

Elektromagnetické jevy s dopadem na provoz IT

V současné bezpečnostní situaci se v rámci diskusí řeší otázky možných útoků na energetickou a průmyslovou infrastrukturu. Tyto útoky mohou být ve formě kyberterorismu, nebo vojenské operace (diverze na území cizího státu). Útok pomocí elektromagnetického pulzu byl popularizován díky filmům, např. „Dannyho parťáci/Ocean Eleven“. Ale jaká je míra rizika? A je to jediná metoda, jak ovlivnit fungování elektroniky?

Nejprve je nutné si uvědomit, jak vlastně zmiňované elektromagnetické jevy probíhají. V případě elektroniky se jedná o příchozí napěťovou špičku, která může být následována proudovým nárazem. Případně se využívá rezonančních frekvencí, které dovolí obvod rozkmitat za hranice jeho provozních charakteristik. Ať v případě jedné nebo opakované špičky se bavíme o elektromagnetickém pulzu, protože probíhá v omezeném čase a zpravidla i v omezené lokalitě. Pokud ale k této situaci dochází globálně a po dobu hodin až dní, bavíme se o elektromagnetické bouři.

Pokud chceme dopravit dostatečné množství energie, brání nám tomu několik fyzikálních překážek. Mimo poklesu výkonu se vzdáleností je to samozřejmě i vlnová délka. Tu potřebujeme co nejkratší (nejvyšší frekvenci), abychom byli schopni předat co největší část energie cíli. Z uvedených důvodů se často používá mikrovlnné záření. Na druhou stranu čím vyšší frekvence, tím menší musí být zařízení (rezonanční dutiny odpovídají vlnové délce nebo jejím násobkům) a tím hůře se bude chladit. Tyto zbraně se často nazývají i neletální (nesmrtící), přestože za určitých podmínek může mikrovlnné záření způsobit poškození zdraví nebo i smrt.

Na straně nedobrovolného příjmu je potřeba využít rozměrů jednotlivých kovových komponent, které mohou zastoupit funkci přijímající antény (pro indukční vazbu). Z hlediska útočníka je tak potřeba odpovídajícím způsobem „naladit“ frekvenční rozsah. Přijatá energie pak může na různých částech systému způsobit následující jevy. Na straně napájení se jedná o napěťové špičky, případně harmonické oscilace schopné přetížit definované rozsahy napájecího zdroje. Na nízkonapěťové části (základní deska, paměti a další komponenty) pak kovové prvky nahrazují antény, a protože jsou tyto komponenty extrémně citlivé na napěťové pulzy a rezonance, je opět možné dostat napětí mimo definované pracovní rozsahy. V těchto případech se tedy jedná hlavně o indukční a do jisté míry i galvanickou vazbu.

Podobné jevy se projevují např. i při známém úderu blesku. Zde se jedná hlavně o indukční a kapacitní vazbu, do jisté míry pak opět i galvanickou. Naštěstí pravděpodobnost něčeho takového je sice nízká, přibližně 1:300 000 (pravděpodobnost autonehody je zhruba 1:90, pravděpodobnost výhry EuroJackpotu je 1:139 838 160), což lze převést zhruba na jeden úder do sídla za 500 let. Ale dopady takového úderu jsou pro elektroniku devastující. Otázka zní, je možné takový blesk nebo něco, co by ho připomínalo, vyvolat uměle? A je to jediná hrozba?

Elektromagnetický pulz

Zdroje zajišťující energii

Vývojem zbraní, schopných ovlivnit elektromagnetickým pulsem chování nebo provoz výpočetní techniky se zabývá řada států a průmyslových podniků. A to jak z důvodů vědeckých, tak vojenských. Tyto zbraně ale zpravidla na vstupu potřebují vysoké napětí. Díky určitým vlastnostem napájecí obvody mohou sloužit do jisté míry jako jednoduchý generátor pulzů. Jako nejjednodušší příklad je možné si uvést takzvaný „Marxův žebříček“, který dokáže vytvořit jakýkoliv nadšený amatér. Jeho princip se používá v různých ionizátorech, často ruší elektroniku a v případě výkonnějšího typu na vzdálenost jednotek metrů dokáže narušit její provoz či vést k trvalému poškození některých komponent. V tomto případě nejde o nic jiného, než kaskádu kondenzátorů

a odporů, která je ukončena jiskřištěm. Napětí na výstupu může dosahovat až desítek nebo stovek kV, tedy nejedná se o nějaké hračky pro děti. Přesto uvedené rušení není cílem těchto zařízení, ale je možné je použít pro napájení vyžadující vysoké napětí.

Ve vědeckých centrech se pro dosažení vysokých pulzních výkonů používají hlavně PFN (Pulse Forming Network) nebo jinak Blumhein, kde se používá kaskáda kondenzátorů a cívek. Takový systém lze velice rychle vybit, což lze použít pro napájení pulsních laserů při fyzikálních experimentech. Ale vybíjení, a zvláště vybíjení cívek má určité dopady na okolí. Každá cívka se chová jako anténa, které vysílá část výkonu do okolí. Přestože PFN dosahují výkonu až v řádu MW, diskutuje se i o vyšších energiích. Ale vyzařované elektromagnetické pole je vedlejší jev, nikoliv primární, cílem je naopak maximum energie předat na výstup. Tato zařízení sice dokáže rušit elektroniku na vzdálenost několika desítek metrů, ale také to není jejich účelem. Jejich účelem je stejně jako v prvním případě tvorba extrémně vysokého napětí a odpovídajícího proudu.

Poslední zařízení, schopné pracovat jako zdroj pro tyto generátory a zároveň do jisté míry jako elektromagnetická zbraň je takzvaný MHD generátor (magnetohydrodynamický generátor). Jeho princip využívá rozdělení ionizovaného plynu, tedy plazmatu, v elektromagnetickém poli na kladně a záporně nabitou část. Tu je následně možné buď zachytit a přeměnit pomocí elektrod na energii, nebo naopak použít energii k tvorbě plazmy a vytvořit proud plynů. To by mělo být možné využít i jako raketový motor. Obdobným způsobem je možné používat namísto plynů slanou vodu, tento postup byl zmíněn jako teoretický „houseskový pohon“ ve známém filmu „Hon na ponorku Rudý říjen“. V reálném prostředí by ale takový pohon potřeboval obrovské množství energie, proto by jeho provoz byl nepraktický. Na druhou stranu jako generátor proudu je účinný, potřebuje ale teplotu plamene přesahující 3700 °C (zpravidla spalování plynu nebo fluidní spalování uhlí). Na výstupu je schopen poskytnout výkon v řádu MW.

Elektrická zařízení generující elektromagnetický pulz

Mezi zařízení schopná generovat elektromagnetický pulz je možné zařadit tzv. Flux generátor (EPFCG, Explosively Pumped Flux Compression Generator) nebo jinak HMCG (Helical Magneto Cumulative Generator). Jde o primitivní a levné zařízení, které přesto může dosáhnout pozoruhodných výstupů. Jedná se o dutou kovovou trubici naplněnou rychlou výbušninou (detonační rychlost musí být vyšší než 8 km·s⁻¹). Uvedená trubka je uvnitř cívky, která je na jednom konci napojena na vyzařovací anténu. Pokud je do cívky zavedeno vysoké napětí a odpovídající proud, odpálení výbuštiny způsobí zkrat na vinutí. Tím dojde ke kompresi magnetického pole a většina energie se následně vyzáří anténou^[1]. Výstup je směrovaný a účinný dle výkonu v řádu desítek až stovek metrů.

Konstrukce takového zařízení je extrémně jednoduchá a levná. Tento princip byl podle dostupných údajů používán jak u prvních elektromagnetických bomb, tak má být použit u čínských DF-17. Takováto konstrukce je pravděpodobná i v případě terorismu. Bohužel díky použití výbuštiny v tomto případě nelze mluvit o nesmrtící zbraní, v okamžiku inicializace je okolí ohroženo troskami.

Další zařízení, schopné generovat mikrovlnné záření se specifickou frekvencí, je magnetron^{[3][4]} (používaný v „mikrovlnkách“ pro ohřev jídla). Jedná se o oscilátor, laděný velikostí dutiny, na výstupu je pravidelný signál. Mimo vysoké účinnosti konverze, okolo 70 %, má výhodu ve schopnosti automatické synchronizace výstupní frekvence. Pokud je více magnetronů zapojených na stejný vlnovod, jejich výstupní frekvence se sladí a výstupní energie se tak sčítá. Vlnovod je možné ukončit směrovou anténou a dle výkonu je možné ohrozit elektroniku na vzdálenost desítek až stovek metrů. Na druhou stranu, jako první z těchto oscilátorů vyžaduje vakuovou komoru, byť jenom s nízkým vakuem. Dlouhou dobu se používal např. v radarech pro generování mikrovlnného signálu. V případě tohoto generátoru je nutné využít frekvencí, které budou odpovídat rozměrům vodičů, aby bylo možné maximálně využít indukce v těchto „anténách“. Z hlediska útočnicka nejsou frekvence používané např. kuchyňským magnetronem ideální, jeho frekvence je relativně nízká a mikrovlnné záření některých frekvencí je silně

pohlcováno vlhkým materiálem. Přesto se jedná o další z rizikových technologií, dostupných i pro útočníky s nízkou úrovní znalostí. Cena těchto zařízení je zpravidla nízká a začíná okolo 50 eur, u výkonných zařízení ale není problém s cenou okolo 50 000 eur.

Klystron^[5] je další z nástrojů, schopný produkovat silný, zpravidla oscilující výstup. Jedná se o mikrovlnný oscilátor a zesilovač signálu, na vstupu proto musí být další oscilátor. Občas bývá nazýván i dalšími názvy, které odrážejí způsob jeho konstrukce. Jedná se o reflex nebo reflexní elektronku, two-cavity/dvou-dutinové, multicavity/vícedutinové elektronky, planotron, gyrokystron nebo relativistický klystron. Ve všech případech jde o zařízení, kde je zdroj elektronů, který je zároveň připojen na vysoké napětí, elektrony jsou díky tomu uvnitř trubice přitahovány ke sběrači. Vstupující mikrovlnný signál ovlivňuje proud elektronů, ty následně oscilují uvnitř trubice. Díky tomu dochází k obrovskému zesílení, ale zesilovač musí být konstrukčně naladěn na konkrétní frekvenci. V poslední době jsou zkoumány hlavně relativistické klystrony, které dosahují extrémních hodnot zesílení a významných hodnot výstupu. Klystron vyžaduje extrémně vysoké vakuum, s hodnotami tlaku alespoň $1,3 \cdot 10^{-7}$ Pa, nejlepších výsledků se dosahuje okolo $7 \cdot 10^{-11}$ Pa. Účinnost konverze energie dosahuje zhruba 42 %, hodnota zesílení se u běžných klystronů pohybuje nad hranicí 50 dB. Rekordní výstup popsáný v experimentálních datech prozatím dosahuje hodnoty 180MW. Opět, účinný dosah je v řádu desítek až stovek metrů, výstup může být směřován, ale cena výkonných klystronů může začínat 100 000 eur a výše. Mimo klystronů je možné použít i klystrody, které jsou výrazně menší a mají vyšší účinnost (místo rychlosti elektronů využívají napětí).

Posledním zajímavým zařízením je virkator^[1] (virkator, zkratka z VIRtual CAThode OscilatoR, mikrovlnný oscilátor). Jedná se o dutinu, kde je opět zdroj elektronů zapojen na jeden pól vysokého napětí, druhým je sběrná mřížka. Elektrony jsou urychlovány a tímto napětím je ovlivňována jejich hybnost. Pokud jejich hybnost překročí určitou hranici, proletí okolo sběrné elektrody. Díky tomu vzniká „mrak“ elektronů, který kmitá v určité oblasti, od toho pochází i název. Tyto pohyby elektronů pak vyzařují tzv. brzděné, v tomto případě mikrovlnné záření. Maximální účinnost tohoto zařízení dosahuje 30 % a špičkových výkonů okolo 80MW, účinný dosah v desítkách až stovkách metrů. Pro základní schopnosti potřebuje být v dutině alespoň nízké vakuum pod 1kPa, ale optimálních výkonů začíná dosahovat až při tlaku pod 0,1Pa. Cena výkonných virkatorů začíná na 100 000 eur. Dalším vývojovým stupněm virkatorů je reditron (Reflected Electron Discrimination microwave generator), který dosahuje podstatně vyšší účinnosti, téměř srovnatelné s magnetrony.

Přestože by bylo ideální použít masery (mikrovlnný laser), jejich použití je nevýhodné. Dosahuje účinnosti přibližně 3 %, což při výkonu 10MW vyžaduje obrovský zdroj. Proto se tématu maserů nebudu dále věnovat. Na druhou stranu je vhodné tuto oblast sledovat, v případě pokroku technologií by se z tohoto zařízení mohla stát obávaná zbraň.

Uvedená zařízení nejsou nikdy použita odděleně. Pro jejich efektivní využití je potřeba primární zdroj energie, což mohou být pulsní kondenzátory, superkondenzátory, MHD generátory nebo i za konkrétních podmínek výbušniny. Jejich energie se následně přeměňuje pomocí násobičů (Marxův žebříček, EPFCG) a zpravidla nabíjí PFN/Blumlein. Tím dochází ke konverzi určitého množství energie rozprostřené v čase na vysoký puls energie v extrémně krátkém čase. Tedy kondenzace energie, přetvoření, její formování a převod na krátký pulz. Tato energie je následně poskytnuta systémům jako jsou elektromagnetické zářiče (klystrony, reditrony). Tím je možné ideálně v opakovatelných pulzech provést puls, který může být pro nechráněnou elektroniku destruktivní.

Elektromagnetický pulz tvořený jaderným výbuchem

Samostatnou kapitolou pro tvorbu elektromagnetických pulsů je výbuch jaderné bomby. V tomto případě ale dochází ke třem samostatným pulsům pojmenovaným E₁, E₂ a E₃, které mají dopad na elektroniku. Mimo těchto pulsů pak ještě dochází pro určité vzdálenosti k jevu označovanému jako SIEMP (System Inducted EMP). Pokud by došlo k jadernému výbuchu,

budeme mít jiné starosti než řešit, jak oživit počítače. Přesto je zajímavé pochopit, k jakým jevům dochází, jaké mají dopady a jak se proti nim chránit.

První pulz je nazývaný E_1 , trvá několik ns v průběhu jaderného výbuchu. Dochází k němu v době, kdy se na místě původní jaderné bomby teprve začíná formovat koule plazmy. Generuje ho proud gama záření z rozpadu, případně i fúze použitých materiálů, který vyrazí elektrony nejčastěji z atomů kyslíku a dusíku. Nepříjemností je možnost změny směru (rozptyl) na těchto atomech, ve výsledku tak neexistuje žádný stín. Samozřejmě, pokud dojde k vyražení elektronů z atomů, vzniká díky tomu elektrický náboj a ten se následně někde musí vybit. Pro představu je to situace, jako by se vytvářela obrovská kulová anténa, která se šíří od místa výbuchu. Na povrchu této antény je vysoké napětí (dosahuje desítek až stovek kV/m).

Zhruba ve stejné době začíná i pulz E_2 . Ten trvá podstatně déle, ale jeho intenzita je nižší. Způsobuje ho použitý materiál na jadernou bombu. Limit výkonu, tzv. Taylorův limit je cca 6kT TNT/1kg bomby, ale ekvivalent 6 kT TNT je pouze necelého půl gramu hmoty přeměněné na energii. Zbytek je aktivovaný neutrony a případně ionizovaný. Některé z těchto materiálů představují nestabilní radioizotopy, které se téměř okamžitě přeměňují a při této přeměně vyzařují další gama záření. Uvedený puls trvá až desetiny sekundy, ale jeho intenzita dosahuje stovek V/m.

Poslední částí je pulz E_3 . Ten do jisté míry připomíná jevy generovaný slunečními bouřemi. Jde o to, že veškerý ionizovaný materiál (ionizovaný vzduch, materiál bomby, část materiálu nasátá výbuchem) se zemským magnetickým polem začíná orientovat a podle náboje je směřován k pólům. To způsobuje následně vybíjení, které začíná několik vteřin po výbuchu a může trvat až jednotky hodin. Produkované napětí je nízké, jedná se o desetiny V/m, ale harmonické kmity mohou způsobit poškození některých komponent.

Mimo vlastní pulz (indukované napětí), dochází k poškození komponent několika způsoby. Jednak je tu zmiňovaný SIEMP, kdy intenzivní proud neutronů může způsobit aktivaci některých atomů s veškerými možnými dopady. Počínaje EMP pulzem generovaným lokálně, např. uvnitř čipů po změnu chemických vlastností a následnou změnou vlastností PN přechodů. Uvedené jevy mohou způsobit degradaci nebo zničení elektroniky. Dále tu je průlet nabitých částic, který může zkratovat např. elektrolytické kondenzátory, prorazit odpory ... To vede v lepším případě např. k vybití paměťových buněk, v horším až k nevratnému poškození obvodů.

Pokud dojde k výbuchu vysoko v atmosféře (100–200 km), dochází k ovlivnění elektroniky v rozsáhlé oblasti ^[6]. Výbuch hlavice o ekvivalentu 2 MT TNT nad Českou republikou by zajistil kompletní „zhasnutí“ většiny systémů v rámci celé Evropy. Vrstva atmosféry je dostatečně silná, aby utlumila většinu nebezpečného záření. Ale veškerá kritická infrastruktura, řízení provozů, komunikace, ale i auta a další dopravní prostředky by se zastavily.

Sluneční bouře

Do ranku indukovaných elektrických polí je třeba zařadit i zcela přírodní jev, který je spojen s nejhmotnějším tělesem místního planetárního systému, se Sluncem. Slunce nejenže řídí pohyby planet a dalších těles ve Sluneční soustavě, ale je také zdrojem nabitých částic zaplavujících meziplanetární prostor. Naše planeta Země není klidovým slunečním větrem zásadně ovlivněna, neboť je před průniky nabitých částic chráněna vlastním magnetickým polem. Toto magnetické pole působí jako jistá forma štítu a v rovnovážném klidovém stavu je pro částice slunečního větru propustná jen v polárních oblastech, kde se indukční čáry pole noří do zemské atmosféry.

Naše Slunce je však tělesem vybaveným velmi komplikovaným magnetickým polem. Proto na něm můžeme pozorovat jevy, které označujeme jako jevy sluneční aktivity, sluneční činnosti. Mezi ty nejznámější patří bezpochyby tzv. sluneční skvrny, tmavá místa pozorovatelná i v amatérských podmínkách. Sluneční skvrny jsou důkazem pro přítomnost velmi silných a komplexních lokalizovaných magnetických polí, v nichž magnetická indukce dosahuje až 0,6 T, přičemž rozměrově jsou takové skvrny srovnatelné s planetou Zemí, tedy s rozměry řádově v desetitisících kilometrech.

Komplexní magnetické pole sice může být dlouhodobě stabilní, ale v určitých situacích může dojít k jeho prudkému narušení. Proces, který se v odborné literatuře označuje jako rekonexe neboli přepojení, vede k náhlé (až explozivní) změně konfigurace pole do jiné, jednodušší formy, přičemž při tomto procesu se uvolní nashromážděná energie komplexního pole. Dochází k tzv. sluneční erupci. Náhlé výrony trvající řádově minuty až desítky minut jsou spojeny s uvolněním řádově 10^{25} J energie¹. Tato energie se uvolňuje ve formě elektromagnetického záření převážně v tvrdých oblastech spektra (rentgenové oblasti, extrémní ultrafialové oblasti) a dále ve formě směrových svazků nabitých částic (především elektronů a protonů). Za určitých okolností může být sluneční erupce doprovázena vyvržením horkého slunečního plazmatu do meziplanetárního prostoru. Tyto jevy jsou známy pod označením CME (coronal mass ejection, tj. výrony hmoty do koróny) a mohou pronikat celou Sluneční soustavou. Protože při erupci došlo k přepojení magnetického pole, bývá obvykle CME doprovázen svým vlastním magnetickým polem, které bylo „odtrženo“ ze Slunce.

Erupce probíhají v nesmírně lokalizované oblasti slunečního povrchu a jejich projevy jsou směřovány do pomyslného kuželu s poměrně ostrým vrcholovým úhlem. Ovšem vzdálenost Slunce-Země je velká (150 milionů kilometrů) a tedy i oblak slunečního plazmatu s původní velikostí řádově v desítkách tisíc kilometrů se v této vzdálenosti v důsledku expanze stává rozměrným útvarem, jehož pravděpodobnost srážky s tělesy Sluneční soustavy, Zemi nevylučuje, není nulová.

Pokud k takové srážce dojde, přichází na zemský magnetosférický deštník prudký náraz hustého horkého slunečního plazmatu, který s sebou navíc přináší vlastní magnetické pole. Magnetosféra na přílet reaguje smrštěním na návětrné straně. Pokud s sebou přináší oblak magnetické pole opačné orientace, zemské magnetické pole na návětrné straně oslabuje. Oba efekty, smrštění i případné oslabení, vedou k značným změnám v celé magnetosféře Země, nejen na nejméně postižené návětrné straně. Měřicí stanice registrují časové změny geomagnetického pole, mluvíme o probíhající geomagnetické bouři^[7]. Nabité částice jsou z chvostových částí zemské magnetosféry vrhány podél siločar geomagnetického pole do zemské atmosféry, kde v severovýchodních oblastech rozsvěcejí polární záře.

V ionosféře se indukuje a zesiluje celý systém plošných elektrických proudů, vznikají rozsáhlá elektrická pole s intenzitami až 1 V/km, která pronikají z ionosféry do nižších vrstev atmosféry a dále do vrstev zemského tělesa. Na vodivých strukturách se indukují elektrické proudy, jež se označují jako geomagneticky indukované proudy (GIC). GIC protékají vodivými strukturami zemské kůry (vodou prosycenými horninami, oceánem), ale také technologickými prvky kritické infrastruktury, jako jsou rozvody elektriny, metalické signální sítě nebo potrubí produktovodů.

Podobně jako dopady CME se chovají i četné nestability a výkyvy v proudění slunečního větru. I ony mohou být příčinou geomagnetických bouří, obvykle je však jejich rozsah menší, i když bouře vyvolané nepravidelnostmi ve slunečním větru mohou trvat déle než ty vyvolané impaktem CME.

Geomagnetické bouře jsou relativně běžným jevem a existuje jejich úzká vazba na úroveň sluneční činnosti. Sluneční činnost prochází cyklem s délkou kolem 11 let, a geomagnetická aktivita vykazuje podobný trend. V období minima sluneční činnosti, kdy na jeho povrchu nepozorujeme téměř žádné sluneční skvrny, jsou geomagnetické bouře vzácné. Naopak, v období maxima, kdy je Slunce doslova „poseto“ skvrnami, jsou geomagnetické bouře téměř na denním pořádku. Ovšem ty skutečně silné, u nichž lze počítat s měřitelnými vlivy na lidské technologické prvky, se vyskytují s mnohem menší četností. Silných geomagnetických bouří třídy G4 napočítáme stovku za cyklus, extrémně silných třídy G5 pak za stejné období méně než deset.

¹ Toto množství zhruba odpovídá energii vyrobené 1 GWe reaktorem jaderné elektrárny za dobu asi 300 milionů let.

Historicky je za archetyp destruktivní geomagnetické bouře považována tzv. Carringtonova událost ze září roku 1859. Technologickým výstřelkem tehdejší doby byl telegraf, jež postihl globální výpadek. Očití svědkové popisují, jak z telegrafních sloupů sršely jiskry, operátoři dostávali zásahy elektřinou při styku s telegrafním klíčem. Na krátkých trasách bylo možné zprávy posílat bez připojených baterií. Na dlouhých trasách byla komunikace nemožná. Polární záře byly pozorovány v Karibiku a Mumbai.

Takto mohutná událost nebyla v následné historii až doposud zaznamenána. Odhaduje se, že k ní statisticky dochází jednou za sto až čtyři sta let. Přesnější odhad není možný, neboť naše pozorovací řady jsou příliš krátké. Pečlivá analýza koncentrace tzv. kosmogenních prvků ukazuje, že Země zřejmě pamatuje i silnější události, než byla Carringtonova. Jen k žádné nedošlo v moderní éře. Jejich odhadovaná četnost je jednou až dvakrát za tisíc let. Po svém objeviteli se označují jako Myakeho události a odborná veřejnost se shodne, že taková epizoda by pro pozemní i kosmickou infrastrukturu představovala skutečně problém.

Nejvíce skloňovanou problematikou je v souvislosti s extrémními geomagnetickými bouřemi přítomnost GIC v rozvodech elektrické energie^{[8][9]}. Tyto proudy, jejichž hodnota dosahuje přinejlepším několika stovek ampér, mají totiž dlouhou časovou škálu změn v řádu několika minut. Pro zařízení rozvodů střídavého proudu s frekvencí 50 Hz představují GIC stejnosměrný příspěvek. Jeho hodnota je sice ve srovnání s pracovními střídavými proudy mnohem menší, ale i to stačí například na saturaci jádra transformátoru jednou polaritou a posunu pracovní hysterezní křivky. Z jádra vyzařuje magnetické pole, roste jalová komponenta, jádro se přehřívá. Olejová lázeň může podléhat pyrolýze, z transformátorového oleje se uvolňuje např. vodík, metan a další hořlavé plyny, transformátor tzv. plynuje. V extrémním případě může dojít až k selhání transformátoru nebo dokonce jeho tavení.

Přítomnost GIC celkově narušuje vlnoplochu pracovního proudu a tyto změny mohou být jistími prvky vyhodnoceny jako nebezpečné. Dochází tak k náhlému odpojování prvků sítě, nebo dokonce celých síťových segmentů. Tato situace se může vzápětí opakovat v téže síti s chybějícím segmentem. V extrémním případě síť kaskádově zkolabuje.

Dne 13. března 1989, za hluboké Kanadské noci, k Zemi dorazilo CME jako důsledek celé série erupcí, které byly na Slunci zaregistrovány v předchozích dnech. Tento jev trval jen 90 sekund a oblast Jamesova zálivu provincie Québec byla bez proudu. 735kV vedení sítě Hydroquébec kaskádově zkolabovalo a bez napětí bylo celých devět hodin. Náhlý kolaps sítě na rozsáhlém území vedl k mechanickým závadám na celé řadě elektrárenských turbín.

Rozsáhlé GIC protékaly i trojicí jaderných elektráren v ústí řeky Delaware v New Jersey. Operátoři se snažili regulovat výkyvy jalového výkonu, zaznamenali i častý vznik zpětné soustavy (nesprávného pořadí fází ve vedení). O týden později odebrali vzorky z výstupní transformátoru gigawatové jednotky Salem I. Množství plynů v oleji je enormní, transformátor se musí odstavit a rozebrat. Technici nevěřícně sledovali roztavené a teplem deformované desky primárního vinutí. Transformátor nebylo možné opravit.

V následujících dvou letech havarovalo na území Kanady a Spojených států dvanáct klíčových zařízení rozvodné sítě, taková chybovost nebyla nikdy předtím zaznamenána. I když je québecký blackout asi nejlépe historicky zaznamenanou událostí s efekty geomagnetické aktivity na rozvodnou síť elektrické energie, nebyla ani zdaleka první a ani poslední. Odborníci si pak začali v první dekádě 21. století pokládat přirozené otázky, zda je v případě geomagnetických bouří nějaká hranice, nad níž dochází k problémům a pod níž jsou zařízení v bezpečí. Místo studia jednotlivých událostí přišla ke slovu statistika^{[10][11][12]}. A ta ukázala velmi překvapivé výsledky. I ty mnohem slabší události se počítají. Celá 4 % provozních anomálií zaznamenaných na severoamerické rozvodné síti lze připsat důsledkům sluneční činnosti. Statisticky řečeno. Není možné identifikovat konkrétní provozní anomálie, které by bylo způsobeny výhradně sluneční aktivitou, ale trend nárůstu je dobře prokazatelný. Anomálie sledují trend 11letého cyklu a viditelně se koncentrují do dnů se silnými geomagnetickými bouřemi. Toto procento bylo následně potvrzeno i z hlášenek pojišťoven řešících pojistné události spojené s anomáliemi na zásobování elektřinou.

Statistická studie překvapivě ukázala, že nárůst jen málo závisí na vzdálenosti posuzovaného místa od rovníku. V absolutních číslech jsou efekty samozřejmě větší v oblastech blíže k pólům, ale relativní nárůst je podobný i ve státech zdánlivě nepostižených, např. v Nevadě nebo Kalifornii. Nárůst abnormalit se netýká jen vysokonapěťové pátevní sítě, ale prakticky stejně postihuje i distribuční síť nízkonapěťovou, vedoucí přímo ke koncovým odběratelům. Podobná statistická studie byla následně provedena i pro Českou republiku, v zásadě se srovnatelnými výsledky. Počet anomálií na české rozvodné síti narůstá o 5 až 10 % v pěti dnech následujících po silném výkyvu geomagnetické aktivity. Další studie tyto závěry potvrzují i pro Slovensko, Polsko a další země, u nichž se tyto efekty vůbec nepředpokládaly.

Amplitudy GIC nejsou v ČR měřeny. Matematické modely ukazují, že by mohlo jít o desítky ampér stejnosměrného proudu protékajících neutrálem transformátorové stanice. Nejde o stovky ampér, které vedly k destrukci jednotky Salem I, ale dlouhodobější opakovaná zátěž své efekty ve výsledku má. Některé inženýrské studie prokázaly, že již jedna minuta expozice stejnosměrného proudu s amplitudou jeden ampér vede k saturaci jádra transformátoru jednou polaritou se všemi negativními projevy.

Nesmíme zapomínat ani na další negativní důsledky bouřlivé sluneční aktivity. V průběhu geomagnetické bouře narušená atmosféra komplikuje rádiové spojení a oslepuje navigační systémy založené na šíření elektromagnetických signálů, a to včetně systému GPS a podobných. Nemalá část infrastruktury je závislá na přítomnosti umělých družic na oběžné dráze Země. Aparáty mimo zemskou atmosféru jsou mnohem citlivější na rozmary vesmírného počasí, v současnosti je známo již dvanáct případů umělých družic, k jejichž zkáze přispěla sluneční aktivita. A to nepočítáme nedávnou ztrátu téměř čtyř desítek družic Starlink, na nichž měla sluneční aktivita též důležitý podíl. Před dopady událostí typu Carringtonovy nebo Myakeho nejsou kosmické družice nijak chráněny a ani to není možné zařídít. Jedinou myslitelnou obranou je na Zemi skladovaná flotila náhradních družic připravených k vypuštění.

Vojenské technologie nejsou slunečních vlivů ušetřeny. 4. srpna 1972 detonovala geomagnetická bouře desítku námořních min, položených v blízkosti města Hon La jakou součást námořní blokády Severního Vietnamu během Vietnamské války. Britská hlídková ponorka Acheron zůstala bez rádiového spojení 24. února 1956, zatímco plnila hlídkovou misi v arktické oblasti. Než se po mnoha hodinách podařilo navázat rádiové spojení, britské námořnictvo vyhlásilo obří záchrannou operaci. Nedávno také archívy odhalily, že přinejmenším jednou bylo lidstvo blízko jaderné válce, a to kvůli Slunci. Když 23. května 1967 přišlo americké letectvo o radarový signál a rádiovou komunikaci nad severskými oblastmi, bylo velení přesvědčeno, že přístroje jsou rušeny Sověty, kteří se chystají na vojenský úder. Naštěstí se rychle ukázalo, že rušení je vyvoláno Sluncem a letadla s jadernými hlavicemi mohla zůstat na Zemi. Právě kvůli rušení rádiových signálů se americké letectvo i další světové vojenské organizace zajímaly o sluneční aktivitu již od 50. let 20. století a výrazně se podílely na vytváření celosvětových pozorovacích sítí.

Slunečních vlivů na technologie je tak celá řada. V této souvislosti je však třeba zdůraznit, že diskuse přímých důsledků souvisejícího (elektro)magnetického pulsu je bezpředmětná. Změny zemského magnetického pole během geomagnetické bouře jsou přinejhorším ve stovkách nanotesla, což přibližně odpovídá „EMP“ vyvolanému soupravou metra projíždějící ve vzdálenosti pár desítek metrů. Běžná elektronika tedy není Sluncem bezprostředně ohrožena přinejmenším ne ekvivalentem elektromagnetického pulsu. Pro globálně fungující propojené systémy^{[13][14]} to ale již neplatí.

Ochrana před elektromagnetickým pulzem

Uvedené informace mají za cíl upozornit na některá opomíjená rizika. Pravděpodobnost teroristického útoku elektromagnetickou zbraní je prozatím nízká a snad i dlouho zůstane. Stejně tak i útok jadernou zbraní, navíc zde není v tuto chvíli možnost ochrany proti E_1 . Ale proti slunečním bouřím a do jisté míry i útokům elektromagnetickým pulzem je možnost se bránit^[15].

Ochrana infrastrukturních technologií před možnými dopady silné geomagnetické bouře je obtížná. Jak již bylo řečeno dříve, například pro technologie umístěné na oběžné dráze Země (telekomunikační satelity nebo globální navigační systémy) je zcela nemožná a nezbyvalo by, než zničené družice nahradit jinými.

V případě pozemních prvků jsme poněkud v jiné situaci. Zkušenosti z reálných situací, které již v minulosti nastaly, ukazují, že zcela kritickým je ochrana klíčových zařízení elektrické rozvodné sítě. I v případě jiných přírodních katastrof, např. zemětřesení, dochází k rozsáhlým výpadkům celých velkých segmentů rozvodné sítě. Po odstranění největších škod je provoz obvykle obnoven přivedením napětí ze sousedního segmentu, který katastrofou nebyl postižen. Avšak v případě katastrofické geomagnetické bouře hrozí výpadek rozvodných sítí v měřítku celých kontinentů. V lepším případě by došlo k rozpadu globalizované sítě do ostrovních systémů, v horším případě pak o globální kolaps. Běžné scénáře obnovy by pak nepřicházely v úvahu. Je tedy důležité nenechat situaci dojít do takového stavu.

Stalo se již standardem, že ve vysokonapěťovém vedení jsou zařazovány filtry (v podstatě kondenzátorové banky), které mají za cíl stabilizaci vlnoplochy pracovního napětí a proudu blízko očekávané pracovní frekvenci (50 nebo 60 Hz podle kontinentu). Tyto filtry mají mimo jiné za cíl potlačení téměř stejnosměrných geomagneticky indukovaných proudů. Historie však opakovaně ukázala, že vyšší harmonické frekvence GIC těmito filtry pronikají. Pro nejlepší ochranu by bylo zapotřebí instalovat kapacitní filtr na každou fázi každého klíčového transformátoru. Současný stav tomu ideálnímu zdaleka neodpovídá.

Jiným přístupem (realizovaným například ve Finsku) je zařazování dodatečného odporu ZN mezi uzemnění a neutrální vodič, který jednak omezuje průnik GIC do uzlu transformátoru z vodivého podloží a jednak omezuje asymetrii fází. Volba optimální hodnoty ZN je ovšem zcela delikátní a testy ukazují, že by se mohla dokonce měnit v závislosti na provozním režimu transformátoru.

Spolehlivější cestou je vývoj vysokonapěťových transformátorů imunních vůči přítomnosti GIC. To znamená značný odklon od klasické poválečné konstrukce, kdy vysokonapěťový transformátor byl pouhou zvětšeninou transformátorů nízkonapěťových. Tyto konstrukce jsou ve světě však stále v provozu a jejich citlivost na přítomnost GIC je enormní. Konstrukce GIC imunních transformátorů je v současné době patentovanou technologií. Jejím základem je přítomnost kompenzačního vinutí a divertorů stejnosměrných proudů, které velmi účinně eliminují přítomnost GIC v jádře transformátoru^{[16],[17]}.

Nejlevnějším protiopatřením jsou však propracované operační postupy jasně instruuující operátory dohledového střediska, jak si počínat v případě hrozícího nebezpečí. Základem je spolupráce s odpovídajícími vědeckými organizacemi (to je standardem např. v USA, kde je v Boulderu činné Space Weather Prediction Center s 24hodinovou službou, podobnou jednotku provozuje též britská MET Office a další země jako Švédsko, Finsko apod., Space Weather Office provozuje i Evropská kosmická agentura ESA, do níž přispívá i Sluneční oddělení Astronomického ústavu AVČR), která je schopna v předstihu informovat o míře hrozícího nebezpečí. Vhodným preventivním opatřením je například snížení zátěže v síti a zvýšený monitoring klíčových uzlů v reálném čase.

Výrazně jednodušší situace je na rozvodech nízkého napětí. Důvodem je zapojení, které není součástí infrastruktury rozvodné sítě, pouze odběrným místem. Jeho dostupnost proto není kritická pro ostatní komponenty, přestože může být kritická z jiných pohledů. Současné technologie dovolují pro konstrukci ochrany na použití následujících komponent:

- Varistor, polovodičový prvek s proměnným odporem, závislým na napětí. Rychlost reakce okolo stovek ms.
- LC filtry (Induktor-Kondenzátor) se používají k filtraci vysokofrekvenčního šumu a přepětí. Je možné je použít jako doplněk pro ochranu před indukovanými frekvencemi způsobenými EMP nebo geomagnetickými anomáliemi.

- Tlumivky mohou omezit rychlé změny proudu a tím chránit zařízení před proudovými špičkami. Je možné je použít jako doplněk pro ochranu před proudovými nárazy u EMP pulzů.
- Supresory, transily nebo trasnorby jsou přepětové diody (TVS - Transient Voltage Suppression Diodes). Jedná se vlastně o klasické Zenerovy diody. Dovolují velice rychlé reakce na přepětí v řádu ps až ns. Jako jediné tak dovolují vytvořit ochranu před přímým úderem blesku nebo EMP pulzem.
- Jiskřiště a plynové svodiště přepětí (Gas Discharge Tubes, GDT) se používá pro ochranu před vysokými přepětími, reakční doba se pohybuje v řádu ns až ms. Je vhodné jako ochrana před přímým úderem blesku. Nevýhodou je průnik části výkonu do vedení (důvodem je výkon potřebný na zapálení vnitřního oblouku pro svod).
- Jističe slouží k opakovatelné ochraně před nadproudy. Tepelně-magnetické jističe mají reakci magnetické části v řádu ms, u tepelné ochrany v řádu sekund až minut. Alternativou jsou elektronické jističe s reakční dobou v řádu ms.
- Pojistky slouží k jednorázové ochraně před nadproudy. Rychlé pojistky dokáží reagovat v řádu desítek ms, pomalé pojistky v řádu sekund až desítek sekund.

Na základě těchto informací je jasné, že žádná ochrana není dokonalá. To je i důvodem pro vrstvenou ochranu, zpravidla tříúrovňovou^[18]. V takové chvíli totiž dochází ke špičkovým přepětím a následně kvůli výpadkům energetické a komunikační sítě organizace prakticky přechází do ostrovního způsobu provozu, je odstřižená. Co je potřeba zajistit?

- Je nutné mít kvalitní filtrování a oddělení vstupů energie do organizace. Měla by být použita alespoň tříúrovňová ochrana. Jedná se o ochrany proti přepětí a výkonovým špičkám, frekvenční filtry, invertory, případě další komponenty. Za určitých podmínek je možné použít i elektromechanické galvanické oddělení, ale kvůli ztrátám převodem je provozně drahé.
- Ochranu kritických rozvodů energie před indukcí napětí kovovým opláštěním nebo koaxiálním vedením a jejich uzemněním.
- Záložní zdroje energie, které jsou pravidelně testované. Tyto zdroje by podle kritičnosti měly být schopné až 24 hodin provozu na základě zásob pohonných hmot, kapacity baterií atd. Další možností je použití obnovitelných zdrojů pro zajištění nouzového zásobování (to vše spadá pod ostrovní režim napájení).
- Interní komunikace musejí být galvanicky oddělené od externích. Zde nepomohou firewally, je nutné přerušit vodivých tras. Ideální jsou optočleny nebo vedení komunikačních tras optickými kabely. Jakýkoliv metalický kabel je zranitelný, pro radiová pojiťka to naštěstí platí jenom na určitých frekvencích. Stejně tak by mělo dojít k podobnému oddělení mezi budovami, aby se omezil dopad rozdílů zemních potenciálů a svodových proudů.
- V případě použití cloudových technologií je nutné mít lokální kopii dat a zajištěnu možnost aktivace lokální kopie dat alespoň pro kritické provozy.

Uvedené rady mohou znít přehnaně. Ale pomohou nejenom v případě útoku elektromagnetickou zbraní. Mají šanci zmírnit dopady v případě slunečních bouří, blízkém úderu blesku, nebo, a to je nejdůležitější, proti provozním poruchám při distribuci energie.

Reference:

- [1] Andreas A. Neuber, James C. Dickens, Magnetic flux compression Generators, Zdroj: https://www.researchgate.net/publication/2986332_Magnetic_flux_compression_Generators
- [2] Libor DRAŽAN, Roman VRÁNA, Axial Vircator for Electronic Warfare Applications, Zdroj: https://www.radioeng.cz/fulltexts/2009/09_04_618_626.pdf
- [3] G. Kazakevich, B. Chase, R. Pasquinelli, Magnetron RF sources for state of the art accelerators, Zdroj: <https://www.jlab.org/conferences/meic15/talks/kazakevich.pdf>

- [4] Patibandla Anilkumar, Dobbidi Pamu, Tapeswar Tiwari, Historical Developments and Recent Advances in High-power Magnetron: A Review, IETE Technical Review, Volume 39, 2022 - Issue 6. Zdroj: <https://doi.org/10.1080/02564602.2021.2017802>
- [5] George Caryotakis, High Power Klystrons: Theory and Practice at the Stanford Linear Accelerator Center Part I, Zdroj: <https://inspirehep.net/files/db23faa11f1b2d4f9fd74d9526c19916>
- [6] Edward Savage, James Gilbert, William Radasky, The early-time (E1) High-Altitude electromagnetic pulse (HEMP) and its impact on the US power grid. Zdroj: <http://large.stanford.edu/courses/2019/ph241/rogers1/docs/meta-r-320.pdf>
- [7] NOAA Space weather scales. Zdroj: <https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation>
- [8] Švanda, M., Smičková, A., Výboštková, T., Modelling of geomagnetically induced currents in the Czech transmission grid, Earth, Planets and Space, Volume 73, Issue 1, article id.229, DOI:10.1186/s40623-021-01555-5
- [9] Švanda, M., Mourenas, D., Žertová, K., Výboštková, T., Immediate and delayed responses of power lines and transformers in the Czech electric power grid to geomagnetic storms, Journal of Space Weather and Space Climate, Volume 10, id.26, 31 pp., DOI:10.1051/swsc/2020025
- [10] J. Kappenman, Geomagnetic storms and their impacts on the U.S. power grid. Technical Report Meta-R-319, Metatech Corp., 358 S. Fairview Ave., Suite E, Goleta, CA 93117, Jan. (2010).
- [11] JASON (2011), Impacts of severe space weather on the electric grid, Rep. JSR-11-320, MITRE Corp., McLean, Va. Available at <https://fas.org/irp/agency/dod/jason/spaceweather.pdf>
- [12] Unpublished internal FEMA reports and studies concerning risks from geomagnetic storms and solar flares, https://www.governmentattic.org/24docs/UnpubFEMAgeomagRpts_2010.pdf
- [13] Jorge C. Castellanos, Jo Conroy, Valey Kamalov, Mattia Cantono, Urs Hölzle, Solar storms and submarine internet cables. Zdroj: <https://arxiv.org/abs/2211.07850>
- [14] Sangeetha Abdu Jyothi University of California, Irvine and VMware Research, Solar Superstorms: Planning for an Internet Apocalypse. Zdroj: <https://ics.uci.edu/~sabdujyo/papers/sigcomm21-cme.pdf>
- [15] Electromagnetic pulse and geomagnetic disturbance. Zdroj: <https://www.cisa.gov/resources-tools/programs/electromagnetic-pulse-and-geomagnetic-disturbance>
- [16] Klercker Alaküla, M., Lindahl, S., 2007, European Patent Office, patent EP1766746A1
- [17] Eriksson Rosenkvist, K., 2015, GIC immune transformers - An evaluation of their GIC elimination and fault behaviour, Lund University
- [18] Např. ČSN 33 2000-4-443, ČSN 33 2000-5-534 ED.2, ČSN EN 60099-4 ED.3, ČSN EN IEC 60099-5 ED.3, ČSN EN IEC 60099-8 ED.2, ČSN EN IEC 60099-9 ED.2

Autoři:

- Jan Dušátko (*1972), věnuje se elektronice a počítačům od roku 1984, počítačové bezpečnosti od roku 1994. Zajímá se o přírodní vědy, v roce 1998 propadl kryptografii.
- doc. Michal Švanda (*1980) vystudoval astronomii a astrofyziku na MFF UK v Praze. V současnosti pracuje v Astronomických ústavech AV ČR a MFF UK, kde se zabývá výzkumem v oboru sluneční fyziky, výukou magisterských studentů a popularizací astronomie.