Středoškolská technika 2017

Setkání a prezentace prací středoškolských studentů na ČVUT

Dálkový přenos elektrické energie prakticky

Vít Fanta

Podještědské gymnázium s. r. o.

Sokolovská 328, Liberec 17

Poděkování

Děkuji vedoucí své práce, RNDr. Vladimíře Erhartové, za cenné a užitečné rady v průběhu zpracování práce.

Také děkuji svým rodičům, Mgr. Štěpánce Fantové a Ing. Tomáši Fantovi, za doplňující připomínky a provedení jazykové korektury.

Anotace

Tato práce je zaměřena na bezdrátový přenos elektrické energie. V první, teoretické části jsou popsány fyzikální veličiny a děje relevantní pro popsání principu fungování vybraných obvodů, které využívají bezdrátového přenosu elektrické energie. V rámci praktické části práce byly tyto obvody sestrojeny za pomoci běžně dostupných pomůcek a součástek.

Klíčová slova: elektrická energie, obvod, bezdrátový přenos, elektrotechnika.

Annotation

This paper focuses on the wireless transmission of electrical energy. In the theoretical part, several relevant physical quantities and phenomena are described in order to describe the principles of the circuits which use wireless electricity transmission. As the practical part, these circuits were constructed with the use of easily obtainable parts and tools.

Key words: electrical energy, circuit, wireless transmission, electrical engineering.

ÚVOD **5**

1 TEORETICKÁ ČÁST **6**

1.1 HISTORIE 6

1.2 POUŽITÉ SOUČÁSTKY 6

1.2.1 Light emitting diode (LED) *6*

1.2.2 Tranzistor *7*

1.2.3 Rezistor *8*

1.3 RELEVANTNÍ VELIČINY A DĚJE 8

1.3.1 Elektrický proud *8*

1.3.2 Elektrické napětí *9*

1.3.3 Elektrický náboj *9*

1.3.4 Intenzita elektrického pole *10*

1.3.5 Elektrický odpor *10*

1.3.6 Magnetická indukce *10*

1.3.7 Magnetický indukční tok *11*

1.3.8 Elektromagnetická indukce *11*

1.3.9 Přechodný děj *12*

1.3.10 Indukčnost *12*

1.4 PRINCIP FUNGOVÁNÍ JEDNOTLIVÝCH OBVODŮ 13

1.4.1 Obvod se dvěma cívkami *13*

1.4.2 Obvod s rovinnými cívkami *14*

1.4.3 Zloděj joulů *15*

1.4.4 Obvod pro detekci mobilního signálu *16*

2 PRAKTICKÁ ČÁST **17**

2.1 OBVOD SE DVĚMA CÍVKAMI 17

2.2 OBVOD S ROVINNÝMI CÍVKAMI 19

2.3 OBVOD PRO DETEKCI MOBILNÍHO SIGNÁLU 20

ZÁVĚR **22**

ZDROJE **23**

PŘÍLOHY **25**

Úvod

Tato práce se zabývá sestavením vybraných obvodů využívajících bezdrátového přenosu elektrické energie a popsáním principu jejich fungování. Cílem práce je sestrojit vybrané obvody využívající dálkový přenos elektrické energie, popsat principy jejich fungování a také navrhnout jednoduché pokusy k demonstrování jejich vlastností.

Práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. Teoretická část obsahuje krátký úvod do historie oblasti bezdrátového přenosu elektrické energie, popsání fyzikálních veličin a jevů týkajících se této problematiky, charakteristiku jednotlivých elektrotechnických součástek a vysvětlení principu fungování vybraných obvodů.

Druhá, praktická část obsahuje postup sestrojení jednotlivých elektrických obvodů a návrhy jednoduchých experimentů k demonstraci popsaných jevů. K názorným ukázkám slouží fotodokumentace v přílohách a krátká videa na přiloženém CD.

1 Teoretická část

1.1 Historie

Významným průkopníkem v oblasti dálkového přenosu elektrické energie byl srbský fyzik Nikola Tesla (viz obr. č. 1). Uvědomoval si, jaký obrovský průlom by znamenal pokrok v této problematice. Snil o vytvoření globálního bezdrátového energetického a informačního systému, který se v mnoha ohledech mohl podobat dnešní mobilní síti či internetu.[1]

Po prvních pokusech ve své newyorské laboratoři vybudoval v roce 1899 poblíž městečka Colorado Springs pokusnou laboratoř. Umístění laboratoře v horách nebylo náhodné - Tesla věřil, že dokáže elektrickou energii přenášet prostřednictvím horních vrstev atmosféry. Důsledkem jeho experimentů bylo poškození nedaleké elektrárny, a proto začal být považován za podivína hrajícího si s magickými silami.

Posledním Teslovým významným počinem v této oblasti bylo vybudování tzv. Wardenclyffské věže na Long Islandu v New Yorku. S pomocí této 57metrové konstrukce hodlal přenášet elektrickou energii přes Atlantský oceán. Financování tohoto projektu bylo však zastaveno kvůli poklesu zájmu investorů. Ti se rozhodli podpořit Teslova souputníka Guglielma Marconiho, který byl v té době na poli bezdrátové komunikace úspěšný.[2]

1.2 Použité součástky

1.2.1 Light emitting diode (LED)

Dioda je elektrotechnická součástka charakteristická svou propustností při zapojení do určitého směru proudu. Je tvořena dvěma oblastmi: zápornou a kladnou, mezi nimiž se nachází tzv. PN přechod (P - positive, N - negative). V každé polovině diody se v určitém poměru nachází nosiče náboje, tedy kladné díry a záporné elektrony, přičemž na P části je přebytek děr a na N části přebytek elektronů. Jsou proto zavedeny pojmy většinový a menšinový nosič, které označují nosiče náboje na té, či oné části.

[1] New York Times: Tesla, 75, Predicts New Power Source. New York, 5. 7. 1931.

[2] *Tesla - pán blesků* [Tesla: Master of Lightning] [dokumentární film]. Režie Robert UTH. USA, 2000.

Při zapojení diody v propustném směru (kladný pól k P a záporný pól k N) dochází (po překonání prahového napětí U_p) k přechodu většinových nosičů přes PN přechod a vnějším obvodem začne protékat proud. Při zapojení diody na zdroj s opačnou polaritou, než je uvedeno výše, mohou přes PN přechod procházet pouze menšinové nosiče a vnějším obvodem bude protékat pouze závěrný proud I_R. Závěrný proud má téměř konstantní hodnotu až do hodnoty průrazného napětí U_Z, kdy se začnou v krystalové mřížce vytvářet další nosiče. To má za následek rychlý nárůst závěrného proudu a hrozí zničení diody přetavením PN přechodu (viz obr. č. 2).[3]

Svítivá dioda (dříve elektroluminiscenční dioda) při průchodu proudu emituje viditelné elektromagnetické vlnění, tedy světlo (odtud pojem „light emitting diode“, zkráceně LED). Tato emitace je důsledkem rozdílné energetické úrovně majoritních nosičů v P a N oblasti diody. Při zapojení diody v propustném směru dochází k přesunu těchto nosičů do druhé oblasti a splývání elektronů s dírami. Při tomto ději ztrácí elektron určité množství energie, které je vyzářeno právě ve formě elektromagnetického záření, nejčastěji světla. Množství této vyzářené energie je podle kvantové teorie rovno

$$E = hf,$$

kde h je Planckova konstanta a f frekvence vyzářeného záření. Pokud tento vztah upravíme podle vztahu pro frekvenci, získáme

$$E = \frac{hc}{\lambda},$$

kde λ označuje vlnovou délku elektromagnetického záření a c rychlost světla ve vakuu. Vlnová délka (a tedy i barva v případě viditelného záření) závisí na polovodičovém materiálu diody.

1.2.2 Tranzistor

Použité tranzistory patří do skupiny bipolárních NPN tranzistorů. Podstata těchto součástek je v řízeném ovládání propustnosti či nepropustnosti elektrického proudu. Tranzistor má tři kontakty, které jsou připojeny ke třem odpovídajícím oblastem

[3] UHLÍŘ, Ivan a kolektiv. *Elektronické obvody a elektronika* [online]. In: . s. 139 [cit. 2016-11-19]. Dostupné z: https://www.strojar.com/upload/skripta/3rocnik/EOE_skripta.pdf

střídajícím se typem vodivosti (v tomto případě se jedná o NPN tranzistor). NPN tranzistor (viz obr. č. 3) obsahuje dvě N oblasti, které tvoří emitor (E) a kolektor (C), a jednu P oblast tvořící bázi (B).

U bipolárního tranzistoru platí, že malý proud na bázi vyvolá velký proud mezi kolektorem a emitorem. Pokud na bázi není připojen zdroj napětí, proud mezi kolektorem a emitorem neprochází. Je to způsobeno tím, že při přechodu z N oblasti emitoru do P oblasti báze dochází k rekombinaci elektronů s dírami, což má za následek utvoření záporného náboje v oblasti P. Elektrony pak nemohou dále přecházet do této oblasti a PN přechod mezi emitorem a bází se uzavře. Po připojení kladného pólu napětí k bázi přes ni mohou elektrony opouštět oblast P, čímž se zmenší záporný náboj v polovodiči P a elektrony mohou přecházet z emitoru do kolektoru.[4] Tento typ tranzistorů se používá jako zesilovač, nebo, jak je tomu v použitých zapojeních, jako rychlý spínač (bližší popis tohoto zapojení v kapitole 1.4.1 a 1.4.2).[5]

1.2.3 Rezistor

Rezistor je elektrotechnická součástka charakteristická svým odporem. Kvůli tomu, že brání volnému průchodu elektrického proudu, v této součástce dochází k přeměnám elektrické energie na energii jiného druhu (zpravidla na tepelnou energii). Lineární rezistory, které jsou použity v sestrojených obvodech, mají lineární voltampérovou charakteristiku.[6]

1.3 Relevantní veličiny a děje

1.3.1 Elektrický proud

Elektrický proud je skalární veličina, jejíž značka je *I* a jednotka ampér (A). Elektrický proud je definován jako množství elektrického náboje prošlé plochou za jednotku času.

[4] Tranzistor. *Realisticky.cz* [online]. Martin Krynycký, 2015 [cit. 2017-03-18]. Dostupné z: http://www.realisticky.cz/ucebnice/02%20Fyzika%20S%C5%A0/04%20Elekt%C5%99ina%20a%20magnetismus/03%20Polovodi%C4%8De%20a%20z%C3%A1klady%20elektroniky/04%20Tranzistor.pdf

[5] VYŠKOVSKÝ, Jakub. Využití moderních měřících metod k diagnostice a měření aktivních elektrotechnických součástek (tranzistor, dioda) ve výuce. Sezimovo Ústí, 2012. Absolventská práce.

[6] *Elektrotechnika*. V Praze: České vysoké učení technické, 2011, s. 40-41. ISBN 9788001048665.

Jednotka ampér je jednou ze základních jednotek SI. Podle definice je 1 ampér stálý elektrický proud, který při průchodu dvěma přímými rovnoběžnými nekonečně dlouhými vodiči zanedbatelného kruhového průřezu umístěnými ve vakuu ve vzájemné vzdálenosti 1 metr vyvolá mezi těmito vodiči stálou sílu $2 \cdot 10^{-7}$ N na 1 m délky vodiče.[7]

1.3.2 Elektrické napětí

Elektrické napětí je skalární veličina, jejíž značka je *U* a jednotka volt (V). Je definována jako rozdíl potenciálů ve zvolených bodech a zároveň vyjadřuje množství práce nutné k přenesení jednotkového náboje z jednoho bodu do druhého. Elektrický potenciál φ_A je tedy definován jako podíl práce *W*, kterou vykonají síly elektrického pole při přemisťování kladného bodového náboje Q_0 ze zvoleného bodu *A* k nulové hladině, a náboje Q_0:

$$\varphi_A = \frac{W}{Q_0}$$ [8]

Elektrické napětí mezi body *A* a *B* je rovno rozdílu potenciálů v těchto bodech.

1.3.3 Elektrický náboj

Elektrický náboj je skalární veličina, jejíž značkou je *Q* a jednotkou coulomb (C). Elektrický náboj vyjadřuje schopnost tělesa tvořit elektrické pole a působit na okolí elektrickou silou. K tomu dochází, pokud převládají náboje jedné polarity. Rozdíl součtu všech kladných elementárních nábojů a součtu všech záporných nábojů udává elektrický náboj daného tělesa. Hodnota elementárního náboje (tedy náboje elektronu nebo protonu - liší se polaritou) činí přibližně

$$e \approx 1{,}602\ 176\ 53 \cdot 10^{-19} C.$$

[7] *Elektrotechnika*. V Praze: České vysoké učení technické, 2011, s. 20-21. ISBN 9788001048665.

[8] *Přehled středoškolské fyziky*. 5., přeprac. vyd. Praha: Prometheus, 2014, s. 267. ISBN 9788071964384.

1.3.4 Intenzita elektrického pole

Intenzita elektrického pole je vektorová veličina se značkou E a jednotkou $N \cdot C^{-1}$ (nebo $V \cdot m^{-1}$). Je definována jako podíl elektrické síly F_e (působící na bodový náboj Q) a hodnoty bodového náboje Q:

$$E = \frac{F_e}{Q}$$

1.3.5 Elektrický odpor

Elektrický odpor je skalární veličina se značkou R a jednotkou Ω (ohm). Vyjadřuje schopnost látky bránit průchodu elektrického proudu. Dle Ohmova zákona se jedná o konstantu úměrnosti mezi napětím a proudem v obvodu s konstantní teplotou:

$$R = \frac{U}{I} = konst.$$

Vodičem o hodnotě elektrického odporu 1 Ω proteče při napětí 1 V proud o velikosti 1 A. Převrácená hodnota R se nazývá elektrická vodivost. Tato veličina má značku G a její jednotkou je S (siemens).[9]

1.3.6 Magnetická indukce

Magnetická indukce je vektorová veličina se značkou B a jednotkou T (tesla). Charakterizuje silové působení magnetického pole na vodič s proudem. Lze ji určit ze vztahu pro výpočet magnetické síly F_m působící na vodič, z něhož po úpravě získáme

$$B = \frac{F_m}{I \cdot l \cdot \sin \alpha},$$

kde l je aktivní délka vodiče (délka části zasahujícího do magnetického pole) a α úhel mezi vodičem a magnetickými indukčními čarami. Magnetické pole má hodnotu magnetické indukce 1 T právě tehdy, když na 1 m vodiče kolmého k indukčním čarám, kterým prochází proud 1 A, působí síla 1 N.

[9] *Přehled středoškolské fyziky*. 5., přeprac. vyd. Praha: Prometheus, 2014, s. 281-282. ISBN 9788071964384.

Magnetické pole kolem závitu má tvar soustředných kružnic kolem vodiče. Magnetické pole cívky tedy vznikne složením magnetických polí všech jednotlivých závitů. To má za následek, že uvnitř cívky jsou magnetické indukční čáry rovnoběžné s podélnou osou cívky.[10]

1.3.7 Magnetický indukční tok

Magnetický indukční tok je skalární veličina se značkou Φ a jednotkou weber (Wb). Je definován vztahem

$$\phi = B \cdot S \cdot \cos\alpha\,,$$

kde S je obsah zvolené rovinné plochy, B je velikost vektoru magnetické indukce daného pole a α úhel mezi směrem magnetické indukce B a normálou plochy. Ze vztahu vyplývá, že magnetický indukční tok je největší v případě, kdy je vektor B na plochu kolmý ($\cos 0° = 1$).

1.3.8 Elektromagnetická indukce

Elektromagnetická indukce je jev, k němuž dochází při vložení vodiče do nestacionárního magnetického pole (tj. pole, v němž dochází ke změně magnetického indukčního toku v čase). Toto magnetické pole uvede do pohybu nosiče náboje ve vodiči, což zapříčiní vznik indukovaného napětí. Pro indukované napětí platí Faradayův zákon elektromagnetické indukce:

$$U_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

Znaménko minus ve vzorci vychází z Lenzova zákona, podle něhož má indukovaný elektrický proud v uzavřeném obvodu takový směr, že svým magnetickým polem působí proti změně magnetického indukčního toku, která je jeho příčinou.[11]

[10] *Přehled středoškolské fyziky*. 5., přeprac. vyd. Praha: Prometheus, 2014, s. 317-318. ISBN 9788071964384.

[11] *Fyzika pro gymnázia*. 6. vyd. Praha: Prometheus, 2010, s. 166. ISBN 9788071963851.

Okamžitá hodnota indukovaného napětí je poté dána první derivací magnetického indukčního toku podle času

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

1.3.9 Přechodný děj

Při přechodném ději se nejvýrazněji projevuje indukčnost cívek. Při skokové změně napětí v obvodu (například při sepnutí spínače se hodnota napětí změní z nuly na napětí zdroje) se indukuje elektrické napětí. Indukované elektrické napětí má opačnou polaritu než napětí zdrojové, a proto v obvodech s cívkou dochází k postupnému navyšování elektrického proudu.

Podobná situace nastává také při rozpojení elektrického obvodu. Zdrojové napětí skokově poklesne, což má za následek vznik indukovaného napětí stejné polarity, jakou má zdroj. Proud v obvodu tedy zaniká postupně, spolu s postupně se zmenšujícím indukovaným napětím. Pro indukované napětí U_i a proud v obvodu platí

$$I = \frac{U_e + U_i}{R} = \frac{U_e - L\frac{\Delta I}{\Delta t}}{R},$$

kde L je indukčnost cívky a U_e elektromotorické napětí zdroje.[12]

1.3.10 Indukčnost

Indukčnost je skalární veličina se značkou L a jednotkou H (henry). Indukčnost je jedním z parametrů elektrického obvodu a slouží k popsání vztahu mezi indukovaným napětím a změnou procházejícího proudu s časem. Při indukování napětí na koncích vodiče dochází k vytvoření indukovaného proudu. Tento proud vytváří vlastní magnetické pole s vlastním magnetickým indukčním tokem Φ, který prochází závity cívky. Pokud je cívka v prostředí se stálou permeabilitou (veličina popisující vliv prostředí na účinky magnetického pole), pro tento magnetický indukční tok platí

$$\Phi = L \cdot I.$$

[12] *Fyzika pro gymnázia*. 6. vyd. Praha: Prometheus, 2010, s. 171-173. ISBN 9788071963851.

Pro indukované napětí U_i tedy platí:

$$U_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -L\frac{\Delta I}{\Delta t}.$$[13]

1.4 Princip fungování jednotlivých obvodů

1.4.1 Obvod se dvěma cívkami

Obvod se dvěma cívkami využívá jevu vzájemné indukce v proměnlivém magnetickém poli. Obvod se skládá ze dvou izolovaných okruhů, z nichž je jeden označen jako vysílací a druhý jako přijímací (viz schéma č. 1). Součástí vysílacího okruhu je zdroj stejnosměrného napětí (v tomto případě jej pro úsporu energie tvoří zloděj joulů, který je blíže popsán v další kapitole), rezistor 1 kΩ, cívka a tranzistor BC337 sloužící jako spínač a zesilovač proudu. Součástí přijímacího okruhu je cívka a LED.

Vzájemná indukce spočívá ve vzniku indukovaného elektromotorického napětí ve vodiči, v tomto případě cívce, která se nachází v blízkosti cívky, kterou protéká proměnlivý elektrický proud. Proměnlivost proudu je dána střídavým rozepínáním a spínáním tranzistoru BC337-16, a v přijímací cívce se tedy indukuje napětí U_{i2}. Pro toto indukované napětí platí:

$$U_{i2} = -\frac{\Delta\phi_{21}}{\Delta t} = -L_{21}\frac{\Delta I_1}{\Delta t},$$

kde ϕ_{21} je magnetický indukční tok, L_{21} je vzájemná indukčnost cívek a I_1 proud procházející první cívkou.[14]

Indukované elektromotorické napětí v přijímací cívce má tedy za následek rozsvícení LED, což slouží jako důkaz správného fungování obvodu a zároveň demonstrace výše popsaného jevu.

[13] *Fyzika pro gymnázia*. 6. vyd. Praha: Prometheus, 2010, s. 169-170. ISBN 9788071963851.

[14] *Fyzika v kostce*: pro střední školy. Praha: Fragment, 2007, s. 118. Maturita v kostce. ISBN 978-80-253-0228-6.

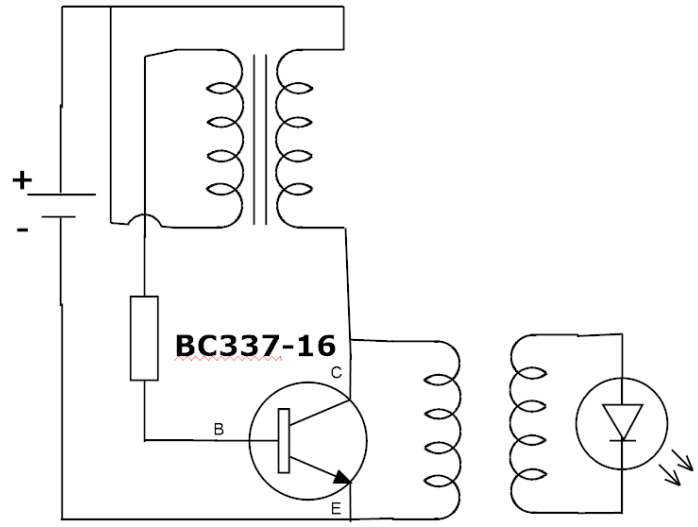


Schéma č. 1: Schéma zapojení vysílacího obvodu se zlodějem joulů (vlevo) a přijímací obvod s LED (vpravo); (zdroj: autor, vytvořeno pomocí programu SmartDraw 2016)

1.4.2 Obvod s rovinnými cívkami

Obvod s rovinnými cívkami využívá jevu elektromagnetické indukce k rozsvícení LED. Opět se skládá z vysílací a přijímací části (viz schéma č. 2). Přijímací část je tvořena měděnou cívkou s LED. Vysílací část sestává z tranzistoru TIP35C (který zde slouží jako rychlý spínač), dvou sériově zapojených 220Ω rezistorů, spínače, 9V baterie a dvou rovinných cívek. Po sepnutí spínače začne procházet proud v obvodu báze-emitor, čímž se otevře obvod kolektor-emitor s druhou cívkou. Následný nárůst proudu způsobí vznik indukovaného napětí na koncích první cívky, které bude působit proti napětí zdroje. To má za následek pokles napětí na přechodu báze-emitor a tranzistor se zavře. Tím pádem přestane protékat proud i v obvodu kolektor-emitor. Přestane tedy vznikat indukované napětí působící proti napětí zdroje a celá sekvence se znovu periodicky opakuje. Důsledkem této periodicky se opakující sekvence dějů je vznik proměnlivého elektromagnetického pole, které je možno využít k elektromagnetické indukci.

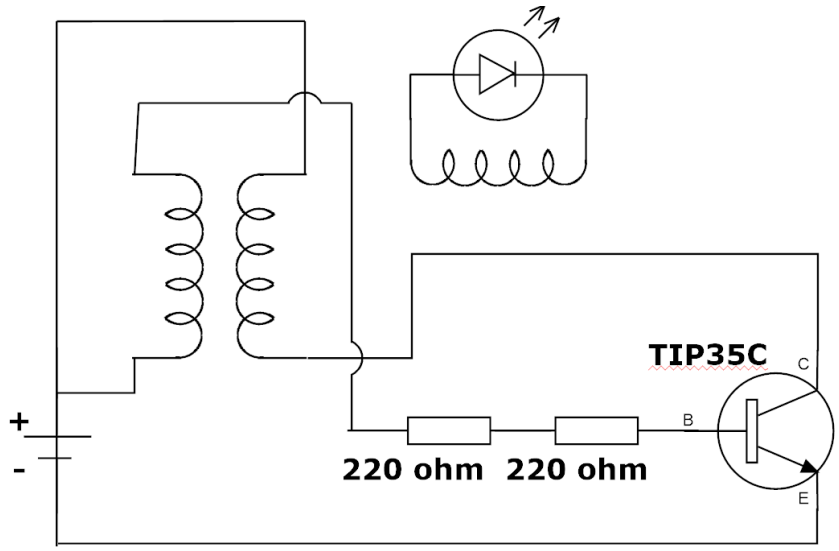


Schéma č. 2: Schéma zapojení obvodu se dvěma rovinnými cívkami spolu s přijímacím obvodem (vpravo nahoře); (zdroj: autor, vytvořeno pomocí programu SmartDraw 2016)

1.4.3 Zloděj joulů

Tento obvod představuje způsob, jakým dosáhnout vyššího napětí, než které máme zdánlivě k dispozici. V tomto případě se jedná o rozsvícení superjasné červené LED, k čemuž je třeba napětí o hodnotě minimálně 1,85 V. Díky tomuto obvodu lze ale stejného výsledku docílit připojením zdroje o nižší hodnotě napětí, například tužkové AA baterie (pokud její napětí neklesne pod 0,35 V).

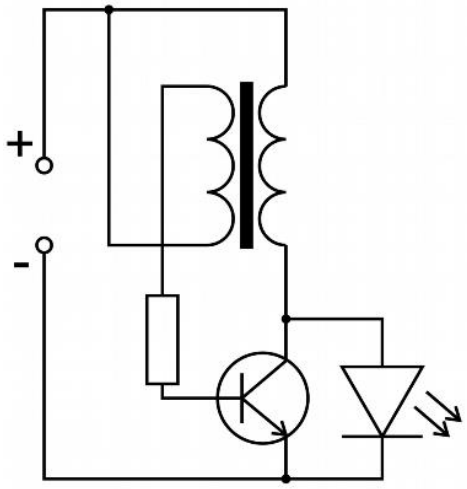


Schéma č. 3: Zloděj joulů; (zdroj: PISKAČ, Václav. joule_thief.pdf [online]. [cit. 13.3.2017]. Dostupný na WWW: http://fyzikalnisuplik.websnadno.cz/elektro/joule_thief.pdf)

Klíčovým prvkem obvodu je toroidní jádro ovinuté dvěma cívkami (viz schéma č. 3). Při sepnutí obvodu začne proud procházet první cívkou, která jej přivede do tranzistoru. Obvodem báze-emitor protéká proud, což vyvolá proud i v obvodu kolektor-emitor, jehož součástí je druhá cívka. Proud v této cívce vyvolá silnější magnetické pole okolo toroidního jádra, což vyvolá opět větší proud v první cívce. Kvůli opačnému namotání cívek má tento vyvolaný proud stejný směr, jaký už cívkou protéká. Toto zvýšení proudu má za následek zvýšení proudu protékajícího tranzistorem, a tedy i zvýšení proudu protékajícího druhou cívkou. Takto vyvolaná „řetězová reakce“ dosáhne vrcholu ve chvíli, kdy v jádru nelze vyvolat větší magnetické pole (hovoříme o tzv. saturovaném jádru). V tento okamžik se přestane indukovat napětí v cívkách a spolu s tranzistorem se celý obvod uzavře. Tato náhlá změna proudu vyvolá ve druhé cívce napětí dost velké na to, aby se krátce rozsvítila LED. Celý proces se velmi rychle opakuje (frekvence vyplývá z vlastností tranzistoru a činí přibližně 210 MHz), takže díky setrvačnosti zrakového vjemu se jeví LED jako stále rozsvícená.[15]

1.4.4 Obvod pro detekci mobilního signálu

Obvod s detekcí mobilního signálu je schopen demonstrovat přítomnost mobilního signálu typu 2G o vlnové délce přibližně 33 centimetrů (viz výpočet v kapitole při vytočení čísla z mobilního telefonu). Obvod sestává z měděného drátu o délce shodné s vlnovou délkou přijímaného signálu, germaniové diody a LED. Při dopadu elektromagnetických vln o odpovídající vlnové délce dochází k rezonanci. Elektrony v měděném drátu začnou oscilovat ve frekvenci dopadajícího záření a způsobí tak malý střídavý proud v obvodu. Germaniová dioda slouží k usměrnění tohoto střídavého proudu do stejnosměrných pulzů. Pokud by byla použita dioda obyčejná, PN přechod by se kvůli vysoké frekvenci střídání napětí nestačil otevřít. Hrotová germaniová dioda je schopna správně reagovat i při vysokých frekvencích, což má za následek rozsvícení diody.[16]

[15] How does the "Joule Thief" circuit work? *Quora.com* [online]. Mountain View: Virendra Harmalkar, 2016 [cit. 2017-02-21]. Dostupné z: https://www.quora.com/How-does-the-Joule-Thief-circuit-work

[16] Simple demonstration to explore the radio waves generated by a mobile phone. *Creative Science* [online]. Brighton: Dr Jonathan Hare, 2010 [cit. 2017-02-21]. Dostupné z: http://www.creative-science.org.uk/mobile_LED.html

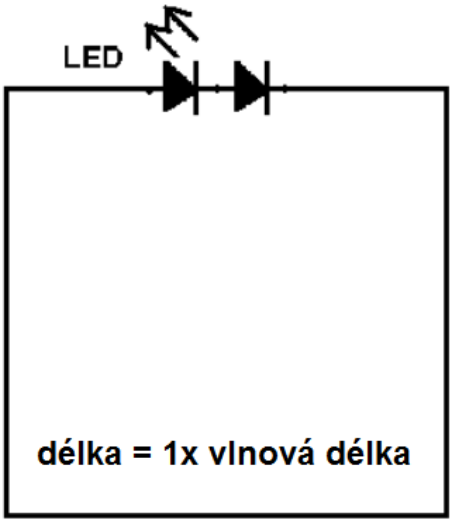


Schéma č. 4: Schéma obvodu pro detekci mobilního signálu; (zdroj (upraveno): Mobile phone radio wave detector simple schematic. In: Creative Science [online]. Brighton: Dr Jonathan Hare, 2010 [cit. 2017-02-21]. Dostupné z: http://www.creative-science.org.uk/mob/loop_antenna_2.gif)

2 Praktická část

2.1 Obvod se dvěma cívkami

Použité součástky a pomůcky: LED (U_p = 1,85V), tranzistor BC337-16, měděný lakovaný drát o průměru 0,3 mm, rezistor o odporu 1 kΩ, tužková AA baterie, patice na tužkovou AA baterii, pájecí stanice PLS 45 C1, pájecí cín, feritový toroid, drát izolovaný PVC o průměru 0,4 mm, spínač.

Postup sestrojení: Bylo postupováno podle videa na serveru YouTube.com a instrukcí podle serveru Instructables.com[17]. Nejprve bylo třeba vytvořit z lakovaného měděného drátu dvě cívky o 30 závitech, přičemž bylo nutné u jedné cívky po 15 zavinutích utvořit oko, které mělo následně sloužit jako další kontakt. Tato cívka je cívkou vysílací.

[17] Wireless Electricity Transmission Circuit. *Instructables.com* [online]. argha halder, 2015 [cit. 2017-03-18]. Dostupné z: http://www.instructables.com/id/Wireless-electricity-transmission-circuit/

K udržení neměnné struktury byly obě cívky zalepeny lepicí páskou. Nakonec bylo nutno se zbavit izolace na kontaktech, což bylo provedeno opálením v plameni a pomocí ostrého nože.[18]

K demonstraci sledovaného jevu (elektromagnetické indukce) bylo třeba připájet LED k přijímací cívce. Směr zapojení diody je libovolný. Dále byl zapojen obvod vysílací cívky. Mezi jeden z jejích konců a bázi tranzistoru bylo nutno zapojit rezistor kvůli ochraně tranzistoru před přehřátím, což by mělo za následek celkovou nefunkčnost obvodu. Druhý konec cívky byl připojen na kolektor tranzistoru. Nakonec byl připojen zloděj joulů, který sloužil jako zdroj napětí a spolu s tranzistorem jako zesilovač (viz obr. č. 4). Záporný pól byl připojen k emitoru tranzistoru a pól kladný k prostřednímu vývodu cívky (viz obr. č. 5).[19]

Odhad velikosti indukovaného napětí: Aby bylo možné provést výpočet indukovaného napětí, bylo třeba naměřit hodnotu magnetické indukce. K tomu bylo použito rozhraní LabQuest s připojeným teslametrem. Vzhledem k omezeným možnostem měřicího zařízení (nejvíce 1000 měření za sekundu) lze však naměřené hodnoty brát pouze orientačně. Teslametr nebyl schopen zachytit měnící se magnetické pole o frekvenci 210 MHz (frekvence vyplývá z charakteristiky tranzistoru BC337-16).[20]

Demonstrace: S použitím cívek o různých poloměrech a počtech závitů lze ukázat závislost velikosti indukovaného napětí na ploše cívky (magnetický indukční tok) a indukčnosti cívky (viz obr. č. 6). Rovněž je možno vidět, že indukované napětí klesá přímo úměrně vzdálenosti vzájemné vzdálenosti přijímací a vysílací cívky (pokles jasu LED). Rovněž lze možno mezi přijímací a vysílací cívku vkládat různé materiály různé tloušťky a pozorovat jejich vliv na svit diody. Běžně dostupné materiály (např. papír, dřevo, plasty), s výjimkou materiálů feromagnetických, magnetické pole nenaruší, takže vliv na magnetické pole je minimální.

[18] Wireless electricity transmission circuit. YouTube [online]. [cit. 2016-09-21]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=-7DgPmkg-74

[19] tamtéž

[20] BC337 - Amplifier Transistors. *GM electronic* [online]. Denver: Semiconductor Components Industries, 2009 [cit. 2017-03-19]. Dostupné z: https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.210-017.1.pdf

Na videu č. 1 na přiloženém CD disku je názorně ukázána závislost indukovaného napětí na vzájemné poloze cívek. Nejprve je demonstrováno, jak indukované napětí klesá úměrně s rostoucí vzdáleností cívek, a poté je natočením cívky ukázána závislost magnetického indukčního toku na ploše cívky.

2.2 Obvod s rovinnými cívkami

Použité součástky: Měděný lakovaný drát, LED (U_p = 1,85 V), tranzistor TIP35C, měděný lakovaný drát o průměru 0,3 mm, rezistory o odporu 220 Ω, 9V baterie, pájecí stanice PLS 45 C1, pájecí cín, drát izolovaný PVC o průměru 0,5 mm, oboustranná lepicí páska, spínač.

Postup sestrojení: Tento obvod se opět skládá s vysílací a přijímací části. Přijímací cívka (viz obr. č. 7) pro tento i výše popsaný obvod je stejná (měděná cívka s 30 závity a LED). Vysílací část sestává z tranzistoru TIP35C (který zde slouží jako rychlý spínač), dvou sériově zapojených 220Ω rezistorů, spínače, 9V baterie a rovinné cívky ze dvou různých drátů (viz obr. č. 8). K jednoduššímu smotávání této cívky bylo použito zásobníku na CD a oboustranné lepicí pásky. Střed cívky byl nalepen okolo středového sloupce a poté byly postupným otáčením namotávány další závity. Každá z cívek má 20 závitů (viz obr. č. 9).

Po sepnutí spínače začne procházet proud v obvodu báze-emitor, čímž se otevře obvod kolektor-emitor s druhou cívkou. Jelikož směr proudu je v obou cívkách opačný, napětí indukované v první cívce působí proti napětí zdroje a proud v obvodu emitor-báze přestane být dostatečný. Tranzistor se tedy zavře, avšak tím se přestane indukovat napětí v první cívce a proces začne nanovo. Důsledkem této periodicky se opakující sekvence dějů je získáno proměnlivé elektromagnetické pole, které je možno využít k elektromagnetické indukci (frekvence vyplývá z charakteristiky tranzistoru TIP35C a činí přibližně 3 MHz).[21]

[21] TIP35C. *GM electronic* [online]. STMicroelectronics, 1999 [cit. 2017-03-19]. Dostupné z: https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.211-147.1.pdf

Demonstrace: Podobně jako u předchozího obvodu lze demonstrovat závislost velikosti indukovaného napětí na vzdálenosti přijímací a vysílací cívky a zároveň na vlastnostech přijímací cívky (viz obr. č. 10). Pokud je přijímací cívka postupně zasouvána nad plochu cívky vysílací, jas LED roste. Zároveň je možno pozorovat pokles jasu diody při vychýlení cívek z rovnoběžné polohy. Je opět způsoben snížením magnetického indukčního toku, který je závislý na natočení cívky v magnetickém poli.

Na videu č. 2 na přiloženém CD disku je názorně ukázána závislost indukovaného napětí na vzájemné poloze cívek. Nejprve je demonstrováno, jak indukované napětí klesá úměrně s rostoucí vzdáleností cívek, a poté je natočením cívky ukázána závislost magnetického indukčního toku na ploše cívky.

2.3 Obvod pro detekci mobilního signálu

Použité součástky: Měděný lakovaný drát, LED (U_p = 1,85 V), germaniová dioda OA91, pájecí stanice PLS 45 C1, pájecí cín.

Postup sestrojení: Obvod sestává z měděného drátu o délce jedné vlnové délky elektromagnetické vlny, jejíž přítomnost chceme zachytit, germaniové diody OA21 a LED L-34SRDF (viz obr. č. 11). Drát je zatočen do čtvercového tvaru a je připojen k LED a germaniové diodě, které jsou zapojeny v sérii a v souhlasném směru. V tomto případě je použit telefon Lenovo A6000, který přijímá frekvence 900 MHz a 1800 MHz v 2G pásmu. V České republice v síti 3G poskytuje operátor O2 signál na frekvenci 900 MHz a 1800 MHz. Skutečnost, že mobilní telefon je schopen přijímat oba dostupné 2G signály způsobuje, že ne vždy dochází k aktivaci obvodu, protože telefon komunikuje na druhé frekvenci 1800 MHz. V některých případech je proto nutno více pokusných hovorů, než se podaří vysílání zachytit. Vlnovou délku tohoto signálu získáme ze vztahu

$$\lambda = \frac{c}{f},$$

kde se *c* je rychlost světla a *f* frekvence signálu. Po dosazení:

$$\lambda = \frac{299\,792\,458\ \mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}}{9\cdot 10^{8}\ s^{-1}} \doteq 0{,}3331\ m = 33{,}31\ cm$$

Délka měděného drátu bude v tomto případě přibližně 33,31 centimetrů.[22]

[22] Simple demonstration to explore the radio waves generated by a mobile phone. *Creative Science* [online]. Brighton: Dr Jonathan Hare, 2010 [cit. 2017-02-21]. Dostupné z: http://www.creative-science.org.uk/mobile_LED.html

Demonstrace: Pomocí tohoto obvodu je možné dočasně „zviditelnit“ malou část elektromagnetických vln v okolí (viz video na CD). To slouží jako ukázka toho, že v současnosti se v našem bezprostředním okolí nachází obrovské množství elektromagnetického záření. Je využíváno jako internetové, mobilní nebo televizní připojení. Zároveň lze ukázat, že starší mobilní zařízení, která využívají frekvence detekovatelné tímto obvodem, LED rozsvítit dokážou, zatímco novější telefony nikoliv.

Na videu č. 3 je patrné blikání LED při detekci daného mobilního signálu.

Závěr

Cíle této práce byly splněny. V teoretické části byly popsány principy fungování vybraných obvodů (obvod se dvěma cívkami, obvod s rovinnými cívkami a obvod pro detekci mobilního signálu), použité elektrotechnické součástky, veličiny důležité pro popsání této problematiky a fyzikální děje, na jejichž základě tyto obvody fungují. V rámci praktické části pak byly tyto obvody zhotoveny a byly i navrženy jednoduché demonstrační experimenty ukazující platnost popsaných dějů.

Ke zhotovení obvodů bylo použito běžných pomůcek z lokálního maloobchodu s elektrotechnickými potřebami (kromě germaniové diody OA91, kterou bylo třeba objednat ze zahraničí).

Zdroje

Knižní zdroje:

CIPRA, Mirko, Michal KŘÍŽ a Vladimír KŮLA. *Úvod do elektrotechniky*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000, ISBN 80-010-2155-6.

LEPIL, Oldřich a Přemysl ŠEDIVÝ. *Fyzika pro gymnázia*. 6. vyd. Praha: Prometheus, 2010, ISBN 978-80-7196-385-1.

MALÝ, Karel. *Základy elektrotechniky: cvičení*. V Praze: České vysoké učení technické, 2012, ISBN 978-80-01-05087-3.

SVOBODA, Emanuel. *Přehled středoškolské fyziky*. 5., přeprac. vyd. Praha: Prometheus, 2014, ISBN 978-80-7196-438-4.

VYŠKOVSKÝ, Jakub. *Využití moderních měřících metod k diagnostice a měření aktivních elektrotechnických součástek (tranzistor, dioda) ve výuce*. Sezimovo Ústí, 2012. Absolventská práce.

Internetové zdroje

BC337 - Amplifier Transistors. *GM electronic* [online]. Denver: Semiconductor Components Industries, 2009. Dostupné z: https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.210-017.1.pdf

How does the "Joule Thief" circuit work? *Quora.com* [online]. Mountain View: Virendra Harmalkar, 2016. Dostupné z: https://www.quora.com/How-does-the-Joule-Thief-circuit-work

Joule_thief. *Fyzikální šuplík* [online]. Brno, 2015. Dostupné z: http://fyzikalnisuplik.websnadno.cz/elektro/joule_thief.pdf

Měření odporu. *WikiSkripta* [online]. MEFANET, 2016. Dostupné z: http://www.wikiskripta.eu/index.php/M%C4%9B%C5%99en%C3%AD_odporu

Mobile phone radio wave detector simple schematic. In: *Creative Science* [online]. Brighton: Dr Jonathan Hare, 2010. Dostupné z: http://www.creative-science.org.uk/mob/loop_antenna_2.gif

Simple demonstration to explore the radio waves generated by a mobile phone. *Creative Science* [online]. Brighton: Dr Jonathan Hare, 2010. Dostupné z: http://www.creative-science.org.uk/mobile_LED.html

TIP35C. *GM electronic* [online]. STMicroelectronics, 1999. Dostupné z: https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.211-147.1.pdf

Tranzistor. *Realisticky.cz* [online]. Martin Krynický, 2015. Dostupné z: http://www.realisticky.cz/ucebnice/02%20Fyzika%20S%C5%A0/04%20Elekt%C5%99ina%20a%20magnetismus/03%20Polovodi%C4%8De%20a%20z%C3%A1klady%20elektroniky/04%20Tranzistor.pdf

UHLÍŘ, Ivan a kolektiv. *Elektronické obvody a elektronika* [online]. Dostupné z: https://www.strojar.com/upload/skripta/3rocnik/EOE_skripta.pdf

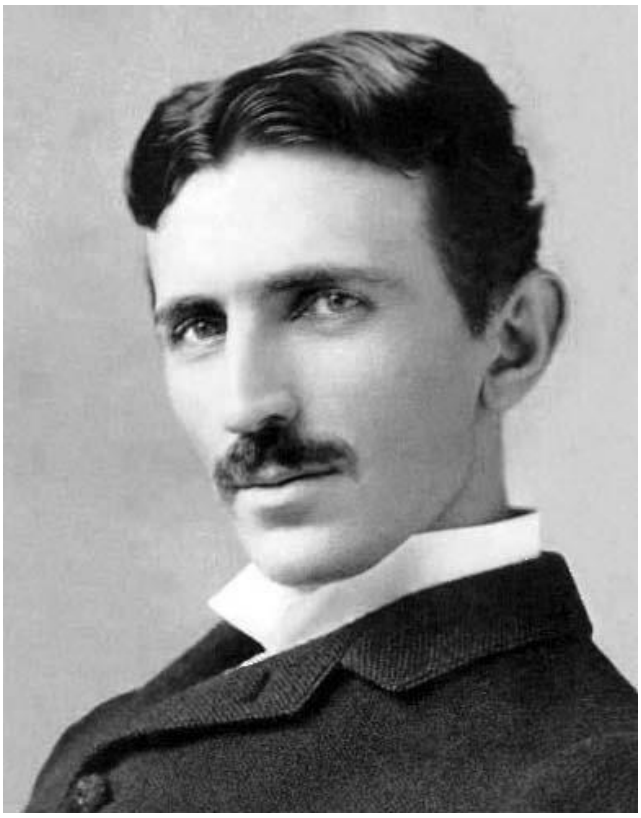
Wireless Electricity II. *Pinterest* [online]. Dostupné z: https://cz.pinterest.com/pin/317292736228789397/

Wireless electricity transmission circuit. *YouTube* [online]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=-7DgPmkg-74

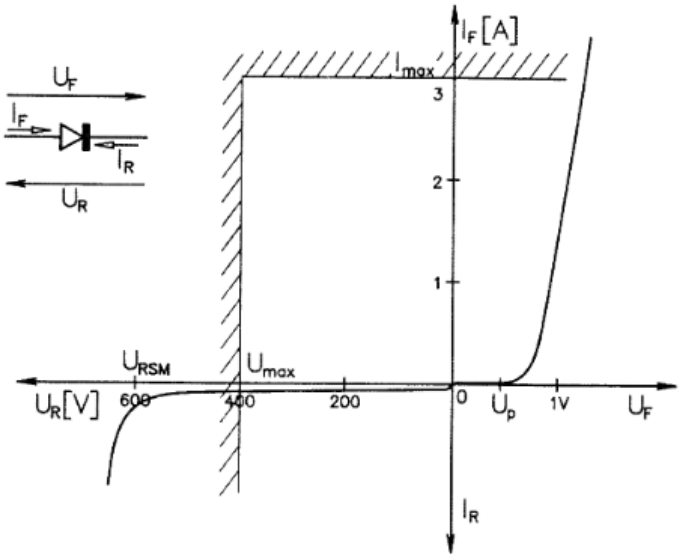
Wireless Electricity. *Pinterest* [online]. Dostupné z: https://cz.pinterest.com/pin/317292736228789376/

Wireless Power Transmission. *Instructables* [online]. Dostupné z: http://www.instructables.com/id/Wireless-Power-Transmission/

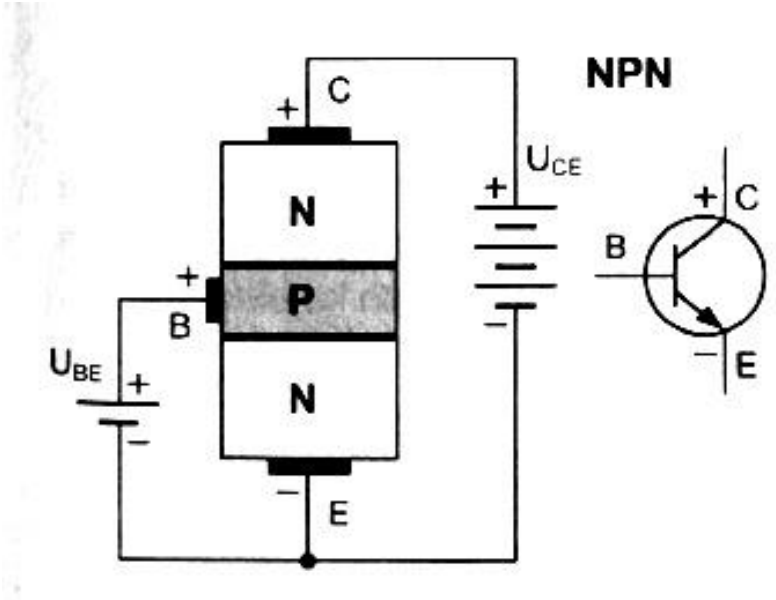
Přílohy



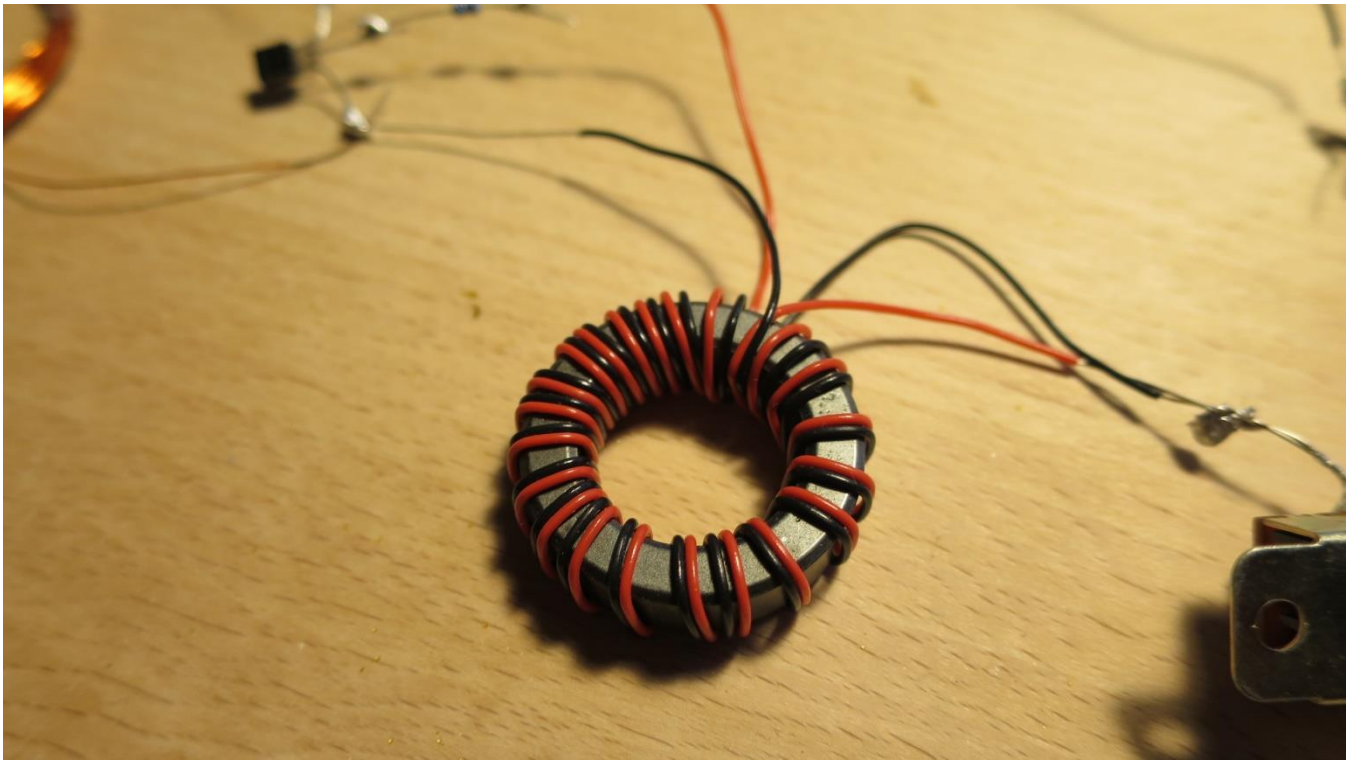
Obr. č. 1: Portrét Nikola Tesly z roku 1890; (zdroj: Tesla3.jpg. In: Wikimedia.org [online]. San Francisco, 2007 [cit. 2017-03-18]. Dostupné z: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/56/Tesla3.jpg



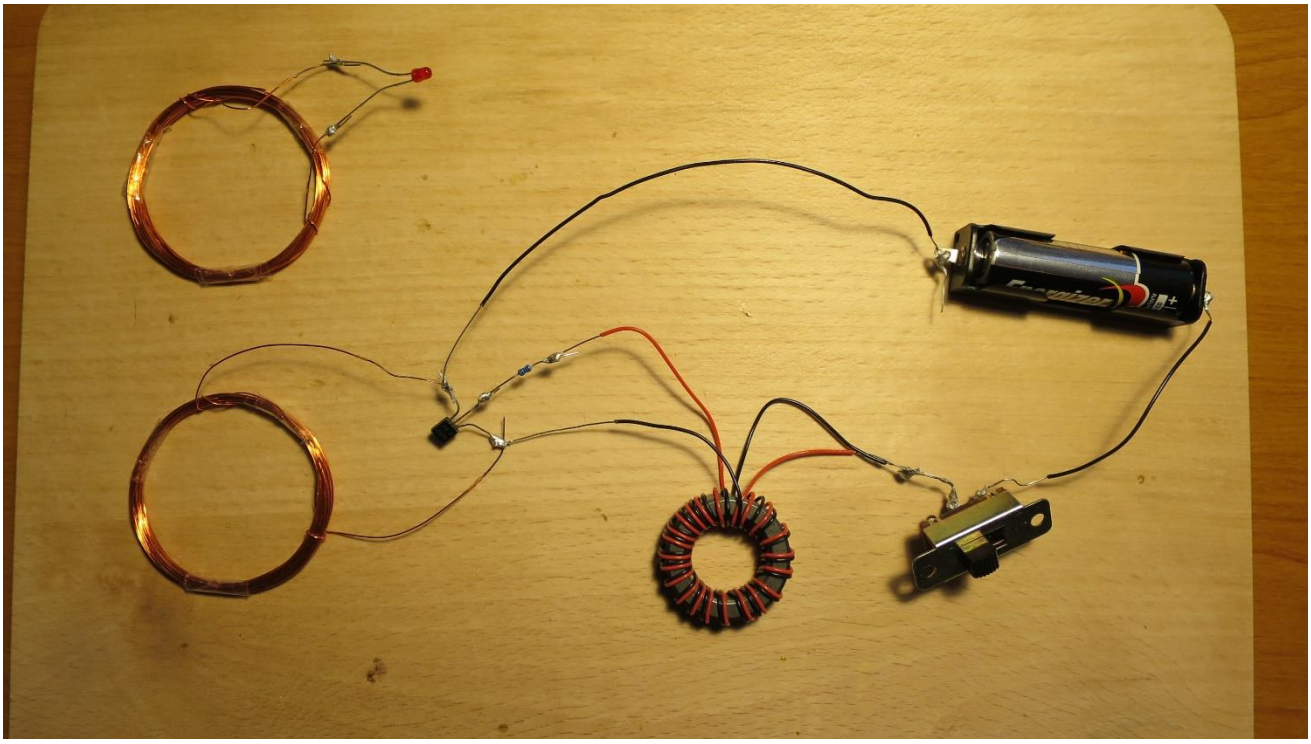
Obr. č. 2: Voltampérová charakteristika diody (U_p - prahové napětí, U_{max} - maximální závěrné napětí, U_{RSM} - průrazné napětí); (zdroj: UHLÍŘ, Ivan. skripta eoe [online]. [cit. 20. 11. 2016]. Dostupný na WWW: https://www.strojar.com/upload/skripta/3rocnik/EOE_skripta.pdf)



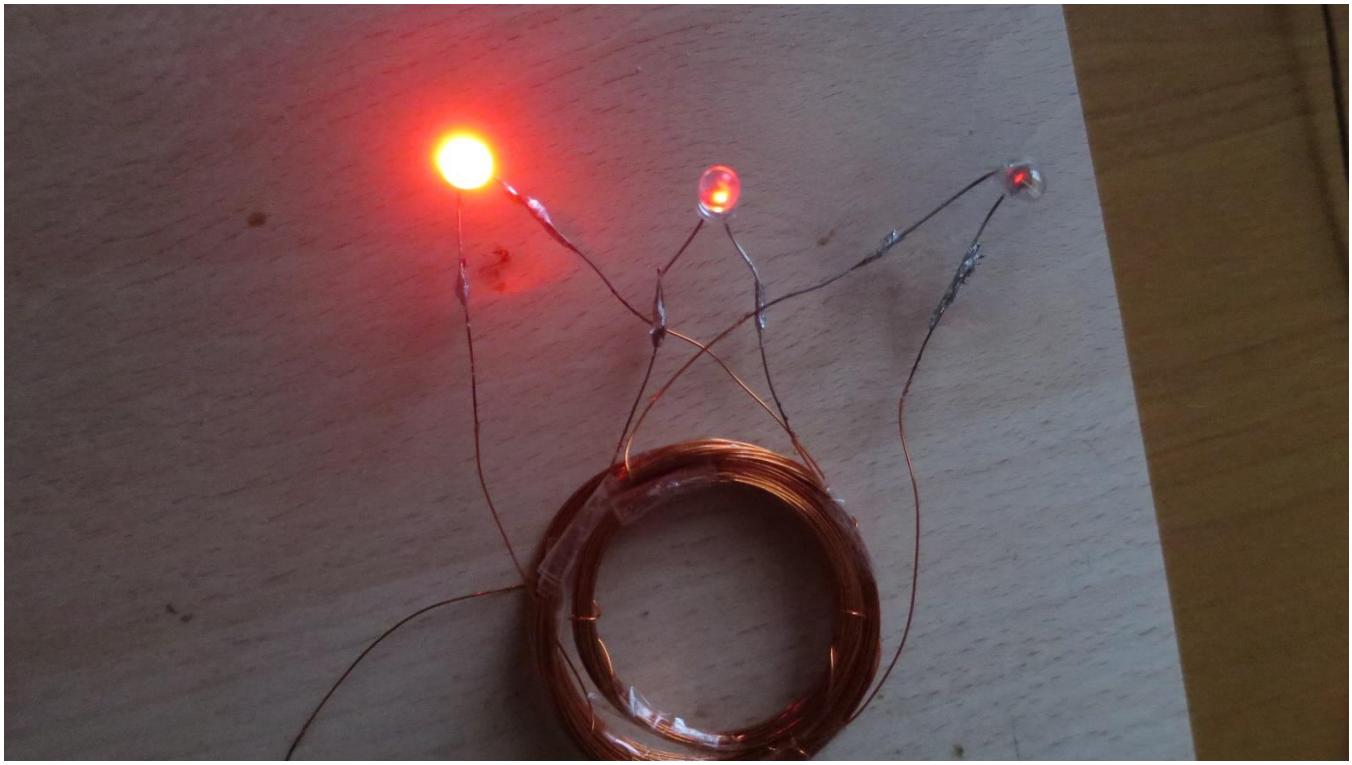
Obr. č. 3: Znázornění struktury NPN rezistoru a jeho zapojení v propustném směru; (zdroj: KABÁT, T. klopné obvody [online]. [cit. 20. 1.2016]. Dostupný na WWW: http://klopneobvody.hys.cz/tranzistory.html)



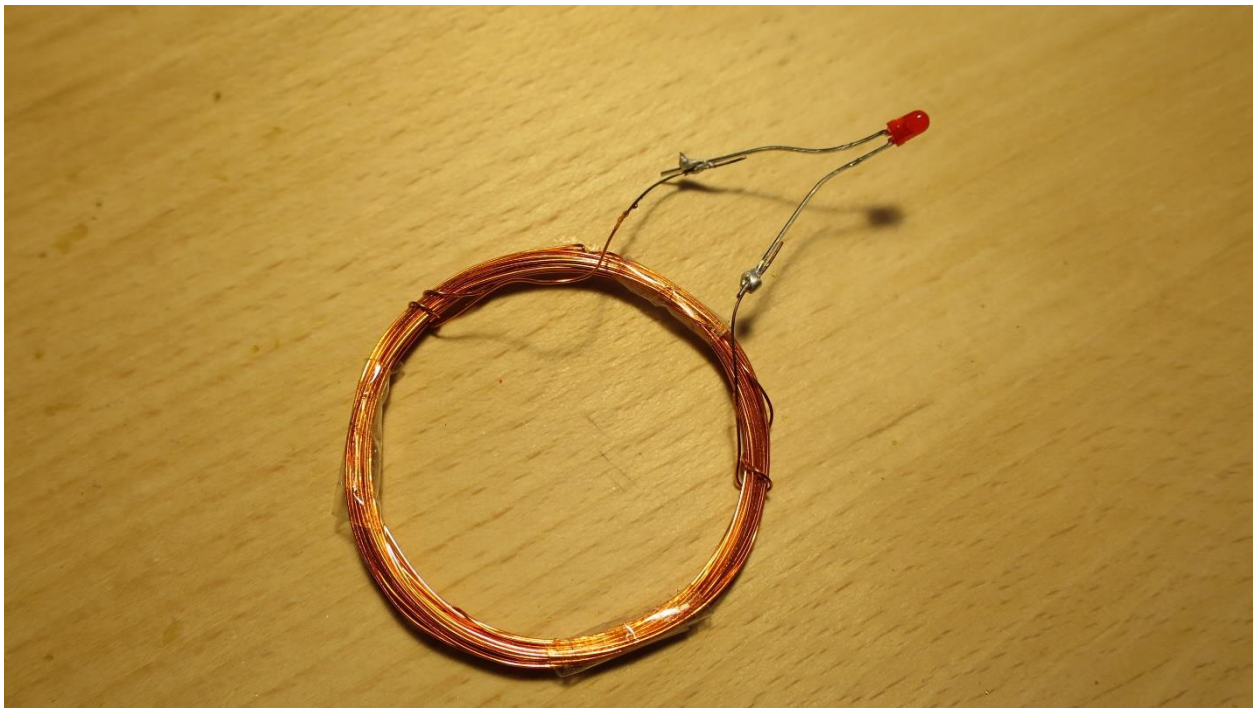
Obr. č. 4: Detail feritového toroidního jádra s navinutými cívkami; (zdroj: archiv autora)



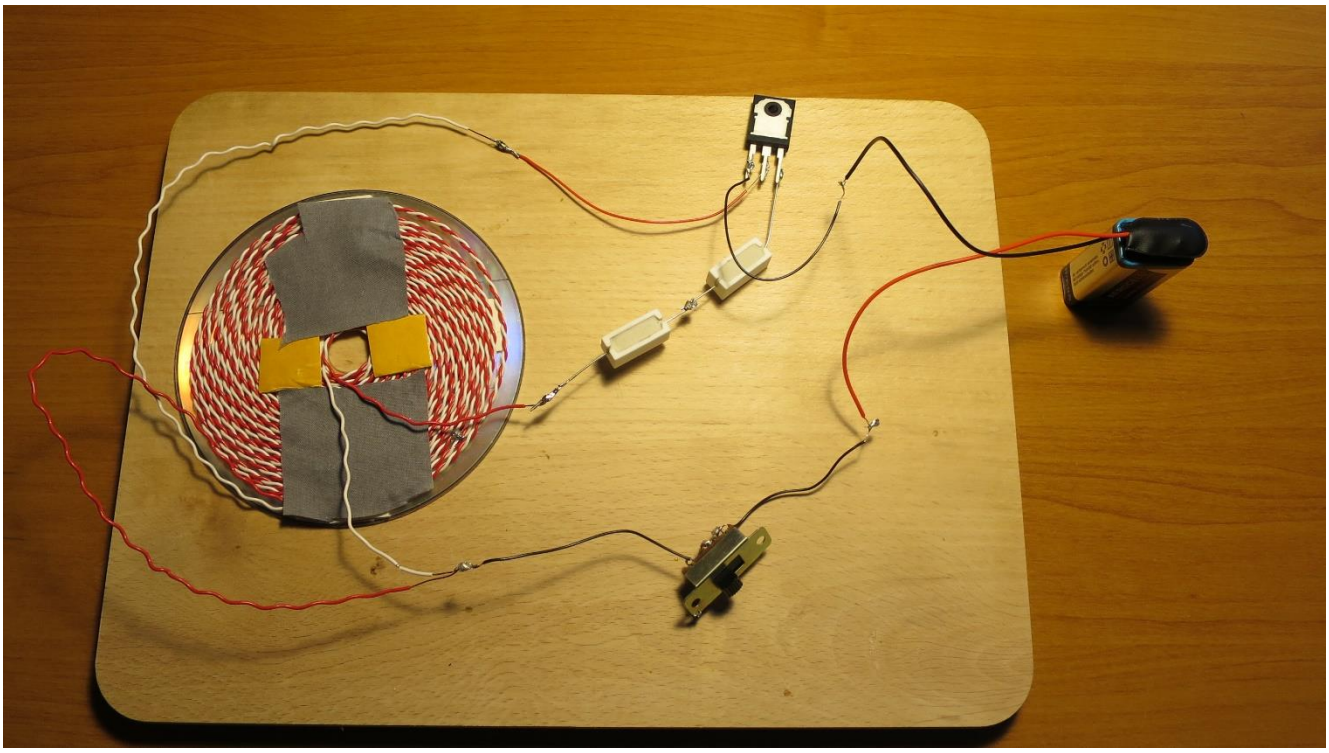
Obr. č. 5: Obvod se dvěma cívkami (přijímací cívka vlevo nahoře) se zlodějem joulů jako zdrojem; (zdroj: archiv autora)



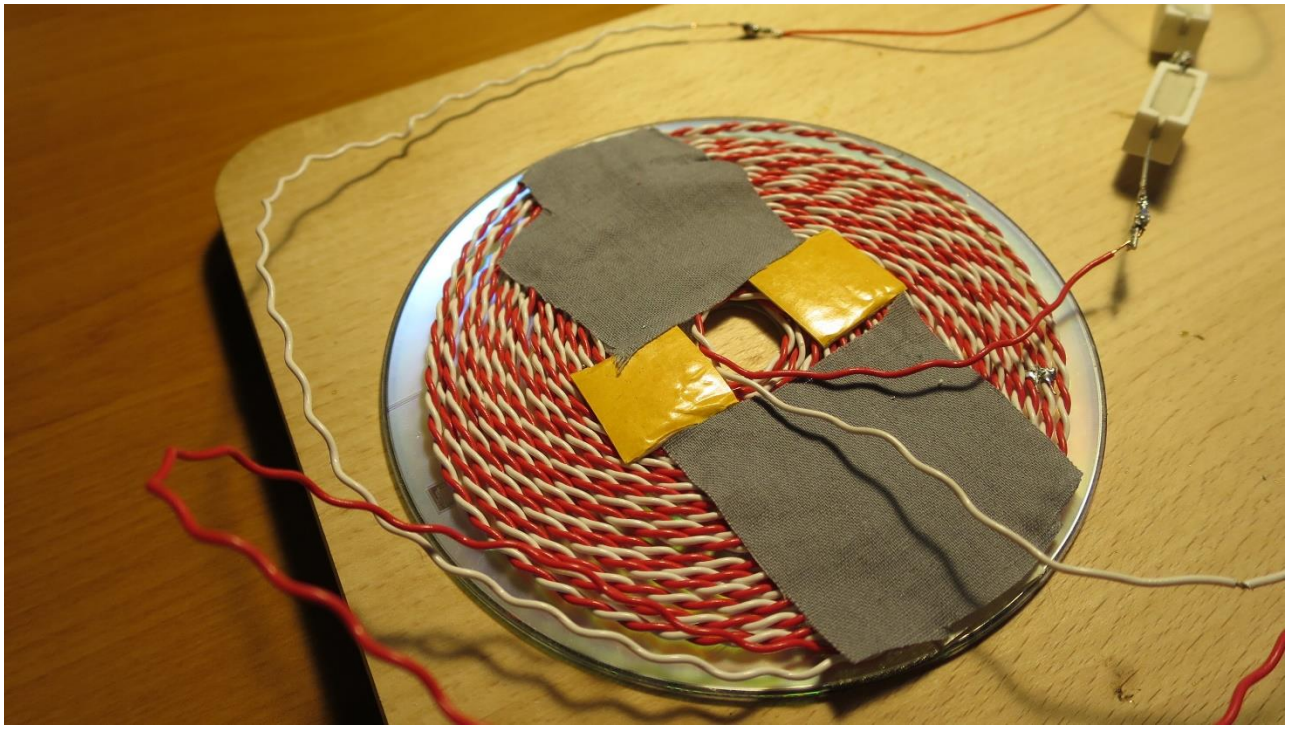
Obr. č. 6: Demonstrace vlivu vlastností cívky na velikost indukovaného napětí (zleva: cívka s třiceti závity a poloměrem 2,4 cm, cívka se třiceti závity a poloměrem 1,9 cm, cívka s patnácti závity a poloměrem 2,4 cm); (zdroj: archiv autora)



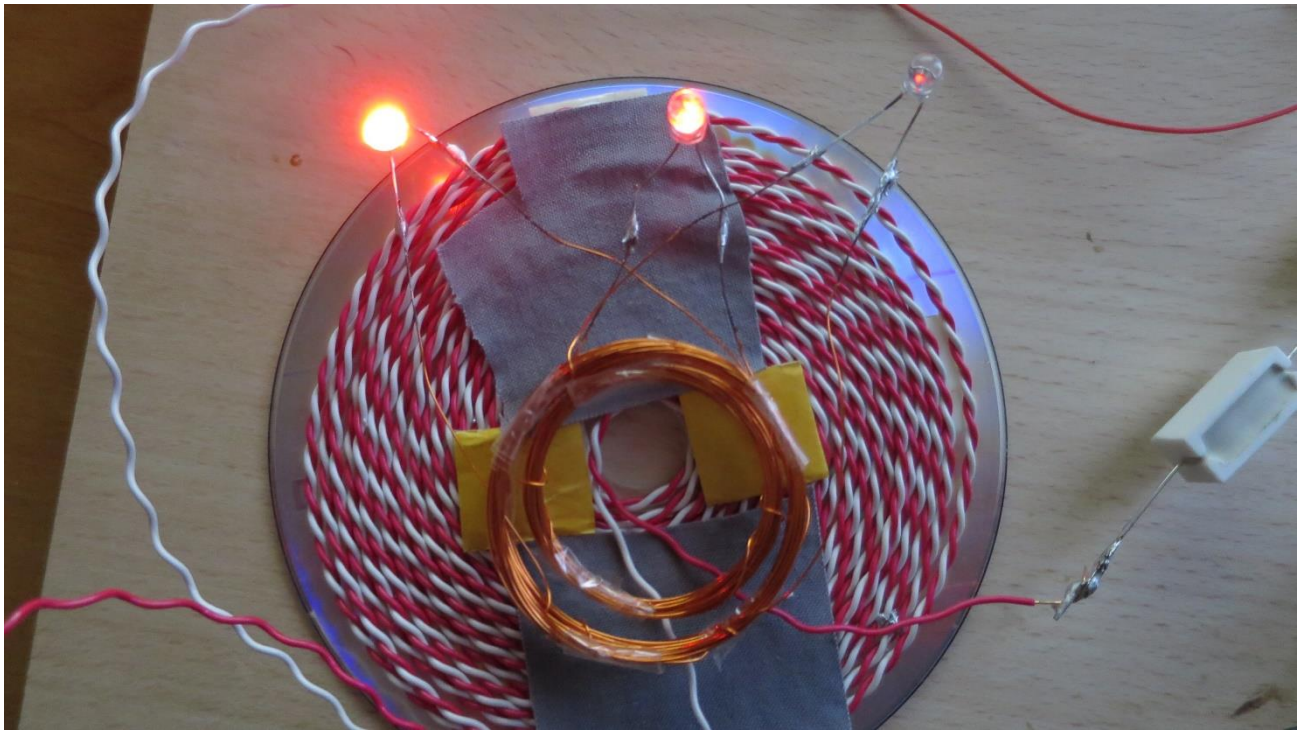
Obr. č. 7: Detail přijímací cívky s třiceti závity a superjasnou LED; (zdroj: archiv autora)



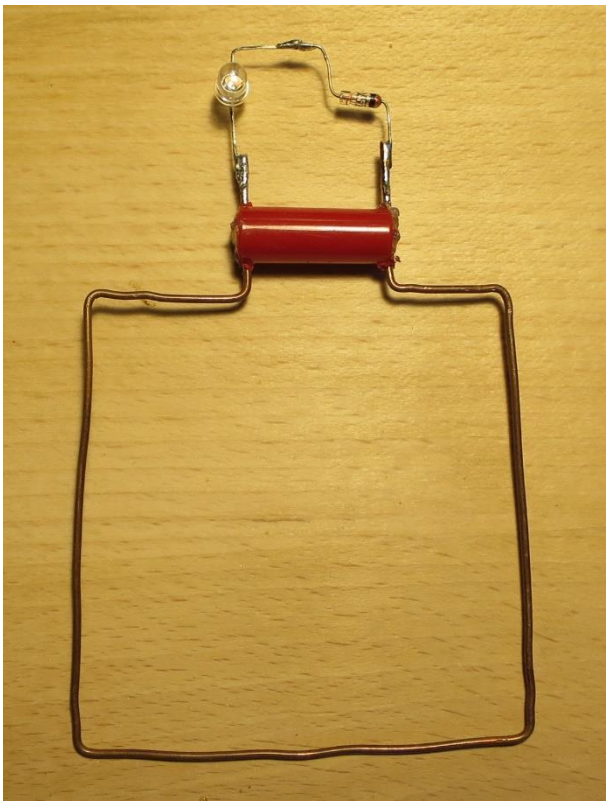
Obr. č. 8: Obvod s rovinnými cívkami; (zdroj: archiv autora)



Obr. č. 9: Detail rovinné cívky uchycené na CD; (zdroj: archiv autora)



Obr. č. 10: Demonstrace vlivu vlastností cívky na velikost indukovaného napětí (zleva: cívka s třiceti závity a poloměrem 2,4 cm, cívka se třiceti závity a poloměrem 1,9 cm, cívka s patnácti závity a poloměrem 2,4 cm); (zdroj: archiv autora)



Obr. č. 11: Obvod pro detekci mobilního signálu; (zdroj: archiv autora)