

Úloha VI.P ... nebezpečnější korona

10 bodů; (chybí statistiky)

Dojde-li k výronu koronální hmoty ze Slunce, začne se tato hmota velkou rychlostí šířit prostorem. Někdy může zasáhnout Zemi a ovlivnit její magnetické pole. Odhadněte, jak velké elektrické proudy by mohl takový výron generovat na Zemi v síti elektrického vedení. Na jakých parametrech to závisí? Okomentujte, jaké by měla taková událost dopady na lidskou civilizaci.

Karel byl na konferenci a pak na stejné téma viděl video.

Sluneční korona je velmi horké a zářivé okolí Slunce tvořené žhavými plyny unikajícími ze sluneční atmosféry. Teploty zde dosahují až jednoho milionu kelvinů, což je mnohem více než na povrchu Slunce, který má teplotu „pouze“ 6 000 K. Vyšší teplota je způsobena zahříváním magneto-zvukovými vlnami, které se nazývají Alfvénovy vlny. Oblast sluneční korony je magneticky velmi aktivní, tvoří se zde sluneční skvrny, dochází zde k častým erupcím a aktivita také není rovnoměrná, například v blízkosti slunečních skvrn je vyšší. Magnetické siločáry u slunečního povrchu jsou neustále v pohybu a při jejich křížení tak může dojít k jejich přepojení, jak je naznačeno na obrázku 1. Z rozžhavaného povrchu se potom oddělí část plazmatu nazývaná koronální výron (*coronal mass ejection*) tvořená především elektrony, protony a heliem, která se pohybuje od Slunce velmi vysokou rychlostí, a to až $3\,000\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$.

Když takový koronální výron dorazí k Zemi, interaguje s magnetosférou a může tak způsobit geomagnetickou bouři. Dochází totiž k interakci magnetického pole Země s magnetickým polem neseným koronálním výbojem. Nabitě částice pak obvykle putují podél magnetických siločar směrem k pólům, kde interagují tentokrát s atmosférou, čímž se podílejí na vytváření polární záře. V důsledku změny rovnováhy tlaku mezi zemskou magnetosférou a slunečním větrem dochází ke změnám geomagnetického pole. Právě na rychlosti této změny jsou závislé naindukované proudy ve vedení vysokého napětí. Velikost těchto proudů odhadneme z druhé Maxwellovy rovnice

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t},$$

kde \mathbf{E} je vektor elektrické intenzity a \mathbf{B} je vektor magnetické indukce. Tento vztah lze alternativně vyjádřit pomocí Farradayova zákona

$$\varepsilon = -\frac{\partial \Phi}{\partial t},$$

kde ε je indukované elektromotorické napětí a Φ je magnetický tok smyčkou.

V této úloze budeme vedení vysokého napětí modelovat jako dva paralelní dráty s odporem R mezi cívkami s indukčností L . Když zanedbáme původní napětí a započítáme jenom to indukované, dostaneme

$$\varepsilon = Ri - L\frac{di}{dt},$$

kde i je aktuální velikost proudu. Řešením diferenciální rovnice získáme proud v čase t

$$i = \frac{\varepsilon}{R} + \frac{K}{R}e^{\frac{R}{L}t}, \quad (1)$$

kde K je integrační konstanta, kterou určíme z počátečních podmínek. Kdy si řekneme, že v čase 0 je proud také nulový, vyjde nám $K = -\varepsilon$. Nyní ještě vyjádříme změnu magnetického toku jako součin plochy a změny magnetické indukce. Plochu smyčky tvořené dvěma dráty o délce l ve vzdálenosti d určíme jako $S = ld$ a odpor drátu jako $R = \rho l$, kde ρ je odpor na

jednotku délky. Vzdálenost mezi dráty odhadneme jako $d = 1 \text{ m}$ a délkový odpor jako¹ $\rho = 10^{-4} \Omega \cdot \text{m}^{-1}$. Indukčnosti cívek transformátoru mohou být řádově desítky henry až desítky milihenry (podle toho, jestli cívka transformuje nahoru nebo dolů)²

Změny magnetické indukce jsou běžně zaznamenávány magnetometry v rámci sledování kosmického počasí a jejich velikost kromě intenzity slunečního větru závisí i na denní době (ve dne má větší vliv než v noci) a na vzdálenosti od magnetického pólu. Z magnetických měření bouře³ z roku 2003 můžeme odhadnout změnu magnetické indukce na $\Delta B = 4000 \text{ nT}$, kdy tento pokles trval s výkyvy přibližně dvě hodiny. Protože na takovýchto časových škálách je impedance cívek zanedbatelná (v řádu jednotek ohmů pro 50 Hz), můžeme ji zanedbat a počítat pouze s odporem vedení. Dostaneme tak

$$i = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{\frac{\Delta B}{\Delta t} l d}{\rho l} = \frac{d}{\rho} \frac{\Delta B}{\Delta t}.$$

Po dosazení dostáváme velikost proudu

$$I \approx \frac{1 \text{ m}}{10^{-4} \Omega \cdot \text{m}^{-1}} \frac{4000 \text{ nT}}{7200 \text{ s}} \doteq 6 \cdot 10^{-6} \text{ A}.$$

Toto je hodnota proudu naindukovaná ve smyčce tvořené vedením dvou souběžných drátů. Nicméně vedení tvoří i větší smyčky díky zasítování velkých ploch států nebo dokonce kontinentů. S rostoucím charakteristickým rozměrem roste plocha smyčky kvadraticky, zatímco její obvod lineárně. V případě elektrické sítě se však nejedná o jednoduchou smyčku, ale o složitější síť, takže délka kabelů je úměrná vyšší mocnině rozměru než první, ale menší než druhé. Výsledný proud je těžší odhadnout, ale jistě bude větší než výše uvedená hodnota. Pro větší smyčky a síť však už není velikost změny magnetické indukce po celé ploše stejná, naindukované proudy se proto liší i dle polohy.

Smyčky mohou být dále tvořeny i proudem tekoucím zemí resp. dráty a zemí, což je v reálném výzkumu těchto proudů hlavním zdrojem. Tento proud potom kromě výše uvedených parametrů závisí i na hloubce průniku do země, která zase závisí na vodivosti podloží a do drátů vysokého napětí se dostává skrze transformátory, které jsou uzemněné. Kvůli komplexnosti sítě a rozložení vodivosti se pak vše řeší numericky.

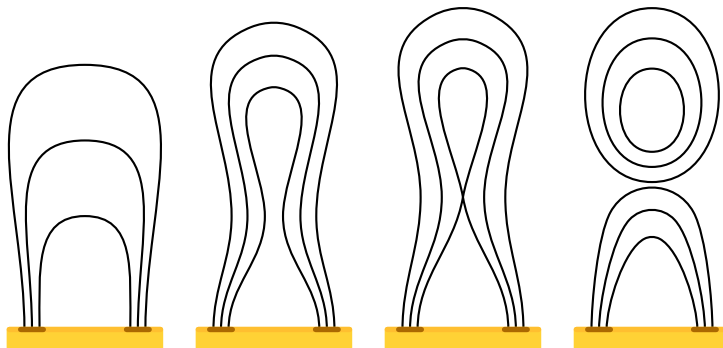
Vedením vysokého napětí obvykle teče proud o velikosti řádu stovek ampér, což je sice mnohem více než námi spočtená hodnota, ta je však jen velmi nepřesným dolním odhadem. Dalším problémem jsou především rychlé změny velikosti tekoucího proudu, na které nedovedou síťové prvky (například pojistky) dostatečně rychle reagovat. Velikost odhadu navíc závisí především na rychlosti změny magnetické indukce, která je nejvíce nepřesnou částí výpočtu.

V diskusi vlivu na lidskou civilizaci můžeme porovnávat pouze s jedinou obdobnou událostí, která se stala roku 1859 a je známá jako Carringtonova událost. Několik dnů před ní bylo pozorováno mnoho slunečních skvrn, polární záře a poté i silná geomagnetická bouře, při které došlo k velkému výronu koronální hmoty směrem přímo k Zemi, kam doputoval za přibližně 17,5 hodin. Díky velké intenzitě výronu bylo možné pozorovat polární záři i v mírných zeměpisných šířkách. Co se týká vlivu na tehdejší infrastrukturu, událost vyřadila z provozu telegrafy a někteří jejich operátoři byli dokonce zasaženi elektrickým proudem. V té době však

¹Odpor klasického drátu na 230 V je dle https://cs.wikipedia.org/wiki/Elektrický_odpor řádově $10^{-2} \Omega \cdot \text{m}^{-1}$, pro vysoké napětí odhadneme setinový odpor, protože dráty mohou mít přibližně desetinásobný průřez.

²https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=87213

³<https://www.spaceweatherlive.com/sv/hjalp/kiruna-magnetometer.html>



Obr. 1: Znáornění magnetických siločar při koronálním výboji.

elektřina nebyla zdaleka využívána tak hojně jako dnes, tedy ani následky nebyly tak rozsáhlé. Pokud by podobná bouře zasáhla Zemi dnes, došlo by vlivem naindukovaného proudu ve vedení vysokého napětí k poruchám transformátorů a nejspíš i k rozsáhlým blackoutům. Kvůli poničené infrastruktuře by také mohlo trvat velmi dlouho obnovení dodávek elektřiny. Změny v magnetickém poli Země by mohly nepřímo ovlivnit lidmi vysílané elektromagnetické vlnění jako rádio, telefonní signál či 4G a wifi-sítě.⁴ Kromě toho i slabší bouře by vystavila silnému ionizačnímu záření satelity na oběžné dráze⁵, jejichž poškození by mohlo vést k výpadkům GPS sítě a navigačních systémů.

Jelikož ke slunečním bouřím různé síly dochází neustále, je téměř jisté, že jednou se objeví silná bouře, která Zemi zasáhne. Vliv na infrastrukturu pak nebude všude stejný, ale bude se lokálně lišit podle vzdáleností od magnetických pólů, vzdáleností od pobřeží i vodivosti podloží. Například oblast USA je těmito událostmi ohrožena o něco více než Evropa kvůli rozdílné poloze zeměpisného a magnetického pólu, kdy magnetický pól je posunut směrem k Americe. Díky pozorování Slunce můžeme tyto bouře předvídat a mít tak několik hodin na přípravu. Nezanedbatelný vliv mohou mít i na plánované kosmické lety na Mars, kde by kosmonauty ve vesmíru již nechránilo magnetické pole Země, takže by pro ně byly mnohem nebezpečnější.

Kateřina Rosická
kacka@fykos.cz

Fyzikální korespondenční seminář je organizován studenty MFF UK. Je zastřešen Oddělením propagace a mediální komunikace MFF UK a podporován Ústavem teoretické fyziky MFF UK, jeho zaměstnanci a Jednotou českých matematiků a fyziků.

Toto dílo je šířeno pod licencí Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported.
Pro zobrazení kopie této licence navštivte <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>.

⁴Ne však fatálně, protože na rovinnou vlnu v komunikačním frekvenčním pásmu šířící se atmosférou nemají změny geomagnetického pole vliv.

⁵Které jsou sice chráněny magnetosférou, ale mohou je poškodit urychlené populace částic v radiačních pásmech (vzniklé v důsledku bouře).