

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Renovace soupravy pro výuku elektromagnetismu**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2014/2015

**ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Martin ŠULA**  
Osobní číslo: **E12B0067P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**  
Název tématu: **Renovace soupravy pro výuku elektromagnetismu**  
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

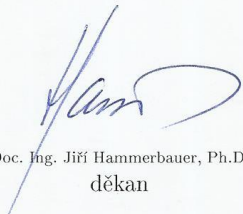
1. Zhodnoťte současný stav výukových pomůcek pro výuku elektromagnetismu.
2. Proveďte renovaci poškozených dílů a doplňte chybějící.
3. Vytvořte dokumentaci k soupravě.
4. Vytvořte demonstrační úlohy pro použití soupravy ve výuce elektromagnetického pole.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího  
Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran  
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická  
Seznam odborné literatury:


1. Mayer, Daniel: Teorie elektromagnetického pole. Plzeň, Západočeská univerzita, 2004. ISBN 80-7082-826-9

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jindřich Jansa**  
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2014**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **8. června 2015**

  
Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



  
Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

## **Abstrakt**

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na renovaci soupravy pro výuku elektromagnetismu. Součástí této práce je zdokumentování soupravy a návod pro sestavení demonstračních úloh. Cílem je opravit poškozené díly souprav, zjistit jaké úlohy jsme schopni se soupravou demonstrovat a k jakým úlohám byla souprava určena. Podle toho doplnit chybějící části a konstrukční prvky abychom dosáhli plné funkčnosti soupravy s dostatečným množstvím demonstračních úloh. Souprava tak může sloužit k názorné výuce elektromagnetismu.

## **Klíčová slova**

Magnetické pole, indukované napětí, magnetický tok, souprava, renovace, výuka

## Abstract

The presented thesis is focused on the renovation of a kit for teaching the electromagnetism which includes documentation and instructions for assembly of the demonstration tasks. The goal is to repair the damaged parts to determine what exercises we are able to demonstrate with the kit and what exercises were the kit designed for. It was necessary to add parts and design elements that were missing.

## **Key words**

Magnetic field, inductor, inducted voltage, magnetic flux, kit, renovation, teaching

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 3.6.2015

Martin Šula

# Obsah

<b>OBSAH.....</b>	<b>7</b>
<b>1 ÚVOD .....</b>	<b>9</b>
<b>2 HLAVNÍ PROBLÉMY .....</b>	<b>9</b>
CHYBĚJÍCÍ DOKUMENTACE .....	9
PŘEPRAVKY .....	9
CÍVKY .....	9
CHYBĚJÍCÍ DÍLY .....	9
<b>3 PROVEDENÉ OPRAVY .....</b>	<b>10</b>
OPRAVA PŘEPRAVEK .....	10
OPRAVY UCHYCOVACÍCH PRVKŮ .....	10
OPRAVA CÍVEK .....	10
OPRAVA KOSTER CÍVEK.....	10
NAVÍJENÍ CÍVEK.....	10
<b>4 DOKUMENTACE.....</b>	<b>11</b>
ROZKLADNÝ TRANSFORMÁTOR I .....	11
ROZKLADNÝ TRANSFORMÁTOR II .....	12
DOPLŇK K ROZKLADNÉMU TRANSFORMÁTORU .....	13
<b>5 DEMONSTRAČNÍ ÚLOHY .....</b>	<b>14</b>
DEMONSTRAČNÍ ÚLOHY S VYUŽITÍM ROZKLADNÉHO TRANSFORMÁTORU .....	14
<i>Jádro elektromagnetu</i> .....	14
<i>Kotva a jádro elektromagnetu</i> .....	16
<i>Jádrový transformátor</i> .....	18
<i>Růžková bleskojistka</i> .....	20
<i>Žhavení</i> .....	22
<i>Svařování</i> .....	24
<i>Indukční ohřev</i> .....	26
<i>Levitující kroužek</i> .....	28
<i>Lenzovo pravidlo</i> .....	29
DEMONSTRAČNÍ ÚLOHY S VYUŽITÍM DOPLŇKU K ROZKLADNÝM TRANSFORMÁTORŮM.....	30
<i>Dynamo</i> .....	30
<i>Motor</i> .....	32
<i>Waltenhofenovo kyvadlo</i> .....	33
<i>Elektromagnetická brzda</i> .....	35
<i>Komutační přepětí</i> .....	37
<b>6 ZÁVĚR.....</b>	<b>38</b>
<b>7 POUŽITÁ LITERATURA.....</b>	<b>38</b>
<b>8 PŘÍLOHY.....</b>	<b>39</b>
MANUÁL K ROZKLADNÉMU TRANSFORMÁTORU I .....	39
MANUÁL K ROZKLADNÉMU TRANSFORMÁTORU II .....	45
MANUÁL DOPLŇKU ROZKLADNÉHO TRANSFORMÁTORU.....	52

## Seznam použitých zkratk

$R_m$ ( $H^{-1}$ )	Magnetický odpor
$R_{mo}$ ( $H^{-1}$ )	magnetický odpor vzduchového jádra
$R_{mFe}$ ( $H^{-1}$ )	magnetický odpor železného jádra
$L$ (H)	indukčnost
$W_m$ (J)	energie magnetického pole
$l$ (m)	délka střední indukční čáry
$S$ ( $m^2$ )	průřez jádra
$\mu$ ( $Hm^{-1}$ )	permeabilita
$I$ (A)	proud
$N$ (-)	počet závitů
$F$ (N)	síla
$x$ (m)	zasunutí jádra
$c$ (m)	vzdálenost mezi horní a spodní hranou segmentu
$R$ ( $\Omega$ )	elektrický odpor
$v$ (m/s)	rychlost
$r$ (m)	střední poloměr segmentu, poloměr otáčení
$b$ (m)	šířka pólového nástavce
$d$ (m)	tloušťka plechu segmentu
$M$ (Nm)	brzdový moment
AC	střídavý proud
DC	stejnsměrný proud
$u_i$ (V)	indukované napětí mezi středem a okrajem kotouče
$B$ (T)	magnetická indukce
$\omega$ (rad/s)	úhlová rychlost
$R$ (m)	poloměr kotouče
$f$ (Hz)	frekvence
$\rho$ ( $\Omega m$ )	rezistivita
$\gamma$ ( $Sm^{-1}$ )	konduktivita
$E$ (Ws)	elektrická energie
$t$ (s)	čas

## Seznam obrázků

OBR. 1 ULOŽENÍ KOMPONENTŮ SOUPRAVY I.....	11
OBR. 2 ULOŽENÍ CÍVEK V BOXU SOUPRAVY I.....	11
OBR. 3 ULOŽENÍ KOMPONENTŮ SOUPRAVY II.....	12
OBR. 4 UMÍSTĚNÍ CÍVEK V BOXU SOUPRAVY II.....	12
OBR. 5 ULOŽENÍ SOUČÁSTEK DOPLŇKU ROZKLADNĚHO TRANSFORMÁTORU.....	13
OBR. 6 CÍVKA S JÁDREM .....	14
OBR. 7 DVĚ CÍVKY NA SPOLEČNÉM JÁDŘE S KOTVOU .....	16
OBR. 8 JÁDROVÝ TRANSFORMÁTOR .....	18
OBR. 9 RŮŽKOVÁ BLESKOJISTKA .....	20
OBR. 10 ŽHAVENÍ DRÁTU.....	22
OBR. 11 BODOVÉ SVAŘOVÁNÍ PLÍŠKŮ.....	24
OBR. 12 OHŘEV V KRUHOVÉ TAVÍCÍ MISCE .....	26
OBR. 13 LEVITUJÍCÍ KROUŽEK .....	28
OBR. 14 POKUS PRO OVĚŘENÍ LENZOVA PRAVIDLA .....	29
OBR. 15 DYNAMO.....	30
OBR. 16 STEJNOSMĚRNÝ MOTOR .....	32
OBR. 17 WALTENHOFENOVO KYVADLO .....	33
OBR. 18 ELEKTROMAGNETICKÉ BRZDA.....	35
OBR. 19 UMÍSTĚNÍ SAMOSTATNĚHO KOMUTÁTORU .....	37



## 1 Úvod

Souprava pro výuku elektromagnetismu byla součástí vybavení tehdejší elektrotechnické fakulty Vysoké školy strojní a elektrotechnické v Plzni již od roku 1962. V posledních letech ale nebyla příliš využívána. Teprve v loňském roce vznikla myšlenka na její renovaci a zařazení zpět do výuky teorie elektromagnetismu.

Souprava se celkově skládá ze dvou souprav, takzvaného rozkladného transformátoru a jedné soupravy takzvaného doplňku k rozkladným transformátorům. Rozkladné transformátory původně byly dvě stejné soupravy se stejným vybavením skládající se ze sady cívek s různým počtem závitů, sady jader a uchycovacího zařízení pro rozebíratelnou montáž transformátoru. Vzhledem k praktickému využití souprav bylo rozhodnuto o doplnění každé ze souprav různými konstrukčními prvky aby tak vznikly dvě podobné soupravy. Jedna se zaměřením na síly a energii magnetického pole byla doplněna o konstrukční prvek pro zavěšení jádra a pružinu. Druhá souprava byla doplněna o Holtzovy svorky pro sestavení bleskojistky a pohybu vodiče v magnetickém poli.

Na ukázkou principů stejnosměrných motorů, dynamu a indukční brzdy slouží doplněk rozkladných transformátorů. Tento doplněk je vybaven řadou kotev pro demonstraci chování vodiče v magnetickém poli permanentního magnetu nebo elektromagnetu.

## 2 Hlavní problémy

### Chybějící dokumentace

Zásadním problémem před zahájením renovace byla chybějící dokumentace. Dochovaly se pouze špatně čitelné kusovníky jednotlivých součástí nalepené na vnitřních stranách beden které se značně rozcházely se skutečným stavem jejich obsahu. Nebylo tedy možné zjistit k jakým úlohám a v jakém rozsahu byla souprava původně určena. Proto bylo nejdůležitější sestavit demonstrační úlohy a podle jejich charakteru díly souprav doplňovat a opravovat.

### Přeppravky

Soupravy jsou uloženy v dřevěných přeprávkách, které v průběhu času utrpěly četná poškození. Nejen vnější otlučení a poškození nátěru ale i vnitřní upevňovací mechanismy, sloužící k zajištění součástí proti pohybu, byly uvolněné, chybějící nebo nefunkční.

### Cívky

Velmi poškozenými částmi souprav byly cívky. Celkem bylo nalezeno 16 cívek s různými počty závitů různými průřezy vodičů a také různým typem poškození. Konstrukční prvky cívek jsou vyrobeny z plastu který se vlivem stárnutí stal velmi křehkým proto se dá říci že byly více nebo méně poškozeny všechny cívky. Některé cívky byly poškozeny buď mechanicky nebo tepelně zcela nevratně a bylo nutné je navinout znovu.

### Chybějící díly

Po prostudování dochované dokumentace se ukázalo, že chybí několik pomůcek a řada konstrukčních prvků. U doplňku k rozkladnému transformátoru se jednalo zejména o segmenty k Waltenhofenovu kyvadlu, konkrétně segment plný a segment prořezaný. Dále upínací mechanismus s kladkou a konstrukční prvky jako držák osy s osou a zajišťovací matice. Pro rozkladné transformátory byly díly doplněny podle sestavených úloh. Souprava I byla doplněna o Holtzovy svorky, základní desku a držáky Holtzových svorek. Souprava II byla doplněna o mechanismus pro zavěšení pomůcek sestávající z nosné konstrukce, závěsu, pružiny a řetízku s háčky.

### 3 Provedené opravy

#### Oprava přepravek

Poškození přepravek nebyla jen povrchová ale ukázalo se že je na několika místech porušena jejich celistvost. Proto bylo nezbytné odštípnuté nebo uvolněné části přilepit speciálním lepidlem. Poté byly přepravky ošetřeny smirkovým papírem a následně opatřeny otěruvzdorným lakem na dřevo.

#### Opravy uchycovacích prvků

Uchycovací prvky, které mají sloužit k uchycení součástí souprav na svých místech, byly vlivem stárnutí odlepené, uvolněné nebo naopak byla znemožněna jejich pohyblivost. Proto bylo nutné tyto prvky z beden demontovat, rozebrat, natřít a poté přidělat zpět.

#### Oprava cívek

Tento krok byl, vzhledem k počtu cívek a četnosti jejich používání, nejnáročnější. Větší nebo menší opravu potřebovala téměř každá cívka. Typickou závadou cívek bylo odlomení nebo odtržení vývodů cívky ze vstupních svorek. Bylo potřeba vodiče zkrátit očistit a připájet zpět na svorku. Hlavní ale bylo nahradit rozlámané kusy plastů koster cívek. Jednu cívku bylo nutné znovu navinout a jednu vyrobit celou znovu.

#### Oprava koster cívek

Kostra cívky je plastová skořepina na které je navinut vodič cívky. S ohledem na to že se jednalo o renovaci byla snaha zachovat co možná nejvíc dílů původních. To znamená že poškozené části byly nahrazovány znovu vyrobenými částmi z odpovídajícího materiálu. Z plastové desky o tloušťce 1,3mm tak bylo potřeba vyříznout díly přesně podle původní předlohy. Původní díly musely být začištěny, zabroušeny a poté doplněny novými díly. Tímto způsobem byly doplněny všechny odštípnuté součásti a jedna kostra vyrobena celá znovu. Protože nový materiál neměl stejnou barvu jako původní bylo potřeba nové díly opatřit světle žlutým nátěrem.

#### Navíjení cívek

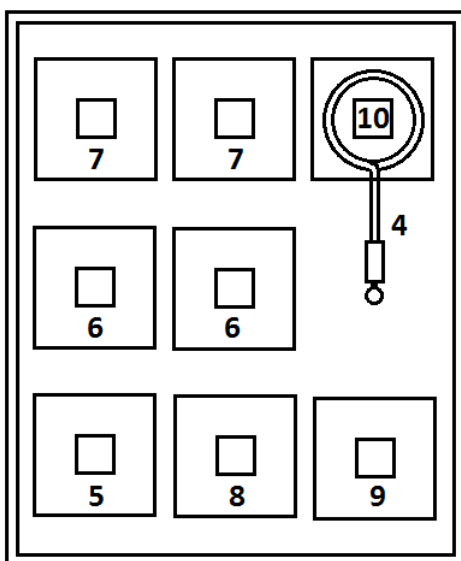
Po opravě koster bylo třeba cívky opět navinout. Na jednu cívku bylo možné použít původní drát a na druhou byl použit jiný drát podobného průřezu. V obou případech se jednalo o 1200 závitové cívky.

## 4 Dokumentace

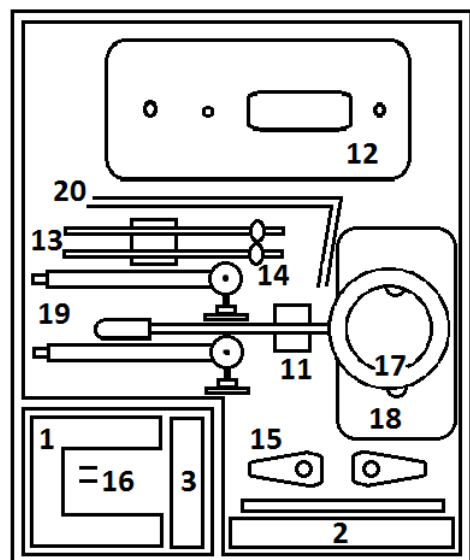
Dokumentace se skládá ze soupisu položek obsažených v jednotlivých přepravkách. Tyto díly lze snadno vyhledat pomocí situačního náčrtku, jenž představuje pohled shora do vnitřku přepravky. Každý díl má přidělené svoje číslo v soupisce, kterému odpovídá číslo uvedené na náčrtku. Přepravky jsou členěny do dvou pater jak je naznačena na náčrtcích (viz Obr.1-5). V horních patrech jsou uloženy cívky a ve spodních patrech pak ostatní komponenty. Podobně je tomu i v případě doplňku k rozkladným transformátorům, jehož přepravka je ovšem pouze jednopatrová.

### Rozkladný transformátor I

Číslo	Součást	Kusů
1	Transformátorové jádro U	1
2	Jádro dlouhé	1
3	Jádro krátké	1
4	Cívka 6 závitů	1
5	Cívka 60 závitů	1
6	Cívka 300 závitů	2
7	Cívka 600 závitů	2
8	Cívka 1200 závitů	1
9	Cívka 12000 závitů	1
10	Kostra cívky bez čela	1
11	Tavící miska	1
12	Základní deska	1
13	Nástavec	2
14	Vroubkovaná matice	2
15	Patka	2
16	Spojovací kolík	2
17	Hliníkový kroužek	1
18	Základní deska Holtzovy svorky	1
19	Holtzovy svorky	2
20	Drát růžkové bleskojistky	2



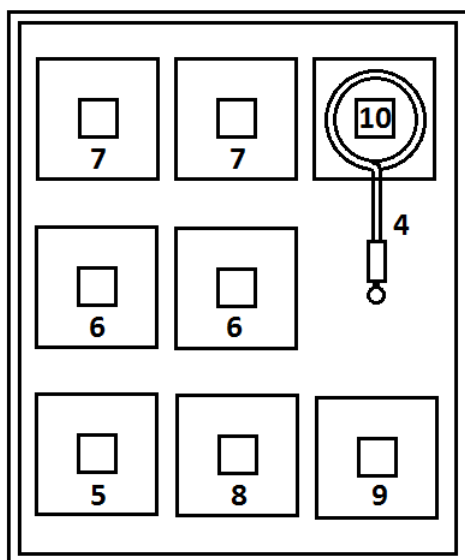
Obr. 2 Uložení cívek v boxu soupravy I horní patro



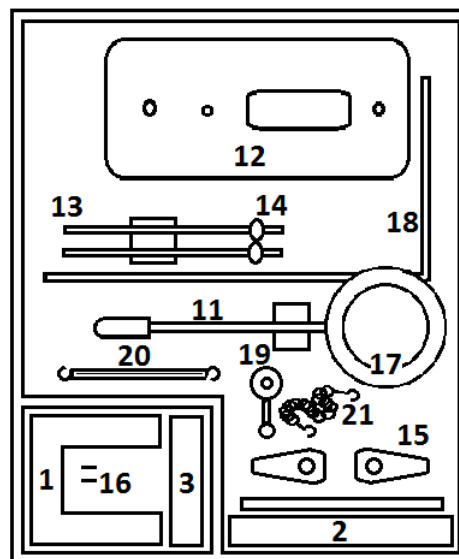
Obr. 1 Uložení komponentů soupravy I spodní patro

**Rozkladný transformátor II**

Číslo	Součást	Kusů
1	Transformátorové jádro U	1
2	Jádro dlouhé	1
3	Jádro krátké	1
4	Cívka 6 závitů	1
5	Cívka 60 závitů	1
6	Cívka 300 závitů	2
7	Cívka 600 závitů	2
8	Cívka 1200 závitů	1
9	Cívka 12000 závitů	1
10	Kostra cívky bez čela	1
11	Tavící miska	1
12	Základní deska	1
13	Nástavec	2
14	Vroubkovaná matice	2
15	Patka	2
16	Spojovací kolík	2
17	Hliníkový kroužek	1
18	Nosná konstrukce	1
19	Závěs	1
20	Pružina	1
21	Řetízek s háčky	1



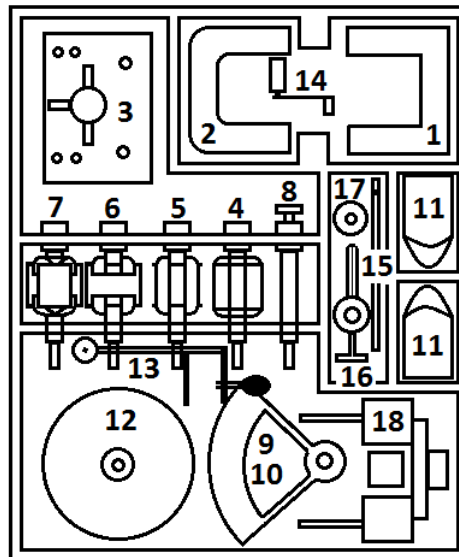
Obr. 4 Umístění cívek v boxu soupravy II horní patro



Obr. 3 Uložení komponentů soupravy II spodní patro

**Doplňěk k rozkladnému transformátoru**

Číslo	Součást	Kusů
1	Jádro U	1
2	Permanentní magnet U	1
3	Držák kartáčů	1
4	Kotva s jedním závitem	1
5	Kotva s cívkou	1
6	Kotva s dvojitým T	1
7	Kotva bubnová	1
8	Komutátor	1
9	Segment plný	1
10	Segment prořezaný	1
11	Pólový nástavec	2
12	Kotouč	1
13	Kladka s upínacím mechanismem	1
14	Klička	1
15	Tyčka Ø5mm	1
16	Držák osy s osou	1
17	Zajišťovací matice	1
18	Prodlužovací nástavec	1



Obr. 5 Uložení součástí doplňku rozkladného transformátoru

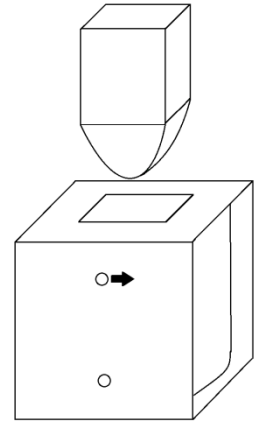
## 5 Demonstrační úlohy

### Demonstrační úlohy s využitím rozkladného transformátoru

#### Jádro elektromagnetu

Pokus ukazuje magnetické účinky cívky na předměty ve svém okolí. Při zapnutí proudu cívkou je vidět jak se jádro vychýlí ze své původní rovnovážné polohy a je vtahováno do cívky. Tato síla působící na jádro je tím větší čím menší je vzdálenost od cívky. Z následujícího příkladu vyplývá jak pokus demonstruje energetickou bilanci elektromagnetického pole cívky. Jak se jádro zasouvá do cívky zvětšuje se indukčnost a zvětšuje se i energie akumulovaná v magnetickém poli cívky. Z výsledku tohoto příkladu podle [1], plyne závislost energie magnetického pole na hloubce zasunutí jádra.

Pro takovýto výpočet je potřeba zavést některé značně zjednodušující předpoklady jako dlouhý solenoid a zanedbání rozptylových toků.



Obr. 6 Cívka s jádrem

Vycházíme ze vztahu pro výpočet magnetického odporu.

$$R_m = \int \frac{1}{\mu \cdot S} dl \quad (7.1)$$

$$R_m = \int \frac{1}{\mu \cdot S} dl = \frac{l}{\mu \cdot S}$$

Po úpravě dostaneme vztah do kterého dosadíme. Magnetický odpor se skládá ze dvou složek. Ze složky se zasunutým jádrem a ze složky se vzduchem.

$$R_{m0} = \frac{l-x}{\mu_0 \cdot S} \quad R_{mFe} = \frac{x}{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot S}$$

Do vztahu pro výpočet indukčnosti dosadíme součet obou složek magnetického odporu.

$$L = \frac{N^2}{R_{mc}} \quad (7.2)$$

$$L = \frac{N^2}{R_{mc}} = \frac{N^2 \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot S}{(l-x)\mu_r + x}$$

Vypočteme energii magnetického pole cívky.

$$W_m = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2 \quad (7.3)$$

Po dosazení indukčnosti a proudu získáme energie magnetického pole v závislosti na hloubce zasunutí jádra.

$$W_m = \frac{I^2 \cdot N^2 \cdot \mu_r \cdot \mu_0 \cdot S}{2((l-x)\mu_r + x)}$$

Po dosazení skutečných hodnot vychází energie při zcela zasunutém jádře 5,27 J.

$$W_{mmax} = \frac{1^2 \cdot 600^2 \cdot 8000 \cdot \mu_0 \cdot 12,25 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 0,42} = 5,27 \text{ J}$$

Energie bez jádra vychází 0,65 mJ.

$$W_{m0} = \frac{1^2 \cdot 600^2 \cdot 8000 \cdot \mu_0 \cdot 12,25 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 0,42 \cdot 8000} = 6,5 \cdot 10^{-4} \text{ J}$$

Kde	$R_m$	je magnetický odpor,
	$R_{m0}$	magnetický odpor vzduchového jádra,
	$R_{mFe}$	magnetický odpor železného jádra,
	$L$	indukčnost,
	$W_m$	energie magnetického pole,
	$W_{mmax}$	energie magnetického pole cívky se zcela zasunutým jádrem,
	$W_{m0}$	energie magnetického pole cívky bez jádra,
	$l$	délka střední indukční čáry (délka solenoidu),
	$S$	průřez jádra,
	$\mu_r$	relativní permeabilita,
	$\mu_0$	permeabilita vakua,
	$I$	proud,
	$N$	počet závitů,
	$x$	zasunutí jádra.

Z výpočtu je vidět jak je energie akumulovaná v magnetickém poli cívky závislá na charakteru jádra. Lze porovnat energii magnetického pole při zasunutém jádře a zcela vysunutém jádře. Přičemž tento postup umožňuje vypočítat energii pro libovolnou hloubku zasunutí jádra a může tak sloužit i pro stanovení síly působící na jádro.

### Použité pomůcky:

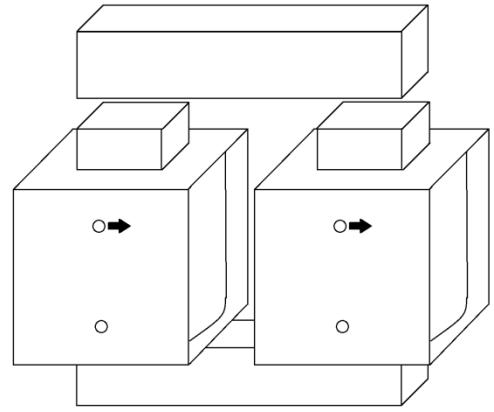
Rozkladný transformátor II	číslo
• Cívka 600 závitů	7
• Základní deska	12
• Nosná konstrukce	18
• Závěs	19
• Pružina	20
• Řetízek s háčky	21
Doplňk k rozkladnému transformátoru	
• Pólový nástavec	11
• Zdroj 12 V, 2 A DC	

### Postup

Pokus sestavíme z jedné cívky s 300 nebo 600 závity a krátkého jádra. Cívku upevníme na základní desku pomocí nástavce s patkou a zajistíme maticí. Jádro zavěšíme nad cívku na pružinu uchycenou k nosnému konstrukčnímu prvku. Nosný konstrukční prvek se zavěšeným jádrem upevníme rovněž na základní desku pomocí upínacího šroubu. Nyní můžeme připojit cívku ke zdroji proudu a pozorovat jak se s hloubkou vtažení jádra mění napínací síla pružiny.

### Kotva a jádro elektromagnetu

Úloha ukazuje, jaké magnetické účinky mohou mít cívky nasazené na magnetickém jádře a protékané proudem. Například při použití dvou šesti set závitových cívek protékaných relativně malým proudem, řádově desetinami ampéru, je horní část jádra přitahována takovou silou že ji není možné odstranit bez použití nástroje. Úlohu je možné také zapojit s jednou cívkou a silové účinky poté porovnat. Další možností je zapojit cívky tak aby jejich magnetické toky působily proti sobě tedy záměrně nerespektovat směry vinutí (na obrázcích označené šipkami). Magnetické účinky cívek se poté vyruší a jádro není přitahováno téměř žádnou silou.



Obr. 7 dvě cívky na společném jádře s kotvou

Tento pokus praktickým způsobem ukazuje klasický příklad, kdy na základě znalostí počtu závitů, proudu, relativní permeability jádra a fyzických rozměrů máme určit sílu, kterou je přitahována kotva elektromagnetu. Jak je patrné z následujícího příkladu (viz [1]), síla působící na kotvu elektromagnetu je nepřímo úměrná šířce vzduchové mezery.

Výpočet magnetického odporu vzduchové mezery a magnetického obvodu podle vztahu 7.1.

$$R_m = \int \frac{1}{\mu \cdot S} dl$$

$$R_{m\delta} = \frac{2\delta}{\mu_0 \cdot S} \quad R_{mFe} = \frac{l}{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot S}$$

Celkový magnetický odpor obvodu je součtem složek magnetického odporu vzduchové mezery a magnetického odporu železného jádra.

$$R_{mc} = R_{m\delta} + R_{mFe} = \frac{2\delta}{\mu_0 \cdot S} + \frac{l}{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot S} = \frac{2\delta\mu_0 + l}{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot S}$$

Stanovíme indukčnosti podle vztahu (7.2).

$$L = \frac{N^2}{R_{mc}} = \frac{\frac{N^2}{1}}{\frac{2\delta\mu_0 + l}{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot S}} = \frac{N^2 \cdot \mu_r \cdot \mu_0 \cdot S}{2\delta\mu_0 + l}$$

Z indukčnosti lze vypočítat energii magnetického pole podle vztahu (7.3).

$$W_m = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2$$

$$W_m = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2 = \frac{I^2 \cdot N^2 \cdot \mu_r \cdot \mu_0 \cdot S}{2\delta\mu_r + l}$$

Podle vztahu pro výpočet síly z energie magnetického pole stanovíme sílu působící na jádro.

$$F = \frac{\partial W_e}{\partial s} \quad (7.4)$$

$$F = \frac{\partial W_e}{\partial s} = \frac{\partial}{\partial \delta} \left( \frac{I^2 \cdot N^2 \cdot \mu_r \cdot \mu_0 \cdot S}{2\delta\mu_r + l} \right) = - \frac{4 \cdot I^2 \cdot N^2 \cdot \mu_r^2 \cdot \mu_0 \cdot S}{(4\delta\mu_r + l)^2}$$



Pod dosazení konkrétních hodnot pro vzduchovou mezeru 5mm vychází síla 5,5 N

$$F = \frac{4 \cdot 1^2 \cdot 600^2 \cdot 8000^2 \cdot \mu_0 \cdot 12,25 \cdot 10^{-4}}{(4 \cdot 0,005 \cdot 8000 + 0,42)^2} = 5,5 \text{ N}$$

Síla na přiloženou kotvu bez vzduchové mezery vychází 803 kN

$$F = \frac{4 \cdot 1^2 \cdot 600^2 \cdot 8000^2 \cdot \mu_0 \cdot 12,25 \cdot 10^{-4}}{(4 \cdot 0 \cdot 8000 + 0,42)^2} = 803 \text{ kN}$$

Kde	$R_m$	je magnetický odpor,
	$R_{m\delta}$	magnetický odpor vzduchové mezery,
	$R_{mFe}$	magnetický odpor železného jádra,
	L	indukčnost,
	$W_m$	energie magnetického pole,
	l	délka střední indukční čáry (délka solenoidu),
	S	průřez jádra,
	$\mu_r$	relativní permeabilita $\mu_r=8000$ ,
	$\mu_0$	permeabilita vakua,
	I	proud,
	N	počet závitů,
	F	síla,
	$\delta$	délka vzduchové mezery.

Tyto výsledky je nutné chápat jako orientační neboť jsou zavedeny značně zjednodušující předpoklady jako v posledním příkladu vzduchová mezera rovna nule. To by odpovídalo dokonale spojenému magnetickému obvodu. Z příkladu vyplývá jak síla působící na jádro je nepřímo úměrná druhé mocnině délky vzduchové mezery.

### Použité pomůcky:

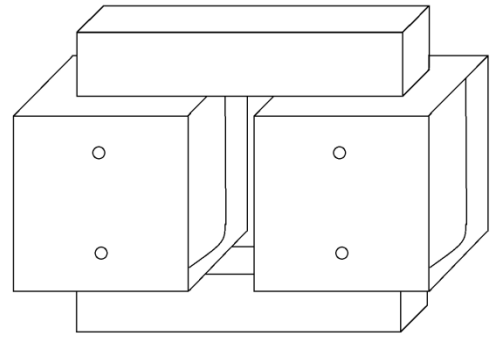
Rozkladný transformátor II	číslo
• Transformátorové jádro U	1
• Jádro krátké	3
• dvě cívky 300 nebo 600 závitů	6-7
• Základní deska	12
• Nosná konstrukce	18
• Závěs	19
• Pružina	20
• Řetízek s háčky	21
• Zdroj 12 V, 2 A DC	

### Postup

Na transformátorové U jádro nasuneme dvě cívky 300 nebo 600 závitů a propojíme je sériově. Takto vzniklý magnetický obvod umístíme na základní desku. Do otvoru v základní desce nasadíme nosnou konstrukci a zajistíme upínacím šroubem. Na rameno konstričního prvku nasuneme závěs na který zavěsíme pružinu a krátké jádro. Jádro by mělo viset zhruba 5 až 10 mm nad magnetickým obvodem protože s větší vzdáleností by nemuselo dojít k přitažení. Při pomalém zvyšování proudu můžeme pozorovat jak je krátké jádro přitahováno ke zbytku magnetického obvodu. Po přitažení se můžeme pokusit rukou jádro opět nadzdvihnout a vyzkoušet tak jakou silou je jádro přitahováno.

## Jádrový transformátor

Souprava umožňuje velice názorně sestavit a předvést funkci jádrového transformátoru. Transformátor tohoto uspořádání se prakticky nepoužívá zejména kvůli rozptylovým reaktancím a ztrátám v relativně dlouhém magnetickém jádře. Jeho uspořádání ale odpovídá náčrtkům magnetických obvodů se kterými se student často setkává při výkladu teorie magnetického pole. Pro potřeby sestavení transformátoru je souprava vybavena řadou cívek s různými počty závitů.



Obr. 8 Jádrový transformátor

Podle zvolených cívek je možné sestavit a vyzkoušet transformátory s různými transformačními poměry.

Zvyšovací nebo snižovací funkci lze demonstrovat měřícím přístrojem nebo je možné ukázat oddělovací funkci oddělovacího transformátoru. Jak je ukázáno na následujícím příkladu [2], je-li primární vinutí s počtem závitů  $N_1$  protékáno proudem  $i_1$  potom indukované napětí na sekundárním vinutí s počtem závitů  $N_2$  bude  $u_2$ .

Stanovíme magnetický tok podle Hopkinsonova zákona.

$$\Phi = \frac{U_m}{R_m} = \frac{N_1 \cdot i_1}{\frac{l}{\mu S}} \quad (7.5)$$

V tomto vztahu je  $R_m$  magnetický odpor celého magnetického obvodu podle 7.1.

$$R_m = \int \frac{1}{\mu \cdot S} dl$$

Po dosazení do rovnice pro indukované transformační napětí získáme napětí indukované na  $N_2$  sekundárních závitů.

$$u_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad (7.6)$$

$$u_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} = \frac{-N_2 N_1 \mu S}{l} \cdot \frac{di}{dt} = \frac{-N_2 N_1 \mu S}{l} \cdot i \omega \cos(\omega t)$$

Při použití primární cívkou 600 závitů a proudem  $i_1 = 0,012 \sin(\omega t)$  na sekundárním 300 závitovém vinutí naměříme efektivní hodnotu 20 V.

$$\begin{aligned} & - \frac{600 \cdot 300 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 8000 \cdot 12,25 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{2}}{0,42} 0,012 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot \sin(\omega t) = \\ & = -20\sqrt{2} \sin(\omega t) \text{ V} \end{aligned}$$

Tento příklad ukazuje jak magnetický tok, který je vybuzen proudem v primárním vinutí, indukuje napětí v sekundárním vinutí. Z rovnice 7.6 je vidět že indukované napětí je závislé na časové změně magnetického toku. To znamená je-li magnetický tok vybuzen harmonickým proudem je také harmonický a v sekundární cívkě indukuje harmonické napětí. Pokud by průběh proudu nebyl sinusový, jako v tomto příkladu, ale představoval jinou funkci indukované napětí by odpovídalo časové derivaci této funkce.

Kde	$U_m$	je magnetické napětí,
	$\Phi$	magnetický tok,
	$R_m$	magnetický odpor,
	$N_1$	počet závitů primární cívky,
	$N_2$	počet závitů sekundární cívky,
	$i_1$	primární proud,
	$u_2$	napětí na sekundárním vinutí,
	$l$	délka střední indukční čáry,
	$S$	průřez jádra,
	$\mu$	permeabilita.

### Použité pomůcky:

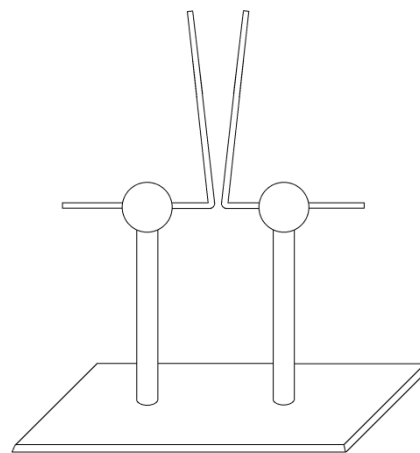
Rozkladný transformátor I a II	číslo
• Transformátorové jádro U	1
• Jádro krátké	3
• 2 cívky	4-9
• Základní deska	12
• Nástavce	13
• Vrubová matice	14
• Patky	15
• V-metr	
• Žárovka	
• Zdroj 12 V, 2 A DC	

### Postup

Transformátorové U jádro umístíme na základní desku a nasuneme dvě zvolené cívky. Cívky volíme podle toho zda chceme pracovat na primární straně se síťovým napětím 230V, pro tento účel lze použít cívky s více než 600 závitů. Nebo pro nižší napětí a vyšší proudy lze použít cívky s menším počtem závitů a silnějším průřezem. Rovněž záleží také na tom, jestli chceme sestavit transformátor zvyšovací, snižovací, nebo oddělovací. Magnetický obvod uzavřeme krátkým jádrem a upevníme pomocí nástavců a patek. Vznikne Jádrový transformátor (viz obr. 8). Převodní poměr je zřejmý z počtů závitů použitých cívek ale pro názornost pokusu můžeme tento poměr stanovit ještě na základě měření primárního napětí ku sekundárnímu napětí. Na předvedení oddělovací funkce je nejvhodnější použít žárovku, která by neměla svítit, pokud ji připojíme mezi primární a sekundární svorky. Mezi primární a sekundární svorky lze též připojit i V-metr při vyšším rozsahu by neměl ukazovat žádné napětí nebo bude jeho údaj neurčitý a zmatený, způsobený pouze rozptylovými toky.

## Růžková bleskojistka

Pokus má za úkol předvést činnost růžkové bleskojistky, vznik a zánik výboje. V praxi růžková bleskojistka funguje tak, že je jeden její konec připojen na napětí a druhý je uzemněn. Při bezporuchovém stavu k přeskoku nedojde. Stejně jako v tomto pokusu bez přiblížení plamene pod nejužší místo elektrod. Dojde-li na zařízení chráněném bleskojistkou k přepětí vznikne v nejužším místě bleskojistky k výboji. V pokusu tento stav navodíme pomocí plamene svíčky tedy ionizačního činidla.



Obr. 9 Růžková bleskojistka

Působením plamene se plyn ionizuje tj. některé jeho molekuly se rozštěpí na elektron a kladný ion. Plamen dodává elektronům energii potřebnou k jejich odtržení tzv. tepelná ionizace. Pokud se ionizovaný plyn nachází v elektrickém poli mezi dvěma elektrodami, vznikne uspořádaný pohyb kladných iontů k záporně nabitě katodě a záporných iontů a elektronů ke kladně nabitě anodě, tj. vznikne elektrický proud. Tento elektrický proud v plynu, který se udržuje jen po dobu působení ionizátoru, se nazývá nesamostatný výboj [3].

Původně byla tato úloha koncipována s napájením ze zvyšovacího transformátoru v zapojení s 600závitovou cívkou na primární a 12000 závitovou cívkou na sekundární straně. Primární vinutí transformátoru bylo napájeno síťovým napětím 230V to znamená že, na výstupu transformátoru bylo napětí 4600V. Z bezpečnostních důvodů byla tato úloha upravena pro napájení z transformátoru kde má primární vinutí šedesát závitů a je napájeno ze střídavého zdroje 24 V, 2A. Ovšem na sekundární straně se vysokému napětí, které je potřeba k překonání vzdušné vzdálenosti, nelze vyhnout proto zůstává cívka 12000 závitů a napětí 4800V. Sekundární vinutí je galvanicky odděleno od zdroje a není schopno dodat větší proud než 10mA přesto je potřeba aby tento pokus prováděla výhradně osoba s dostatečnou kvalifikací a při dodržení maximálních bezpečnostních opatření. V opačném případě lze tento experiment chápat jen jako teoretické doplnění výčtu pokusů ke kterým měla souprava původně sloužit.

Podle transformačního poměru lze stanovit napětí na sekundárním vinutí.

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (7.7)$$

Použijeme-li jako primární cívku s šesti sty závity se síťovým napájením 230V potom napětí na sekundární cívce s 12000 závity bude:

$$U_2 = U_1 \cdot \frac{N_2}{N_1} = 230 \cdot \frac{12000}{600} \doteq 4600 \text{ V}$$

Nebo je vhodné použít bezpečnější uspořádání s cívkou o šedesáti závitech napájenou dvaceti čtyřmi volty.

$$U_2 = U_1 \cdot \frac{N_2}{N_1} = 24 \cdot \frac{12000}{60} \doteq 4800 \text{ V}$$

Vzdálenost mezi elektrodami při které může dojít k přeskoku lze určit ze vztahu pro elektrickou pevnost. Zanedbáme-li vliv teploty, vlhkosti, tvaru elektrod a stanovíme-li elektrickou pevnost vzduchu na 2kV/mm, poté lze stanovit přeskokovou vzdálenost ze vztahu pro elektrickou pevnost.

Vycházíme ze vztahu pro elektrickou pevnost.

$$E_p = \frac{U_p}{d} \quad (7.8)$$

$$d = \frac{U_p}{E_p} = \frac{4,8}{2} = 2,4 \text{ mm}$$

Kde  $d$  je vzdálenost mezi elektrodami,  
 $U_p$  přeskokové napětí,  
 $E_p$  intenzita elektrického pole.

Při této nebo kratší vzdálenosti mezi elektrodami dochází k přeskoku ihned po připojení napájení. V tomto případě se výbojová činnost soustředí v nejužším místě a nedochází ke stoupání a přerušení oblouku. Při oddálení elektrod k samostatnému výboji nedojde proto je nutné přiblížit pod nejužší místo elektrod plamen svíčky který místo zahřeje a dodá ionizační energii čímž sníží elektrickou pevnost vzduchu. Takto vzniklý výboj má dostatečnou energii pro svoje udržení a je vlivem tepla unášen vzhůru, jeho délka se prodlužuje až na koncích růžků zhasne.

### Pomůcky:

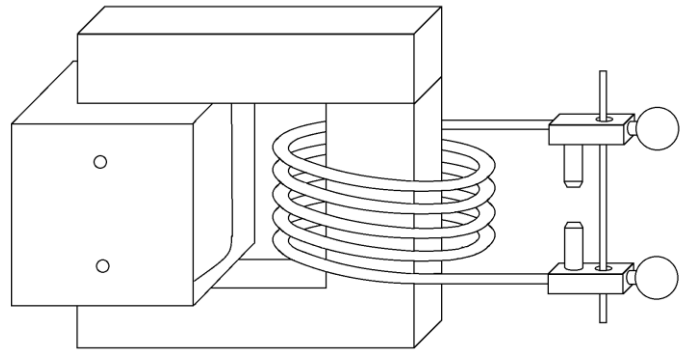
Rozkladný transformátor I	číslo
Zvyšovací transformátor	
• Transformátorové jádro U	1
• Jádro krátké	3
• 2 cívky	4-9
• Základní deska	12
• Nástavce	13
• Vrubová matice	14
• Patky	15
Růžková bleskojistka	
• Základní deska Holtzových svorek	18
• Holtzovy svorky	19
• Dráty růžkové bleskojistky	20
• Zdroj 24 V, 2 A AC	
• Zápalky	
• Svíčka	

### Postup

K napájení je potřeba nejprve sestavit transformátor. Jako primární použijeme cívku 60 závitů a napájení 24V. Na sekundárním vinutí použijeme cívku 12000 závitů tím získáme napětí zhruba 4,8kV. Proto, jak je uvedeno v předchozím odstavci, je nezbytné aby tento pokus prováděl pouze vyučující. Obě cívky nasuneme na transformátorové U jádro, magnetický obvod uzavřeme krátkým jádrem. Celý transformátor umístíme na základní desku kde jej upevníme pomocí nástavců a patek. Na sekundární svorky připojíme vodiče vedoucí k Holtzovým svorkám na nichž jsou umístěny růžky bleskojistky. Dráty růžkové bleskojistky by měly být v nejužším místě vzdáleny zhruba 5-8mm. V takovém případě po spuštění transformátoru k přeskoku samovolně nedeje, proto přiložíme pod nejužší místo bleskojistky plamen svíčky čímž vyvoláme výboj.

## Žhavení

Pokus ukazuje využití tepelných účinků elektrického proudu při tavení železa nebo svařování. Primární cívka je připojena na síťové napětí 230V kdy je vhodné, z bezpečnostních důvodů, předřadit dostatečně výkonný oddělovací transformátor. Nebo lze, z bezpečnostních důvodů, použít pro primární vinutí šedesáti závitovou cívku a napájení 24V. Sekundární cívka je masivní a má šest závitů proto se na ní indukuje malé napětí ale za to velký proud. Časově proměnný magnetický tok způsobený primární cívkou indukuje v sekundární cívce napětí vyvolávající proud, který se uzavírá přes svorky ocelovým drátem. Sekundární cívka je vyrobena z masivního měděného vodiče takže tepelné účinky protékajícího proudu jsou na jejím vinutí minimální. To neplatí pro ocelový drát, který má menší průřez a větší odpor, proto se při průchodu proudu bude silně zahřívat. Následující příklad podle [4], ukazuje jaké napětí se indukuje na šest závitů. Protékající proud je omezen pouze odporem vodiče.



Obr. 10 Žhavení drátu

Při použití 600závitové cívky a protékajícím proudem 0,7A lze uvažovat magnetickou indukci v jádře 1T. Potom magnetický tok ve sloupku určíme z následujícího vztahu.

$$\Phi = \int B dS = B \cdot S \quad (7.9)$$

$$\Phi = B \cdot S = 1 \cdot 12,24 \cdot 10^{-4} = 1,224 \text{ mWb}$$

Kde  $\Phi$  je magnetický tok,  
 $B$  magnetická indukce  
 $S$  průřez jádra kde  $S=12,24 \text{ cm}^2$

Určíme indukované napětí na šest závitů sekundární cívky.

$$u_i = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot N \cdot \Phi \cdot f \quad (7.10)$$

$$u_i = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot 6 \cdot 1,224 \cdot 10^{-3} \cdot 50 = 1,63 \text{ V}$$

Zanedbáme-li odpor sekundárního vinutí bude proud závislý na odporu drátku mezi sekundárními svorkami.

$$R = \int \frac{1}{\gamma \cdot S} dl \quad (7.11)$$

Kde  $l$  je délka vodiče  $l=50\text{mm}$ ,  
 $\rho$  rezistivita,  
 $\gamma$  konduktivita,  
 $S$  průřez vodiče.

Při použití železného drátu s průřezem  $2 \text{ mm}^2$  a rezistivitou železa  $0,1 \mu\Omega\text{m}$  bude odpor

$$R = \frac{l}{\gamma \cdot S} = \rho \cdot \frac{l}{S} = 0,1 \cdot \frac{0,05}{2} = 2,5 \cdot 10^{-3} \Omega$$

Stanovíme výkon dodaný transformátorem do zátěže.

$$P = \frac{U^2}{R} \quad (7.12)$$

$$P = \frac{U^2}{R} = \frac{1,63^2}{2,5} = 1062 \text{ W}$$

Kde P je elektrický výkon,  
U indukované napětí v sekundárním vinutí,  
R elektrický odpor.

Při zanedbání ztrát transformátoru lze snadno stanovit energii spotřebovanou při žhavení drátu. Při pokusu bylo experimentálně zjištěno že se drát rozžhaví do bílého žáru zhruba za 10s. Proto je ve výpočtu zavedeno  $t=10\text{s}$

$$E = P \cdot t \quad (7.13)$$

$$E = P \cdot t = 1062 \cdot 10 = 106200 \text{ J} \doteq 0,0295 \text{ kWh}$$

Kde E je elektrická energie  
t čas,  
P je elektrický výkon.

### Pomůcky:

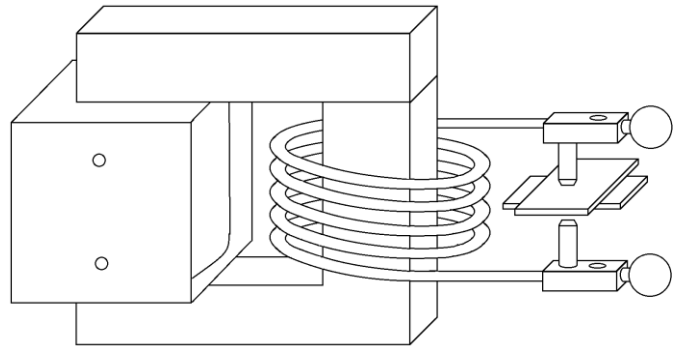
Rozkladný transformátor I a II	číslo
• Transformátorové U jádro	1
• Jádro krátké	3
• Cívka 6 závitů	4
• Cívka 60 závitů	5
• Základní deska	12
• Kostra cívky bez čela	10
• Nástavce	13
• Vrubové matice	14
• Patky	15
• Ocelový drát	
• Zdroj 24 V, 2 A AC	

### Postup

Na transformátorové U jádro nasuneme cívku 600 nebo 60 závitů a na druhý sloupek nejprve kostru cívky bez čela, ta má zabránit mezizávitovému zkratu při doteku s jádrem, poté nasuneme šestizávitovou cívku. Magnetický obvod uzavřeme krátkým jádrem. Takto vzniklý transformátor upevníme pomocí nástavců a patek na základní desku. Mezi svorky šestizávitové cívky upneme ocelový drátek. Poté můžeme připojit přívodní vodiče a zapnout napájení 230V nebo 24V, 50Hz. Po sepnutí můžeme pozorovat, jak se drát začne zahřívat do bílého žáru až se nakonec přetaví. Po vychladnutí drátu je možné přiložit kusy drátů opět na sebe a znovu spustit proud. Dráty se začnou tavit v místě dotyku až se znovu svaří, poté je nutné proud opět vypnout aby nedošlo k jejich dalšímu přetavení.

## Svařování

Následující pokus představuje neznámější druh odporového svařování. Spoj přeplátovaných plechů je tvořen jedním nebo několika bodovými svary. V praxi se pro svařování používají duté válcové elektrody většinou s vyměnitelnou čepičkou. Ke svaření materiálů dojde po sepnutí zdroje proudu. Svařovanými materiály začne procházet velký elektrický proud, který v místě jejich styku materiály nataví. Současně musí dojít k silnému stlačení ramen svařovacího stroje. V místě styku materiálů se tak vytvoří bodový svar. Dodání stejného množství tepla do svaru můžeme dosáhnout buď velkým proudem a krátkým časem, nebo nižším svařovacím proudem dodaným v delším čase [5]. V tomto pokusu je nejvhodnější svařování dvou žiletok o tloušťce 0,2mm které stlačíme přes dvě izolované úchytky na koncích svorek šestizávitové cívky.



Obr. 11 Bodové svařování plíšků

Při použití 600závitové cívky a protékajícím proudem 0,7A lze uvažovat magnetickou indukci v jádře 1T. Průřez jádra je v tomto případě  $S=12,24 \text{ cm}^2$ .

Vycházíme ze vztahu pro magnetický tok podle vztahu 7.9

$$\Phi = \int B dS = B \cdot S$$

$$\Phi = B \cdot S = 1 \cdot 12,24 \cdot 10^{-4} = 1,224 \text{ mWb}$$

Kde  $\Phi$  je magnetický tok,  
 $B$  magnetická indukce  
 $S$  průřez jádra

Indukované napětí na šest závitů podle 7.10

$$u_i = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot N \cdot \Phi \cdot f$$

$$u_i = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot 6 \cdot 1,224 \cdot 10^{-3} \cdot 50 = 1,63 \text{ V}$$

Zanedbáme-li odpor sekundárního vinutí bude proud závislý na odporu materiálu stlačeného mezi elektrodami sekundární šestizávitové cívky. Tento odpor určíme ze vztahu 7.11

$$R = \int \frac{1}{\gamma \cdot S} dl$$

Kde  $l$  je tloušťka dvou žiletok tedy  $l=0,4 \text{ mm}$ ,  
 $\gamma$  konduktivita,  
 $S$  kruhová plocha pod přiloženou elektrodou o průměru 5 mm.

$$S = \pi r^2 \quad (7.14)$$

$$S = \pi r^2 = \pi \cdot 2,5^2 = 19,5 \text{ mm}^2$$

Zanedbáme-li přechodový odpor mezi kontakty se styčnou plochou  $19,5 \text{ mm}^2$ . A zavedeme-li rezistivitou železa  $0,1 \mu\Omega\text{m}$  bude odpor svařovaného železa:



$$R_{Fe} = \frac{l}{\gamma \cdot S} = \rho \cdot \frac{l}{S} = 0,1 \cdot \frac{0,0004}{19,5} \doteq 2 \cdot 10^{-6} \Omega$$

Obdobně vypočteme odpor sekundárního vinutí, který vzhledem k velkému proudu nelze zanedbat. Vinutí je tvořeno Cu vodičem o průřezu 28 mm<sup>2</sup> a délce 1,4 m. Výsledný odpor sekundární smyčky je dán součtem  $R_{Fe} + R_{Cu}$

$$R_{Cu} = \frac{l}{\gamma \cdot S} = \rho \cdot \frac{l}{S} = 0,017 \cdot \frac{1,4}{28} \doteq 5 \cdot 10^{-3} \Omega$$

Určíme proud dodaný transformátorem pro zátěž tohoto typu.

$$I = \frac{U}{R} \quad (7.15)$$

$$I = \frac{U}{R} = \frac{1,63}{8,02 \cdot 10^{-4}} = 2032 \text{ A}$$

Vypočteme výkon dodaný do žiletěk.

$$P = R \cdot I^2 = 2 \cdot 10^{-6} \cdot 2032^2 = 8,25 \text{ W} \quad (7.16)$$

Kde P je elektrický výkon,  
U indukované napětí v sekundárním vinutí,  
 $\rho$  rezistivita,  
R elektrický odpor.

Při zkoušení tohoto pokusu bylo zjištěno, že k bodovému svaření je zapotřebí zhruba deset sekund působení průchodu proudu. I tak je takto stanovený výkon poněkud nízký. Je to dáno zejména zanedbáním přechodového odporu mezi žiletkami, kde je odpor největší a kde také dochází ke svaření.

### Pomůcky:

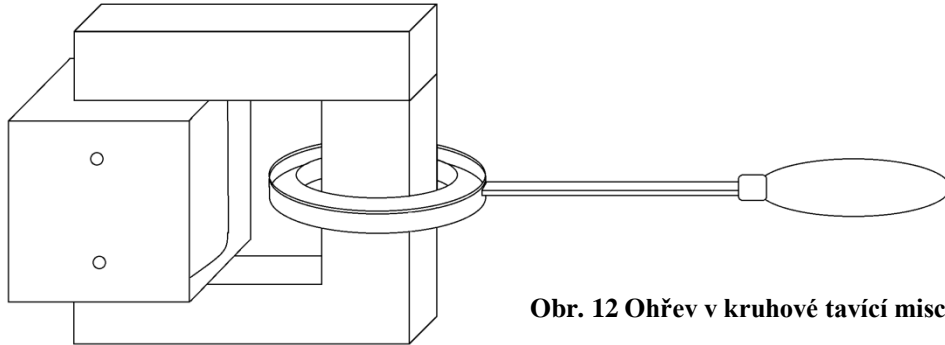
Rozkladný transformátor I a II	číslo
• Transformátorové U jádro	1
• Jádro krátké	3
• Cívka 6 závitů	4
• Cívka 60 závitů	5
• Základní deska	12
• Kostra cívky bez čela	10
• Nástavce	13
• Vrubové matice	14
• Patky	15
• Žiletky	
• Zdroj 24 V, 2 A AC	

### Postup

Sestavíme transformátor. Na transformátorové U jádro nasuneme cívku 600 závitů a na druhý sloupek nejprve kostru cívky bez čela. Poté nasuneme šestizávitovou cívku. Nakonec magnetický obvod uzavřeme krátkým jádrem a upevníme pomocí nástavců a patek na základní desku. Poté umístíme mezi elektrody na sekundární cívce dvě žiletky a stiskneme je. Nyní můžeme zapnout proud na zhruba několik sekund, poté proud opět vypneme a přesvědčíme se zda jsou žiletky svařené. Na žiletkách je jasně patrné místo vstupu a výstupu elektrického proudu.

## Indukční ohřev

Pokus ukazuje jeden ze způsobů využití transformátorů v praxi. Tímto způsobem lze zahřívát nebo tavit elektricky vodivé materiály, které se zahřívají průchodem proudu. Původně mělo při tomto pokusu docházet k roztavení cínu v kruhové tavicí misce. Z bezpečnostních důvodů lze cín nahradit vodou, která je sice tekutá již na začátku pokusu, ale její ohřev je též velice názorný.



Obr. 12 Ohřev v kruhové tavicí misce

Úloha pracuje jako transformátor jehož sekundární vinutí tvoří jeden závit na krátko. V tomto případě závit nakrátko představuje kov tavený v misce nebo při použití vody samotná tavicí miska. Průchod střídavého proudu primárním vinutím dává vzniknout proudu v sekundárním závitě. Tento proud je větší v poměru počtu primárních závitů ku jedné jak ukazuje následující příklad.

Transformační poměr podle 7.7

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

Použijeme-li cívku 600 závitů se síťovým napájením 230 V protékanou proudem 0,5 A potom proud v uzavírající se v misce bude přibližně:

$$I_2 = I_1 \cdot \frac{N_1}{N_2} = 0,5 \cdot \frac{600}{1} \doteq 300 \text{ A}$$

Nebo je vhodné použít bezpečnější uspořádání s cívku 60 závitů napájenou dvaceti čtyřmi volty a protékající proud omezit na 5 A, potom proud v misce bude rovněž 300 A.

$$I_2 = I_1 \cdot \frac{N_1}{N_2} = 5 \cdot \frac{60}{1} = 300 \text{ A}$$

Kde  $N_1$  počet závitů primární cívky,  
 $N_2$  počet závitů sekundární cívky,  
 $U_1$  primární napětí,  
 $U_2$  sekundární napětí,  
 $I_1$  primární proud,  
 $I_2$  sekundární proud.

Stanovíme odpor kruhové misky ze vztahu 7.11.

$$R = \int \frac{1}{\gamma \cdot S} dl$$

Kde  $l$  je střední délka kruhové misky  $l=220$  mm,  
 $\gamma$  konduktivita  $\gamma_{Al}=0,03 \mu\Omega\text{m}$

S průřez kruhové misky,  
R elektrický odpor.

Kruhová miska je vylisována z hliníkového plechu o tloušťce 1 mm a rozvinutá délka jejího profilu je 30 mm. Průřez kruhové misky proto činí 30 mm<sup>2</sup>.

$$R = \frac{l}{\gamma \cdot S} = \rho \cdot \frac{l}{S} = 0,03 \cdot \frac{0,22}{30} = 2,2 \cdot 10^{-4} \Omega$$

Kde  $\rho$  rezistivita hliníku  $\rho=0,03 \mu\Omega\text{m}$ .

Budeme-li uvažovat ohřívání samotné misky, tedy zanedbáme-li elektrickou vodivost tavené látky v misce, bude tato miska ohřívána výkonem téměř 20W.

$$P = R \cdot I^2 \quad (7.17)$$

$$P = R \cdot I^2 = 2,2 \cdot 10^{-4} \cdot 300^2 = 19,8 \text{ W}$$

Na základě zkušeností z pokusu bylo zjištěno, že miska se zahřeje z běžných 20°C na 100°C za zhruba 20 s. Při zanedbání ztrát v transformátoru je možné určit energii potřebnou k zahřátí misky o 80 °C podle vztahu 7.13.

$$E = P \cdot t$$

$$E = P \cdot t = 19,8 \cdot 20 = 396 \text{ J} = 0,00011 \text{ kWh}$$

Kde E je elektrická energie  
t čas  
P je elektrický výkon.

### Pomůcky:

Rozkladný transformátor I a II	číslo
• Transformátorové U jádro	1
• Jádro krátké	3
• Cívka 60 závitů	5
• Kostra cívky bez čela	10
• Tavící miska	11
• Základní deska	12
• Nástavce	13
• Vrubové matice	14
• Patky	15
• Zdroj 24 V, 2 A AC	

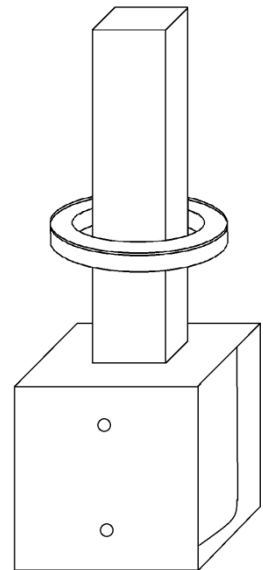
### Postup

Na sloupek transformátorového U jádra nasuneme cívku 600 nebo 60 závitů a na druhý sloupek nejprve kostru cívky bez čela a poté tavící misku. Magnetický obvod uzavřeme krátkým jádrem a připojíme přívodní vodiče. Do misky nalijeme trochu vody poté spustíme napájení. Pozorujeme, jak se miska začne zahřívát, voda vařit a vypařovat. Po odpaření vody je nutné napájení neprodleně vypnout protože miska je vyrobena z hliníku a mohlo by dojít k jejímu roztavení.

### Levitující kroužek

Pokus znázorňuje vzájemné silové působení magnetického pole cívky a hliníkového kroužku. V kroužku se, v okamžiku kdy kolem něho vznikne magnetické pole, začne indukovat napětí. Vzniklý proud vyvolá magnetické pole, které začne interagovat s polem cívky. Masivní hliníkový kroužek umožňuje při malém indukovaném napětí průchod tak velkého proudu, že se viditelně projeví jeho magnetické účinky. Proto lze také pozorovat, jak se kroužek po chvíli zahřeje.

Směr proudu indukovaného v prstenci popisuje Lenzův zákon: Indukovaný elektrický proud v uzavřeném obvodu má takový směr, že svým magnetickým polem působí proti změně magnetického indukčního toku, která tento proud vyvolala. Díky tomu se bude magnetické pole kroužku orientovat opačně než magnetické pole cívky. Tak se budou cívka a kroužek navzájem odpuzovat [6].



Obr. 13 Levitující kroužek

#### Pomůcky:

Rozkladný transformátor I a II

- Transformátorové U jádro
- Jádro dlouhé
- Cívka 300 závitů
- Hliníkový kroužek
- Zdroj 40 V AC

číslo

1

2

6

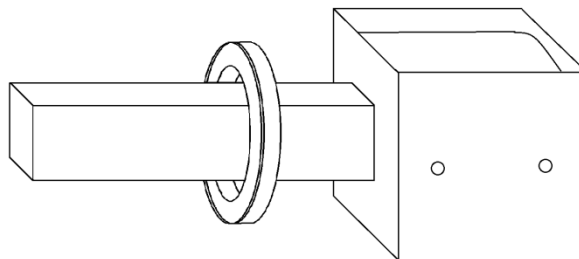
17

#### Postup

Na sloupek transformátorového U jádra nasuneme cívku 300 závitů a na tentýž sloupek postavíme dlouhé jádro jako prodloužení transformátorového sloupku. Na toto jádro navlečeme hliníkový kroužek a položíme jej na cívku. Zapneme zdroj napětí. Kroužek se vznese několik centimetrů nad cívku. Magnetické pole však nemá dostatečnou sílu aby kroužek vyneslo až nad jádro. Pokus lze též provést se střídavým napětím 230 V. V takovém případě je vzájemné silové působení mnohem větší a kroužek je odmrštěn nad jádro.

## Lenzovo pravidlo

Tento pokus ukazuje příčinu vzniku indukovaného napětí jako změnu magnetického indukčního toku. Pokus lze též zjednodušit použitím tyčového magnetu, kdy do lehkého hliníkového prstence, zavěšeného na stojanu, je prudce zasunut magnet, zjistíme, že se kroužek vychýlí ve směru pohybu magnetu. Při prudkém vytažení magnetu se vychýlí na



Obr. 14 Pokus pro ověření Lenzova pravidla

opačnou stranu tedy opět ve směru pohybu magnetu. Mechanické pohyby magnetu, v tomto pokusu, nahrazuje spínání a odepínání elektromagnetu. Jeho nabuzení představuje změnu magnetického indukčního toku v jednom směru a odbuzení změnu v opačném směru.

Příčinou tohoto děje je indukovaný elektrický proud, který při elektromagnetické indukci vzniká v každé uzavřené smyčce. Vzhledem k malému odporu hliníkového prstence, je i při malém indukovaném napětí proud natolik velký, že se výrazně projeví jeho magnetické pole. Směr tohoto proudu je takový, že jeho magnetické pole odpuzuje pole cívky, tzn. působí proti změně, která tento proud vyvolala [7].

### Pomůcky:

Rozkladný transformátor II	číslo
• Jádru dlouhé	3
• Cívka 300 závitů	6
• Základní deska	12
• Hliníkový kroužek	17
• Nosná konstrukce	18
• Závěs	19
• Řetízek s háčkem	21
• Zdroj 12 V, 2 A DC	

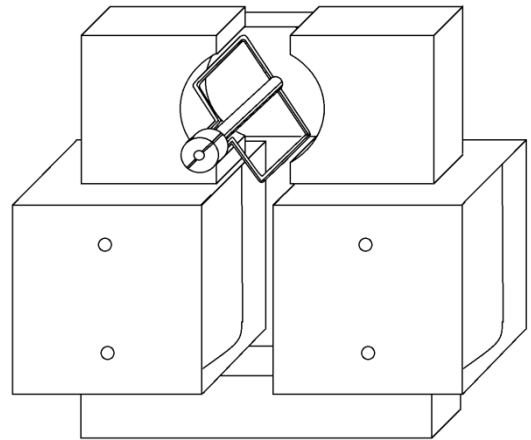
### Postup

Cívku položíme na základní desku a nasuneme do ní dlouhé jádro. Do základní desky upevníme nosnou konstrukci a zajistíme šroubem. Na nosnou konstrukci pomocí závěsu zavěsíme řetízek na jehož konci necháme volně viset hliníkový kroužek. Kroužek navlečeme na jádro a nastavíme takovou délku řetízku aby se mohl volně pohybovat. Připojíme cívku ke zdroji napětí. Při zapnutí můžeme pozorovat jak se kroužek od cívky odpudí a rozkýve se. Po jeho ustálení v rovnovážné poloze proud vypneme a kroužek se vychýlí na opačnou stranu.

## Demonstrační úlohy s využitím doplňku k rozkladným transformátorům

### Dynamo

Na tomto pokusu lze velmi jednoduchým způsobem předvést funkci stejnosměrného generátoru. Pro tento účel jsou k dispozici čtyři druhy kotev z nichž každá představuje určitou konstrukční úroveň. První kotva představuje jeden závit vyvedený na komutátor a lze s její pomocí předvést rotační pohyb vodiče v magnetickém poli a nastítnit tak platnost Faradayova indukčního zákona. Druhá z kotev je tvořena vzduchovou cívku a je na ní vidět že se jedná v podstatě o zněkolikanásobení první cívky. Ukazuje jak je indukované napětí závislé na počtu závitů. Vinutí třetí kotvy je navinuto na železném jádře, takzvaném dvojitém T, které



Obr. 15 Dynamo

usměřňuje magnetický indukční tok mezi pólovými nástavci což má opět vliv na velikost indukovaného napětí. Čtvrtá kotva se vyznačuje dvojnásobným počtem pólů a rovněž i dvojnásobným počtem lamel komutátoru. Ze všech těchto typů kotev lze sestavit generátory dvojího druhu buď s permanentním magnetem nebo s cizím buzením. Nejjednodušší variantou je použití permanentního magnetu. Tento magnet je zdrojem poměrně slabého magnetického toku, proto bude i indukované napětí nižší než při použití cizího buzení.

Elektromotorické napětí se ve smyčce indukuje tehdy, když se mění magnetický indukční tok plochou smyčky. Magnetický indukční tok si můžeme představit jako počet magnetických indukčních čar, které protnou plochu smyčky. Úhel, který svírá magnetická indukce a smyčka, určujeme mezi směrem magnetické indukce a kolmicí k ploše smyčky. Při otáčení smyčkou se bude měnit plocha smyčky vzhledem k magnetickému toku a bude se v ní indukovat napětí. Velikost elektrického napětí indukovaného ve vodivé smyčce je rovna změně magnetického indukčního toku za čas. Nejlepším způsobem jak toto napětí indikovat je s pomocí galvanometru nebo milivoltmetru.

V následujícím příkladu podle [1], je ukázáno jak lze stanovit indukované napětí v cívce s jedním závitem. Samozřejmě při zavedení zjednodušujících předpokladů jako homogenní magnetické pole nebo přesné znalosti úhlové rychlosti.

Stanovíme indukované napětí v závitě podle vztahu 7.6 Kde  $\Phi$  je magnetický tok mezi pólovými nástavci podle 7.9.

$$u_i = - \frac{d\Phi}{dt}$$

$$\Phi = \int B dS = BS$$

Kde S je plocha ohraničená závitěm cívky určená vztahem:

$$S = a \cdot b$$

Budeme-li otáčet klikou úhlovou rychlostí  $\omega$  potom bude magnetická indukce dána tímto vztahem.

$$B(t) = B \cos(\omega t)$$

Kde  $a, b$  jsou strany obdélníkového závitu,  
 $\omega$  úhlová rychlost.

$$u_i = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d(a \cdot b \cdot B \cos(\omega t))}{dt} = a \cdot b \cdot \omega \cdot B \sin(\omega t)$$

Dosadíme-li do tohoto vztahu skutečné hodnoty tedy  $a=30$  mm,  $b=60$  mm,  $f=2$  Hz. Bude při použití dvou 600závitových cívek protékaných proudem 2 A vycházet magnetická indukce mezi pólovými nástavci zhruba 0,1 T. Takto získáme maximální hodnotu napětí, kterou naměříme mezi svorkami komutátoru.

$$u_i = a \cdot b \cdot \omega \cdot B = 0,03 \cdot 0,06 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 2 \cdot 0,1 = 2,26 \cdot 10^{-3} V$$

### Pomůcky:

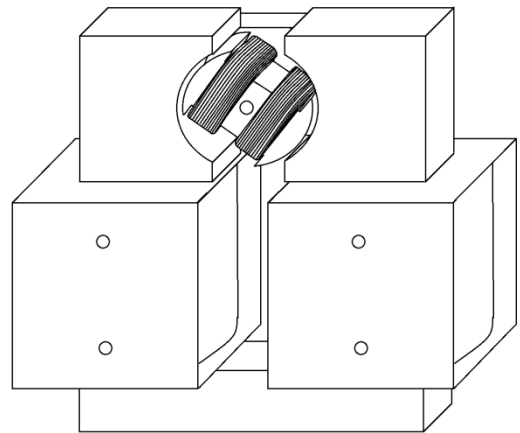
Doplňěk k rozkladným transformátorům	číslo
• Jádru U (pro variantu s cizím buzením)	1
• Permanentní magnet (pro variantu s permanentním magnetem)	2
• Držák kartáčů	3
• Kotva s jedním závitem	4
• Kotva s cívkou	5
• Kotva s dvojitým T	6
• Kotva bubnová	7
• Klička	14
• Zajišťovací matice	17
• Prodlužovací nástavec	18
Rozkladný transformátor I nebo II	
• 2 cívky (pro variantu s cizím buzením)	6-7
• DC zdroj 12 V, 2 A (pro variantu s cizím buzením)	
• Galvanometr	

### Postup

- Dynamo s permanentním magnetem  
 Na permanentní magnet nasadíme prodlužovací nástavec. Do otvoru v prodlužovacím nástavci zasuneme ložisko kotvy, nasuneme kličku a zajistíme maticí. Na tyčky prodlužovacího nástavce nasadíme držák kartáčů tak aby se kartáče dotýkaly komutátoru. Nyní můžeme mezi svorky kartáčů připojit galvanometr. Při otáčení kličkou je vidět jak se ručka galvanometru vychyluje.
- Dynamo s cizím buzením  
 Dvě cívky nasuneme na U jádro a projíme sériově. Na U jádro umístíme prodlužovací nástavec. Další postup je shodný s výše uvedeným pouze před započítím pokusu je nutné cívky připojit ke zdroji napětí.

## Motor

Na tomto pokusu lze předvést činnost stejnosměrného motoru. Pro tento pokus ale nelze použít kotvu s jedním závitem, jejíž magnetické pole je tak slabé že nedojde k jejímu roztočení. V motorickém režimu lze provozovat pouze kotvy s vinutím tedy takzvanou kotvu s cívkou, kotvu s dvojitým T a kotvu bubnovou. K roztočení těchto kotev je zapotřebí silného magnetického pole statoru, tudíž není možné použít permanentní magnet ale je nutné použít cizí buzení. Jako buzení mohou nejlépe posloužit dvě sériově zapojené 600 závitové cívky jejichž proudy se liší podle typu použité kotvy. Při příliš malém budícím proudu je magnetické pole statoru příliš slabé na to aby v součinnosti s polem rotoru otočilo kotvou a lze pozorovat pouze jakousi snahu o roztočení. Naopak při příliš velkém budícím proudu se projeví velký reluktanční moment který drží pólové nástavce rotoru mezi póly statoru a k samovolnému roztočení opět nedojde. Proto byly experimentálním způsobem stanoveny hodnoty statorových a rotorových napětí a proudů, s nimiž lze úlohu provozovat jako motor.



Obr. 16 Stejnosměrný motor

	$U_{\text{rotor}}$	$I_{\text{rotor}}$	$U_{\text{stator}}$	$I_{\text{stator}}$
Bubnová kotva	9 V	1,7 A	2 V	0,34 A
Kotva s dvojitým T	1,5 V	0,25 A	12 V	1 A
Kotva s cívkou	1,5 V	2,5 A	12 V	1,5 A

### Pomůcky:

Doplňěk k rozkladným transformátorům	číslo
• Jádru U	1
• Držák kartáčů	3
• Kotva s cívkou	5
• Kotva s dvojitým T	6
• Kotva bubnová	7
• Zajišťovací matice	17
• Prodlužovací nástavec	18
Rozkladný transformátor I nebo II	
• 2 cívky 600 závitů	7
• Dva zdroje 12 V, 2 A DC	

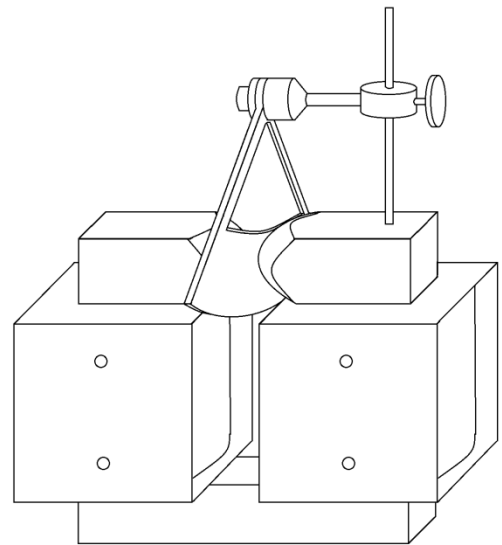
### Postup

Dvě cívky nasuneme na U jádro a projíme sériově. Na U jádro umístíme prodlužovací nástavec. Do otvoru v prodlužovacím nástavci zasuneme ložisko kotvy a zajistíme maticí. Na tyčky prodlužovacího nástavce nasadíme držák kartáčů tak aby se kartáče dotýkaly komutátoru. V této fázi připojíme jeden zdroj napětí na rotor, druhý na stator a nastavíme jmenovité hodnoty proudů a napětí podle typu zvolené kotvy.



### Waltenhofenovo kyvadlo

Pokus ukazuje brždění kyvadla vířivými proudy. Při pohybu v magnetickém poli se ve vodivé smyčce indukuje napětí. Tento jev neplatí pouze pro závity ale je možné jej pozorovat na všech vodivých materiálech v jejichž objemu se mohou uzavírat vířivé proudy. Tvar těchto proudů si lze představit jako soustředné smyčky jejichž tvar a velikost lze ovlivnit fyzickými rozměry a tvarem tělesa. Proto jsou v soupravě dva druhy kyvadel takzvaný plný segment a prořezaný segment. Obě kyvadla jsou vyrobena z hliníku, jsou nemagnetická a dobře elektricky vodivá, proto jsou veškeré magnetické účinky vyvolány pouze vířivými proudy. Při použití plného segmentu se vířivé proudy mohou uzavírat v celém objemu kyvadla a tlumení kyvů je výraznější. Oproti tomu s prořezaným segmentem je tlumení rovněž pozorovatelné ale mnohem menší. Pokus lze sestavit s pomocí permanentního magnetu. Poté jsou kyvy tlumené jen slabě a je nutné se orientovat podle počtu kyvů. Například plný segment bez magnetu vykoná zhruba 21 kyvů, v magnetickém poli s permanentním magnetem 16 kyvů a prořezaný segment 18 kyvů. Nebo je možné celý pokus zopakovat s elektromagnetem. Brzdící moment je potom patrný na první pohled. Závisí sice na budícím proudu ale oba segmenty lze zastavit již po několika kyvech. V příkladu podle [2], je naznačeno řešení brzdícího momentu takového kyvadla.



Obr. 17 Waltenhofenovo kyvadlo

Vycházíme za vztahu pro intenzitu elektrického pole.

$$\mathbf{E} = \mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (7.18)$$

$U_c$  je napětí mezi horní a spodní hranou segmentu.

$$U_c = \int_0^c \mathbf{E} \, dl = vBc \quad (7.19)$$

Kde  $c$  je vzdálenost mezi horní a spodní hranou segmentu,  
 $v$  rychlost, přičemž  $v = \omega r$ .  
 $E$  intenzita elektrického pole,  
 $\omega$  úhlová rychlost,  
 $r$  poloměr kotouče,  
 $B$  magnetická indukce.

Určíme elektrický výkon vířivých proudů.

$$P = \frac{U_c^2}{R} = \frac{v^2 B^2 c^2}{R} = \frac{\omega^2 r^2 B^2 c^2}{R} \quad (7.20)$$

Kde  $r$  je střední poloměr segmentu.

Odpor  $R$  je odpor kvádříku segmentu pod pólovými nastavci podle rovnice 7.11.

$$R = \int \frac{1}{\gamma \cdot S} dl = \frac{l}{\gamma \cdot S} = \frac{c}{\gamma \cdot b \cdot d}$$

Kde  $\gamma$  je konduktivita,  
 $b$  šířka pólového nástavce,  
 $d$  tloušťka plechu segmentu,

Mechanický příkon brzdy je:

$$P_{mech} = M\omega \quad (7.21)$$

Kde  $M$  je brzdový moment,  
 $\omega$  úhlová rychlost.

Po dosazení získáme brzdový moment kyvadla.

$$M = \frac{P_{mech}}{\omega} = \frac{\omega^2 r^2 B^2 c^2 \gamma b d}{\omega} = \gamma B^2 \omega c b d r^2$$

### Pomůcky:

Doplňek k rozkladným transformátorům	číslo
• Jádru U	1
• Permanentní magnet	2
• Segment plný	9
• Segment prořezaný	10
• Pólové nástavce	11
• Tyčka $\varnothing 5\text{mm}$	15
• Držák osy s osou	16
• Zajišťovací matice	17
Rozkladný transformátor I nebo II	
• Dvě cívky 600 závitů	7
• Zdroj 12 V, 2 A DC	

### Postup

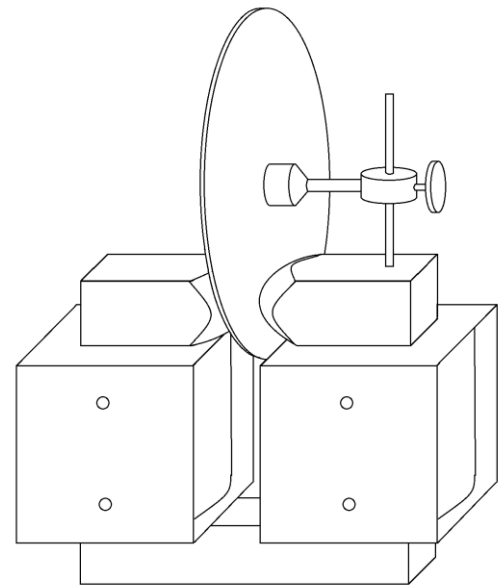
- S permanentním magnetem  
 Připravíme pólové nástavce. Do jednoho našroubujeme tyčku  $\varnothing 5\text{mm}$ , oba nástavce umístíme na konce permanentního magnetu. Na tyčku nasadíme držák osy s osou a zajistíme šroubem. Na osu nasadíme plný nebo prořezaný segment a zajistíme maticí. V této fázi můžeme přistoupit k samotnému pokusu. Nejlepší je natočit segment do nejvyšší polohy na ose a nechat jej samovolně zhoupnout aby byla vrhací síla pokud možno minimální. Při kývání sledujeme počet kyvů.
- S cizím buzením  
 Na jádru U nasuneme dvě cívky 600 závitů a propojíme je paralelně. Do pólového nástavce našroubujeme tyčku  $\varnothing 5\text{mm}$ , oba nástavce umístíme na konce U jádra. Držák osy nasadíme na tyčku a zajistíme šroubem. Na osu nasadíme plný nebo prořezaný segment a zajistíme maticí. Je vhodné nastavit pólové nástavce tak aby byla mezera mezi nimi co možná nejmenší ale aby nebránily kývání segmentu.

### Elektromagnetická brzda

Pokus ukazuje magnetické účinky vířivých proudů a jejich využití pro brzdění. Brzda se skládá se z hliníkového kotouče, který rotuje v magnetickém poli elektromagnetu. Rotací vyvolává provázek se závažím navinutý na ose kotouče, závaží je přes kladku pověšeno přes hranu stolu. Jak se provázek odvíjí roztáčí kotouč. Lze pozorovat rychlost poklesu závaží bez připojeného napětí a následně tento pokus zopakovat s přiloženým napětím. Je zřejmé, že prochází-li cívkami proud, pohyb kotouče je brzděn a pokles závaží je pomalejší.

Při rotaci kotouče se indukuje napětí mezi středem a okrajem kotouče. Vzniklý proud působí svými magnetickými účinky proti změně která ho vyvolala tedy proti směru otáčení. Toto uspořádání představuje nejstarší typ takzvaného homopolárního dynama, která vynalezl v roce 1831 Michael Faraday [8]. U homopolárního dynama je proud odebírán z kluzných kontaktů mezi hřidelí a okrajem kotouče. V případě tohoto pokusu se proud nijak neodebírá a musí se tak uzavírat v objemu kotouče.

Jak je ukázáno v následujícím příkladu podle [2], proud se uzavírá v objemu kotouče a vytváří tak brzdny moment.



Obr. 18 Elektromagnetické brzda

Intenzitu elektrického pole stanovíme podle vztahu 7.18.

$$\mathbf{E} = \mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

Stanovíme indukované mezi horní a spodní hranou pólového nástavce podle rovnice 7.19 přičemž  $\mathbf{v} = \omega \mathbf{r}$ .

$$U_c = \int_0^c \mathbf{E} d\mathbf{l} = vBc$$

Kde  $c$  je vzdálenost mezi horní a spodní hranou segmentu,  
 $v$  rychlost,  
 $E$  intenzita elektrického pole,  
 $\omega$  úhlová rychlost,  
 $B$  magnetická indukce.

Určíme elektrický výkon vířivých proudů podle vztahu 7.20.

$$P = \frac{U_c^2}{R} = \frac{v^2 B^2 c^2}{R} = \frac{\omega^2 r^2 B^2 c^2}{R}$$

Kde  $r$  střední poloměr kotouče,

Odpor  $R$  je odpor kvádříku kotouče pod pólovými nástavci podle rovnice 7.11.

$$R = \int \frac{1}{\gamma \cdot S} dl = \frac{l}{\gamma \cdot S} = \frac{c}{\gamma \cdot b \cdot d}$$

Kde  $\gamma$  je konduktivita,  
 $b$  šířka pólového nástavce,  
 $d$  tloušťka plechu kotouče,

Mechanický příkon brzdy určíme ze vztahu 7.21.

$$P_{mech} = M\omega$$

Kde  $M$  je brzdny moment,  
 $\omega$  úhlová rychlost.

Po dosazení získáme brzdny moment kotouče.

$$M = \frac{P_{mech}}{\omega} = \frac{\omega^2 r^2 B^2 c^2 \gamma b d}{\omega} = \gamma B^2 \omega c b d r^2$$

### Pomůcky:

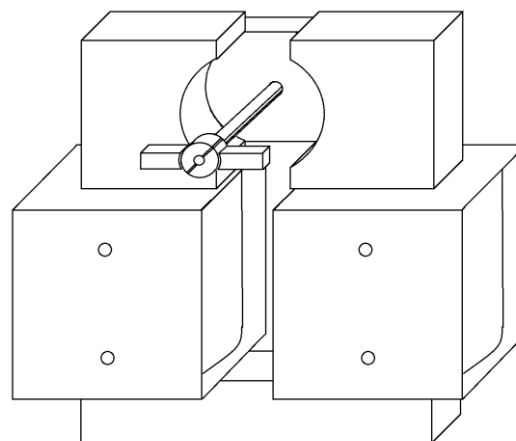
Doplňk k rozkladným transformátorům	číslo
• Jádru U	1
• Pólové nástavce	11
• Kotouč	12
• Kladka s upínacím mechanismem	13
• Tyčka $\varnothing 5\text{mm}$	15
• Držák osy s osou	16
• Zajišťovací matice	17
Rozkladný transformátor I nebo II	
• Dvě cívky 600 závitů	7
• Zdroj 12V, 2A DC	

### Postup

Na jádru U nasuneme dvě cívky 600 závitů a propojíme je paralelně. Do pólového nástavce našroubujeme tyčku  $\varnothing 5\text{mm}$ , oba nástavce umístíme na konce U jádra. Držák osy nasadíme na tyčku a zajistíme šroubem. Na osu nasadíme kotouč a zajistíme maticí, odmotáme kousek provázku, tak aby závaží mohlo viset přes hranu stolu. Kladku s upínacím mechanismem upevníme ke hraně stolu a zavěšíme na ní závaží tak aby se mohl provázek odvíjet. Pokud závaží uvolníme můžeme pozorovat jak se provázek odvíjí a roztáčí tak kotouč. Když ovšem zapneme proud cívkou je vidět jak se kotouč značně zpomalí. Nelze jej však zcela zastavit protože jak je vidět z výše uvedeného příkladu, brzdny moment je přímo úměrný rychlosti otáčení.

## Komutační přepětí

Tento pokus ukazuje funkci komutátoru. K tomuto účelu slouží samostatný komutátor, který se upevňuje do prodlužovacího nástavce stejně jako ostatní druhy kotev, není ovšem vybaven žádným vinutím a slouží tak jen pro ukázkou komutace. Speciální provedení tohoto komutátoru umožňuje předvést zapínání a vypínání proudu cívku prostřednictvím kluzných kontaktů. Na držáku kartáčů jsou umístěny celkem čtyři kartáče z nichž ty, umístěné v horní části označené bílou a žlutou barvou, slouží k trvalému napájení kroužků komutátoru a dva, proti sobě umístěné kartáče označené červeně a modře, jsou přiloženy k lamelám. Pokud jsou tyto kartáče propojeny s cívkou dochází při



Obr. 19 Umístění samostatného komutátoru

otáčení komutátorem k periodickému zapínání a vypínání proudu s otáčením polarity. Tímto způsobem jsou napájeny dvě sériově spojené cívky, pro zvětšení indukčnosti nasazené na železném jádře, které nese prodlužovací nástavec. Takto vzniklá komutační přepětí lze indikovat výchylkami ručkového voltmetru nebo lze celý děj pozorovat na osciloskopu.

### Pomůcky:

Doplněk k rozkladným transformátorům

	číslo
• Jádro U	1
• Držák kartáčů	3
• Komutátor	8
• Klička	14
• Zajišťovací matice	17
• Prodlužovací nástavec	18

Rozkladný transformátor I nebo II

• Dvě cívky 600závitů	7
• Zdroj 12 V, 2 A DC	
• Osciloskop	

### Postup

Dvě cívky nasuneme na U jádro a projíme sériově. Na U jádro umístíme prodlužovací nástavec. Do otvoru v prodlužovacím nástavci zasuneme ložisko komutátoru, nasadíme kličku kterou zajistíme maticí. Na tyčky prodlužovacího nástavce nasadíme držák kartáčů tak aby se kartáče dotýkaly komutátoru. V této fázi připojíme zdroj napětí na horní svorky (žlutou a bílou), zbývající svorky (červenou a modrou) připojíme k cívkám. Paralelně k cívkám připojíme osciloskop při otáčení kličkou lze pozorovat průběhy napětí na cívkách. Je potřeba zvolit nízké napájecí napětí, neboť komutační přepětí může být mnohonásobě větší, aby nedošlo k poškození měřícího přístroje.

## 6 Závěr

Výsledkem této práce je zrenovovaná a kompletní souprava, která tak může sloužit jako velmi názorná pomůcka při výuce elektromagnetického pole. Pro pochopení této problematiky je nutné porozumět základním fyzikálním principům, na nichž je teorie vybudována. Právě kvůli své jednoduchosti a názornosti může mít souprava i nadále svoje uplatnění ve výuce.

V rámci renovace proběhla oprava stávajících dílů a byly doplněny chybějící, aby tak vzniklo dostatečné množství demonstračních úloh. Bylo sestaveno celkem 14 demonstračních úloh s řadou modifikací tak že celkem lze předvádět více než 20 pokusů. Posléze byly všechny tyto úlohy vyzkoušeny, aby byla zaručena jejich spolehlivost. Ve většině případů jsou úlohy doplněny o jednoduché početní příklady, které mají za úkol provázat teoretický základ problematiky s prakticky předváděným úkolem. Tyto příklady jsou voleny tak aby co nejvíce odpovídaly příkladům s kterými se studenti často setkávají v průběhu všech předmětů týkajících se teorie magnetického pole. V některých případech nejsou příklady uváděny protože jsou analyticky jen obtížně řešitelné a pro danou úlohu by tudíž neměly z pedagogického hlediska praktický význam.

Zároveň vznikly manuály ke každé soupravě (viz příloha), jejichž součástí jsou soupisy dílů se situačním plánkem jejich umístění pro lepší přehlednost. Manuál dále obsahuje seznam a fotografie všech pokusů, které lze se soupravou provádět. Tyto manuály zůstanou uloženy v přepravkách, aby je bylo možné použít při práci se soupravou.

## 7 Použitá literatura

### Knihy

[1] BENEŠOVÁ, Zdeňka a MAYER, Daniel. *Základní příklady z teorie elektromagnetického pole*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2008, 167 s. ISBN 978-80-7043-737-7.

[2] MAYER, Daniel. *Aplikovaný elektromagnetismus: úvod do makroskopické teorie elektromagnetického pole pro elektrotechnické inženýry*. 2. vyd. České Budějovice: Kopp, 2012. 538 s. ISBN 978-80-7232-436-1.

[8] MAYER, Daniel. *Teorie elektromagnetického pole*. 3. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2004. 2 sv. ISBN 80-7082-826-9.

### Internetové zdroje

[3] Bleskojistka. Video pokusy. [online]. 2012 [cit. 2015-04-20]. Dostupné z: [www.fyzweb.cz/materialy/videopokusy/POKUSY/BLESKOJISTKA/POPIS.HTM](http://www.fyzweb.cz/materialy/videopokusy/POKUSY/BLESKOJISTKA/POPIS.HTM)

[4] Skala, Bohumil. Materiály k přednáškám z předmětu KEV/TES1. [online]. 2007 [cit. 2015-05-14]. Dostupné z: <https://courseware.zcu.cz/wps/myportal/predmety/kev/tes1>. Fakulta elektrotechnická ZČU v Plzni.

[5] Odporové bodové svařování. Schinkmsnn. [online]. 2015 [cit. 2015-04-26]. Dostupné z: <http://www.schinkmann.cz/odporove-bodove-svarovani>

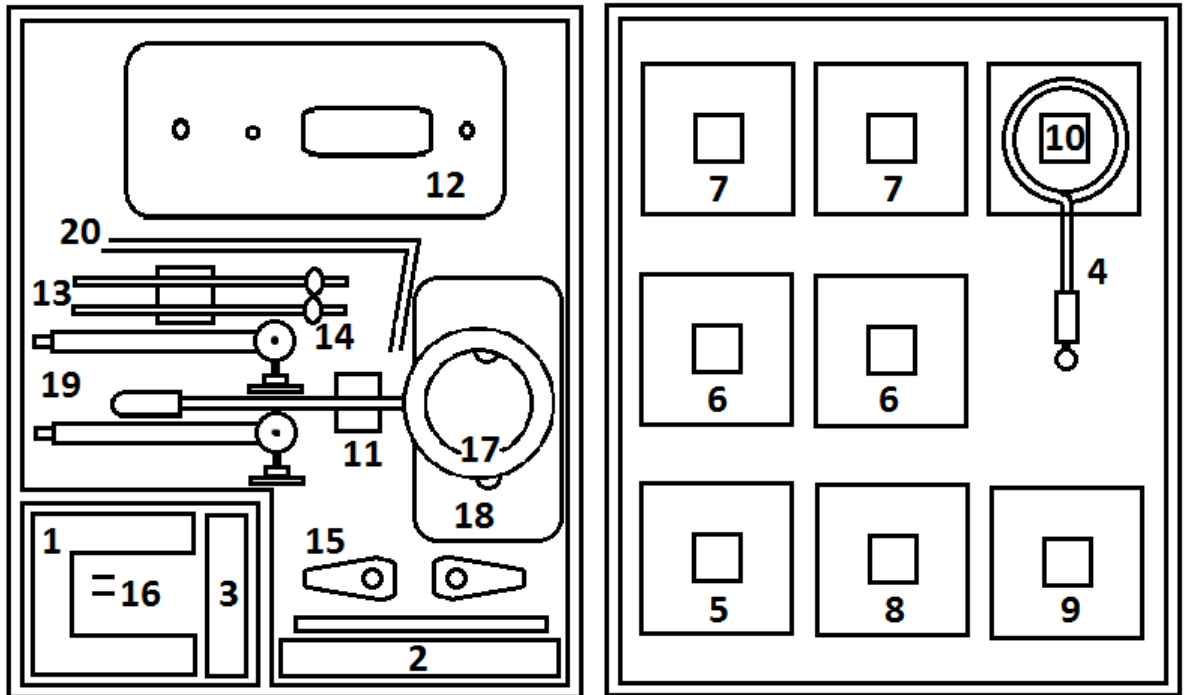
[6] Elektromagnetická levitace. Fyzikální experimenty. [online]. 2012 [cit. 2015-04-14]. Dostupné z: <http://www.fyzikalni-experimenty.cz/cz/elektromagnetismus/elektromagneticka-levitace/>

[7] Indukovaný proud. Encyklopedie fyziky. [online]. 2006 [cit. 2015-04-27]. Dostupné z: [www.fyzika.jreichl.com/main.article/view/306-indukovany-proud](http://www.fyzika.jreichl.com/main.article/view/306-indukovany-proud)

## 8 Přílohy

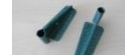
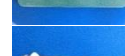
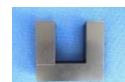
### Manuál k rozkladnému transformátoru I

Uložení součástek v přepravkách

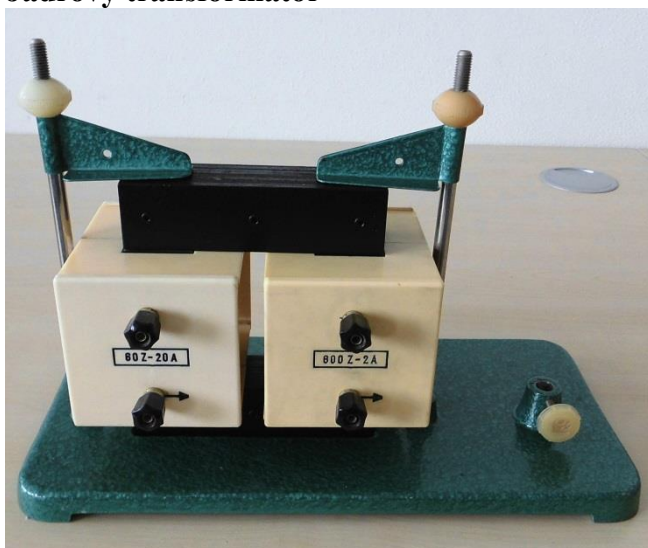


**Seznam součástek**

Číslo	Součástka
1	Transformátorové jádro U
2	Jádro dlouhé
3	Jádro krátké
4	Cívka 6 závitů
5	Cívka 60 závitů
6	Cívka 300 závitů
7	Cívka 600 závitů
8	Cívka 1200 závitů
9	Cívka 12000 závitů
10	Kostra cívky bez čela
11	Tavící miska
12	Základní deska
13	Nástavec s vroubkovanou maticí
15	Patka
16	Spojovací kolík
17	Hliníkový kroužek
18	Základní deska Holtzovy svorky
19	Holtzovy svorky
20	Drát růžkové bleskojistky

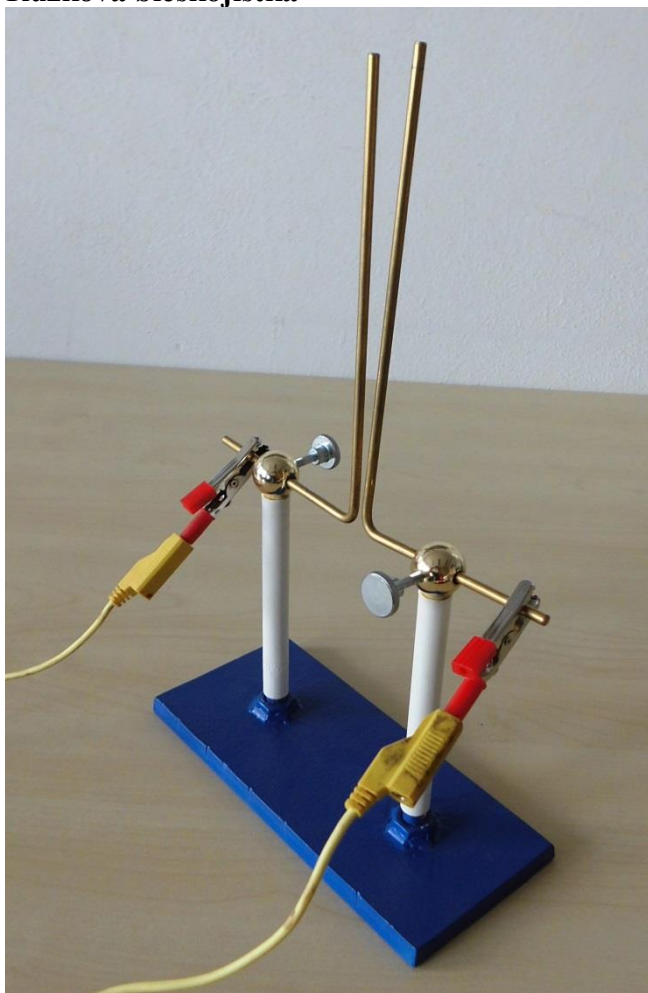




**Seznam úloh I****Jádrový transformátor****Pomůcky:**

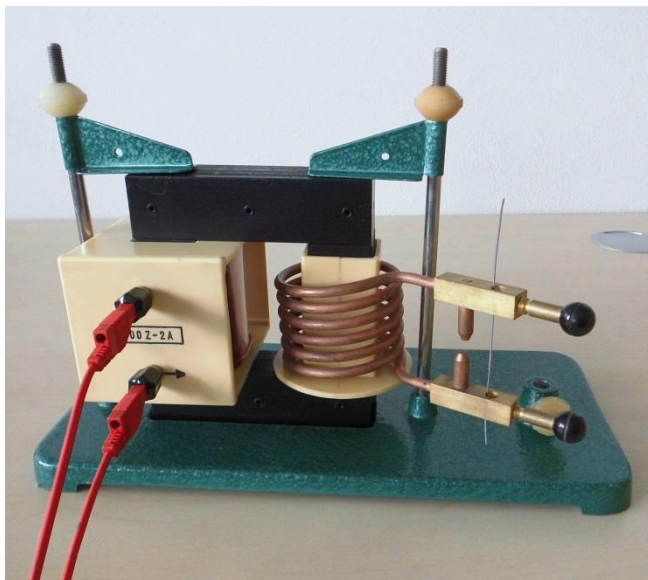
Rozkladný transformátor I

- Transformátorové jádro U 1
- Jádro krátké 3
- 2 cívky 4-9
- Základní deska 12
- Nástavce 13
- Vrubová matice 14
- Patky 15
- Měřicí přístroj
- Zdroj 12V, 2A DC

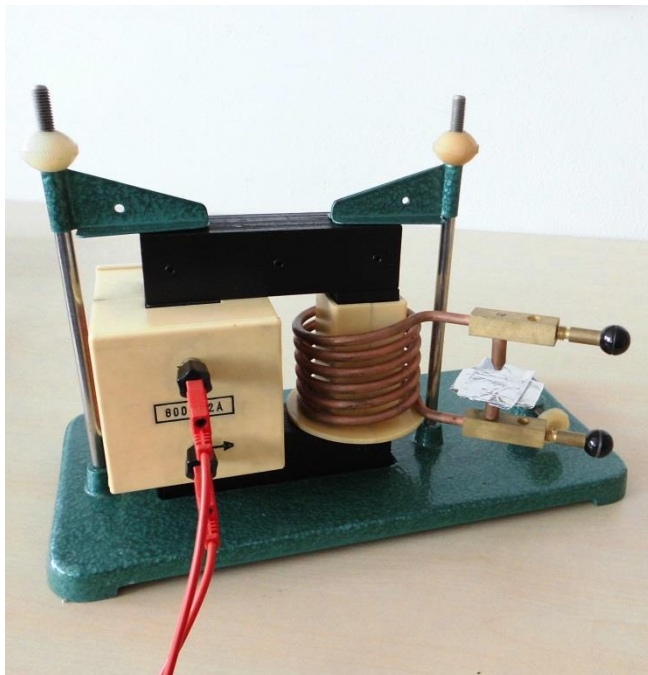
**Růžková bleskojistka****Pomůcky:**

Rozkladný transformátor I

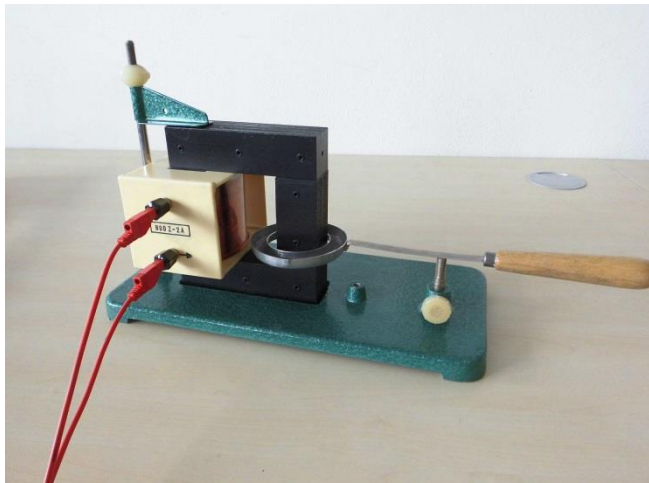
- Zvyšovací transformátor
- Transformátorové jádro U 1
- Jádro krátké 3
- 2 cívky 4-9
- Základní deska 12
- Nástavce 13
- Vrubová matice 14
- Patky 15
- Růžková bleskojistka
- Základní deska Holtzových svorek 18
- Holtzovy svorky 19
- Dráty růžkové bleskojistky 20
- Zdroj 24V, 2A AC
- Zápalky
- Svíčka

**Žhavení****Pomůcky:****Rozkladný transformátor I**

- Transformátorové U jádro 1
- Jádro krátké 3
- Cívka 6 závitů 4
- Cívka 60 závitů 5
- Základní deska 12
- Kostra cívky bez čela 10
- Nástavce 13
- Vrubové matice 14
- Patky 15
- Ocelový drát
- Zdroj 24V, 2A AC

**Svařování****Pomůcky:****Rozkladný transformátor I**

- Transformátorové U jádro 1
- Jádro krátké 3
- Cívka 6 závitů 4
- Cívka 60 závitů 5
- Základní deska 12
- Kostra cívky bez čela 10
- Nástavce 13
- Vrubové matice 14
- Patky 15
- Žiletka
- Zdroj 24V, 2A AC

**Indukční ohřev****Pomůcky:**

Rozkladný transformátor I

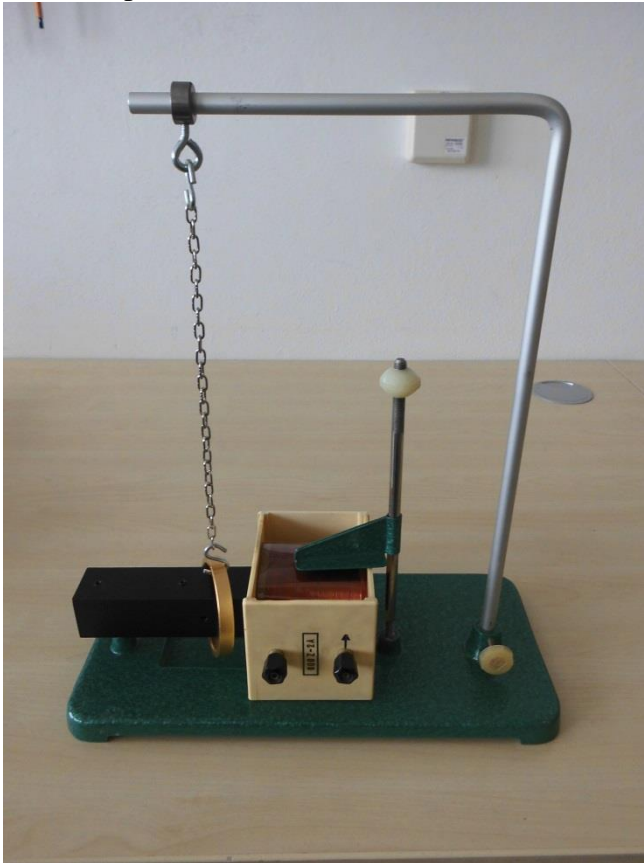
- Transformátorové U jádro 1
- Jádro krátké 3
- Cívka 60 závitů 5
- Kostra cívky bez čela 10
- Tavicí miska 11
- Základní deska 12
- Nastavce 13
- Vrubové matice 14
- Patky 15
- Zdroj 24V, 2A AC

**Levitující kroužek****Pomůcky:**

Rozkladný transformátor I

- Transformátorové U jádro 1
- Jádro dlouhé 2
- Cívka 300 závitů 6
- Hliníkový kroužek 17
- Zdroj 40V AC

## Lenzovo pravidlo

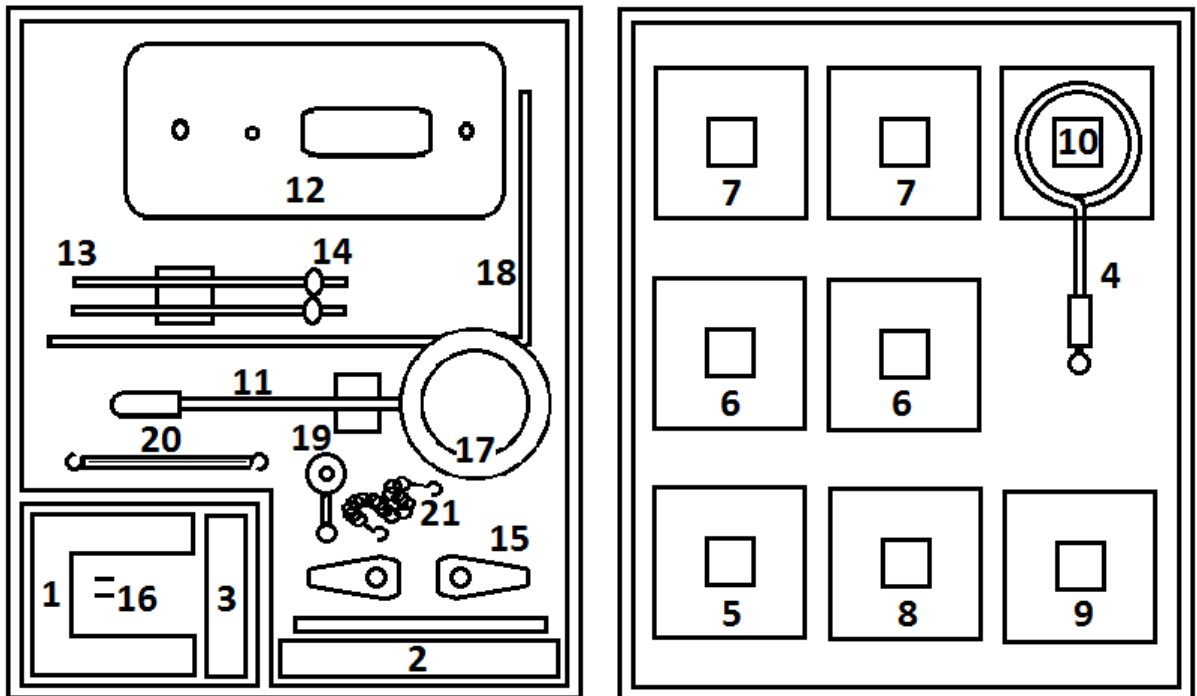
**Pomůcky:**

## Rozkladný transformátor I

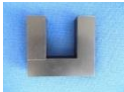




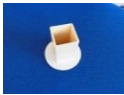







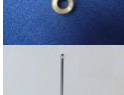


- Jádru dlouhé 3
- Cívka 300 závitů 6
- Základní deska 12
- Hliníkový kroužek 17
- Nosná konstrukce 18
- Závěs 19
- Řetízek s háčkem 21
- Zdroj 12V, 2A DC

## Manuál k rozkladnému transformátoru II

### Uložení součástek v přepravech

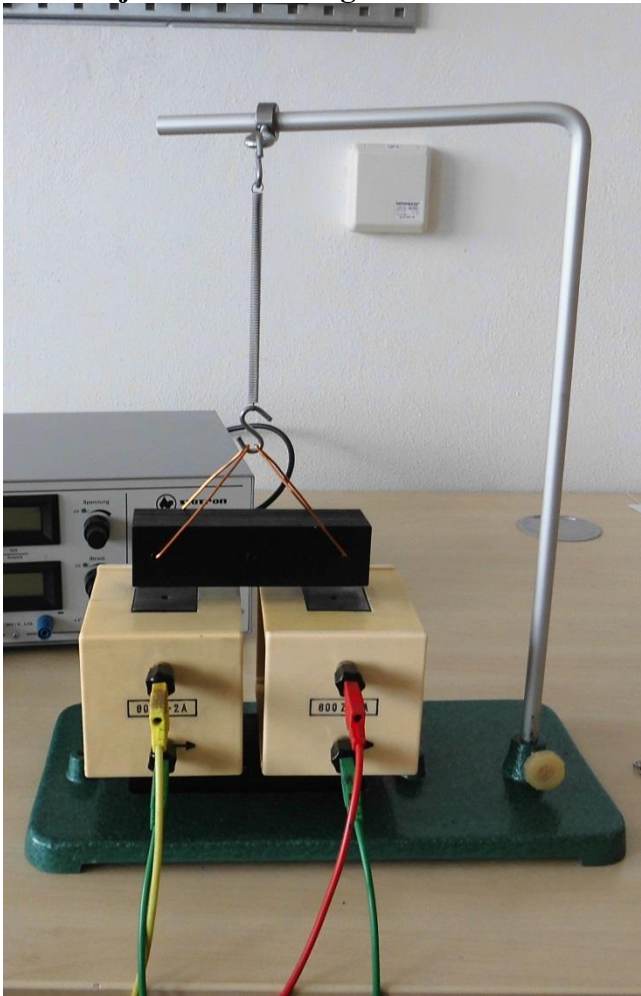


**Seznam součástek**

Číslo	Součástka	
1	Transformátorové jádro U	
2	Jádro dlouhé	
3	Jádro krátké	
4	Cívka 6 závitů	
5	Cívka 60 závitů	
6	Cívka 300 závitů	
7	Cívka 600 závitů	
8	Cívka 1200 závitů	
9	Cívka 12000 závitů	
10	Kostra cívky bez čela	
11	Tavící miska	
12	Základní deska	
13	Nástavec s vroubkovanou maticí	
15	Patka	
16	Spojovací kolík	
17	Hliníkový kroužek	
18	Nosná konstrukce	
19	Závěs	
20	Pružina	
21	Řetízek s háčky	

## Seznam úloh II

### Kotva a jádro elektromagnetu

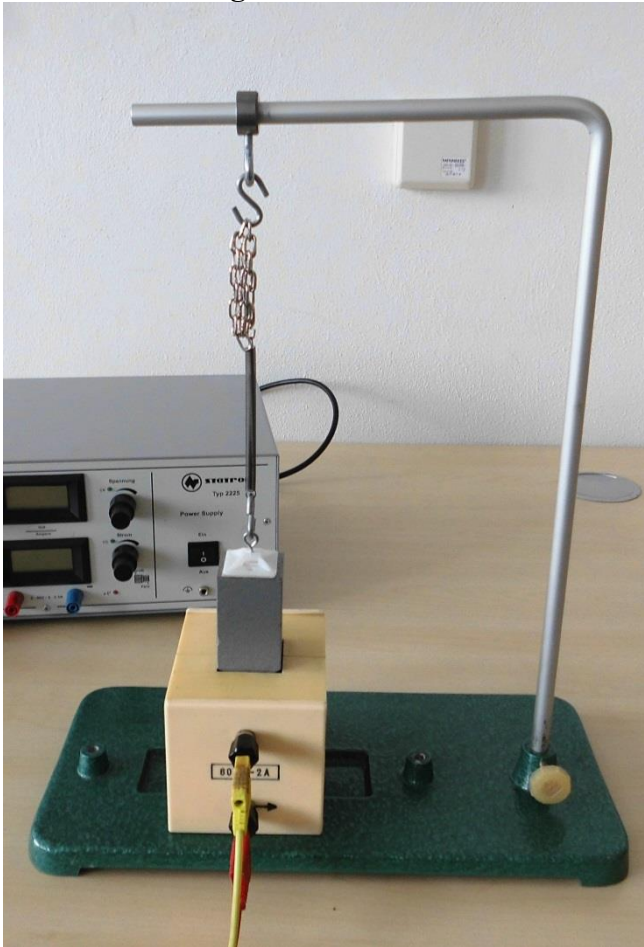


#### Pomůcky:

##### Rozkladný transformátor II

- Transformátorové jádro U 1
- Jádro krátké 3
- dvě cívky 300 nebo 600 závitů 6-7
- Základní deska 12
- Nosná konstrukce 18
- Závěs 19
- Pružina 20
- Řetízek s háčky 21
- Zdroj 12V, 2A DC

### Jádro elektromagnetu



#### Pomůcky:

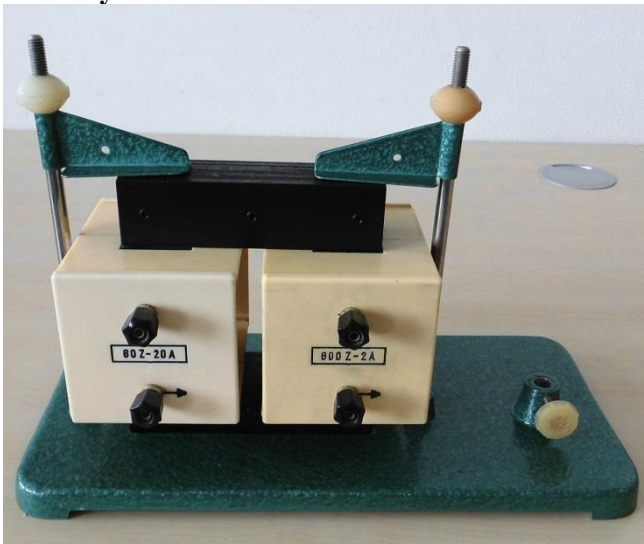
##### Rozkladný transformátor II

- Cívka 600 závitů 7
- Základní deska 12
- Nosná konstrukce 18
- Závěs 19
- Pružina 20
- Řetízek s háčky 21

##### Doplňěk k rozkladnému transformátoru

- Pólový nástavec 11
- Zdroj 12V, 2A DC

### Jádrový transformátor



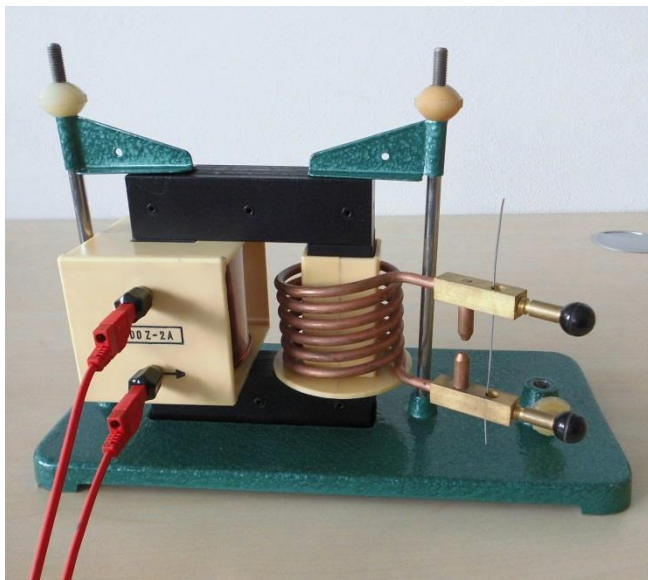
#### Pomůcky:

##### Rozkladný transformátor II

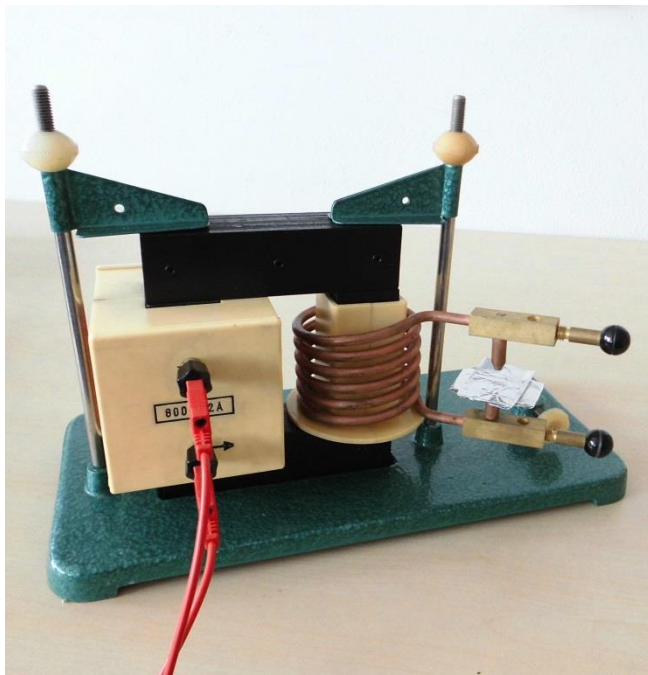
- Transformátorové jádro U 1
- Jádro krátké 3
- 2 cívky 4-9
- Základní deska 12
- Nástavec 13
- Vrubová matice 14
- Patky 15

- Měřicí přístroj
- Zdroj 12V, 2A DC

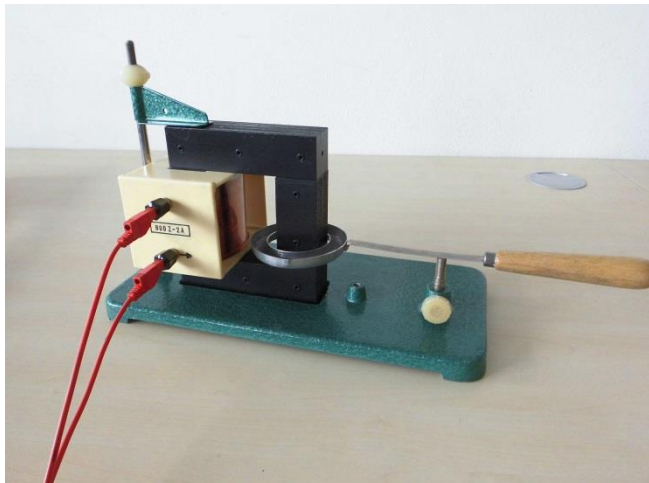


**Žhavení****Pomůcky:****Rozkladný transformátor II**

- Transformátorové U jádro 1
  - Jádro krátké 3
  - Cívka 6 závitů 4
  - Cívka 60 závitů 5
  - Základní deska 12
  - Kostra cívky bez čela 10
  - Nástavce 13
  - Vrubové matice 14
  - Patky 15
- 
- Ocelový drát
  - Zdroj 24V, 2A AC

**Svařování****Pomůcky:****Rozkladný transformátor II**

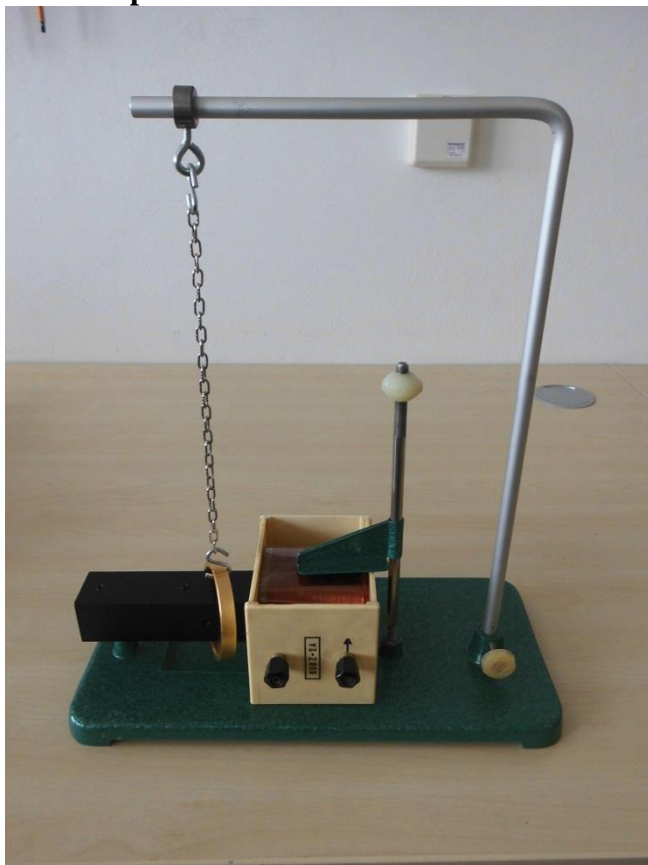
- Transformátorové U jádro 1
  - Jádro krátké 3
  - Cívka 6 závitů 4
  - Cívka 60 závitů 5
  - Základní deska 12
  - Kostra cívky bez čela 10
  - Nástavce 13
  - Vrubové matice 14
  - Patky 15
- 
- Žiletky
  - Zdroj 24V, 2A AC

**Indukční ohřev****Pomůcky:****Rozkladný transformátor II**

- Transformátorové U jádro 1
  - Jádro krátké 3
  - Cívka 60 závitů 5
  - Kostra cívky bez čela 10
  - Tavicí miska 11
  - Základní deska 12
  - Nástavce 13
  - Vrubové matice 14
  - Patky 15
- Zdroj 24V, 2A AC

**Levitující kroužek****Pomůcky:****Rozkladný transformátor II**

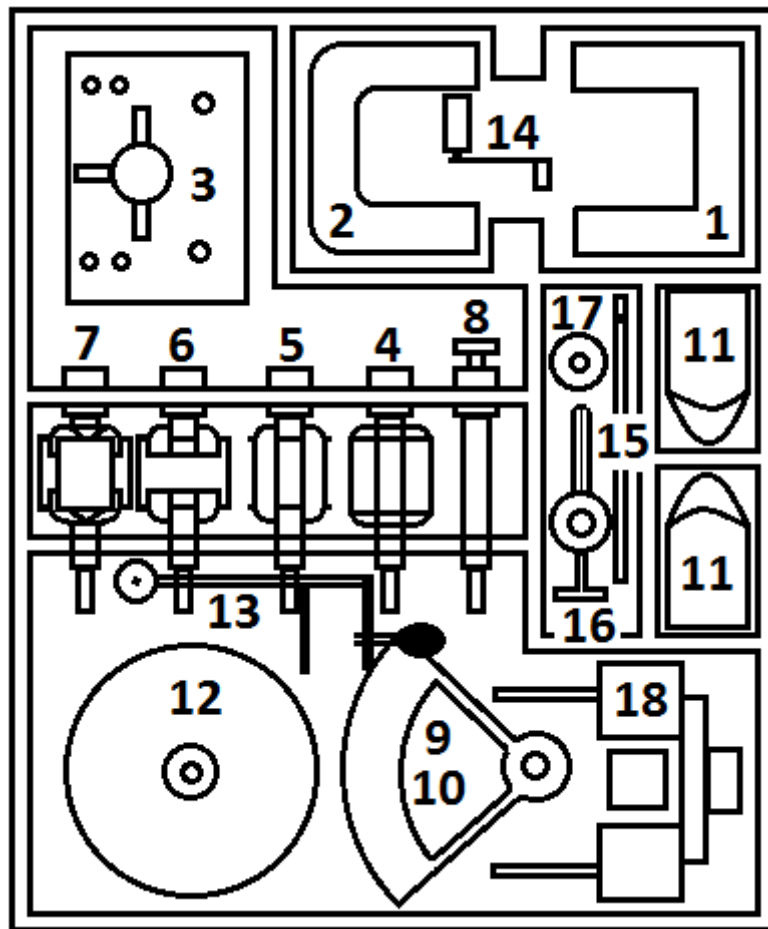
- Transformátorové U jádro 1
  - Jádro dlouhé 2
  - Cívka 300 závitů 6
  - Hliníkový kroužek 17
- Zdroj 40V AC

**Lenzovo pravidlo****Pomůcky:****Rozkladný transformátor II**

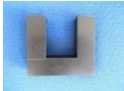

















- Jádru dlouhé 3
  - Cívka 300 závitů 6
  - Základní deska 12
  - Hliníkový kroužek 17
  - Nosná konstrukce 18
  - Závěs 19
  - Řetízek s háčkem 21
- 
- Zdroj 12V, 2A DC

## Manuál doplňku rozkladného transformátoru

### Uložení součástek v přepravce

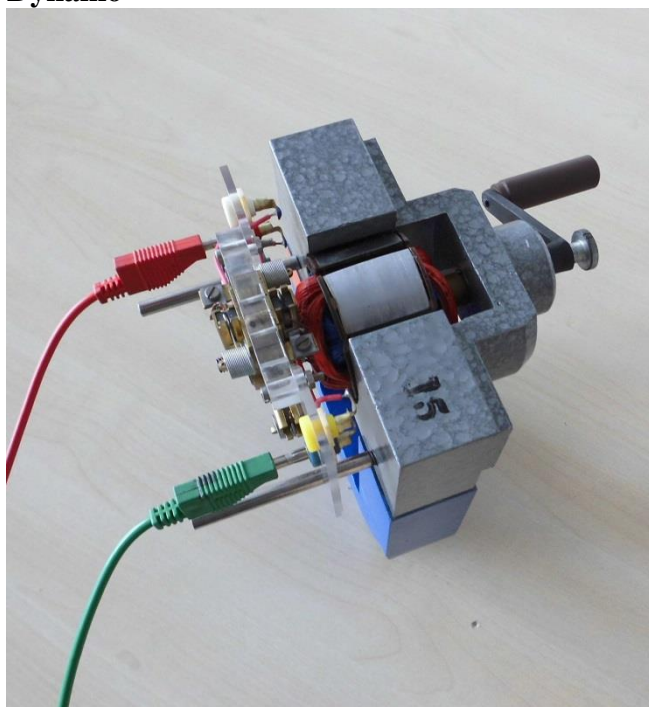


**Seznam součástí**

Číslo	Součást	
1	Jádro U	
2	Permanentní magnet U	
3	Držák kartáčů	
4	Kotva s jedním závitem	
5	Kotva s cívkou	
6	Kotva s dvojitým T	
7	Kotva bubnová	
8	Komutátor	
9	Segment plný	
10	Segment prořezaný	
11	Pólový nástavec	
12	Elektrická brzda	
13	Kladka s upínacím mechanismem	
14	Klička	
15	Tyčka Ø5mm	
16	Držák osy s osou	
17	Zajišťovací matice	
18	Prodlužovací nástavec	

## Seznam úloh

### Dynamo



#### Pomůcky:

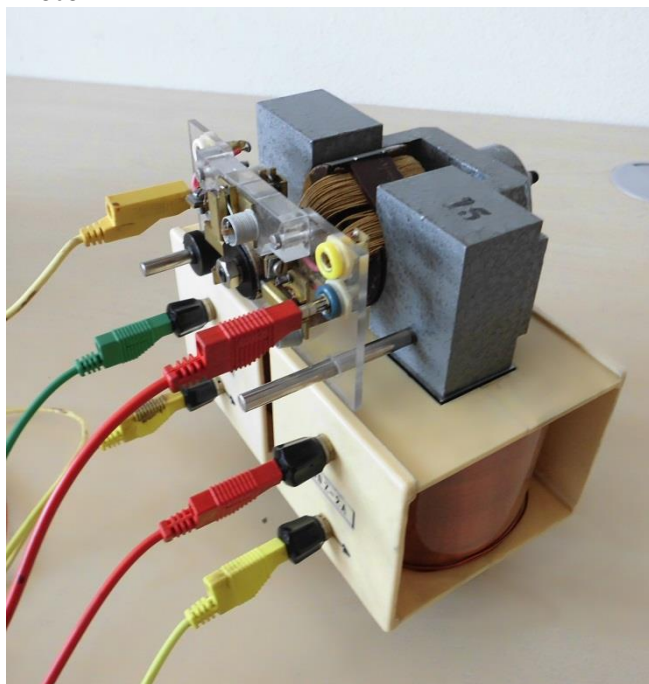
Doplněk k rozkladným transformátorům

- Jádro U 1
- Permanentní magnet 2
- Držák kartáčů 3
- Kotva s jedním závitem 4
- Kotva s cívkou 5
- Kotva s dvojitým T 6
- Kotva bubnová 7
- Klička 14
- Zajišťovací matice 17
- Prodlužovací nástavec 18

Rozkladný transformátor I nebo II

- 2 cívky 6-7
- DC zdroj 12V, 2A
- Galvanometr

### Motor



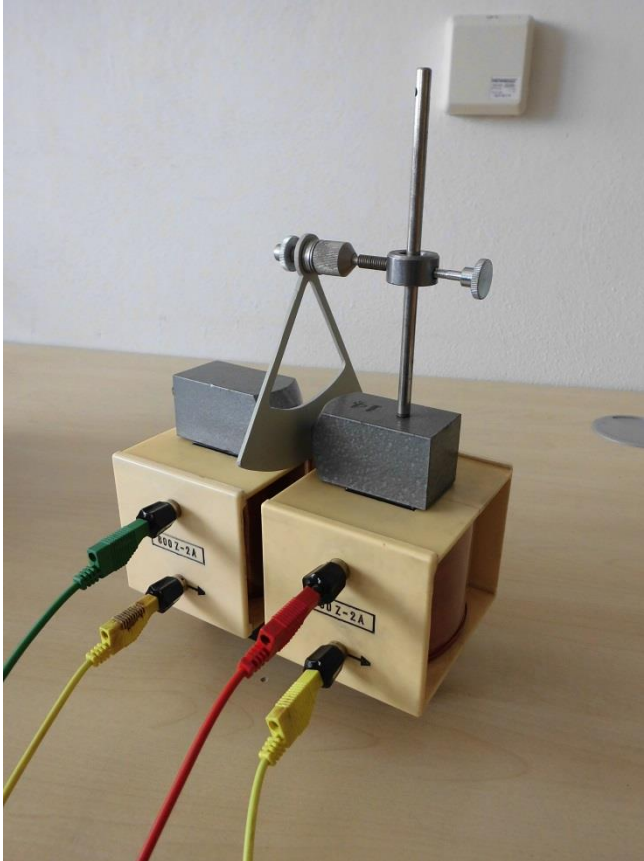
#### Pomůcky:

Doplněk k rozkladným transformátorům

- Jádro U 1
- Držák kartáčů 3
- Kotva s cívkou 5
- Kotva s dvojitým T 6
- Kotva bubnová 7
- Zajišťovací matice 17
- Prodlužovací nástavec 18

Rozkladný transformátor I nebo II

- 2 cívky 600 závitů 7
- Dva zdroje 12V, 2A DC

**Brzdění kyvadla****Pomůcky:**

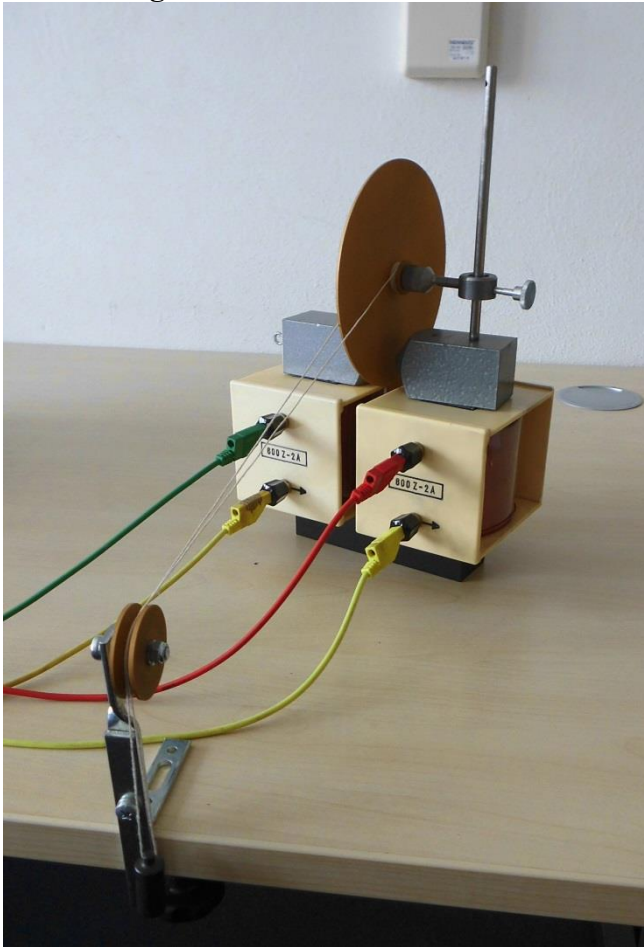
Doplněk k rozkladným transformátorům

- Jádru U 1
- Permanentní magnet 2
- Segment plný 9
- Segment prořezaný 10
- Pólové nástavce 11
- Tyčka Ø5mm 15
- Držák osy s osou 16
- Zajišťovací matice 17

Rozkladný transformátor I nebo II

- Dvě cívky 600 závitů 7
- Zdroj 12V, 2A DC

## Elektromagnetická brzda



### Pomůcky:

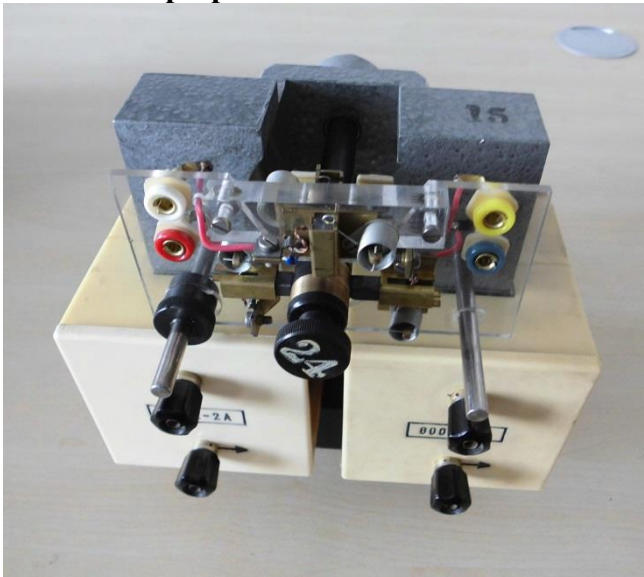
Doplněk k rozkladným transformátorům

- Jádru U 1
- Pólové nástavce 11
- Kotouč 12
- Kladka s upínacím mechanismem 13
- Tyčka  $\varnothing 5\text{mm}$  15
- Držák osy s osou 16
- Zajišťovací matice 17

Rozkladný transformátor I nebo II

- Dvě cívky 600 závitů 7
- Zdroj 12V, 2A DC

## Komutační přepětí



### Pomůcky:

Doplněk k rozkladným transformátorům

- Jádru U 1
- Držák kartáčů 3
- Komutátor 8
- Klička 14
- Zajišťovací matice 17
- Prodlužovací nástavec 18

Rozkladný transformátor I nebo II

- Dvě cívky 600závitů 7
- Zdroj 12V, 2A DC