



Michael Faraday byl vynikající anglický experimentátor, který se zabýval elektrickými a magnetickými ději a také chemií. Mezi jeho objevy a vynálezy patří elektrolyza, elektromagnetická indukce nebo právě Faradayova klec. Zdroj: Sualci Quotes.

Je Faradayova klec vždy účinná?

Klec pro stínění elektrického pole vynalezl v roce 1836 jeden z nejvýznamnějších experimentátorů všech dob, anglický fyzik Michael Faraday (1791–1867). V dnešní době se Faradayova klec používá v mnoha obměnách ke stínění statického elektrického pole i elektromagnetických vln. Setkat se s ní můžeme například v mikrovlnné troubě, ve starších mobilních telefonech nebo ve vědeckých laboratořích. Efekt Faradayovy klece také chrání pasažéry automobilu nebo letadla před účinky zásahu bleskem. Speciální Faradayovy obleky umožňují technikům provádět opravy na vysokonapětovém vedení pod napětím. Jen z tohoto krátkého výčtu je vidět, jak důležitou úlohu tento téměř 200 let starý vynález hraje v našem životě. Zatímco základní princip fungování Faradayovy klece je relativně snadno pochopitelný, pokud budeme zkoumat detaily týkající se závislosti účinnosti stínění na geometrii klece, je třeba vytvořit vhodný model a použít patřičný matematický aparát k vyřešení daného problému. Je překvapivé, že neexistuje mnoho seriózních prací zabývajících se touto problematikou.

Faradayova klec

Elektricky vodivé materiály (vodiče) obsahují volné nosiče nábojů, které jsou schopny se pohybovat v materiálu pod vlivem vnějšího elektrického pole. Umístíme-li kousek vodivého materiálu do elektrického pole, dojde uvnitř tohoto vodiče k přeuspořádání nábojů. Záporný náboj se shromáždí na povrchu vodiče, blíže ke kladně nabitě elektrodě, a kladný náboj blíže k záporné elektrodě. Tomuto jevu se říká elektrická indukce. Uvnitř vodiče tak vznikne indukované elektrické pole, které přesně vykompenzuje vnější elektrické pole tak, že uvnitř vodiče je v ideálním případě pole nulové. Tento indukovaný náboj je koncentrován pouze na povrchu vodiče a vnitřní objem vodiče se stínícího efektu neúčastní. Vytvoříme-li ve vodiči dutinu, pak v ní bude rovněž nulové elektrické pole. Stínící efekt funguje i tehdy, když vodič nemá souvislou plochu a může obsahovat otvory, případně může být složený pouze z drátů, čímž se dostáváme k Faradayově kleci.

Faradayova klec funguje i opačně – stíní elektrický náboj umístěný uvnitř a jeho elektrické pole nezasahuje ven. Klec ovšem v tomto

případě musí být uzemněná (což vyplývá z Gaussova zákona pro elektrostatiку). V této konfiguraci se používá jako stínění v elektronických zařízeních nebo v elektrických stanicích. Uzemněná Faradayova klec do značné míry stíní také elektromagnetické vlny. Zde je důležité, aby vlnová délka záření byla mnohem větší než otvory v kleci (typickým příkladem jsou dvířka mikrovlnné trouby, kde mikrovlny s vlnovou délkou 12,5 cm zůstanou uvězněny v troubě, zatímco viditelné světlo s vlnovou délkou ve stovkách nanometrů bez problému projde otvory v mřížce dvířek trouby). U elektromagnetických vln ale vstupují do hry i jiné faktory, než je vodivost klece – například permeabilita použitého materiálu.

Je jasné, že účinnost Faradayovy klece má své hranice. Jeden drát elektrické pole neodstíní, zatímco vodivá krabice s plnými stěnami ano. Jak tedy namodelovat přechod mezi těmito extrémními případy? Klesne intenzita elektrického pole ve Faradayově kleci skutečně na nulu? Jak závisí účinnost stínění na hustotě drátů klece?

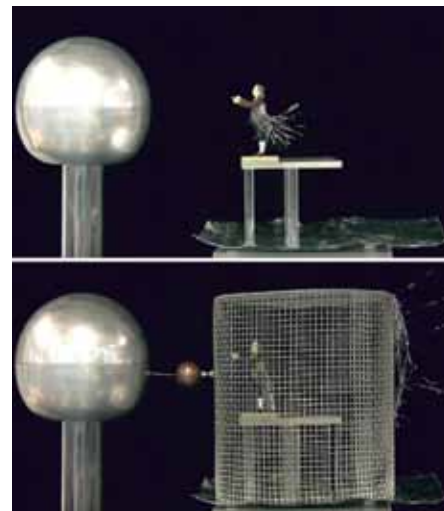
Matematický model

Výsledky výpočtů stínících schopností Faradayovy klece závisí na její geometrii a přesnost závisí na zjednodušení, která se při analýze provádějí. Například analýza uváděná ve Feynmanových přednáškách uvažuje model mřížky s nekonečně tenkými a nekonečně dlouhými dráty s konstantním nábojem a předpovídá exponenciální pokles elektrického pole k nule s rostoucí vzdáleností od mřížky. Analýzou stínících schopností Faradayovy klece se nedávno také zabývala skupina matematiků na Oxfordské univerzitě. Cílem jejich studií bylo vypočítat rozložení elektrického potenciálu v okolí Faradayovy klece vyřešením Laplaceovy rovnice podobně jako ve Feynmanově případě, avšak s tím rozdílem, že vodiče mají konečný průměr a konstantní potenciál (nikoliv konstantní náboj). Zdrojem elektrického pole je elektrický náboj umístěný vně klece. Dráty klece ve dvou dimenzích reprezentuje n vodivých disků o poloměru r rozmístěných po obvodu kruhu o jednotkovém poloměru.

Elektrické pole vždy částečně proniká do klece a nikdy neklesne zcela na nulu, ale na konečnou hodnotu. Pole uvnitř klece má pouze logaritmickou závislost na poloměru drátů oproti očekávané exponenciální (což je Feynmanův případ s mřížkou s konstantním nábojem) a hyperbolickou závislost na počtu drátů. Intenzita elektrického pole

Van de Graaffův generátor – zdroj vysokého napětí. Na duté kovové kouli se akumuluje náboj nanášený pohybujícím se třecím pásem. Zařízení vynalezl americký fyzik Robert Jemison Van de Graaff (1901–1967) v roce 1929. V roce 1933 se svým strojem vytvořil napětí 7 milionů voltů.

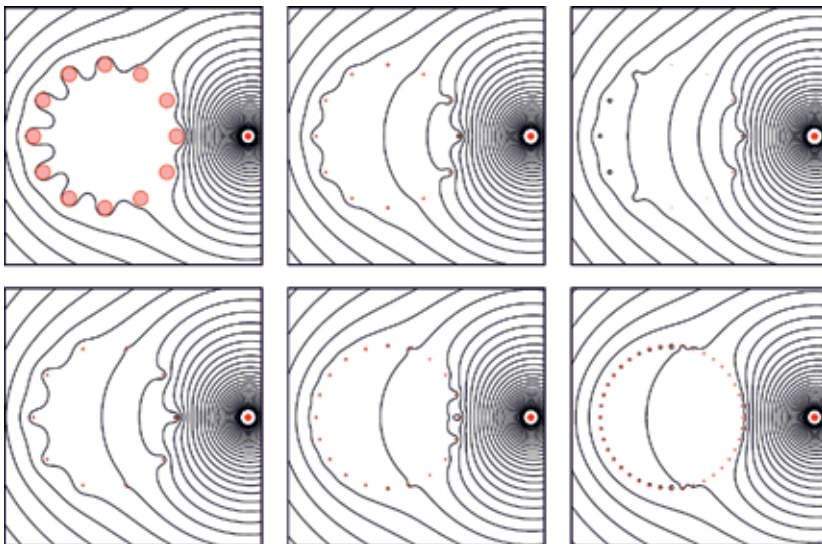
Van de Graaffův generátor vytváří statické elektrické pole, které elektrickou indukcí nabíjí tenké vodivé třásně připevněné k testovací figurce. Tyto třásně se vlivem souhlasného náboje odpuzují. Pokud figurku umístíme do Faradayovy klece, tak je figurka umístěna v nulovém elektrickém poli (v ideálním případě) a k žádné indukci nedochází. Ovšem na povrchu Faradayovy klece existuje indukovaný náboj, jehož přítomnost signalizují vylající vodivé třásně připevněné na pravé straně klece. Zdroj: MIT.





Obří Faradayova klec stíní elektromagnetické vyzařování z transformátorů v elektrické převáděcí stanici v kalifornském Sylmaru (USA). Ve stanici se převádí stejnosměrné napětí 500 kV ze severozápadu USA na střídavých 230 kV při výkonu 3,1 GW. Stanice napájí velkou část Los Angeles. Povrch klece má plochu přibližně 37 000 m². Zdroj: Galvanizeit.

Ekvipotenciály elektrického pole získané numerickým řešením jsou znázorněny na obrázcích pro několik různých poloměrů vodičů tvořících klec (nahore) a pro jejich různé počty (dole). Efektivita stínění dramaticky klesá jak se zmenšujícím se poloměrem, tak se snižujícím se počtem vodičů. Zdroj: SIAM Review 57.



uvnitř klece klesá nikoli k nule, ale ke konečně malé hodnotě pole. Tato nedokonalost stínění souvisí s indukcí náboje v drátech klece a s energií, kterou má pole kolem klece. Pro nabití tenkého drátu je potřeba více energie než pro nabití tlustého drátu na stejný náboj, protože v tenčím drátě jsou souhlasné náboje blíže sobě. Tento energetický rozdíl je zodpovědný za nedokonalou kompenzaci elektrického pole uvnitř Faradayovy klece. Výsledky simulací byly reprodukovány také pomocí jiných schémat výpočtu – například řešením Laplaceovy rovnice s nábojem spojitě rozloženým na kružnici reprezentující obvod klece nebo hledáním rozložení potenciálu pomocí minimalizace energie elektrického pole.

A jaké jsou výsledky?

Výpočty účinnosti Faradayovy klece ukazují nižší stínící schopnosti, než se doposud myslelo, což je poměrně překvapivé zjištění, i když se jedná pouze o simulaci a matematický popis. Experimentální ověření těchto výsledků není nikterak složitý úkol. Problematika stínění je seriózní inženýrská disciplína a řeší se buď pomocí příslušného CAD softwaru, nebo jsou data o účinnosti stínění klece získána měřením pro dané geometrické uspořádání. Z aplikačního hlediska to mohou být dostatečné údaje, ale na seriózní vědeckou publikaci pokrývající jak teoretický popis, tak experimentální data, si budeme muset asi ještě nějakou dobu počkat.

■ Miroslav Havránek,
9. 10. 2015, AB 35/2015

Od Fresnela k metačočkám

Zásadní mechanickou nevýhodou klasických skleněných čoček je jejich objem a z toho vyplývající velká hmotnost. Čočky využívají k optickému zobrazování lom světla a jejich povrch musí s optickou osou svírat vhodný úhel. Tenké čočky mají tento povrch tvarovaný jako kulový vrchlík. Se zvyšováním optické mohutnosti se poloměry křivosti optických ploch zmenšují, čímž ale narůstá tloušťka čočky (a s tím mimo jiné i optické vady) a z toho vyplývající její objem a hmotnost.

Fresnelova čočka

Problém objemu a hmotnosti čoček se do jisté míry podařilo odstranit francouzskému fyzikovi Augustin Jeanu Fresnelovi (1788–1827), který v první polovině 19. století navrhl jednoduchý způsob snížení hmotnosti čočky. Fresnel navrhl odstranit ty části čočky, které se nepodílejí na lomu světla. Výsledná čočka se poskládá z několika soustředných mezikružných čoček, přičemž každé z mezikruží má menší tloušťku, než by měla původní čočka. Snížení hmotnosti je velkou mechanickou výhodou, která je ale vyvážena nárůstem optických vad čočky, zejména na ostrých hranách mezi drážkami mezikruží. Přesnost zobrazování se sice zvyšuje s hustotou mezikruží, ale ani tak nejsou současné Fresnelovy čočky vhodné pro přesné optické zobrazování a používají

Optická mohutnost – vyjadřuje zakřivení čočky, jde o převrácenou hodnotu obrazové optické vzdálenosti a měří se v dioptriích (m^{-1}).

Fresnelova čočka – speciálně tvarovaná čočka, která má při podobných parametrech a stejném použitém materiálu nižší objem a hmotnost než klasická čočka. Jsou z ní vyňaty části materiálu, které se nepodílejí na lomu světla a ostatní části jsou vhodně posunuté. Výsledná čočka má velké optické vady a není vhodná pro optické zobrazování. Využívá se v optických přístrojích a zařízeních pro směřování světelných paprsků, například v semaforech nebo v majácích.

Nalevo je porovnání profilu Fresnelovy a klasické čočky. Uprostřed je Fresnelova čočka z reflektoru a napravo pohled na krajinu přes Fresnelovu čočku ze zpětného projektoru. Zdroje: Wikipedia, Kayelites a Greensboroday.

