

## **Neposlušná elektrostatika II**

*PETER ŽILAVÝ*

Matematicko-fyzikální fakulta Univerzity Karlovy, Praha

Školní Van de Graaffův generátor je jednou ze základních pomůcek pro pokusy z elektrostatiky. Přesto je princip jeho činnosti pro mnohé lidi často obestřen tajemstvím. Jak vlastně doopravdy funguje? Jak hledat chybu, když nepracuje správně? Neobvyklý způsob hledání odpovědi na tyto otázky pomocí digitálního osciloskopu s vn sondou je obsahem tohoto příspěvku.

### **Úvod\***

Chceme-li zjistit, zda (a jak) je těleso nabitó, obvykle používáme elektroskop, případně nějaký elektronický měřič či indikátor elektrického náboje. Nabitá tělesa přitahují i nenabitó kusky papíru, vlasy či jiné drobné předměty (např. díky jejich polarizaci a následnému přitahování v nehomogenním poli nabitóho tělesa).

Princip činnosti elektroskopu (elektrometru) spočívá ve vzájemném odpu-zování souhlasně nabitých mechanických částí. Elektronické měřiče náboje využívají měřicího kondenzátoru (o výrazně větší kapacitě než má zkoumané kovové těleso) s jednou uzemněnou elektrodou. Po připojení druhého pólu kondenzátoru k tělesu se tento kondenzátor nabije stejně velkým nábojem, jaký mělo měřené těleso. Z napětí na kondenzátoru a jeho kapacity lze pak určit hledaný náboj. Podrobně je tento princip popsán v [2].

Pokud nabitó těleso vodivě spojíme se zemí, odvedeme jeho náboj (v případě tělesa z izolantu jen část jeho náboje) do země. Při tomto spojení chvíli teče elektrický proud. Velikost a doba trvání „proudového impulsu“ přitom závisí na kapacitě tělesa (velikost, tvar...) a na celkovém odporu spojení se zemí. V následujícím textu bude ono spojení se zemí představovat vysokonapětěová (dále jen „vn“) sonda osciloskopu.

### *Osciloskop a vysokonapětěová sonda*

Osciloskop obvykle používáme k zobrazení časových průběhů elektrických veličin ve slaboproudých obvodech. Ve spojení s vysokonapětěovou sondou však může být užitečným nástrojem i pro elektrostatiku. Pro toto použití je

---

\* Převzato a upraveno z [1].

vhodný (v současné době snadno dostupný) digitální osciloskop umožňující zachycení, zobrazení a proměření jednorázových dějů (špiček, jednotlivých impulsů). Samotný popis práce s osciloskopem není předmětem tohoto článku, základní informaci lze nalézt např. v [3].

Základní napěťové rozsahy osciloskopu lze zvětšit použitím vhodné sondy (která vlastně představuje se samotným vstupem osciloskopu pokud možno frekvenčně nezávislý dělič napětí). Pro naše experimenty jsme použili vysokonapěťovou sondu 1 000× umožňující bezpečně měřit napětí ve špičce až do 40 kV. Z pohledu tělesa, ke kterému sondu přiblížíme, lze sondu s osciloskopem nahradit paralelní kombinací rezistoru o odporu 100 M $\Omega$  a kondenzátoru o kapacitě asi 3 pF zapojenou do země.



Obr. 1 Osciloskop a vysokonapěťová sonda

Výstupní informací je časový průběh potenciálu (napětí vůči zemi) hrotu sondy resp. časový průběh potenciálu tělesa, ke kterému je sonda připojena.

### **Co budeme potřebovat?**

Pro následující experimenty budeme kromě osciloskopu s vysokonapěťovou sondou potřebovat: novodurovou tyč (odpadní trubku či trubku z příslušenství vysavače), skleněnou tyč, flanelový hadřík nebo umělou jelenici, kousek kůže, laboratorní stojan se svorkou na uchycení vn sondy, šroubovák a školní Van de Graaffův generátor.



Obr. 2 Pomůcky pro experimenty

Pro naše experimenty jsme použili školní Van de Graaffův generátor NTL DE525-1B s motorovým pohonem pásu. Spodní kladka (válec) je hliníková, horní je z plexiskla a pás je vyroben ze silikonové pryže.

### **Sršení náboje z nabitě tyče**

V [1] jsme zkoumali vybíjení zelektrované tyče do různě velkých kovových těles – postupně do ostrého hrotu sondy, kuličky nasazené na hrot sondy a do dalších dvou větších koulí přiložených k sondě osciloskopu. Diskutovali jsme vliv velikosti koule (kapacity kovového tělesa) na velikost a délku napěťového impulsu zaznamenaného osciloskopem.

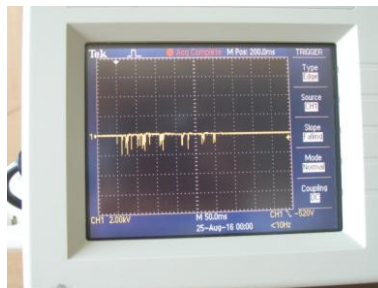
Pro potřeby dalšího zkoumání nejdříve připomeňme dva základní experimenty z tohoto článku.

Nabitou novodurovou tyč jsme přibližovali ostrému hrotu vn sondy. Při jejím postupném přibližování jsme pozorovali již při vzdálenosti několika centimetrů od hrotu sondy na obrazovce osciloskopu řadu impulsů – „sršení náboje“ do hrotu. Impulsy měly zápornou polaritu, z tyče sršel záporný náboj. Potvrdili jsme známé tvrzení, že novodurová tyč se při tření flanelem či umělou jelenicí nabíjí záporně.

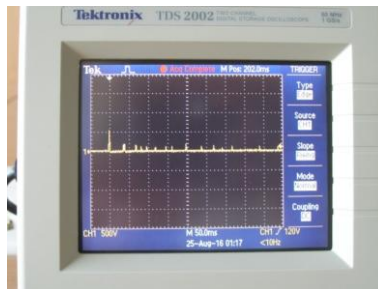
Při posunutí tyče ve své ose při nezměněné vzdálenosti od sondy vysršel do hrotu další náboj (vidíme další sérii impulsů na obrazovce osciloskopu). Do hrotu sondy tedy vysrší vždy jen část náboje z malé oblasti nabitě tyče z izolantu. Tato skutečnost umožňuje následující podrobnější zkoumání nabi-

tých těles z izolantu jako např. pás či kladky školního Van de Graaffova generátoru.

Experiment jsme zopakovali se skleněnou tyčí nabitou třením kouskem kůže.



Obr. 3 Sršení náboje z nabitě novodurové tyče do hrotu sondy



Obr. 4 Sršení náboje z nabitě skleněné tyče do hrotu sondy

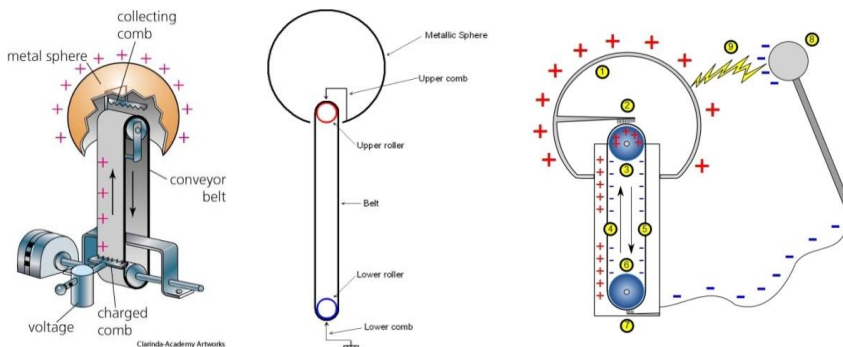
Podobně jako v případě novodurové tyče, pozorovali jsme i v případě skleněné tyče při jejím postupném přibližování k hrotu sondy na obrazovce osciloskopu sérii impulsů. Impulsy však měli kladnou polaritu, z tyče srší kladný náboj, skleněná tyč se při tření kůže nabíjí kladně.

Důležitou skutečností bylo, že u skleněné i novodurové tyče (bez ohledu na znaménko náboje na tyči) probíhal experiment stejně jak v případě sršení náboje do ostrého hrotu, tak i v případě přeskoku náboje na zakulacenou plochu. V blízkosti ostrého hrotu sondy vzniká při přiblížení nabitě tyče velké elektrické pole, ve kterém dochází k ionizaci okolního vzduchu, vytvoření nabitých částic (nosičů náboje obou znamének – iontů i elektronů) a tím i „vodivého kanálu“ mezi tyčí a hrotem. V případě „hladkých ploch“ tyče a kuličky (nasažené na hrot sondy) vznikne mezi nimi dostatečné silné elektrické pole pro

ionizaci vzduchu až při jejich přiblížení na podstatně menší vzdálenost. Množství najednou přeneseného náboje vzniklým elektrickým výbojem je pak větší.

### Jak funguje školní Van de Graaffův generátor?

Školní Van de Graaffův generátor je jednou ze základních pomůcek pro pokusy z elektrostatiky. Přesto je princip jeho činnosti pro mnohé lidi často obořčen tajemstvím. Většina informačních zdrojů (internet, ale i učebnice) se omezují pouze na popis uspořádání Van de Graaffova generátoru (kladky, pás, pohon, kartáče – hřebeny, kulový konduktor). Jen málo z nich např. [4], [5] se však detailně zabývá principem činnosti generátoru a popisuje nabíjecí procesy probíhající na jeho dílčích součástech. Navíc, existuje více druhů školních generátorů lišících se použitými materiály kladek a pásu, umístěním elektrod či způsobem pohonu.



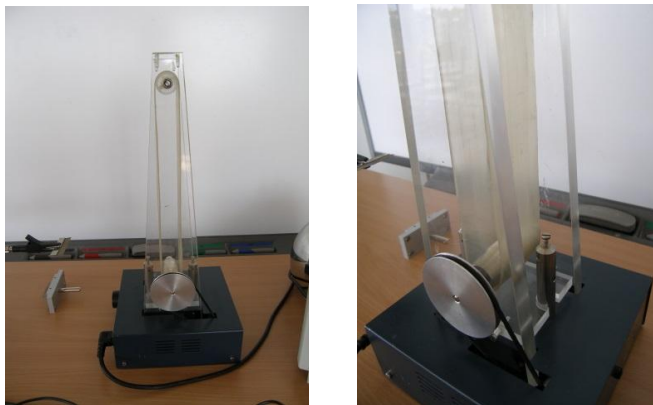
Obr. 5 Obrázky získané vyhledávačem na internetu k vysvětlení činnosti Van de Graaffova generátoru

Obvykle snadno vysvětlíme, že náboj přivedený dovnitř kulového konduktoru (duté kovové koule) z horního sběracího kartáče se díky vzájemnému odpuzování nábojů stejného znaménka rozloží po vnějším povrchu koule. Čím je ale dána „ochota“ pásu převzít náboj ze spodního kartáče a „ochota“ odevzdat jej v horní části prostřednictvím sběracího kartáče kulovému konduktoru? Na čem závisí znaménko náboje, kterým se konduktor nabíjí?

Zkusme hledat odpověď na tyto otázky pomocí následujícího experimentu.

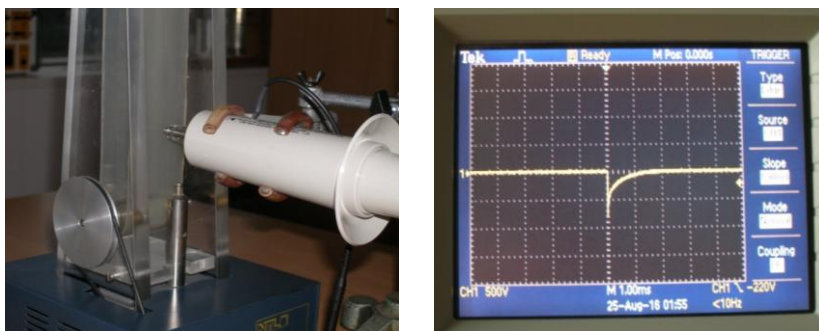
Odeberme kulový konduktor školního Van de Graaffova generátoru, odšroubujme spodní kartáče i horní sběrací kartáč s držákem. Odstraňme z blízkosti přístroje veškerá nabitá tělesa. Odvedme také zbytkový náboj

z obou stran pásu pomocí uzemněného vodiče (nebo jen ponechme přístroj několik minut stát).



Obr. 6 Školní Van de Graaffův generátor bez sběracích kartáčů

Ke spodní části pásu (poblíž místa, kde je v sestaveném stavu spodní kartáč) přiblížíme hrot vn sondy. Můžeme také nasadit na hrot sondy krokosvorku, do ní uchytit odmontovaný spodní kartáč a přiblížit jej k dolní části pásu.



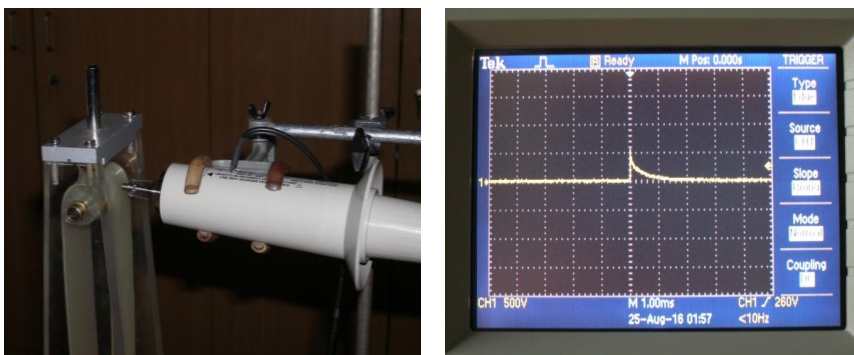
Obr. 7 Zkoumání náboje na pásu v oblasti mezi kladkami

Po roztočení pásu pozorujeme na obrazovce osciloskopu záporné impulsy, podobně jako tomu bylo při přibližování záporně nabitě novodurové tyče k hrotu sondy (viz obr. 3 vpravo a obr. 7 vpravo, na obr. 7 je jen větší časové rozlišení). Pozoruhodné přitom je, že četnost těchto impulsů po krátké době (asi 10 až 20 sekund od spuštění pohybu pásu) výrazně klesá. Zjistili jsme tedy, že

samotný pás je v místě přiblížení sondy v případě našeho přístroje jako celek záporně nabitý. Při přiblížení uzemněného hrotu sondy resp. uzemněného kartáče toto nabití způsobuje sršení kladného náboje na pás. Stejný výsledek dostaneme při měření z obou směrů pohybu pásu (nahoru i dolů).

Po provedení předchozího měření nyní přesuneme hrot sondy k horní části pásu tak, aby přes něj „ukazoval“ na horní kladku. Měření můžeme provést při odebraném kovovém držáku s horním kartáčem, nebo jej můžeme ponechat na místě, případně se hrotem sondy dotýkat přímo držáku.

Osciloskop nyní registruje kladné impulsy – pás a horní kladka se dohromady jeví jako kladně nabitá soustava, dochází k sršení kladného náboje na (uzemněnou) sondu.



Obr. 8 Zkoumání celkového náboje soustavy pásu a horní kladky

Četnost registrovaných impulsů přitom po krátké době od spuštění pohybu pásu klesá podobně, jako tomu bylo u měření v dolní části pásu.

Co způsobilo, že se pás při pouhém roztočení bez přítomnosti kartáčů nabil záporně? Odpověď naznačuje už samotný pohled na obě kladky našeho Van de Graaffova generátoru. Jsou z různých materiálů. Spodní je hliníková, horní je z průhledného plexiskla.

### *Kontakt pásu a hliníkové kladky*

Představme si na chvíli, že se pás odvaluje jen kolem jediné, hliníkové kladky. Při odvalování pásu kolem ní se v důsledku tzv. triboelektrického jevu nabíjí tato kladka kladně a vnitřní část pásu záporně, podobně jako se při tření (vzájemném kontaktu) novodurové tyče flanelovým hadrem či umělou jelenicí nabíjí hadr kladně a tyč záporně. Znaménka nábojů odpovídají umístění siliko-

nové pryže (–) a hliníku (+) v tzv. triboelektrické řadě. Efekt je výrazný, uvedené materiály jsou od sebe daleko v opačných částech řady. Díky vodivosti hliníkové kladky se takto získaný kladný náboj může pohybovat po celém jejím povrchu. Konkrétní rozložení náboje na kladce závisí kvůli elektrostatické indukci i na stavu nabití pásu.

V případě našeho Van de Graaffova generátoru se spodní hliníková kladka otáčí v kluzných ložiscích osazených v konstrukci z izolantu – není spojena se zemí. Po přiblížení hrotu sondy ke kovové ose kladky pozorujeme na obrazovce osciloskopu impulsy kladné polarity. Hliníková kladka se tedy při odvalování pásu ze silikonové pryže skutečně nabíjí kladně.

### *Kontakt pásu a kladky z plexiskla*

Nyní si představme, že se pás odvaluje jen kolem kladky z plexiskla. Podobně jako tomu bylo v případě hliníku, i plexisklo (polymethylmethakrylát) (0–) se v kontaktu se silikonovou pryží (–) nabíjí kladně. Efekt je však slabší než v předchozím případě, plexisklo a silikonová pryž jsou v triboelektrické řadě blíž sebe, než tomu bylo předtím. Celkový kladný náboj na povrchu kladky z plexiskla sice bude menší, než tomu bylo u hliníkové kladky, plexisklo je však izolant – kladný náboj zůstane na povrchu kladky na místě, kde „vznikl“.

### *Van de Graaffův generátor jako nábojová pumpa*

Dejme nyní „dohromady“ obě kladky tak, že hliníková bude dole a kladka z plexiskla nahoře (uspořádání našeho přístroje). Vnitřní část pásu se bude v důsledku výše popsaných procesů nabíjet záporně, kladky kladně.

Pokud tedy přiblížíme k pásu z vnější strany do prostoru mezi kladkami uzemněnou elektrodu (hrot sondy, uzemněný kartáč), tak mezi ní a nabitým pásem vznikne elektrické pole. V důsledku silného elektrického pole v okolí hrotů kartáče či hrotu sondy pak dochází k ionizaci vzduchu, vytvoření „vodivého kanálu“ a k přenosu kladného náboje na vnější povrch pásu. Proto jsme na obr. 7 pozorovali záporné impulsy na obrazovce osciloskopu – elektrický proud tekł ze sondy na pás. Pás (který je sám z izolantu) je tedy z vnitřní strany nabit záporně a z vnější se postupně nabíjí kladně.

Pokud nebudeme z vnější strany pásu náboj odebírat (máme odmontovaný horní kartáč či jen sundaný konduktor), kladný náboj na vnější straně pásu postupně vyrovná záporný náboj na straně vnitřní – pás se z pohledu spodní uzemněné elektrody přestane „tvářit“ jako elektricky nabitý, poklesne elektrické pole mezi ním a elektrodou a tím ustane i další sršení kladného náboje na



pás. Tato skutečnost vysvětluje pozorovaný (viz výše) pokles četnosti impulsů registrovaných osciloskopem po určité době od spuštění pohybu pásu.

Podívejme se nyní na situaci u horní kladky z plexiskla. Jak již bylo řečeno, při pohybu pásu se tato kladka nabíjí kladně, vnitřní povrch pásu záporně. V části, kde je pás obtočen kolem kladky, je záporný náboj vnitřního povrchu pásu kompenzován kladným nábojem na povrchu kladky. Soustava horní kladky spolu s pásem se tak „tváří“ vůči svému okolí neutrálně nebo (s přihlédnutím k nabíjení pásu i spodní, hliníkovou kladkou) jako málo záporně nabitá. Jestliže však v prostoru mezi kladkami v důsledku záporně nabitého vnitřního povrchu pásu „nastoupí“ na jeho vnější povrch kladné náboje, bude soustava pás jako celek (oba povrchy) spolu s horní kladkou kladně nabitá. Pokud tedy k horní kladce přiblížíme (uzemněnou) sondu osciloskopu či sběrací kartáč umístěný v dutině kulového konduktoru, bude díky kladnému nabití soustavy kladky a pásu z tohoto pásu sřet kladný náboj.

Aby tedy mohl kladný náboj u horní kladky „vystoupit“ do horního sběracího kartáče, musí v dolní části přístroje „nastoupit“ na pás. V případě našeho druhého měření s hrotem sondy u horní kladky (obr. 8) „vystoupil“ do sběracího kartáče kladný náboj, který předtím na pás „nastoupil“ z hrotu sondy při prvním měření s hrotem sondy mezi kladkami (obr. 7). Proto také (při odebraných spodních kartáčích) osciloskop registroval kladné impulsy pouze po omezenou dobu od spuštění pohybu pásu. Při následném doplnění jednoho nebo obou spodních (uzemněných) kartáčů (stačí je jen přidržet rukou poblíž místa, kam patří) již osciloskop registruje kladné impulsy kontinuálně.

Pozn.: V případě dolní vodivé hliníkové kladky je situace poněkud odlišná od horní kladky z izolantu. Jak již bylo řečeno, díky elektrostatické indukci je rozložení náboje na jejím povrchu ovlivňováno nábojem z obou stran pásu. Pokud je celkově pás méně záporně nabitý (na vnější povrch pásu „nastoupil“ kladný náboj), je v oblasti vzájemného kontaktu pásu a kladky i méně kladného náboje na samotném povrchu kladky.

## **Závěr**

Digitální osciloskop s vysokonapěťovou sondou je užitečným nástrojem k pochopení zákonitostí elektrostatiky. Přináší možnost zkoumat „časový průběh“ různých nabíjecích procesů a umožňuje podrobně lokálně prozkoumat náboj na povrchu ploch z izolantu (např. nabitě tyče či pásu školního Van de Graaffova generátoru).

Základem činnosti řady školních Van de Graaffových generátorů je triboelektrický jev – nabíjení těles z různých materiálů při jejich vzájemném kontak-

tu. Pro správnou funkci těchto přístrojů je proto důležitý stav (a čistota) povrchu pásu i kladek. Neméně důležité je i zajištění dostatečného vzájemného kontaktu těchto součástí pomocí řádného napnutí pásu. Kovové sběrací kartáče se nesmí dotýkat pásu, jinak způsobí mechanické poškození jeho povrchu. Pro řádnou funkci generátorů (s jedním konduktorem) musí být spodní kartáč uzemněn, v případě přístrojů s motorovým pohonem pásu napájených z elektrické sítě je toto uzemnění obvykle provedeno přes ochranný kolík elektrické zásuvky.

### **Poděkování**

Děkuji panu profesoru Jaroslavu Krejčímu z gymnázia Na Pražačce za inspiraci a upozornění na nesrovnalosti v učebnicích a dalších studijních textech věnovaných základním pokusům z elektrostatiky. Související diskuse byla prvotním impulsem pro vznik tohoto článku.

### **Literatura**

- [1] Žilavý P.: *Neposlušná elektrostatika I.* In: Sborník konference Veletrh nápadů učitelů fyziky 21. Ed.: Milěr T., Válek J. Masarykova univerzita Brno 2016, ISBN 978-80-210-8465-0, s. 235-243.
- [2] Žilavý P.: *Indikátor a měřič elektrického náboje.* In: Sborník konference Veletrh nápadů učitelů fyziky 5. Ed.: Rauner K. ZČU Plzeň 2000. s. 169-170.
- [3] Žilavý P.: *Střídavé proudy, ČEZ a. s. ve spolupráci s P3K, 2012, vydání druhé, ISBN 978-80-87186-65-7.*
- [4] Žouželka J., Trčka Z.: *Nové přístroje pro pokusy z elektrostatiky, Acta Universitatis Palackianae Olomucensis. Facultas Rerum Naturalium. Mathematica-Physica-Chemica, Vol. 12 (1972), No. 1, 293-303, dostupné z <https://dml.cz/handle/10338.dmlcz/127132>*
- [5] <http://youtube.com/rimstarorg>