



**MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ
FAKULTA**
Univerzita Karlova

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Tatiana Výbošťoková

Vliv sluneční aktivity na poruchy prvků české rozvodné sítě

Astronomický ústav UK

Vedoucí bakalářské práce: doc. Mgr. Michal Švanda, Ph.D.

Studijní program: Fyzika

Studijní obor: Fyzika – Obecná fyzika

Praha 2017

V prvom rade by som sa chcela poďakovať svojmu vedúcemu bakalárskej práce, doc. Michalovi Švandovi za celkovú pomoc a ochotu pri analýze výsledkov. Ďalej by som sa rada poďakovala ČEPS, a.s., za dáta s poruchami na českej rozvodnej sieti a Geofyzikálnemu ústavu AV ČR za voľnú dostupnosť meraní z Budkova.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů, literatury a dalších odborných zdrojů.

Beru na vědomí, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona v platném znění, zejména skutečnost, že Univerzita Karlova má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona.

V Praze dne

Tatiana Výbošťoková

Název práce: Vliv sluneční aktivity na poruchy prvků české rozvodné sítě

Autor: Tatiana Výbošťoková

Katedra: Astronomický ústav UK

Vedoucí bakalářské práce: doc. Mgr. Michal Švanda, Ph.D., Astronomický ústav UK

Abstrakt:

V bakalářské práci analyzujeme vplyv slnečnej aktivity na českú rozvodnú sieť.

Masívne slnečné erupcie sú zodpovedné za vznik kozmického počasia a majú určitý dopad na technologickú infraštruktúru na Zemi a jej okolie. Za účelom dozvedieť sa viac o tom, aký vplyv môžu mať zmeny v aktivite Slnka na terestriálne klíma, sme sa rozhodli spracovávať danú problematiku.

Jadrom praktickej časti je vytvorenie programu, ktorý spracováva metódami štatistickej analýzy dáta s poruchami na rozvodných sieťach v Českej republike z ČEPS, a.s., a namerané hodnoty geomagnetickej aktivity na stanici Budkov na Šumave.

Práca odhaľuje, že nejde vylúčiť vplyv intenzity slnečnej aktivity na poruchy na českej rozvodnej sieti. Ukazuje sa, že počet porúch na sieti je v období zvýšenej slnečnej aktivity je značne väčší ako v období nižšej či priemernej slnečnej aktivity.

Naša práca prispieva k rozšíreniu povedomia o poruchách na českej rozvodnej sieti, ktoré môžu vzniknúť aj vplyvom slnečnej aktivity.

Klíčová slova: slnečná aktivita, rozvodná sieť, geomagnetická aktivita

Title: The influence of solar activity on failure rate of components of Czech power-distribution network

Author: Tatiana Výbošťoková

Department: Astronomical Institute of the Charles University

Supervisor: Assoc. Prof. Michal Švanda, Astronomical Institute of Charles University

Abstract:

We analyse the impact of solar activity on Czech power grid.

Massive solar flares are responsible for the formation of spaceweather and have a certain impact on technological infrastructures on the Earth and in its surroundings. We elaborated this issue and studied possible effects of spaceweather events on failure rate recorded in Czech power grid.

The basis of the practical part is a program that processes the data recording the disturbances on power grid in the Czech Republic obtained by ČEPS (Czech Transmission System Operator) and compared those with the measured values of geomagnetic activity from Budkov station in Šumava by the statistical analysis methods.

Our study revealed that there possibly exists some connection between the intensity of solar activity and disturbances in the Czech electrical power grid. It turns out that the number of faults on the grid during the period of increased solar activity is appreciably higher than in the period of lower solar activity.

Our work contributes to the propagation of awareness of disturbances in the Czech electrical power grid that can also arise due to solar activity

Keywords: solar activity, power grid, geomagnetic activity

Obsah

Úvod	2
1 Slnko	3
1.1 Najbližšia hviezda	3
1.2 Základné informácie o Slnku	3
2 Slnčná aktivita	5
2.1 Zavedenie pojmu	5
2.1.1 Výrony hmoty do koróny	5
2.1.2 Dopad slnečnej aktivity	7
2.2 Kozmické počasie	7
3 Vplyv na rozvodnú sieť	9
3.1 Fyzikálne objasnenie	9
3.2 Udalosti vo svete	10
3.3 Česká rozvodná sieť	11
4 Inšpirácia	12
4.1 Hlavný zdroj informácií	12
4.2 Metóda spracovania	12
5 Spracovanie	15
5.1 Dáta	15
5.1.1 Analýza dát z ČEPS, a.s.	15
5.1.2 Analýza dát k-indexu	16
5.2 Popis postupu práce	18
5.3 Výpočtový algoritmus	19
5.3.1 Príprava	19
5.3.2 Popis programu	21
5.4 Štatistické metódy	22

5.4.1	Binomický test	22
5.4.2	Štúdia prípadov a kontrol	24
5.4.3	Test bezprostrednosti	25
6	Diskusia	27
	Záver	30
	Zoznam literatúry	32
	Zoznam obrázkov	34
	Zoznam tabuliek	35
	Zoznam použitých skratiek	36

Úvod

Erupcie prebiehajúce na Slnku, ktoré sú spojené s náhlou rekonexiou magnetického poľa, slnečné škvrny (tmavšie miesta na povrchu Slnka) alebo protuberancie (oblak plazmy vyplňujúci slučky magnetických polí nad slnečným povrchom) sú javy, ktoré označujeme spoločným názvom slnečná aktivita. Slnečná aktivita sa s časom mení, rôzne indikátory aktivity (napr. počet škvŕn) vykazujú semiperiodické správanie s určitými periódami.

Pri erupciách dochádza k ohrevu koronálneho materiálu až na teploty desiatok miliónov stupňov, ktorý sa následne stáva zdrojom röntgenového žiarenia. Vznikajú urýchlené zväzky elektrónov a protónov, ktoré smerujú do medziplanetárneho priestoru a ovplyvňujú podmienky na Zemi. Zemská magnetosféra do značnej miery bráni vplyvu prilietavajúcich nabitých častíc. Prostredníctvom tohto poľa však poruchy slnečnej aktivity indukujú poruchy v magnetosfére, označované ako geomagnetická aktivita.

Aj napriek známym efektom zvýšenej slnečnej aktivity na vesmírne technológie, či samotnú Zem, je výskumov zaoberajúcich sa touto problematikou pomerne málo. Veľká časť dostupných prác sa zaoberá najmä bezprostrednými efektami registrovanými na infraštruktúre behom alebo len krátko po výrazných poruchách v slnečnej aktivite. Množstvo prác je možné dohľadať napríklad k najznámejšiemu výpadu elektriny v kanadskej provincii Quebec v roku 1989. Len v poslednej dobe sa začali objavovať práce vyhodnocujúce dlhodobý vplyv kolísajúcej slnečnej aktivity na infraštruktúry siete aj v prípade udalostí výrazne menšieho rozsahu ako bol quebecký blackout (napr. [1]).

Cieľom tejto práce je urobiť zrovnateľné analýzy pre poruchy hlásené v českej rozvodnej sieti. Pomocou nahlásených porúch na kľúčových zariadeniach získaných v spolupráci s ČEPS, a.s. Ich početnosť bude štatisticky porovnávaná s úrovňou slnečnej aktivity popísanou rôznymi indexami. Jedná sa o pilotnú štúdiu v Čechách.

1 Slnko

1.1 Najbližšia hviezda

Slnko je naša najbližšia hviezda, ktorá je vzdialená približne $1,5 \cdot 10^8$ kilometrov, čo je tristo tisíckrát bližšie ako naša druhá najbližšia hviezda Proxima Centauri. Patrí medzi hviezdy hlavnej postupnosti. Je jedinou hviezdou, ktorá môže byť pozorovaná vo väčších detailoch, v pomerne vysokom priestore a časovom rozlíšení súčasne 24 hodín denne. Preto je pre nás najvhodnejším hviezdny kandidátom na skúmanie, či už zo Zeme pomocou ďalekohľadov alebo umelými družicami vypustenými vo vesmíre.

Keďže aktivita Slnka ovplyvňuje kozmické počasie, žiada sa jeho podrobnejšie skúmanie aj za účelom zníženia nepriaznivých vplyvov na Zem. Získané výsledky nám umožňujú lepšie porozumieť správaniu ostatných vzdialenejších hviezd, keďže Slnko je len jednou z hviezd.

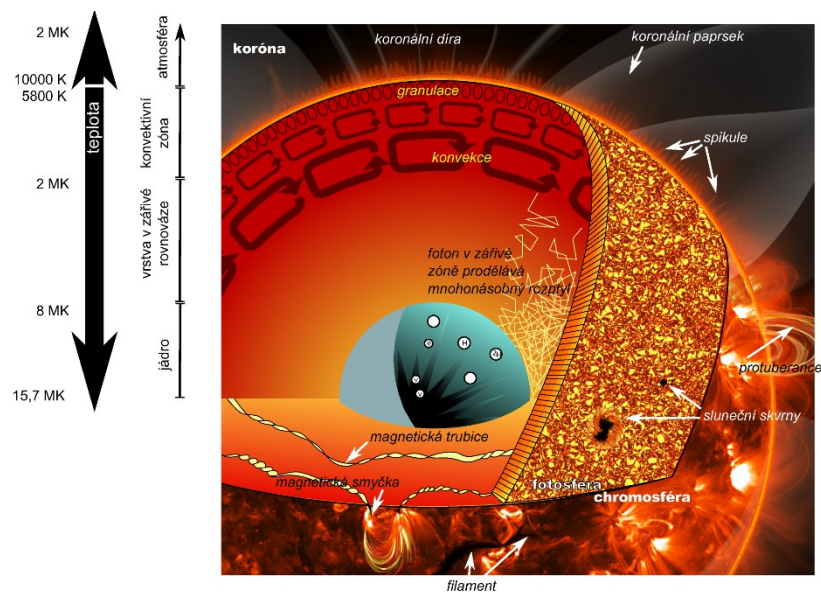
1.2 Základné informácie o Slnku

Vek Slnka je približne 4,5 miliárd rokov. Slnko s polomerom 696 tisíc kilometrov je približne sto krát väčšie než Zem, jeho hmotnosť $2 \cdot 10^{30}$ kg. Je to hviezda typu G2. Podobných hviezd vo vesmíre je zhruba 9% [3]. Hviezdy rovnakého spektrálneho typu ako Slnko pozorujeme na oblohe ako žlté.

Energia Slnka je produkovaná v jeho horúcom jadre. Jadro siaha od stredu Slnka do vzdialenosti okolo 175 Mm. V tejto oblasti prebieha termonukleárna fúzia a preto teploty dosahujú hodnoty $15 \cdot 10^6$ kelvinov [4]. Z jadra smerom ku povrchu sa energia šíri radiálne do vzdialenosti približne 0,713 polomeru Slnka [5]. Táto oblasť sa nazýva radiačná zóna a jej teplota už nie je dostatočná na udržanie termojadrových reakcií. Celá energia vznikajúca v jadre sa cez radiačnú zónu prenáša žiarením. Hustota v tejto oblasti je tak veľká, že fotóny sú neustále pohlcované a zrážajú sa s ostatnými časticami, preto im cesta na povrch Slnka trvá tisíce rokov [6], zatiaľ čo 8 minút je dĺžka cesty fotónu z povrchu Slnka na Zem. Povrch Slnka absorbuje väčšinu z celkovej energie a vyžiari ju von, podobne ako čierne teleso, s teplotou 5780 K [3].

Slnko ma veľmi podobné spektrum ako absolútne čierne teleso, čo značí že Slnko je blízko termodynamickej rovnováhy. Avšak spektrálne čiary a okrajové zatmenie Slnka svedčí o tom, že sa nejedná presne o absolútne čierne teleso. Na obrázku 1.1 je znázornená vnútorná aj vonkajšia štruktúra Slnka.

Dôsledkom prerozdeľovania momentu hybnosti vo vonkajšej konvektívnej obálke Slnka [7] a toho že, Slnko nie je pevné teleso sa prejavuje rozdielnosť periódy rotácie na rovníku (25 dní) a na póloch (36 dní), tzv. diferenciálna rotácia. Bola objavená pri sledovaní pohybu slnečných škvŕn v rôznych vzdialenostiach od rovníka [8]. Rotáciu Slnka pravdepodobne ovplyvňuje aj pravidelne prepólovanie magnetických pólov Slnka po 11 rokoch [9]. Slnečný cyklus sa prejavuje aj zmenou slnečnej aktivity, keďže priamo súvisí s počtom pozorovaných slnečných škvŕn na Slnku.



Obrázok 1.1: Schematické znázornenie štruktúry Slnka (Petra Vaňáčová)

2 Slnčná aktivita

2.1 Zavedenie pojmu

Slnko je magneticky premenná hviezda, ktorá fluktuuje na časovej škále od zlomku sekundy po miliardy rokov.

Slnčné protuberancie, výrony hmoty do koróny, vysoko rýchlostný slnečný vietor a energetické častice pochádzajúce zo Slnka sú určité formy slnečnej aktivity. Zmeny slnečnej aktivity sú poháňané solárnym magnetickým poľom. Dvoma jej podstatnými prejavmi sú elektromagnetické žiarenie a emisia nabitých častíc.

Slnčná aktivita sa mení s 22 ročnou periódou, v priebehu ktorej sa polarita celkového magnetického poľa Slnka vráti do pôvodného stavu [10]. Približne každých 11 rokov môžeme na Slnku pozorovať najväčší výskyt slnečných úkazov (napr. slnečné škvrny) súvisiacich so slnečnou aktivitou. Takéto obdobie nazývame slnečným maximom a naopak obdobie s nižšou slnečnou aktivitou nazývame slnečné minimum. Základný 11-ročný cyklus slnečnej aktivity bol objavený Schwabem [11].

2.1.1 Výrony hmoty do koróny

Ak je Slnko v období silnej slnečnej aktivity, vytvárajú sa na ňom miesta so silným magnetickým poľom (aktívne oblasti), v ktorých prebiehajú javy ako výtrysky koronálnej hmoty, vzplanutia röntgenového žiarenia, erupcie a pod. Slnečná erupcia je masívna explózia v slnečnej atmosfére prevádzajúca náhlu premenu energie magnetického poľa (rekonexiu) na kinetickú alebo vnútornú energiu plazmy. Obvykle ku nej dochádza v oblastiach s lokálne zvýšenou aktivitou napr. v oblastiach slnečných škvŕn, kde sú splnené podmienky pre existenciu slučiek magnetických polí vypínajúcich sa vysoko do koróny. Náhodné pohyby vyvolané konvekciou spôsobujú vznik zložitých magnetických polí. Tie obsahujú veľké množstvo energie, rádovo 10^{25} J. Ak dôjde ku prekročeniu rovnovážnej hranice, magnetické pole náhle zmení konfiguráciu na konfiguráciu s menším množstvom energie, pričom prebytočná energia sa uvoľní. Tento prechod do novej konfigurácie trvá maximálne niekoľko hodín no zvyčajne je to v desiatkach minút. Dôjde ku ohriatiu koronálneho materiálu

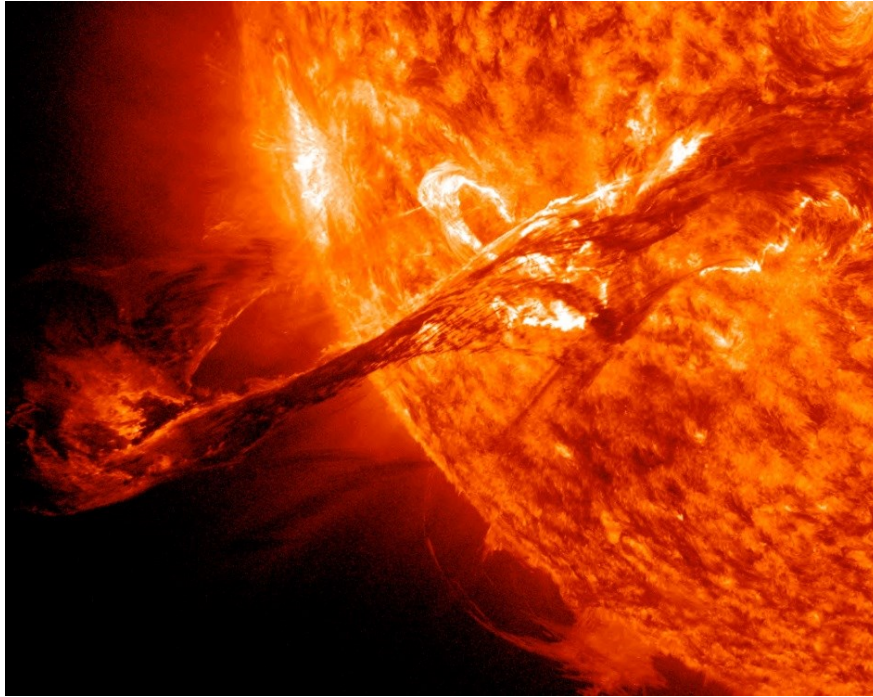
na také teploty, že sa stáva zdrojom röntgenového žiarenia. Pri tomto procese vznikajú rýchlo unikajúce nabitú častice, najmä protóny a elektróny, ktoré padajú späť do slnečnej atmosféry pod miesta erupcie a taktiež sú vypudené do medziplanetárneho priestoru.

Slnečné erupcie sú klasifikované podľa ich toku v oblasti vlnovej dĺžky od 1 do 8 angströmov. Existujú tri kategórie slnečných erupcií. Prvou sú erupcie triedy X. Sú to veľké erupcie, ktoré môžu spúšťať rádiové výpadky a dlhotrvajúce rádiové búrky po celej Zemi. Erupcie triedy M sú erupcie strednej veľkosti. Môžu spôsobiť krátke rádiové výpadky, ktoré postihujú najmä polárne oblasti Zeme. V porovnaní s X a M triedami erupcií sú erupcie triedy C malé a majú len malo viditeľných dopadov na Zem.

Počas slnečnej erupcie, keď pozorujeme slnečné žiary, je možné vidieť náhle uvoľnenie plazmy uzavretej vo svojom vlastnom magnetickom poli zo slnečnej koróny. Tento jav nazývame výron hmoty do koróny tzv. CME (coronal mass ejection). Medziplanetárne CME majú potenciál najviac ovplyvňovať pozemské technológie. CME vznikajú zväčša po erupcii a najlepšie pozorovateľné sú pomocou kozmického koronografu. V období maxima slnečnej aktivity Slnko produkuje približne tri CMEs každý deň a naopak v obdobiach nízkej slnečnej aktivity je pozorovateľná približne jedna CME každých päť dní.

Tento ionizovaný magnetický plyn, ktorý konštantne a radiálne prúdi preč od Slnka nazývame slnečný vietor. Je zložený najmä z protónov a elektrónov so stopovým množstvom ťažších iónov. Hlavné zrýchlenie na nadzvukovú rýchlosť dosiahne slnečný vietor vo vzdialenosti približne 15 polomerov Slnka a v blízkosti orbity Zeme je táto rýchlosť typicky $400 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ s hustotou okolo 5-10 protónov na cm^{-3} [12]. Avšak rýchlosť a hustota slnečného vetra sú podmienené komplexnou štruktúrou koronálneho magnetického poľa.

Výrony hmoty do koróny majú za následok zvýšený tok častíc slnečného vetra, ktoré síce priamy vplyv na Zem nemajú, keďže magnetosféra väčšinu z nich odtieni. Vďaka nej poruchy slnečnej aktivity vzbudia poruchy v zemskej magnetosfére, ktoré nazývame geomagnetická aktivita. Prejavy slnečnej aktivity menia lokálne magnetickú indukciu o hodnoty rádovo desiatky až stovky nanotesla. Tieto zmeny sú približne sto až tisíckrát menšie ako je stredná hodnota indukcie (25 až 65 mikrottesla). Väčšie zmeny už vyvolávajú geomagnetické búrky.



Obrázok 2.1: Aktivácia filamentu často vedúca ku koronálnym výronom hmoty (NASA)

2.1.2 Dopad slnečnej aktivity

Energetické častice pochádzajúce zo Slnka môžu spôsobiť silné polárne žiarenie v oblastiach magnetických pólů Zeme. CME sprevádzané slnečnými erupciami zase môžu narušiť rádiové prenosy, môžu prispievať ku zničeniu satelitov a elektrických rozvodných sietí a tie môžu viesť ku dlho trvajúcim výpadkom prúdu.

2.2 Kozmické počasie

Pojem kozmické počasie označuje podmienky na Slnku a v slnečnom vetre, magnetosfére, ionosfére a termosfére, ktoré môžu ovplyvniť výkonnosť a spoľahlivosť kozmických a pozemských technologických systémov a môžu ohroziť ľudský život alebo zdravie v zmysle ich závislosti od technológii, ktoré môžu byť kozmickým počasím poškodené. Slnečná aktivita je hlavným zdrojom zmien kozmického počasia. CME spolu s náhlym uvoľnením žiarenia pri slnečných erupciách, to všetko spôsobuje rôzne efekty kozmického počasia na Zemi.

Geomagnetické búrky môžu ovplyvniť pozemné systémy ako rozvodnú sieť elektriny, plynovody, ropovody, telekomunikačné káble a pod., kde vytvárajú geomagnetické indukované prúdy. Taktiež boli počas geomagnetických búrok pozorované poruchy v leteckých a námorných navigačných prístrojoch.

Na klasifikáciu intenzity geomagnetických búrok sa používa niekoľko popisných indexov, najpoužívanejším je k-index. K-index vyčísluje poruchy v horizontálnej zložke zemského magnetického poľa s celým číslom v rozsahu 0-9, pričom 1 znamená relatívny pokoj a 5 alebo viac indikuje geomagnetickú búrku. Súvisí s geografickou polohou miesta kde sa zisťuje jeho hodnota. Je odvodený z maximálnych výkyvov horizontálnych zložiek pozorovaných na magnetometri počas trojhodinového intervalu. K-škála je kvázi logaritmická. Prevodná tabuľka z maximálnej fluktuácie ΔB (meraná v jednotkách nanotesla) na k-index sa líši v závislosti od polohy observatória. V praxi to znamená, že observatória na vyššej geomagnetickej šírke vyžadujú vyššie úrovne fluktuácie pre daný k-index. K-index v reálnom čase sa určuje po uplynutí predpísaných 3 hodinových intervaloch. Maximálne kladné a záporné odchýlky počas 3-hodinového obdobia sa spočítajú, aby sa určila celková maximálna fluktuácia. Pre merania z Budkova platí nasledujúca prevodná tabuľka medzi fluktuáciami horizontálneho poľa ΔB a k-indexom pre $k=9$ a $\Delta B = 500\text{nT}$

ΔB [nT]	0	5	10	20	40	70	120	200	330	500
K	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Tabuľka 2.1: Prevodná tabuľka maximálnych fluktuácií ΔB na k-index

3 Vplyv na rozvodnú sieť

3.1 Fyzikálne objasnenie

Silný prúd častíc unikajúcich vysokou rýchlosťou zo Slnka spôsobuje poruchy v zemskom magnetickom poli. Počas geomagnetickej búrky dochádza ku narušeniu ionosféry, v ktorej sa odrážajú rádiové elektromagnetické vlny, čo počas silných geomagnetických búrok znemožňuje šírenie a odraz elektromagnetickým vlnám od ionosféry. Takto sa narúša spojenie medzi zemou a satelitmi vyslanými na obežnej dráhe Zeme.

Okrem prúdových systémov v ionosfére počas geomagnetických porúch vznikajú aj prúdové systémy v technologických zariadeniach na zemskom povrchu. Porucha kozmického počasia spôsobuje vznik intenzívnych a rýchlo sa meniacich prúdových systémov v ionosfére, ktoré podľa Biot-Savartovho zákona spôsobujú časovo premenné magnetické polia pozorované ako geomagnetické subbúrky alebo búrky, čo podľa Faradayovho indukčného zákona je vždy sprevádzané elektrickým poľom. Časové zmeny magnetického poľa sú veľké hlavne na miestach s väčšou geomagnetickou šírkou a indukované prúdy sú tam preto značné. Takéto prúdy nazývame geomagnetické indukované prúdy (GIC). GIC môžu spôsobovať problémy, častokrát deštruktívne, ak sa následne dostanú do komponent rozvodnej siete ako napr. transformátorov. Prejavujú sa napr. v rozvodných systémoch v Kanade, severských krajinách Európy a inde. Hlásené sú z období extrémne silných geomagnetických búrok. Vďaka práci [2] bolo preukázané, že slnečná aktivita a jej vplyv na elektrickú rozvodnú sieť je podstatný aj v oblastiach ďaleko od magnetického póla, a to konkrétne v Grécku.

GIC boli vyšetované na území ČR v práci [13], kde boli porovnávané merania geoelektrického potenciálu na ropovode Družba s jeho modelom získaným z merania geomagnetického poľa. Obe veličiny boli vo vynikajúcej zhode. Výrazne výkyvy hodnôt geopotenciálu boli registrované v okamžikoch, kedy vo Švédsku dochádzalo k lokálnym black-outom rozvodnej siete. Je teda zrejmé, že GIC sa Českej republike nevyhýbajú.

3.2 Udalosti vo svete

Už v roku 1928 v práci Marconiho [14] bolo uvedené, že počas prípadov kedy došlo ku strate rádiových signálov, boli pozorované veľké slnečné škvrny, intenzívne polárne žiary a geomagnetické búrky.

Slnečná búrka v roku 1859, známa ako Carringtonova udalosť [15] bola silná geomagnetická slnečná búrka behom 10. slnečného cyklu. Koronálny výron hmoty zasiahol zemskú magnetosféru a vyvolal jednu z najväčších zaznamenaných geomagnetických búrok. Erupcia v slnečnej fotosfére bola pozorovaná a zaznamenaná anglickými astronómami Richardom Christopherom Carringtonom [15] a Richardom Hodgsonom [16]. V dňoch 1. až 2. septembra bola polárna žiara viditeľná po celom svete na severnej pologuli smerom ku juhu až v Karibiku. Telegrafné systémy po celej Európe a Severnej Amerike zlyhali. Na telegrafných stĺpoch preskakovali výboje.

15. mája 1921 došlo v New Yorku ku skolabovaniu mestskej železnice a následne požiaru riadiacej veže na 57th Street a Park Avenue [17]. Dôvodom bola prítomnosť silných geomagneticky indukovaných prúdov. Vo Švédsku došlo ku požiaru telefónnej ústredne a vo väčšine Európy bola narušená kabelová komunikácia.

13 marca 1989 došlo ku 9 hodinovému výpadku elektriny v Kanadskej provincii Quebec [18]. Zmeny v magnetickom poli Zeme spôsobili indukované prúdy v rozvodnej sieti. Spôsobia prepätie, vyvolajú automatické odpojovanie preťažených segmentov siete a môžu viesť až ku kaskádnému kolapsu rozvodnej siete na veľkom území. Sieť v oblasti Jamesonovho zálivu prešla do režimu offline za menej ako 90 sekúnd, čo bol druhý masívny výpadok prúdu v priebehu 11 mesiacov.

V marci v roku 1989 bol značne poškodený 500 kV výstupný transformátor jadrovej elektrárne Salem v New Jersey [19].

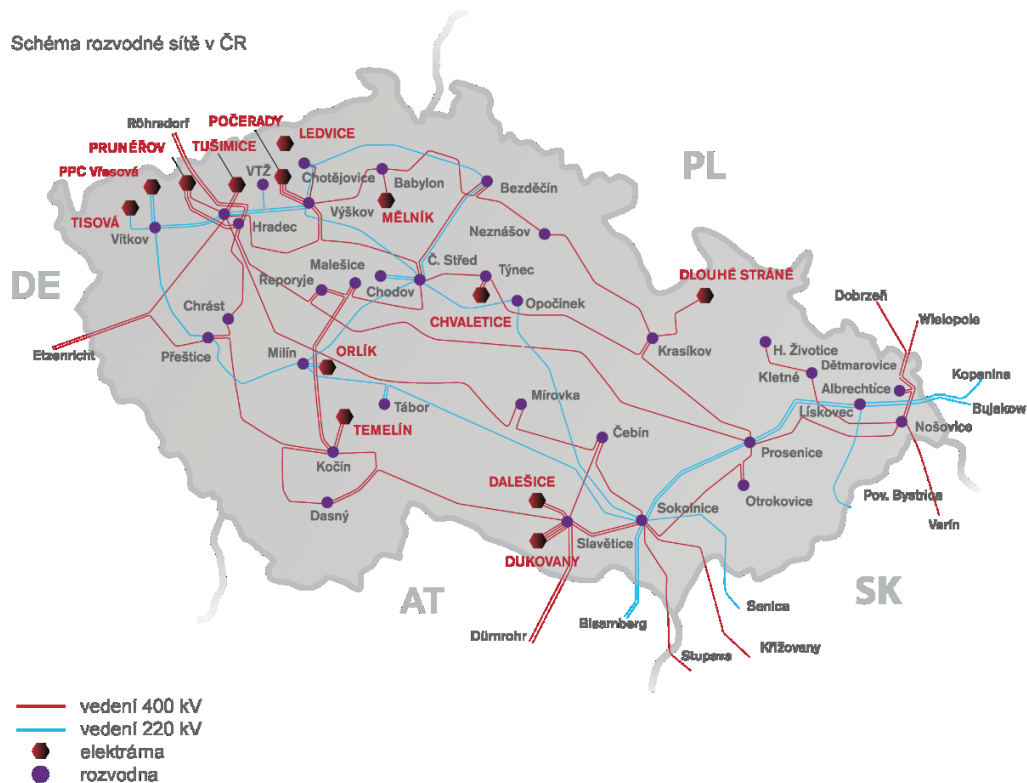
Ku poruche veľkého juhoafrického generátorového transformátora došlo 3 týždne po geomagnetickej búrke v roku 2003 [19]. Keďže sa značne poškodil, zničili sa dôkazy, ktoré by mohli viesť ku lepšiemu pochopeniu pri postupe vyšetrenia poškodenia po iniciácii geomagneticky indukovaným prúdom.

Početné menšie výpadky energetických rozvodov, navigačných, zabezpečovacích systémov a rádiokomunikácií bývajú zaznamenané nárazovo takmer po každej veľkej erupcii v priemere desaťkrát za jeden slnečný cyklus. Postihované sú najmä transformátory na rozvodných sieťach. GIC s charakteristickou škálou zmeny

rádovo v minútach posúvajú hysteréznú krivku transformátora zostrojeného pre frekvenciu 50 Hz podobne ako rovnomerný prúd, z jadra transformátora vyžaruje magnetický tok, v doskách sa indukujú vírivé prúdy. Medené jadro sa prehrieva, dokonca sa môže roztaviť.

3.3 Česká rozvodná sieť

Elektrická prenosová sústava je systém zariadení, ktoré zaisťujú prenos elektrickej energie od výrobcov ku odberateľom. Hlavnú prenosovú sústavu v Českej republike prevádzkuje štátna spoločnosť ČEPS, a.s. Udržiava, obnovuje a rozvíja 41 rozvodní so 71 transformátormi prevádzajúcimi elektrickú energiu z prenosovej do distribučnej sústavy, a trasy vedenia s napäťovou hladinou 400 kV o dĺžke 3508 km a 220 kV o dĺžke 1910 km. Na nižšie uvedenom obrázku 3.1 je znázornená schéma hlavnej rozvodnej siete v Česku. Údaje o českej rozvodnej sieti sme získali z webovej stránky ČEPS, a.s., uvedenej v zdrojoch [20].



Obrázok 3.1: Schéma rozvodnej siete v Česku (ČEPS, a.s.)

4 Inšpirácia

4.1 Hlavný zdroj informácií

Hlavným námetom na našu prácu bola práca Schrijvera a Mitchell [1] o poruchách v americkej rozvodnej sieti. Vedľajším zdrojom informácií o postupe spracovania problematiky bola práca [21], v ktorej Schrijver a kol. štatisticky analyzovali 11 242 poistných udalostí od roku 2000 do roku 2010, straty zariadení a súvisiace obchodné prerušenia v severo-amerických obchodných organizáciách, ktoré sú spojené s poškodením alebo poruchou elektrickej energie a elektronických zariadení.

V [1] je uvedené, že solárne explózie spôsobujú vznik kozmického počasia. V tejto práci využili retrospektívnu analýzu aby vyčíslili dopad geomagnetickej aktivity na americkú elektrickú sieť počas rokov 1992 a 2010. Zistili, že viac ako 3σ významnosti, čo sú približne 4 % porúch v americkej energetickej sieti nahlásených Americkému Oddeleniu pre Energiu sú pripisované silnej geomagnetickej aktivite a sú spojené s geomagnetickým indukovaným prúdom. Pracovali s 1 216 poruchami uvedenými v NERC-DOE správach. Zoznam hlavných príčin porúch elektrickej siete obsahoval aj rôzne poveternostné podmienky, poruchy operátora, poruchy zariadení a pod.

4.2 Metóda spracovania

Metóda spracovania štúdie bola obdobná s metódou využívanou v epidemiologických štúdiách [22]. Schrijver a Mitchell študovali zoznam porúch od roku 1992 do roku 2010. Pre všetky poruchy z daného zoznamu skúmali vystavenie americkej elektrickej siete geomagnetickej aktivite a skúmali počet porúch v tomto období.

Keďže je sieť dlhá a prevádzkové postupy sa časom menia, aplikovali metódu, ktorá porovnávala poruchy siete v dňoch vysokej geomagnetickej aktivity s poruchami, ktoré nastali v dni nižšej geomagnetickej aktivity pričom všetky ostatné podmienky boli rovnaké. Vytvorili dve kontrolné vzorky s rovnakou dĺžkou. Dátumy týchto vzoriek vyberali tak, aby boli blízke dátumom s vysokou slnečnou aktivitou. Pri výbere kontrolných vzoriek museli vylúčiť poruchy, ktoré sa týkali podmienok

súvisiacich s počasím, vandalizmu a pod. Očividne takéto poruchy nesúviseli s podmienkami na Slnku a v geosfére.

Porovnávali frekvenciu porúch rozvodnej siete pod vplyvom silného kozmického počasia s poruchami, ktoré nastali počas slabších kozmických zmien počasia, pritom rozvodná sieť bola za oboch prípadov v rovnakých podmienkach. Druhú skupinu kontrolných vzoriek tvoria vzorky, ktoré obsahujú poruchy, ktoré málo alebo skoro vôbec nie sú postihnuté kozmickým počasím. Kontrast medzi týmito dvoma vzorkami im umožnil prisúdiť, že početnosť porúch zariadení súvisí s kozmickým počasím.

Vybrali 50-denné intervaly počas ktorých bola vysoká hodnota ($dB/dt(30\text{ m})$), kde B je amplitúda indukcie magnetického poľa Zeme a meranie prebieha zakaždým po 30 minútach. Náhodný 50-denný interval, ktorý bol v iný dátum ako ten predchádzajúci, mohol však obsahovať aj dni s vyššou geomagnetickou aktivitou, preto druhou kontrolnou vzorkou boli poruchy počas dátumov s nízkou hodnotou ($dB/dt(30\text{ m})$). Zistili, že počet porúch bol najvyšší v období s najvyššou slnečnou aktivitou a najmenší v období nízkej slnečnej aktivity. Tieto vzorky boli však vybrané pre určité hodnoty geomagnetickej aktivity. Prišli však nato, že pre rôzne hodnoty geomagnetickej aktivity sa výsledky nedajú priamo porovnať, pretože pokrytie v plnej časovej perióde je pre každý zo súborov odlišné.

Začali teda opakovať analýzu pre iný, bežne používaný index, ktorý charakterizuje interakciu geomagnetického poľa s premenným slnečným vetrom. Jedná sa o k -index. V záverečnom teste porovnávali databázu porúch v elektrickej rozvodnej sieti so zoznamom slnečných erupcií vedenom NOAA, kde vyberali len veľké erupcie tried M a X .

Určili si frekvencie porúch v rozvodnej sieti podľa troch kritérií: 1. f_a je interval pre 2-5 dni po vrchole slnečnej erupcie, 2. f_r je 4-dňový interval náhodne vybraný nie však v rámci 50-denného intervalu zvýšenej erupčnej aktivity, 3. f_i je prvý 4-dňový interval pred vybranými referenčnými dňami silnej slnečnej erupcie. Tieto dátumy vybrali pre všetky X a M triedy žiar a zistili, že našli podstatný nárast porúch pár dni po veľkej slnečnej erupcii vzhľadom ku kludnejším intervalom. Vypočítali, že 1,3% zo všetkých porúch sú spôsobené slnečnou aktivitou. Týmto spôsobom štúdie boli schopný vyčíslieť dopad všetkých možných premenných na elektrickú rozvodnú sieť.

Efekty kozmického počasia počas 19-ročného obdobia skúmania boli pomerne slabé. Z grafov uvedených v článku však jasne vidieť jasný nárast porúch v dátumoch

kedy bola slnečná aktivita vyššia. To vedie ku tomu, že stav americkej rozvodnej siete závisí aj od podmienok kozmického počasia.

Výsledkom práce bolo, že zistili štatisticky významné zvyšovanie počtu porúch v dňoch s vyššou geomagnetickou aktivitou. Toto zvyšovanie znamená, že približne 4% nahlásených porúch rozvodnej siete môžeme z väčšej alebo menšej časti pripísať geomagnetickej aktivite.

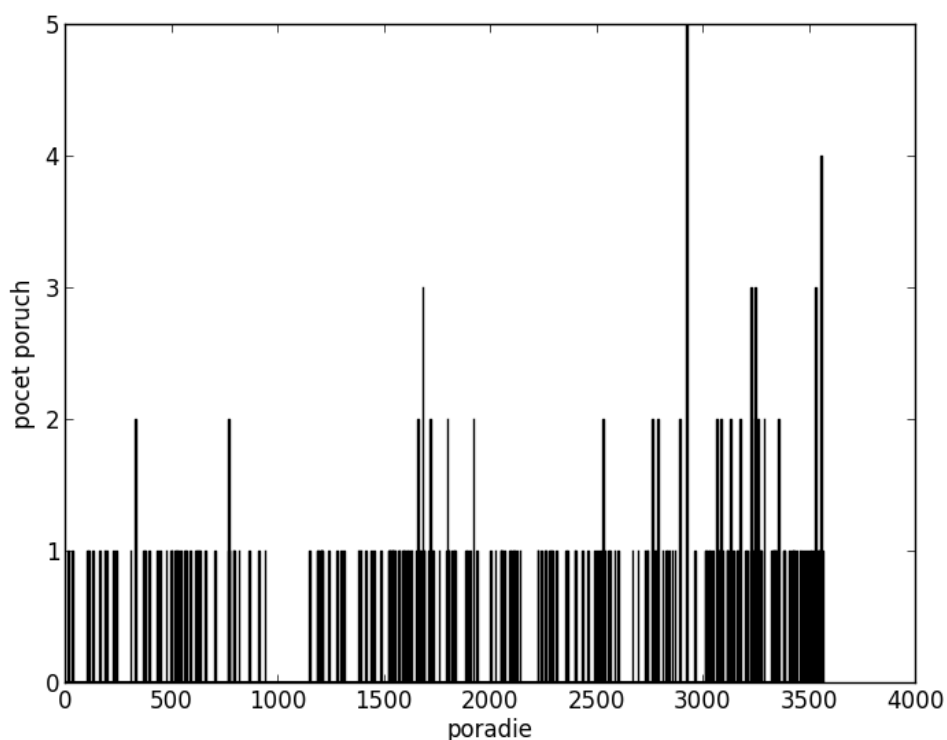
5 Spracovanie

5.1 Dáta

S využitím hlásení ČEPS o poruchách na českej rozvodnej sieti sme mohli študovať možné efekty slnečnej aktivity na českú rozvodnú sieť. Pomocou vhodného indexu aktivity sme posudzovali úroveň slnečnej aktivity, konkrétne sme vychádzali z nepretržitého merania vektora geomagnetického poľa na observatóriu Geofyzikálneho ústavu Akadémie vied ČR v Budkove na Šumave. Naším cieľom je porovnať početnosť nahlásených porúch na kľúčových zariadeniach rozvodnej siete s úrovňou slnečnej aktivity.

5.1.1 Analýza dát z ČEPS, a.s.

Obdržali sme hlásenia ČEPS o poruchách a závadách na kľúčových komponentoch českej rozvodnej siete vo forme tabuľky programu Excel. Poruchy na sieti boli nahlásené od roku 2006 do roku 2015, celkovo ich bolo za toto obdobie 338. Na obrázku 5.1 je znázornený priebeh počtu porúch na českej rozvodnej sieti počas rokov 2006 až 2015, kde poradie na x-ovej osi má význam počtu dní od určitého dátumu ako aj v nasledujúcich grafoch.



Obrázok 5.1: Počet porúch na českej rozvodnej sieti počas rokov 2006-2015

Pred samotným spracovaním dát bolo nutné najskôr uvážiť, či by za daný typ poruchy nejakých spôsobom mohla stáť zvýšená slnečná aktivita. Vopred sme odstránili poruchy, ktoré nastali ešte pred uvedením do prevádzky, taktiež poruchy, za ktoré mohli povodne či privalový dážď, ktoré očividne nemali priamy súvis s aktivitou Slnka. Filtrované dáta sme následne zoradili podľa dátumu kedy došlo ku nahláseniu poruchy či závady na sieti. Počet porúch sme takto zredukovali na 322. To znamená, že za približne 10 rokov bolo nahlásených 322 porúch na kľúčových komponentoch českej rozvodnej siete, na ktorých sa mohla podieľať zvýšená slnečná aktivita.

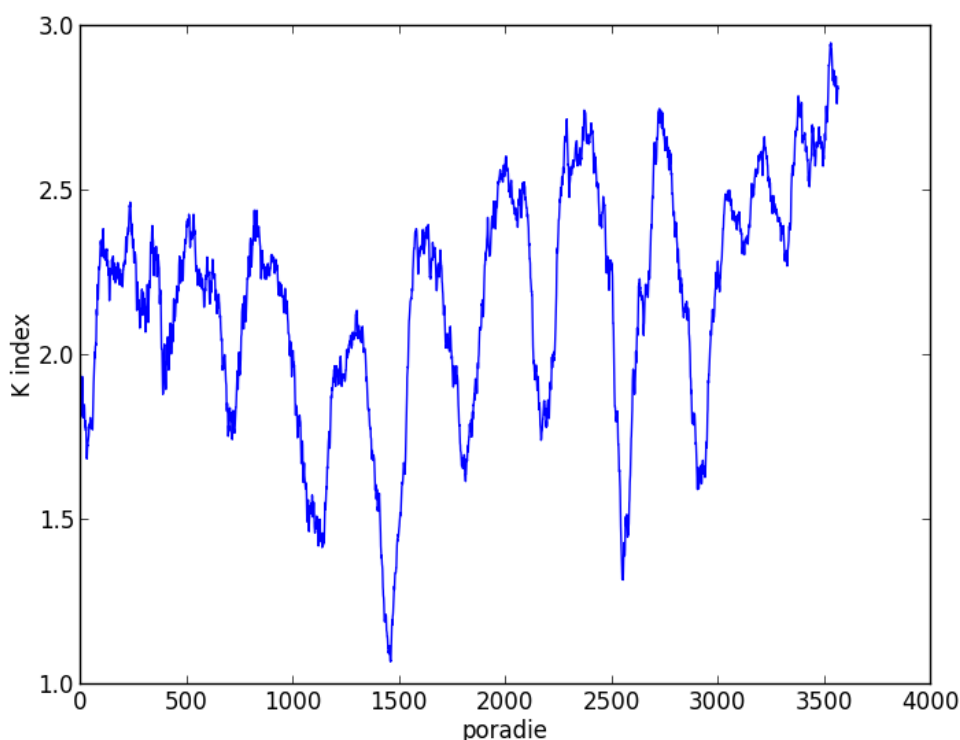
5.1.2 Analýza dát k-indexu

Ďalej sme vyšetrovali geomagnetickú aktivitu, ktorej úroveň je možné posúdiť z meraní vektoru geomagnetického poľa na stanici Budkov v Šumave. Z fluktuácií horizontálnych komponent vektoru geomagnetického poľa sme spočítali index

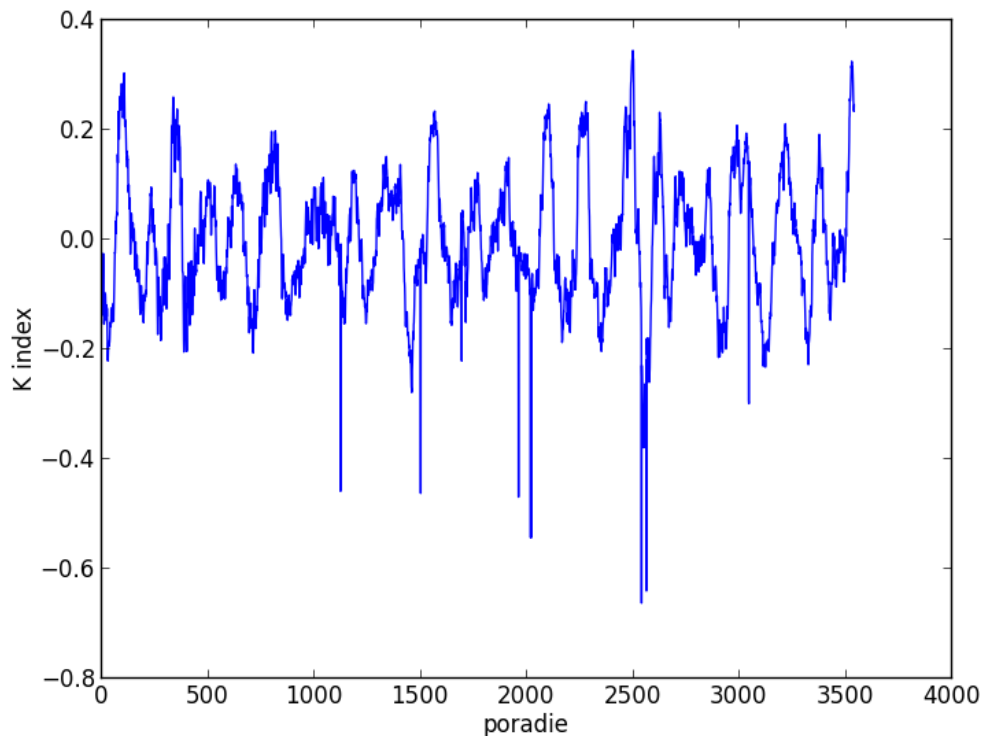
porušenosti magnetického poľa podobne ako je uvedené v tabuľke 2.1. Pre Budkov je hodnota maximálnej fluktuácie ΔB 500 nT. Vlastnú konštrukciu k-indexu z meraní na stanici Budkove sme verifikovali so zverejneným k-indexom pre ďalšiu blízku stanicu v Moskve, a to s dobrou zhodou [23].

Vďaka pozorovaniu polárnej žiary na území ČR sme mohli sledovať, že v období kedy bola aurora pozorovaná boli aj hodnoty k-indexu zvýšené. Priebeh zmien hodnoty k-indexu počas rokov 2006 až 2015 je znázornený na obrázku 5.2.

Z k-indexu sme odstránili ročné a 28-denné periodicity, keďže nás zaujímali náhodne aktivity, ktoré sa udiali na Slnku nie tie, ktoré sa s istou periódou opakujú. Porovnávali sme koreláciu medzi priemernou hodnotou k-indexu za 50 dní a počtom porúch za rovnaké obdobie počas rokov 2006 až 2015. Podrobnejšie vysvetlenie a výsledky sú uvedené v [23]. Opäť na obrázku 5.3 je graficky znázornená závislosť hodnoty filtrovaného k-indexu obdobia jeho merania.



Obrázok 5.2: Hodnota nefiltrovaného k-indexu v priebehu rokov 2006 až 2015



Obrázok 5.3: Hodnota filtrovaného k-indexu v priebehu rokov 2006 až 2015

5.2 Popis postupu práce

Pri spracovaní dát sme postupovali podobným spôsobom ako v [1]. Študovali sme zoznam nahlásených závad a porúch na českej rozvodnej sieti od ČEPS, a.s.

Disponovali sme dátami s k-indexom, ktoré boli pôvodné ale aj upravenými dátami, z ktorých sme odstránili ročnú periodicitu, ktorá je spôsobená obehom Zeme okolo Slnka a zmenou sklonu slnečnej rotačnej osy voči ekliptike a 28-dennú periodicitu odpovedajúcu nerovnomernému rozdeleniu slnečnej aktivity v dôsledku otáčania Slnka okolo vlastnej osy. Vo všetkých analýzach k-indexu použitých v našej práci sme testovali dáta nefiltrované aj filtrované. Avšak väčší zmysel majú dáta zbavené ročnej a 28-dennej periodicity. Ich význam je dôležitý, keďže sme odfiltrovali zmeny geomagnetickej aktivity, ktoré nesúviseli s náhodnými zmenami vyvolanými erupčnou aktivitou Slnka, ale len s efektami, ktorých pôvod je viacmennej

v geometrii problému. Preto v závere kladieme váhu hlavne na výsledky, ktoré získame práve z týchto údajov.

Pre prefiltrované poruchy sme skúmali vystavenie českej elektrickej siete geomagnetickej aktivite. Porovnávali sme obdobia zvýšenej geomagnetickej aktivity s dvoma kontrolnými vzorkami s odlišnými úrovňami vystavenia geomagnetickej aktivite, kde jedna vzorka bola vybraná náhodne zo všetkých a druhá kontrolná vzorka bola pre zníženú slnečnú aktivitu. Toto porovnávanie prebiehalo pomocou rôznych metód štatistickej analýzy.

V programovacom jazyku Python 2.7. sme vytvorili program, ktorý dané dáta spracoval a pracoval s nimi podľa našich potrieb. Vykreslili sme graf, ktorý zobrazuje zmenu k-indexu počas obdobia jeho merania. Z tejto závislosti sme určovali kedy bola geomagnetická aktivita zvýšená resp. znížená. Program sme nastavili tak, aby sme mohli ľubovoľne meniť dĺžku okna intervalu, to znamená ľubovoľnú dĺžku intervalu, ktorý obsahuje dané lokálne maximum či minimum geomagnetickej aktivity. Z výstupu programu sme zhotovili tabuľky, na ktorých sú prehľadne zobrazené výsledky jednotlivých testov. Nakoniec sme testovali platnosť hypotézy zvýšenej poruchovosti českej rozvodnej siete počas zvýšenej geomagnetickej aktivity.

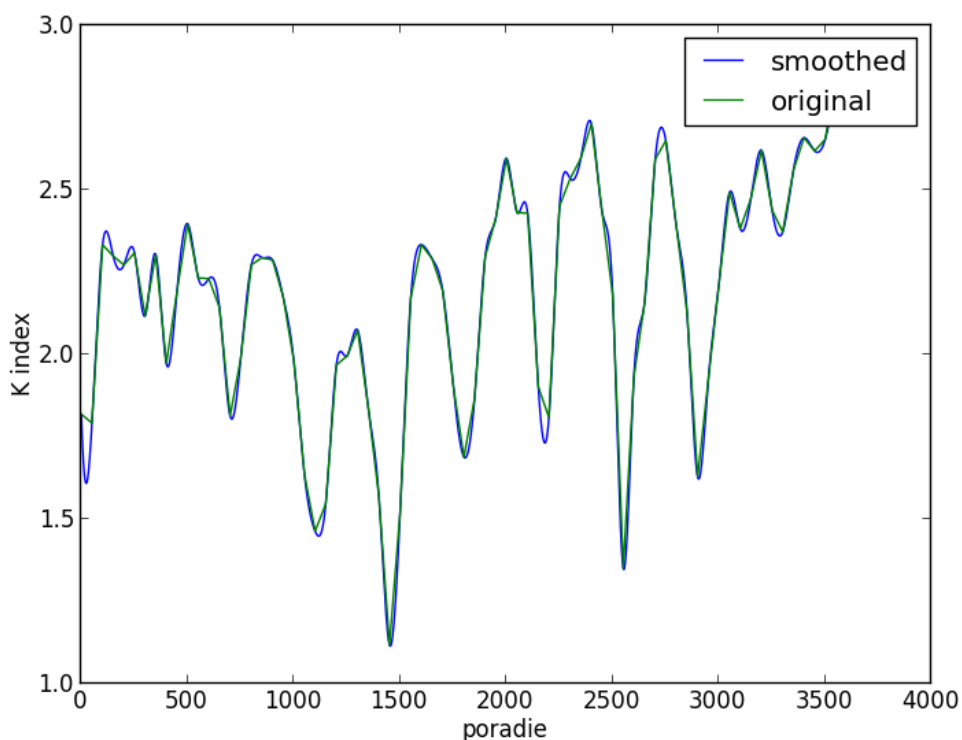
5.3 Výpočtový algoritmus

Za účelom efektívneho spracovania dát sme vytvorili algoritmus na ich spracovanie. Kód sme napísali v programovacom jazyku Python 2.7. Okrem nástrojov, ktoré obsahuje štandardná knižnica sme využívali balíčky NumPy, SciPy a csv. Tieto knižnice nám uľahčili numerické výpočty, prácu s tabuľkami a databázami. Pri vykresľovaní grafov bolo nutné mať nainštalovaný balíček matplotlib.

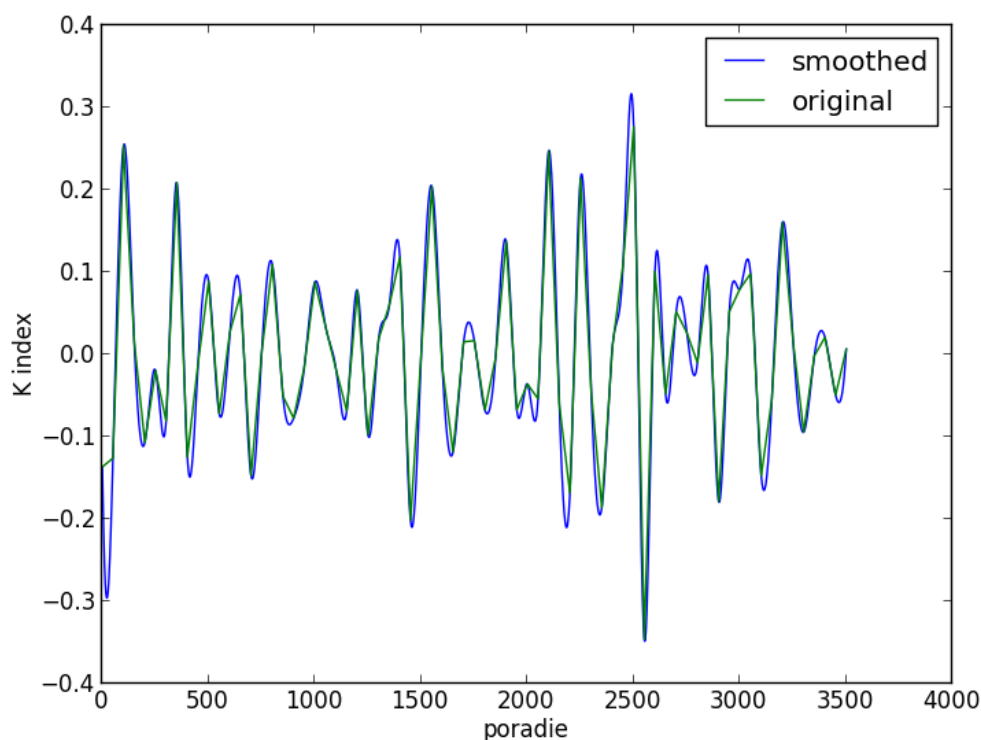
5.3.1 Príprava

Vstupné dáta tvoril textový súbor s hodnotami k-indexov a dátumom ich namerania. Celkovo bolo týchto hodnôt 3876. Na určenie maximálnych a minimálnych hodnôt k-indexu, a teda určenie zvýšenej či zníženej slnečnej aktivity, počas obdobia kedy bol meraný bolo vhodné vykresliť si graf, ktorý je na obrázku 5.4 a graf na obrázku 5.5,

na ktorých je jasne vidieť zmenu hodnoty k-indexu počas tohto obdobia. Túto závislosť sme následne vyhladili, aby sme boli schopní pomocou programu Python 2.7 numerickým derivovaním nájsť jej prvú a druhú deriváciu. Extrémne hodnoty k-indexu sme hľadali pomocou prvých derivácií blízkyh nule. Kladná resp. záporná hodnota k-indexu vypovedá o type extrému, a teda či sa jedná o minimum alebo maximum. Tieto derivácie uložili do textového súboru pre ďalšie spracovanie.



Obrázok 5.4: Interpolovaná a vyhladená závislosť nefiltrovaného k-indexu od obdobia merania



Obrázok 5.5: Interpolovaná a vyhladená závislosť filtrovaného k-indexu od obdobia merania

5.3.2 Popis programu

Na vstupe sme načítali textový súbor s dátumom merania, hodnotami k-indexu, počtom porúch, a prvými a druhými deriváciami k-indexu v závislosti od dátumu merania.

Ďalej sme hľadali extrémne hodnoty k-indexu tak, že sme prehľadávali pole s prvými deriváciami a hľadali hodnoty blízke nule. Z hodnôt druhých derivácií sme následne zistili, či sa jedná o minimum alebo maximum. Ak sa stalo, že sa dve hodnoty takto vybraných k-indexov nachádzali vo vopred určenom intervale, jednu z nich sme už ďalej z logických dôvodov neuvažovali.

Pre jednotlivé minimá sme utvorili interval s dĺžkou okna, ktorú sme si zvolili ako parameter. Minimum sa nachádzalo v strede tohto intervalu a samotný interval obsahoval hodnoty k-indexu. Vypočítali sme priemernú hodnotu k-indexu pre jednotlivé okná. Zaujímali nás však poruchy, konkrétne počet porúch počas

jednotlivých intervalov. Obdobne sme postupovali pri maximách hodnôt k-indexov. Nakoniec sme zvolili ešte intervaly s rovnakou dĺžkou okna, ktoré sme vybrali náhodne avšak tak aby sa vzájomne neprekrývali. Opäť sme vypočítali priemernú hodnotu k-indexu pre jednotlivé intervaly a taktiež aj počet porúch.

Vďaka porovnaniu počtu porúch počas obdobia so zvýšenou a zníženou slnečnou aktivitou (počet porúch pre maximá a minimá) máme podozrenie že, zvýšený výskyt porúch na sieti je najmä počas zvýšenej slnečnej aktivity viz. stĺpec N_V tabuľky 5.1 a 5.2.

5.4 Štatistické metódy

Užitím rôznych štatistických metód overujeme platnosť hypotéz. Musíme explicitne vyjadriť, či sme s určitou pravdepodobnosťou – hypotézu zvýšeného výskytu závad v období vyššej aktivity zamietli, alebo nie. Taktiež musíme určiť mieru štatistickej významnosti týchto rozdielov, a to uskutočňujeme pomocou vhodnej štatistickej metódy.

V našom prípade sme využívali binomický test, test kontrolnej vzorky, a test bezprostrednosti, v ktorom sme porovnávali počet porúch pred a po dni lokálneho maxima.

5.4.1 Binomický test

Výstup z programu sme overovali rôznymi štatistickými metódami a jednou z nich bol aj binomický test. Binomický test využívame najmä v prípadoch kedy daný jav má len dve predpokladané realizácie, a tie sú rovnako pravdepodobné. Vhodný je aj pre relatívne malú vzorku.

Štatistické testovanie prebieha tak, že vznesieme nulovú hypotézu H_0 a túto sa snažíme testovať. V našom prípade hovorí hypotéza H_0 , že zistený rozdiel početnosti medzi počtom porúch počas zvýšenej a zníženej slnečnej aktivity je dielom náhody. Na zamietnutie hypotézy volíme tzv. mieru štatistickej významnosti α , ktorá udáva pravdepodobnosť, že hypotéza H_0 ešte stále platí. Budeme využívať two-tailed test, pri ktorom uvažujeme, že odchýlka od predpokladanej hodnoty je možná na obidve strany. Pri binomickom teste porovnáваме pravdepodobnosť, že nastala testovaná

hodnota s mierou štatistickej významnosti. Pokiaľ je α_t väčšie ako testovaná pravdepodobnosť, je možné nulovú hypotézu zamietnuť. Ak je menšia nemožno H_0 zamietnuť.

V našom prípade je počet nahlásených porúch závislý od voľby dĺžky intervalu počas nízkej aj vysokej aktivity. Prehľadné zhrnutie je uvedené v tabuľke 5.1 a 5.2. Predpokladáme, že počet porúch v období vyššej a nižšej geomagnetickej aktivity bude rovnaký, preto $H_0: p = 0,5$ (p označuje pravdepodobnosť). Teda $H_1: p \neq 0,5$. Nami zvolená miera signifikancie je 5 %. Pravdepodobnosť P , že pozorovaných prípadov je x a viac sa vypočíta podľa vzorca:

$$P = 2 \sum_{k=x}^n \binom{n}{k} (p)^k (1-p)^{n-k} \quad (5.1)$$

kde x je počet porúch v období vysokej/nízkej/náhodnej aktivity, n je celkový počet porúch, p označuje pravdepodobnosť. Python 2.7. obsahuje štatistickú funkciu `scipy.stats.binom_test`. Je to presný, obojstranný test nulovej hypotézy, že pravdepodobnosť úspechu je P .

Po dosadení určitých hodnôt nám vyjde hodnota pravdepodobnosti P . Ak je menšia ako miera štatistickej významnosti, ktorú sme si zvolili ako 5% môžeme hypotézu H_0 zamietnuť. Platí teda alternatívna hypotéza H_1 , ktorá hovorí, že v období zvýšenej geomagnetickej aktivity je význačne viac porúch vo vedení. Jedná sa teda o štatisticky významný výsledok.

Pre dvojicu nízka slnečná resp. vysoká slnečná aktivita vs. náhodne zvolený interval sme urobili podobný test na určenie štatistickej významnosti.

Štatistickú významnosť je dôležité upresniť zväčšením testovacej vzorky, najmä rozšírením dátového súboru o nahlásených chybách na iných zariadeniach.

Výsledky binomického testu pre filtrované hodnoty k -indexu uvádzame pre prehľadnosť zhrnuté v tabuľke 5.1. Skúmali sme vplyv veľkosti okna intervalu N na počet porúch počas zníženej N_n zvýšenej N_v a náhodne zvolenej N_r intenzite slnečnej aktivity. Výstupom tohto testu sú hodnoty pravdepodobností pre jednotlivé dvojice nízka-náhodná aktivita P_{n-r} , náhodná-vysoká aktivita P_{r-v} a najdôležitejšia hodnota pravdepodobnosti pre dvojicu nízka-vysoká slnečná aktivita P_{n-v} . Obdobné značenie je použité v tabuľke 5.2 pre nefiltrované hodnoty k -indexu.

N [d]	N_n	N_r	N_v	P_{n-r}	P_{r-v}	P_{n-v}
10	11	6	19	0,332	0,015	0,201
30	27	31	50	0,694	0,045	0,012
50	41	43	72	0,913	0,009	0,005
70	70	81	102	0,416	0,139	0,018
100	82	109	124	0,006	0,359	0,004

Tabuľka 5.1: Analýza filtrovaných dát k-indexu metódou binomického testu

N [d]	N_n	N_r	N_v	P_{n-r}	P_{r-v}	P_{n-v}
10	5	7	8	0,774	1,000	0,581
30	20	31	25	0,161	0,504	0,551
50	39	46	56	0,515	0,373	0,100
70	51	50	74	1,000	0,038	0,049
100	83	63	100	0,116	0,005	0,237

Tabuľka 5.2: Analýza nefiltrovaných dát k-indexu metódou binomického testu

5.4.2 Štúdia prípadov a kontrol

Metóda kontrolnej vzorky (case-control study) je typ epidemiologickej výskumnej štúdie, v ktorej dve existujúce skupiny líšiac sa výsledkom sú porovnávané na základe nejakého predpokladaného kauzálneho atribútu. Pozorovacie štúdie sú štúdie, v ktorých subjekty nie sú náhodne vybrané do exponovaných resp. neexponovaných skupín. Skôr sú subjekty pozorované za účelom zistenia expozície a ich výsledného stavu.

Časté využitie nachádza pri identifikovaní faktorov, ktoré môžu prispieť ku určitému zdravotnému stavu. Potom sa jedná o porovnávanie jedincov, ktorí spĺňajú túto podmienku resp. chorobu (prípady) s pacientami, ktorí danú podmienku nespĺňajú (kontroly), a teda netrpia chorobou ale sú inak podobné.

V našom prípade sme počítali relatívne riziko, že počet porúch počas zvýšenej geomagnetickej aktivity je značne väčší ako počas zníženej geomagnetickej aktivity. Relatívny risk R vypočítame ako :

$$R = \frac{a}{(a+b)} / \frac{c}{(c+d)} \quad (5.2)$$

kde a je počet dní so závadou, b je počet dní bez závady obidva pre intervaly so zvýšenou slnečnou aktivitou. Pre intervaly so zníženou slnečnou aktivitou je c počet dní so závadou a d počet dní bez závady.

Tento pomer hovorí o tom koľkokrát viac je pravdepodobné, že poruchy na rozvodnej sieti nastávajú v období zvýšenej slnečnej aktivity. V prehľadnejšej forme uvádzame výsledky v tabuľke 5.3 a 5.4, kde sme používali rovnaké značenie ako v prípade tabuliek 5.1 a 5.2 pre binomický test.

N [d]	N_n	N_r	N_v	R
10	11	6	19	1,73
30	27	31	50	1,85
50	41	43	72	1,77
70	70	81	102	1,46
100	82	109	124	1,51

Tabuľka 5.3: Analýza filtrovaných dát k-indexu metódou kontrolnej vzorky

N [d]	N_n	N_r	N_v	R
10	5	7	8	1,60
30	20	31	25	1,25
50	39	46	56	1,44
70	51	50	74	1,45
100	83	63	100	1,21

Tabuľka 5.4: Analýza nefiltrovaných dát k-indexu metódou kontrolnej vzorky

5.4.3 Test bezprostrednosti

Posledný zjednodušený test slúžil ku bezprostrednému určeniu vplyvu zvýšenej slnečnej aktivity na rozvodnú sieť. Volili sme rôzne dĺžky intervalov obsahujúcich maximá a minimá opäť zvlášť pre filtrované a nefiltrované dáta.

Pre dni s lokálnymi maximami aktivity sme zvolili interval dĺžky okna N tak, že jeho stred je v príslušnom dátume. Pre tieto stredové intervaly sme spočítali celkový počet závad N_{stred} . Ďalej sme zvolili dva rovnako dlhé intervaly, pričom jeden na danom maxime začína a druhý končí, pre ktorý sme tiež spočítali celkový počet závad N_{pred} a N_{po} . Tieto trojice sme porovnali binomickým testom a vypočítali case-control test pre intervaly pred maximom aktivity a intervaly po maxime aktivity. Opäť výsledky uvádzame v tabuľkách 5.5 a 5.6

N [d]	N_{pred}	N_{stred}	N_{po}	P_{pr-st}	P_{st-po}	P_{pred-po}	R
10	12	13	19	1,000	0,377	0,281	1,583
30	43	52	50	0,412	0,921	0,534	1,412
50	59	83	72	0,053	0,422	0,294	1,220
70	79	108	102	0,040	0,730	0,102	1,291
100	110	123	124	0,432	1,000	0,395	1,127

Tabuľka 5.5: Analýza filtrovaných dát k-indexu metódou zjednodušeného testu

N [d]	N_{pred}	N_{stred}	N_{po}	P_{pr-st}	P_{st-po}	P_{pred-po}	R
10	14	14	10	1,000	0,541	0,541	0,714
30	31	33	37	0,901	0,720	0,545	1,194
50	50	57	61	0,562	0,783	0,343	1,220
70	53	66	74	0,271	0,554	0,076	1,396
100	81	90	100	0,540	0,514	0,180	1,235

Tabuľka 5.6: Analýza nefiltrovaných dát k-indexu metódou zjednodušeného testu

6 Diskusia

Spôsob našej analýzy porúch nahlásených ČEPS, a.s., na českej elektrickej sieti a intenzity geomagnetickej aktivity bol veľmi podobný s postupom práce Schrijvera a Mitchell [1], ktorým sme sa pri spracovaní danej témy do veľkej miery inšpirovali. Pracovali sme však výrazne s menším počtom závad nahlásených na českej rozvodnej sieti v porovnaní s počtom závad nahlásených na americkej rozvodnej sieti. Približne na 4000 dní, počas ktorých sa zaznamenávali dané poruchy, ich bolo nahlásených len okolo 400. Vopred sme vylúčili poruchy, ktoré nemohli byť spôsobené dopadom zvýšenej slnečnej aktivity: napr. záplavy, privalové dažde a pod. Taktiež sme ďalej nepracovali so závadami, ktoré nastali ešte pred uvedením komponenty do systému.

Presnejších výsledkov by sme mohli dosiahnuť získaním podrobnejších informácií o poruchách na sieti prípadne zväčšením dátovej základne, ktoré je v našom prípade 9 rokov. Napriek tomu, že v zemepisnej šírke, v ktorej sa nachádza Česká republika, sa nepredpokladá taký dopad zvýšenej slnečnej aktivity ako pre severnejšie krajiny, výsledok našej práce túto možnosť nevylučuje. Taktiež v práci Zoisa [2], ktorý skúmal slnečnú aktivitu a jej dopad na grécku elektrickú sieť, je uvedené, že existuje štatistická korelácia medzi slnečnou aktivitou definovanou pomocou rôznych novo definovaných dlhodobých indexov slnečnej aktivity a ročným počtom porúch transformátorov.

Kód, ktorý sme vytvorili v programovacom jazyku Python 2.7 nám uľahčoval analýzu dát a pomocou neho sme boli schopní naprogramovať rôzne analytické a štatistické metódy, ktorými sme dané dáta spracovávali. V programe sme zvolili za dva voľné parametre dĺžku okna intervalu a hladinu štatistickej významnosti. Podľa potreby sme menili najmä veľkosť okna intervalu v rozmedzí od 10 dňových intervalov do 100 dňových intervalov. V závislosti na veľkosti týchto intervalov sme vykonávali rôzne štatistické testy na overenie platnosti hypotézy H_0 o nesúvislosti zvýšenej geomagnetickej aktivity s poruchami transformátorov. Výstupom programu sú tabuľky 5.1 až 5.6, v ktorých sú výsledky testov prehľadné zhrnuté.

Pri spracovávaní sme pracovali jednak s hodnotami k-indexu, ktoré boli vypočítané z hodnoty geomagnetickej aktivity a taktiež s rovnakými hodnotami, z ktorých sme odstránili ročné a 28-denné periodicity. Z tabuliek 5.1 a 5.2 pre

nefiltrované hodnoty k-indexu porušenosti magnetického poľa je vidieť pri binomickom teste, že hodnota P_{n-v} pre dvojicu nízka-vysoká aktivita presahuje nami stanovenú hladinu štatistickej významnosti 5% čo následne implikuje, že hypotézu H_0 nemôžeme s danou pravdepodobnosťou zamietnuť. Preto usudzujeme, že hodnoty v tabuľke 5.2 sú zväčša nepoužiteľné pre našu štúdiu, keďže okrem efektov slnečnej erupcie obsahuje aj ďalšie efekty s iným pôvodom, a preto sú tieto výsledky skreslené. Pre náhodne vybraný interval sa hodnoty počtov porúch pohybujú medzi hodnotami porúch pre nízku a pre vysokú aktivitu, čo je očakávané. Hodnoty pravdepodobnosti pre dvojice náhodná-nízka a náhodná-vysoká aktivita opäť v oboch prípadoch k-indexov dávajú hodnoty väčšie ako 0,05, čo je očakávané, okrem jedného prípadu, ktorý je skôr považovaný za náhodu. Pri analýze filtrovaných hodnôt k-indexov a počtu nahlásených porúch je z tabuľky 5.1 vidieť, že tieto dáta potvrdzujú hypotézu H_1 , sú významné keďže podávajú informáciu o zmene geomagnetickej aktivity súvisiacej s náhodnými zmenami vyvolanými erupčnou aktivitou Slnka. Jedine v prípade 10 dňového intervalu je α_t menšia ako vypočítaná P_{n-v} . To môže byť v dôsledku toho, že interval zahŕňajúci len 10 dní je príliš krátky na určenie významnosti vplyvu aktivity Slnka na poruchovosť rozvodnej siete.

Pri analýze dát testom kontrolnej vzorky je smerodajným údajom hodnota relatívne risku R , ktorú sme opäť určovali pre jednotlivé intervaly pre dáta filtrované aj nefiltrované. Z tabuľky 5.4 vidieť, že hodnoty relatívneho risku pre nefiltrované dáta sú 1,2 až 1,6. To znamená, že počet porúch pri zvýšenej geomagnetickej aktivite bol vyšší, no aj napriek tomuto nie je súvislosť medzi intenzitou aktivity a závadami na komponentoch siete významná. Výsledky case-control testu pre filtrované dáta uvádzame v tabuľke 5.3, ktorá ukazuje že, relatívny risk dosahuje hodnoty väčšie ako 1,5. Iba v prípade 70 dňového intervalu je hodnota R približne 1,46. Táto hodnota relatívneho risku hovorí, že je 1,46 krát pravdepodobnejší výskyt porúch počas zvýšenej slnečnej aktivity ako počas zníženej slnečnej aktivity.

V poslednom teste sme porovnávali počet nahlásených porúch v závislosti od voľby maxima k-indexu. Vytvárali sme tri rôzne intervaly. V jednom bola hodnota extrémnej hodnoty k-indexu na začiatku, v druhej v strede a v tretom na konci intervalu. Takto sme mohli sledovať vplyv bezprostredne pred počas a aj po zvýšenej aktivite slnka. Opäť sme analyzovali jednak nefiltrované hodnoty k-indexu ako aj filtrované. Pri nefiltrovaných hodnotách sa neprejavila žiadna súvislosť medzi počtom

porúch a voľbou intervalu. Dokonca pri 10 dňovom intervale je počet porúch po maxime menší ako pred maximom hodnoty k- indexu. Pre prípad filtrovaných dát sme dostali obdobné hodnoty, hoci hodnoty relatívneho riziku pri 10 a 30 dňovom intervale majú hodnotu približne 1,5. Vo väčšine prípadov je vidieť, že počet porúch po danom maxime, teda po extrémne zvýšenej hodnote slnečnej aktivity je väčší ako pre prípad kedy je poruchovosť pozorovaná pred obdobím tohto maxima. Počet porúch pre stredové intervaly je približne rovnaký ako počet porúch v období po maxime geomagnetickej aktivity.

Pomocou týchto testov sme dospeli k záveru, že pre nefiltrované dáta nemôžeme uvažovať spojitosť zvýšenej aktivity Slnka a závad na elektrickej sieti. Jedná sa najmä o to, že nefiltrované dáta k-indexu vypovedajú o zmene geomagnetickej aktivity, ktorá súvisí s periodicky sa opakujúcimi zmenami vyvolané erupčnou aktivitou Slnka (tie nás nezaujímajú) a s efektami, ktoré súvisia s geometriou problému. Celkovo je viac logické pracovať a zohľadňovať výsledky, ktoré udávajú hodnoty k-indexu zbaveného ročnej a 28 dennej periodicity, keďže tie naopak udávajú hodnoty geomagnetickej aktivity súvisiacej len s náhodnými zmenami v slnečnej aktivite. Pre tieto hodnoty sa ukazuje istá súvislosť medzi silnou geomagnetickou aktivitou a poruchami na elektrickej sieti v Českej republike.

Záver

V našej bakalárskej práci sme sa zaoberali dopadom zvýšenej slnečnej aktivity, ktorá ma vplyv na kozmické počasie a následne na zvýšenú geomagnetickú aktivitu na Zemi, na českú rozvodnú sieť resp. snažili sme sa zistiť, či existuje vzťah medzi poruchami na kľúčových komponentoch napr. transformátoroch na rozvodnej sieti a zvýšenou geomagnetickou aktivitou počas rokov 2006 až 2015.

Zreprodukovali sme postup práce Schrijvera a Mitchella z článku [1]. Ku vlastnému spracovaniu dát sme vytvorili kód v programovacom jazyku Python 2.7, pomocou ktorého sme boli schopní manipulovať s dátami v podobe textových súborov. Pre účely riešenia sme vyvinuli parametrizovateľný programový balík, ktorý umožnil vykonať a vyhodnotiť štatistické spracovanie pre rôznu voľbu voľných parametrov (napr. dĺžka korelačného okna, voľba hladiny štatistickej významnosti a ďalšie).

Následne sme s využitím hlásení ČEPS, a.s., o poruchách a závadách na kľúčových komponentoch českej rozvodnej siete vykonali štúdiu možných efektov slnečnej aktivity na českú rozvodnú sieť. Cieľom bolo porovnať početnosť hlásení porúch na kľúčových zariadeniach rozvodnej siete s úrovňou slnečnej aktivity (jej úroveň bola posudzovaná prostredníctvom vhodného indexu aktivity) sofistikovanejšími štatistickými metódami. Jednalo sa najmä o použitie binomického testu a metódy case-control.

Výsledkom našej štúdie je zamietnutie hypotézy, ktorá hovorí, že česká rozvodná sieť nie je citlivá na kozmické počasie, a to s pravdepodobnosťou viac ako 95%. Kontingenčné tabuľky 5.1 až 5.6 obsahujú výsledky všetkých testov, pomocou ktorých sme dospeli ku tomuto záveru.

Naša analýza však nepreukazuje priamu koreláciu medzi zvýšenou geomagnetickou aktivitou a poruchovosťou českej elektrickej rozvodnej siete. Aby sme mohli túto skutočnosť overiť bolo by nutné analyzovať geomagnetický indukované prúdy, modelovať procesy prebiehajúce na Slnku počas zvýšenej slnečnej aktivity, mať prístup ku väčšej vzorke porúch na českej rozvodnej sieti a pod.

Vzťah medzi poruchami v elektrickej rozvodnej sieti a výraznou slnečnou a geomagnetickou aktivitou si zaslúži pozornosť a podporu výskumného programu na

skúmanie kozmického počasia a jeho dopadu na Zem ako tiež vývoj prognostického systému kozmického počasia. Takýto výskum by nám umožnil lepšie pochopiť akú ochranu by sme potrebovali proti nežiadúcim efektom zvýšenej slnečnej aktivity ako nastali v posledných desaťročiach.

Zoznam literatúry

- [1] C. J. Schrijver and S. D. Mitchel. Disturbances in the U.S. electric grid associated with geomagnetic activity. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 7, 2013.
- [2] I.P. Zois. Solar activity and transformer failures in the Greek national electric grid. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 17, 2013.
- [3] Brož, M. a M. Šolc (2013). *Fyzika sluneční soustavy*. Matfyzpress, Praha. ISBN 978-80-7378-236-8.
- [4] J. Christensen-Dalsgaard a kol. The Current State of Solar Modeling. *Science*. 272,1996.
- [5] J. Christensen-Dalsgaard, D.O. Gough, M.J. Thompson. The depth of solar convection zone. *Astrophysical Journal*. 378,1991.
- [6] R. Mitalas, K.R. Sills. On the photon diffusion time scale for the sun. *Astrophysical Journal*. 401, 1992.
- [7] M. S. Miesch, A. S. Brun, M. L. DeRosa, J. Toomre. Structure and Evolution of Giant Cells in Global Models of Solar Convection. *The astrophysical Journal*, 673, 2008.
- [8] Ch. Scheiner. *Rosa Ursina*. Rosa Ursina. 1630.
- [9] A. S. Brun. On the interaction between differential rotation and magnetic fields in the Sun. *Solar Physics*. 220, 2004.
- [10] P. Charbonneau. *Dynamo Models of the Solar Cycle*. *Solar Physics*. 7, 2010.
- [11] M. Schwabe. *Sonnenbeobachtungen im Jahre 1843*. Von Herrn Hofrath Schwabe in Dessau. *Astronomische Nachrichten*. 21, 1844.
- [12] Antia, H. M., A. Bhatnagar a P. Ulmschneider (2003). *Lectures on solar physics*. Springer, New York. ISBN 978-3-540-01528-4
- [13] P. Hejda, J. Bochníček. Geomagnetically induced pipe-to-soil voltages in the Czech oil pipelines during October–November 2003. *European Space Weather Week*. 23, 2005.

- [14] J. Hlaváčová a A. Dirner. Kozmické žiarenie a jeho vplyv na okolité prostredie. SKALTA, 74, 2012
- [15] R. C. Carrington. Description of a Singular Appearance seen in the Sun on September 1. Monthly Notices of Royal Astronomical Society, 20, 1859.
- [16] R. Hodgson. On a curious Appearance seen in the Sun. Monthly Notices of Royal Astronomical Society. 20, 1859.
- [17] E. W. Cliver, W. F. Dietrich. The 1859 space weather event revisited: limits of solar activity. Journal of Space Weather and Space Climate, 31, 2013.
- [18] The Day the Sun Brought Darkness.
https://www.nasa.gov/topics/earth/features/sun_darkness.html.
[Prístup 2017-04-28].
- [19] Geomagnetic storms and the US power grid
<http://www.swpc.noaa.gov/sites/default/files/images/u33/finalBoulderPresentation042611%20%281%29.pdf>. [Prístup 2017-04-27].
- [20] ČEPS, a.s <http://www.ceps.cz/ENG/Pages/default.aspx>.
[Prístup 2017-04-28].
- [21] C. J. Schrijver, R. Dobbins, W. Murtagh, S. M. Petrinec. Assessing the impact of space weather on the electric power grid based on insurance claims for industrial electrical equipment. Space Weather Journal, 9, (2014).
- [22] S. Lewallen, P. Courtright. Epidemiology in Practise: Case-Control Studies. Community Eye Health. 28, 1998.
- [23] T. Výbošťoková. Vplyv slnečnej aktivity na českú rozvodnú sieť. Študentský projekt, MFF UK, 2016.

Zoznam obrázkov

Obrázok 1.1: Schematické znázornenie štruktúry Slnka (Petra Vaňáčová)	4
Obrázok 2.1: Aktivácia filamentu často vedúca ku koronálnym výronom hmoty (NASA)	7
Obrázok 3.1: Schéma rozvodnej siete v Česku (ČEPS, a.s.)	11
Obrázok 5.1: Počet porúch na českej rozvodnej sieti počas rokov 2006-2015	16
Obrázok 5.2: Hodnota nefiltrovaného k-indexu v priebehu rokov 2006 až 2015	17
Obrázok 5.3: Hodnota filtrovaného k-indexu v priebehu rokov 2006 až 2015	18
Obrázok 5.4: Interpolovaná a vyhladená závislosť nefiltrovaného k-indexu od obdobia merania	20
Obrázok 5.5: Interpolovaná a vyhladená závislosť filtrovaného k-indexu od obdobia merania	21

Zoznam tabuliek

Tabuľka 2.1: Prevodná tabuľka maximálnych fluktuácii ΔB na k-index	8
Tabuľka 5.1: Analýza filtrovaných dát k-indexu metódou binomického testu	24
Tabuľka 5.2: Analýza nefiltrovaných dát k-indexu metódou binomického testu	24
Tabuľka 5.3: Analýza filtrovaných dát k-indexu metódou kontrolnej vzorky	25
Tabuľka 5.4: Analýza nefiltrovaných dát k-indexu metódou kontrolnej vzorky	25
Tabuľka 5.5: Analýza filtrovaných dát k-indexu metódou zjednodušeného testu	26
Tabuľka 5.6: Analýza nefiltrovaných dát k-indexu metódou zjednodušeného testu	26

Zoznam použitých skratiek

CME – Coronal mass ejection – výrony hmoty do koróny

GIC – Geomagnetically induced current – geomagneticky indukovaný prúd