



Středoškolská technika 2024

Setkání a prezentace prací středoškolských studentů na ČVUT

**VAN DE GRAAFŮV GENERÁTOR
A
TESLŮV TRANSFORMÁTOR**

Vít Sebastian Kopczyk

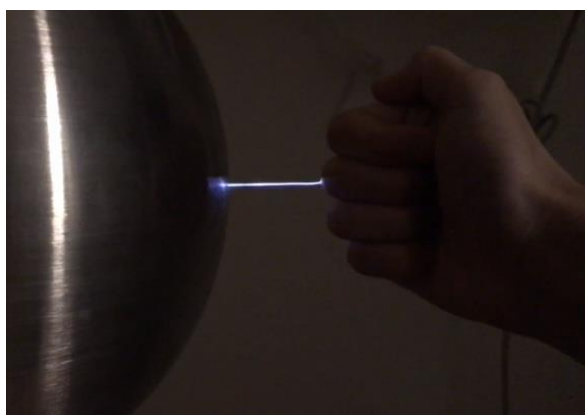
Gymnázium Opatov
Konstantinova 1500, Praha

Van de Graaffův generátor

Van de Graaffův generátor je generátor vysokého elektrostatického napětí. Dnes slouží jako základní výuková pomůcka pro výuku elektrostatiky. Elektrostatika je obor fyziky, který se zabývá elektrickými náboji a nabíjením těles, tedy hlavně statickými náboji a jejich působením.

Jak ale generátor funguje, jaké s ním existují pokusy, a k čemu vlastně sloužil?

Obr. 1: Přeskočení jiskry.



V principu dělá to, že odebírá elektrony ze země a hromadí ten náboj na kouli nahoře. Funguje na principu triboelektrického jevu, což je proces získávání náboje tělesa od jiného tělesa třením. Pojem „tribo“ pochází z řečtiny a znamená „tření“. Řecká civilizace položila základ matematicky, fyziky, filozofie, politiky a mnoha dalších věd. Ve skutečnosti však k tomuto jevu není nutné tření, stačí pouze kontakt dvou těles, tření tento efekt pouze zesiluje. Dochází ke sdílení elektronů tělesy. Při oddělení těles se elektrony nestihnou vrátit zpátky, a přeskóčí tak jiskra (viz fotografie na obr. 1).

V tomto tématu se také setkáme s pojmem triboelektrická řada. Je to seřazení materiálů podle toho, jestli se daný materiál rád elektronů zbavuje, nebo naopak chce elektrony získávat. Tedy, zda se nabíjí kladně či záporně. Čím dále jsou materiály v řadě od sebe, tím větší je mezi nimi elektrický potenciál. Příklad triboelektrické řady je na obr. 2.

Obr. 2: Triboelektrická řada.

vzduch
kůže
liščí ohon
sklo
vlasý
nylon (silonky)
vlna
hedvábí
hliník
papír
bavlna
ocel
jantar
guma
polyester (pravítko)
polyetylen (sáčky)
PVC (vinyl)
silikon
teflon
ebonit

Ze spodního kartáče, který je uzemněný, sbírá tento otáčející se gumový pás elektrony a vozí je na kouli, kam je hromadí pomocí horního kartáče (ten je stejný jako dole). Dle triboelektrické řady musíme spodní váleček zvolit z materiálu, který má tendenci se elektronů zbavovat, a horní váleček zvolit takový, který bude chtít elektrony získávat. Zvolili jsme tedy vhodnou kombinaci tak, že spodní váleček je z nylonu a horní z polyvinylchloridu neboli z PVC, který se používá na vodovodní trubky. Gumový pás elektrony přenáší a všimněte si, že guma je v triboelektrické řadě zhruba uprostřed. To proto, aby pás elektrony nebral ani neodevzdával více než válečky. Gumový pás tedy funguje jako výtah pro elektrony. Horní kartáč potom elektrony navede na dutou kovovou kouli.

Je potřebné zmínit, že tato konstrukce je však vhodná pro verzi generátoru, který na kouli shromažďuje elektrony. Kdybychom válečky prohodili, koule by se nabíjela kladně. Důležité také je, aby se kartáče pásu nedotýkaly, a to proto, abychom dosáhli lepší izolace od země. Elektrony vytažené na kouli ze země mají totiž tendenci se do země vracet. Na výsledném náboji na kouli se tedy podílí jak elektrony získané třením pásu o nylonový váleček, tak vytažené ze země. Země jako taková má tady od počátku věků totiž i svůj náboj. Kdyby ho neměla, nefungovaly by správně některé fyzikální zákony. Nejpravděpodobnější tudíž je, že země svůj náboj dobíjí ze zemského jádra.

Jelikož elektrony lépe unikají ze špičatých konců, pro účely hromadění náboje má vršek generátoru tvar koule, aby elektrony příliš neunikaly. To umožňuje naměřit na této kouli stovky tisíc voltů. To však není nebezpečné, protože je zde malý proud a výboj působí velmi krátkou dobu.

Generátor jsem zhotovil sám ze 2 PVC trubek, 5mm kovové osy, gumového pásu na posilování, PVC válečku, nylonového válečku z 3D tiskárny a z koule, která původně sloužila jako zahradní dekorace. Pohon zajišťuje elektromotor z vrtačky s pwm (pulse wave modulation)

regulátorem, který je napájen 100 W zdrojem ze zásuvky. Zdroj je jako jediný potenciálně nebezpečný. Dolní kartáč jsem uzemnil do uzemňovacího kolíku v zásuvce.

Školní pomůcku za desetitisíce korun, jsem dokázal vyrobit do 3000 Kč. Jeden jsem dokonce vyrobil i do kabinetu fyziky pro moji školu (viz obr. 5). Pracoval jsem na něm 9 měsíců. Dělá sice hluk a pás je poněkud divoký, ale na kouli je 300 000 voltů, je funkční a vhodný pro demonstrace při výuce.

Jak už jsem zmiňoval, na kouli je vysoké elektrostatické napětí. V tomto případě jsou samozřejmostí výboje. Počítejme 30 000 voltů na proražení 1 cm vzduchu. Mně se podařilo z generátoru získat maximálně 10 centimetrový výboj. Můžeme tedy říct, že se zde jedná o nějakých 300 tisíc voltů. Stejně jako je to s póly magnetu, i u nábojů platí, že opačné se přitahují a stejné odpuzují. Demonstrovat si to můžeme například hliníkovými kalíšky naskládány na kouli na sebe. Jelikož se nacházejí na nabité kouli, všechny jsou nabíjeny záporným nábojem. Jsou stejné, tudíž se odpuzují, a to zapříčiňuje to, že se rozletí, protože mají tendenci být co nejdál od sebe. Stejně to funguje i s vlasy. Pokud nejsme uzemnění, staneme se jakoby součástí koule, a vstávají nám vlasy.

Předvádím také pokus s bublinami. Pokud je fouknu blízko koule, získají její náboj, a od koule odletí, jelikož bude stejný. Bublina dokáže od koule získat náboj bez kontaktu, díky tzv. elektrostatické indukci, kdy se elektrony indukují do tělesa. Některé bubliny se však přitahují, a to zase díky jevu zvanému elektrostatická polarizace, kdy v bublině dojde k otočení elektronů. No a pokud jsem součástí koule já, můžu donutit levitovat balonek, který odpuzují.

A k čemu takový generátor vůbec je?

Dnes slouží hlavně jako učební pomůcka pro výuku. Ale ve své době měl využití při urychlování elektronů v rentgenových trubcích. Vynalezl ho v roce 1929 Holandský fyzik Robert J. Van De Graaff (viz obr. 3).

Obr. 3: Robert J. Van De Graaff



Vysoké napětí používá ke svému fungování zářivka. Výboj excituje molekuly plynu v zářivce a tím ho rozsvítí. Jen musíme čekat na okamžik, kdy se koule znovu nabije, aby se poté vybila do zářivky. Na kouli totiž není při vybíjení stále napětí, ale nabíjení chvíli trvá. Můžeme tedy říct, že koule slouží jako kondenzátor přesto, že se koule neskládá ze dvou vodivých desek oddělených dielektrikem. Každý takovýto dutý předmět má svoji kapacitu, kterou můžeme srovnávat s klasickými destičkovými kondenzátory. Například koule na generátoru má kapacitu 28 pF, což odpovídá kapacitě maličkého keramického kondenzátoru (viz obr. 4).

Obr. 4: Kondenzátor o stejné kapacitě, jako má kapacita koule



Obr. 5: Generátor



Teslův transformátor

Transformátory jsou všude kolem nás. Jsou to důležité elektrotechnické součástky. Najdeme je v adaptérech, mikrovlnkách, televizích a dalších zařízeních. Transformátor už podle názvu slouží k transformaci elektrického napětí. Skládá se ze dvou cívek, což je izolovaný drát několikrát obmotaný kolem transformátorového jádra. Cívky se nazývají primární a sekundární. Poměr závitů těchto cívek se rovná transformačnímu poměru napětí. Vstupní proud posíláme skrz primární cívku s určitým počtem závitů. Jelikož je transformátor součástka, která funguje pouze na střídavé napětí, indukuje se díky tomu proud v sekundární cívce. Kolikrát je na sekundární cívce více nebo méně závitů, tolikrát se nám změní napětí. Transformátory se většinou používají na zvyšování napětí, proto je na sekundární cívce obvykle více závitů. Co se však stane s proudem, jak se bude chovat?

Jelikož transformátor není perpetuum mobile, elektrický výkon na primární cívce musí být větší nebo roven výkonu cívky sekundární. Každý přístroj má totiž své ztráty a může mít účinnost maximálně 100%, čehož je v podstatě nemožné dosáhnout. Podle fyzikálních zákonů není možné ze 100W získat 120W, takový přístroj by měl účinnost 120%, což je perpetuum mobile. Proto tedy při zvýšení napětí, aby byl výkon na primární cívce přibližně stejný i na sekundární cívce, se musí úměrně tomu snížit proud, aby platil zákon zachování energie. Kdyby bylo na primární straně závitů více, napětí by se poměrem snižovalo, zato proud by se nám zvýšil.

Co je tedy Teslův transformátor a jak se tento specifický druh od klasických liší?

Jako klasické transformátory má TT také primární a sekundární cívku. Doted' záleželo pouze na poměru závitů. U TT to platí také, s tím rozdílem, že je v obvodu s cívkou i kondenzátor. Takovému obvodu se říká LC obvod. L vyjadřuje indukčnost cívky a C kapacitu kondenzátoru. Indukčnost je vlastnost cívky vytvářet magnetické pole při protékání elektrického proudu a měří se v jednotkách H (henry). Kapacita je v jednotkách F (farad). Teslův transformátor funguje na tzv. rezonančním principu. Každý LC obvod má podle svých hodnot cívky a kondenzátoru svoji frekvenci, na které dosahuje rezonance. Jak primární strana, tak sekundární strana TT tvoří LC člen. Na primární je to vysokonapěťový kondenzátor a cívka, na sekundární je to také cívka a kapacitu tvoří horní dutý vodivý tvar, zvaný toroid. Pokud jsou hodnoty LC obou obvodů stejné a tím i stejné rezonanční frekvence (v mém případě 132 kHz), TT má nejvyšší možnou účinnost, jelikož obvody spolu rezonují a zesilují se navzájem.

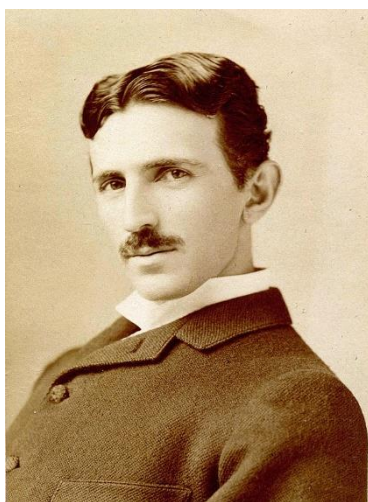
Rezananční frekvence LC obvodů se počítá podle vzorce:

$$F_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Předpokládá se, že na primární straně bude cívka s malou indukčností, ale kondenzátor s velkou kapacitou a na sekundární zase velká indukčnost a malá kapacita. Cílem je, aby byly mezi součiny co nejmenší rozdíly. Jaký je tedy princip činnosti?

Existují základní 3 typy TT podle primárního obvodu a součástek, kterými jsou buzeny. První typ se zkratkově nazývá SSTC (Solid State Tesla Coil), neboli polovodičový budič jako Tranzistor, MOSFET nebo JFET. Tyto součástky zesilují proud do primární cívky. Druhý typ je SGTC (Spark Gap Tesla Coil), což znamená v překladu jiskřiště. To je v podstatě tvořeno dvěma elektrodami, mezi kterými je malinká mezera. Tento obvod je asi nejjednodušší. Postavil jsem ho i já. Zkoušel jsem i pár SSTC zapojení, avšak tyto pokusy nebyly příliš úspěšné. Obvod funguje tak, že vysoké střídavé napětí, v mém případě transformátor z mikrovlnné trouby, nabíjí kondenzátor vlastní výroby z linolea a alobalu. Jakmile je kondenzátor nabitý, přeskočí jiskra v jiskřišti, čímž se uzavře část obvodu s primární cívkou a vznikne silný elektromagnetický pulz, který se naindukuje do sekundární cívky. Moje zařízení dokáže podle poměru závitů zvyšovat napětí až 1000x. Přitom 1000x snižuje proud, tudíž je díky své velmi nízké hodnotě bezpečný. Zároveň jsou výboje vysokofrekvenční, přičemž dochází k tzv. skin effectu, při kterém se vysokofrekvenční proudy šíří pouze po povrchu těla, a ne přes srdce. Poslední způsob zapojení primárního obvodu je VTTC (Vacuum Tube Tesla Coil). V tomto obvodu je obsažena elektronka, což je předchůdce dnešního tranzistoru. Tato zapojení jsou asi nejsložitější, používají se pro obvody s audio modulací, což jsou obvody, u kterých se dá vstupní frekvence modulovat a zvuky blesků rychle mění frekvence. Teslák nám tak může hrát písničky. Toto zapojení je mojí vizí, ale obvody jsou velmi složité a je potřeba počítač. Sekundární cívka totiž okolo sebe má točivé elektromagnetické pole, které může takováto zařízení jako paměťová média ničit. Proto je toto zařízení nebezpečné pro osoby s kardiostimulátory. Díky tomuto poli však můžeme zcela bezdrátově přenášet energii.

Obr. 6: Nikola Tesla



Asi nejznámější pokus s tímto přístrojem je zcela bezdrátové rozsvícení zářivky, který vidíme i na fotce z obr. 7. Pole kolem cívky excituje molekuly uvnitř zářivky, a tím ji rozsvítí.

Ostatně přesně k tomuto účelu bylo zařízení vynalezeno srbským vynálezcem Nikolou Teslou (viz obr. 6). A i právě zářivka je jeho vynálezem. Chtěl pomoci 50metrových těchto věží umístěných různě po světě dodávat energii každému zcela bezdrátově. Začal takový vysílač stavět, avšak v polovině prací Teslu jeho investor přestal financovat. Věž byla nazvána „Wardenclyffská“ a Tesla s ní dokázal rozsvítit zářivku až na 200 metrů. Sousedé si však stěžovali kvůli výpadkům proudu a probíjení podkov koňů. A tímto se dostáváme ještě k jedné informaci, a to proč musí být sekundární cívka uzemněna. Stále platí věta, že proud prochází pouze uzavřeným obvodem. Ani sekundární obvod nesmí být výjimka. Sekundární cívka je dole uzemněná a výboje chtějí tento obvod uzavřít, nicméně je uzavřen přes jistý odpor vzduchu a přirozenou kapacitu.

Obr. 7: Svítící zářivka



Jak se ale v blízkosti TT bude chovat žárovka? Paradoxně je vynález žárovky připisován největšímu rivalovi Nikoly Tesly, Thomasu Edisonovi. Na rozdíl od zářivky je v žárovce místo plynů vzduchoprázdné neboli vakuum. Zde se nenacházejí žádné molekuly, které by se při excitaci rozsvítily. Využijeme ale toho, že vakuum má menší elektrický odpor než vzduch. Na 1cm výboje ve vzduchu je potřeba asi 10kV. Pokud žárovku přiložíme k toroidu, můžeme pozorovat nádhernou plazmovou záři (viz obr. 8).

Obr. 8: Žárovka v blízkosti TT.



Zařízení Nikoly Tesly bylo zcela průkopnické. Sám Nikola Tesla svůj celý život zasvětil bezdrátovému přenosu energie. Dodnes je zařízení fascinující, známé pro své dlouhé blesky, málokdo ale ví, jak ve skutečnosti funguje. Není sice nijak průmyslově využíváno, ale jako studentský projekt je naprosto skvělé. Sám jsem na něm pracoval přes rok a půl, avšak ještě zdaleka nejsem spokojený s aktuální verzí (viz obr. 9). S tímto experimentováním plánuju pokračovat a moc mě to baví. Fyzika je zábava.

Obr. 9: Autor textu s Teslovým transformátorem



Zdroje obrázků:

<https://www.electricstuff.co.uk/bulb.html>

https://cs.wikipedia.org/wiki/Nikola_Tesla

<https://www.couplingtips.com/bellows-couplings/what-role-does-resonant-frequency-play-in-selecting-a-bellows-coupling/>