

Magnetické bouře a jejich vliv na zabezpečovací systémy

Aleš Navrátil

Bakalářská práce
2022

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky
Ústav bezpečnostního inženýrství

Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Aleš Navrátil**
Osobní číslo: **A19271**
Studijní program: **B3902 Inženýrská informatika**
Studijní obor: **Bezpečnostní technologie, systémy a management**
Forma studia: **Kombinovaná**
Téma práce: **Magnetické bouře a jejich vliv na zabezpečovací systémy**
Téma práce anglicky: **Magnetic Storms and Their Effect on Security Systems**

Zásady pro vypracování

1. Popište vztah jevů, které probíhají na povrchu Slunce, s jevy na planetě Zemi. Vysvětlete pojem kosmické počasí.
2. Popište principy působení slunečních erupcí na elektronické systémy, které jsou používány v průmyslově vyspělých zemích, včetně případů z historie.
3. Pojednejte o způsobech měření magnetického pole Země a jeho změn.
4. Navrhněte měřicí systém s použitím technických prostředků laboratoří FAI UTB ve Zlíně k měření magnetického pole Země.
5. Pokuste se o odhad korelace změn magnetického pole Země s úrovní signálů geopozičních systémů ve vztahu k aktivitě Slunce.
6. Vyhodnotte získaná data a poznatky pro zvýšení odolnosti elektronických zabezpečovacích systémů.

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. Hejda P.: Historie geomagnetických pozorování, Vesmír 93 (2014), 10, 551
2. Šafránková J. at al.: Jak předpovídat kosmické počasí, Vesmír 91 (2012), 492-496
3. Kusano K., Ijju T., Bamba Y., Inoue S. : A Physics-based Method that Can Predict Imminent Larger Solar Flares, Science 369 (2020) 587-591
4. Chen J. at al.: Power system responses to geomagnetic disturbances recognized using phasor measurement recordings, Electrical Power and Energy systems 113 (2019) 932-940
5. Nevanlinna H. at al.: Breakdown caused by a geomagnetically induced current in the Finnish teletsystem in 1958, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics 63 (2001) 1099-1103

Vedoucí bakalářské práce: **doc. RNDr. Vojtěch Křesálek, CSc.**
Ústav elektroniky a měření

Datum zadání bakalářské práce: **17. ledna 2022**
Termín odevzdání bakalářské práce: **31. května 2022**



doc. Mgr. Milan Adámek, Ph.D. v.r.
děkan

Ing. Jan Valouch, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 17. ledna 2022

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen připouští-li tak licenční smlouva uzavřená mezi mnou a Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně s tím, že vyrovnání případného přiměřeného příspěvku na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše) bude rovněž předmětem této licenční smlouvy;
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně, dne 3. 5. 2022

Aleš Navrátil, v. r.
podpis studenta

ABSTRAKT

Předkládaná bakalářská práce se zabývá tématem magnetických bouří a jejich vliv na zabezpečovací systémy. Obsahuje teoretickou část, seznamující s principy vzniku magnetických bouří a jejich dopadem na telekomunikační, dopravní a zabezpečovací systémy. Praktická část se zabývá sestavením vlastního zařízení, které bude měřit magnetické pole Země. Dále bude provedena datová analýza a vytvořené možné koncepty preventivních opatření a návrhy řešení eliminace dopadů možných magnetických bouří v budoucnu.

Klíčová slova: Sluneční soustava, kosmické počasí, sluneční erupce, elektronické systémy, elektromagnetická indukce, geomagnetické indukované proudy, zemský magnetismus, plazma, elektromagnetická kompatibilita.

ABSTRACT

The present bachelor thesis deals with the topic of magnetic storms and their influence on security systems. It contains a theoretical part, introducing the principles of magnetic storms and their impact on telecommunication, transport and security systems. The practical part deals with the construction of the actual device that will measure the Earth's magnetic field. Furthermore, data analysis will be performed and possible concepts of preventive measures and proposed solutions to eliminate the impact of possible magnetic storms in the future will be developed.

Keywords: Solar system, space weather, solar flares, electronic systems, electromagnetic induction, geomagnetic induced currents, earth magnetism, plasma, electromagnetic compatibility.

Na tomto místě bych rád poděkoval doc. RNDr. Vojtěchu Křesálkovi, CSc. za vedení a podněty v souvislosti s vypracováním této bakalářské práce. Dále děkuji rodině, přátelům a zaměstnavateli za jejich podporu při studiu.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Obsah

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 NAŠE MÍSTO VE VESMÍRU	11
1.1 SLUNEČNÍ SOUSTAVA	11
1.2 SLUNCE A JEHO VLIV NA ZEMI	11
1.2.1 SLUNEČNÍ AKTIVITA	12
1.2.2 GEOMAGNETICKÁ BOUŘE	14
1.2.3 VLIV JINÝCH PLANET NA SLUNEČNÍ AKTIVITU	15
1.3 KOSMICKÉ POČASÍ	16
1.3.1 ÚČINKY KOSMICKÉHO POČASÍ NA ZEMI.....	16
2 PRINCIPY PŮSOBENÍ SLUNEČNÍCH ERUPCÍ NA ELEKTRONICKÉ SYSTÉMY	18
2.1 ELEKTROMAGNETICKÁ INDUKCE	18
2.2 ÚLOHA HLUBOKÉ ZEMSKÉ VODIVOSTI	18
2.3 HLAVNÍ NEBEZPEČÍ A RIZIKOVÉ FAKTORY GEOMAGNETICKÝCH INDUKOVANÝCH PROUDŮ	19
2.3.1 MAGNETICKÁ ZEMĚPISNÁ ŠÍŘKA	19
2.3.2 HLUBOKÁ ZEMSKÁ VODIVOST	20
2.3.3 SYSTÉMOVÉ OPATŘENÍ	20
3 ZEMSKÝ MAGNETISMUS	21
3.1.1 STUDIUM ZEMSKÉHO MAGNETISMU	21
3.2 PLAZMA V MAGNETICKÉM POLI ZEMĚ	22
3.2.1 CHOVÁNÍ PLAZMY V MAGNETICKÉM POLI ZEMĚ	22
3.2.2 PLAZMA V ZEMSKÉ MAGNETOSFÉRE	23
3.3 ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA (EMC)	24
3.3.1 ELEKTROMAGNETICKÉ PROSTŘEDÍ	24
3.3.2 ELEKTROMAGNETICKÉ SPEKTRUM	27
3.3.3 ZLEPŠENÍ EMC ELEKTROTECHNICKÝCH ZAŘÍZENÍ	29
3.4 DOPADY MAGNETICKÝCH BOUŘÍ NA POZEMSKÉ SYSTÉMY	30
3.5 HISTORIE SLUNEČNÍCH BOUŘÍ	30
3.6 SYSTÉMY VČASNÉHO VAROVÁNÍ PŘED SLUNEČNÍ BOUŘÍ	33
3.6.1 SONDA SOHO	33
3.7 MĚŘENÍ MAGNETICKÉHO POLE ZEMĚ A JEHO ZMĚN	34
3.7.1 DRUŽICOVÝ ROJ SWARM	34
3.8 SENZORY K MĚŘENÍ MAGNETICKÉHO POLE	35
3.9 HROZBY SOUVISEJÍCÍ S MAGNETICKÝMI BOUŘEMI	38
3.9.1 VLIV MAGNETICKÝCH BOUŘÍ NA DANÁ ODVĚTVÍ	38
3.9.2 VLIV MAGNETICKÝCH BOUŘÍ NA BEZPEČNOSTNÍ SYSTÉMY	43
II PRAKTICKÁ ČÁST	44
4 VLASTNÍ MĚŘENÍ	45

4.1	KOMPONENTY PRO MĚŘENÍ.....	45
4.1.1	ZÁKLADNÍ DESKA ARDUINO UNO R3 (ATMEGA328P)	45
4.1.2	SENZOR KEYES KY-024 HALLŮV SENZOR	46
4.1.3	3-OSÝ MAGNETOMETR A KOMPAS HMC5883L	46
4.1.4	SENZOR NA MĚŘENÍ TEPLoty A TLAKU BMP180	47
4.1.5	PREMIUMCORD USB 2.0, A-B–3 M (STÍNĚNÝ).....	48
4.1.6	NOTEBOOK – INSTALOVÁN PROGRAM ARDUINO VERZE 1.8.18.....	48
4.1.7	DUPONT PROPOJOVACÍ KABEL 40ŽIL M-M SAMEC-SAMEC (10 CM).....	48
4.1.8	SCHRÁNKA PRO UMÍSTĚNÍ MĚŘÍCIHO ZAŘÍZENÍ	49
4.2	PŘÍPRAVA MĚŘENÍ.....	49
4.3	ZÁKLADNÍ KONFIGURACE	50
4.4	MOŽNÉ NEJISTOTY PŘI MĚŘENÍ.....	51
4.4.1	DEMAGNETIZACE A AUTOTEST	52
4.4.2	KOMPENZACE POSUNU	52
4.5	FÁZE MĚŘENÍ.....	54
4.5.1	PRVNÍ FÁZE MĚŘENÍ 26. 3. 2022, 10:15 – 10:27 HODIN	54
4.5.2	ODHAD NEJISTOTY TYP A	55
4.5.3	DRUHÁ FÁZE MĚŘENÍ 26. 3. 2022, 12:15 – 14:20 HODIN	56
4.5.4	TŘETÍ FÁZE MĚŘENÍ 31. 3. 2022, 5:45 – 6:30 HODIN.....	57
4.5.5	POROVNÁNÍ MĚŘENÝCH DAT	57
4.6	VYHODNOCENÍ ZÍSKANÝCH DAT	62
	ZÁVĚR	64
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	65
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	74
	SEZNAM OBRÁZKŮ	76
	SEZNAM TABULEK.....	79

ÚVOD

Lidstvo se po tisíce let snaží porozumět principu vesmírných zákonů. Už od raného věku lidstvo pozoruje a propočítává pohyby planet a hvězd.

Zlom přišel s rozvojem průmyslu a s ním spojené využívání elektrické energie. Elektrická energie se stala součástí našeho každodenního života, bez které si nedokážeme představit fungování dnešní moderní společnosti. Tato závislost nám také ukázala, jak velmi jsme zranitelní.

V minulosti jsem měl to štěstí, být členem týmů v rámci vesmírných projektů ESA (European Space Agency). Jako Senior Engineer jsem měl na starosti softwarovou architekturu a tvorbu kontrolních systémů předletové přípravy. Tyto projekty se zabývaly monitoringem slunečních aktivit a sledováním změn zemského klimatu. V současnosti pracuji v oblasti kybernetické bezpečnosti. Uvědomuji si, jak důležité je mít stabilní, dostupný a zabezpečený systém, proto jsem si zvolil toto zajímavé téma bakalářské práce.

V této práci se budu zabývat vztahem mezi Sluncem a Zemí z hlediska sluneční aktivity na pozemské systémy. Dále se budu snažit nastínit budoucí vývoj technologií, které budou schopny těmto aktivitám odolávat.

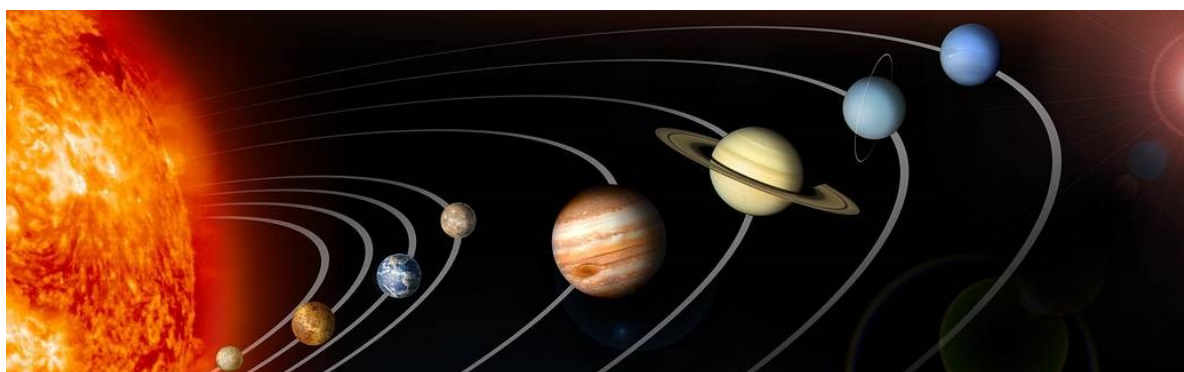
I. TEORETICKÁ ČÁST

1 NAŠE MÍSTO VE VESMÍRU

Naše civilizace je stále závislejší na křehké a zranitelné pozemské infrastruktuře. Tato závislost je dána technologickým pokrokem a rozvojem informačních technologií. Bez technologií, které jsou napájeny elektrickou energií, si dnešní život nedokážeme vůbec představit. K tomu abychom mohli tuto technologii využívat, je zapotřebí schopnost vyrobit a distribuovat elektrický proud. Jednou z vážných hrozeb, které mohou zapříčinit kolaps nebo nedostupnost elektrické energie jsou mimo jiné i sluneční magnetické bouře.

1.1 Sluneční soustava

Před 4,6 miliardami let se začalo formovat Slunce a planety naší sluneční soustavy. Ve středu naší sluneční soustavy se nachází Slunce. Gravitační síla Slunce udržuje na oběžné dráze množství planet, trpasličích planet (jako je Pluto), komet a meteoroidů. [1]

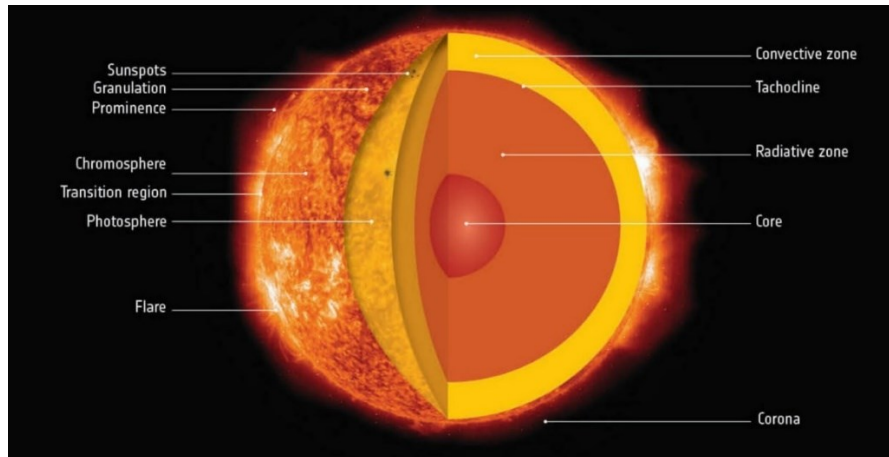


Obrázek 1: Sluneční soustava. [2]

1.2 Slunce a jeho vliv na Zemi

Slunce je hvězdou průměrné velikosti, teploty a jasnosti. Výkon Slunce je přibližně 10^{26} wattů a předpoklad je, že tato výkonnost potrvá dalších 5 miliard let. Průměr Slunce je přibližně 1,4 milionu kilometrů, což je asi 109násobek průměru Země. [3]

Z fyzikálního pohledu lze naši nejbližší hvězdu definovat jako kouli ze žhavých plynů (tzv. plazmatu) s hmotností $1,99 \times 10^{30}$ kg, s poloměrem 695 980 km a efektivní povrchovou teplotou 5770 K. Teplota jádra je několik milionů kelvinů, kde se materiál chová jako ideální plyn. Povrchová vrstva je složena ze 74 hmotnostních procent vodíku, 24 procent helia a ostatních prvků (kyslík, dusík a uhlík). [4]



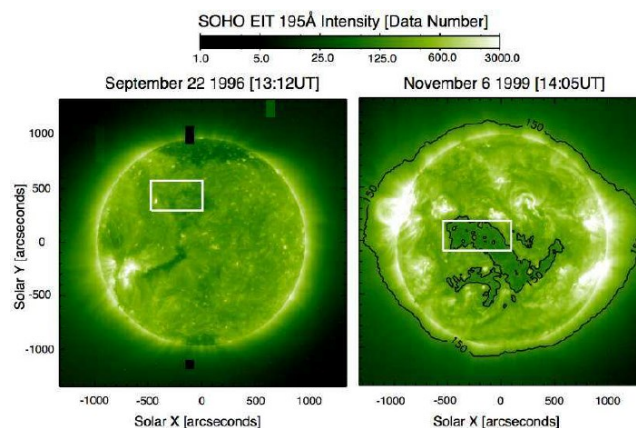
Obrázek 2: Anatomie našeho Slunce. [5]

1.2.1 Sluneční aktivita

Za sluneční aktivitou stojí sluneční magnetické pole. Před vytvořením moderní civilizace nemělo magnetické pole Slunce na náš život velký dopad. Naše civilizace je stále více závislá na komunikaci mezi jednotlivými technologickými systémy, které jsou citlivé na proměnlivost slunečního magnetického pole. Carringtonova událost z roku 1859 odstartovala oprávněné obavy, že může docházet ke geomagnetickým poruchám, které ovlivní chod naší civilizace. [4] [6]

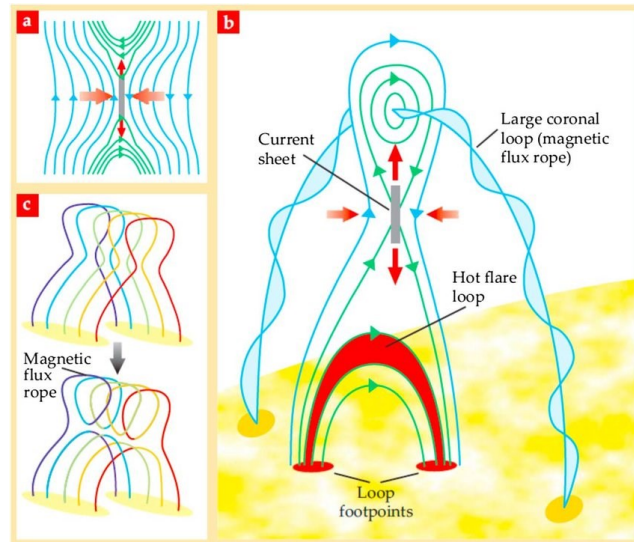
Sluneční aktivitu spojenou s kosmickým počasím (Space Weather) lze rozdělit do čtyř hlavních skupin:

- **Sluneční erupce** mají dopad na Zemi pouze tehdy, pokud se vyskytnou na straně Slunce přivrácené k Zemi. Protože jsou erupce tvořeny fotony, šíří se přímo z místa erupce, takže pokud erupci vidíme, může nás ovlivnit. [4] [7]



Obrázek 3: 2. dubna 2001, došlo v aktivní oblasti 9393 k velké sluneční erupci (SOHO). [8]

- **Výrony koronální hmoty** jedná se o velká oblaka plazmatu a magnetického pole, která vybuchují ze Slunce. Tato mračna mohou vybuchnout v jakémkoli směru a pak v tomto směru pokračovat dál, přičemž se prodírají přímo slunečním větrem. Pouze v případě, že mrak směřuje k Zemi, zasáhne výron koronální hmoty Zemi a způsobí tak rázovou vlnu. [4] [7]

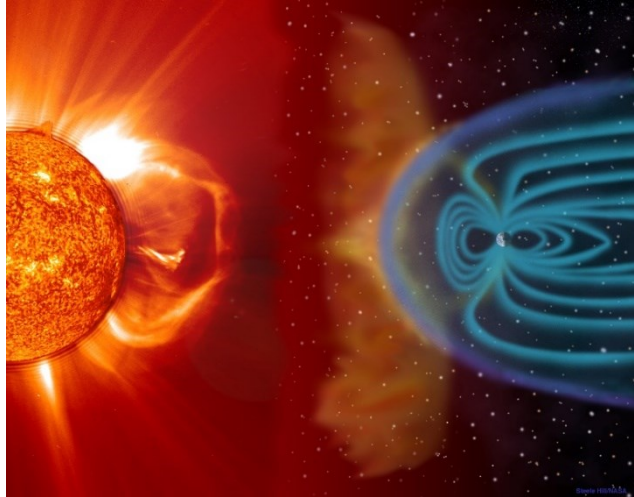


Obrázek 4: Standardní model magnetického vývoje sluneční erupce. [9]



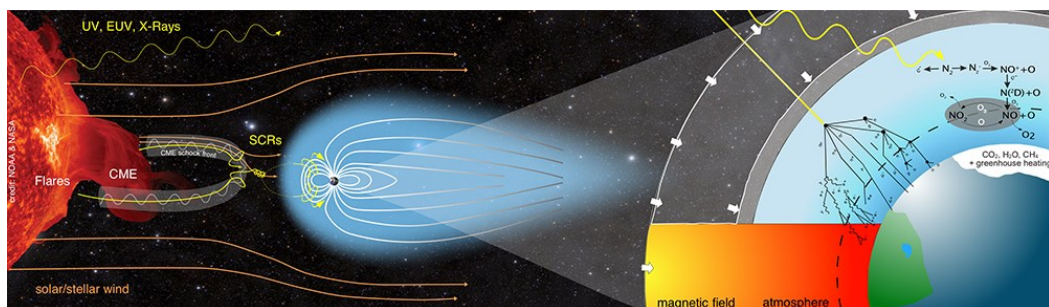
Obrázek 5: Sluneční erupce a porovnání z velikostí Země. [10]

- **Vysokorychlostní proudy slunečního větru** vycházejí z oblastí na Slunci, známých jako koronální díry. Koronární díry vznikají v různých místech na Slunci, pouze v blízkosti slunečního rovníku může sluneční vítr zasáhnout Zemi. [4] [7]



Obrázek 6: Výron koronální hmoty (CME). [11]

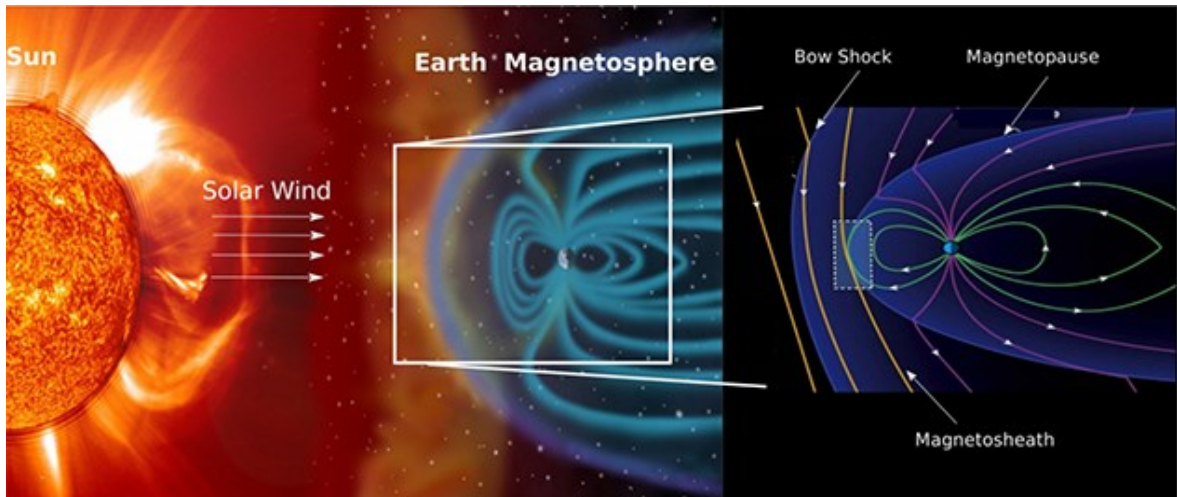
- **Sluneční energetické částice** jedná se o vysokoenergetické nabitě částice, které se uvolňují při otřesech vznikajících na čele koronálních výtrysků hmoty a slunečních erupcí. Při průchodu oblakem výronu koronální hmoty slunečním větrem, dochází k vzniku slunečních energetických částic s vysokou rychlostí. Proto pouze nabitě částice, které sledují magnetické siločáry protínající Zemi způsobí rázovou vlnu. [4] [7]



Obrázek 7: Sluneční energetické částice. [12]

1.2.2 Geomagnetická bouře

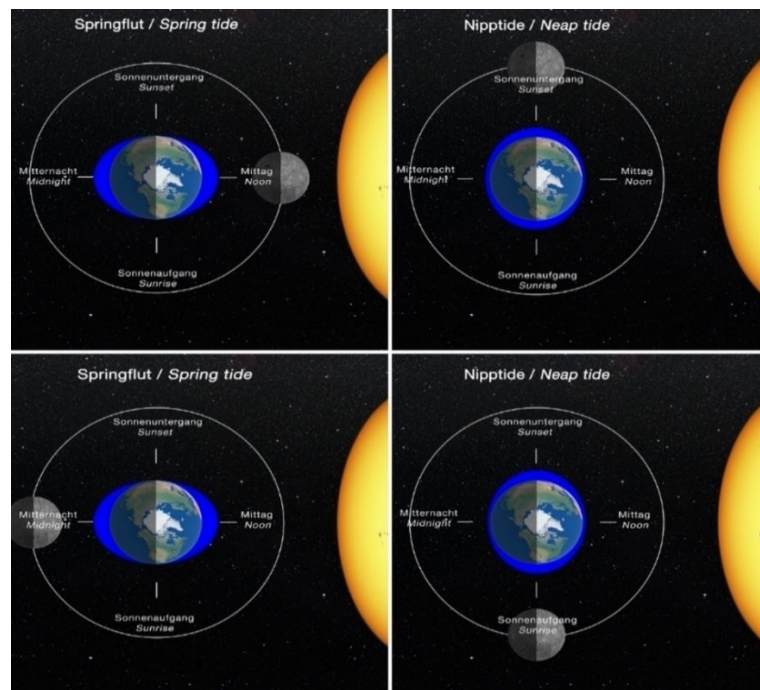
Zemská magnetosféra nás chrání před částicemi ze Slunce. Pokud je příchozí sluneční magnetické pole orientováno jižním směrem, silně interaguje s opačně orientovaným magnetickým polem Země. Magnetické pole Země se pak loupe jako cibule a umožňuje energetickým částicím slunečního větru proudit po siločárách dolů a zasáhnout atmosféru nad póly. Na zemském povrchu se magnetická bouře projevuje poklesem intenzity magnetického pole Země. [4] [7]



Obrázek 8: Interakce slunečního větru se zemskou magnetosférou. [13]

1.2.3 Vliv jiných planet na sluneční aktivitu

Základní cyklus sluneční aktivity trvá přibližně 11 let. Podle nejnovější studie výzkumného ústavu Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR), mohou oběžné dráhy Venuše, Země a Jupiteru silně ovlivňovat tento 11letý cyklus. Tato nová studie ukazuje souvislost mezi slapovými silami Venuše, Země a Jupiteru, jejichž gravitační síla přitahuje sluneční plazmu. Slapové působení je například mezi Zemí a Měsícem, Sluncem a Zemí. [4] [14] [15]



Obrázek 9: V závislosti na vzájemné poloze mohou slapové účinky Měsíce a Slunce působit společně nebo proti sobě. [16]

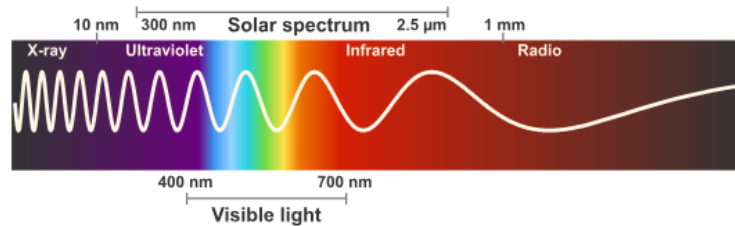
Slapový jev je také důvodem vzniku přílivu a odlivu. Dále NASA potvrdila pozorování, kdy dvacet pět z třiceti osmi největších známých slunečních erupcí začalo v době, kdy se jedna nebo více planet způsobujících příliv a odliv (Merkur, Venuše, Země a Jupiter), nacházely nad pozicemi události (méně než 10 stupňů zeměpisné délky) nebo na opačné straně Slunce. To podporuje hypotézu, že rovnováha sil nebo hybnosti (mezi tlakem sluneční atmosféry, gravitačním polem a magnetickým polem) na plazma ve smyčkových magnetických siločarách ve sluneční koróně by mohla být narušena přílivem a odlivem, což by mělo za následek rekonexi magnetického pole, sluneční erupce a sluneční bouře. Tyto principy mohou vysvětlovat gravitační a slapový vliv planet na sluneční aktivitu. Předpokládá se, že díky těmto nejnovějším poznatkům se bude moci lépe předpovídat vesmírné počasí a sluneční bouře. [4] [14] [15]

1.3 Kosmické počasí

Počasí na Zemi velkou měrou ovlivňuje naše Slunce. Vesmírné počasí a pozemské počasí ovlivňuje Slunce, které prochází vlastním slunečním cyklem. Sluneční erupce, koronální díry a výrony koronální hmoty mohou vytvářet rozsáhlé záření, rychlé elektrony a protony a další vysoce energetické částice směrem k Zemi. Tyto částice a záření mohou poškodit satelity na oběžné dráze kolem Země, vyřadit elektrické sítě, způsobit výpadky GPS, omezit dopravu, ohrozit informační infrastrukturu a v neposlední řadě vážně ohrozit lidské zdraví. [17] [18] [19]

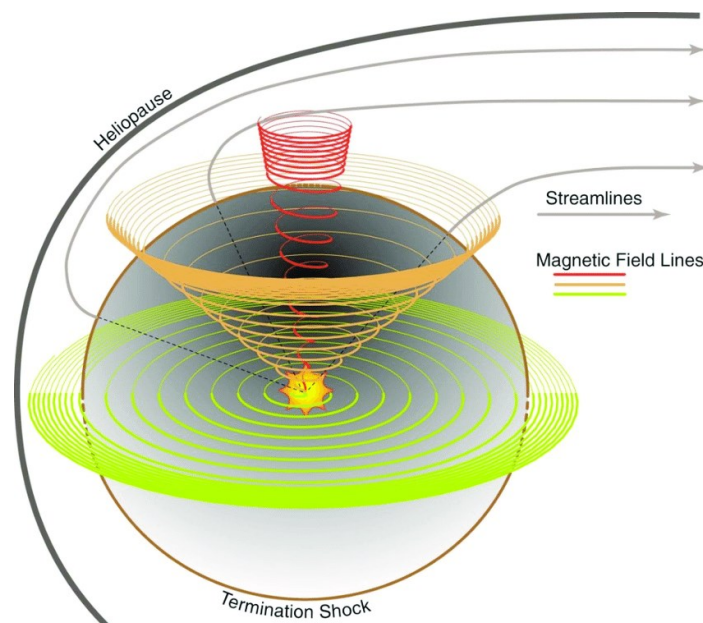
1.3.1 Účinky kosmického počasí na Zemi

Nejvýznamnější vliv Slunce na Zemi má samotný jas nebo zářivost. Slunce vytváří energii ve formě fotonů. Změny slunečního záření závisí na vlnové délce. Většina energie je vyzařována ve viditelných vlnových délkách (přibližně 400-800 nanometrů (nm)). Výkon Slunce v těchto vlnových délkách je téměř konstantní a během jedenáctiletého slunečního cyklu se mění pouze o jednu část z tisíce (0,1 %). Celková energie se označuje jako celkové sluneční záření (TSI). Zvýšení TSI o 0,1 % představuje změnu příkonu energie v horní části atmosféry přibližně o 1,3 wattu na m^2 . Tato energie je rozptýlena, odražena a pohlcena v různých výškách atmosféry, ale výsledná změna teploty atmosféry je měřitelná. [7] [17] [20]



Obrázek 10: Vyzářovaná energie je ve viditelných vlnových délkách (přibližně 400-800 nanometrů (nm)). [21]

V roce 1954 odhalilo pozorování ohonu komet existenci permanentního toku nabitých částic, které jsou obsaženy v meziplanetárním prostoru. Tento jev byl nazván sluneční vítr. Jedná se o izotermickou expanzi sluneční atmosféry. Rychlost expanze je konstantní a závisí na teplotách ve vysokých vrstvách sluneční korony. K tomu, aby bylo možné odhadnout teplotu slunečního větru, se využívá zatmění Slunce. Při tomto jevu se odhadla teplota na 1 milion kelvinů a zároveň se propočítala rychlost částic zhruba na 450 km/s. [17]



Obrázek 11: Schéma Parkerovy spirály v heliosféře. Proudnice slunečního větru působí na magnetické siločáry Slunce, které se v důsledku rotace Slunce stáčí do Archimédovy spirály. [22]

Dalším významným faktorem ovlivňující kosmické počasí na Zemi je meziplanetární magnetické pole. Sluneční vítr je plně ionizované kvazineutrální plazma, které je považováno za elektricky vodivou tekutinu. Pomocí takzvaného zamrznutí magnetického pole na slunečním povrchu a v expandujícím slunečním větru se v meziplanetárním prostoru vytváří typická spirála. V průniku slunečního větru na zemský povrch chrání Zemi geomagnetické pole. Sluneční vítr díky zemskému geomagnetickému poli Zemi jen obtéká. [17] [22]

2 PRINCIPY PŮSOBENÍ SLUNEČNÍCH ERUPCÍ NA ELEKTRO-NICKÉ SYSTÉMY

Na zemském povrchu se projevuje vesmírné počasí jako geomagnetická bouře doprovázená geoelektrickým polem a geomagnetickým indukovaným proudem. To vše ovlivňuje technologické systémy, jako jsou sítě pro přenos elektrické energie, potrubí, telekomunikační sítě a dopravní infrastrukturu. Geomagnetické indukované proudy jsou potenciálním zdrojem systémových problémů. Geomagnetické poruchy (GMD), často nazývané geomagnetické bouře, a geomagneticky indukované proudy jsou stále více považovány za hrozbu pro energetickou soustavu. Geomagnetické indukované proudy jsou proudy, které se během geomagnetické poruchy indukují v dlouhých vodičích. K tomuto jevu dochází při každé velké i malé geomagnetické bouři. Geomagnetické indukované proudy mohou poškodit systémy způsobem, který může být náhlý a katastrofální, jako v případě bouře v Quebecu v roce 1989. Geomagnetické indukované proudy může mít také za následek stárnutí technologií během mírných událostí, které se vyskytují pravidelně. [23] [24] [25]

2.1 Elektromagnetická indukce

Při pohybu vodiče v magnetickém poli, vzniká (indukuje se) elektrické napětí. Pokud je elektrický obvod uzavřen, vzniká v něm elektrický proud. Zákon elektromagnetické indukce vyjadřuje další fyzikální projev magnetického pole. Důležitým pojmem je indukční tok Φ . Jedná se o součin magnetické indukce B a průmětu plochy S (např. uzavřené proudové smyčky) do roviny kolmé k indukčním čarám, α je úhel mezi směrem B a kolmicí (normálovou) k rovině S . [26] [27]

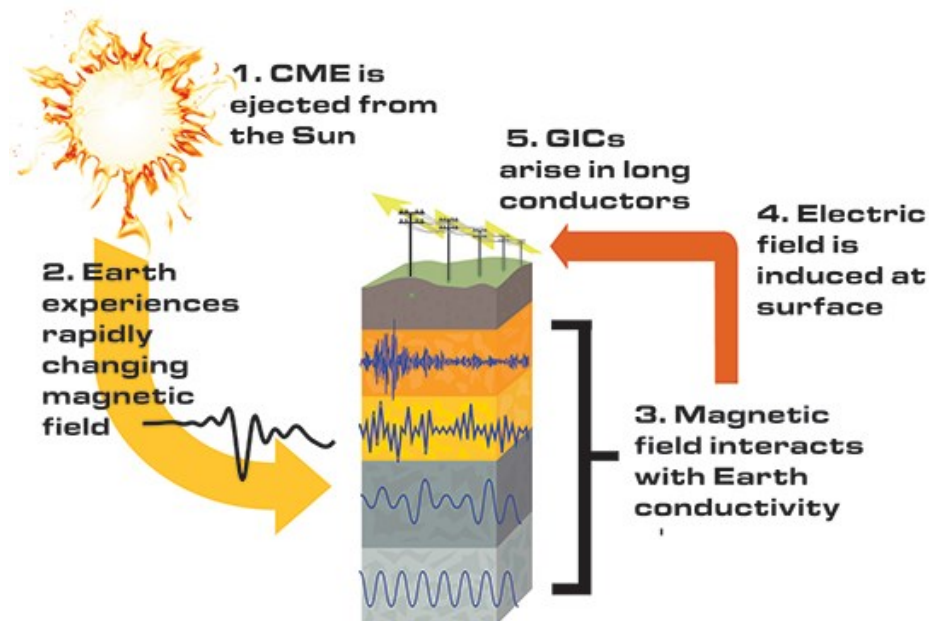
$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos\alpha \quad (1.1)$$

Faradayův zákon říká, že indukovaný U_{ind} se rovná časové změně indukčního toku (tok se změní o $\Delta\Phi$ za čas Δt). Lenzův zákon popisuje, že vznikající napětí má takový směr, aby zmenšovalo působení změny indukčního toku, který ho vyvolá. [26] [27]

2.2 Úloha hluboké zemské vodivosti

Podmínky pro geomagnetické indukované proudy jsou vytvářeny pomocí rychle se měnícímu geomagnetickému poli. GMD je obvykle kontinentálního rozsahu vzhledem k velkému rozsahu systémů horních atmosférických elektrických proudů, ale mohou mít i lokální charakter jako tzv. "horké skvrny". Indukované geoelektrické pole je závislé na poloze.

Důvodem menšího horizontálního měřítka proměnlivosti geoelektrického pole, je to, že geoelektrická pole na povrchu jsou způsobena interakcí geomagnetické poruchy s vodivostí hlubokých zemských vrstev. Horizontální měřítka proměnlivosti těchto hlubokých zemských vrstev pokrývají rozsah od subkontinentálního po lokální na rozdíl od plně kontinentálního měřítka GMD. [23] [24] [25]



Obrázek 12: Sled událostí po výronu koronální hmoty Slunce. [24]

2.3 Hlavní nebezpečí a rizikové faktory geomagnetických indukovaných proudů

Při posuzování možností vzniku geomagnetických indukovaných proudů je třeba vzít v úvahu některé z následujících faktorů nebezpečí a rizik.

2.3.1 Magnetická zeměpisná šířka

Systémy ionosférických elektrických proudů, které jsou zesíleny nebo vytvořeny během událostí geomagnetické poruchy, se nacházejí na severu nebo jihu. Čím blíže se infrastruktura nachází k zemskému povrchu nebo v její blízkosti, tím více je vystavena vlivu geomagnetickým bouřím. Většinou jsou vystaveny nebezpečí geomagnetických indukovaných proudů oblasti vyskytují na severní polokouli severněji a na jižní polokouli jižněji. V průběhu geomagnetické poruchy se jižní (severní polokoule) a severní (jižní polokoule) hranice proudových systémů rozšiřuje. V současné době není známo, jak daleko od pólů se tyto ionosférické proudové systémy mohou během nejextrémnějších událostí posunout. [24] [25]

2.3.2 Hluboká zemská vodivost

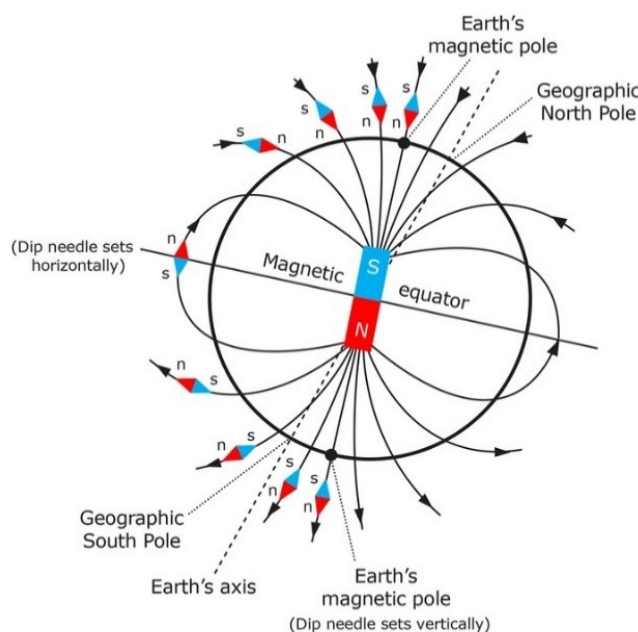
Obecně platí, že u oblastí se složitější geologickou strukturou je větší nebezpečí kvůli lokálnímu zesílení geoelektrického pole. Patří sem i pobřežní oblasti, a to kvůli velkému rozdílu ve vodivosti mezi vodou a pevninou. Je to také dáno tím, že indukované geoelektrické pole závisí na tom, jak oblast reaguje na frekvenční obsah geomagnetické bouře. Vertikální a horizontální změny zemské vodivosti tak vedou k nebezpečí geoelektrického pole, které závisí jak na místě, tak na frekvenčním spektru konkrétní bouře. [24] [25]

2.3.3 Systémové opatření

Velmi důležitým faktorem je délka a orientace přenosového vedení vzhledem ke geoelektrickému poli, které do značné míry určují velikost geomagnetických indukovaných proudů. Delší vedení, která jsou rovnoběžná s geoelektrickým polem, budou mít větší geomagnetický indukovaný proud. Při probíhající velké bouři se může orientace fluktuací magnetického pole v jednotlivých okamžicích velmi lišit. Nelze mít geomagnetické indukované proudy pod kontrolou, ale je možné snížit riziko vhodnými technickými a provozními opatřeními. [24] [25]

3 ZEMSKÝ MAGNETISMUS

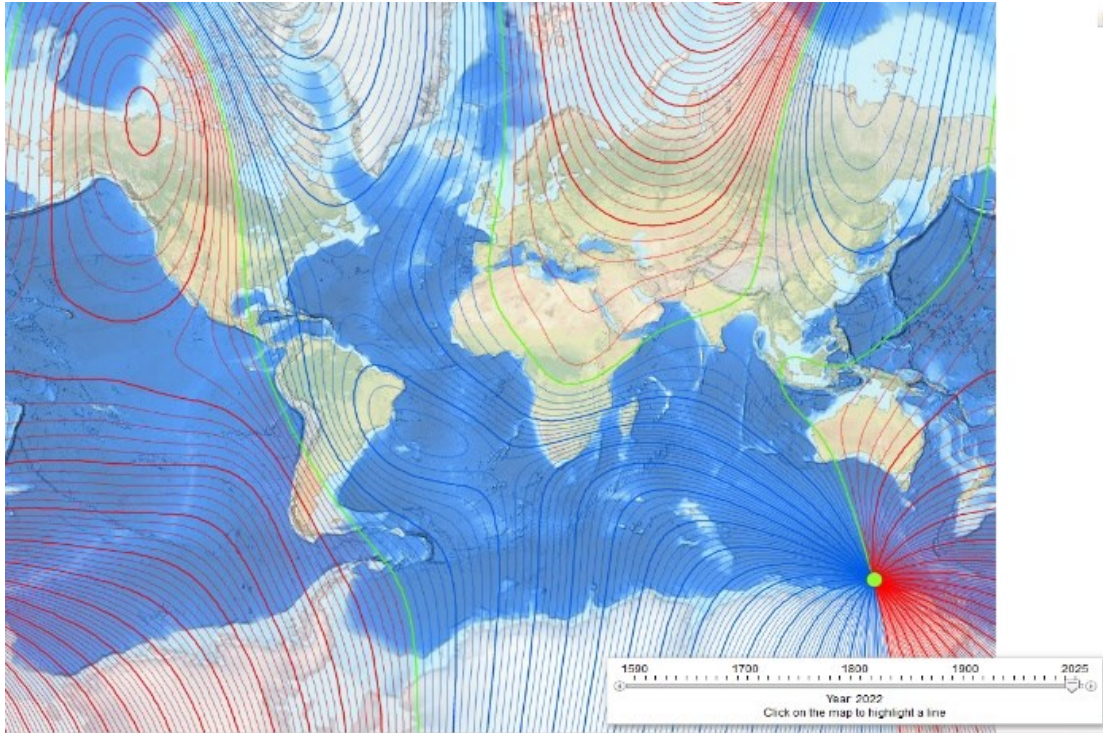
Zemská magnetosféra je rozsáhlá oblast ve tvaru komety, která hraje klíčovou roli v obyvatelnosti naší planety. Jedná se o interakci slunečního větru s dipólem planety v přítomnosti atmosféry. Na návětrné straně se vytváří magnetická rázová vlna. Na této rázové vlně se skokem mění magnetické pole a velikost rychlosti částic slunečního větru. Částice obtékají rázovou vlnu a celou Zemi směrem k magnetickému ohonu. Jedná se o oblast prodloužených siločar magnetického pole Země, která je vyplněna plazmatem. [28] [29]



Obrázek 13: Magnetické pole Země. [30]

3.1.1 Studium zemského magnetismu

Velký přínos pro magnetismus přinesli dva němečtí vědci a to, Alexander von Humboldt (1769-1859) a Carl Friedrich Gauss (1777-1855). Při pozorování magnetické deklinace si Humboldt povšiml souvislosti mezi rychlým pohybem strelky a polární září. Dospěl tak k názoru, že oba jevy mají společnou příčinu. Gauss vyvinul metodu pro určení absolutní velikosti geomagnetického pole. Historické geomagnetické záznamy jsou velmi důležité ke studiu řetězců procesů týkajících se sluneční aktivity a kosmického počasí. [28]



Obrázek 14: Magnetická deklinace je důležitý pojem pro přesnou navigaci. Kompas vždy ukazuje podél siločar magnetické pole (které se sbíhají na tzv. magnetických pólech). [31]

Elektrické a magnetické pole můžeme popsat pomocí skalárního a vektorového potenciálu (Φ, \mathbf{A}).

Převodní vztahy:

$$\mathbf{E} = -\frac{\delta \mathbf{A}}{\delta t} - \frac{\delta \Phi}{\delta \mathbf{x}}, \quad (1.2)$$

$$\mathbf{B} = \text{rot} \mathbf{A}. \quad (1.3)$$

kdy \mathbf{E} je intenzita elektrického pole, \mathbf{B} je magnetická indukce. Při výpočtu pohybu nabitých částic bude předpoklad, že potenciály $\Phi(\mathbf{t}, \mathbf{x})$ a $\mathbf{A}(\mathbf{t}, \mathbf{x})$ jsou předem dané funkce. [32]

3.2 Plazma v magnetickém poli Země

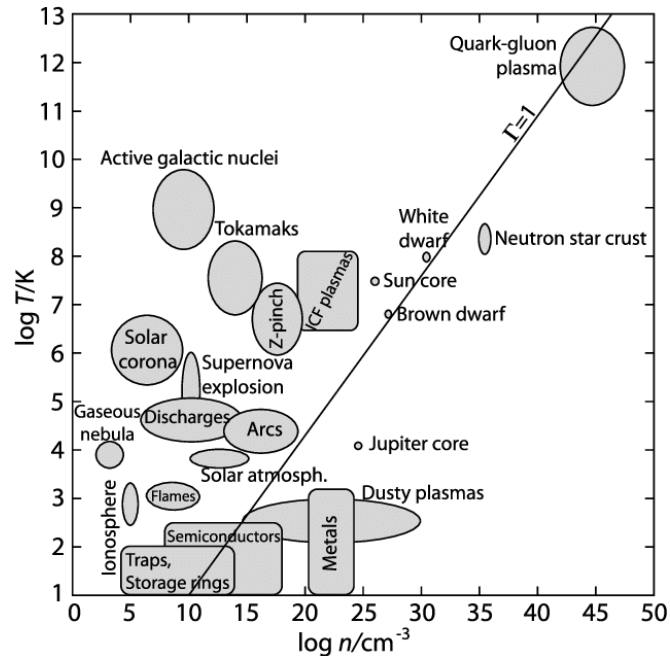
Plazma je ionizovaný plyn, kde se od kladných iontů odštěpily elektrony a vytvořily strukturu nabitých částic. Z velké části je plazma ve vesmíru velmi řídká a rozptýlená. [33]

3.2.1 Chování plazmy v magnetickém poli Země

Plazma má tři základní vlastnosti:

1. V plazmatu se vyskytují volné nosiče elektrického náboje.

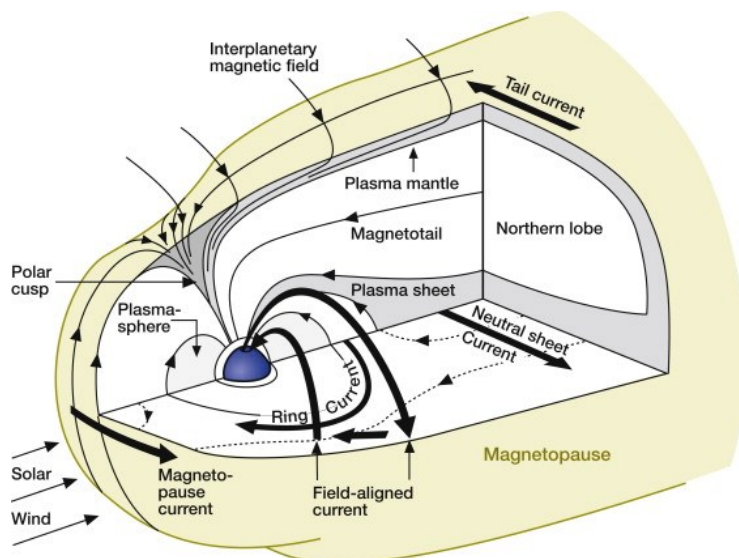
2. Plazma vykazuje kolektivní chování (jako celek reaguje na elektrické a magnetické pole, které také vytváří).
3. Plazma je kvazineutrální (v makroskopickém objemu je stejné množství kladných i záporných nábojů). [32]



Obrázek 15: Různé typy plazmatu v rozmezí hustota – teplota. Silně vázaná plazma se nachází přímo na přímce $\Gamma = 1$ (Γ charakterizuje poměr potenciální a kinetické energie). Osa X představuje koncentraci elektronů, osa Y představuje teplotu elektronů. [34]

3.2.2 Plazma v zemské magnetosféře

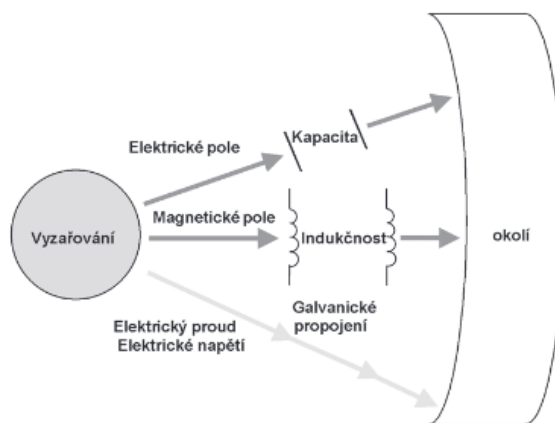
Vyšle-li Slunce směrem k Zemi mračna slunečního materiálu, který je tvořen plazmou, magnetické pole obsažené v tomto materiálu se střetne s magnetickým polem Země. To vyvolá magnetickou rekonexi, která předá energii do blízkého zemského prostoru a vyvolá řadu reakcí. Mezi tyto reakce patří vytvoření indukovaného elektrického proudu, který může poškodit energetické sítě. V horních vrstvách atmosféry, může docházet k ovlivnění funkčnosti satelitních systémů. [33]



Obrázek 16: Magnetosféra, prstencový proud a magnetický plazmový ohon. [35]

3.3 Elektromagnetická kompatibilita (EMC)

Elektromagnetická kompatibilita je vlastnost elektrického a elektronického zařízení, která mu umožňuje pracovat v souladu s jeho určením v přítomnosti jiných elektrických a elektronických zařízení a nerušit je. Všechna tato zařízení vyzařují elektromagnetickou energii a část této vyzařované energie může interagovat a rušit jiná zařízení. [36]



Obrázek 17: Elektromagnetické ovlivňování. [37]

3.3.1 Elektromagnetické prostředí

Důležité oblasti výkonové elektroniky je schopnost zmírňovat elektromagnetického rušení (EMI). Mezi přirozené zdroje EMI patří atmosférické výboje a mimozemské záření. Uměle vytvořené zdroje EMI jsou radiační záření, automatické zapalování, vysokofrekvenční rušení a elektrické vedení, které jsou vytvořené lidskou činností. Potlačení EMI a zvýšení

elektromagnetické kompatibility (EMC) se stalo nezbytným u vysokofrekvenčních výkonových elektronických měničů (např.: usměrňovače, zvyšovače napětí, snižovače napětí). [38] [39] [40]

Maxwellovy rovnice

Podle nejnovějších poznatků jsou atomy látek složeny z elektricky nabitých částic. Z vnějšku se látky mohou zdát jako elektricky neutrální, pokud se vliv opačných nábojů vzájemně neruší. Pohyb elektricky nabitých částic je definován jako elektrický proud. Zákon nestacionárního elektromagnetického pole buzeného pohybujícími se nabitými částicemi ve vakuu je možné definovat v Maxwellových – Lorenzových rovnicích: [41]

$$\operatorname{div} E = \frac{\rho}{\varepsilon_0}, \operatorname{rot} B - \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\delta E}{\delta t} = \mu_0 j \quad (1.4)$$

$$\operatorname{rot} E + \frac{\delta B}{\delta t} = 0, \operatorname{div} B = 0 \quad (1.5)$$

kde $j = \rho v$, kde $v(\mathbf{r}, t)$ je rozložení rychlosti pohybu náboje. Elektromagnetické pole je určeno rozložením vektorových polí *intenzity elektrického pole* $E(\mathbf{r}, t)$ a *magnetické indukce* $B(\mathbf{r}, t)$. Přibližná hodnota permitivity vakua ε_0 a permeability μ_0 dle mezinárodní soustavy jednotek fyzikálních veličin SI je: [41]

$$\varepsilon_0 \doteq 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}, \mu_0 \doteq 1,257 \cdot 10^{-6} \text{ Hm}^{-1}$$

kde je F jednotka farad, H henry a je splněn *Weberův vztah*: [41]

$$\varepsilon_0 \mu_0 = \frac{1}{c^2} \quad (1.6)$$

kde rychlost světla ve vakuu je $c \doteq 2,998 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$.

Interakci nabitých částic je silové působení daného elektrického pole E , B na náboje a můžeme ho určit vzorcem pro *Lorenzovu sílu*: [41]

$$F = q(E + v \cdot B) \quad (1.7)$$

Upravená Maxwellova rovnice pomocí vektorové *Gaussovy a Stokesovy analýzy*: [41]

1. zákon:

$$\text{a. v prostředí} \quad \operatorname{div} D = \rho \Leftrightarrow \oint_{\delta V} D \cdot df = \int_V \rho dV \quad (1.8)$$

$$\text{b. ve vakuu} \quad \operatorname{div} E = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \Leftrightarrow \oint_{\delta V} E \cdot df = \frac{1}{\varepsilon_0} \int_V \rho dV \quad (1.9)$$

Integrální rovnice vyjadřuje *Ampérův zákon* doplněný Maxwellem o posuvný proud: [41]

2. zákon:

a. v prostředí

$$\text{rot}H - \frac{\delta D}{\delta t} = j \Leftrightarrow \oint_{\delta f} H \cdot dl - \frac{d}{dt} \int_f D \cdot df = \int_f j \cdot df \quad (1.10)$$

b. ve vakuu

$$\text{rot}B - \frac{1}{c^2} \frac{\delta E}{\delta t} = \mu_0 j \Leftrightarrow \oint_{\delta f} B \cdot dl - \frac{1}{c^2} \frac{d}{dt} \int_f E \cdot df = \mu_0 \int_f j \cdot df \quad (1.11)$$

Rovnice vyjadřuje skutečnost, že magnetické siločáry jsou buď uzavřené, nebo probíhají z nekonečna do nekonečna: [41]

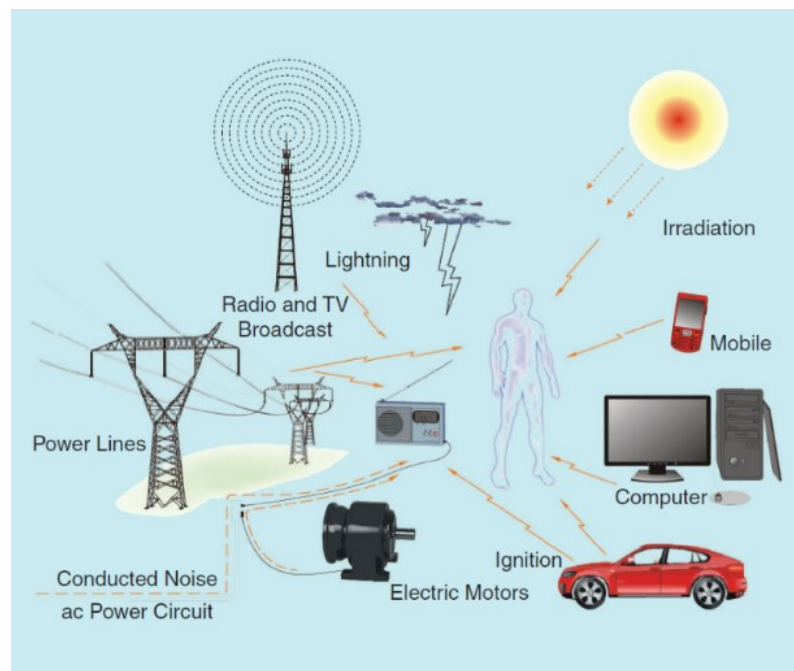
3. zákon:

a. ve vakuu $\text{div}B = 0 \Leftrightarrow \oint_{\delta V} \cdot df = 0$ (1.12)

Zákon vyjadřuje Maxwellovo zobecnění Faradayova zákona elektromagnetické indukce: [41]

4. zákon:

$$\text{rot}E + \frac{\delta B}{\delta t} = 0 \Leftrightarrow \oint_{\delta f} E \cdot dl + \frac{d}{dt} \int_f B \cdot df = 0 \quad (1.13)$$

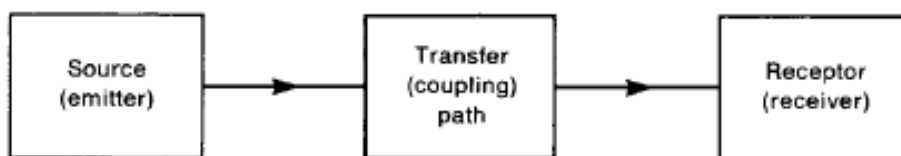


Obrázek 18: Typické pozemské elektromagnetické prostředí. [39]

Faradayovy zákony elektromagnetické indukce

Faradayovy zákony elektromagnetické indukce vysvětlují vztah mezi elektrickým obvodem a magnetickým polem. Tento zákon je základním principem fungování většiny elektromotorů, generátorů, transformátorů, induktorů. [42]

$$u = \frac{d\Phi}{dt} [V] \quad (1.14)$$



Obrázek 19: Základní prvky problému EMC. [43]

Zdroje rušení: motory, spínače, relé, měniče napětí, zářivky, počítače, digitální obvody, oscilátory, obvody pracující s vysokými proudy, obvody se signály s rychlými přechodovými jevy, elektrostatické výboje, **rušení mimozemského původu** (geomagnetické bouře, kosmické záření). [42]

Vazební cesta: vzdušný prostor, napájecí vedení, zemní vodiče, signální vedení, stínění, datové kabely. [42]

Zařízení, které jsou rušeny: televizní a rozhlasové přijímače, počítače a digitální obvody, měřicí přístroje, automatizační zařízení, komunikační a navigační systémy, výbušné a hořlavé páry/plyny. [42]

3.3.2 Elektromagnetické spektrum

Elektromagnetické spektrum je spojité spektrum všech elektromagnetických vln uspořádaných podle frekvence a vlnové délky. Frekvenční spektrum elektromagnetické energie může sahát od stejnosměrného proudu až po gama záření (10^{21} Hz). [44]

Tabulka 1: Vlnové délky, frekvence a úrovně vyzářené energie [44]

Elektromagnetické spektrum			
Oblast	Vlnová délka [λ] = (cm)	Frekvence [f] = (Hz)	Energie [E] = [eV]
rádiové záření	> 10	< 3×10^9	< 10^{-5}
infračervené záření	10 – 0.01	$3 \times 10^9 - 3 \times 10^{12}$	$10^{-5} - 0.01$
viditelné světlo	$7 \times 10^{-5} - 4 \times 10^{-5}$	$4.3 \times 10^{14} - 7.5 \times 10^{14}$	2 – 3
ultrafialové záření	$4 \times 10^{-5} - 10^{-7}$	$7.5 \times 10^{14} - 3 \times 10^{19}$	3 – 10^3

rentgenové záření	$10^{-7} - 10^{-9}$	$3 \times 10^{17} - 3 \times 10^{19}$	$10^3 - 10^5$
gama záření	$< 10^{-9}$	$> 3 \times 10^{19}$	$> 10^5$

Dvě hlavní složky EMC:

- Elektromagnetické rušení (EMI) – jedná se o schopnost zařízení pracovat, aniž by vyzařovalo příliš mnoho elektromagnetické energie, která by mohla poškodit jiná zařízení.
- Elektromagnetickou citlivost (EMS) – jedná se o schopnost zařízení odmítat rušení a odstraňovat rušivé vlivy a pracovat, aniž by bylo rušeno jinými zařízeními. [44]

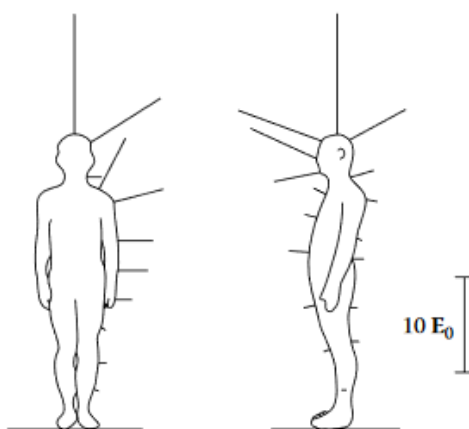
$$EMC = EMI + EMS \quad (1.15)$$

Elektromagnetickou kompatibilitu lze rozdělit do dvou podskupin na základě studovaných jevů:

- Elektromagnetická kompatibilita biologických systémů.
- Elektromagnetická kompatibilita technických systémů. [44]

3.3.2.1 Elektromagnetická kompatibilita biologických systémů

Elektromagnetická kompatibilita biologických systémů se zabývá vlivem elektromagnetického pole na živé organismy. Fyzikální interakce elektromagnetických polí s biologickými systémy jsou definovány zákony popisujícími jejich vlastnosti a chování v biologických systémech a jiných hmotných prostředích. Tyto zákony jsou obecně známé jako Maxwellovy rovnice. [42] [45]



Obrázek 20: Rozložení nízkofrekvenčního elektrického pole měřené na povrchu lidského těla stojícího pod elektrickým přenosovým vedením. [45]

3.3.2 Elektromagnetická kompatibilita technických systémů

Elektromagnetická kompatibilita technických systémů se zabývá vlivem elektromagnetického pole na technické systémy. Jedná se hlavně o elektrotechnická a elektronická zařízení. [40] [43]

Čtyři hlavní oblasti problémů EMC u technických systémů:

- **Emise** – jedná se o rušící elektromagnetická pole, která pochází přímo ze zařízení. Tento problém se musí vždy řešit již při návrhu samotného zařízení. Projekty by měly zahrnovat vhodné návrhy například plošných spojů, filtrování nežádoucích frekvencí, používání stíněných kabelů a kabelů s ochranou proti rušení. [44]
- **Rušení** – tento problém se týká rozvodných a elektrických sítí. Jedná se o přechodné jevy například změny frekvencí a průběhu, rychlé přechodné jevy, RF na elektrickém vedení. Řešením je například správné uzemnění, použití výkonných filtrů nebo instalaci ochrany proti přechodným jevům. [44]
- **Elektrostatický výboj (ESD)** – jedná se o náhlé vybití elektrických nábojů. Statické výboje mají podobu elektrického proudu, které jsou okamžité. Extrémně rychlé vybití má za následek vyzařování vysokofrekvenční elektromagnetické energie, jež sahá až do oblasti ultra vysokých frekvencí (UHF). [44]
- **Radiofrekvenční interference (RFI)** – tento problém narůstá v důsledku zvyšování počtu mobilních komunikačních zařízení, například velké množství bezdrátových místních sítí (Wireless LAN). Nejvíce zranitelná jsou však analogová zařízení. Řešením těchto problémů mohou být vysokofrekvenční filtrace nebo používání stíněné kabeláže. [44]

3.3.3 Zlepšení EMC elektrotechnických zařízení

- Zmenšení indukční vazby.
- Zmenšení kapacitní vazby.
- Zmenšení galvanické vazby.
- Zmenšení elektromagnetické vazby.
- Zmenšení jiskření kontaktů a atmosférických přepětí. [40]

3.4 Dopady magnetických bouří na pozemské systémy

Studium vlivu magnetických bouří na naši Zemi se v současné době dostává do popředí zájmu světových vědeckých týmů. Příkladem může být nedávný objev v Grónsku a Antarktidě. Zde se po analýze jader z vrtů objevily data o velké sluneční bouři, která postihla Zemi před více než 9125 lety. Jedná se o zásadní objev, kdy došlo k nejsilnější sluneční erupci, jaká kdy byla zjištěna. O to důležitější je fakt, že k ní došlo při slunečním minimu. [46]



Obrázek 21: Analýza ledových jader (Foto: Raimund Muscheler). [47]

3.5 Historie slunečních bouří

V roce 2015 byl zveřejněn článek v Nature Communications o silných slunečních bouřích v naší minulosti. Jedná se o období 774–775 n. l. a 993–994 n. l., kdy z vrtů v Grónsku a Antarktidě byl objeven zvýšený výskyt kosmogenních radionuklidů, jako jsou beryllium-10 ($^{10}_4Be$), uhlík-14 ($^{14}_6C$) a chlor-36 ($^{36}_{17}Cl$). Tyto radionuklidy vznikají v jaderných reakcích při dopadu kosmického záření do zemské atmosféry. [48]

Super bouře v roce 1859

V roce 1859 zasáhla Zemi jedna z nejsilnějších slunečních bouří v historii. Bouře se nazývá "Carringtonova událost". Tato sluneční bouře způsobila velkou polární záři, která byla viditelná až v Karibiku. Způsobila také poruchy v tehdejších globálních telekomunikačních sítích. [49]

Geomagnetická bouře 1921

Další mohutná sluneční bouře zasáhla Zemi v roce 1921. Tato bouře je považována za největší zaznamenanou bouři ve 20. století. Bouře zasáhla Zemi ještě před rozsáhlou

celosvětovou elektrifikací, a proto její následky byly lokálního charakteru. Při bouři docházelo ke zkratům vodičů a vyřazení signalizačních systémů. [49]

Geomagnetická bouře 1972

V roce 1972 zasáhla Zemi další velká sluneční bouře. Bouře vyřadila dálkové telefonní spojení v mnoha amerických státech. Pravděpodobně odpálila některé námořní miny a mohla být zodpovědná za ovlivnění vojenských operací ve Vietnamu. [49]

Geomagnetická bouře 1989

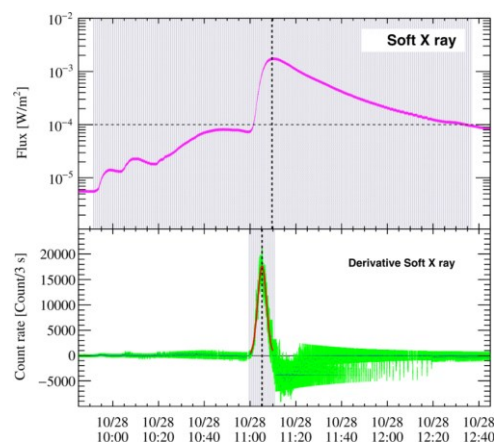
Část kanadské elektrické sítě byla v roce 1989 vyřazena velkou sluneční bouří. V postižených oblastech byl rozsáhlý výpadek proudu. Dále byly poškozeny přenosové systémy elektrárny Hydro Québec a některé transformátory v New Jersey se roztavily. [49]

Geomagnetická bouře 2000

Tato sluneční bouře byla na stupnici slunečních erupcí označena číslem X5 a stala se jednou z nejstudovanějších. Bouře vyřadila některé družice a vedla k výpadkům rádiového vysílání v postižených oblastech. [49]

Geomagnetická bouře 2003

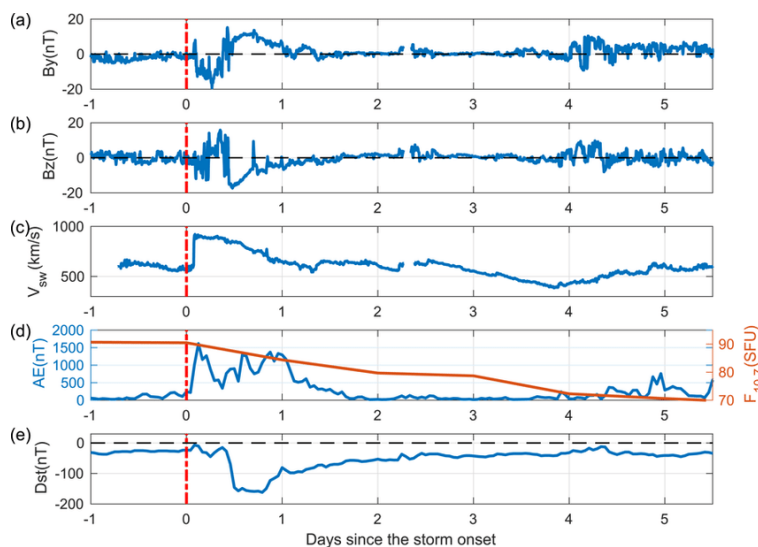
Sluneční erupce byla tak silná, že zahltila rentgenový detektor družice GOES, která ji pozorovala. Jednalo se o sérii erupcí, které probíhaly v průběhu dvou týdnů. Satelitní technici byli nuceni přepnout některé družice do bezpečného režimu a astronautům na palubě Mezinárodní vesmírné stanice bylo doporučeno, aby vyhledali úkryt před zvýšenou úrovní radiace. Na Zemi byla omezena letecká doprava. [49]



Obrázek 22: Sluneční erupce z 28. října 2003. Je zde znázorněna křivka měkkého rentgenového záření (nahore) a derivace toku měkkého rentgenového záření (dole). Měřené hodnoty družice GOES. [50]

Geomagnetická bouře 2006

Sluneční bouře narušila komunikaci mezi družicemi a Zemí a navigačními signály globálního polohového systému (GPS) asi na 10 minut. Bouře poškodila rentgenový sluneční zobrazovací přístroj na družici GOES 13. [50]



Obrázek 23: Parametry slunečního větru a indexy geomagnetických bouří od 13. do 19. prosince 2006: (a) IMF B_y , (b) IMF B_z , (c) rychlost slunečního větru, (d) AE a $F_{10.7}$, (e) index Dst . Svislá červená přerušovaná čára v každém panelu označuje čas nástupu bouře a vodorovné černé přerušované čáry v (a), (b) a (e) označují čáry nulových hodnot pro B_y , B_z a Dst . [51]

Geomagnetická bouře 2012

Tato sluneční bouře Zemi minula, ale pokud by k erupci došlo o pouhý týden dříve, Země by se skutečně ocitla v epicentru. Bouře zasáhla družici NASA Solar Terrestrial Relations Observatory. Dle odhadů NASA, pokud by nás bouře zasáhla, způsobila by škody za více než 2 biliony dolarů. [52]

Geomagnetická bouře 2017

6. září 2017 došlo na Slunci k velké sluneční erupci třídy X9,3. Jednalo se o nejsilnější erupci 24. slunečního cyklu (2008-2019). Tato geomagnetická bouře vyvolala výpadek rádiového vysílání kategorie R3 (silný). NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) později oznámila, že vysokofrekvenční rádiové vysílání používané v letectví, námořní dopravě, radioamatérství a dalších nouzových pásmech bylo toho dne na osm hodin nedostupné. [52] [53] [54]

Geomagnetická bouře 2022

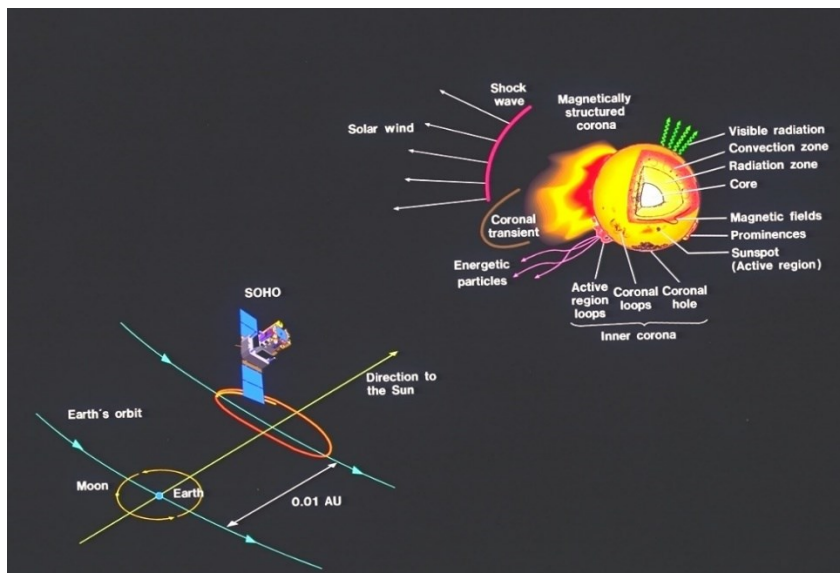
8. února 2022 oznámila společnost SpaceX ztrátu 40 družic Starlink z celkového počtu 49. Tato ztráta byla zapříčiněna mohutnou sluneční bouří. Tyto družice mají sice systém ochrany proti magnetickým bouřím, ale díky husté zemské atmosféře nebylo možné družice již vrátit na vyšší orbitu. [55]

3.6 Systémy včasného varování před sluneční bouří

Je důležité mít včas informace o hrozbě slunečních bouří. Tyto informace nám mohou pomoci včas aktivovat systémy ochrany tak, aby se zamezilo škodám jak na lidském zdraví, tak na technických systémech. K tomu nám může pomoci například technologie, kterou má sonda SOHO.

3.6.1 Sonda SOHO

Sonda SOHO zkoumá sluneční povrch, jádro, ale také sluneční vítr ve vzdálených oblastech naší sluneční soustavy. Sonda je umístěna ve vzdálenosti 1,5 milionu kilometrů od Země. Sonda nepřetržitě pořizuje snímky a údaje o slunečních erupcích. Jedná se o společný projekt ESA a NASA. Díky těmto informacím jsme schopni například včas zajistit ochranu systémů na oběžné dráze kolem Země nebo pozemních systémů. [56]



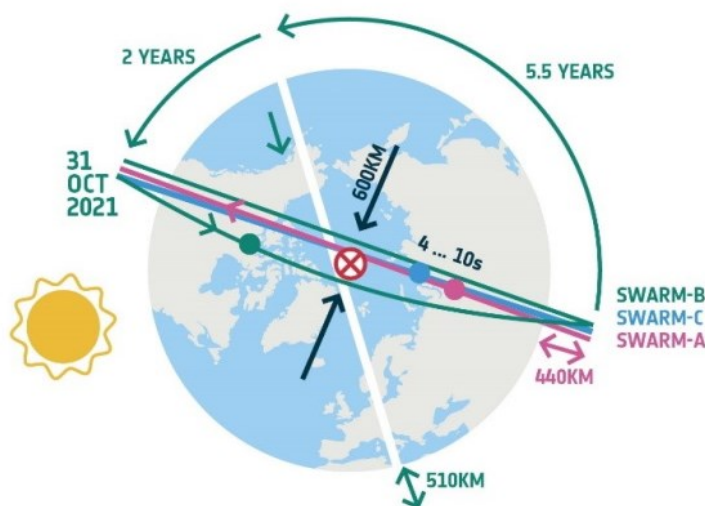
Obrázek 24: Pozice sondy SOHO. [57]

3.7 Měření magnetického pole Země a jeho změn

Měření magnetického pole je důležité pro monitoring a poskytování výstrah pro strategická průmyslová odvětví včetně provozovatelů družic a energetických společností. Díky novým technologiím se v současnosti používají počítačové simulace k určení pravděpodobných účinků slunečních erupcí na zemskou atmosféru a magnetosféru. [58] [59]

3.7.1 Družicový roj Swarm

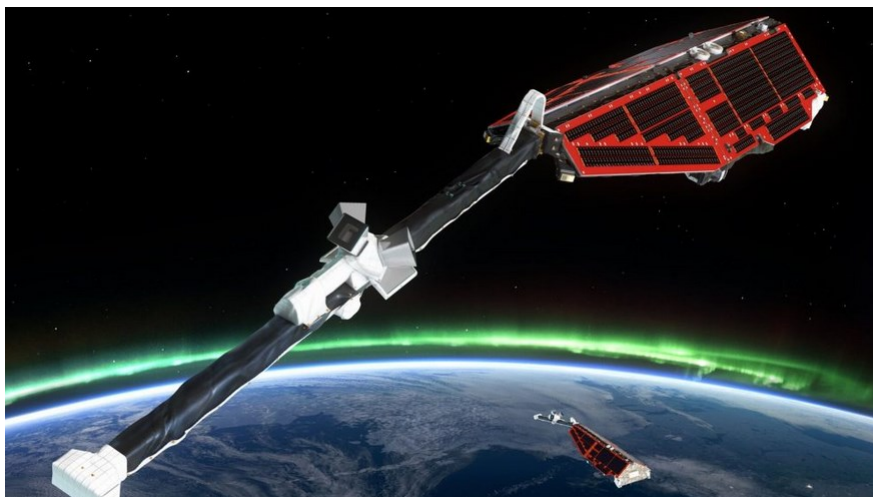
Jedná se o družicový systém, který je určen k podrobnému průzkumu geomagnetického pole Země a jeho časového vývoje. [60]



Obrázek 25: Orbit družicového roje Swarm. [61]

Hlavní cíle technologie Swarm

- Studium dynamiky zemského jádra, geodynamických procesů a interakce zemského jádra se zemským pláštěm.
- Mapování litosférické magnetizace a její geologická interpretace.
- Určení 3D elektrické vodivosti pláště.
- Zkoumání elektrických proudů tekoucích v magnetosféře a ionosféře.
- Identifikace oceánské cirkulace podle její magnetické signatury.
- Kvantifikace magnetického ovlivňování horních vrstev atmosféry. [60]



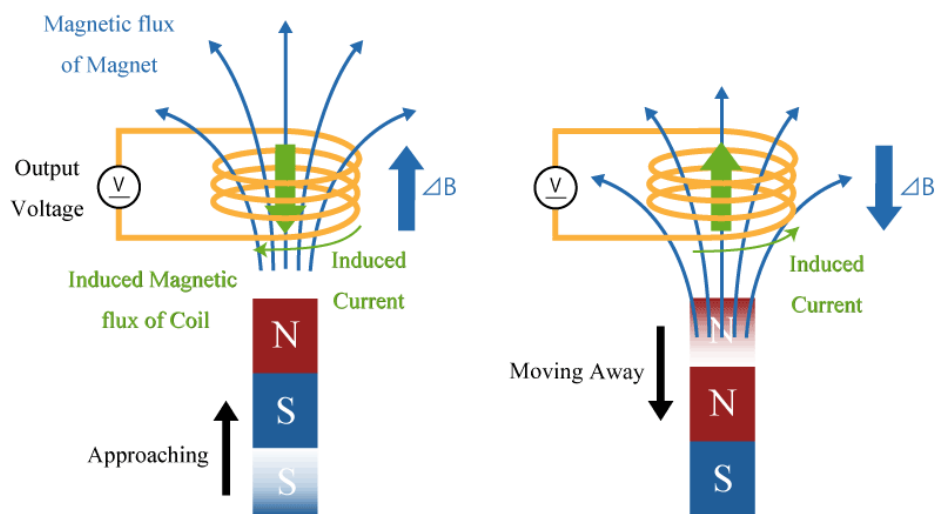
Obrázek 26: Družicový roj Swarm. [62]

3.8 Senzory k měření magnetického pole

K měření magnetického pole se využívají senzory, které detekují velikost magnetismu a geomagnetismu generovaného magnetem nebo proudem. Druhy magnetických senzorů:

Cívka

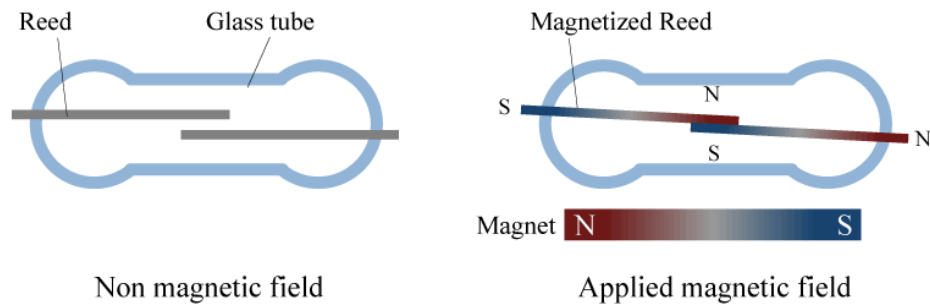
Cívky se řadí mezi nejjednodušší magnetické senzory, které mohou detekovat změny hustoty magnetického toku. Při přiblížení magnetu k cívce hustota magnetického toku v cívce se zvýší. V cívce se vytvoří indukovaný elektrický proud, který generuje magnetický tok ve směru, který brání zvýšení hustoty magnetického toku. Pokud se magnet oddálí od cívky hustota magnetického toku se v cívce sníží, a v cívce vznikne indukovaný elektrický proud, který zvýší hustotu magnetického toku. [63]



Obrázek 27: Princip cívky. [63]

Reed Switch

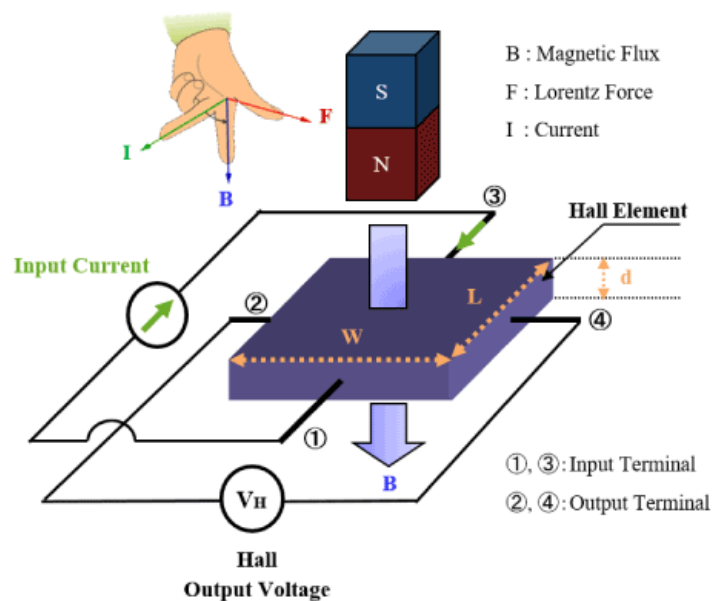
Jedná se o snímač, u kterého jsou kovové jazýčky upevněné na levé i pravé straně a jsou uzavřeny ve skleněné trubici. Při působení magnetického pole se tyto jazýčky zmagnetizují. Při zmagnetizování se jazýčky navzájem přitahují a dochází tím ke kontaktu a spínač sepne. [63]



Obrázek 28: Princip Reed Switch. [63]

Senzory s Hallovým jevem

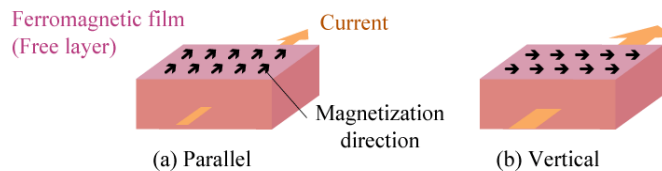
Senzor je založen na jevu, kdy elektromotorická síla je tvořena ve směru kolmém na proud i na magnetické pole. Pokud se na polovodič přivede elektrický proud, vznikne díky Hallovu jevu napětí odpovídající hustotě magnetického toku a jeho směru. [63]



Obrázek 29: Princip Hallova senzoru. [63]

AMR senzor (Anisotropic Magnetostrictive Element)

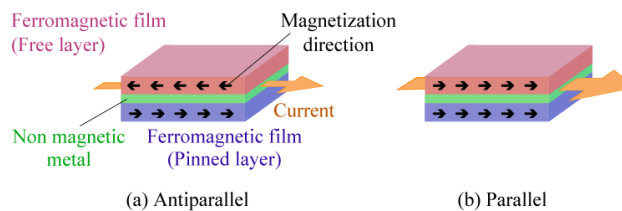
Senzor pracuje na principu změny elektrického odporu vlivem magnetického pole. Díky velké citlivosti se senzor dá použít při regulaci dopravy, měření magnetického pole Země. [63] [64]



Obrázek 30: Princip AMR senzoru. [63]

GMR senzor (Giant Magnetostrictive Element)

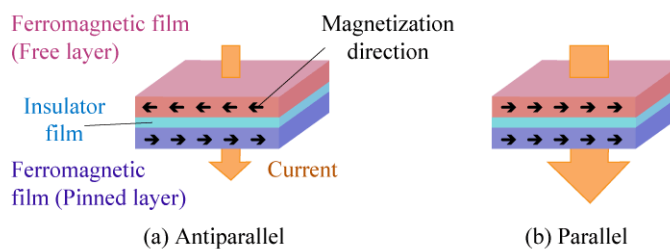
Senzor GMR pracuje na principu, závislosti změny odporu na velikosti magnetického pole. Senzor je z tenkých vrstev magnetických a nemagnetických materiálů. Pořadí a tloušťka těchto materiálů umožňuje, aby se v přítomnosti magnetického pole měnil odpor. [63] [65]



Obrázek 31: Princip GMR senzoru. [63]

TMR senzor (Tunnel Magnetostrictive Element)

Jedná se o senzorový prvek využívající magnetorezistivního tunelového jevu (TMR). V porovnání s běžným Hallovým nebo AMR senzorem je TMR senzor novou technologií, která je méně citlivá na změny teploty. Senzorové TMR má široké využití například v automobilovém průmyslu, kde se vyžaduje vysoká přesnost měření. [63] [66]



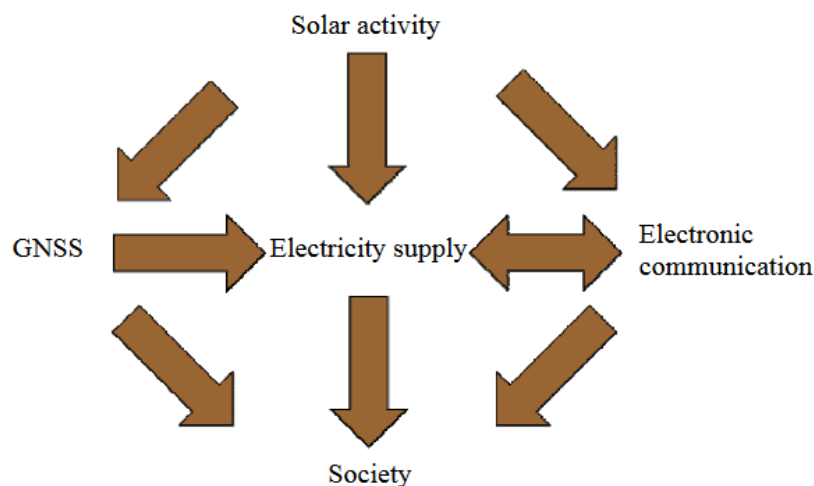
Obrázek 32: Princip TMR senzoru. [63]

3.9 Hrozby související s magnetickými bouřemi

V současnosti nejsou hrozby geomagnetických bouří zakomponované do tvorby analýz rizik. Pokud by opravdu došlo k silné sluneční erupci, není vytvořen koncept, jak se proti takové hrozbě účelně bránit. Přitom je mnoho odvětví, na kterých je současná civilizace životně závislá.

3.9.1 Vliv magnetických bouří na daná odvětví

Sluneční bouře mohou ovlivnit technologie, na které se denně spoléháme: globální určování polohy GPS, satelity a elektrické rozvodné sítě. [58]



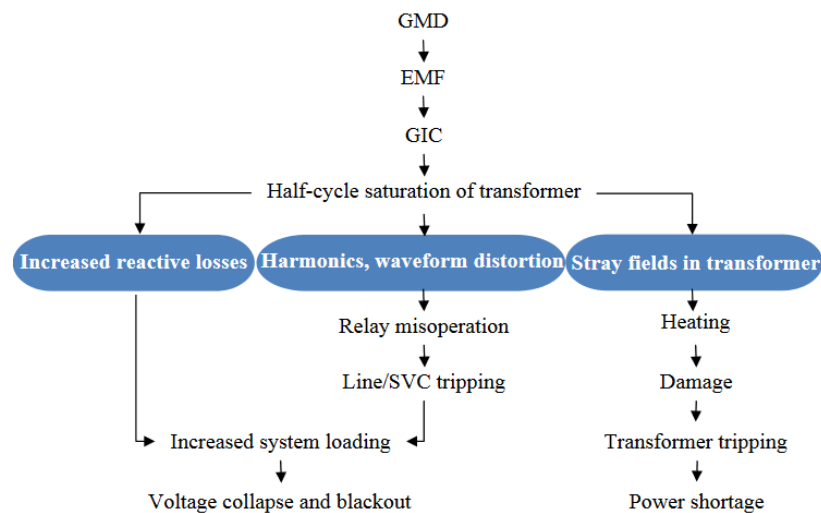
Obrázek 33: Vliv magnetických bouří na technologické systémy. [67]

Energetika

Proudy v ionosféře mohou svou činností indukovat proudy v elektrickém vedení. Přepětí z těchto indukovaných proudů mohou způsobit rozsáhlé poruchy elektrických přenosových sítí, ropných a plynových systémů. [58] [68]

Elektrické přenosové sítě

Geomagnetické indukované proudy v elektrické přenosové síti ovlivňuje běžný provoz a způsobuje poruchu nebo přerušení provozu. Geomagnetické indukované proudy představují velký problém pro transformátory. Tyto indukované proudy se zvyšují s délkou vedení a zároveň zvyšují i odpor. Dále rostou s délkou vedení pouze do té doby, než odpor vedení převáží nad odporem smyčky. Délka, při které dochází k tomuto jevu, se pohybuje kolem 150-200 km. [58] [68] [69]



Obrázek 34: Přehled dopadu geomagnetických indukovaných proudů na elektrické soustavy (1. zvýšené jalové ztráty, 2. harmonické zkreslení, 3. bludná pole v transformátoru). [67]

Modelování krizových scénářů mají velký význam při řízení a tvorbě analýz rizik. Důležitým faktorem jsou scénáře z událostí, které se již staly. To má velký význam pro plánování nových elektrických soustav. Dalším důležitým faktorem je včasné varování blížící se magnetické bouře. Toto varování musí být vždy v reálném čase, tak aby se v dostatečném časovém předstihu mohly realizovat krizová opatření. V první řadě to jsou satelitní technologie, které dovedou upozornit na potencionální hrozbu s časovým předstihem (například: SOHO, Swarm, Solar Shield Project). Na pozemské úrovni je to například měření geomagnetických indukovaných proudů v zemních přípojkách vybraných výkonových transformátorů na přenosové úrovni. Dalším zdrojem informací jsou magnetometry, které slouží k měření magnetického pole a přímo indikující GMD. [58] [67] [68] [69]

Solar Shield Project

Projekt slunečního štítu pomáhá chránit elektrárenské společnosti před extrémním vesmírným počasím. Solar Shield pomáhá zmapovat, kde a jak silně mohou geomagneticky indukované proudy zasáhnout Zemi. Tím mohou poskytnout energetickým společnostem včasné varování k ochraně svých systémů. [67] [70]

- Úroveň 1: data ze sondy SOHO, předstih 1–2 dny.
- Úroveň 2: data ze sondy ACE, předstih 30-60 minut. [67]

Ropovody a plynovody

U ropovodů a plynovodů dochází k problémům spojenými s korozi způsobenou geomagnetickými indukovanými proudy a doprovodným napětím mezi potrubím a zemínou. Telurické proudy mění potenciál mezi potrubím a půdou. Potrubí je opatřeno izolačním povlakem, ale nejde zbránit poškození izolace. Proto jsou potrubí vybavena systémem katodické ochrany, která udržuje potrubí na záporném potenciálu. Přepravu ropy zajišťuje v České republice ropovod DRUŽBA a ropovod IKL. Vzhledem k tomu, že tyto plynovody byly vybudovány v různých obdobích, liší se v mnoha parametrech. Například potrubí DRUŽBA je pokryto dehtem, zatímco potrubí IKL je pokryto polyethylenem. [68]

Navigační systémy

Navigace, komunikační systémy a mnoho dalších technologií využívá globální polohové systémy (GPS, Galileo, GLONASS, Beidou) k určování polohy na základě rádiových signálů ze satelitů. Poruchy v ionosféře mohou způsobit zhoršení GPS signálu nebo jeho úplnou ztrátu. Celosvětová komunikace závisí na orbitálních systémech využívajících vysokofrekvenční (HF), velmi vysokofrekvenční (VHF) a ultra vysokofrekvenční (UHF) rádiové signály. Tyto sluneční aktivity mohou negativně ovlivnit určování poloh letadel, lodí a určování polohy pozemních dopravních prostředků. Jedná se například o nepřesné polohy i v řádech několika metrů. [58] [71]

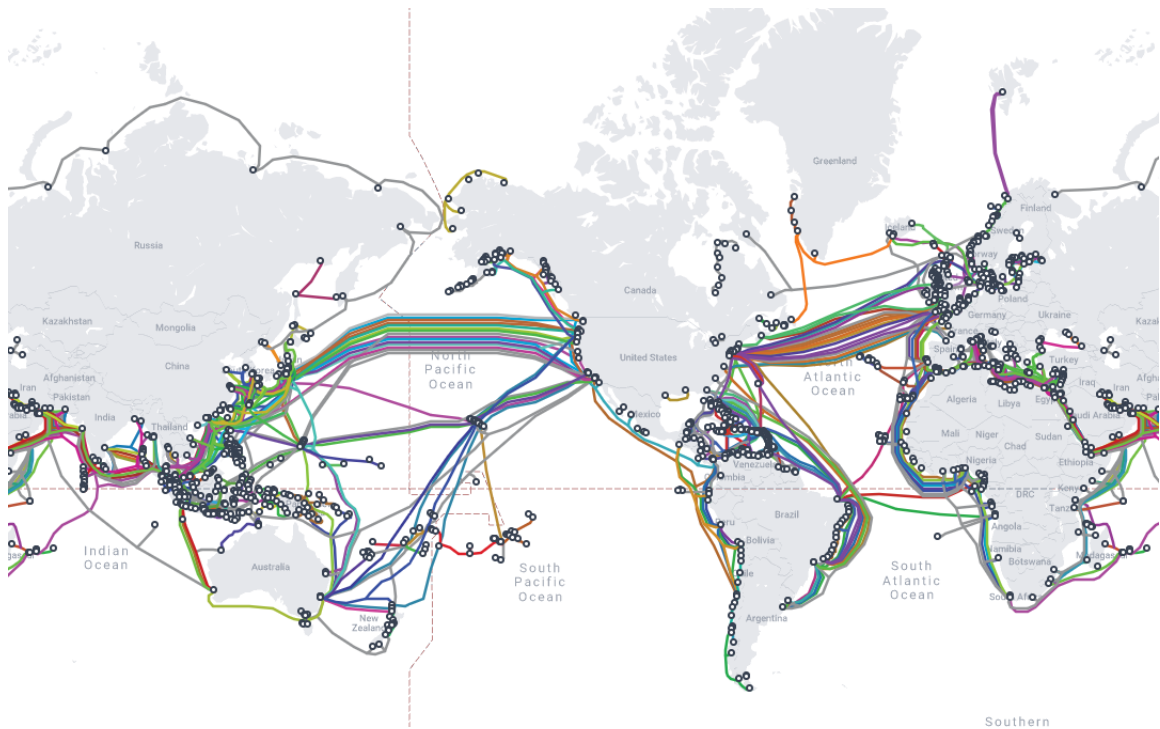
Informační technologie

Velké magnetické bouře mohou negativně ovlivnit informační technologie a internetovou infrastrukturu. Pokud by opravdu došlo ke globálnímu kolapsu internetu, mohlo by to vést k obrovským ztrátám v kyberneticko-fyzických systémech. Tento výpadek by ovlivnil ekonomickou stabilitu (například akcie na burzách), byly by ohroženy životy jak v dopravě, tak zdravotnických zařízeních. Samozřejmě by vše záviselo na rozsahu a délce trvání výpadku. V informačních technologiích je do značné míry toto riziko podceňováno. Hlavně se jedná o návrhy a tvorbu topologií sítí, návrhy geoslužeb (například kořenové DNS, datová centra, certifikační autority, NTP a Cloudových technologií). [72]

Síťová infrastruktura

Kontinenty jsou v dnešní době propojeny optickými kabely, které jsou proti geomagnetickému indukovanému proudu imunní. Bohužel tato infrastruktura má opakovače k zesílení optického signálu a další podpůrná zařízení. Tyto opakovače jsou rozmístěny v intervalech 50-150 km a jsou napájeny pomocí elektrického vodiče. Po vyřazení opakovače z provozu, by byl optický kabel nefunkční. [72]

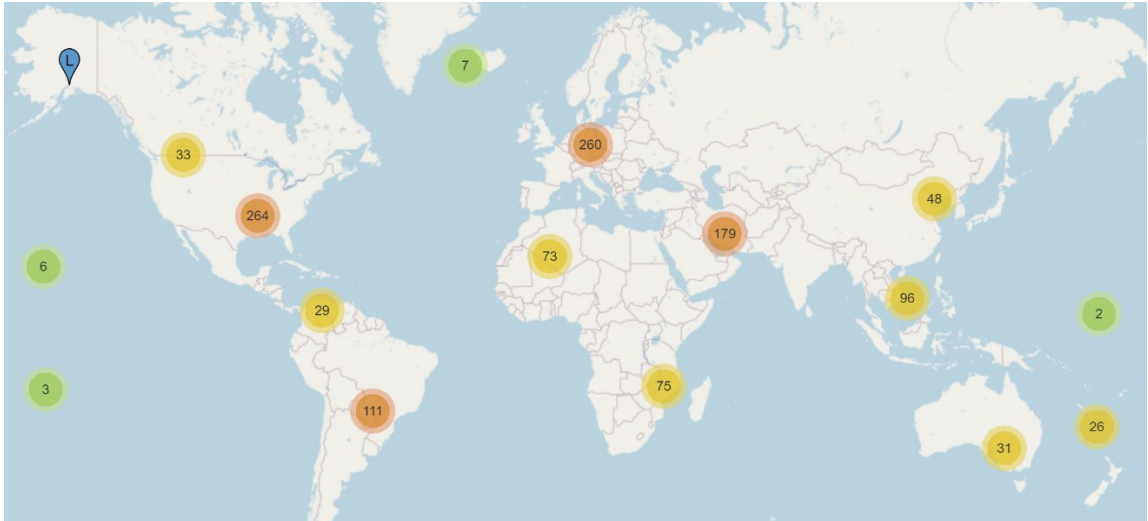
Geografické rozložení internetových sítí je více situované do vyšších zeměpisných šířek, které jsou zranitelnější. Další problém je propojení mezi kontinenty. Podmořské kabely jsou zranitelnější než pozemská kabeláž. Je to dáno větší délkou podmořských kabelů. Například Asie má vysokou odolnost díky Singapuru. [72]



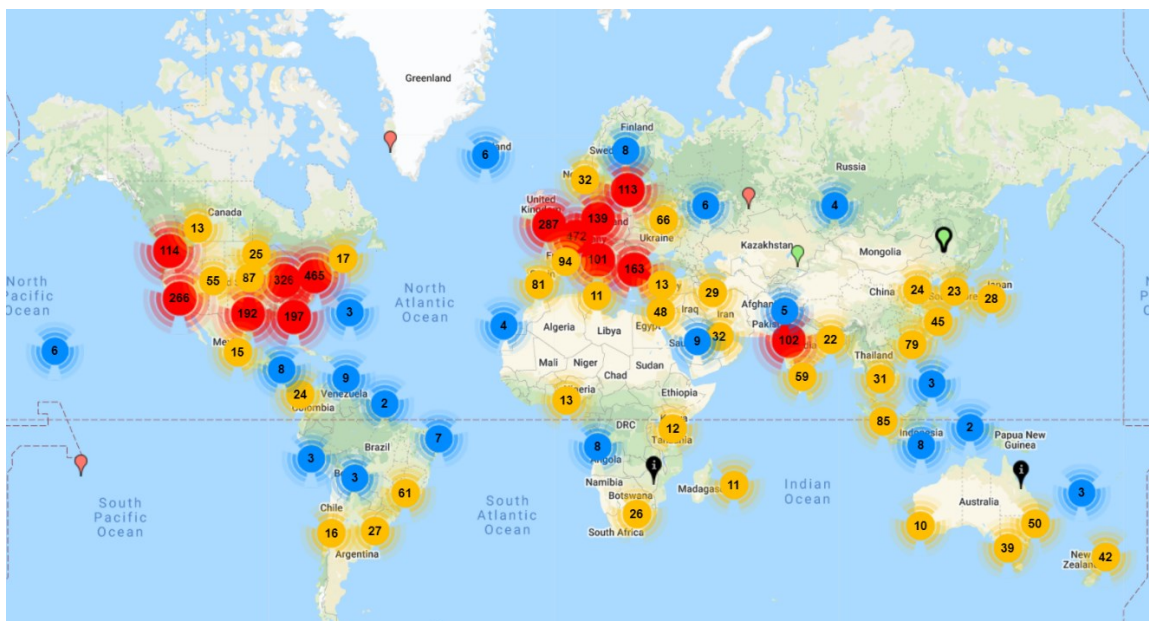
Obrázek 35: Mapa podmořských kabelů 2022. [73]

Infrastruktura služeb

Kořenové DNS servery mají menší zranitelnost z důvodu geografického rozptýlu. Datacentra jsou odolná dle úrovně zabezpečení jejich poskytovatelů. Pro lokální informační systémy jsou rizika menší. Jedná se například o autonomní systémy. Mezi takové systémy mohou patřit zabezpečovací systémy, které mají vlastní DC servery, dohledové a záložní systémy. Důležitou roli zde hraje také vlastní NTP server (stratum 0 nebo 1). Je to z důvodu poskytování přesného času. To je důležité hlavně pro bezpečnost certifikačních autorit, event logs, syslogs a podporu například protokolu KERBEROS. [72]



Obrázek 36: Systém kořenových serverů se skládá z 1510 instancí provozovaných 12 nezávislými provozovateli kořenových serverů (2022). [74]



Obrázek 37: Veřejná datová centra (2022). [75]

Budoucí možnosti informačních infrastruktur

V nejnovějších studiích se při návrhu topologií začíná počítat s větším využitím afrického kontinentu. Další možností je také více začlenit jižní Ameriku do infrastruktury při možném výpadku konektivity USA a Evropy. Je důležité počítat s technickým řešením elektrické izolace kabelů, které se mohou připojovat do vyšších zeměpisných šířek. Je to z důvodu předcházení kaskádovitému propojení s ostatní kabeláží a tím předejít výpadkům ve větších měřítkách. Je také potřeba prosadit standardizované testy pro měření odolnosti aplikací mezi

koncovými body. Dále je také žádoucí, aby se prohloubila spolupráce astrofyziků, elektroinženýrů a výzkumníků v oblastech sítí, HW a SW, ke zlepšení odolnosti informačních systémů. [72]

3.9.2 Vliv magnetických bouří na bezpečnostní systémy

V rámci bezpečnostních technologií je důležité se zabývat možností vlivu magnetických bouří již v analýzách rizik. Příkladem mohou být nejnovější technologie rušiček GPS signálů, kdy je nutné přesně určit, jestli se jedná o přírodní jev rušení nebo o kybernetický útok. V současnosti dochází k detekování rušení GPS signálů na mezinárodních letištích po celém světě. Tyto incidenty zaznamenává NASA a prověřuje jejich možný původ. Nebo rušení GPS signálů na dálnicích, aby se zabránilo přesné identifikaci projíždějícího vozidla. [76] [77] [78]

Přesný čas v systémech

Bezpečnostní infrastruktura vyžaduje také přesný čas. Je to z důvodu synchronizace všech zařízení, aby bylo možné přesně určit vznik incidentu při narušení objektu. Nebo zjistit, kdy došlo k výpadku některého ze subsystémů. Nesynchronizovaný čas na zařízeních může mít za následek nepřihlášení se do systému nebo nebude možné ověřit uživatele. Mohou být také problémy s certifikačními autoritami, které podepisují certifikáty nebo poskytují digitální podpis. Citlivé na přesný čas jsou systémy SCADA, které jsou umístěny v komunikační a dopravní infrastruktuře. Proto je nutné v rámci bezpečnostních konfigurací, aby byly určeny záložní NTP servery. [77] [78] [79]

Zabezpečení řídicích a provozních systémů

V rámci bezpečnosti by měly mít systémy také účinnou přepěťovou ochranu a záložní napájení. Zde se jedná o UPS a dieselové agregáty. Tyto zařízení musí být schopny zajistit provoz po určitou dobu. Pokud například dojde k vyřazení klimatizací v servrovnách, může dojít k přehřívání technologií. Dále by zařízení měla být instalována do kovových racků, které přímo chrání před elektromagnetickou interakcí. Je také důležitá pravidelná kontrola záložních zařízení. V nejhorším případě se mohou technologie na určitou dobu vypnout, tak aby se předešlo jejich poškození. [77] [78] [79]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 VLASTNÍ MĚŘENÍ

V praktické části budu na vlastním zařízení měřit a monitorovat magnetické pole Země. Celé zařízení pro měření magnetického pole navrhu, sestavím a naprogramuji. Měřené hodnoty budu porovnávat s technickými prostředky laboratoře Budkov, Conradovi observatoře a magnetometry, které jsou rozmístěny po celém světě nebo na oběžné dráze Země. Dále se budou hodnoty porovnávat s NTP serverem Stratum 1 (GPS a Galileo signál). Pomocí naměřených dat provedu odhad korelace změn magnetického pole Země s úrovní signálů geopozičních systémů ve vztahu k aktivitě Slunce. Vzhledem k vytvoření vlastního měřicího zařízení nebude nutné využití prostředků laboratoří FAI UTB.

4.1 Komponenty pro měření

Pro měření magnetického pole použiji technologii:

- Základní deska Arduino UNO R3 (ATmega328P).
- Senzor Keyes KY-024 Hallův senzor.
- 3-osý magnetometr a kompas HMC5883L.
- Senzor na měření teploty a tlaku BMP180.
- Modul LED semafor

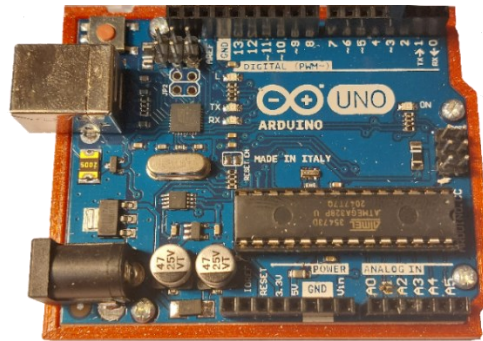
dále

- PremiumCord USB 2.0, A-B–3 m (stíněný).
- Notebook – instalován program Arduino verze 1.8.18.
- Dupont propojovací kabel 40žil M-M samec-samec (10 cm).
- Schránka pro umístění celého zařízení.

4.1.1 Základní deska Arduino UNO R3 (ATmega328P)

Jedná se o základní desku Arduino UNO R3. Její součástí je převodník ATmega16U2 a mikroprocesor ATmega328P. Dále má 14 digitálních vstupních/výstupních pinů (z nichž 6 lze použít jako výstupy PWM), 6 analogových vstupů, 16MHz keramický rezonátor (CSTCE16M0V53-R0), připojení USB, napájecí konektor a tlačítko reset. Pro spuštění jej stačí připojit k počítači pomocí kabelu USB nebo napájet pomocí adaptéru AC-DC či baterie.

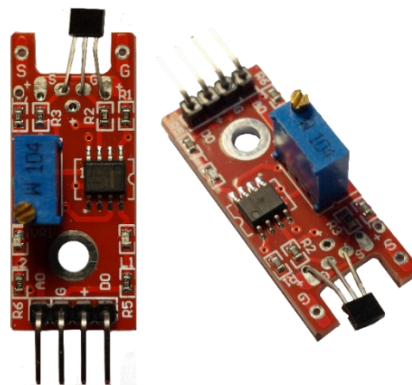
[80]



Obrázek 38: Základní deska Arduino UNO R3.

4.1.2 Senzor Keyes KY-024 Hallův senzor

Jedná se o lineární magnetický Hallův snímač, který reaguje v přítomnosti magnetického pole. Jeho součástí je potenciometr pro nastavení citlivosti senzoru a jeho výstupy jsou jak analogové, tak digitální. V blízkosti magnetického pole funguje digitální výstup jako spínač, který se zapne nebo vypne. Analogový výstup dokáže měřit polaritu a relativní sílu magnetického pole. [81]



Obrázek 39: KY-024 Hallův senzor.

Tabulka 2: Specifikace Keyes KY-024 Hallova senzoru. [81]

Provozní napětí	2,7 V až 6,5 V
Citlivost	1,0 mV/G min., 1,4 mV/G typ., 1,75 mV/G max.
Rozměry desky	1,5 x 3,6 cm [0,6 x 1,4 palce]
Teplotní rozsah	-40 až +85 °C

4.1.3 3-osý magnetometr a kompas HMC5883L

HMC5883L je tříosý senzor založený na principu AMR, který pro komunikaci využívá rozhraní I2C. Přesnost směru kompasu 1° až 2° zajišťuje interní 12bitový ADC (analogově-

digitální převodník). Obsahuje vestavěný regulátor napětí, který umožňuje napájet modul napětím od 3,3 V do 6 V. [82]



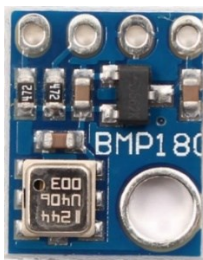
Obrázek 40: 3-osý magnetometr a kompas HMC5883L.

Tabulka 3: Specifikace HMC5883L. [82]

Napájení	3–5 V DC
Měřicí rozsah	$\pm 1.3\text{--}8$ gauss
Rozměry	18x17x2 mm

4.1.4 Senzor na měření teploty a tlaku BMP180

Tento senzor je určen pro měření barometrického tlaku a teploty. Senzor měří tlak v rozsahu od 300 hPa – 1100 hPa. Rozsah měření teplot je – 40°C až 85°C. Přenos dat probíhá po I2C sběrnici. Měření teploty je důležité z pohledu kompenzace teplotní závislosti magnetometrů. [83]



Obrázek 41: Senzor na měření teploty a tlaku BMP180. [84]

Tabulka 4: Specifikace senzor na měření teploty a tlaku BMP180. [83]

Rozlišení	až 0.01 hPa a 0.1 °C
Napájení	1.6 V-3.6 V DC
Spotřeba	0.5 μ A
Klidová spotřeba	0.1 μ A

Rozměry desky	12 mm x 10 mm
---------------	---------------

4.1.5 PremiumCord USB 2.0, A-B–3 m (stíněný)

Kabel slouží k propojení základní desky a notebooku. Na jedné straně je kabel zakončen USB A, které je vhodné pro zapojení do počítače. Druhá strana je zakončena USB B, které umožňuje mimo jiné zapojení například tiskárny nebo skeneru. Stínění kabelu slouží k ochraně před působením vnějších elektrických polí a zároveň brání výstupu elektrického rušení z kabelu. Přenosová rychlost je do 480 Mb/s. [85]



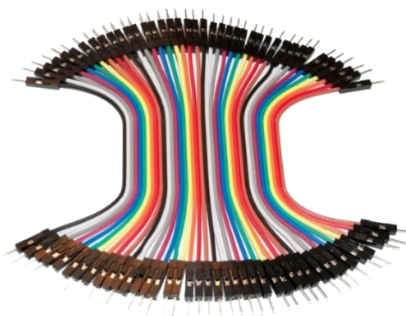
Obrázek 42: Kabel PremiumCord USB 2.0, A-B 3 m (stíněný).

4.1.6 Notebook – instalován program Arduino verze 1.8.18.

Jedná se o standardní notebook OS Windows 10 Profesional. Operační paměť 32 GB. Propojení se základní deskou je pomocí stíněného kabelu USB 2.0 A-B. Pro účely programování základní desky a senzorů je nainstalován program Arduino verze 1.8.18.

4.1.7 Dupont propojovací kabel 40žil M-M samec-samec (10 cm)

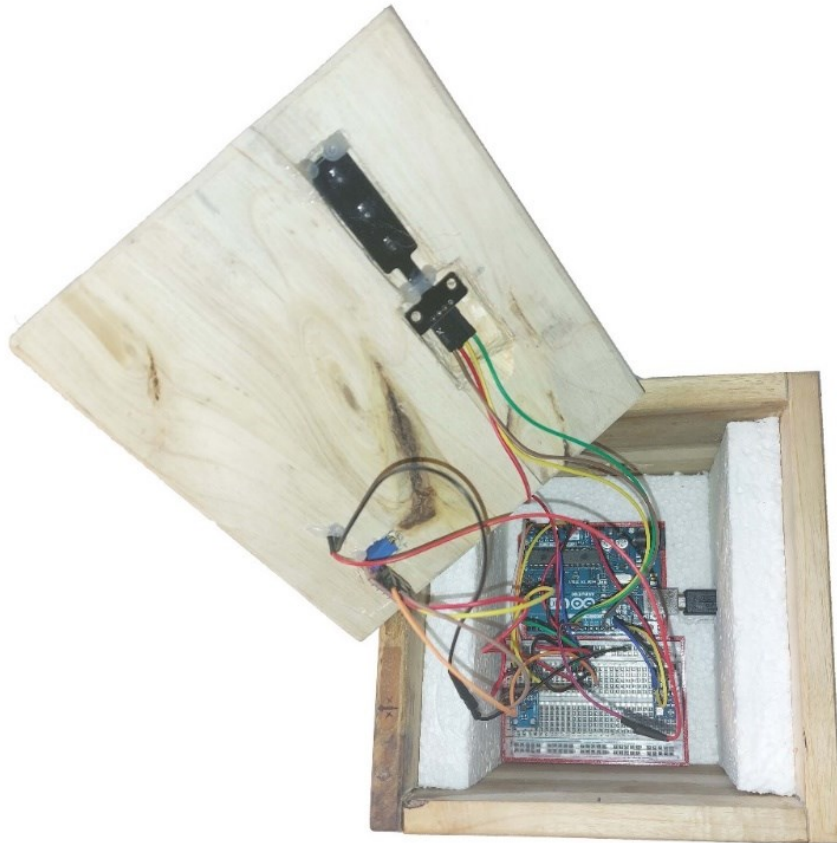
Jedná se o izolované vodiče, které jsou na obou koncích opatřené 1pin Dupont konektorem. Průřez vodiče $0,1288 \text{ mm}^2$ – 26 AWG a délka 10 cm. Vodiče slouží k propojení základní desky se senzory. [86]



Obrázek 43: Dupont propojovací kabel 40žil M-M. [86]

4.1.8 Schránka pro umístění měřícího zařízení

Na schránku jsem použil box z tropického dřeva meranti ze stromu rodu Shorea. Dřevo je tvrdé, trvanlivé a dobře odolává povětrnostním vlivům.

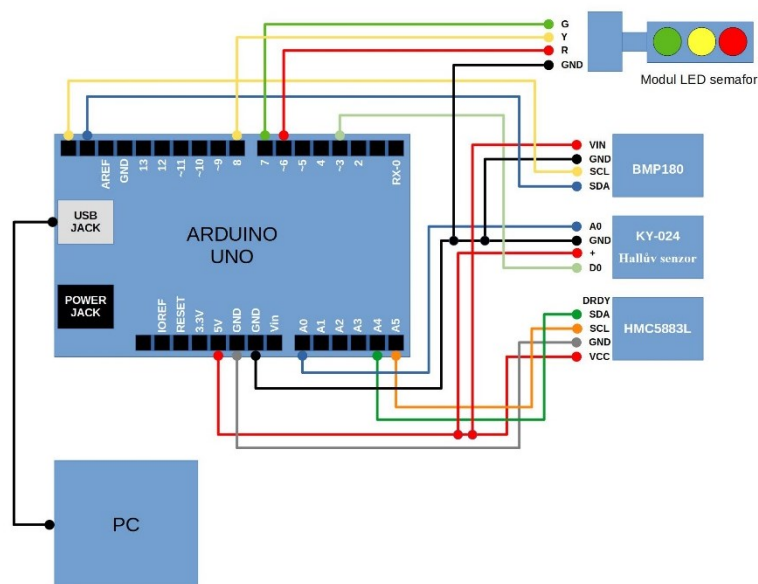


Obrázek 44: Schránka pro umístění měřícího zařízení.

Po uložení zařízení do boxu, budu provádět měření v exteriéru tak, aby se zabránilo nežádoucímu rušení. Pro lepší tepelné vlastnosti jsem do schránky na stěny vložil polystyren.

4.2 Příprava měření

Při měření se budu snažit dosáhnout co nejpřesnějších výstupních hodnot. K tomu mi pomůže několik senzorů a umístění celého zařízení do předem vytvořeného boxu. V první řadě se bude dbát na stálou teplotu, která se bude monitorovat senzorem BMP180 určeným na měření teploty a tlaku. Dále bude určen magnetický sever a zadána deklinace místa měření pomocí senzoru HMC5883L a měření magnetického pole na ose x . Další částí bude Hallův senzor KY 024, který bude monitorovat rušení měřeného magnetického pole.

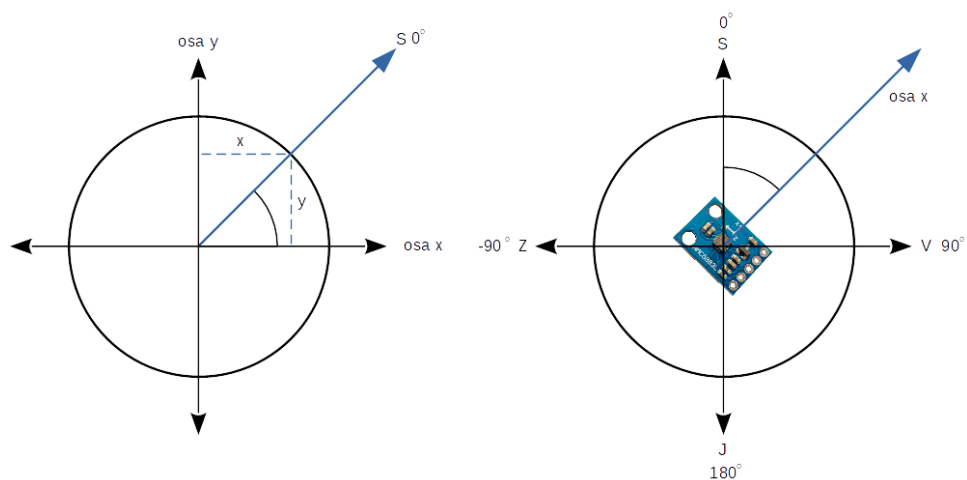


Obrázek 45: Blokové schéma zapojení jednotlivých senzorů k základní desce Arduino UNO R3.

4.3 Základní konfigurace

Pro základní konfiguraci použijte integrované vývojové prostředí Arduino. Pro prostředí Arduino (Arduino Software (IDE)) obsahuje textový editor pro psaní kódu, oblast zpráv, textovou konzoli, panel nástrojů s tlačítky pro běžné funkce a řadu nabídek. Díky tomuto prostředí je možné připojení k základní desce Arduino UNO R3, nahrávání programů a komunikace se senzory.

K naprogramování magnetometru HMC5883L použijte knihovnu Adafruit_HMC5883_U.h, která se nainstaluje přímo v prostředí Arduino.



Obrázek 46: Složka x , y je výstupem osy x , y magnetometru v mikroteslách. Mezi 0° severu a směrem, kterým ukazuje osa x , je vytvořen úhel. [87]

Pro výpočet magnetického pole použiji funkci `aran2`, která převezme výstupní hodnoty senzoru v osách x , y a vrátí výpočet v radiánech. Funkcí `headingDegrees` převedu hodnoty úhlu z radiánů na stupně. Pro získání přesnějšího směru k magnetickému zemskému severu přidám deklinační úhel pro umístění senzoru (lokalita Kojetín $+5^{\circ} 16'$), který jsem si vy počítal funkcí $\text{declinationAngle} = (5.0 + (16.0 / 60.0)) / (180 / M_PI)$. Nakonec provedu korekci výpočtu úhlu natočení.

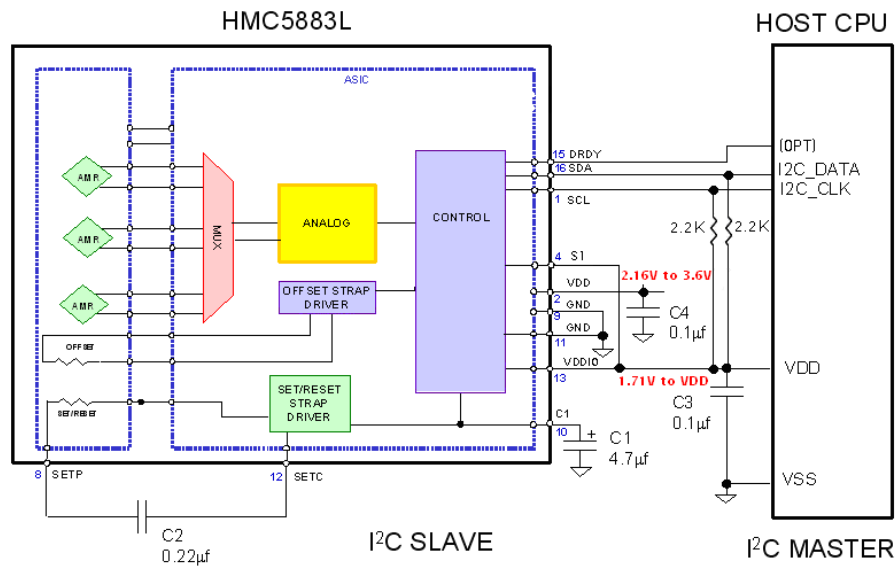
Tabulka 5: Velikost magnetického pole Země podél os x , y a z v mikro teslách a teplotní hodnota v $^{\circ}\text{C}$.

Uhel_natoceni:	359,32	stupnu	X:	13,09	uT	Y:	-1,36	uT	Z:	-68,27	uT	Teplota:	20,6	*C
Uhel_natoceni:	359,36	stupnu	X:	13,18	uT	Y:	-1,36	uT	Z:	-68,27	uT	Teplota:	20,6	*C
Uhel_natoceni:	0,07	stupnu	X:	13	uT	Y:	-1,18	uT	Z:	-68,47	uT	Teplota:	20,6	*C
Uhel_natoceni:	358,39	stupnu	X:	12,82	uT	Y:	-1,55	uT	Z:	-68,57	uT	Teplota:	20,6	*C
Uhel_natoceni:	0,11	stupnu	X:	13,09	uT	Y:	-1,18	uT	Z:	-68,47	uT	Teplota:	20,6	*C
Uhel_natoceni:	0,44	stupnu	X:	12,91	uT	Y:	-1,09	uT	Z:	-68,16	uT	Teplota:	20,7	*C
Uhel_natoceni:	359,64	stupnu	X:	12,91	uT	Y:	-1,27	uT	Z:	-68,06	uT	Teplota:	20,6	*C
Uhel_natoceni:	359,71	stupnu	X:	13,09	uT	Y:	-1,27	uT	Z:	-68,37	uT	Teplota:	20,7	*C
Uhel_natoceni:	0,57	stupnu	X:	13,27	uT	Y:	-1,09	uT	Z:	-68,67	uT	Teplota:	20,6	*C
Uhel_natoceni:	0,11	stupnu	X:	13,09	uT	Y:	-1,18	uT	Z:	-68,57	uT	Teplota:	20,6	*C
Uhel_natoceni:	359,75	stupnu	X:	13,18	uT	Y:	-1,27	uT	Z:	-68,16	uT	Teplota:	20,6	*C
Uhel_natoceni:	0,14	stupnu	X:	13,18	uT	Y:	-1,18	uT	Z:	-68,57	uT	Teplota:	20,6	*C
Uhel_natoceni:	358,97	stupnu	X:	13,18	uT	Y:	-1,45	uT	Z:	-68,47	uT	Teplota:	20,6	*C
Uhel_natoceni:	359,28	stupnu	X:	13	uT	Y:	-1,36	uT	Z:	-68,27	uT	Teplota:	20,7	*C
Uhel_natoceni:	359,71	stupnu	X:	13,09	uT	Y:	-1,27	uT	Z:	-68,37	uT	Teplota:	20,6	*C

4.4 Možné nejistoty při měření

Zařízení je konstruováno na měření geomagnetického pole Země. K tomu, aby bylo možné přesně stanovit hodnoty magnetického pole, je nutné toto zařízení umístit do oblasti bez přítomnosti jiných zdrojů rušení. Zařízení jsem umístil na vlastním pozemku do stanové konstrukce, dále od zastavěné plochy.

Mezi další důležité prvky měření magnetického pole pomocí AMR senzoru, patří teplotní stálost. Jednotlivé čipy senzoru jsou citlivé na teplotní změny. Zajistit tuto stálost lze jedinečně v laboratorních podmínkách s možností regulovat teplotu, nebo použít antizotropní magneto-odporový senzor HMC5883L, který tuto nestálost řeší přímo v architektuře senzoru. Senzor má vestavěné funkce pohonu proudů. Tyto funkce řeší demagnetizaci, autotest a kompenzaci posunu. [88]



Obrázek 47: Vnitřní schéma zapojení senzoru H5883L. [88]

4.4.1 Demagnetizace a autotest

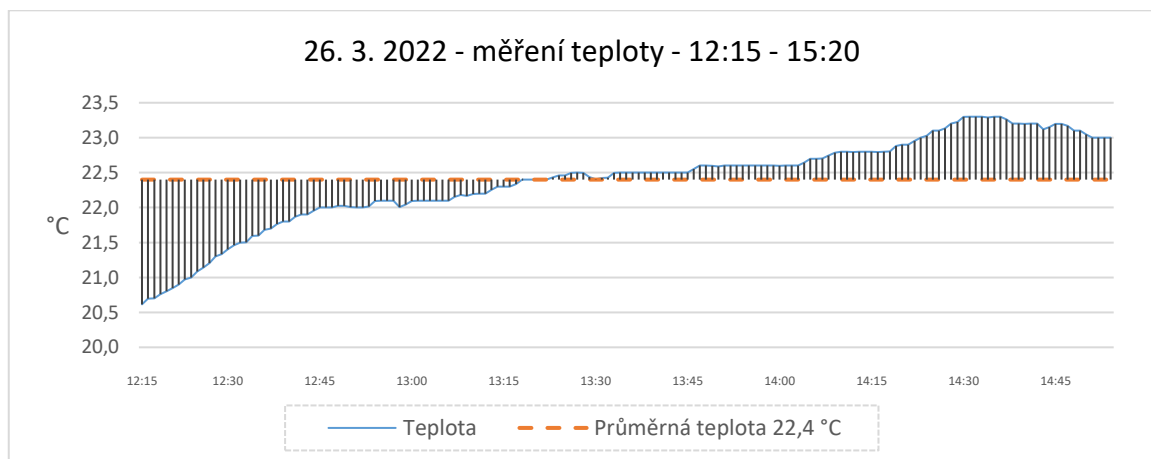
Pro kontrolu správnosti měření je v senzoru HMC5883L zabudovaná funkce autotestu. Tato funkce vybudí pásky offsetu snímače k vytvoření jmenovité intenzity pole, které má být měřeno. Toto pole je měřeno a hlášeno. Dále interní zdroj proudu generuje stejnosměrný proud (10 mA) z napájení VDD. Tento stejnosměrný proud je aplikován na offsetové pásky senzoru, které vytváří umělé zkreslení magnetického pole na senzoru. Rozdíl tohoto měření a měření okolního pole je vložen do výstupního registru dat každou ze tří os. Jedná se o automatickou funkci při každém čtení. [88]

Režim autotestu je ve dvou cyklech na každém magnetickém vektoru. První cyklus je nastavení pulsu, po kterém budou následovat naměřená data vnějšího pole. V druhém cyklu bude offsetový pásek vybudzen 10 mA v režimu kladného přepětí osy x , y , z , tak aby se vytvořilo 1,1 gaussové autotestovací pole a vnější pole. Z prvního cyklu budou hodnoty odečteny od druhého cyklu a čisté hodnoty měření budou umístěny do datových výstupních registrů. [88]

4.4.2 Kompenzace posunu

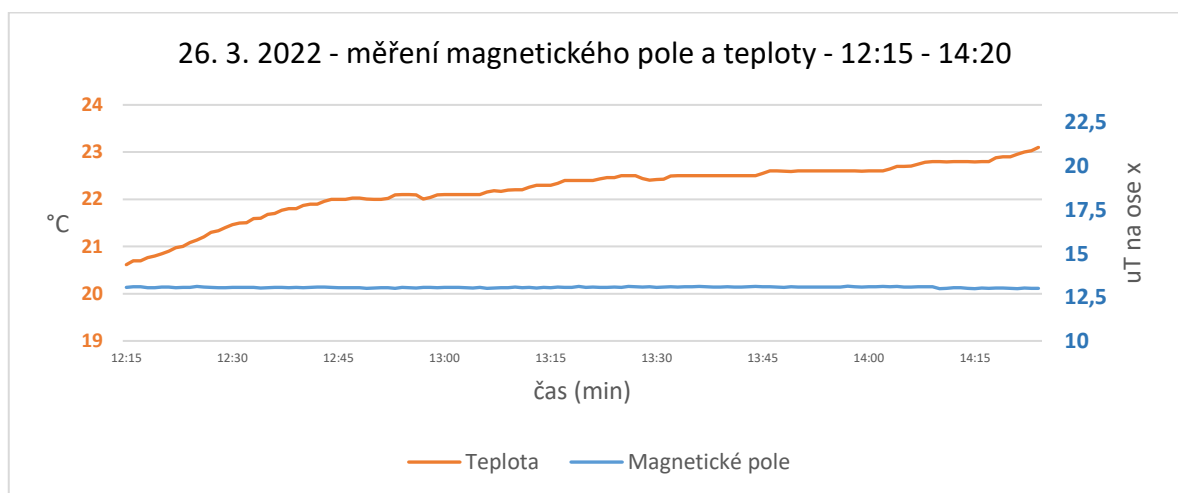
Své měření jsem prováděl v přírodních podmínkách a nebylo tedy možné ovlivnit změnu teploty. Pomocí teplotního senzoru BMP180 jsem monitoroval a zaznamenával změnu teploty. Při samotném měření 26. 3. 2022 v rozmezí od 12:15 do 15:20 hodin, byla naměřena průměrná teplota 22,4 °C. Od začátku měření do konce měření se teplota navýšila o 2,7 °C.

Velkou výhodou je použití senzoru HMC5883L, který má režim autotestu. Tento režim umožňuje měřit a kompenzovat teplotní závislost. ASIC obvod obsahuje spínací tranzistory FET, které jsou schopny přivést velký, ale krátký impuls do *set/reset* senzoru. Řízení funkce *set/reset* je prováděno automaticky obvodem ASIC pro každé měření. Polovina rozdílu od měření provedených po impulsu *set* a po impulsu *reset* se vloží do datového výstupního registru pro každou ze tří měřených hodnot os. Tím se odstraní vnitřní offset snímače a jeho závislost na teplotě pro všechna měření. [88]



Obrázek 48: Měření teploty senzorem BMP180.

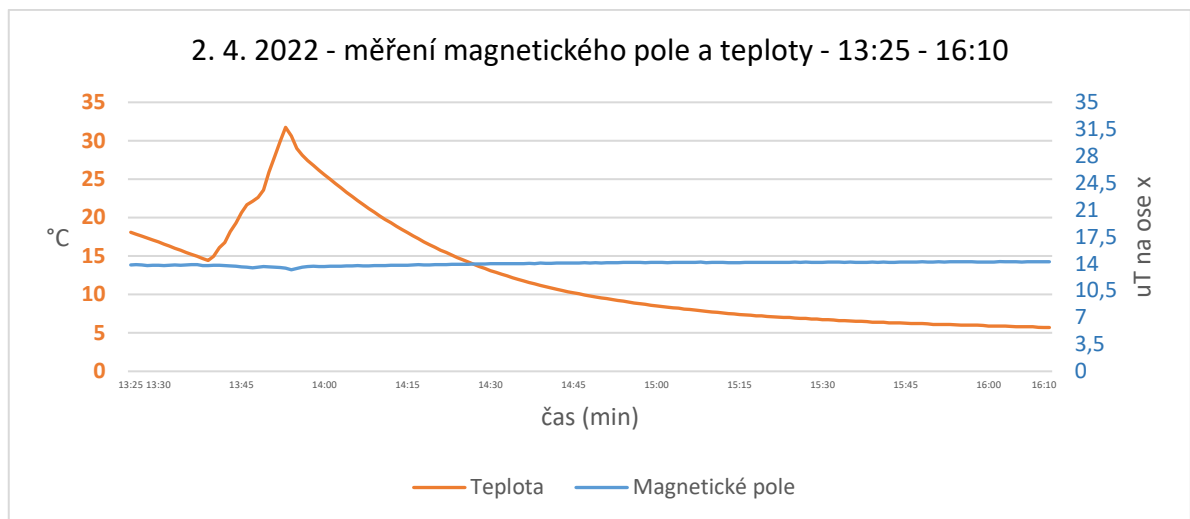
Správnost funkce kompenzace posunu jsem prověřil při vyhodnocování a porovnávání měřených hodnot ze senzorů HMC5883L a BMP180.



Obrázek 49: Měření magnetické kompatibility senzorem HMC5883L a teploty senzorem BMP180.

Z důvodu malého teplotního rozdílu pro ověření správné funkčnosti teplotní závislosti s kompenzací teplotního posunu jsem zopakoval 2. 4. 2022 měření. Při tomto měření jsem

zařízení 15 minut nechal snímat údaje bez teplotního ovlivňování. Venkovní teplota byla 2 °C, zařízení při zapnutí naměřilo 18 °C. Dále po 15 minutách klesla teplota na 14,4 °C. Při této teplotě jsem začal zahřívat zařízení po dobu 15 minut, kdy teplota vzrostla na 31,7 °C. Poté jsem přestal zařízení zahřívat a nechal jsem ho pomalu chladnout po dobu 2,5 hodiny. Po této době klesla teplota na 5,7 °C.



Obrázek 50: Měření magnetické kompatibility senzorem HMC5883L a teploty senzorem BMP180, při větším teplotním rozdílu.

Po porovnání naměřených hodnot magnetického pole na ose x a teploty se potvrzuje funkčnost autotestu a kompenzace posunu senzoru HMC5883L, který odstraňuje pomocí vnitřního offsetu snímače jeho závislost na teplotě pro všechna měření.

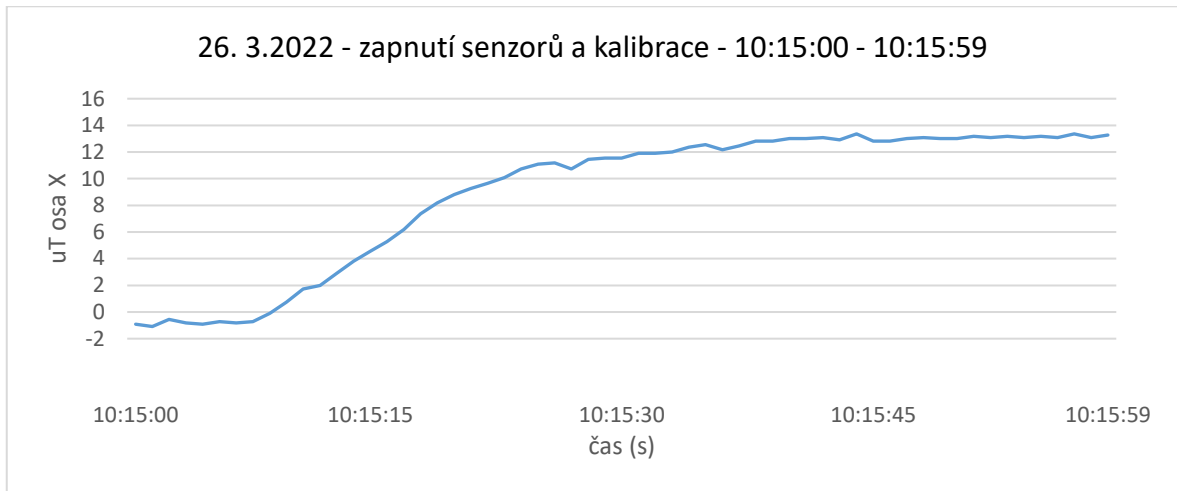
4.5 Fáze měření

Fáze měření jsem rozdělil na několik na sobě nezávislých měření. V první fázi testuji technickou funkčnost zařízení. Ve druhé fázi je zařízení zapnuto při minimální sluneční magnetické aktivitě. Ve třetí fázi bude probíhat měření při co největší sluneční magnetické aktivitě.

4.5.1 První fáze měření 26. 3. 2022, 10:15 – 10:27 hodin

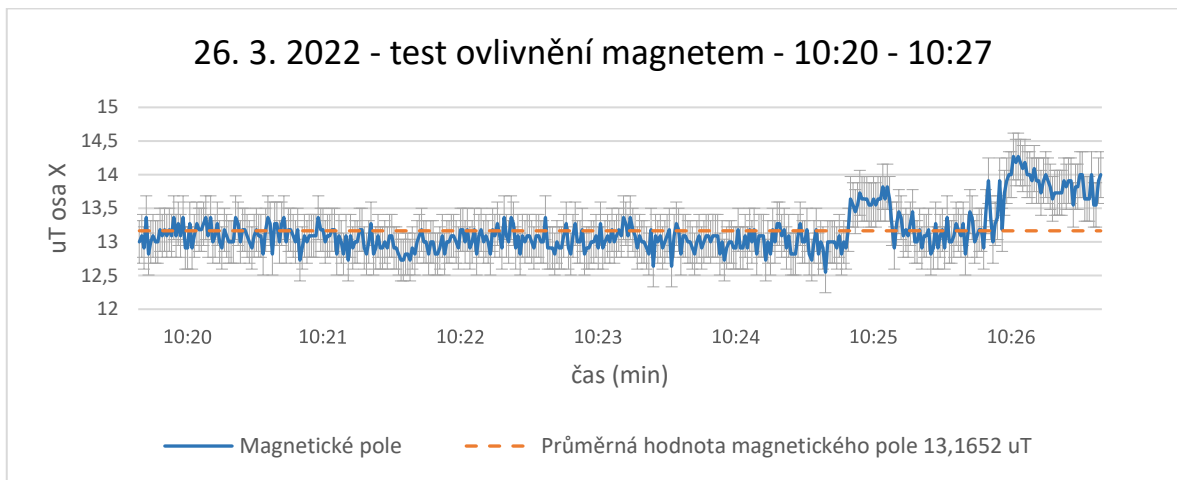
Po připojení zařízení k počítači se začala na portu COM5 načítat data ze všech senzorů. Kontrolka pro detekci magnetického severu na ose x svítila červeně a úhel natočení měl hodnotu 272° 53' 24". Proto jsem zahájil otáčení zařízení. Postupně se kontrolka pro detekci magnetického severu na ose x rozsvítila oranžově, nakonec při úhlu natočení 359° 45' 0" se

kontrolka rozsvítila zeleně. Při této kalibraci jsem dosáhl přesnosti 1 stupně. Celková kalibrace trvala 59 sekund.



Obrázek 51: Zapnutí a kalibrace senzoru.

Dalším úkolem bylo otestovat měření magnetického pole. K zařízení jsem přibližoval a odhadoval magnet po dobu 7 minut.



Obrázek 52: Test ovlivnění zařízení magnetem.

4.5.2 Odhad nejistoty Typ A

Charakteristikou polohy je aritmetický průměr. [89]

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1.16)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{420} \sum_{i=1}^{420} (13 + 13,09 + \dots + 14)$$

$$\bar{x} = 13,1652 \text{ uT}$$

Rozptyl: charakteristikou variability je rozptyl. Jedná se o průměrnou kvadratickou odchylku hodnot od jejich aritmetického průměru. [89]

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (1.17)$$

$$s^2 = \frac{1}{420 - 1} \sum_{i=1}^{420} (13 - 13,1652)^2 + \dots + (14 - 13,1652)^2$$

$$s^2 = \mathbf{0,1029 \text{ uT}}$$

Směrová odchylka (základní):

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1.18)$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} = \sqrt{\frac{1}{420} \sum_{i=1}^{420} (13 - 13,1652)^2 + \dots + (14 - 13,1652)^2}$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} = \sqrt{0,1027} = \mathbf{0,3204 \text{ uT}}$$

Směrová odchylka (výběrová): jedná se o druhou odmocninu z rozptylu.

$$s = \sqrt{s^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1.19)$$

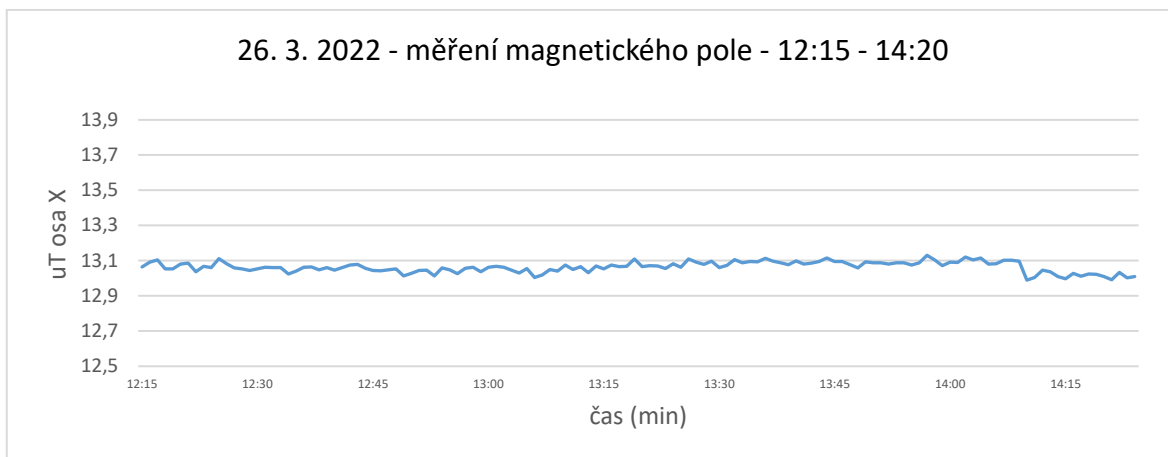
$$s = \sqrt{s^2} = \sqrt{\frac{1}{420 - 1} \sum_{i=1}^{420} (13 - 13,1652)^2 + \dots + (14 - 13,1652)^2}$$

$$s = \sqrt{s^2} = \sqrt{0,1029} = \mathbf{0,3208 \text{ uT}}$$

Z výše uvedených dat dostáváme nejistotu měření **0,4 uT**. Výsledek měření magnetické indukce ze dne 26. 3. 2022 je **(13,2 ± 0,4) uT**. To znamená, že nejistota prováděného měření je přibližně 3 %.

4.5.3 Druhá fáze měření 26. 3. 2022, 12:15 – 14:20 hodin

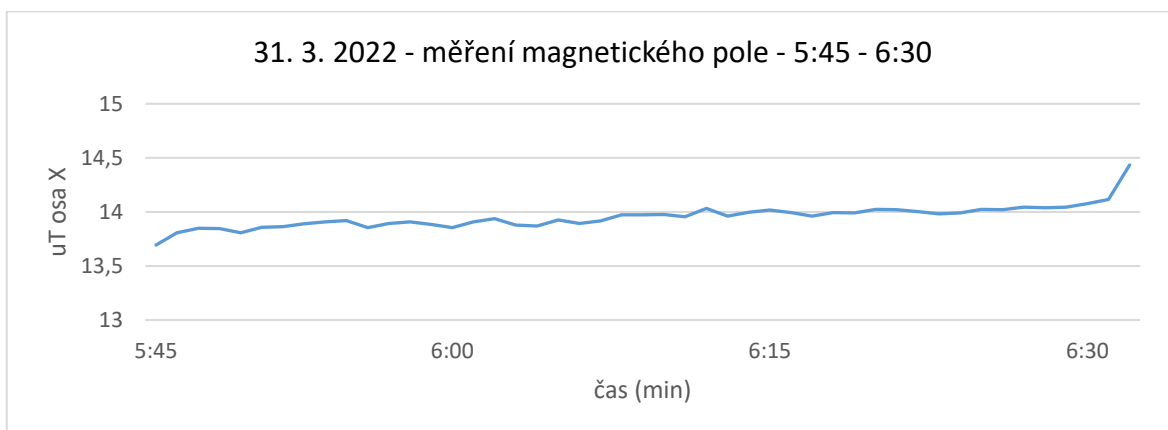
Druhou fází bylo měření magnetické pole Země. Zařízení měřilo hodnoty po dobu přibližně 3 hodiny. Data po celou dobu byla zaznamenávána pomocí softwaru CoolTerm, který ukládal data ve formátu txt. Tuto dobu jsem si zvolil z důvodu minimální sluneční aktivity.



Obrázek 53: Měření magnetického pole Země při minimální sluneční aktivitě.

4.5.4 Třetí fáze měření 31. 3. 2022, 5:45 – 6:30 hodin

Třetí fází měření magnetické pole Země, bylo naměřit hodnoty při silné sluneční aktivitě. Pomocí aplikace SpaceWeatherLive jsem měl možnost v určitém časovém předstihu určit dobu větší magnetické aktivity.



Obrázek 54: Měření magnetického pole Země při větší sluneční aktivitě.

4.5.5 Porovnání měřených dat

Geofyzikální ústav Akademie věd observatoř Budkov

Data jsou zaznamenávána ve vtěrinových intervalech. K měření je použito tříosé feromagnetické čidlo DMI. Mé porovnání se vztahuje pouze k ose x . [90]



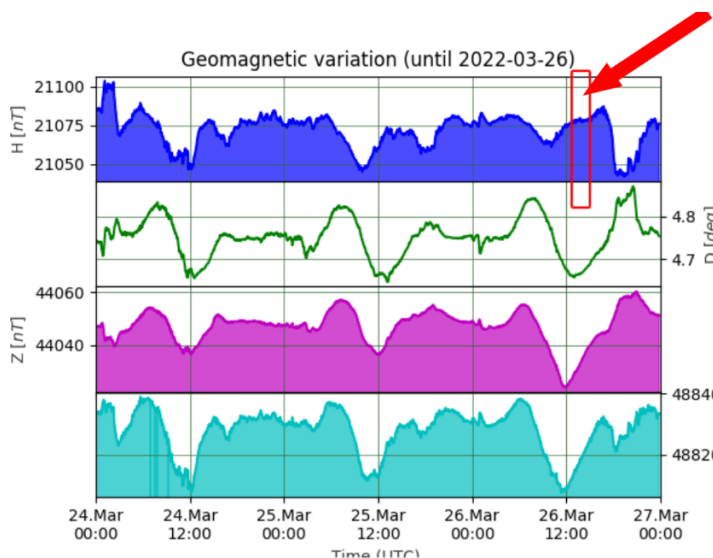
Obrázek 55: Měření intenzity magnetického pole Země – observatoř Budkov 26. 3. 2022 (12:15 – 14:20). [90]



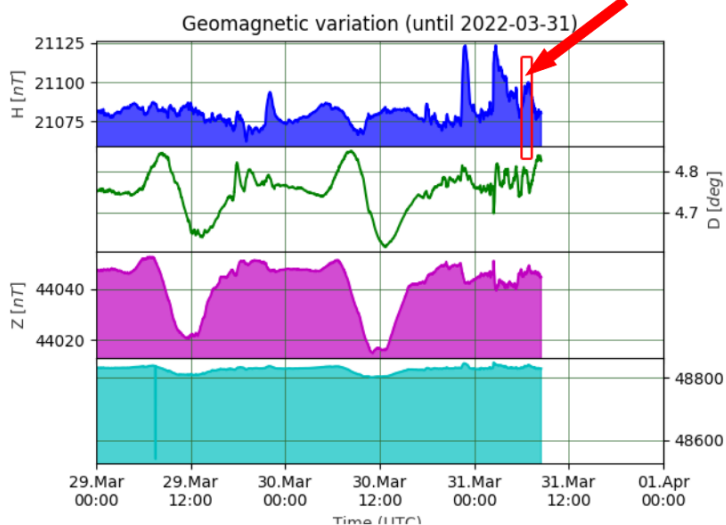
Obrázek 56: Měření intenzity magnetického pole Země – observatoř Budkov 31. 3. 2022 (5:45 – 6:30). [90]

Conradova observatoř ve Vídni

Na grafech jsou zobrazeny horizontální složky magnetického pole (H) v daných obdobích mého měření. Dále je zde deklinace (D) a vertikální složka (Z) místního magnetického pole. Celkovou intenzitu pole F a ΔF znázorňují spodní části grafů. [91]



Obrázek 57: Měření intenzity magnetického pole Země – Conradova observatoř ve Vídni 26. 3. 2022 (12:15 – 14:20). [91]



Obrázek 58: Měření intenzity magnetického pole Země – Conradova observatoř ve Vidni 31. 3. 2022 (5:45 – 6:30). [91]

Space Weather Live

Kp-index je index geomagnetické aktivity, kterou zaznamenávají magnetometry po celém světě. Data zobrazují poslední naměřenou hodnotu Kp z planetárního K-indexu NOAA SWPC. Data jsou využívány při hrubém odhadu současných globálních geomagnetických podmínek. [92]



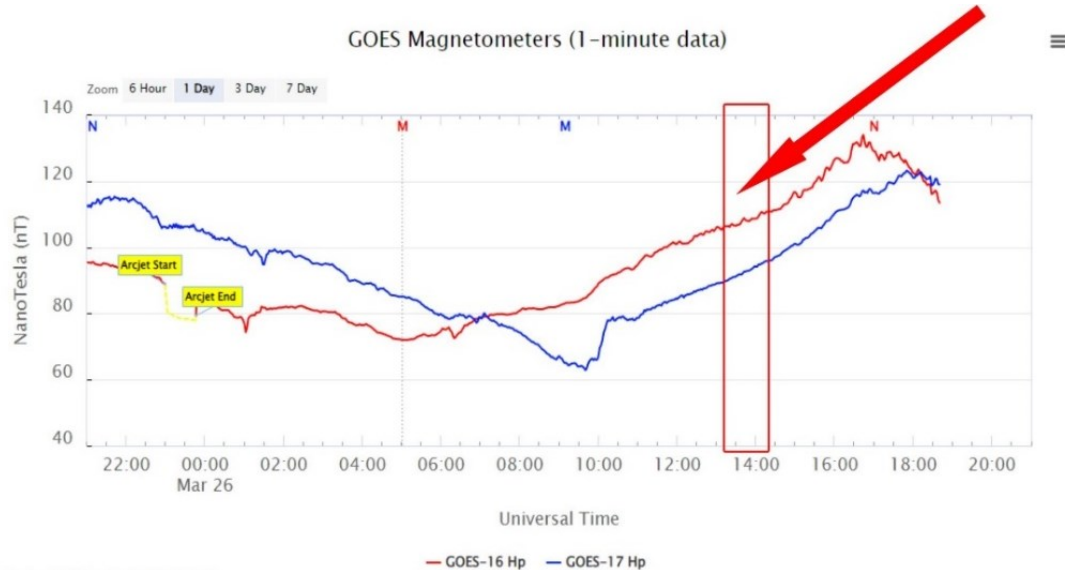
Obrázek 59: Kp-index geomagnetické aktivity 26. 3. 2022 (12:15 – 14:20). [92]



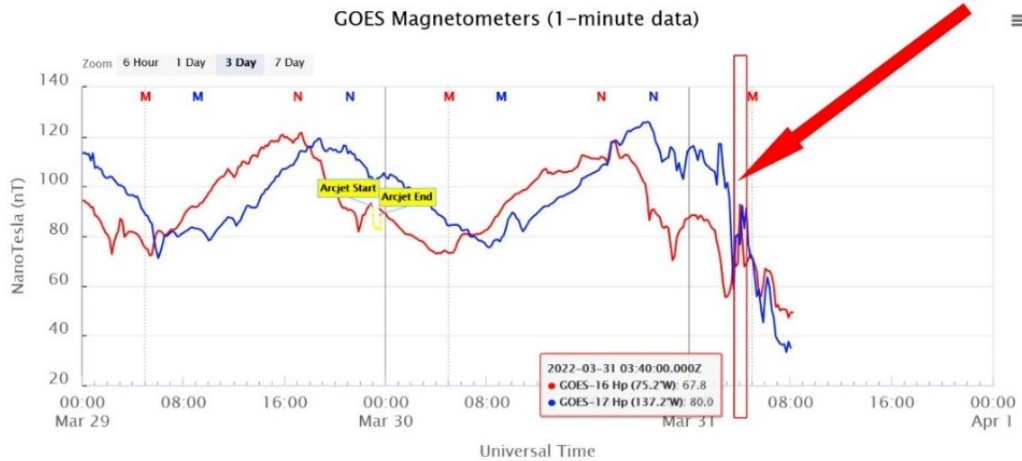
Obrázek 60: Kp-index geomagnetické aktivity 31. 3. 2022 (5:45 – 6:30). [92]

Space Weather Prediction Center

Satelitní systémy GEOS patří mezi důležité prvky měření magnetického pole Země. Satelity poskytují výstrahy pro indikaci magnetických bouří. Data z magnetometrů GEOS jsou také důležitá ve výzkumu slunečního a kosmického počasí. [93]

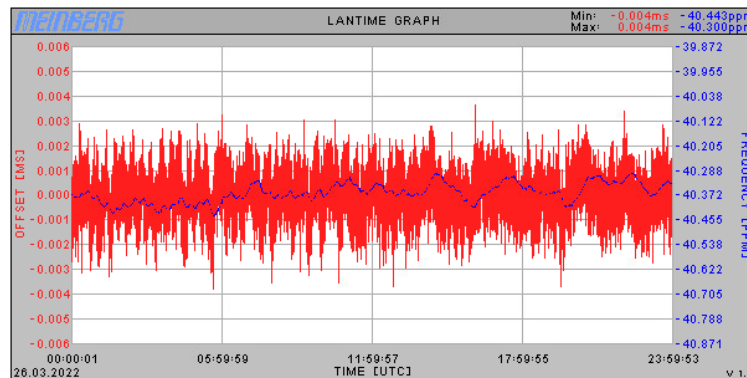


Obrázek 61: GOES měření geomagnetické aktivity 26. 3. 2022 (12:15 – 14:20). [93]

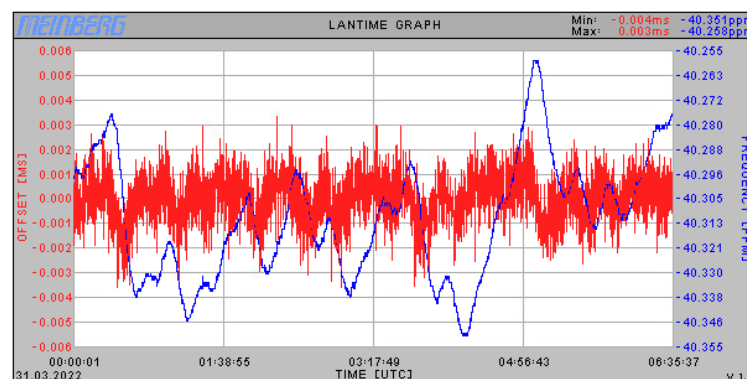


Obrázek 62: GOES měření geomagnetické aktivity 31. 3. 2022 (5:45 – 6:30). [93]

Při měření jsem také porovnával data s funkčními zařízeními, která jsou zakomponované v reálné ICT architektuře. Jedná se o NTP časový server LANTIME M200/GPS, který dodává systémový čas STRATUM 1. Tento časový server přijímá signál z GPS a Galileo.



Obrázek 63: Hodnoty výkonu NTP serveru, měření 26. 3. 2022 (12:15 – 14:20).



Obrázek 64: Hodnoty výkonu NTP serveru, měření 31. 3. 2022 (5:45 – 6:30).

Z obrázků 64 a 65 je patrná korelace mezi změnou magnetického pole Země a uváděnými geopozičními hodnotami.

Pro umístění celého měřicího zařízení jsem zvolil lokalitu Kojetín.



Obrázek 65: Umístění měřicího zařízení.

4.6 Vyhodnocení získaných dat

Moje praktická část byla zaměřena na možnost sestavení zařízení pro měření magnetického pole Země a ověření funkčnosti. Při měření jsem se snažil o co nejpřesnější zaznamenání hodnot magnetického pole Země a jeho změny spojené se sluneční aktivitou. Při analýze dat jsem dospěl k závěru, že data z ostatních magnetometrů, které jsou umístěny ve stejné zeměpisné šířce se přibližně shodují s daty, které jsem naměřil vlastním zařízením.

Pro celkový pohled na problematiku a přesného vyhodnocení dat, by bylo zapotřebí měsíců nepřetržitého měření. K tomu by bylo potřebné vytvořit síťovou infrastrukturu, která zajistí potřebnou bezpečnost a stabilitu síťového provozu. Dále pro zaznamenávání velkého počtu dat je nutná serverová část s dostatečnou výpočetní kapacitou. Data by se ukládala na disková pole typu DAS. Důležitou součástí systému by tvořil software, který by zapisoval, analyzoval a vyhodnocoval naměřená data. Data by se také porovnávali s daty ostatních magnetometrů. Systém by tak vytvářel model potenciačních stupňů hrozeb. Databáze by obsahovala seznam jednotlivých rizikových aktiv a jejich citlivost na danou úroveň. Systém by

zaznamenával data v naší zeměpisné šířce a upozorňoval by na potenciální hrozby spojené se sluneční aktivitou. Tento systém by mohl být začleněn do koncepce kritické infrastruktury.

Pokud by byl systém určen k zajištění bezpečnosti technologických systémů, určoval by, jestli se jedná o přírodní jev nebo pokus úmyslně rušit GPS signál. Systém by detekoval rušení například při přepravě cenin a vyhodnocoval by tak ztrátu poziční lokace a zkreslení pozice objektu. Dále by systém vyhodnocoval riziko, při kterém by docházelo ke změně nebo podvržení času a tím zabránil možnosti převzetí kontroly nad zabezpečeným systémem (autonomním, dohledovým a řídicím (velícím)). Uplatnění by systém mohl mít také u Armády České republiky. Pokud by například armádní jednotky byly v bojových oblastech, mohl by systém detekovat rušení GPS signálu a v předstihu by reagoval na možné výpadky poloh svých jednotek. Systém by také v bojových situacích detekoval možnost podvržení času a upozorňoval by na hrozbu průniku nepřítele do velících systémů.

Je tedy velmi důležité při jakýchkoliv incidentech nebo nestandardních situacích mít k dispozici maximum údajů tak, aby se mohla potenciální nebo reálná hrozba přesně identifikovat a vyhodnotit.

ZÁVĚR

V bakalářské práci jsem popsal vztahy jevů, které probíhají v naší sluneční soustavě. Snažil jsem se definovat, jak důležitá je znalost principů, jak funguje naše Slunce a s ním spojené kosmické počasí. Podrobněji jsem definoval sluneční aktivity, jako jsou sluneční erupce, které mají velký dopad na naši moderní civilizaci. Zákony spojené s magnetickým polem Země a jeho měření, mi umožnily lépe si uvědomit, jak důležité je studovat přírodní jevy, které nás ovlivňují. Při sestavování vlastního měřicího zařízení jsem využil v praxi postupy a principy, které jsem získal při studiu. Na základě naměřených dat jsem se pokusil odhadnout korelaci změn magnetického pole a porovnat je s geopozičními systémy ve vztahu k sluneční aktivitě. Cílem bakalářské práce bylo vyhodnotit do jaké míry je možné identifikovat změny magnetického pole Země a přesněji definovat rizika v zabezpečovacích systémech.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] WILD, Sarah. The solar system: Facts about our cosmic neighborhood. *Livescience* [online]. July 10, 2020 [cit. 2021-9-15]. Dostupné z: <https://www.livescience.com/our-solar-system.html>
- [2] WILLIAMS, Kimberly. NASA Selects New Research Teams to Further Solar System Exploration Research. *Nasa* [online]. Mar 17, 2017 [cit. 2021-9-15]. Dostupné z: <https://www.nasa.gov/ames/press-release/nasa-selects-new-research-teams-to-further-solar-system-exploration-research>
- [3] BRIGGS, Roger P. a Robert J. CARLISLE. The Structure of the Sun: SOLAR PHYSICS AND TERRESTRIAL EFFECTS. *Space Weather Prediction Center* [online]. 2016, 2016 [cit. 2021-9-15]. Dostupné z: <https://www.swpc.noaa.gov/content/solar-physics-and-terrestrial-effects-curriculum-guide-teachers-grades-7-12>
- [4] ŠVANDA, Michal. *Slunce*. 1. Praha: AVENTINUM s.r.o., 2012. ISBN 978-80-7442-024-5.
- [5] Anatomy of our Sun. *ESA* [online]. [cit. 2021-9-15]. Dostupné z: https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2019/10/Anatomy_of_our_Sun
- [6] SVALGAARD, Leif. Solar activity – past, present, future. *Journal of Space Weather and Space Climate* [online]. 2013, **3** [cit. 2022-02-17]. ISSN 2115-7251. Dostupné z: doi:10.1051/swsc/2013046
- [7] Solar Storm and Space Weather-Frequently Asked Questions. *Nasa* [online]. 2020 [cit. 2021-9-16]. Dostupné z: https://www.nasa.gov/mission_pages/sunearth/spaceweather/index.html#q2
- [8] MCINTOSH, Scott W., Alisdair R. DAVEY, Donald M. HASSLER, James D. ARMSTRONG, Werner CURDT, Klaus WILHELM a Gang LIN. Observations Supporting the Role of Magnetoconvection in Energy Supply to the Quiescent Solar Atmosphere. *The Astrophysical Journal* [online]. 2007, **654**(1), 650-664 [cit. 2022-02-17]. ISSN 0004-637X. Dostupné z: doi:10.1086/509071
- [9] HOLMAN, Gordon D. Scientific considerations for future spectroscopic measurements from space of activity on the Sun. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* [online]. 2016, **121**(12), 11,667-11,697 [cit. 2022-02-17]. ISSN 21699380. Dostupné z: doi:10.1002/2016JA022651

- [10] Solar eruption larger than Earth. *ESA* [online]. [cit. 2021-9-16]. Dostupné z: https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2018/11/Solar_eruption_larger_than_Earth
- [11] Coronal mass ejection (CME) blast and subsequent impact at Earth. *ESA* [online]. [cit. 2021-9-16]. Dostupné z: https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2003/04/Coronal_mass_ejection_CME_blast_and_subsequent_impact_at_Earth
- [12] The Role Of Solar And Stellar Energetic Particles On (Exo) Planetary Habitability (ETERNAL). *ISSI International Space Science Institute* [online]. 2021 [cit. 2021-9-16]. Dostupné z: <https://www.issibern.ch/teams/exoeternal/index.php/publications/>
- [13] Space plasmas turbulence: first in-situ estimation of the dissipation rate at sub-ion scales. *LPP Laboratoire de Physique des Plasmas* [online]. 2020 [cit. 2022-02-17]. Dostupné z: <https://www.lpp.polytechnique.fr/Space-plasmas-turbulence-first-in-situ-estimation-of-the-dissipation-rate-at?lang=en>
- [14] STEFANI, Frank a et al. Phase coherence and phase jumps in the Schwabe cycle. *Astronomische Nachrichten* [online]. 2020, 341(6-7), 600-615 [cit. 2022-02-17]. ISSN 0004-6337. Dostupné z: doi:10.1002/asna.202013809
- [15] HUNG, Ching-Cheh. Apparent Relations Between Solar Activity and Solar Tides Caused by the Planets. *NTRS – NASA Technical Reports Server* [online]. 2007 [cit. 2021-12-28]. Dostupné z: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20070025111/downloads/20070025111.pdf>
- [16] Illustration of tides. *ESO Supernova Planetarium & Visitor Centre* [online]. [cit. 2021-12-28]. Dostupné z: https://supernova.eso.org/exhibition/images/tides_illustration_corrected_GG/
- [17] Jak předpovídat kosmické počasí. *Vesmír* [online]. 2012 [cit. 2021-12-30]. Dostupné z: <https://vesmir.cz/cz/casopis/archiv-casopisu/2012/cislo-9/jak-predpovidat-kosmicke-pocasi.html>
- [18] About Space Weather. *Space Weather Prediction Center – National Oceanic and Atmospheric Administration* [online]. [cit. 2021-12-30]. Dostupné z: <https://www.swpc.noaa.gov/about-space-weather>
- [19] Space Weather. *National Oceanic and Atmospheric Administration* [online]. [cit. 2021-12-30]. Dostupné z: <https://www.weather.gov/phi/spacewx>

- [20] Space Weather Impacts On Climate. *Space Weather Prediction Center – National Oceanic and Atmospheric Administration* [online]. [cit. 2021-12-30]. Dostupné z: <https://www.swpc.noaa.gov/impacts/space-weather-impacts-climate>
- [21] Accurately forecasting space weather with a new monitor. *Univerzity College London* [online]. 2019 [cit. 2021-12-30]. Dostupné z: <https://www.ucl.ac.uk/news/2019/mar/accurately-forecasting-space-weather-new-monitor>
- [22] The Sun Does a Flip. *NASA Science Share the Science* [online]. [cit. 2022-01-02]. Dostupné z: https://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2001/ast15feb_1
- [23] NEVANLINNA, Heikki a et al. Breakdown caused by a geomagnetically induced current in the Finnish telesystem in 1958. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2001, 63(10), 1099-1103. ISSN 13646826. Dostupné z: doi:10.1016/S1364-6826(01)00021-9
- [24] GANNON, Jennifer L. Geomagnetic Storms and Geomagnetically Induced Currents. *Electric Energy Online* [online]. [cit. 2022-01-13]. Dostupné z: <https://electricenergyonline.com/energy/magazine/966/article/Geomagnetic-Storms-and-Geomagnetically-Induced-Currents.htm>
- [25] CHEN, Jian a et al. Power system responses to geomagnetic disturbances recognized using phasor measurement recordings. 2019, 113, 932-940. ISSN 01420615. Dostupné z: doi: 10.1016/j.ijepes.2019.06.027
- [26] GASHA, Heinz a Stefan PFLANZ. *Kompendium fyziky*. Banská Bystrica: Euromedia Group, k.s. - Universum, 2008. ISBN 978-80-242-5716-7.
- [27] SEDLÁK, Bedřich a Ivan ŠTOLL. *Elektřina a magnetismus*. Vyd. 3., V nakl. Karolinum 2. Praha: Karolinum, 2012. ISBN 978-80-246-2198-2.
- [28] HEJDA, Pavel. Historie geomagnetických pozorování 175 let od zahájení magnetických pozorování v Klementinu. *Vesmír* [online]. 2014 [cit. 2022-01-13]. Dostupné z: <https://vesmir.cz/cz/casopis/archiv-casopisu/2014/cislo-10/historie-geomagnetickych-pozorovani.html>
- [29] KULHÁNEK, Petr a Jakub ROZEHNAL. *Hvězdy, planety, magnety, aneb, Třináctero příběhů o magnetech ve vesmíru*. Vydání: druhé. Praha: AGA, 2021. ISBN 978-80-906638-6-2.
- [30] Earth's magnetic field. *Science Learning Hub* [online]. [cit. 2022-01-29]. Dostupné z: <https://www.sciencelearn.org.nz/images/1820-earth-s-magnetic-field>

- [31] Historical Magnetic Declination. National Centers for Environmental Information [online]. 2022 [cit. 2022-01-13]. Dostupné z: https://www.ncei.noaa.gov/maps/historical_declination/
- [32] KULHÁNEK, Petr. *Úvod do teorie plazmatu*. Praha: AGA, 2011. ISBN 978-80-904582-2-2.
- [33] Weird Magnetic Behavior in Space. NASA: Tumblr [online]. [cit. 2022-01-27]. Dostupné z: <https://nasa.tumblr.com/post/612502266197557248/weird-magnetic-behavior-in-space>
- [34] HARTMAN, Peter. Strongly Coupled Plasma Liquids. Cornell University [online]. 2007 [cit. 2022-01-27]. Dostupné z: <https://arxiv.org/pdf/0710.5229.pdf>
- [35] SPOHN, Tilman, Doris BREUER a Torrence JOHNSON. *Encyclopedia of the Solar System: Space Weather*. 3rd ed. Oxford UK: Elsevier, 2014. ISBN 978-0-12-415845-0.
- [36] Electro Magnetic Compatibility. ETSI [online]. c2022 [cit. 2022-01-27]. Dostupné z: <https://www.etsi.org/technologies/emc>
- [37] KOVÁČ, Dobroslav, Irena KOVÁČOVÁ a Ján KAŇUCH. *EMC z hlediska teorie a aplikace*. Praha: BEN – technická literatura, 2006. ISBN 80-730-0202-7.
- [38] NATARAJAN, Sudhakar a et al. A State-of-the-Art Review on Conducted Electromagnetic Interference in Non-Isolated DC to DC Converters. *IEEE Access* [online]. 2020, 8, 2564-2577 [cit. 2022-02-17]. ISSN 2169-3536. Dostupné z: doi:10.1109/ACCESS.2019.2961954
- [39] LI, Hong a et al. Suppressing electromagnetic interference in direct current converters. *IEEE Circuits and Systems Magazine* [online]. 2009, 9(4), 10-28 [cit. 2022-02-17]. ISSN 1531-636X. Dostupné z: doi:10.1109/MCAS.2009.934705
- [40] KOVÁČ, Dobroslav, Irena KOVÁČOVÁ a Ján KAŇUCH. *EMC z hlediska teorie a aplikace*. Praha: BEN – technická literatura, 2006. ISBN 80-730-0202-7.
- [41] ŠTOLL, Ivan, Jiří TOLAR a Igor JEX. *Klasická teoretická fyzika*. Praha: Univerzita Karlova, nakladatelství Karolinum, 2017. ISBN 978-80-246-3545-3.
- [42] POSPÍŠILÍK, PH.D., Ing. Martin. *Introduction to Electromagnetic Compatibility for Electronic Engineers: ... and not only for them*. Zlín: Tomas Bata University in Zlín, 2019. ISBN 978-80-7454-876-5.
- [43] PAUL, Clayton R. *Introduction to Electromagnetic Compatibility*. Second Edition. New Jersey: John Wiley, 2006. ISBN 978-0-471-75500-5.

- [44] DORF, Richard C. The Electrical Engineering Handbook. Third Edition. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis, 2006. ISBN 978-0849322747.
- [45] LIN, James C. Electromagnetic Fields in Biological Systems. Boca Raton, USA: CRC Press, 2012. ISBN 978-1-4398-5999-5.
- [46] PALEARI, Chiara I., Florian MEKHALDI, Florian ADOLPHI, et al. Cosmogenic radionuclides reveal an extreme solar particle storm near a solar minimum 9125 years BP. *Nature Communications* [online]. 2022, **13**(1) [cit. 2022-02-17]. ISSN 2041-1723. Dostupné z: doi:10.1038/s41467-021-27891-4
- [47] Ancient ice reveals mysterious solar storm. Lund University [online]. 26 January 2022 [cit. 2022-02-02]. Dostupné z: <https://www.lunduniversity.lu.se/article/ancient-ice-reveals-mysterious-solar-storm>
- [48] MEKHALDI, Florian, Raimund MUSCHELER, Florian ADOLPHI, et al. Multiradionuclide evidence for the solar origin of the cosmic-ray events of AD 774/5 and 993/4. *Nature Communications* [online]. 2015, **6**(1) [cit. 2022-02-17]. ISSN 2041-1723. Dostupné z: doi:10.1038/ncomms9611
- [49] 7 of the Strongest Solar Storms in Recorded History. Interesting Engineering [on-line]. 2020 [cit. 2022-02-02]. Dostupné z: <https://interestingengineering.com/7-of-the-strongest-solar-storms-in-recorded-history>
- [50] OKAMOTO, K. a et al. Development of a Method for Determining the Search Window for Solar Flare Neutrinos. *Solar Physics* [online]. 2020, 295(10) [cit. 2022-02-17]. ISSN 0038-0938. Dostupné z: doi:10.1007/s11207-020-01706-z
- [51] WANG, Ningchao a et al. A Comparison of the CIR – and CME-Induced Geomagnetic Activity Effects on Mesosphere and Lower Thermospheric Temperature. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* [online]. 2021, 126(6) [cit. 2022-02-17]. ISSN 2169-9380. Dostupné z: doi:10.1029/2020JA029029
- [52] 10 Spectacular Solar Storms That Have Shaped Earth's History. Treehugger [onli-ne]. 2021 [cit. 2022-02-02]. Dostupné z: <https://www.treehugger.com/spectacular-solar-storms-history-5185181>
- [53] R3 (X9.3 flare) Radio Blackout on 6 September at 1202 UTC. Space Weather Prediction Center [online]. 2017 [cit. 2022-02-02]. Dostupné z: <https://www.swpc.noaa.gov/news/r3-x93-flare-radio-blackout-6-september-1202-utc>
- [54] Large Solar Event Detected During Irma: Radio blackout occurred while hurricane crossed Caribbean. National Center for Environmental Information [online]. [cit. 2022-

- 02-02]. Dostupné z: <https://www.ncei.noaa.gov/news/large-solar-event-detected-during-irma>
- [55] GEOMAGNETIC STORM AND RECENTLY DEPLOYED STARLINK SATELLITES. SpaceX [online]. 2022 [cit. 2022-02-10]. Dostupné z: <https://www.spacex.com/updates/>
- [56] SOHO overview. ESA [online]. [cit. 2022-02-10]. Dostupné z: https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/SOHO_overview2
- [57] Soho observes the Sun. ESA [online]. [cit. 2022-02-10]. Dostupné z: https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/1998/01/Soho_observes_the_Sun
- [58] Space Weather: Storms from the Sun. Space Weather Prediction Center: National Oceanic and Atmospheric Administration [online]. [cit. 2022-02-07]. Dostupné z: https://www.swpc.noaa.gov/sites/default/files/images/u33/swx_booklet.pdf
- [59] Instruments: Magnetometer (MAG). GEOS R [online]. [cit. 2022-02-07]. Dostupné z: <https://www.goes-r.gov/spacesegment/mag.html>
- [60] Swarm. ESA [online]. [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: <https://earth.esa.int/eogateway/missions/swarm>
- [61] Swarm's orbital dance: counter-rotating and closer, for the benefit of science. ESA [online]. [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: <https://earth.esa.int/eogateway/news/swarm-s-orbital-dance-counter-rotating-and-closer-for-the-benefit-of-science>
- [62] New science challenges from the 2021 SWARM+SCIENCE workshop. ESA [online]. [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: <https://eo4society.esa.int/2021/12/06/new-science-challenges-from-the-2021-swarm-science-workshop/>
- [63] What's a Magnetic Sensor? AKM Asahi Kasei Microdevices Corporation [online]. [cit. 2022-02-11]. Dostupné z: <https://www.akm.com/eu/en/products/hall-sensor/tutorial/magnetic-sensor/>
- [64] Magnetic Position Sensors: AMR Sensors. TE Connectivity [online]. c 2022 [cit. 2022-02-11]. Dostupné z: https://www.te.com/usa-en/products/sensors/position-sensors/magnetic-sensors.html?te_bu=Sen&te_type=srch&te_campaign=ggl_glo_sen-ggl-global-srch-magneticsensor_sma-2330_8&elqCampaignId=121976&gclid=EAIaIQobChMIqovaz6_39QIVguF3Ch1i8wT3EAMYAAEgKvA_D_BwE&tab=pgp-story

- [65] Allegro ICs Based on Giant Magnetoresistance (GMR). Allegro [online]. c2021 [cit. 2022-02-11]. Dostupné z: <https://www.allegromicro.com/en/insights-and-innovations/technical-documents/allegro-ics-based-on-giant-magnetoresistance-gmr>
- [66] What is a TMR sensor IC? ABLIC [online]. [cit. 2022-02-11]. Dostupné z: <https://www.ablic.com/en/semicon/products/sensor/tmr-sensor-ic/intro/>
- [67] SAMUELSSON, Olof. Geomagnetic disturbances and their impact on power systems. IEA Industrial Electrical Engineering and Automation [online]. 2013 [cit. 2022-02-14]. Dostupné z: <https://www.iea.lth.se/publications/Reports/LTH-IEA-7242.pdf>
- [68] HEJDA, P. a J. BOCHNÍČEK. Geomagnetically induced pipe-to-soil voltages in the Czech oil pipelines during October–November 2003. EGU European Geosciences Union [online]. 2005 [cit. 2022-02-11]. Dostupné z: <https://angeo.copernicus.org/articles/23/3089/2005/angeo-23-3089-2005.pdf>
- [69] VÝBOŠT'OKOVÁ, Tatiana a Michal ŠVANDA. Statistical Analysis of the Correlation Between Anomalies in the Czech Electric Power Grid and Geomagnetic Activity. *Space Weather* [online]. 2019, **17**(8), 1208-1218 [cit. 2022-02-17]. ISSN 1542-7390. Dostupné z: doi:10.1029/2019SW002181
- [70] Solar Shield. CCMC Community Coordinated Modeling Center [online]. [cit. 2022-02-14]. Dostupné z: https://ccmc.gsfc.nasa.gov/Solar_Shield/Solar_Shield.html
- [71] Health, Safety, and Commercial Needs. Jet Propulsion Laboratory [online]. [cit. 2022-02-14]. Dostupné z: <https://www.jpl.nasa.gov/nmp/st5/SCIENCE/effects2.html>
- [72] JYOTHI, Sangeetha Abdu. Solar superstorms. *Proceedings of the 2021 ACM SIGCOMM 2021 Conference* [online]. New York, NY, USA: ACM, 2021, 2021-08-09, 692-704 [cit. 2022-02-17]. ISBN 9781450383837. Dostupné z: doi:10.1145/3452296.3472916
- [73] Submarine Cable Map. Submarine Cable Map [online]. 2022 [cit. 2022-02-14]. Dostupné z: <https://www.submarinecablemap.com/>
- [74] DNS Root Servers. Root Servers [online]. 2022 [cit. 2022-02-14]. Dostupné z: <https://root-servers.org/>
- [75] Data Center Map. Data Center Map [online]. 2022 [cit. 2022-02-14]. Dostupné z: <https://www.datacentermap.com/>
- [76] GPS disruption a full-fledged aviation problem. GPS WORLD [online]. 2017 [cit. 2022-02-15]. Dostupné z: <https://www.gpsworld.com/gps-disruption-a-full-fledged-aviation-problem/>

- [77] Extreme space weather: impacts on engineered systems and infrastructure. Royal Academy of Engineering [online]. 2013 [cit. 2022-02-15]. Dostupné z: <https://www.raeng.org.uk/publications/reports/space-weather-full-report>
- [78] Postřehy z bezpečnosti: s NTP proti proudu času. ROOT [online]. 2016 [cit. 2022-02-15]. Dostupné z: <https://www.root.cz/clanky/postrehy-z-bezpecnosti-s-ntp-proti-proudu-casu/>
- [79] ICS Advisory (ICSA-11-084-01): Solar Magnetic Storm Impact on Control Systems. CISA Cyber Security Infrastructure Security Agency [online]. 2014 [cit. 2022-02-16]. Dostupné z: <https://www.cisa.gov/uscert/ics/advisories/ICSA-11-084-01>
- [80] LaskaKit UNO R3, ATmega328P. *Laskakit* [online]. 2022 [cit. 2022-03-07]. Dostupné z: <https://www.laskakit.cz/arduino-uno-r3--atmega328p--precizni-klon/>
- [81] Keyes KY-024 Hallův senzor. *Laskakit* [online]. 2022 [cit. 2022-03-07]. Dostupné z: <https://www.laskakit.cz/keyes-ky-024-halluv-senzor/>
- [82] 3osý magnetometr a kompas HMC5883L. *Laskakit* [online]. 2022 [cit. 2022-03-07]. Dostupné z: <https://www.laskakit.cz/3-osy-magnetometr-a-kompas-hmc5883/>
- [83] Senzor na měření teploty a tlaku BMP180. *Pájeničko* [online]. 2021 [cit. 2022-03-09]. Dostupné z: https://pajenicko.cz/senzor-na-mereni-teploty-tlaku-bmp180?gclid=EAIaIQobChMI1a7en_m49gIV0QIGAB2xjQ3mEAQYASABEGlGUfD_BwE
- [84] BMP180 Barometric Pressure/Temperature/Altitude Sensor. *Makerfabs* [online]. 2021 [cit. 2022-03-09]. Dostupné z: <https://www.makerfabs.com/bmp180-barometric-pressure-temperature-altitude-sensor.html>
- [85] PremiumCord USB 2.0, A-B-3 m (stíněný). *CZC* [online]. [cit. 2022-03-09]. Dostupné z: https://www.czc.cz/premiumcord-usb-2-0-a-b-3m-stineny/62919/produkt?gclid=EAIaIQobChMIl8achYm59gIVFYbVCh1D_gZ6EAQYAYABEG-KRbfD_BwE
- [86] Dupont propojovací kabel 40žil M-M samec-samec (10 cm). *Laskakit* [online]. 2022 [cit. 2022-03-09]. Dostupné z: <https://www.laskakit.cz/dupont-propojovaci-kabely-40ks-m-m-samec-samec--10cm/>
- [87] How to Setup a Magnetometer on the Arduino. *Circuit Basics* [online]. [cit. 2022-03-19]. Dostupné z: <https://www.circuitbasics.com/how-to-setup-a-magnetometer-on-the-arduino/>

- [88] 3 – Axis Digital Compass IC HMC5883L. *Parallax* [online]. [cit. 2022-03-30]. Dostupné z: <https://www1.parallax.com/sites/default/files/downloads/29133-HMC5883L-3-Axis-Digital-Compass-IC-Datasheet.pdf>
- [89] BUDÍKOVÁ, Marie, Maria KRÁLOVÁ a Bohumil MAROŠ. *Průvodce základními statistickými metodami*. Praha: Grada, 2010. Expert (Grada). ISBN 978-80-247-3243-5.
- [90] Měření intenzity magnetického pole Země z observatoře Budkov. *Geofyzikální ústav Akademie věd ČR* [online]. 2022 [cit. 2022-04-05]. Dostupné z: <https://www.ig.cas.cz/vyzkum-a-vyuka/oddeleni/geomagnetika/aktualni-mereni-geomagnetickeho-pole/>
- [91] Daily magnetogram from the Conrad Observatory. *Conrad Observatory* [online]. 2022 [cit. 2022-04-05]. Dostupné z: <https://www.conrad-observatory.at/index.php/de/data-de/daily-magnetogram-de>
- [92] Auroral activity. *SpaceWeatherLive* [online]. 2022 [cit. 2022-04-05]. Dostupné z: <https://www.spaceweatherlive.com/en.html>
- [93] GOES Magnetometer. *Space Weather Prediction Center* [online]. 2022 [cit. 2022-04-05]. Dostupné z: <https://www.swpc.noaa.gov/products/goes-magnetometer>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

AD	Active Directory.
AMR	Anisotropic Magnetoresistive Element.
ASCI	Application Specific Integrated Circuit
CME	Coronal Mass Ejection.
DAS	Direct Attached Storage
DC	Domain Controller.
DNS	Domain Name Systém.
EMC	Electromagnetic Compatibility.
EMI	Electromagnetic Interference.
EMS	Electromagnetic Susceptibility.
ESA	European Space Agency.
ESD	Electrostatic Discharge.
GIC	Geomagnetic Induced Current.
GLONASS	Global Navigation Satellite Systém.
GMD	Geomagnetic Disturbance.
GMR	Giant Magnetoresistive Element.
GEOS	Geostationary Operational Environmental Satellites.
GPS	Global Positioning System.
HF	High Frequency.
HW	Hardware.
HZDR	Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf.
LAN	Local Area Network.
NASA	National Aeronautics and Space Administration.
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration

NTP	Network Time Protocol.
RF	Radio Frequency.
RFI	Radio Frequency Interference.
SOHO	Solar and Heliospheric Observatory.
SW	Software
TMR	Tunnel Magnetoresistive Element
TSI	Total Solar Irradiance
UHF	Ultra high frequency
USA	United States of America
VHF	Very High Frequency

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1: Sluneční soustava. [2]</i>	11
<i>Obrázek 2: Anatomie našeho Slunce. [5]</i>	12
<i>Obrázek 3: 2. dubna 2001, došlo v aktivní oblasti 9393 k velké sluneční erupci (SOHO). [8]</i>	12
<i>Obrázek 4: Standardní model magnetického vývoje sluneční erupce. [9]</i>	13
<i>Obrázek 5: Sluneční erupce a porovnání z velikostí Země. [10]</i>	13
<i>Obrázek 6: Výron koronální hmoty (CME). [11]</i>	14
<i>Obrázek 7: Sluneční energetické částice. [12]</i>	14
<i>Obrázek 8: Interakce slunečního větru se zemskou magnetosférou. [13]</i>	15
<i>Obrázek 9: V závislosti na vzájemné poloze mohou slapové účinky Měsíce a Slunce působit společně nebo proti sobě. [16]</i>	15
<i>Obrázek 10: Vyzařovaná energie je ve viditelných vlnových délkách (přibližně 400-800 nanometrů (nm)). [21]</i>	17
<i>Obrázek 11: Schéma Parkerovy spirály v heliosféře. Proudnic slunečního větru působí na magnetické siločáry Slunce, které se v důsledku rotace Slunce stáčíjí do Archimédovy spirály. [22]</i>	17
<i>Obrázek 12: Sled událostí po výronu koronální hmoty Slunce. [24]</i>	19
<i>Obrázek 13: Magnetické pole Země. [30]</i>	21
<i>Obrázek 14: Magnetická deklinace je důležitý pojem pro přesnou navigaci. Kompas vždy ukazuje podél siločar magnetické pole (které se sbíhají na tzv. magnetických pólech). [31]</i>	22
<i>Obrázek 15: Různé typy plazmatu v rozmezí hustota – teplota. Silně vázaná plazma se nachází přímo na přímce $\Gamma = 1$ (Γ charakterizuje poměr potenciální a kinetické energie). Osa X představuje koncentraci elektronů, osa Y představuje teplotu elektronů. [34]</i>	23
<i>Obrázek 16: Magnetosféra, prstencový proud a magnetický plazmový ohon. [35]</i> ...	24
<i>Obrázek 17: Elektromagnetické ovlivňování. [37]</i>	24
<i>Obrázek 18: Typické pozemské elektromagnetické prostředí. [39]</i>	26
<i>Obrázek 19: Základní prvky problému EMC. [43]</i>	27
<i>Obrázek 20: Rozložení nízkofrekvenčního elektrického pole měřené na povrchu lidského těla stojícího pod elektrickým přenosovým vedením. [45]</i>	28
<i>Obrázek 21: Analýza ledových jader (Foto: Raimund Muscheler). [47]</i>	30

Obrázek 22: Sluneční erupce z 28. října 2003. Je zde znázorněna křivka měkkého rentgenového záření (nahore) a derivace toku měkkého rentgenového záření (dole). Měřené hodnoty družice GOES. [50]	31
Obrázek 23: Parametry slunečního větru a indexy geomagnetických bouří od 13. do 19. prosince 2006: (a) IMF By, (b) IMF Bz, (c) rychlost slunečního větru, (d) AE a F10.7, (e) index Dst. Svíslá červená přerušovaná čára v každém panelu označuje čas nástupu bouře a vodorovné černé přerušované čáry v (a), (b) a (e) označují čáry nulových hodnot pro By, Bz a Dst. [51]	32
Obrázek 24: Pozice sondy SOHO. [57]	33
Obrázek 25: Orbit družicového roje Swarm. [61]	34
Obrázek 26: Družicový roj Swarm. [62]	35
Obrázek 27: Princip cívky. [63]	35
Obrázek 28: Princip Reed Switch. [63]	36
Obrázek 29: Princip Hallova senzoru. [63]	36
Obrázek 30: Princip AMR senzoru. [63]	37
Obrázek 31: Princip GMR senzoru. [63]	37
Obrázek 32: Princip TMR senzoru. [63]	37
Obrázek 33: Vliv magnetických bouří na technologické systémy. [67]	38
Obrázek 34: Přehled dopadu geomagnetických indukovaných proudů na elektrické soustavy (1. zvýšené jalové ztráty, 2. harmonické zkreslení, 3. bludná pole v transformátoru). [67]	39
Obrázek 35: Mapa podmořských kabelů 2022. [73]	41
Obrázek 36: Systém kořenových serverů se skládá z 1510 instancí provozovaných 12 nezávislými provozovateli kořenových serverů (2022). [74]	42
Obrázek 37: Veřejná datová centra (2022). [75]	42
Obrázek 38: Základní deska Arduino UNO R3.	46
Obrázek 39: KY-024 Hallův senzor.	46
Obrázek 40: 3-osý magnetometr a kompas HMC5883L.	47
Obrázek 41: Senzor na měření teploty a tlaku BMP180. [84]	47
Obrázek 42: Kabel PremiumCord USB 2.0, A-B 3 m (stíněný).	48
Obrázek 43: Dupont propojovací kabel 40žil M-M. [86]	48
Obrázek 44: Schránka pro umístění měřícího zařízení.	49

Obrázek 45: Blokové schéma zapojení jednotlivých senzorů k základní desce Arduino UNO R3.	50
Obrázek 46: Složka x, y je výstupem osy x, y magnetometru v mikrotéskách. Mezi 0° severu a směrem, kterým ukazuje osa x , je vytvořen úhel. [87]	50
Obrázek 47: Vnitřní schéma zapojení senzoru H5883L. [88]	52
Obrázek 48: Měření teploty senzorem BMP180.	53
Obrázek 49: Měření magnetické kompatibility senzorem HMC5883L a teploty senzorem BMP180.	53
Obrázek 50: Měření magnetické kompatibility senzorem HMC5883L a teploty senzorem BMP180, při větším teplotním rozdílu.	54
Obrázek 51: Zapnutí a kalibrace senzoru.	55
Obrázek 52: Test ovlivnění zařízení magnetem.	55
Obrázek 53: Měření magnetického pole Země při minimální sluneční aktivitě.	57
Obrázek 54: Měření magnetického pole Země při větší sluneční aktivitě.	57
Obrázek 55: Měření intenzity magnetického pole Země – observatoř Budkov 26. 3. 2022 (12:15 – 14:20). [90]	58
Obrázek 56: Měření intenzity magnetického pole Země – observatoř Budkov 31. 3. 2022 (5:45 – 6:30). [90]	58
Obrázek 57: Měření intenzity magnetického pole Země – Conradova observatoř ve Vídni	58
Obrázek 58: Měření intenzity magnetického pole Země – Conradova observatoř ve Vídni 31. 3. 2022 (5:45 – 6:30). [91]	59
Obrázek 59: K_p -index geomagnetické aktivity 26. 3. 2022 (12:15 – 14:20). [92]	59
Obrázek 60: K_p -index geomagnetické aktivity 31. 3. 2022 (5:45 – 6:30). [92]	60
Obrázek 61: GOES měření geomagnetické aktivity 26. 3. 2022 (12:15 – 14:20). [93]	60
Obrázek 62: GOES měření geomagnetické aktivity 31. 3. 2022 (5:45 – 6:30). [93]	61
Obrázek 64: Hodnoty výkonu NTP serveru, měření 26. 3. 2022 (12:15 – 14:20)	61
Obrázek 65: Hodnoty výkonu NTP serveru, měření 31. 3. 2022 (5:45 – 6:30)	61
Obrázek 63: Umístění měřícího zařízení.	62

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Vlnové délky, frekvence a úrovně vyzářené energie [44]	27
Tabulka 2: Specifikace Keyes KY-024 Hallova senzoru. [81].....	46
Tabulka 3: Specifikace HMC5883L. [82]	47
Tabulka 4: Specifikace senzor na měření teploty a tlaku BMP180. [83]	47
Tabulka 6: Velikost magnetického pole Země podél os x , y a z v mikro teslách a teplotní hodnota v °C.....	51