se rozsvítí diody u symbolů  a  (diody 2 a 3 na obr. 8-7), posléze dioda u symbolu  zhasne.
- Stisknete a dlouze držete tlačítko  (tlačítko 4 na obr. 8-7), tlačítko držte, dokud nezačne svítit pouze dioda u symbolu  (tj. dioda 3 z obr. 8-7).
- Na počítači se otevře nové okno s názvem „Cobra 4“.
- Pokud se dioda u symbolu  (dioda 3 z obr. 8-7) nerozsvítí nebo se na PC neotevře okno měřicího softwaru, vypněte tlačítkem  (tlačítko 1 na obr. 8-7) senzor a postup z bodu d) opakujte.



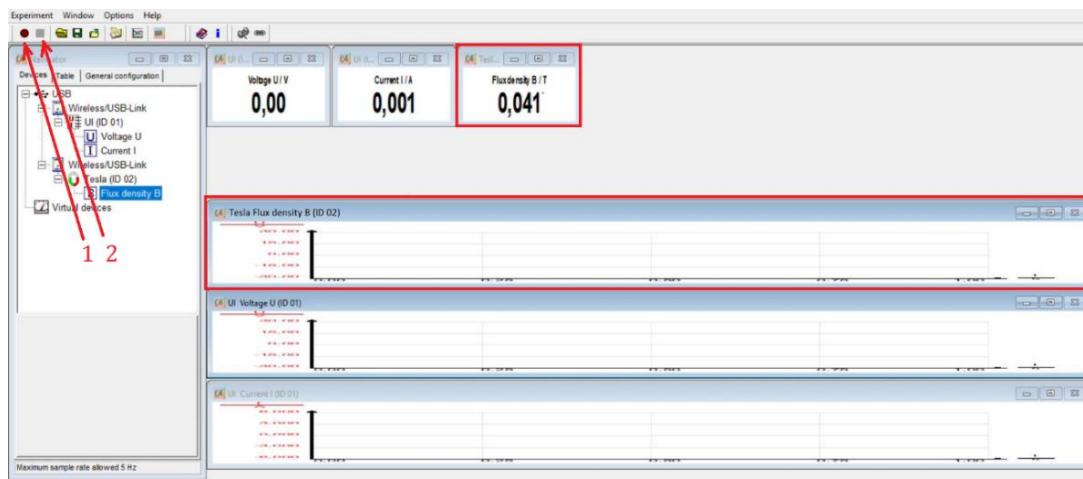
Obr. 8-7: Zapnutí základní jednotky Cobra 4

e) Ze senzoru „Tesla“ sundejte krytku sondy a sondu pomocí připraveného stojánku umístěte tak, aby špička sondy byla přivřena uvnitř železného jádra, na kterém jsou umístěny cívky.



Obr. 8-8: Umístění sondy teslametru

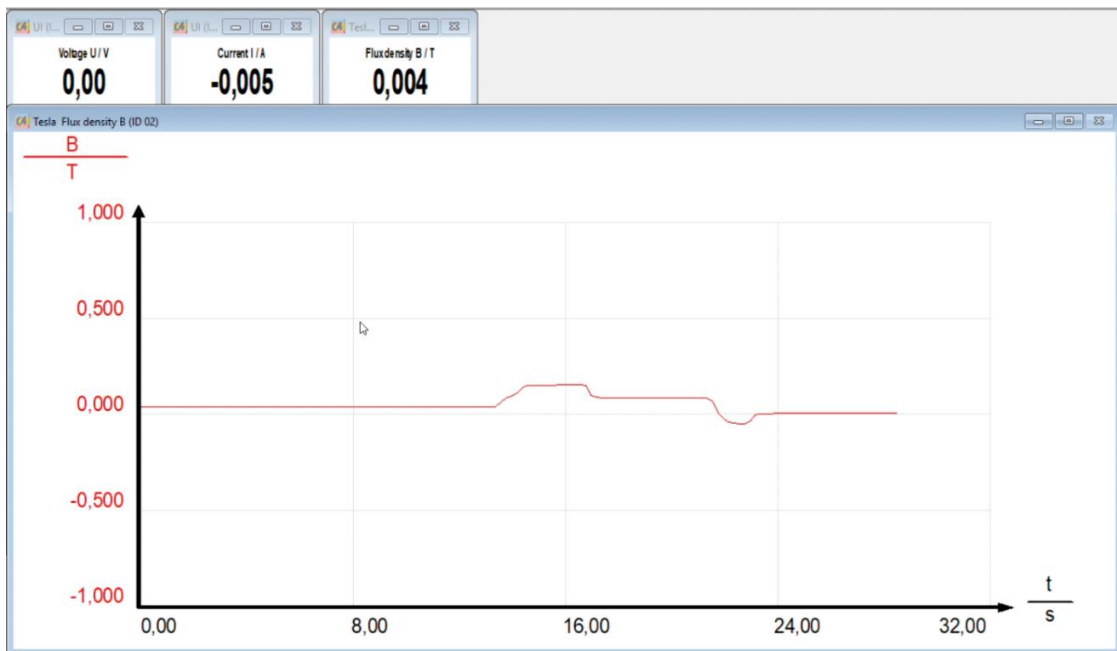
f) V okně „Cobra 4“ by mělo být otevřeno několik podoken (viz obr. 8-9)



Obr. 8-9: Okno softwaru Cobra 4

g) Připravte vzorek k měření (před vlastním měřením je třeba kovové jádro odmagnetovat)

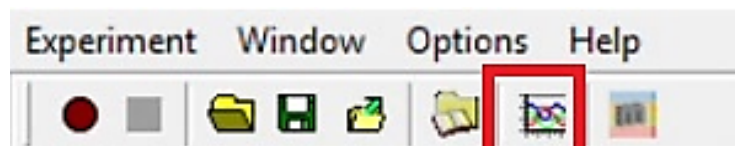
- Zapněte zdroj (vypínačem na zadní straně přístroje).
- Otočným knoflíkem 2 na obr. 8-6 nastavte proud $I = 3 \text{ A}$, toto nastavení v průběhu měření neměňte.
- Na počítači zahajte měření stiskem tlačítka ● (tlačítko 1 na obr. 8-9).
- Otočným knoflíkem 1 na obr. 8-6 postupně měňte napětí tak, aby bylo docíleno nulové hodnoty magnetické indukce B – tuto skutečnost ověřujte v podoknech k tomu určených (červeně zarámovaná podokna v obr. 8-9).
- Potřebujete-li snižovat intenzitu v opačném směru, snižte napětí na nulu (otočný knoflík 1 na obr. 8-6) a přepněte křížový přepínač (3 na obr. 8-6) do polohy 2 (to můžete opakovat několikrát).
- Až docílíte nulové intenzity (viz obr. 8-10), zastavte měření stiskem tlačítka ■ (tlačítko 2 na obr. 8-9), vypněte zdroj (tlačítkem na zadní straně přístroje) a napětí na zdroji nastavte na nulu (otočným knoflíkem 1 na obr. 8-6).



Obr. 8-10: Nastavení nulové intenzity B

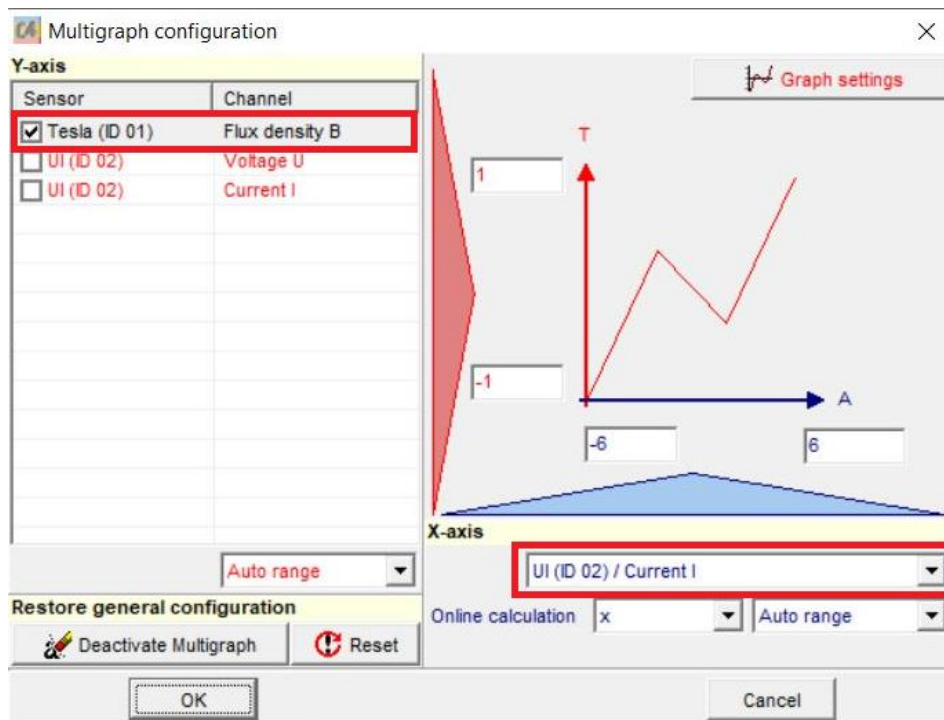
h) Připravte si zvláštní okno, ve kterém vykreslíte graf $B = f(I)$

- Klikněte na ikonu „Multigraph“ (červeně označené tlačítko na obr. 8-11).



Obr. 8-11: Ikona „Multigraph“

- Objeví se podokno, ve kterém nastavte požadavky na graf podle obr. 8-12, nastavení potvrďte stiskem tlačítka „OK“.



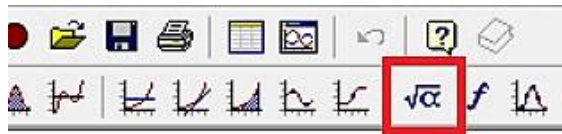
Obr. 8-12: Podokno k nastavení grafu

ch) Proměřte magnetizační křivku a hysterezní smyčku ve tvaru $B = f(I)$

- Křížový přepínač (3 na obr. 8-6) přepněte do polohy 1.
- Ověřte, zda je na zdroji nastaven proud $I = 3 \text{ A}$ (otočný knoflík 2 z obr. 8-6) a hodnota napětí $U = 0 \text{ V}$ (otočný knoflík 1 z obr. 8-6).
- Zahajte měření stiskem tlačítka ● (tlačítko 1 z obr. 8-9)
- zapněte zdroj (tlačítkem na zadní straně přístroje)
- velmi jemně a pomalu zvyšujte napětí na zdroji na maximální hodnotu (otočným knoflíkem 1 z obr. 8-6), během zvyšování napětí sledujte na obrazovce počítače, jak se vykresluje komutační křivka
- Až na zdroji nastavíte maximální napětí, začněte stejným způsobem napětí snižovat, tím začnete vykreslovat hysterezní smyčku.
- Jakmile snižíte napětí na minimum, přepněte křížový přepínač do polohy 2 a opět začněte zvyšovat napětí na zdroji. Tím vykreslíte část hysterezní křivky ve II. a III. kvadrantu.
- Znovu postupně snižte napětí na nulovou hodnotu, přepněte křížový přepínač do polohy 1 a napětí postupně zvyšujte, dokud se hysterezní smyčka neuzavře.
- Stiskem tlačítka ■ zastavte měření (tlačítko 2 na obr. 8-9), vypněte zdroj (tlačítkem na zadní straně přístroje) a napětí i proud na zdroji nastavte na nulu (otočnými knoflíky 1 a 2 na obr. 8-6)
- Po stisku tlačítka ■ (tlačítko 2 na obr. 8-9) se na počítači objeví okno, ve kterém musíte zvolit možnost „send data to the measure“. Výběrem této možnosti se zavře okno „Cobra 4“ a otevře se okno „PHYWE Measure 4“, ve kterém budete upravovat získaný graf.

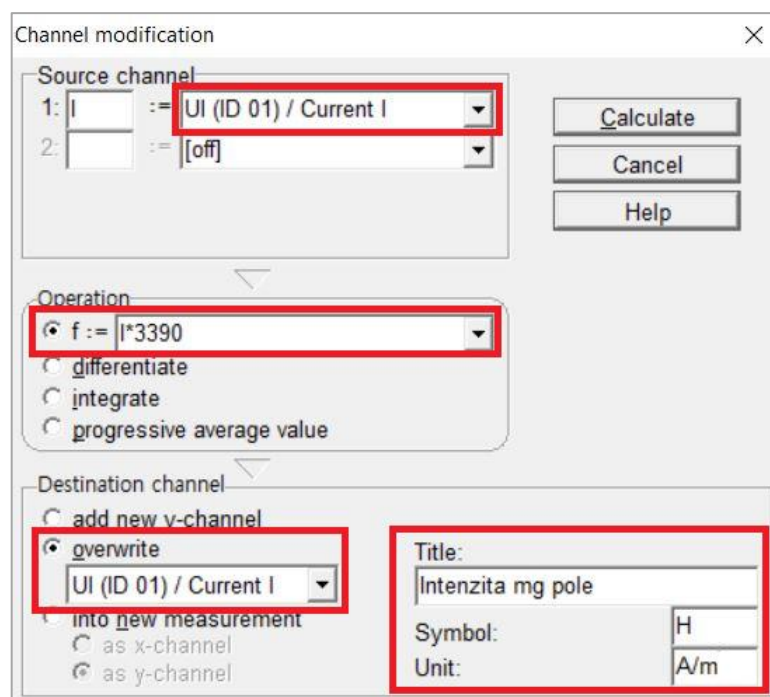
i) Naměřený graf $B = f(I)$ upravte na graf $B = f(H)$

- Klikněte na ikonu $\sqrt{\alpha}$ (viz obr. 8-13), tím se otevře okno s názvem „Channel modification“.



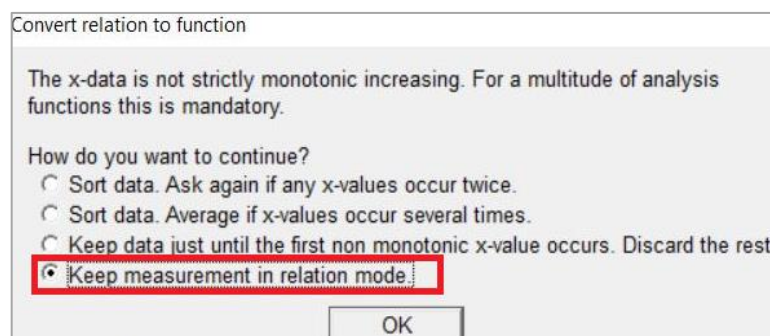
Obr. 8-13: Ikona k otevření okna „Channel modification“

- V okně s názvem „Channel modification“ nastavte hodnoty podle obr. 8-14. Koefficient 3390 plyne ze vzorce (8-3), má význam podílu N/l_s , neboť pro měření byly použity dvě sériově spojené cívky (každá se 600 závitů) a železné jádro o délce střední siločáry $l_s = 35,4$ cm. Nastavení potvrďte stiskem tlačítka „Calculate“.



Obr. 8-14: Nastavení grafu

- Otevře se okno s názvem „Convert relation to function“. Vyberte možnost „Keep measurement in relation mode“ a potvrďte „OK“, tím se v novém okně otevře požadovaný graf $B = f(H)$.



Obr. 8-15: Nastavení pro otevření grafu $B = f(H)$

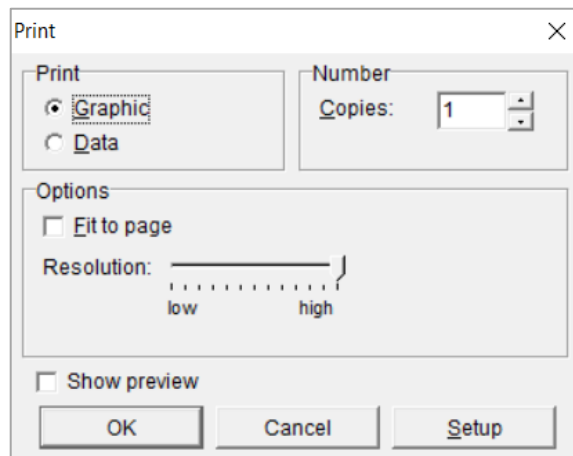
j) Uložte graf $B = f(H)$ do podoby souboru PDF

- Klikněte na ikonu Print (viz obr. 8-16), tím se otevře okno „Print“.



Obr. 8-16: Ikona k otevření okna „Print“

- Proved'te nastavení podle obr. 8-17 a stiskněte „OK“.
- Otevře se okno, ve kterém vyberte místo, kam chcete soubor uložit.

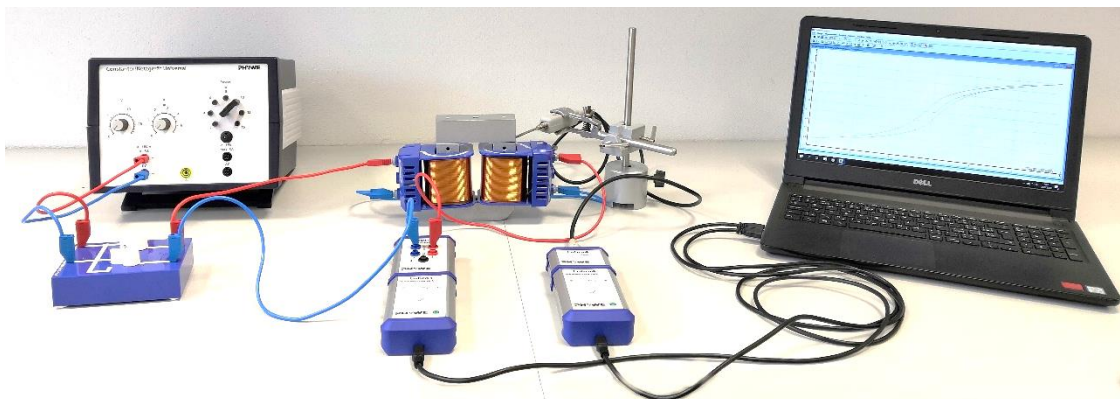


Obr. 8-17: Nastavení uložení obrázku

k) Zpracujte data měření

- Uložený graf $B = f(H)$ přiložte do protokolu.
- Okomentujte, zda průběh odpovídá poznatkům z teoretické části.
- Z obrázku přibližně odečtete hodnotu všech význačných bodů vyznačených na obr. 8-3, tj. hodnoty maximální indukce $\pm B_m$, remanentní indukce $\pm B_r$ a koercitivní intenzity $\pm H_k$.

8.2.3 Fotodokumentace úkolu



Obr. 8-18: Sestava pro měření masivního železného jádra

8.3 Úkol č. 2 – Železné jádro z navzájem izolovaných plechů

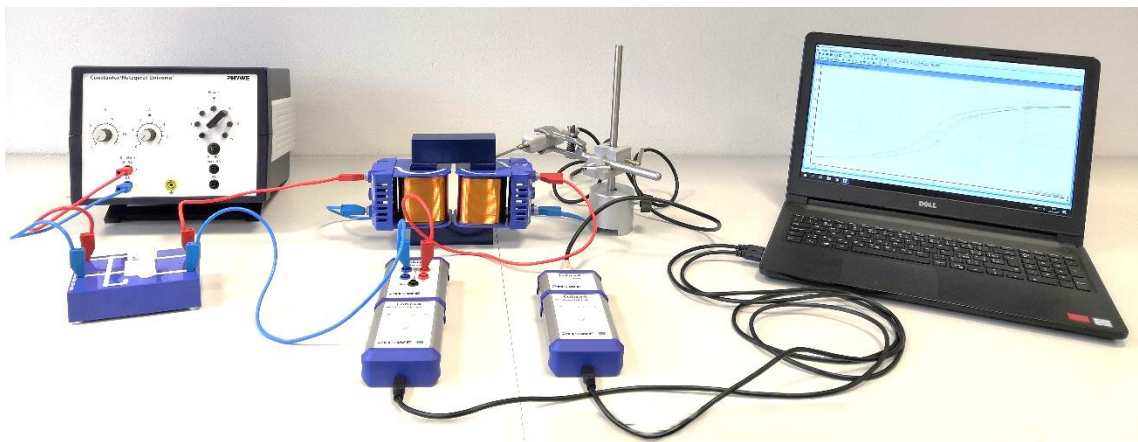
8.3.1 Zadání úkolu

Pomocí měřicí soupravy Cobra 4 proměřte magnetizační křivku a hysterezní smyčku železného jádra z navzájem izolovaných plechů.

8.4 Postup měření

Opakujte měření jako v úkolu č. 1. Tentokrát ale použijte železné jádro z navzájem izolovaných plechů (jádro pro měření poznáte podle jeho modré barvy). Dalším rozdílem je maximální proud, který můžete pro magnetizaci použít, na otočném knoflíku pro nastavení proudu (otočný knoflík 2 z obr. 8-6) nastavte místo proudu 3 A hodnotu pouze $I = 1$ A! Všechny ostatní pokyny zůstávají nezměněny.

8.4.1 Fotodokumentace úkolu

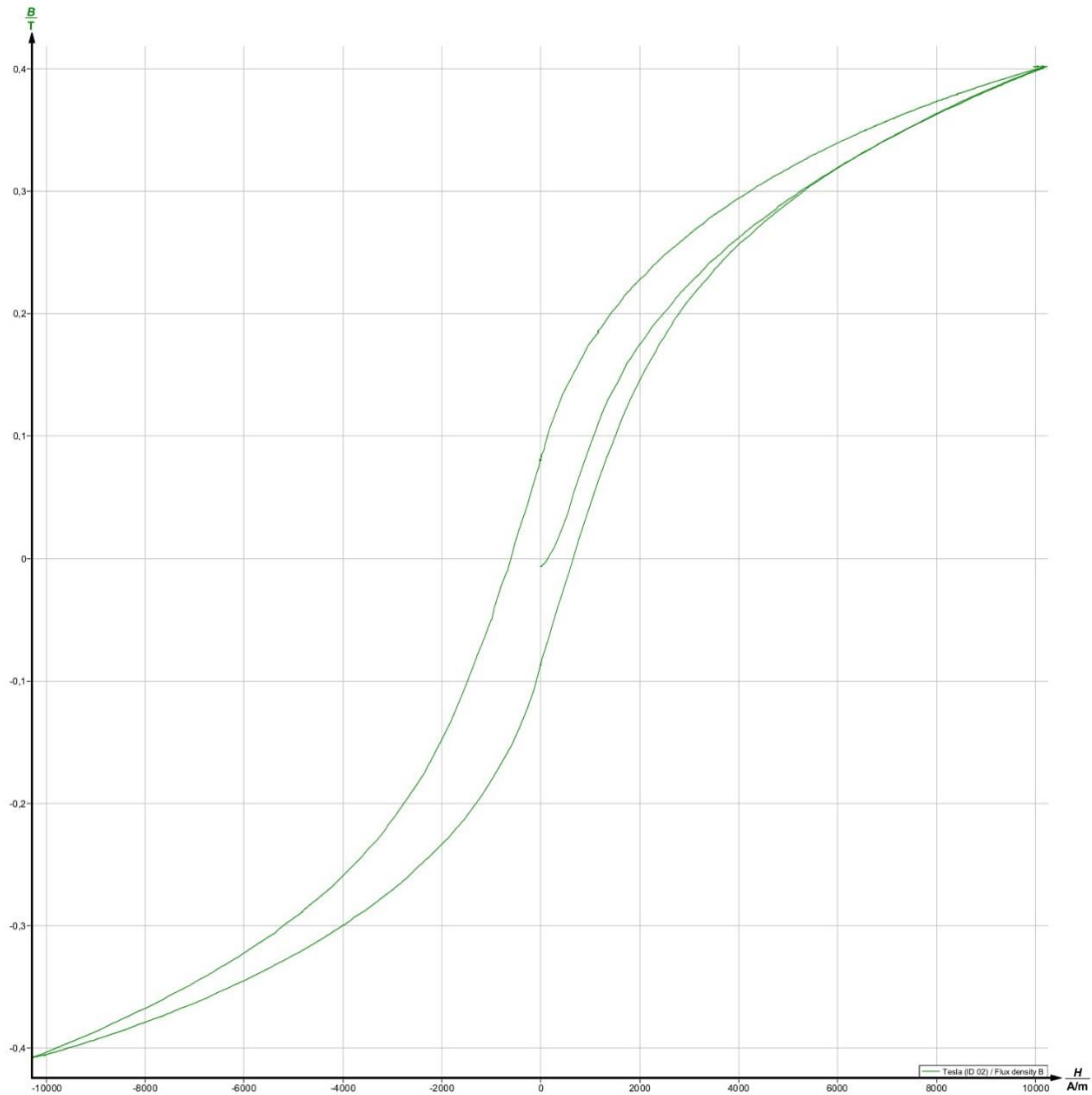


Obr. 8-19: Sestava pro měření železného jádra z navzájem izolovaných plechů

8.5 Zpracování dat měření

8.5.1 Úkol č. 1

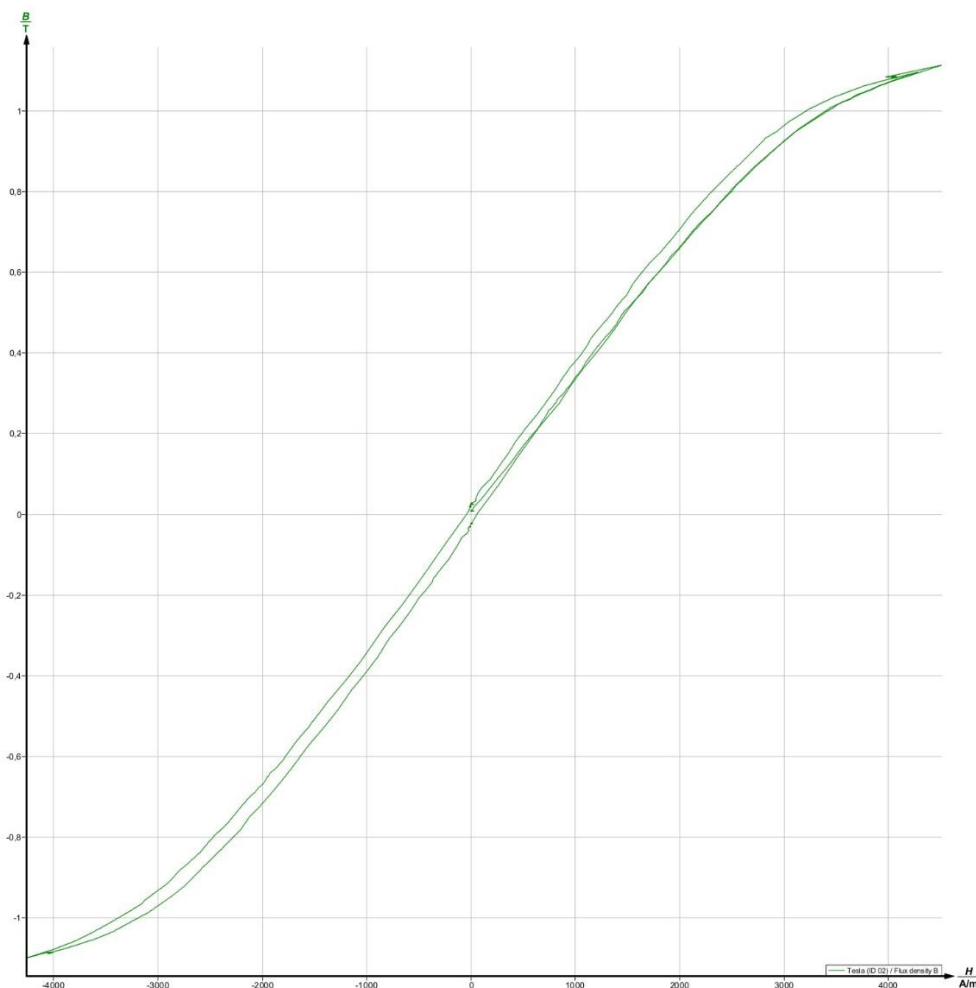
Hodnoty význačných bodů odečtené z grafu jsou následující. Hodnoty maximální indukce činní $B_m = 405 \text{ mT}$ a $-B_m = 409 \text{ mT}$, remanentní indukce jsou $B_r = 85 \text{ mT}$ a $-B_r = -85 \text{ mT}$. Hodnoty koercitivní intenzity magnetického pole jsem přibližně stanovil na $-H_k = -590 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$ a $H_k = 590 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$.



Obr. 8-20: Magnetizační křivka a hysterezní smyčka masivního železného jádra

8.5.2 Úkol č. 2

Maximální indukce je v případě jádra z navzájem izolovaných plechů $B_m = 1,1 \text{ T}$ a $-B_m = -1,1 \text{ T}$, remanentní indukce mají hodnotu $B_r = 27 \text{ mT}$ a $-B_r = -27 \text{ mT}$. Koercitivní intenzity jsou $-H_k = -63 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$ a $H_k = 63 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$.



Obr. 8-21: Magnetizační křivka a hysterezní smyčka železného jádra z navzájem izolovaných plechů

8.5.3 Závěr laboratorního cvičení

Splnil jsem zadání laboratorního cvičení. Proměřil jsem magnetizační křivku a hysterezní smyčku dvou různých železných jader. Všechny význačné body na proměřených křivkách si velikostně vzájemně odpovídají (např. velikost remanentní indukce masivního jádra odpovídá velikosti remanentní indukce v opačné polaritě neboli $B_r = |-B_r|$), což vylučuje hrubé chyby měření. Tvar magnetizační křivky i hysterezní křivky odpovídá teoretické části. Železné jádro z navzájem izolovaných plechů má poměrně úzkou smyčku, což taktéž odpovídá teoretickým poznatkům. Díky úzké hysterezní smyčce jsou jádra tohoto druhu používána v transformátorech, neboť u nich zaznamenáváme nízké ztráty. Měření pomocí počítače hodnotím mimořádně kladně, protože má okamžitý výstup na obrazovku, což je velmi názorné.

Závěr

V rámci bakalářské jsem skutečně vytvořil 8 laboratorních cvičení a doplnil jsem k nim potřebnou textovou oporu.

Náměty úloh jsou voleny pestře. Posluchači se v průběhu kurzu Fyzikální praktikum 2 seznámí nejen s čistě fyzikálními úlohami, ale i s úlohou z fyzikální chemie. V některých úlohách se seznámí s přístroji, u kterých je malá pravděpodobnost, že s nimi již někdy pracovali (například měřič elektrického pole, teslametr atd.). V jedné úloze je podroben zkoumání solární články, neboť solární zdroje energie jsou velmi aktuální a velmi často skloňované téma. Úloha s názvem Magnetická hystereze je zaměřena na počítačem podporovaný experiment, což je jakási předzvěst předmětu Počítač a experiment, se kterým se studenti setkají ve třetím ročníku. Vyjma moderního vybavení jsou však studenti vedeni i k práci s klasickými přístroji, a proto je zařazena i práce s analogovým voltmetrem. Některé úlohy jsou koncipovány tak, aby byly nejednou zdůrazněny souvislosti mezi elektrickými a magnetickými jevy.

Na podobu laboratorních cvičení mělo vliv i zpracování měření. Úlohy jsou vytvořeny tak, aby si studenti v rámci jejich zpracování postupně vyzkoušeli tvorbu regresních funkcí, tvorbu grafů s více řadami nebo s více osami apod. Během zpracovávání dat si navíc procvičí úpravy výrazů a uvědomí si vliv fyzikálních veličin na teplotě. V každé úloze je kladen důraz na soulad (případně nesoulad) získaných dat s teoretickými poznatky, k čemuž je využita i práce se zdroji informací (online katalogové listy, matematicko-fyzikální a chemické tabulky).

Struktura jednotlivých materiálů k laboratorním cvičením je ujednocena. Vlastnímu měření předchází krátká teoretická část, která poskytuje studentům potřebné znalosti k pochopení praktické části laboratorního cvičení. Teoretická část je na úrovni základních kurzů fyziky, se kterými se posluchači katedry setkávají, je proto pojata tak, že se pro čtenáře jedná pouze o jakési osvěžení již nabytých poznatků, z tohoto důvodu chybí některé souvislosti, odvození apod. V ojedinělých případech předkládá studentům informace nové. Po teoretické části jsou žáci obeznámeni s vlastním měřením, které bývá zpravidla rozděleno na více úkolů. Na začátku každého úkolu je stručné slovní zadání, následuje podrobný postup měření včetně poměrně rozpracovaných obrázků, které by měly být studentům co nejvíce nápomocné ve správném měření, přičemž ani jeden obrázek není převzatý, všechny obrázky jsem vytvořil. Kromě toho je každý návod doplněn o fotodokumentace experimentů, případně o tabulky vhodné pro zpracování výsledků měření. V neposlední řadě je obsaženo i autorské řešení.

Při volbě struktury textové opory jsem vycházel ze svých zkušeností, které jsem získal v průběhu studia. Tuto strukturu považuji za vhodnou a funkční, což ale nezajišťuje, že bude vhodná i pro ostatní studenty. Proto jsem ve spolupráci s vedoucím práce některé úlohy nechal proměřit studenty, kteří absolvovali v akademickém roce 2019/20 předmět Fyzikální praktikum 2. Díky jejich připomínkám jsem podrobil již sepsaný text úpravám (některé postupy v měření byly upřesněny, případně doplněny o obrázek, teoretické části byly rozšířeny atd.). Nápomocen mi byl i vedoucí bakalářské práce, který se se mnou podělil o své zkušenosti a na základě jeho rad byla práce v některých částech taktéž upravena do finální podoby.

Seznam použité literatury

- [1] FUKA, Josef a Bedřich HAVELKA. *Elektřina a magnetismus*. Vydání 3. upravené. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1979.
- [2] VOŽENÍLEK, Ladislav. *Kurs ELEKTROTECHNIKY*. Druhé vydání. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1988.
- [3] SEDLÁK, Bedřich. *Elektřina a magnetismus*. Praha: Academia, 1993. ISBN 80-200-0172-7.
- [4] DOSTÁLEK, Martin. *Základní měření pasivních a aktivních elektronických součástek* [online]. Hradec Králové, 2016 [cit. 2020-02-22]. Dostupné z: <https://theses.cz/id/kd2oef/>. Bakalářská práce. Univerzita Hradec Králové, Přírodovědecká fakulta, katedra fyziky. Vedoucí práce Karol Radocha.
- [5] *PHYWE: University – Physics – Experiments* [online]. Göttingen [cit. 2020-02-23]. Dostupné z: <https://www.phywe.com/en/physics/university/>
- [6] ZUSKOVÁ, Iva a Kateřina UŠELOVÁ. *Praktikum z fyzikální chemie* [online]. Vydání druhé, upravené. Praha, 2018 [cit. 2020-02-23]. Dostupné z: <https://www.natur.cuni.cz/chemie/fyzchem/zuskova/soubory/praktikum/skripta>
- [7] HUBEŇÁK, Josef. *Elektřina a magnetismus: skriptum pro základní kurs fyziky*. 2. vyd. Hradec Králové: Gaudeamus, 2010. ISBN 978-80-7435-075-7.
- [8] *Information at the foundation of modern science and technology from the Physical Measurement Laboratory of NIST* [online]. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 1994 [cit. 2020-02-23]. Dostupné z: <https://physics.nist.gov/cuu/Constants/index.html>
- [9] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. Brno: VUTIUM, 2000. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 80-214-1868-0.
- [10] NĚMEČEK, Ondřej. *Tepelné charakteristiky fotovoltaických panelů* [online]. Plzeň, 2017 [cit. 2020-03-14]. Dostupné z: <https://portal.zcu.cz/stag?urlid=prohlizeni-pracedetail&praceIdno=70988>. Diplomová práce. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI. Fakulta elektrotechnická.
- [11] PAVLÍK, Stanislav. *Tester fotovoltaických článků a panelů* [online]. Brno, 2014 [cit. 2020-03-14]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=88545. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [12] VRÁNA, Michal. *Měřicí systém pro sledování efektivity fotovoltaického panelu* [online]. Brno, 2012 [cit. 2020-03-14]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=54152. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [13] BROŽ, Jaromír. *Základy fyzikálních měření: I. díl*. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1967.

- [14] VEČEŘA, František. *Měření světelné účinnosti zdrojů světla* [online]. Brno, 2011 [cit. 2020-03-14]. Dostupné z: <https://theses.cz/id/eccpli/>. Diplomová práce. Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta.
- [15] *Učební text k přednášce UFY102: Fotometrie a radiometrie* [online]. Praha, 2006 [cit. 2020-03-14]. Dostupné z: <http://alma.karlov.mff.cuni.cz/ufy102/Fotometrie%20a%20radiometrie.pdf>
- [16] VYBÍRAL, Bohumil. *Magnetické pole ve vakuu: Studijní text pro řešitele FO a ostatní zájemce o fyziku* [online]. Hradec Králové: MAFY, 2000 [cit. 2020-03-14]. Dostupné z: <http://fyzikalniolympiada.cz/texty/elstat.pdf>