

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA PEDAGOGICKÁ**  
**KATEDRA MATEMATIKY, FYZIKY A TECHNICKÉ VÝCHOVY**

**TESLŮV TRANSFORMÁTOR VE ŠKOLSKÉ FYZICE**  
**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Daniel Eret**

*Přírodovědná studia, obor Fyzika se zaměřením na vzdělávání*

Vedoucí práce: PhDr. Pavel Kratochvíl, Ph.D.

**Plzeň 2022**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně  
s použitím uvedené literatury a zdrojů informací.

V Plzni, 20. května 2022

.....  
vlastnoruční podpis

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto bych chtěl poděkovat PhDr. Pavlu Kratochvílovi, Ph.D. za vedení bakalářské práce, zprostředkování fyzikálních měření a taktéž za odborné rady. Poděkování patří též PhDr. Zdeňce Kielbusové, která pro tuto práci zapůjčila svůj Teslův transformátor s hudební modulací, jehož bylo využito pro referenci.

## OBSAH

SEZNAM ZKRATEK .....	3
ÚVOD .....	5
1 HISTORICKÉ POZADÍ.....	6
1.1 NIKOLA TESLA .....	6
1.2 PŮVODNÍ PODOBA TESLOVA TRANSFORMÁTORU .....	8
2 TYPY ZAPOJENÍ TESLOVA TRANSFORMÁTORU .....	11
2.1 JISKŘIŠTĚ .....	11
2.1.1 Mechanické jiskřiště .....	11
2.1.2 Moderní náhrady .....	12
2.2 ZDROJOVÉ NAPĚTÍ.....	13
2.2.1 Střídavé napětí.....	13
2.2.2 Stejnoseměrné napětí .....	13
2.3 CÍVKY.....	14
3 KONSTRUKCE TESLOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ .....	15
3.1 PRINCIP ZAPOJENÍ .....	15
3.1.1 SSTC bez kondenzátoru .....	15
3.1.2 SSTC s kondenzátorem .....	17
3.2 SOUČÁSTKY A PRAKTICKÉ ZHOTOVENÍ .....	18
3.3 VYPOČÍTNÉ PARAMETRY .....	19
3.4 NAMĚŘENÉ PARAMETRY .....	23
3.5 ZHODNOCENÍ VLASTNÍCH KONSTRUKCÍ.....	25
4 BEZPEČNOST .....	26
4.1 BEZPEČNOST PŘI PRÁCI S ELEKTRICKÝM PROUDEM .....	26
4.2 BEZPEČNOST PŘI PRÁCI S TESLOVÝM TRANSFORMÁTOREM .....	27
4.3 BEZPEČNOST PŘI ŠKOLNÍCH POKUSECH.....	27
5 NAVRHOVANÉ POKUSY S TESLOVÝM TRANSFORMÁTOREM .....	29
5.1 ROZSVĚCENÍ ZÁŘIVKY .....	29
5.1.1 Princip pokusu .....	29
5.1.2 Průběh pokusu.....	30
5.1.3 Návrh didaktického využití .....	31
5.2 FARADAYOVA KLEC.....	32
5.2.1 Princip pokusu .....	32
5.2.2 Průběh pokusu.....	32
5.2.3 Návrh didaktického využití .....	33
5.3 ELEKTROMAGNETICKÁ INDUKCE PRIMÁRNÍ CÍVKY .....	34
5.3.1 Princip pokusu .....	34
5.3.2 Průběh pokusu.....	36
5.3.3 Návrh didaktického využití .....	37
5.4 HUDEBNÍ MODULACE TESLOVA TRANSFORMÁTORU .....	38
5.4.1 Princip pokusu .....	38
5.4.2 Průběh pokusu.....	39
5.4.3 Návrh didaktického využití .....	39
5.5 PŘENOS ENERGIE MEZI DVĚMA TESLOVÝMI TRANSFORMÁTORY .....	40
5.5.1 Princip pokusu .....	40
5.5.2 Průběh pokusu.....	40
5.5.3 Návrh didaktického využití .....	41

---

5.6 SESTAVENÍ OBVODU SSTC VE SKUPINĚ .....	42
5.7 SESTAVENÍ SGTC.....	42
6 ZHODNOCENÍ NAVRHOVANÝCH POKUSŮ .....	43
ZÁVĚR.....	45
RESUMÉ.....	47
SEZNAM LITERATURY .....	48
SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK A GRAFŮ .....	51
PŘÍLOHY .....	I

**SEZNAM ZKRATEK**

AC – zdroj střídavého napětí

C1 – kondenzátor

J1, J2 – jiskřiště

T1 – transformátor

$\omega$  – úhlová rezonanční frekvence v  $s^{-1}$

$L$  – indukčnost v H

$C$  – kapacita v F

VTTC – Teslův transformátor s elektronkovým budičem (Vacuum Tube Tesla Coil)

SSTC – Teslův transformátor s polovodičovým buzením (Solid State Tesla Coil)

TC1 – Teslův transformátor typu SSTC bez kondenzátoru, sestavený autorem

TC2 – Teslův transformátor typu SSTC s kondenzátorem, sestavený autorem

S1 – spínač

R1 – rezistor

Q1 – tranzistor

L1 – primární cívka

L2 – sekundární cívka

D1 – svítivá dioda

B1, B2 – zdroj stejnosměrného napětí

$d$  – průměr cívky v m

$l$  – délka cívky v m

$N$  – počet závitů

$r_0$  – průměr vodiče v m

$H$  – parametr pro výpočet kapacity cívky v  $F \cdot m^{-1}$

$\mu_0$  – permeabilita vakua v  $H \cdot m^{-1}$

$S$  – plocha v  $m^2$

$f$  – frekvence v Hz

$U_1, U_2$  – napětí ve V

$M$  – vzájemná indukčnost cívek v H

$\Phi$  – elektromagnetická indukce ve V·s

$B$  – magnetická indukce v T

$\alpha$  – úhel svíraný vektorem magnetické indukce a normálou plochy ohraničené cívkou v rad

SGTC – Teslův transformátor s mechanickým jiskřištěm (Spark Gap Tesla Coil)

## Úvod

Je mnoho pomůcek, které by se daly považovat za povinnou výbavu kabinetu fyziky, díky kterým je možno názorně předvádět jinak těžko pochopitelné jevy. Každý učitel fyziky může mít jinou představu o tom, kterou z nich umístí do svého repertoáru, nicméně pro názorné předvedení účinků elektromagnetického pole a vysokých frekvencí střídavého elektrického proudu, může většina zvolit Teslův transformátor.

Tato práce se zabývá využitím Teslova transformátoru ve školní fyzice. Jejím prvním cílem je popsat Teslův transformátor a učinit rozbor různých možností jeho konstrukce. Proto se v úvodní části nejprve zaměřuje na život Nikoly Tesly, některé jeho technické úspěchy a následně i původní zapojení jeho vysokofrekvenčního transformátoru. V další kapitole jsou rozebrány jiné typy zapojení, které nějakým způsobem upravují klasické schéma Teslova transformátoru.

Dalším cílem je zkonstruování jednoduchého Teslova transformátoru, měření jeho parametrů a zhodnocení vhodnosti využití ve výuce. Tomu je věnována třetí kapitola obsahující rozbor vlastních Teslových transformátorů sestavených autorem této bakalářské práce. Od samotného zapojení a principu fungování, až po technické a fyzikální parametry. Dále je taktéž zhodnocena funkčnost a vhodnost daných transformátorů pro školní pokusy.

Třetí zásadou pro vypracování této práce je návrh několika experimentů s Teslovým transformátorem. K tomu slouží pátá kapitola, jež je pro většinu popisovaných pokusů rozčleněna na oddíl teoretický, kde je vysvětlen fyzikální princip za prezentovaným jevem, a praktický, ve kterém je popsán navrhovaný průběh experimentu a jeho prezentace žákům. Závěr pro každý pokus tvoří návrh didaktického využití sledovaného jevu pro žáky základních škol.

Posledním cílem této práce je zhodnocení možností využití experimentů ve školské fyzice. Tomu je věnována poslední, šestá kapitola. Zhodnocení je zde provedeno zejména ze stránky praktičnosti, dostupnosti a také vhodnosti z hlediska didaktického zařazení.

Zvlášť je pak zařazena čtvrtá kapitola, jejíž obsah je dedikován bezpečnosti práce a zásadám, které by se měly dodržovat při provádění experimentů s Teslovým transformátorem.



## 1 HISTORICKÉ POZADÍ

### 1.1 NIKOLA TESLA<sup>1</sup>

Nikola Tesla, jehož vynálezem se budeme v této práci podrobněji zabývat, se narodil dne 10. července 1856 v Srbském Smiljani u Gospiče do rodiny pravoslavného kněze, Mikulina Tesly.

Ačkoli měl Nikola vlohy pro technické obory, jeho otec nesouhlasil s tím, že by jeho syn, po vykonání maturity v Karlovcích roku 1873, nastoupil na technicky zaměřenou vysokou školu. Nakonec však Mikulin ustoupil, a tak zahájil roku 1875 Nikola Tesla studium na vysoké škole ve Štýrském Hradci. Zde se mu dostalo uznání od vyučujících, kteří jej považovali za sečtělého a vytrvalého studenta, jež dokončí vše, co započne. Zde se také Tesla poprvé setkává s Grammovým dynamem, které generuje stejnosměrný elektrický proud, nicméně na kartáčích tohoto stroje se tvoří jiskry, čímž se snižuje účinnost při převádění mechanické energie na elektrickou. V tuto dobu začíná mladý Tesla uvažovat o zdokonalení přístroje za využití střídavého proudu.

Ačkoli byl Tesla dobrým studentem, v roce 1878 mu finanční problémy znemožnily pokračovat ve studiu. To tedy přerušil a na několik let se stal pomocným inženýrem v Mariboru, aby získal finanční prostředky pro pokračování ve studiu. To následně obnovil a studoval i na univerzitě v Praze, než, opět kvůli potížím s penězi, přijal místo v Budapeštské telefonní společnosti. Zde se mu dostalo kariérního postupu, zejména díky menším vynálezům, které zlepšovaly stávající přístroje firmou používané.

Roku 1882 se Teslovi podařilo vylepšit Grammovo dynamo, které úspěšně předělal na dynamo generující střídavý elektrický proud, čímž zvýšil i jeho efektivitu. Tento rok také přestoupil do Edisonova závodu v Paříži. Jeho nadřízení mu mimo jiné dali za úkol pomoci s opravou Štrasburské elektrické centrály, za což mu slíbili finanční odměnu. Tu však Tesla nikdy nedostal, a tak po dokončení této práce nastoupil na cestu do Spojených států amerických. Zde, na základě doporučujícího dopisu, začal roku 1884 pracovat pro newyorskou pobočku Edisonovy společnosti.

---

<sup>1</sup> Volně podle: ŠAFRÁNEK, Jaroslav. *Nikola Tesla a jeho zásluhy o elektroniku a radiotechniku*. Praha: Občanská knihtiskárna, 1941, s. 13–27 a 50–74.

BOKŠAN, Slavko. *Nikola Tesla a jeho dílo*. Brno: Rovnost, 1947, s. 74–184.

V New Yorku Tesla znovu vypomáhal chodu společnosti i pomocí různých vylepšení již existujících přístrojů, za což mu následně byla přislíbena mimořádná odměna padesáti tisíc dolarů. Tu však opět nedostal, načež se Nikola odhodlal opustit Edisonovu společnost a založit si vlastní podnik. Tak roku 1876 vznikla Teslova společnost pro obloukové osvětlení (anglicky Tesla Arc Light Company). Během svého působení v této firmě si nechal Tesla zaregistrovat devět patentů, nicméně díky právním formalitám byly tyto vynálezy majetkem společnosti, ne však přímo Nikoly. Proto i ji opustil a roku 1887 založil Teslovu elektrickou společnost (anglicky Tesla Electric Company), jejímž hlavním zaměřením byly elektrické motory. V tomto období si také Tesla nechává patentovat několik přístrojů využívajících točivého pole a také stroje na přenos energie.

Od roku 1889 jsou pak zaznamenány Teslovy pokusy v oblasti vysokofrekvenčního vysokého napětí. Již o rok později zkonstruoval generátor produkující napětí o kmitočtu až 35 kHz. Při těchto pokusech také pozoroval tzv. skinefekt, tedy skutečnost, že vysokofrekvenční napětí je lidskému životu méně nebezpečné v porovnání s nízkofrekvenčním napětím. To je způsobeno skutečností, že vysokofrekvenční proud prochází po povrchu těla a nezasahuje vnitřní orgány. Rovněž roku 1890 vyhrál v soutěži o návrh nové elektrárny na Niagarských vodopádech, která měla za úkol převádět kinetickou energii vodní masy v energii elektrickou.

V devadesátých letech devatenáctého století zažil Nikola Tesla několik úspěchů. Roku 1891 si nejprve nechal patentovat vysokofrekvenční transformátor (dnes známý spíše jako transformátor Teslův). O rok později (19. února) s ním provedl první ukázkou bezdrátového přenosu elektrické energie. Navíc se roku 1893 uskutečnila světová výstava v Chicagu, která jako zdroj energie využila několika Teslových generátorů. Tento okamžik je historicky brán jako obrat společenského pohledu na střídavý proud, který Tesla léta propagoval jako efektivnější alternativu k proudu stejnosměrnému.

Následující roky se Tesla zabíral výzkumem radiové komunikace. K tomu mu zejména posloužila radiová věž v Coloradu (zahájení stavby roku 1897) a následně i druhá věž na Long Islandu (zahájení stavby roku 1899). S první jmenovanou sice zvládl uskutečnit radiovou komunikaci na vzdálenost tisíc kilometrů, na dostavbu druhé věže mu však již nestačili finance. Později, během první světové války, ji nechala americká vláda strhnout pod záminkou obrany státu před případným zneužitím této věže nepřítelem.

Dvacáté století Teslovi již nepřineslo významnějších objevů, ačkoli se v této době začal zabývat technologií turbín.

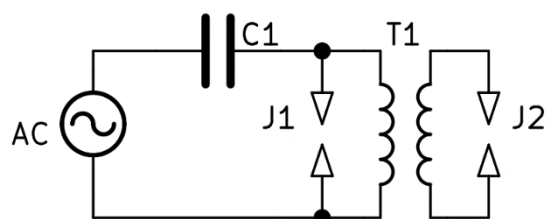
Roku 1939 byl Nikola Tesla v New Yorku sražen automobilem, což jej upoutalo na lůžko v jeho hotelovém pokoji. Zde strávil zbytek života a dne 7. ledna 1943 zemřel.

## 1.2 PŮVODNÍ PODOBA TESLOVA TRANSFORMÁTORU

Jak už bylo řečeno, Tesla se okolo roku 1890 zajímal o techniku využívající vysokého střídavého napětí s velkou oscilační frekvencí. Pomocí generátorů, které si v této době nechal patentovat, se pokoušel vylepšit chod obloukových lamp. Ty totiž měly jako vedlejší efekt produkci hlasitých zvuků. Tesla byl toho názoru, že pokud je bude napájet vysokofrekvenčním střídavým proudem, dojde k eliminaci tohoto jevu.<sup>2</sup>

Při této snaze sestavil obvod, který můžeme pokládat za jednu z prvních podob Teslova vysokofrekvenčního transformátoru. Jednalo se o zapojení sestávající z generátoru střídavého napětí, několika Leidenských lahví, jež zastávaly funkci kondenzátorů, mechanického jiskřiště a transformátoru bez jádra, který měl vývod sekundární cívky vedený do druhého jiskřiště.<sup>3</sup>

Samotné zapojení (Obrázek 1) pak propojuje zdroj střídavého napětí (AC) s paralelně uspořádanými kondenzátory (souhrnně označeny C1), které se po nabití mohly vybit pouze přes první jiskřiště (J1).



Obrázek 1 - Schéma Teslova transformátoru s jiskřištěm

Po vytvoření jiskry a propojení obvodu, prochází elektrický proud skrze primární cívku transformátoru (T1). Následuje uhasnutí jiskry, opětovné nabití kondenzátorů a proces se opakuje.<sup>4</sup>

<sup>2</sup> Volně podle: BOKŠAN, Slavko. *Nikola Tesla a jeho dílo*. Brno: Rovnost, 1947, s. 152.

<sup>3</sup> Volně podle: ŠAFRÁNEK, Jaroslav. *Nikola Tesla a jeho zásluhy o elektroniku a radiotechniku*. Praha: Občanská knihtiskárna, 1941, s. 68–69.

<sup>4</sup> Volně podle: BROŽ, Jaromír. *Elektrina a magnetismus*. II. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1976, s. 203.

Z primární cívky se pak elektrický proud indukuje na sekundární cívku, která má až tisíckrát více závitů než primární. Ta má řádově jednotky až desítky závitů. Díky netlumeným oscilacím, vyvolaným na jiskřišti, vzniká na sekundární cívce transformátoru vysoké napětí (při původních Teslových pokusech vznikaly řádově až miliony voltů) o vysokých frekvencích (řádově tisíce hertzů)<sup>5</sup>. To se následně vybíjelo na druhém jiskřišti (J2), které bylo schopné vyvolat výboje až několik metrů dlouhé. Celé zařízení navíc generovalo ve svém okolí silné elektromagnetické pole, kterého chtěl Tesla využít pro transport energie na velké vzdálenosti bez použití elektrických vodičů. Též bylo pozorováno rozsvícení vzduchoprázdných (vakuových) trubic. Tento jev Tesla využíval zejména při svých přednáškách pro veřejnost.<sup>6</sup>

Zmíníme se ještě o technických parametrech cívek samotného transformátoru. Primární vinutí bylo namotáno z tlustšího měděného drátu uspořádaného do tvaru solenoidu. Sekundární cívka byla tvořena tenkým měděným drátem, opět ve tvaru solenoidu. Menší průměr sekundárního vinutí je potřebný zejména kvůli úspoře místa, neboť tato cívka má zpravidla stovky až tisíce závitů. Pro co nejvyšší účinnost transformátoru je však zapotřebí dosáhnout rezonance mezi primární a sekundární cívkou, čehož se většinou v devatenáctém století dosahovalo pokusy a drobnými úpravami cívek, protože ještě nebyly vyvinuty nástroje pro změření indukčnosti daných součástek.<sup>7</sup>

Dnes již tyto technologie máme, a tak se krátce zmíníme o principu rezonanční frekvence, kterou Teslův transformátor využívá. Frekvence primární i sekundární cívky by se v ideálním případě měly rovnat. Vztah pro úhlovou rezonanční frekvenci dané cívky má tvar  $\omega_i = \sqrt{\frac{1}{L_i C_i}}$ , kde  $L_i$  je indukčnost dané cívky v Henryích a  $C_i$  je kapacita téže cívky ve Faradech.<sup>8</sup> Je důležité neopomenout do kapacity primární cívky připočítat i kapacitu kondenzátorů, neboť musíme první část obvodu (vyjma sekundární cívky) brát jako jeden celek.

<sup>5</sup> Volně podle: ŠAFRÁNEK, Jaroslav. *Nikola Tesla a jeho zásluhy o elektroniku a radiotechniku*. Praha: Občanská knihtiskárna, 1941, s. 70.

<sup>6</sup> Volně podle: BOKŠAN, Slavko. *Nikola Tesla a jeho dílo*. Brno: Rovnost, 1947, s. 154.

<sup>7</sup> Volně podle: ŠAFRÁNEK, Jaroslav. *Nikola Tesla a jeho zásluhy o elektroniku a radiotechniku*. Praha: Občanská knihtiskárna, 1941, s. 69–71.

<sup>8</sup> Vztah převzat z: LYSENKO, Vladimír. *VN zdroje: zdroje vysokého napětí pro experimenty, pokusy a měřicí přístroje, ochranné pomůcky*. Praha: BEN – technická literatura, 2008, s. 124. ISBN 978-80-7300-235-0.

Jak už bylo řečeno, musíme zajistit, aby obě cívky byly naladěny na stejnou frekvenci, tedy musí platit  $\omega_1 = \omega_2 = \sqrt{\frac{1}{L_1 C_1}} = \sqrt{\frac{1}{L_2 C_2}}$ . Tento vztah následně můžeme zjednodušit na rovnici  $L_1 C_1 = L_2 C_2$ , z čehož vyplývá, že pro zajištění rezonance cívek Teslova transformátoru je nutné zajistit, aby se součin indukčnosti a kapacity primární cívky rovnal témuž součinu u cívky sekundární.

## 2 TYPY ZAPOJENÍ TESLOVA TRANSFORMÁTORU

Od doby vytvoření prvního Teslova transformátoru bylo provedeno mnoho pokusů o jeho replikaci, ať už v původním provedení, či v upravené podobě. Vědci, ale i nadšenci, se snažili buď o zefektivnění přístroje, anebo o vytvoření podobného efektu za použití dostupnějších součástí.

Z toho důvodu můžeme rozdělit jednotlivé Teslovy transformátory podle mnohých kritérií. V následujících podkapitolách se na některé z nich zaměříme, a u všech zmíněných popíšeme principy, které umožňují funkci daného zapojení.

### 2.1 JISKŘIŠTĚ

#### 2.1.1 MECHANICKÉ JISKŘIŠTĚ

Jiskřiště zajišťuje u primárního obvodu, aby do primární cívky proudily pulzy elektrického proudu o vysoké frekvenci. Tím je zajištěna funkce paralelního LC oscilátoru, od kterého potřebujeme pro správný chod přístroje kmity netlumené. S mechanickým jiskřištěm sice nejsme schopni zajistit, aby vyvolané elektrické kmity nebyly utlumené, nicméně díky rychlému spínání a rozpínání obvodu jsme schopni tuto skutečnost vykompenzovat stále novými kmity, které mají téměř totožnou amplitudu.<sup>9</sup>

Ve své podstatě se mechanické jiskřiště skládá ze dvou elektrod oddělených dielektrikem (většinou se volí vzduch, ale nemusí tomu tak být vždy), které jsou napájeny přes kondenzátor z hlavního zdroje. Dokud není dosaženo hraničního napětí na kondenzátoru, není možné, aby mezi elektrodami přeskočila jiskra. Jakmile se však kondenzátor nabije na dostatečnou hodnotu napětí, která je schopna překlenout potenciální bariéru dielektrika, vytvoří se mezi elektrodami jiskřiště jiskra a ta propojí obvod. Pro naši potřebu je ideální, pokud je jiskra ihned uhašena a následně opět zažehnutá, abychom dosáhli požadovaných netlumených kmitů. Tohoto jevu je možné dosáhnout vhodnou volbou materiálů elektrod, dielektrika a kondenzátoru.<sup>10</sup>

<sup>9</sup> Volně podle: LYSENKO, Vladimír. *VN zdroje: zdroje vysokého napětí pro experimenty, pokusy a měřicí přístroje, ochranné pomůcky*. Praha: BEN – technická literatura, 2008, s. 123. ISBN 978-80-7300-235-0.

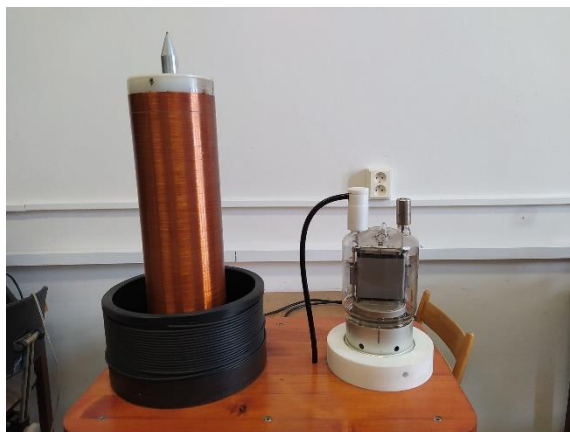
<sup>10</sup> DENICOLAI, Marco. *Tesla Transformer for Experimentation and Research*. Helsinki: Espoo: Helsinki University of Technology, 2001, s. 11.

Rozlišujeme dva základní typy jiskřišť: statické a rotační. Oba tyto druhy fungují na stejném principu, jež byl popsán výše, a každý z nich má své výhody. U statického jiskřiště můžeme spojitě měnit vzdálenost elektrod a tím i hraniční napětí pro vytvoření jiskry. Může sestávat z dvojice stejných elektrod, anebo můžeme jednu elektrodu uzavřít do válce, který tvoří elektrodu druhou. Tímto uzpůsobením se jiskra může šířit více směry zároveň a díky větší ploše druhé elektrody dochází k lepšímu chlazení jiskřiště.

Rotační jiskřiště pak sestává z jedné či více elektrod statických a z druhé sady elektrod, které se otáčí v jejich blízkosti. Toho je docíleno samostatným pohonem, např. za použití elektrického motoru. Jiskra pak může přeskočit pouze ve chvíli, kdy je rotující elektroda v dostatečné blízkosti té statické. Dochází tak k rychlejšímu uhašení jiskry a také k lepšímu chlazení. Je taktéž možné ovlivnit frekvenci otáček jiskřiště, čímž lze přímo ovlivnit i frekvenci vzniklých elektrických kmitů.<sup>11</sup>

### 2.1.2 MODERNÍ NÁHRADY<sup>12</sup>

V novodobých zapojeních primárního obvodu Teslova transformátoru již nenajdeme výhradně mechanické jiskřiště. Tento spínací prvek byl nejprve nahrazován elektronkami, vznikl tak tzn. Teslův transformátor s elektronkovým budičem (anglicky Vacuum Tube Tesla Coil, zkratka VTTC) (viz Obrázek 2). Ty byly následně nahrazeny polovodičovými prvky. Toto nové zapojení je označováno jako SSTC (z anglického Solid State Tesla Coil – Teslův transformátor s polovodičovým buzením). To umožnilo zejména zmenšení primárního obvodu, využívá se tedy především pro malé aplikace s nižším výkonem.



Obrázek 2 - Teslův transformátor typu VTTC

<sup>11</sup> Volně podle: DENICOLAI, Marco. *Tesla Transformer for Experimentation and Research*. Helsinki: Espoo: Helsinki University of Technology, 2001, s. 11.

Volně podle: LYSENKO, Vladimír. *VN zdroje: zdroje vysokého napětí pro experimenty, pokusy a měřicí přístroje, ochranné pomůcky*. Praha: BEN – technická literatura, 2008, s. 122–123. ISBN 978-80-7300-235-0.

<sup>12</sup> Volně podle: LYSENKO, Vladimír. *VN zdroje: zdroje vysokého napětí pro experimenty, pokusy a měřicí přístroje, ochranné pomůcky*. Praha: BEN – technická literatura, 2008, s. 128–138. ISBN 978-80-7300-235-0

Pro tato zapojení se využívá mnoho druhů polovodičových součástek, od tranzistorů, MOSFETů až po logická hradla NAND. Výhodou těchto zapojení je zejména možnost vyhnout se vyladování primárního a sekundárního obvodu na stejnou rezonanční frekvenci. Místo toho je možné tyto obvody propojit a pomocí zpětné vazby vybudit netlumené oscilace.<sup>13</sup> Přes to je stále možné nechat oba obvody oddělené a generovat kmity na primárním obvodu. Tato konkrétní metoda bude blíže popsána ve třetí kapitole.

## 2.2 ZDROJOVÉ NAPĚTÍ<sup>14</sup>

### 2.2.1 STŘÍDAVÉ NAPĚTÍ

Teslův transformátor je stále ve své podstatě transformátor napětí, z toho důvodu je tedy nutné, aby bylo na primární vinutí přivedeno střídavé napětí. Tento transformátor však funguje v oblasti vysokých frekvencí, je tedy potřeba zvýšit skrze primární obvod kmitočet zdrojového napětí. U klasických zapojení se využívá kombinace kondenzátoru a jiskřiště. V takovém případě je nutné zajistit, aby hraniční kapacita kondenzátoru, která způsobí přeskočení jiskry, byla nižší, než je maximální amplituda zdrojového střídavého napětí. Tím dosáhneme požadovaného zvýšení frekvence napětí.

V opačném případě by se kondenzátor nabíjel minimálně jednu periodu průběhu střídavého napětí, tudíž by výsledné kmity LC obvodu měly frekvenci nanejvýše stejnou jako má zdrojové napětí.

### 2.2.2 STEJNOSMĚRNÉ NAPĚTÍ

Zapojení Teslova transformátoru se stejnosměrným zdrojem napětí využívají buzených oscilací, které do primární cívky pouští krátké pulzy elektrického proudu o vysoké frekvenci. Pro tyto účely se může využít jak klasického zapojení, tak modifikovaného polovodičového schématu. Při využití stejnosměrného napájení je nutné zohlednit, aby generované pulzy měly konstantní napětí. Toho se dosahuje buď za použití vhodného kondenzátoru, anebo vysokonapěťového spínače.

<sup>13</sup> Volně podle: ŠLÉGR, Jan. Jednoduché zdroje vysokého napětí pro školní praxi. In: KŘÍŽOVÁ, Michaela, ed. *Veletrh nápadů učitelů fyziky 18*. Hradec Králové: Jednotou českých matematiků a fyziků, 2013, 261-263. ISBN 978-80-7435-372-7.

<sup>14</sup> Volně podle: DENICOLAI, Marco. *Tesla Transformer for Experimentation and Research*. Helsinki: Espoo: Helsinki University of Technology, 2001, s. 11–12.



### 2.3 CÍVKY

V klasickém Teslově zapojení se vyskytují dvě cívky se společnou osou bez jádra, označované jako primární a sekundární vinutí. Jak už bylo řečeno v části zabývající se původním zapojením Teslova transformátoru, primární cívka je tvořena z drátu většího průměru vinutého většinou do podoby solenoidu. Taktéž je ale možné tuto cívku navinout do podoby plošné spirály, díky čemuž zvýšíme celkovou elektrickou izolaci mezi cívkami.<sup>15</sup> Tím můžeme zamezit nechtěným zkratům a přeskokům jisker mezi primárním a sekundárním obvodem. Ztrácíme však na množství přenesené energie.

U sekundární cívky je nutná zejména její izolace a skutečnost, že se jednotlivé závitů nepřekrývají. Opět tomu je z důvodu minimalizace možnosti zkratu. Na vrchol sekundární cívky se taktéž může umístit toroid, kterým můžeme v případě potřeby regulovat kapacitu sekundárního obvodu. Díky tomu můžeme snadněji získat požadovaný kmitočet, který odpovídá kmitočtu primárního obvodu. Toroid lze volit vodivý, či z izolantu. V druhém případě je však potřeba alespoň na jeho povrch umístit vodivý materiál, např. hliník. Vhodné je též doplnit toroid o alespoň jeden vodivý hrot, ze kterého se může sekundární obvod vybíjet pomocí ionizace okolního vzduchu.<sup>16</sup>

Existují taktéž tzv. tří cívková zapojení. Hlavní myšlenka tohoto provedení spočívá v rozdělení sekundární cívky na dvě propojené části. Jedna je součástí klasického transformátoru s primární cívkou s vodičem vyvedeným do druhé části cívky, umístěné mimo magnetické pole primárního obvodu. Tím je při správném zapojení možné zvýšit výkon transformátoru. Zároveň lze zamezit u výkonnějších zapojení probíjení proudu z vrcholu sekundární cívky zpět do cívky primární.<sup>17</sup>

---

<sup>15</sup> Volně podle: LYSENKO, Vladimír. *VN zdroje: zdroje vysokého napětí pro experimenty, pokusy a měřicí přístroje, ochranné pomůcky*. Praha: BEN – technická literatura, 2008, s. 130–131. ISBN 978-80-7300-235-0.

<sup>16</sup> Volně podle: LYSENKO, Vladimír. *VN zdroje: zdroje vysokého napětí pro experimenty, pokusy a měřicí přístroje, ochranné pomůcky*. Praha: BEN – technická literatura, 2008, s. 131. ISBN 978-80-7300-235-0.

<sup>17</sup> Volně podle: DENICOLAI, Marco. *Tesla Transformer for Experimentation and Research*. Helsinki: Espoo: Helsinki University of Technology, 2001, s. 10.

### 3 KONSTRUKCE TESLOVÝCH TRANSFORMÁTORŮ

Pro samotnou konstrukci zvolil autor dvě různá zapojení typu SSTC, s vyměnitelnou primární a sekundární cívkou. V předchozích kapitolách byla popsána funkce Teslova transformátoru s jiskřištěm, proto zde bude nejprve vysvětlen princip jednotlivých provedených zapojení. Následně budou ke každému provedenému obvodu přidané i specifikace týkající se použitých součástek, parametrů jednotlivých vinutí cívek a také naměřené hodnoty popisující chod zařízení.

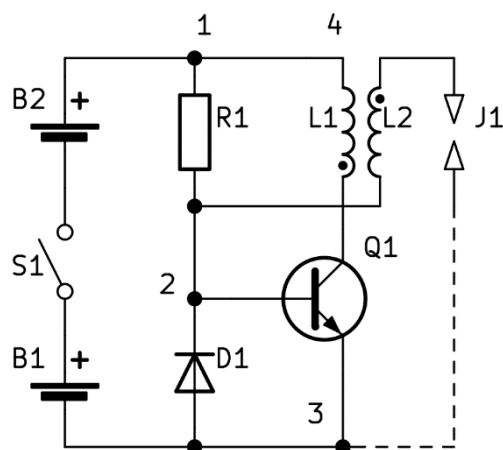
Jako základ pro první sestavený obvod posloužilo schéma ze sborníku *Dílny Heuréka 2018*, konkrétně z příspěvku Michala Hnyka „*Slayer exciter aneb Větší bráška Joule thiefu*“.<sup>18</sup> Toto konkrétní zapojení bude nadále označováno jako SSTC bez kondenzátoru, případně pomocí zkratky TC1.

Předlohou pro druhý obvod Teslova transformátoru je schéma obsažené v článku Vlastimila Píče „*Teslův transformátor: Schéma, návod na výrobu a uvedení do chodu*“.<sup>19</sup> V práci bude nadále označováno jako SSTC s kondenzátorem, případně pomocí zkratky TC2.

#### 3.1 PRINCIP ZAPOJENÍ

##### 3.1.1 SSTC BEZ KONDENZÁTORU

Použité zapojení (Obrázek 3) tohoto Teslova transformátoru se dá popsat pomocí tří distinktivních stavů, kterých tento obvod nabývá. Nejprve je sepnut spínač S1, což zapříčiní průchod elektrického proudu skrze uzel s označením 1, dále do rezistoru R1, přes uzel 2 do báze tranzistoru Q1 a skrz uzel 3 zpět do zdroje. Původně uzavřený tranzistor se tímto proudem začíná otevírat.



Obrázek 3 - Schéma obvodu TC1

<sup>18</sup> HNYK, Michal. *Slayer exciter aneb Větší bráška Joule thiefu*. In: KOUDELKOVÁ, Věra, ed. *Dílny Heuréka 2018*. Praha: MatfyzPress, 2019, s. 31–39. ISBN 978-80-7378-377-8.

<sup>19</sup> PÍČ, Vlastimil. *Teslův transformátor: Schéma, návod na výrobu a uvedení do chodu*. *Ábíčko.cz: Zábava, příroda, věda a technika* [online]. 2021 [cit. 2022-03-04]. Dostupné z: <https://www.abicko.cz/clanek/precit-si-technika/26919/serial-elektro-10-postavte-si-teslův-transformator.html>

Tím se obvod dostává do druhého stavu. Díky dostatečnému elektrickému proudu do báze je tranzistor Q1 otevřen. Proud tedy prochází z uzlu 1 přes primární cívku L1, kolektor a emitor do uzlu 3. V této chvíli zároveň indukuje cívka L1 magnetické pole, které v důsledku indukuje napětí na cívce L2. Polarita těchto cívek je následovná: L1 má kladný pól u uzlu 4, L2 má též pól u jiskřiště J1. Indukované napětí na L2 se však promítne do funkce obvodu, neboť její záporný pól je přímo zapojen do uzlu 2. Aby nedošlo k přetížení tranzistoru a jeho potenciálnímu zničení, je do uzlu 2 zapojena svítivá dioda v závěrném směru. Cívka L2 v tuto chvíli přivede záporné napětí na bázi tranzistoru, který se uzavře. Dioda D1 je vůči tomuto napětí zapojena v propustném směru, takže omezí napětí, které by mohlo ohrozit tranzistor.

Dále následuje poslední fáze, která odpovídá první, kdy proud opět prochází uzavřeným obvodem baterie, uzly 1, 2, 3 a znovu baterií. V tuto chvíli se však k tomuto procesu přidávají i cívky, které mají již opačnou polaritu, než jakou měly ve stavu dva. Díky tomu ale napětí na bázi tranzistoru naroste rychleji než v první fázi, čímž se i rychleji otevře propojení mezi konektorem a emitorem. Od této chvíle se tak střídají stavy dva a tři, dokud není spínač S1 rozepnut.<sup>20</sup>

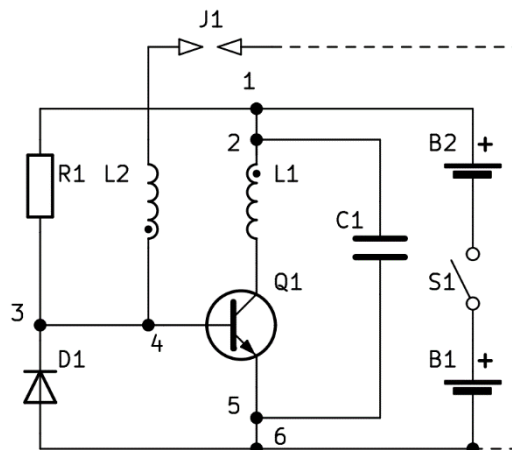
Oproti původnímu návrhu, jež použil Michal Hnyk, bylo k obvodu v této práci přidáno jiskřiště J1, které je tvořeno volným koncem vinutí L2 a vodičem vedeným přímo k zápornému zdroji stejnosměrného napětí. To má napomoci vzniku elektrického výboje na zakončení sekundární cívky pro lepší prezentaci tohoto jevu. Nejedná se však o nezbytné opatření, proto je ve schématu zobrazeno přerušovanou čarou.

---

<sup>20</sup> Volně podle: HNYK, Michal. Slayer exciter aneb Větší bráška Joule thiefu. In: KOUDELKOVÁ, Věra, ed. *Dílňy Heuréka 2018*. Praha: MatfyzPress, 2019, s. 31–39. ISBN 978-80-7378-377-8.

### 3.1.2 SSTC s KONDENZÁTOREM

Následující obvod (Obrázek 4) se stejně jako předešlý dá rozdělit do tří pracovních fází, které se ve své podstatě podobají stavům nabývaným obvodem TC1. Hlavním rozdílem tak tedy je role kondenzátoru v obvodu TC2, kterou popíšeme na následujících odstavcích.



Obrázek 4 - Schéma obvodu TC2

V první fázi, bezprostředně po sepnutí spínače S1, začne procházet elektrický

proud skrze uzel 1 přes rezistor R1 do báze tranzistoru Q1. Tranzistor je v tento okamžik uzavřený, ale začíná se díky zvýšenému napětí na bázi otevírat. Proud tedy pokračuje dál skrze uzly 5 a 6 zpět do zdroje napětí. V uzlu 1 se však proud rozvětjuje nejen k rezistoru, ale zároveň přes uzel 2 do kondenzátoru C1, který se tak začíná nabíjet.

Díky otevření tranzistoru Q1 je v následující fázi umožněn průchod proudu skrze uzly 1 a 2 přes primární cívku L1 do kolektoru tranzistoru a opět přes emitor k zápornému pólu zdroje. K tomuto proudu se přidává i proud z kondenzátoru C1, který uzavírá smyčku: C1, uzel 2, L1, kolektor a emitor Q1, uzel 5 a C1. Na cívce L1 se tak vytváří magnetické pole, které indukuje elektrické napětí i na sekundární cívce L2. Díky vzájemné orientaci cívek víme, že záporný pól cívky L1 bude u kolektoru tranzistoru Q1 a cívka L2 bude mít záporný pól u uzlu 4. Napětí na těchto cívkách se podobně jako u obvodu TC1 promítne do chování celého obvodu. Sekundární cívka se začne vybíjet, ale díky možnému přetížení tranzistoru Q1 je do zapojení začleněna svítivá dioda D1, která sníží záporné napětí na bázi tranzistoru (vyzářením světla). Díky tomu se tranzistor uzavře. Napětí na cívce klesá a kondenzátor se opět dobíjí ze zdroje.

Následuje stav podobný první fázi po sepnutí spínače. Obdobně jako u zapojení TC1 je i zde tento proces otevírání tranzistoru Q1 urychlen díky polaritě primární a sekundární cívky. Tato polarita je opačná vůči předchozímu stavu. Dále se tedy opakují druhá a třetí fáze, až dokud nerozpojíme spínač S1 a celý proces neukončíme.

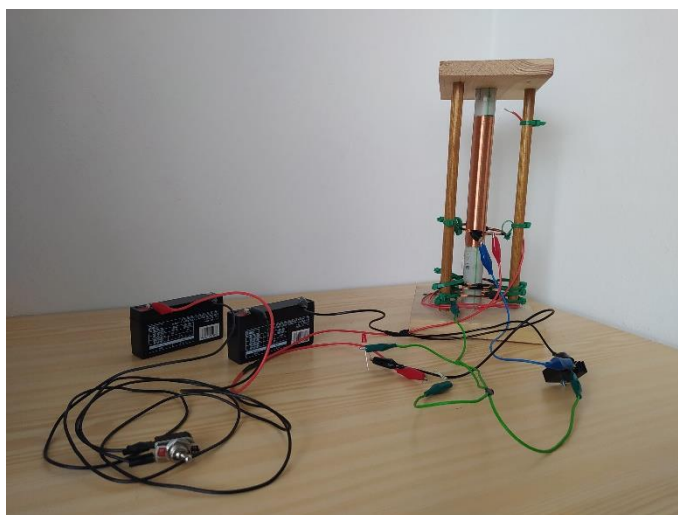
Stejně jako u SSTC bez kondenzátoru je i v obvodu TC2 obsaženo jiskřiště J1, které není nezbytnou součástí zapojení a je tedy vyznačeno přerušovanou čarou. Jedná se o prvek, jež má napomáhat utváření výboje na zakončení sekundárního vinutí a je zapojen přímo k zápornému pólu zdroje.

### 3.2 SOUČÁSTKY A PRAKTICKÉ ZHOTOVENÍ

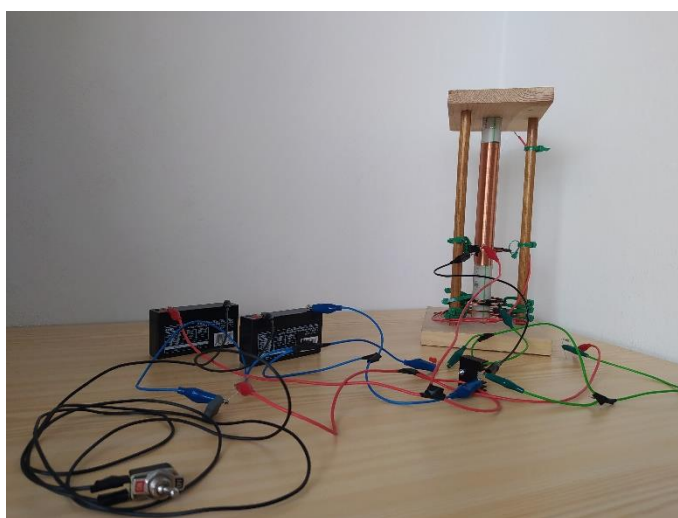
Ke zhotovení obou výše popsaných obvodů bylo použito dvou sériově zapojených stejnosměrných akumulátorů o napětí 6 V; rezistoru s odporem 10 k $\Omega$ ; červené svítivé diody a NPN tranzistoru s označením BD243C. K tranzistoru je navíc umístěn chladič, kterým předcházíme možnému tepelnému zničení této součástky. Na rozdíl od TC1 (Obrázek 5) obsahuje obvod TC2 (Obrázek 6) i svitkový radiální kondenzátor s kapacitou 100 nF a maximálním napětím 275 V.

Všechny výše uvedené součástky, včetně tlačítkového spínače, byly podle schémat (viz Obrázek 3, Obrázek 4) propojeny pomocí izolovaných vodičů zakončených svorkami, čímž byl vytvořen primární obvod. Cívky

a akumulátory jsou připojené k ostatním součástkám pomocí vývodů, které tvoří izolované vodiče, jež mají z obou stran svorky, kterými je lze připevnit k vybranému prvku.



Obrázek 5 - Zapojení TC1



Obrázek 6 - Zapojení TC2

Obě cívky (Obrázek 7) tedy lze jednoduše vyměnit za jinou, případně zachovat cívky a vyměnit celý primární obvod. Konkrétní použité cívky jsou souosé, z měděného izolovaného drátu. Sekundární cívka je tvořena drátem o průměru 0,2 mm. Ten je navinut na PVC trubce o vnějším průměru 25,3 mm do solenoidu o délce 163,6 mm, což odpovídá zhruba 818 závitům. Primární cívky byly navinuty celkem čtyři. Všechny sestávají z měděného izolovaného drátu o průměru 0,75 mm a jsou solenoidového tvaru. Pro účely měření byly vytvořeny dvě dvojice cívek, z nichž jedna má vnější průměr 76 mm a druhá 59,5 mm. V každé z těchto dvojic je jedna cívka tvořena třemi závitů a druhá tvořená pěti. Konce obou vinutí jsou odizolované, aby se k nim dal připojit primární obvod. Horní konec sekundární cívky je navíc v blízkosti odizolovaného zakončení vodiče, které může být zapojeno k zápornému pólu baterie, čímž se vytvoří jiskřiště J1, které má v případě malého výkonu napomáhat utváření elektrického výboje.



Obrázek 7 - Konstrukce s cívkami pro TC1 a TC2

### 3.3 VYPOČÍTANÉ PARAMETRY

Určování parametrů zkonstruovaných zapojení jsme započali výpočty fyzikálních vlastností jednotlivých cívek. K tomu jsme však potřebovali znát geometrické parametry, přesněji průměr ( $d$ ) a délku ( $l$ ) cívek. Tyto hodnoty byly získány za pomoci posuvného měřidla. Dále bylo taktéž nutné určit počet závitů u jednotlivých vinutí. U primárních cívek to vzhledem k nízkému počtu závitů nebylo nikterak obtížné, u sekundárního vinutí bylo nutné použít komplikovanějšího postupu. Díky změření délky cívky a známého průměru použitého vodiče bylo možné odhadnout počet závitů pomocí vztahu  $N = \frac{l}{r_0}$ , kde  $r_0$  je průměr vodiče. Jedná se však pouze o horní odhad počtu závitů dané cívky, neboť díky nedokonalému navinutí se mezi jednotlivými závitů mohou vyskytovat mezery, které cívku prodlužují. Tento horní odhad nám však může pomoci alespoň k přibližnému odhadu skutečných hodnot, které nám může blíže přiblížit samotné měření.

Další komplikací bylo nalezení vlastní kapacity cívek bez použití měřicí techniky. Nakonec bylo použito vztahu (jež byl převzat ze stránek Coil32.net)  $C = d * H$ , kde  $d$  je průměr cívky a  $H$  je parametr o jednotce  $F \cdot m^{-1}$  závisející na podílu délky a průměru cívky. Tento parametr byl pro různé podíly zaznamenán do níže uvedené tabulky (viz Tabulka 1).<sup>21</sup> Pokud by navíc byla cívka L1 připojena do obvodu TC2, musíme počítat i s kapacitou kondenzátoru C1. Vzhledem k tomu, že zapojení cívky L1 a kondenzátoru C1 je paralelní, můžeme výslednou kapacitu vypočítat pomocí vztahu  $C = C_{C1} + C_{L1}$ .

l/d	H/pF·cm <sup>-1</sup>	l/d	H/pF·cm <sup>-1</sup>	l/d	H/pF·cm <sup>-1</sup>
50	5,8	5	0,81	0,7	0,47
40	4,6	4,5	0,77	0,6	0,48
30	3,4	4	0,72	0,5	0,50
25	2,9	3,5	0,67	0,45	0,52
20	2,36	3	0,61	0,4	0,54
15	1,86	2,5	0,56	0,35	0,57
10	1,32	2	0,50	0,3	0,6
9	1,22	1,5	0,47	0,25	0,64
8	1,12	1	0,46	0,2	0,70
7	1,01	0,9	0,46	0,15	0,79
6	0,92	0,8	0,46	0,1	0,96

Tabulka 1 - Závislost H na podílu l/d

Další hledanou vlastností cívek je jejich indukčnost. Pro tu jsme využili vztahu  $L = \frac{\mu_0 N^2 S}{l}$ , kde  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$  je permeabilita vakua,  $N$  je počet závitů cívky,  $S = \pi r^2$  je plocha cívkou ohraničená a  $l$  je délka cívky.<sup>22</sup>

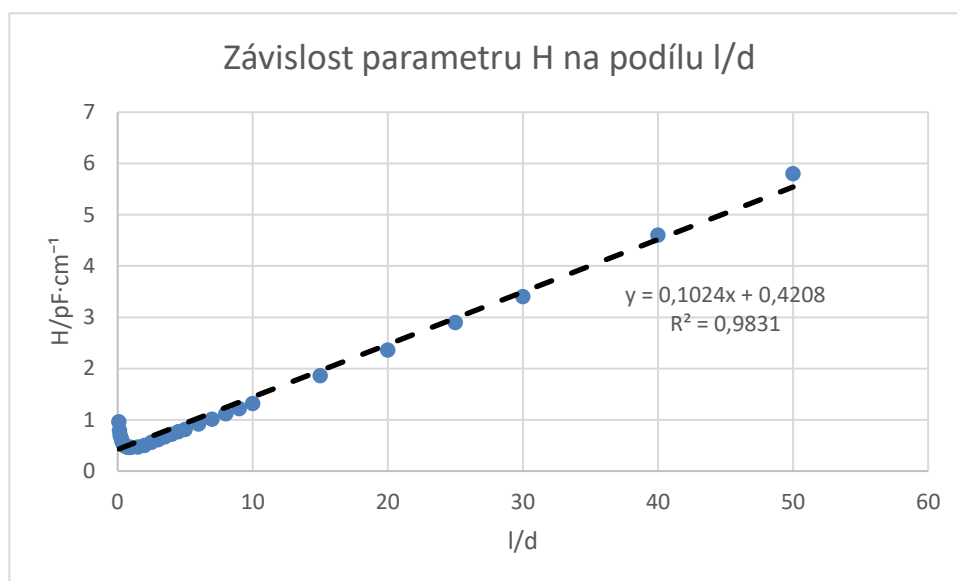
Díky výše uvedeným vzorcům jsme taktéž schopni určit rezonanční frekvenci dané cívky díky vztahu  $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ , kde za L a C dosazujeme námi vypočtené hodnoty.<sup>23</sup>

<sup>21</sup> Volně podle: Coil32 – *Self-capacitance of single-layer inductor*. Coil32.net [online]. 1st February 2015 [cit. 2022-03-13]. Dostupné z: <http://coil32.net/theory/self-capacitance.html>

<sup>22</sup> Vzorec převzat z: RAUNER, Karel. *Elektronika: (fyzikální a analogová část)*. 2., upr. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, Pedagogická fakulta, 2001, s. 45. ISBN 80-7082-775-0.

<sup>23</sup> Vzorec převzat z: HNYK, Michal. Slayer exciter aneb Větší bráška Joule thiefu. In: KOUDELKOVÁ, Věra, ed. *Dílky Heuréka 2018*. Praha: MatfyzPress, 2019, s 31–39. ISBN 978-80-7378-377-8.

Všechny parametry jednotlivých cívek jsme následně uspořádali do dvou tabulek, ve kterých jsou vypočítané hodnoty uvedené v základních jednotkách. Je nutno podotknout, že hodnoty parametru  $H$  v první tabulce (na rozdíl od tabulek následujících) nejsou v základních jednotkách, neboť měly být dosazeny do vzorce  $C = d * H$  tak, aby bylo možné dosadit  $d$  v cm a získat  $C$  v pF. Taktéž vzhledem ke skutečnosti, že parametr  $H$  byl stanoven pouze pro určité hodnoty, provedli jsme jeho lineární aproximaci, která je použita pro všechny následující tabulky. Bylo použito vztahu  $H = 0,1024 * (l/d) + 0,4208$  (viz Graf 1).

Graf 1 - Závislost parametru  $H$  na podílu  $l/d$ 

	L1a		L1b		L1c		L1d	
	TC1	TC2	TC1	TC2	TC1	TC2	TC1	TC2
$d/m$	7,6E-02	7,6E-02	6,0E-02	6,0E-02	7,6E-02	7,6E-02	6,0E-02	6,0E-02
$l/m$	3,8E-03	3,8E-03	3,8E-03	3,8E-03	2,3E-03	2,3E-03	2,3E-03	2,3E-03
$N$	5	5	5	5	3	3	3	3
$H/F \cdot m^{-1}$	4,3E-11	4,3E-11	4,3E-11	4,3E-11	4,2E-11	4,2E-11	4,2E-11	4,2E-11
$L/H$	3,8E-05	3,8E-05	2,3E-05	2,3E-05	2,3E-05	2,3E-05	1,4E-05	1,4E-05
$C/F$	3,2E-12	1,0E-07	2,5E-12	1,0E-07	3,2E-12	1,0E-07	2,5E-12	1,0E-07
$f/Hz$	1,4E+07	8,2E+04	2,1E+07	1,0E+05	1,9E+07	1,1E+05	2,7E+07	1,3E+05

Tabulka 2 - Parametry cívek L1

	$d/m$	$l/m$	$N$	$H/F \cdot m^{-1}$	$L/H$	$C/F$	$f/Hz$
L2	2,6E-02	1,6E-01	818	1E-10	2,7E-03	2,8E-12	1,9E+06

Tabulka 3 - Parametry cívky L2



Zpracováním výsledků (viz Tabulka 2, Tabulka 3) vyšlo najevo, že u primárních cívek zapojených do obvodu TC2 lze zanedbat vlastní kapacitu cívky, neboť ta je řádově v jednotkách pF, zatímco použitý kondenzátor má kapacitu 100 nF, závisí tedy zejména na tomto parametru. Též můžeme očekávat odchylku od naměřených hodnot kapacit a rezonančních frekvencí zejména u cívek L1 v obvodu TC1 (a taktéž u cívky L2). Důvodem je nutnost použití aproximace. Pro přibližný odhad nám však tyto hodnoty mohou postačit.

Vhodné by taktéž bylo teoreticky vypočítat výslednou frekvenci výstupního napětí. Matematický vztah pro tuto veličinu však nebyl autorem nalezen, pokusíme se tedy alespoň změřit tuto hodnotu při změně parametrů. Díky tomu bychom mohli vyvodit, který parametr ji ovlivňuje nejvíce.

Mimo výše zmíněné parametry cívek jsou pro nás podstatné i hodnoty výstupního napětí na cívce L2. K výpočtu této veličiny využijeme vztahu  $U_2 = \sqrt{\frac{M^2}{L_1 L_2}} \sqrt{\frac{C_1}{C_2}} U_1$ , kde  $L_i$  je indukčnost dané cívky,  $C_i$  je její kapacita,  $U_1$  je vstupní napětí (které přivedeme na cívku L1) a  $M$  je vzájemná indukčnost cívek L1 a L2. Tu vypočítáme podle vzorce  $M = \frac{\mu_0 N_1 N_2 S_2}{l_1}$ , kde  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H}\cdot\text{m}^{-1}$  je permeabilita vakua,  $N_i$  je počet závitů dané cívky,  $S_2 = \pi r_2^2$  je plocha ohraničená cívkou L2 a  $l_1$  je délka cívky L1.<sup>24</sup> Pro výpočty použijeme hodnoty z předchozích výpočtů (viz Tabulka 2, Tabulka 3). Za vstupní napětí dosazujeme zdrojové napětí 12 V.

	L1a		L1b		L1c		L1d	
	TC1	TC2	TC1	TC2	TC1	TC2	TC1	TC2
M/H	2,9E-02	2,9E-02	2,9E-02	2,9E-02	2,9E-02	2,9E-02	2,9E-02	2,9E-02
$U_2/V$	1,3E+03	2,1E+05	1,4E+03	2,6E+05	1,8E+03	2,7E+05	2,0E+03	3,4E+05

Tabulka 4 - Vzájemná indukčnost cívek a výstupní napětí na cívce L2

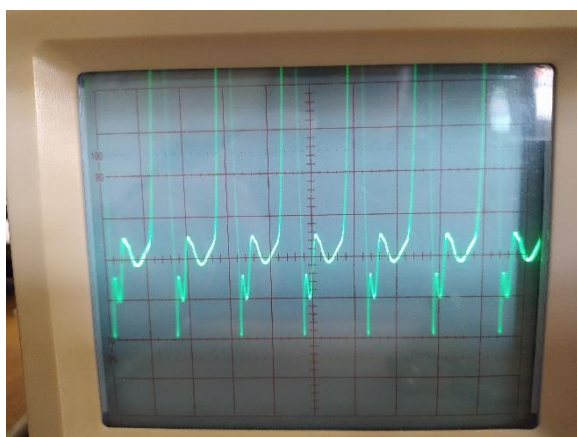
Opět je nutno podotknout, že se jedná pouze o orientační hodnoty. Můžeme ale očekávat, že se podle zvoleného primárního obvodu a primární cívky bude výstupní napětí pohybovat řádově od jednotek až po stovky kilovoltů (viz Tabulka 4).

<sup>24</sup> Vzorec převzat z: LYSENKO, Vladimír. *VN zdroje: zdroje vysokého napětí pro experimenty, pokusy a měřicí přístroje, ochranné pomůcky*. Praha: BEN – technická literatura, 2008, s. 125–126. ISBN 978-80-7300-235-0.

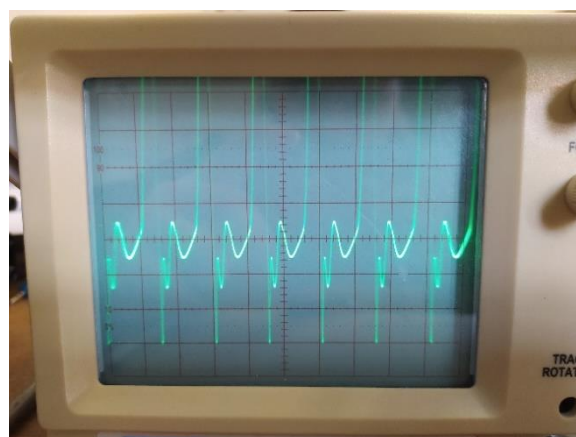
### 3.4 NAMĚŘENÉ PARAMETRY

Během praktického měření na sestavených obvodech Teslových transformátorů jsme se zaměřili zejména na ověření vypočítaných hodnot indukčnosti jednotlivých cívek a frekvence, se kterou v daném zapojení kmitá elektrický proud. Původně bylo též v plánu změřit i kapacity použitých cívek, to však nebylo proveditelné s měřicími přístroji, jež jsme měli k dispozici. Důvodem je nedostatečná citlivost přístroje, která nedovoluje zaznamenat jednotky pF.

Nejprve se zmíníme o frekvencích elektrického proudu. Ty byly měřeny na kolektoru v zapojení TC1 a TC2. U obou zapojení bylo měřeno s primární cívkou L1a. Bylo použito osciloskopu s nastaveným rozsahem 1 dílek = 0,2  $\mu$ s. Následně byla odečtena hodnota jedné periody, ze které byla následně vypočtena hledaná frekvence  $f = \frac{1}{3,2 \cdot 10^{-7}} = 3,125$  MHz. Ta byla v případě obou obvodů velmi podobná, což nás může vést k závěru, že frekvenci řídí zejména parametry sekundární cívky, neboť se obě zapojení liší v kapacitě primární cívky řádově o 100 nF. Pro lepší ilustraci jsou níže přiložené fotografie s hodnotami na displeji osciloskopu při měření TC1 (Obrázek 8) a TC2 (Obrázek 9).



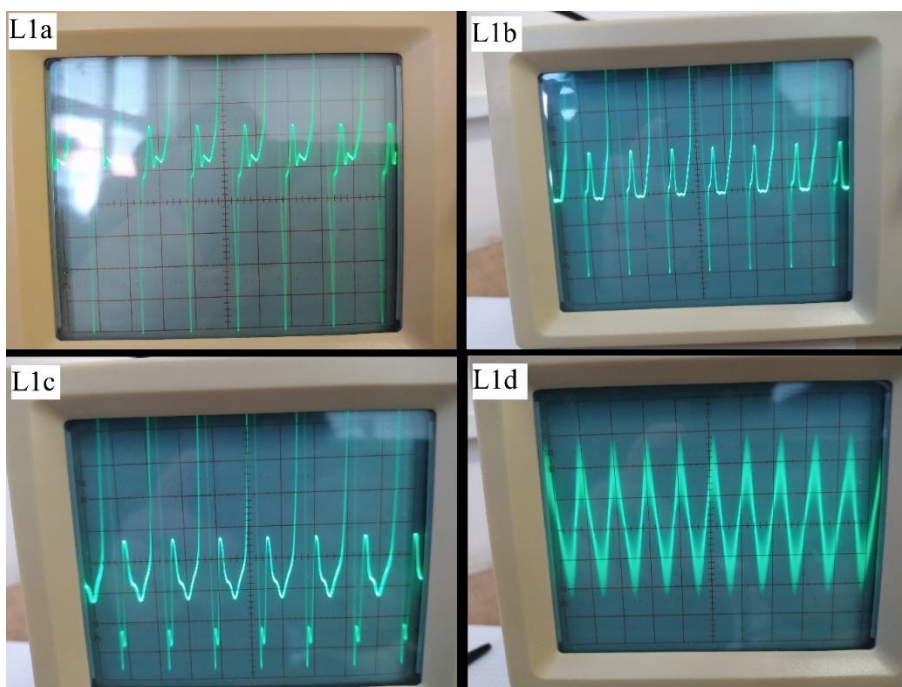
Obrázek 8 - Měření frekvence na TC1



Obrázek 9 - Měření frekvence na TC2

Abychom zjistili, která z cívek má větší vliv na frekvenci výstupního napětí, změřili jsme napětí na kolektoru pro zapojení TC2, ve kterém jsme měnili pouze primární cívky. Dalo by se tedy předpokládat, že pokud frekvence závisí na primárním vinutí, budou se od sebe jednotlivé průběhy lišit. Pakliže tomu tak nebude, výstupní frekvence závisí zejména na sekundární cívce.

Jednotlivá měření (viz Obrázek 10) ukázala, že primární cívky jen minimálně ovlivňují výslednou frekvenci, tudíž můžeme předpokládat, že tuto frekvenci určuje sekundární vinutí.



Obrázek 10 - Měření frekvencí na TC2 pro různé cívky L1

Dále byly změřeny indukčnosti jednotlivých cívek, které jsou níže uvedené jak v tabulce s hodnotami primárních cívek (Tabulka 5), tak v tabulce hodnot sekundární cívky (Tabulka 6). Jelikož jsme u tohoto vinutí byli schopni zjistit jeho rezonanční frekvenci (za předpokladu, že výsledná frekvence je ovlivněna sekundární cívkou natolik, že výsledná frekvence je rovna rezonanční frekvenci tohoto vinutí), mohli jsme taktéž pomocí vztahu  $C = \frac{1}{4\pi^2 f^2 L}$  zjistit hodnotu jeho kapacity. To vyšlo v jednotkách pF, což odpovídá teoreticky získaným hodnotám.

	L1a	L1b	L1c	L1d
d/m	7,6E-02	6,0E-02	7,6E-02	6,0E-02
l/m	3,8E-03	3,8E-03	2,3E-03	2,3E-03
N	5	5	3	3
L/H	1,1E-05	1,1E-05	1,3E-05	1,3E-05

Tabulka 5 - Naměřené parametry primárních cívek

	d/m	l/m	N	L/H	T/s	f/Hz	C/F
L2	2,6E-02	1,6E-01	818	1,6E-03	3,2E-07	3,1E+06	1,6E-12

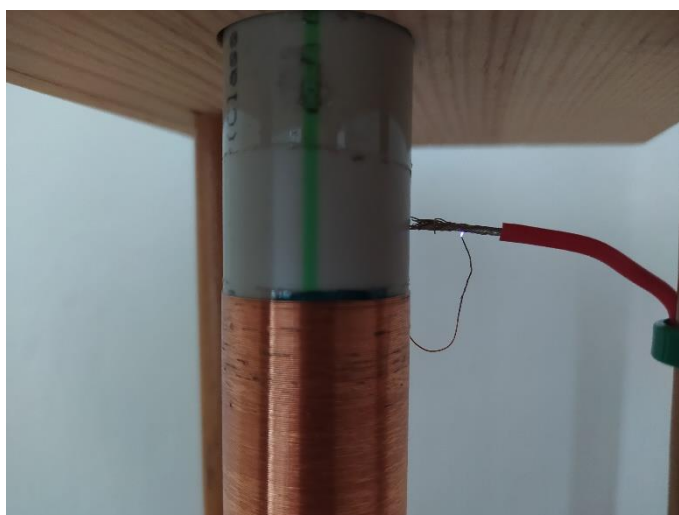
Tabulka 6 - Naměřené parametry sekundární cívky

### 3.5 ZHODNOCENÍ VLASTNÍCH KONSTRUKCÍ

Oba zhotovené Teslovy transformátory fungují podle předpokladů. Jejich malé provedení je vhodné zejména k jednoduchému přenosu a složení. Samotné propojení jednotlivých komponentů (primární obvod, baterie a sada cívek) je relativně rychlé a nevyžaduje použití žádného nářadí. Zvolený systém spojení součástek, tedy izolované vodiče zakončené svorkami, se však nezdá zcela ideální pro práci ve školním prostředí. Zejména přechody mezi vodiči a jednotlivými obvodovými prvky jsou z části odizolovány a hrozí tak nebezpečí úrazu při špatné manipulaci se zapnutým přístrojem.

Korónový výboj dosahuje v obou obvodech řádově několika milimetrů (viz Obrázek 11), což je k využití pro školské pokusy spíše nevhodné. Podle provedených pokusů víme, že obě zapojení indukují dostatečně silné elektromagnetické pole pro rozsvícení zářivky pomocí ionizace. Je tedy možné, aby se s danými obvody daly provádět alespoň některé z pokusů uvedených v kapitole 5. Jmenovitě experimenty s rozsvícením zářivky a odstíněním elektromagnetického pole pomocí Faradayovy klece.

Další pokusy, které jsou popsány v této práci, bychom s těmito zapojeními buď nebyli schopni provést (hudební modulace či přenos energie mezi dvěma totožnými transformátory), případně bychom museli obvod patřičně upravit (skupinová práce žáků při zapojení SSTC). Potřebné modifikace ke zmiňovanému pokusu jsou uvedeny dále v kapitole 5.



Obrázek 11 - Korónový výboj zapojení TC2

## 4 BEZPEČNOST

### 4.1 BEZPEČNOST PŘI PRÁCI S ELEKTRICKÝM PROUDEM

Obecně je při práci s elektrickým proudem potřeba vždy počítat s rizikem úrazu. Nebezpečné pro lidský život mohou být už desítky až stovky mA. Efekt na lidský organismus se může stupňovat od bolesti, přes zablokování postižených svalů až po smrt. Největším rizikem je pak průchod skrze srdce. U elektrického proudu však nezáleží pouze na jeho velikosti, ale zároveň i na tom, jestli se jedná o stejnosměrný či střídavý. Například u stejnosměrného proudu se uvádí hranice velikosti proudu vedoucí ke smrti člověka 300 mA, zatímco u střídavého napětí o frekvenci 60 Hz je tato hranice na 100 mA.<sup>25</sup> Střídavý proud ale není výlučně nebezpečnější, než ten stejnosměrný. Jestliže má střídavý proud frekvenci vyšší než 2 kHz, dochází k tzv. skin efektu, kdy proud neprochází do těla, ale drží se pouze na povrchu. Díky tomu nemůže poškodit důležité vnitřní orgány.<sup>26</sup>

Z těchto důvodů je tedy nutné, aby každý, kdo pracuje s elektřinou, dodržoval několik základních pravidel, která mohou snížit riziko úrazu. V zásadě by pracovník měl pracovat v klidu a být dobře odpočatý. Neměl by být při práci rozptylován. Součástí jeho oděvu by měly být boty s gumovou podrážkou, a naopak by neměl nosit kovové předměty. V blízkosti by měl být další dohlížející pracovník, který by byl schopný zasáhnout v případě nouze. V takovémto případě by měl být po ruce i hasicí přístroj typu C. Poslední pravidlo, tedy mít při práci na zařízení s vysokým napětím neustále jednu ruku v kapse, má zabránit propojení obvodu, který by procházel přímo přes srdce, což by mohlo vést k jeho poškození, či přímo k usmrcení.<sup>27</sup>

---

<sup>25</sup> TILBURY, Mitch. *The Ultimate Tesla Coil Design and Construction Guide*. McGraw-Hill Professional Publishing, 2007, s. 4. ISBN 978-0071497374.

<sup>26</sup> Volně podle: BROŽ, Jaromír. *Elektřina a magnetismus*. I. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1974, s. 99.

<sup>27</sup> Pravidla volně převzata z: LYSENKO, Vladimír. *VN zdroje: zdroje vysokého napětí pro experimenty, pokusy a měřicí přístroje, ochranné pomůcky*. Praha: BEN – technická literatura, 2008, s. 221. ISBN 978-80-7300-235-0.

TILBURY, Mitch. *The Ultimate Tesla Coil Design and Construction Guide*. McGraw-Hill Professional Publishing, 2007, s. 8–9. ISBN 978-0071497374.

## 4.2 BEZPEČNOST PŘI PRÁCI S TESLOVÝM TRANSFORMÁTOREM

Bezpečnostní opatření pro práci s Teslovým transformátorem stojí z velké části na zásadách pro práci s vysokým napětím. Nicméně najdou se i taková, která jsou pro toto zařízení přidána. Je to zejména z toho důvodu, že primárním obvodem prochází střídavý proud obdobně jako u sekundárního vinutí, jeho frekvence však může být menší než 2 kHz, a tedy i potenciálně smrtící. Navíc, pokud máme sestrojený transformátor s mechanickým jiskřištěm, může dojít ke kontaktu s tímto neizolovaným konstrukčním prvkem, není-li správně zabezpečen.

Platí tedy, že u jakéhokoli Teslova transformátoru se nikdy nedotýkáme odizolovaných částí primárního obvodu. Dále pak, pokud manipulujeme s Teslovým transformátorem s jiskřištěm, bychom měli mít ochranu zraku a sluchu. Jiskry produkované na jiskřišti totiž obsahují škodlivé ultrafialové paprsky, které mohou poškodit lidský zrak. Taktéž tyto jiskry vydávají hlasitý praskavý zvuk, který při delším vystavení může poškodit sluchové ústrojí.<sup>28</sup>

## 4.3 BEZPEČNOST PŘI ŠKOLNÍCH POKUSECH

Každý učitel fyziky, který ve své výuce využívá elektrických zařízení, což zahrnuje i Teslův transformátor, musí splňovat podmínky stanovené § 11 odst. 3 vyhlášky č. 50/1978 Sb. Tedy musí „být zaškolen v používání daných zařízení a taktéž se alespoň jednou za tři roky podrobit přezkoušení z těchto znalostí.“<sup>29</sup> Pokud má používaný přístroj návod k použití, řídíme se v souladu s ním. To platí většinou pro zakoupené školní pomůcky, například pro demonstrace elektromagnetických jevů.

---

<sup>28</sup> Volně podle: TILBURY, Mitch. *The Ultimate Tesla Coil Design and Construction Guide*. McGraw-Hill Professional Publishing, 2007, s. 7–9. ISBN 978-0071497374.

<sup>29</sup> Vyhláška č. 50/1978 Sb. In: *Elektrotechnický svaz český*, z. s. [online]. Praha: Elektrotechnický svaz český [cit. 2022-03-20]. Dostupné z: <https://www.elektrosvaz.cz/odborna-zpusobilost/vyhlaska-c-50-1978-sb>

Kromě toho je v zájmu každého učitele předcházet a zabraňovat jakýmkoli možným úrazům žáků. Všeobecně podmínky pro bezpečnost na základní škole určuje rámcový vzdělávací program pro základní vzdělávání.<sup>30</sup> Ten navíc dodává, že všechny potenciálně nebezpečné předměty mají být viditelně označeny, a že má být pravidelně kontrolována jejich bezpečnost. Dále je u učitelů nutná praktická znalost první pomoci i kontaktů na integrovaný záchranný systém spolu s přítomností prostředků k poskytnutí první pomoci.<sup>31</sup>

---

<sup>30</sup> VOKÁČ, Petr. *Školský zákon: zákon č. 561/2004 Sb., o předškolním, základním, středním, vyšším odborném a jiném vzdělávání*. 6., přepracované vydání. Třinec: Resk, spol. s r.o., 2016, s. 16. ISBN 978-80-87675-13-7.

<sup>31</sup> JEŘÁBEK, Jaroslav. *Rámcový vzdělávací program pro základní vzdělávání*. Stařeč: Infra, 2005, s. 104–106. ISBN 80-86666-24-7.

## 5 NAVRHOVANÉ POKUSY S TESLOVÝM TRANSFORMÁTOREM

### 5.1 ROZSVĚCENÍ ZÁŘIVKY

#### 5.1.1 PRINCIP POKUSU

Se zářivkami se dnešní žáci setkávají v podstatě na denní bázi. Jedná se o efektivní způsob osvětlení, který má však na rozdíl od klasické žárovky poněkud komplikovanější princip funkce, než jaký by se dal jednoduše probrat v rámci fyziky na základní škole.

Zářivka, jejíž tělo je tvořeno skleněnou trubicí, je naplněna zředěnou směsí par rtuti a argonu. Přivedeme-li na její elektrody elektrické napětí, způsobíme ionizaci této plynné směsi, čímž dochází k uvolnění fotonů do prostoru. Toto vzniklé záření se však nachází v ultrafialové oblasti spektra, a je tudíž pro účely využití lidmi nevhodné. Proto je na vnitřních stěnách trubice nanesen luminofor, který převádí ultrafialové světlo na světlo viditelné lidským okem.<sup>32</sup>

K již zmíněné ionizaci zředěného plynu nemusí docházet jen díky zapojení do elektrického obvodu, ale i díky umístění do dostatečně silného elektromagnetického pole. Díky tomu, umístíme-li zářivku do blízkosti sekundárního vinutí aktivního Teslova transformátoru, můžeme přenést bezdrátově elektrickou energii a přeměnit ji na světlo. Ionizace ale nemusí probíhat jen ve směsi rtuti a argonu. Tímto způsobem můžeme například rozsvěcet zkumavky s neonem, případně se vzduchem ve stavu podtlaku.

Použijeme-li tedy kupříkladu injekční stříkačku, do jejíhož výstupu zasadíme hřebík, můžeme na ní prezentovat korónovou ionizaci. Ta se od výbojové ionizace, popisované v minulém odstavci, odlišuje zejména svým nápadným tvarem připomínající blesk. Navíc tato ionizace nemusí být dostatečně výkonná k tomu, aby rozsvítila celý objem plynu. Korónu<sup>33</sup> však můžeme pozorovat už na samotném zakončení sekundární cívký Teslova transformátoru. Koróna v injekční stříkačce s nízkým tlakem ale dosahuje větších rozměrů. To je způsobeno zvětšenou střední volnou dráhou, která je nepřímo úměrná tlaku plynu.

<sup>32</sup> Volně podle: KUSALA, Jaroslav. Zářivky. *Metodický portál: Články* [online]. 26. 06. 2007 [cit. 2022 03 22]. ISSN 1802-4785. Dostupné z: <https://clanky.rvp.cz/clanek/1456/ZARIVKY.html>.

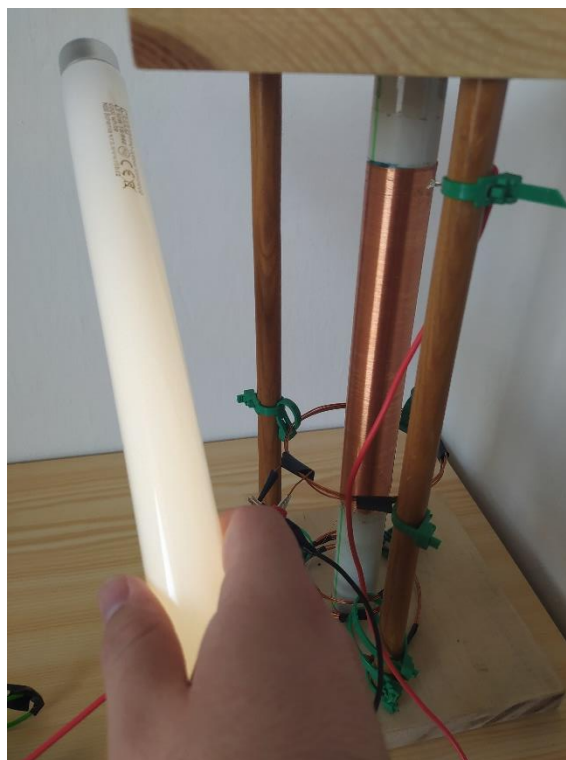
<sup>33</sup> Volně podle: Samostatný výboj v plynu za atmosférického a za sníženého tlaku: MEF. *Fyzika: MEF* [online]. 2006 [cit. 2022-03-24]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/283-samostatny-vyboj-v-plynu-za-atmosferickeho-a-za-snizeneho-tlaku>



### 5.1.2 PRŮBĚH POKUSU

Připravíme si Teslův transformátor, výbojkovou zářivku a dvě upravené injekční stříkačky. Do každé z injekčních stříkaček zasadíme hřebík tak, aby jeho kus vyčníval a kus byl uvnitř nádoby. Ve vyústění tyto hřebíky zafixujeme pomocí tavné lepicí pistole. Rozdíl mezi těmito dvěma upravenými stříkačkami je, že do jedné zabudujeme hřebík, zatímco v ní je minimum vzduchu, kdežto v druhé je ho maximum. To ovlivníme pístem.

Při prezentaci nejprve uvedeme Teslův transformátor do provozu a upozorníme žáky na korónu, tvořící se na zakončení sekundární cívky. Následně přiblížíme zářivku do okolí sekundární cívky, načež v zářivce díky působení elektromagnetického pole dojde k ionizaci a následné emitaci světla (viz Obrázek 12). Poté, co si všichni žáci v klidu prohlédnou daný jev, můžeme zářivku oddálit a prezentovat, že elektromagnetické pole působí dostatečně silně jen na určitou vzdálenost. Tedy s postupným oddálením klesá i intenzita světla vydávaného zářivkou.



Obrázek 12 - Rozsvěcení zářivky

Po prezentaci se zářivkou můžeme uchopit nejprve injekční stříkačku, jejíž obsah (vzduch) má atmosférický tlak. Přiblížíme hřebík vyčnívající ze stříkačky ke koróně na sekundární cívce a ta se částečně přenesse i do vnitřku stříkačky. Následně zopakujeme tentýž postup pro stříkačku s menším objemem, ale před přiblížením k sekundární cívce posuneme pístem injekce. Tím zvětšíme objem obsaženého vzduchu a zároveň snížíme jeho tlak. Po přiblížení ke koróně by tedy mělo dojít k většímu výboji uvnitř injekční stříkačky, než tomu bylo u té s normálním tlakem. Po dokončení pokusu vypneme Teslův transformátor a odložíme zbylé pomůcky. Následně by se mohl čas věnovat již čistě výkladu, případně diskusi se žáky nad možnými příčinami daných jevů, které mohli pozorovat.

### 5.1.3 NÁVRH DIDAKTICKÉHO VYUŽITÍ

Pokus můžeme koncipovat jako motivaci před zahájením učebního celku transformátory.<sup>34</sup> Na začátek hodiny si připravíme věci potřebné k experimentu a s žáky zopakujeme pojmy cívka, elektromagnetické pole, střídavý proud a ionizace. To můžeme provést jako krátké cvičení, při němž se postupně ptáme celé třídy a necháváme odpovídat žáky, kteří se přihlásí. Pokud by došlo ke špatnému vysvětlení pojmu ze strany žáka, necháme zbytek třídy, aby se pokusili chybu opravit, případně ji pro ušetření času opravíme sami.

Následně provedeme výše popisovaný pokus, během něhož žákům vysvětlíme, že v okolí sekundárního vinutí Teslova transformátoru vzniká silné elektromagnetické pole, které je dostatečně silné na to, aby zapříčinilo ionizaci plynu v zářivce. Totéž opakujeme pro injekční stříkačky, s tím objasněním, že plyn v nich není natolik přizpůsoben pro ionizaci jako plyn v zářivce.

Po ukončení pokusu se žáků zeptáme, proč bylo elektromagnetické pole v okolí sekundární cívky natolik silné, že mohlo způsobovat tak silnou ionizaci. Snažíme se je tak řízenou diskusí dovést k závěru, že na tuto cívku muselo být dovedeno velmi vysoké napětí. Odkazujeme se tak na poznatky, které žáci získali z tematického celku generátory elektrického napětí. Pokračujeme ve výkladu konstatováním, že generovat velmi vysoké napětí může být problematické, nicméně místo toho můžeme libovolné napětí přetrasformovat na napětí libovolné velikosti. K tomu nám slouží transformátory napětí, mezi které můžeme zařadit i Teslův transformátor.

Pro další, bližší objasnění funkce transformátorů můžeme pokračovat v hodině dalším pokusem, například takovým, jaký je popisován v učebnici Fyzika 9 na straně 21.<sup>35</sup>

---

<sup>34</sup> Tematický celek převzat z: RANDA, Miroslav, HAVEL, Václav, KÉHAR, Ota, KOHOUT, Václav, KRATOCHVÍL, Pavel, MASOPUST, Pavel, PROKŠOVÁ, Jitka a RAUNER, Karel. *Fyzika 9: učebnice pro základní školy a víceletá gymnázia*. Plzeň: Fraus, 2019, s. 21–23. ISBN 978-80-7489-476-3.

<sup>35</sup> RANDA, Miroslav, HAVEL, Václav, KÉHAR, Ota, KOHOUT, Václav, KRATOCHVÍL, Pavel, MASOPUST, Pavel, PROKŠOVÁ, Jitka a RAUNER, Karel. *Fyzika 9: učebnice pro základní školy a víceletá gymnázia*. Plzeň: Fraus, 2019, s. 21. ISBN 978-80-7489-476-3.

## 5.2 FARADAYOVA KLEC

### 5.2.1 PRINCIP POKUSU<sup>36</sup>

Faradayova klec, vynalezená roku 1836 fyzikem Michaellem Faradayem, je dodnes používaná pomůcka na odstínění určitých částí prostoru od statického elektrického pole či elektromagnetického vlnění. Můžeme se s ní denně setkat u mikrovlnné trouby či u transformátorů elektrických stanic.

Samotná klec využívá skutečnosti, že pokud se elektrický vodič nachází v elektrickém poli, dochází u něj k přesunu elektrického náboje k jeho povrchu. Přesněji, kladné náboje se přesunou k záporné elektrodě, která vytváří elektrické pole. Záporné náboje k elektrodě kladné. Tím vzniká uvnitř vodiče, v ideálním případě, nulové elektrické pole, a to v důsledku vyrušení polarit vnějšího elektrického pole a pole vyvolaného přesunutými náboji na povrchu vodiče. To platí i v případě, že má vodivý materiál uvnitř dutinu, která je díky tomuto jevu chráněna před účinky vnějšího elektromagnetického pole. Vodič navíc nemusí být ani plně souvislý, jak už název napovídá, ale může se jednat o klec s oky, ty však musejí splňovat určité parametry, aby mohla celá konstrukce odstínit dané pole.

Faradayova klec může taktéž izolovat elektromagnetické pole, které je umístěno v jejím vnitřku od okolí. V takovém případě však musí být klec uzemněna.

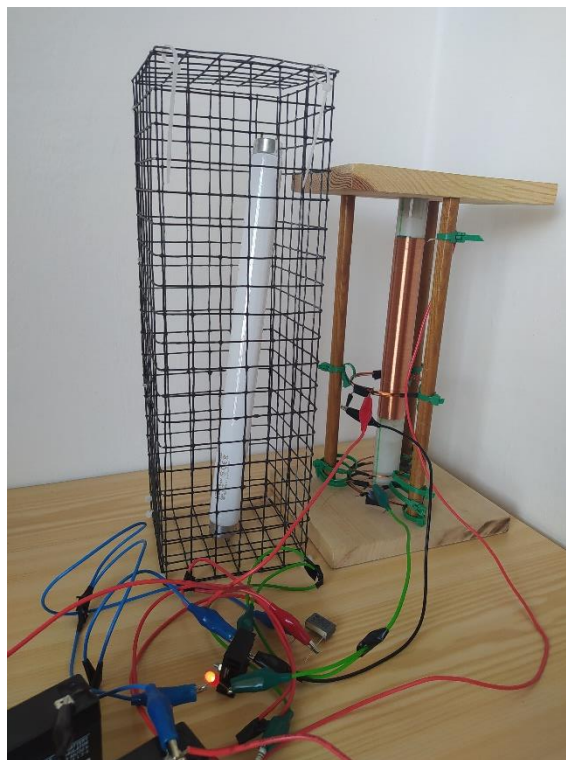
### 5.2.2 PRŮBĚH POKUSU

Připravíme si Teslův transformátor, výbojkovou zářivku a Faradayovu klec, kterou máme buď koupenou jako fyzikální pomůcka, anebo si ji můžeme snadno vyrobit z pletiva s dostatečně malými oky. Zářivku pak volíme pro účely tohoto pokusu takovou, aby se dala celá bez problémů vložit do používané Faradayovy klece. Pro zabránění případného tvoření jisker mezi klecí v elektrickém poli a zářivkou, můžeme elektrody zářivky zajistit pomocí elektrikařské izolační pásky.

---

<sup>36</sup> Volně podle: HAVRÁNEK, Miroslav. Nové poznatky o účinnosti Faradayovy klece. *Aldebaran bulletin: týdeník věnovaný aktualitám a novinkám z fyziky a astronomie* [online]. Praha: Aldebaran Group for Astrophysics, 2015, roč. 13, č. 35 [cit. 2022-03-25]. ISSN 1214-1674. Dostupné z: [https://www.aldebaran.cz/bulletin/2015\\_35\\_far.php](https://www.aldebaran.cz/bulletin/2015_35_far.php)

Při samotném pokusu ze všeho nejdříve uvedeme Teslův transformátor do provozu a provedeme prezentaci účinků elektromagnetického pole vyvolaného sekundární cívkou na zářivku, obdobně jako u pokusu v kapitole 5.1. Poté, co je tento jev důsledně předveden, můžeme zářivku umístit do Faradayovy klece do blízkosti sekundární cívky. Tentokrát by měla zůstat zhasnutá (viz Obrázek 13). Pro lepší názornost můžeme následně zářivku z klece vyjmout ve stále stejné vzdálenosti od Teslova transformátoru, díky čemuž bude vidět její rozsvícení v okamžik, kdy opustí oblast, která je Faradayovou klecí odstíněná od elektromagnetického pole.



Obrázek 13 - Faradayova klec u zapnutého Teslova transformátoru

Alternativně, pokud nám to dovolují rozměry transformátoru a klece, můžeme umístit Teslův transformátor přímo do Faradayovy klece. Opět pomocí zářivky ověříme, že Faradayova klec odstíní elektromagnetické pole a podáme adekvátní vysvětlení třídě. Po skončení pokusu vypneme Teslův transformátor a odložíme pomůcky.

### 5.2.3 NÁVRH DIDAKTICKÉHO VYUŽITÍ

Tento experiment můžeme zařadit do výkladu o bezpečnosti práce s elektrickými spotřebiči<sup>37</sup> a o ochraně života při bouřce. Během výkladu se můžeme žáků zeptat, jak by se zachovali při bouřce za různých podmínek. Pokaždé bychom po nich chtěli, aby se nad situací zamysleli, předložili na základě diskuse nejvhodnější řešení a zkusili odhadnout, jak moc by je jejich jednání ochránilo nebo naopak ohrozilo.

<sup>37</sup> Tematický celek převzat z: RANDA, Miroslav, HAVEL, Václav, KÉHAR, Ota, KOHOUT, Václav, KRATOCHVÍL, Pavel, MASOPUST, Pavel, PROKŠOVÁ, Jitka a RAUNER, Karel. *Fyzika 9: učebnice pro základní školy a víceletá gymnázia*. Plzeň: Fraus, 2019, s. 31–32. ISBN 978-80-7489-476-3.

Jako jeden z příkladů bychom zvolili situaci, kdy jedou v automobilu během bouřky domů. Vzhledem k životním zkušenostem žáků je možné, že většina odpoví správně, tedy že v automobilu jsou ve větším bezpečí než v otevřeném prostoru, ale už nemusí vědět, proč tomu tak je. Proto tedy přistoupíme k názorné demonstraci pomocí pokusu s Teslovým transformátorem a Faradayovou klecí. Můžeme pro zjednodušení říct, že rozsvícení zářivky znamená možnost zasažení bleskem. Toto jednoduché znázornění určí, jestli bylo těleso uvnitř klece zasaženo elektrickým proudem, aniž bychom museli provádět složitá měření.

Po ukončení pokusu dokončíme diskusi vedenou žáky, při které se je snažíme navést k poznatku, že uzavřená kovová konstrukce chrání svůj vnitřek před elektromagnetickým polem a zároveň před přímým zásahem elektrického proudu. To je způsobeno skutečností, že elektrický proud se v tomto případě udržuje na povrchu kovové konstrukce a neproniká dovnitř. Tedy, pokud se Faradayovy klece přímo nedotýkáme, jsme v ní v bezpečí.

### 5.3 ELEKTROMAGNETICKÁ INDUKCE PRIMÁRNÍ CÍVKY

#### 5.3.1 PRINCIP POKUSU

Prochází-li elektrický proud vodičem, vzniká v jeho okolí magnetické pole. Tento jev však působí i opačně. Je-li vystaven elektrický vodič magnetickému poli, indukuje se na něm elektrický proud.

Tato elektromagnetická indukce zajišťuje chod kupříkladu transformátorů na převod elektrického napětí. Na primární cívku přivedeme elektrický proud, který v jejím okolí vytvoří magnetické pole. Jedná-li se o cívku solenoidového tvaru, vektor magnetické indukce tohoto pole zaujímá rovnoběžný směr s osou cívky. Následně můžeme pomocí vzniklého pole indukovat elektrický proud na sekundární cívce, která není nikterak propojena s cívkou primární. Pro to, aby se tento jev uskutečnil, musíme splnit několik předpokladů. Vzdálenost obou cívek musí být dostatečně malá, aby na cívku sekundární působila dostatečně velká složka magnetického pole. Zároveň musí docházet ke změně daného magnetického pole. Toho můžeme dosáhnout buď změnou vzdáleností mezi cívkami. Za technicky jednodušší řešení se ale jeví napájení primární cívky pomocí střídavého napětí, které zaručuje periodickou změnu polaritu magnetického pole.<sup>38</sup>

Dalším důležitým faktorem pro uskutečnění elektromagnetické indukce je závislost magnetického indukčního toku na vzájemné orientaci cívek. Ta je dána matematickým vztahem  $\Phi = B \cdot S \cdot \cos \alpha$ <sup>39</sup>, kde  $\Phi$  je magnetický indukční tok,  $B$  je magnetická indukce,  $S$  je plocha uzavřená cívkou (na které chceme indukovat proud) a  $\alpha$  je úhel, jenž je svírán vektorem magnetické indukce a normálou plochy ohraničené cívkou. Protože nás u zjišťování úhlu  $\alpha$  nezajímá orientace vektoru magnetické indukce ani normály plochy, může tento úhel nabývat pouze hodnot z intervalu  $\alpha \in (0; \frac{\pi}{2})$  a tedy  $\cos \alpha \in (0; 1)$ . Proto největšího výkonu dosáhneme při rovnoběžném umístění os obou cívek a nulového výkonu při jejich vzájemně kolmé orientaci.

---

<sup>38</sup> Volně podle: BROŽ, Jaromír. *Elektřina a magnetismus*. II. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1976, s. 140–142.

<sup>39</sup> Vzorec převzat z: BROŽ, Jaromír. *Elektřina a magnetismus*. II. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1976, s. 164.

### 5.3.2 PRŮBĚH POKUSU<sup>40</sup>

Připravíme si Teslův transformátor s odnímatelnou sekundární cívkou. Jako další pomůcku budeme potřebovat žárovku připevněnou na cívku tak, že s ní vytváří uzavřený obvod. Tato cívka by měla mít pouze pár závitů a měla by být kvůli bezpečnosti celá izolovaná. Pro lepší a bezpečnější uzavření tohoto obvodu je vhodné vyvést cívku do objímky, do které následně zašroubujeme žárovku. Díky tomu by neměl být na celé konstrukci žádný elektricky neizolovaný komponent.

Vyjmeme sekundární cívku z Teslova transformátoru a uvedeme jej do chodu. Uchopíme obvod obsahující cívku a žárovku a přibližujeme jej k primární cívce. Snažíme se udržovat cívky tak, aby jejich osy byly rovnoběžné. Jakmile se s cívkou dostatečně přiblížíme k magnetickému poli, žárovka se začne rozsvěcet. Až dojde k ustálení jejího světla, můžeme přestat zmenšovat vzdálenost mezi cívkami.

Jakmile je tento efekt dostatečně prezentován, začneme pomalu měnit úhel, který svírají cívky, aniž bychom měnili jejich vzdálenost. Během tohoto pohybu je možné pozorovat postupné pohasínání žárovky. Ta následně zhasne, jsou-li cívky na sebe kolmé (viz Obrázek 14).

Pokud budeme pokračovat v otáčení cívky se žárovkou, ta se začne opět pomalu rozsvěcet. Poté, co znovu dosáhneme bodu, kdy se žárovka plně rozsvítí, můžeme ji vyjmout z magnetického pole transformátoru. Ten následně vypneme a ukončíme pokus.



Obrázek 14 - Prezentace magnetické indukce pomocí primární cívky Teslova transformátoru

<sup>40</sup> Volně podle: RAUNER, Karel. Několik pokusů s Teslovým transformátorem. *Metodický portál: Články* [online]. 30. 10. 2006 [cit. 2022-03-23]. ISSN 1802-4785. Dostupné z: <https://clanky.rvp.cz/clanek/968/NEKOLIK-POKUSU-S-TESLOVYM-TRANSFORMATOREM.html>.

### 5.3.3 NÁVRH DIDAKTICKÉHO VYUŽITÍ

Tohoto pokusu můžeme využít během probírání tematických celků elektromagnetická indukce a generátory elektrického napětí.<sup>41</sup> Před samotným pokusem nejprve s žáky zopakujeme, co jsou to magnetické siločáry a jakou mají orientaci u permanentního magnetu. Následně připomeneme, jaký směr mají magnetické siločáry u cívky zapojené do elektrického obvodu. Snažíme se žáky dovést k faktu, že siločáry jsou rovnoběžné s osou cívky.

Dále provedeme pokus s Teslovým transformátorem a žárovkou zapojené do obvodu s cívkou. Během pokusu upozorníme žáky, aby si všímali vzájemné polohy cívek. Po skončení pokusu utváříme prostor pro diskusi, jejímž cílem je objasnění sledovaného jevu (rozsvícení a pohasínání žárovky podle natočení obou cívek). Poznatek, který si z tohoto experimentu mají žáci odnést je, že na cívce se generuje největší napětí právě, když jejím vnitřkem procházejí magnetické siločáry rovnoběžně s její osou.

Jakmile žáci dojdou k tomuto závěru, můžeme volně navázat na výklad zaměřený na generátory elektrického napětí, které tohoto jevu využívají. Pro větší názornost pak také můžeme provést pokus popisovaný v učebnici Fyzika 9 na straně 17.<sup>42</sup>

---

<sup>41</sup> Tematické celky převzaty z: RANDA, Miroslav, HAVEL, Václav, KÉHAR, Ota, KOHOUT, Václav, KRATOCHVÍL, Pavel, MASOPUST, Pavel, PROKŠOVÁ, Jitka a RAUNER, Karel. *Fyzika 9: učebnice pro základní školy a víceletá gymnázia*. Plzeň: Fraus, 2019, s. 14–18. ISBN 978-80-7489-476-3.

<sup>42</sup> RANDA, Miroslav, HAVEL, Václav, KÉHAR, Ota, KOHOUT, Václav, KRATOCHVÍL, Pavel, MASOPUST, Pavel, PROKŠOVÁ, Jitka a RAUNER, Karel. *Fyzika 9: učebnice pro základní školy a víceletá gymnázia*. Plzeň: Fraus, 2019, s. 17. ISBN 978-80-7489-476-3.

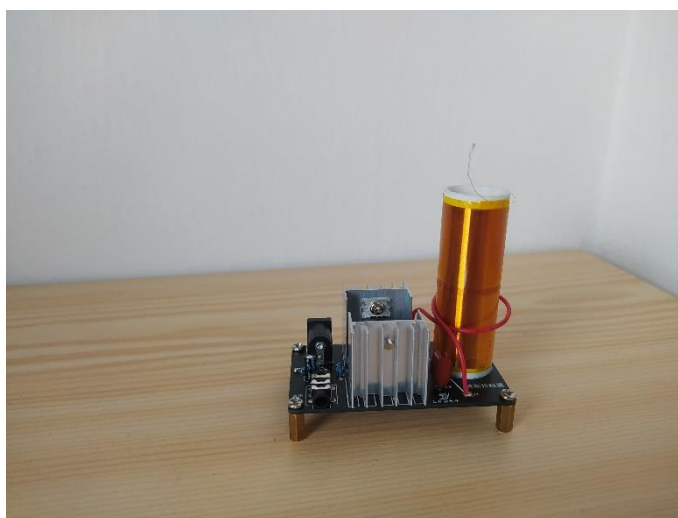


## 5.4 HUDEBNÍ MODULACE TESLOVA TRANSFORMÁTORU

### 5.4.1 PRINCIP POKUSU

Obvod Teslova transformátoru se dá upravit více způsoby, než jaké byly popsány v kapitole 2 této práce. Jedním z nich je i rozšíření SSTC o signálový vstup přes audio kabel. Přes ten se do zapojeného transformátoru mohou přivádět zvukové signály ze souborů MP3, které se následně zesílí přes tranzistor a cívky. Vzniklá koróna na sekundární cívce pak plní stejnou funkci jako klasický reproduktor. Pouze namísto vibračního pohybu, který u reproduktoru rozkmitává molekuly vzduchu a tím přenáší zvuk do okolí, vytváří výboj teplotní změny, které napomáhají rozpínání okolního vzduchu. Tímto způsobem následně vzniká podélné vlnění, které interpretujeme jako zvuky. Díky vysoké frekvenci oscilací navíc korónový výboj může dostatečně rychle měnit svou velikost a tím měnit i intenzitu a charakter vytvářeného zvuku.<sup>43</sup>

Je třeba zdůraznit, že takováto úprava obvodu Teslova transformátoru není zcela triviální a vyplatí se spíše pořídit přístroj již upravený (viz Obrázek 15). Příkladem může být ten, který je prodáván na webu Pájeničko.cz.<sup>44</sup>



Obrázek 15 - Teslův transformátor s hudební modulací

<sup>43</sup> Volně podle: BOČEK, Vít. Osciloskop za 300 Kč a další výhodné fyzikální nákupy. In: HOLUBOVÁ, Renata, ed. *Veletrh nápadů učitelů fyziky 22*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2017, s. 58-59. ISBN 978-80-244-5226-5.

<sup>44</sup> Teslův transformátor s audio modulací. *Pájeničko.cz* [online]. 2022, Pájeničko s.r.o. [cit. 2022-04-22]. Dostupné z: <https://pajenicko.cz/tesluv-transformator-s-audio-modulaci>

### 5.4.2 PRŮBĚH POKUSU

Připravíme si Teslův transformátor s hudební modulací, audio kabel a počítač, na kterém máme soubor MP3, který chceme prezentovat. Nejprve pustíme soubor přes reproduktory počítače. Poté propojíme počítač a Teslův transformátor pomocí audio kabelu a transformátor uvedeme do chodu. Opět přehrajeme soubor MP3, tentokrát však pomocí koróny. Po skončení přehrávání vypneme Teslův transformátor a vypojíme z něj audio kabel.

### 5.4.3 NÁVRH DIDAKTICKÉHO VYUŽITÍ

Výše popsaný pokus bychom mohli za účelem lepšího pedagogického využití zařadit do tematického celku zvuk, zdroje zvuku.<sup>45</sup> Před zahájením experimentu začneme s žáky diskusi zaměřenou na zdroje zvuků, které znají. Pro každý příklad, jež žáci uvedou, po nich nadále chceme i vysvětlení, jak přesně zvuk v daném momentu vzniká. Pro objasnění, pokud by některý ze žáků řekl, že zdrojem zvuku jsou lidské hlasivky, chceme k tomu slyšet dodatečnou informaci o tom, že zvuk vzniká díky vibraci hlasivek, což rozkmitá molekuly vzduchu. To následně můžeme vnímat jako zvuk.

Pro potřeby uvedení našeho pokusu chceme, aby se mezi žáky začalo rozebírat, jak vzniká zvuk úderu blesku (hrom). Sami můžeme toto téma přivést do popředí, jestliže jej žáci sami nezmíní. Navážeme přímou otázkou: „Jak tedy vzniká hrom?“

Následně můžeme očekávat dvě věci. Buď žáci neví správnou odpověď (snaží se například o vysvětlení pomocí úderu blesku do stromu či jiného objektu), anebo alespoň jeden ze žáků ví, že zvuk v tomto případě vzniká díky rozpínání vzduchu zapříčiněným rychlou změnou tlaku způsobenou bleskem. V každém případě však můžeme navázat na tuto konverzaci pomocí pokusu, který má demonstrovat vznik zvuku za využití elektrického výboje.

Po skončení pokusu můžeme věnovat ještě krátkou chvíli pro správné porozumění jevu, případně se posunout ve výuce dál, pokud žáci pochopili, co bylo cílem experimentu.

---

<sup>45</sup> Tematický celek převzat z: RANDA, Miroslav, KOHOUT, Jiří, KOHOUT, Václav, KRATOCHVÍL, Pavel, MASOPUST, Pavel, PETŘÍK, Josef, PROKŠOVÁ, Jitka a RAUNER, Karel. *Fyzika 8: učebnice pro základní školy a víceletá gymnázia*. Plzeň: Fraus, 2018, s. 80–82. ISBN 978-80-7489-392-6.

## 5.5 PŘENOS ENERGIE MEZI DVĚMA TESLOVÝMI TRANSFORMÁTORY

### 5.5.1 PRINCIP POKUSU

Nikola Tesla zaslíbil několik posledních let svého výzkumu zejména zkoumání technologie bezdrátového přenosu energie. Zejména díky svému transformátoru a jím generovanému magnetickému poli dokázal na svých přednáškách rozsvěcet vzduchoprázdné trubice. Větším cílem ale bylo, aby se tato přenesená energie dala libovolně využít.

Toho se dá alespoň částečně dosáhnout za pomoci dvou Teslových transformátorů, které jsou oba naladěny na totožnou rezonanční frekvenci. Pro zjednodušení procesu výroby se může jednat o dva totožné transformátory. Jeden z těchto transformátorů budeme nadále nazývat vysílač a druhý přijímač.

Zapneme-li vysílač a umístíme do jeho dostatečné blízkosti přijímač, elektromagnetické pole vysílače začne působit na přijímač. Ten tedy na sobě začne indukovat elektrický proud, nejprve na sekundárním vinutí a následně díky vazbě i na vinutí primárním. Zapojíme-li do primárního obvodu přijímače žárovku jako zátěž, měla by se rozsvítit. Tím lze dokázat, že se přenos energie pomocí elektrické složky elektromagnetického pole uskutečnil.<sup>46</sup>

### 5.5.2 PRŮBĚH POKUSU

Připravíme si dva Teslovy transformátory: vysílač a přijímač. Umístíme je od sebe do předem zjištěné vzdálenosti, ve které je přenos energie dostatečný pro rozsvícení žárovky na přijímači. Poté uvedeme do chodu vysílač a můžeme pozorovat, která se na přijímači rozsvítí zátěžová žárovka. Jakmile je tento jev dostatečně pozorován žáky, můžeme vysílač vypnout a pokus ukončit. Případně, máme-li k dispozici Faradayovu klec dostatečných rozměrů, můžeme do ní umístit přijímač a opět zapnout vysílač. Tím můžeme prezentovat efekt Faradayovy klece, obdobně jako u pokusu v kapitole 5.2.

---

<sup>46</sup> KRBAL, M.; BAXANT, P. Wireless Energy Transfer by Tesla Coil. In *Sborník prací konference a soutěže Student EEICT 2012*. 2012. s. 168-171. ISBN: 978-80-214-4462-1.

### 5.5.3 NÁVRH DIDAKTICKÉHO VYUŽITÍ

Experiment s přenosem energie mezi dvěma Teslovými transformátory není jednoduše implementovatelný do konkrétního tematického celku probíraného na základní škole. Samozřejmě jej můžeme zařadit do výuky jako „zpestření“, nicméně by se jednalo o samoučelný pokus, který by spíše odváděl pozornost žáků od důležitějších částí výuky.<sup>47</sup>

Jednou z možností přirozeného zařazení experimentu do výuky je kupříkladu zavedení žákovských referátů o významných fyzicích. Učitel by vytvořil seznam fyziků, ze kterého by si žáci mohli vybírat a následně zpracovat referát, jež by přednesli před celou třídou na začátku nebo na konci hodiny (záleží na uvážení učitele). Žák by měl ve svém referátu uvést základní údaje o vybraném fyzikovi, o jeho životě a zejména o jeho přínosu fyzice (vzorec, objevení určitého jevu, vynález atd.). Jako doprovod tohoto referátu můžeme žákům doporučit i určité pokusy, které buď mohou žáci provádět zcela sami, případně jim může učitel dodat potřebné pomůcky a před hodinou jim pomoci komplikovanější pokus připravit.

Jako jedno z témat takovýchto referátů můžeme navrhnout Nikolu Teslu. Jako doprovod k němu můžeme doporučit žákovi, který danou prezentaci zpracovává, výše zmíněný experiment s přenosem energie. Ten by, v doprovodu výkladu o životě Nikoly Tesly a jeho snaze o bezdrátovém přenosu elektrické energie, mohl dodat potřebný kontext k jinak samoučelnému pokusu.

Zde je samozřejmě nutné zmínit, že je v takovém případě nutné, aby se v kabinetu fyziky nacházely dva Teslovy transformátory s potřebnými parametry. Dále by učitel žákovi vysvětlil zjednodušeně princip pokusu a zaškolil by ho v bezpečném ovládní potřebných zařízení. Případně je možná pomoc učitele během průběhu experimentu, aby nedošlo ke zranění.

---

<sup>47</sup> SVOBODA, Emanuel a Růžena KOLÁŘOVÁ. *Didaktika fyziky základní a střední školy: vybrané kapitoly*. Praha: Karolinum, 2006, s. 107. ISBN 80-246-1181-3.

## 5.6 SESTAVENÍ OBVODU SSTC VE SKUPINĚ

Můžeme třídu připravit práci ve skupinách, kdy bude mít každá skupina za úkol sestavit několik elektrických obvodů. Skupiny by měly k dispozici elektronickou stavebnici a pracovní listy, které by obsahovaly jak schémata zadaných obvodů, tak dodatečné úlohy. Kupříkladu, co mají žáci na daném obvodu vyzkoušet, či veličiny, které mají na zadané části obvodu naměřit.

Součástí tohoto cvičení může být i sestavení jednoduchého SSTC obvodu, jehož základem může být například zapojení TC2 nacházející se výše v této práci. Učitel by předem připravil kromě potřebných součástek i konstrukci obsahující primární a sekundární cívky, s jasně označenými vývody, které odpovídají označení na pracovním listu. Žáci by tedy nejprve měli sestavit celý obvod a následně upozornit učitele, aby mohl zkontrolovat správnost jejich zapojení. Pokud by bylo v pořádku, učitel by připojil obvod ke zdroji elektrického napětí a uvedl jej tak do chodu. Následně by mohli žáci pod dohledem ověřovat dodatečné úlohy zanesené na pracovním listu (Příloha č. 1). To může být například rozsvícení zářivky pomocí elektromagnetického pole, či měření oscilací elektrického napětí na kolektoru tranzistoru. Po ukončení této činnosti učitel vypne přístroj a nechá studenty, aby postavili další obvod podle následující části pracovního listu. Nebo je nechá stavebnici uklidit, jednalo-li se o poslední měřící cvičení.

## 5.7 SESTAVENÍ SGTC

V případě, že je na škole fyzikální kroužek s nadanými žáky, případně nabízíme-li témata pro zpracování středoškolské odborné práce, můžeme žákům navrhnout možnost stavby Teslova transformátoru s mechanickým jiskřištěm.

V případě školního kroužku, kdy má učitel přeci jen větší účast na dění, je možné, abychom nejprve připravili předběžné schéma transformátoru. Následně bychom společně s žáky propočítali jednotlivé parametry součástek tak, abychom zaručili vzájemné naladění rezonančních frekvencí cívek. Následně bychom, společně s žáky, sestavili primární obvod. Pomoc učitele by přišla na řadu zejména v případě, že by žákům nešlo pájení a hrozilo by nebezpečí úrazu. Před připojením zdroje napětí bychom ještě zkontrolovali celý obvod a samotné zapojení by prováděl učitel za dodržení bezpečnostních pravidel pro práci s vysokým napětím.

## 6 ZHODNOCENÍ NAVRHOVANÝCH POKUSŮ

Výše uvedené pokusy můžeme rozdělit do tří kategorií podle jejich využitelnosti při výuce na základní škole. Pokusy vhodné pro zapojení do výuky; pokusy nevhodné pro zapojení do výuky a pokusy s náročností přesahující rámec základního školního vzdělávání. Do těchto skupin si nyní rozdělíme zmíněné experimenty na základě teoretických znalostí čerpaných z pedagogické literatury. Autor se zejména zaměřil na požadavek, že „pokus má být organickou součástí vyučovacího procesu.“<sup>48</sup> Pro větší přesnost tohoto rozdělení by bylo taktéž vhodné provést pedagogický výzkum na základních školách. Momentálně se však nejedná o ústřední zaměření této práce.

Mezi vhodné pokusy na základní školy můžeme zařadit: rozsvěcení zářivky, Faradayovu klec, elektromagnetickou indukci primární cívky a hudební modulaci Teslova transformátoru.<sup>49</sup> Tyto experimenty jsou snadno proveditelné s běžně dostupnými pomůckami a jejich objasnění je z větší části obsaženo v látce probírané na základních školách (případně na víceletých gymnáziích). Jedná se taktéž o pokusy, které jsou dobře viditelné při frontální prezentaci.

Složitější realizací by teoreticky mohlo být předvedení hudební modulace Teslova transformátoru. U té je potřeba dostatečný výkon, aby byl generovaný zvuk dobře slyšet po celé třídě, což nemusí zajistit všechny komerčně prodávané modely. Zaváděli bychom tedy tento konkrétní pokus pouze za předpokladu, že máme dostatečně hlasitý Teslův transformátor, u kterého předem zkontrolujeme alespoň subjektivní akustické vlastnosti. Typicky by při zapnutí měl být slyšet až z poslední lavice i za mírného hluku.

Za didaktické činnosti spojené s Teslovým transformátorem, které mohou svými nároky převyšovat stupeň vědomostí a schopností získaných na základní škole, můžeme považovat sestavení SSTC ve skupině a sestavení SGTC.

---

<sup>48</sup> SVOBODA, Emanuel a Růžena KOLÁŘOVÁ. *Didaktika fyziky základní a střední školy: vybrané kapitoly*. Praha: Karolinum, 2006, s. 106. ISBN 80-246-1181-3.

<sup>49</sup> Názvy pokusů odpovídají příslušným kapitolám, ve kterých jsou popisovány.

První zmiňovaná aktivita by musela být zakládána na pracovním listu, který by odpovídal očekávaným znalostem a schopnostem žáků nejvýše devátého ročníku základního vzdělávání. To však může být pro účely měření na Teslově transformátoru dosti restriktivní a bylo by tedy pedagogicky výhodnější použít jiného obvodu, na kterém žáci mohou měřit veličiny, se kterými jsou již navyklí pracovat. Skupinové měření SSTC však může být vhodné například na víceleté gymnázium, či na střední školu zaměřenou na elektrotechniku, kde naopak od studentů můžeme požadovat splnění náročnějších, avšak přiměřených, úloh.

Druhá zmiňovaná aktivita, sestavení SGTC, by se pak dala zcela přesunout do kompetence středoškolské odborné činnosti na elektrotechnických školách, zejména vzhledem k časové a odborné náročnosti.

Za demonstrační pokus, který se nehodí k zařazení do výuky, můžeme označit přenos energie mezi dvěma Teslovými transformátory. Prvně se jedná o experiment, který funguje jen pro dvojici na sebe naladěných transformátorů, což bez hlubšího pochopení rezonanční frekvence není možné dostatečně objasnit tak, aby to pro žáky nebylo zbytečně komplikované. Dále je nutné mít v kabinetu fyziky dva prakticky identické Teslovy transformátory, což nemusí být pro každého učitele fyziky realizovatelné. Samozřejmě je možné použít menších, komerčně vyráběných transformátorů, u těch ale nemusíme zajistit, že jimi indukované elektromagnetické pole bude dosahovat dostatečných rozměrů, pro které by byla možná názorná ukázka celé třídy.

## ZÁVĚR

Čtyřmi zásadami pro vypracování této práce byly: popis Teslova transformátoru a rozbor různých možností jeho konstrukce; zkonstruování jednoduchého Teslova transformátoru, měření jeho parametrů a zhodnocení vhodnosti využití ve výuce; návrh experimentů s Teslovým transformátorem; zhodnocení možností experimentů ve školské fyzice.

Prvním cílem bylo popsat Teslův transformátor. Toho bylo dosaženo v úvodu práce. Teoretických znalostí z této části bylo následně využito při zpracování zbylých částí bakalářské práce.

Na základě těchto poznatků byly pak sestaveny dva transformátory typu SSTC. Důvodem byla dostupnost součástek, jednoduchost zapojení, ale taktéž větší bezpečnost. Tím bylo dosaženo druhého cíle práce. Při měření parametrů se však ukázalo, že zkonstruované Teslovy transformátory nejsou zcela vhodné pro využití v pedagogické praxi. Nevykazovaly dostatečný výkon, který by byl potřebný pro jejich praktické využití během školních pokusů. Tento nedostatek by mohl být odstraněn buď použitím dvojice cívek se společnou rezonanční frekvencí, anebo spíše celkovou výměnou primárního obvodu za jiný typ. Primárně se nabízí SGTC, případně VTTC (za předpokladu, že by se sehnala vhodná elektronka).

Další důležitou částí této práce bylo sepsání několika návrhů na praktické využití Teslova transformátoru pro školní pokusy. Autor zde vytvořil popis sedmi pokusů, jejichž využití a komplikovanost se od sebe výrazně liší. Na některé je potřeba vhodně upravených Teslových transformátorů, jiné lze realizovat i s obvody popisovanými v této práci. Přes to však vhodnost některých popsáných pokusů může být diskutovatelná, především kvůli bezpečnosti, technické vybavenosti školy, případně nadměrné náročnosti na žáky.

Rozbor poznatků, které by měly vést k určení vhodnosti jednotlivých prezentovaných experimentů, byl předložen v poslední kapitole této práce. Souhrnně se dá říci, že samostatná či skupinová práce žáků s Teslovým transformátorem je z důvodů bezpečnosti a náročnosti nevhodná. U frontálně prováděných pokusů by pedagog měl dbát zejména na pochopitelné objasnění prezentovaných principů. Mimo to však záleží i na adekvátním zařazení experimentu do výuky, aby mohl obohatit právě probíraný tematický okruh.



Dalo by se tedy konstatovat, že všechny zadané cíle práce byly splněny. Přesto by mohlo být dosaženo lepších výsledků, použil-li by se výkonnější obvod pro Teslův transformátor, s jehož pomocí by bylo možné ověřit vhodnost uvedených pokusů ve školské praxi. Autor tuto možnost nechává na budoucí zkoumání, případně na jiné autory, kteří by dále rozpracovali toto téma.

## RESUMÉ

V této práci se autor zaměřuje na konstrukci Teslova transformátoru a jeho využití v praxi školské fyziky.

Úvodní část je zaměřena na osobu Nikoly Tesly a historii Teslova transformátoru, především pak na původní zapojení tohoto přístroje. Dále je oddíl věnovaný rozličným způsobům konstrukce daného transformátoru pomocí odlišných součástek a obvodů. V této části jsou obsaženy argumenty, které vedly autora ke konstrukci dvou zapojení typu SSTC, které jsou popsány a zhodnoceny jako převážně nevyhovující využití ve školní fyzice. Toto rozhodnutí je pak hlouběji podpořeno evidencí v části zaměřené na bezpečnost práce s Teslovým transformátorem, zejména ve školním prostředí.

Zbytek práce se věnuje popisu jednotlivých návrhů školních pokusů a dalších využití Teslova transformátoru jako pomůcky při výuce fyziky. Samotný závěr tvoří zhodnocení jednotlivých pokusů podle vhodnosti pro zařazení do výuky na základní škole s ohledem na znalosti žáků, ale též předpokládané vybavení kabinetu učitele fyziky.

The aim of this bachelor thesis is to construct the Tesla coil and to present its practical use in school physics.

The introduction focuses on the life of Nikola Tesla and the history of the Tesla coil (mainly on its original circuit). The next part is dedicated to various ways of assembling the Tesla coil with the use of different components and circuits. This part includes arguments, which led the author to the construction of the two SSTC type Tesla coils. These are described and evaluated mostly as not suitable for use in school physics. This decision is further supported by the evidence from the part of the thesis which deals with the work safety in a school environment.

The rest of the thesis is devoted to the description of individual proposals of school experiments and other uses of Tesla coil as an aid in teaching physics. The conclusion itself is an evaluation of the individual experiments according to their suitability for usage in elementary schools with high regard to the students' knowledge as well as to the equipment available to the physics teacher.

**SEZNAM LITERATURY**

- BOČEK, Vít. Osciloskop za 300 Kč a další výhodné fyzikální nákupy. In: HOLUBOVÁ, Renata, ed. *Veletrh nápadů učitelů fyziky 22*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2017, s. 58-59. ISBN 978-80-244-5226-5.
- BOKŠAN, Slavko. *Nikola Tesla a jeho dílo*. Brno: Rovnost, 1947.
- BROŽ, Jaromír. *Elektřina a magnetismus*. I. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1974.
- BROŽ, Jaromír. *Elektřina a magnetismus*. II. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1976.
- Coil32 – Self-capacitance of single-layer inductor. *Coil32.net* [online]. 1<sup>st</sup> February 2015 [cit. 2022-03-13]. Dostupné z: <http://coil32.net/theory/self-capacitance.html>
- DENICOLAI, Marco. *Tesla Transformer for Experimentation and Research*. Helsinki: Espoo: Helsinki University of Technology, 2001.
- HAVRÁNEK, Miroslav. Nové poznatky o účinnosti Faradayovy klece. *Aldebaran bulletin: týdeník věnovaný aktualitám a novinkám z fyziky a astronomie* [online]. Praha: Aldebaran Group for Astrophysics, 2015, roč. 13, č. 35 [cit. 2022-03-25]. ISSN 1214-1674. Dostupné z: [https://www.aldebaran.cz/bulletin/2015\\_35\\_far.php](https://www.aldebaran.cz/bulletin/2015_35_far.php)
- HNYK, Michal. Slayer exciter aneb Větší bráška Joule thiefu. In: KOUDELKOVÁ, Věra, ed. *Dílňy Heuréka 2018*. Praha: MatfyzPress, 2019, s 31–39. ISBN 978-80-7378-377-8.
- JEŘÁBEK, Jaroslav. *Rámcový vzdělávací program pro základní vzdělávání*. Stařeč: Infra, 2005. ISBN 80-86666-24-7.
- KRBAL, M.; BAXANT, P. Wireless Energy Transfer by Tesla Coil. In *Sborník prací konference a soutěže Student EEICT 2012*. 2012. s. 168-171. ISBN: 978-80-214-4462–1.
- KUSALA, Jaroslav. Zářivky. *Metodický portál: Články* [online]. 26. 06. 2007 [cit. 2022-03-22]. ISSN 1802-4785. Dostupné z: <https://clanky.rvp.cz/clanek/1456/ZARIVKY.html>.
- LYSENKO, Vladimír. *VN zdroje: zdroje vysokého napětí pro experimenty, pokusy a měřicí přístroje, ochranné pomůcky*. Praha: BEN – technická literatura, 2008. ISBN 978-80-7300-235-0.

PÍČ, Vlastimil. Teslův transformátor: Schéma, návod na výrobu a uvedení do chodu. *Ábíčko.cz: Zábava, příroda, věda a technika* [online]. 2021 [cit. 2022-03-04]. Dostupné z: <https://www.abicko.cz/clanek/precti-si-technika/26919/serial-elektro-10-postavte-si-tesluv-transformator.html>

RAUNER, Karel. *Elektronika: (fyzikální a analogová část)*. 2., upr. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, Pedagogická fakulta, 2001. ISBN 80-7082-775-0.

RAUNER, Karel. Několik pokusů s Teslovým transformátorem. *Metodický portál: Články* [online]. 30. 10. 2006 [cit. 2022-03-23]. ISSN 1802-4785. Dostupné z: <https://clanky.rvp.cz/clanek/968/NEKOLIK-POKUSU-S-TESLOVYM-TRANSFORMATOREM.html>.

RANDA, Miroslav, HAVEL, Václav, KÉHAR, Ota, KOHOUT, Václav, KRATOCHVÍL, Pavel, MASOPUST, Pavel, PROKŠOVÁ, Jitka a RAUNER, Karel. *Fyzika 9: učebnice pro základní školy a víceletá gymnázia*. Plzeň: Fraus, 2019. ISBN 978-80-7489-476-3.

RANDA, Miroslav, KOHOUT, Jiří, KOHOUT, Václav, KRATOCHVÍL, Pavel, MASOPUST, Pavel, PETŘÍK, Josef, PROKŠOVÁ, Jitka a RAUNER, Karel. *Fyzika 8: učebnice pro základní školy a víceletá gymnázia*. Plzeň: Fraus, 2018. ISBN 978-80-7489-392-6.

Samostatný výboj v plynu za atmosférického a za sníženého tlaku: MEF. *Fyzika: MEF* [online]. 2006 [cit. 2022-03-24]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/283-samostatny-vyboj-v-plynu-za-atmosferickeho-a-za-snizeneho-tlaku>

SVOBODA, Emanuel a Růžena KOLÁŘOVÁ. *Didaktika fyziky základní a střední školy: vybrané kapitoly*. Praha: Karolinum, 2006. ISBN 80-246-1181-3.

ŠAFRÁNEK, Jaroslav. *Nikola Tesla a jeho zásluhy o elektroniku a radiotechniku*. Praha: Občanská knihtiskárna, 1941.

ŠLÉGR, Jan. Jednoduché zdroje vysokého napětí pro školní praxi. In: KŘÍŽOVÁ, Michaela, ed. *Veletrh nápadů učitelů fyziky 18*. Hradec Králové: Jednotou českých matematiků a fyziků, 2013, s. 261–263. ISBN 978-80-7435-372-7.

Teslův transformátor s audio modulací. *Pájeničko.cz* [online]. 2022, Pájeničko s.r.o. [cit. 2022-04-22]. Dostupné z: <https://pajenicko.cz/tesluv-transformator-s-audio-modulaci>

TILBURY, Mitch. *The Ultimate Tesla Coil Design and Construction Guide*. McGraw-Hill Professional Publishing, 2007. ISBN 978-0071497374.

VOKÁČ, Petr. *Školský zákon: zákon č. 561/2004 Sb., o předškolním, základním, středním, vyšším odborném a jiném vzdělávání*. 6., přepracované vydání. Třinec: Resk, spol. s r.o., 2016. ISBN 978-80-87675-13-7.

Vyhláška č. 50/1978 Sb. In: *Elektrotechnický svaz český, z. s.* [online]. Praha: Elektrotechnický svaz český [cit. 2022-03-20]. Dostupné z: <https://www.elektrosvaz.cz/odborna-zpusobilost/vyhlaska-c-50-1978-sb>

**SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK A GRAFŮ**

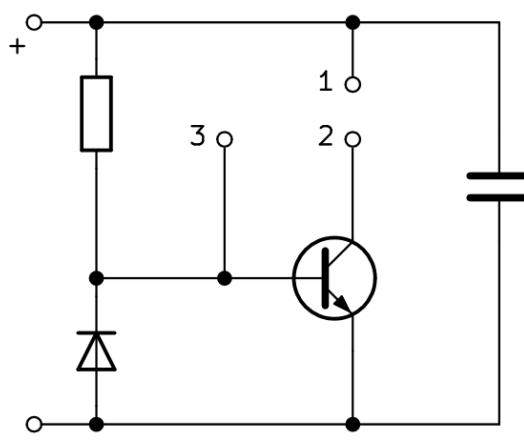
Obrázek 1 - Schéma Teslova transformátoru s jiskřištěm.....	8
Obrázek 2 - Teslův transformátor typu VTTC .....	12
Obrázek 3 - Schéma obvodu TC1 .....	15
Obrázek 4 - Schéma obvodu TC2 .....	17
Obrázek 5 - Zapojení TC1 .....	18
Obrázek 6 - Zapojení TC2 .....	18
Obrázek 7 - Konstrukce s cívkami pro TC1 a TC2 .....	19
Obrázek 8 - Měření frekvence na TC1 .....	23
Obrázek 9 - Měření frekvence na TC2 .....	23
Obrázek 10 - Měření frekvencí na TC2 pro různé cívky L1 .....	24
Obrázek 11 - Korónový výboj zapojení TC2 .....	25
Obrázek 12 - Rozsvěcení zářivky .....	30
Obrázek 13 - Faradayova klec u zapnutého Teslova transformátoru .....	33
Obrázek 14 - Prezentace magnetické indukce pomocí primární cívky Teslova transformátoru.....	36
Obrázek 15 - Teslův transformátor s hudební modulací .....	38
Tabulka 1 - Závislost H na podílu $l/d$ .....	20
Tabulka 2 - Parametry cívek L1 .....	21
Tabulka 3 - Parametry cívky L2 .....	21
Tabulka 4 - Vzájemná indukčnost cívek a výstupní napětí na cívce L2 .....	22
Tabulka 5 - Naměřené parametry primárních cívek .....	24
Tabulka 6 - Naměřené parametry sekundární cívky .....	24
Graf 1 - Závislost parametru H na podílu $l/d$ .....	21

## PŘÍLOHY

## Příloha č. 1. Pracovní list ke skupinové práci s SSTC

Následující úkoly splňte podle uvedených pokynů. Své odpovědi zapisujte na přiložený čistý papír, který odevzdáte s pracovním listem. Do pracovního listu nepište.

1. Sestavte z předložených součástek elektronické stavebnice obvod podle předlohy. Výstupy označené čísly 1, 2 a 3 připojte pomocí kabelů k označeným zakončením cívek, které máte k dispozici. Po dokončení se přihlaste, aby vaši práci zkontroloval učitel a připojil k obvodu zdroj pro další postup cvičení.



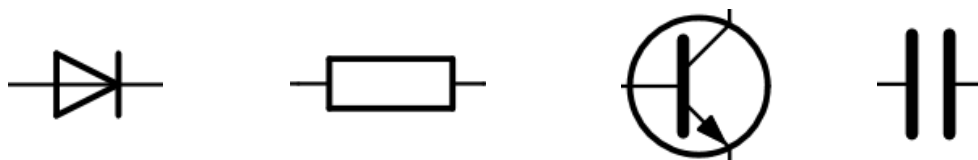
2. Po zapojení obvodu vezměte přiloženou zářivku a pomalu ji začněte přibližovat k cívkám Teslova transformátoru. Změřte pomocí pravítka, v jaké vzdálenosti se poprvé rozsvítí.
3. Nechte učitele vypojit zdroj a připojte osciloskop na výstup s označením 2 a k zápornému pólu zdroje. Po zapojení obvodu změřte na osciloskopu frekvenci, na které obvod kmitá.

Známe indukčnosti a kapacity jednotlivých cívek v obvodu. Zjistěte, která z cívek určuje frekvenci kmitů podle Thompsonova vztahu  $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ .

Hodnoty primární cívky jsou:  $L = 0,013 \text{ mH}$   $C = 100 \text{ nF}$

Hodnoty sekundární cívky jsou:  $L = 1,6 \text{ mH}$   $C = 2,8 \text{ pF}$

4. K následujícím schématickým značkám napište jejich název. Dále nakreslete značku pro cívku.



5. Zkuste v literatuře najít, co způsobuje rozsvícení zářivky v blízkosti Teslova transformátoru. Rozsvítila by se žárovka, kdybychom ji přiblížili k Teslovu transformátoru? Svá tvrzení zdůvodněte.