

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Spolehlivostní databáze elektrických zařízení pro jadernou
energetiku**

ABSTRAKT

Cílem této práce je vytvoření spolehlivostní databáze elektrických komponent a posouzení spolehlivosti české přenosové soustavy na základě této databáze a vlastního výzkumu.

Data pro tvorbu spolehlivostní databáze byla získána analýzou dostupných literárních zdrojů. Vlastní výzkum proběhl v několika etapách. Na začátku byl vytvořen program pro zpracování záznamů o síťových přerušeních, následně byly vypočteny spolehlivostní ukazatele české přenosové soustavy a nakonec byly výsledky posouzeny v rámci vlastního výzkumu a se spolehlivostní databází.

KLÍČOVÁ SLOVA

Spolehlivostní ukazatel, intenzita poruch, střední doba poruch, porucha, přenosová soustava, elektrický komponent.

ABSTRACT

The aim of this thesis is to create a reliability database of electrical component and make an evaluation of Czech transmission system's reliability based on this database and own research.

For creating the reliability database I analyzed an available literature. My own research had a several phases. At the beginning I made a program, which works with transmission system outages' records and enables calculation of the most important reliability indicators of electrical component. Finally I compared these indicators within my own scope and the reliability database.

KEY WORDS

Reliability indicator, failure rate, mean outage duration, failure, transmission's system, electrical component.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

V Plzni dne

.....

PODĚKOVÁNÍ

Touto cestou bych chtěl poděkovat své vedoucí diplomové práce Ing. Janě Jiříčkové, Ph.D. za ochotu, vlídný přístup a zejména pomoc se získáním dat ze společnosti ČEPS, a.s., které byly nutné pro provedení vlastního výzkumu.

Mé díky také patří Ing. Luboši Piterkovi za cenné rady, vstřícný přístup a příjemnou spolupráci při konzultacích k této práci.

Poděkování patří i mé rodině a přátelům, kteří mě po celou dobu studia na Západočeské univerzitě podporovali.

OBSAH

OBSAH.....	7
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	9
ÚVOD.....	10
1 TEORIE SPOLEHLIVOSTI.....	11
1.1 DEFINICE SPOLEHLIVOSTI.....	11
1.2 ZÁKLADNÍ POJMY.....	11
1.3 VLASTNOSTI SPOLEHLIVOSTI.....	13
1.4 UKAZATELE SPOLEHLIVOSTI	16
2 SPOLEHLIVOST V ENERGETICE.....	18
2.1 PŘERUŠENÍ.....	18
2.2 VÝPOČET SPOLEHLIVOSTI SÍTÍ.....	19
2.2.1 <i>Intenzita poruch zařízení.....</i>	<i>20</i>
2.2.2 <i>Střední doba poruchy.....</i>	<i>21</i>
2.2.3 <i>Součinitel pohotovosti a prostoje.....</i>	<i>21</i>
3 RELEVANTNÍ SPOLEHLIVOSTNÍ DATA.....	22
3.1 TECHNICKÁ STUDIE VÝZKUMNÉHO INSTITUTU EPRI.....	22
3.1.1 <i>Záměr studie.....</i>	<i>22</i>
3.1.2 <i>Klasifikace informačních zdrojů.....</i>	<i>23</i>
3.2 SEZNAM ZDROJŮ SPOLEHLIVOSTNÍCH DAT.....	23
3.2.1 <i>Dalabeih et al.</i>	<i>23</i>
3.2.2 <i>Hale et al.</i>	<i>26</i>
3.2.3 <i>IEEE.....</i>	<i>27</i>
3.2.4 <i>Horton et al.....</i>	<i>28</i>
3.2.5 <i>Volkman et al.</i>	<i>30</i>
4 POROVNÁNÍ LITERÁRNÍCH ZDROJŮ	31
4.1 POROVNÁNÍ DAT Z DOSTUPNÝCH ZDROJŮ.....	31
4.1.1 <i>Dalabeih et al.</i>	<i>31</i>
4.1.2 <i>Hale et al.</i>	<i>32</i>
4.1.3 <i>IEEE.....</i>	<i>33</i>
4.1.4 <i>Horton et al.....</i>	<i>33</i>

4.1.5	<i>Volkman et al.</i>	34
4.1.6	<i>Shrnutí analýzy dat</i>	34
4.2	SPOLEHLIVOSTNÍ DATABÁZE	35
5	VÝZKUM SPOLEHLIVOSTI PS	35
5.1	CHARAKTER PŘENOSOVÉ SOUSTAVY ČR	36
5.2	SÍŤOVÁ OMEZENÍ – VEŘEJNĚ PŘÍSTUPNÁ DATA	37
5.2.1	<i>Poměr dočasných a trvalých poruch v PS</i>	37
5.2.2	<i>Střední doba poruch přenosových vedení</i>	38
5.2.3	<i>Intenzita poruch přenosových vedení</i>	39
5.3	PLÁNOVANÉ Odstávky – VEŘEJNĚ PŘÍSTUPNÁ DATA	39
5.3.1	<i>Střední doba plánovaných odstávek</i>	40
5.3.2	<i>Intenzita plánovaných odstávek</i>	40
5.3.3	<i>Součinitel prostoje a pohotovosti</i>	41
5.4	SÍŤOVÁ OMEZENÍ – INTERNÍ DATA	41
5.5	VÝPADKY A PORUCHY ZAŘÍZENÍ – INTERNÍ DATA	42
5.6	ZHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ	44
5.6.1	<i>Přehled získaných výsledků</i>	44
5.6.2	<i>Porovnání hodnot se spolehlivostní databází</i>	45
ZÁVĚR	47
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	49
SEZNAM PŘÍLOH	52

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

ČEPS.....	Česká energetická přenosová soustava
ČR.....	Česká republika
ČSN	české státní normy
DREAM.....	Distribution REliability Assessment Model
DS.....	distribuční soustava
EPRI.....	Electric Power Research Institute
FAIDI.....	feeder average interruption duration index
FAIFI	feeder average interruption frequency index
IEEE.....	Institute of Electrical and Electronics Engineers
JEA	Jordan Electricity Authority
OZ.....	automatika opětovného zapínání
PG&E.....	Pacific Gas and Electric Company
PREPIS	Power Reliability Enhancement Program Information System
PS.....	přenosová soustava
λ [rok ⁻¹]	intenzita poruch elektrických zařízení
λ [rok ⁻¹ /km]	intenzita poruch (plánovaných odstávek) elektrických vedení
t_p [h]	celková doba bezporuchového provozu
t_n [h]	celková doba prostoje
T_p [h]	střední doba poruch (plánovaných odstávek)
k_{poh} [-]	součinitel pohotovosti
k_{pr} [-]	součinitel prostoje
L [km]	délka vedení
X [rok]	vyšetřované období
Z	počet zařízení
N	počet poruch (plánovaných odstávek)

ÚVOD

Jedním z cílů této práce je analýza dostupných literárních zdrojů v oblasti spolehlivosti a následné vytvoření spolehlivostní databáze elektrických komponent. Dalším úkolem je provedení vlastního výzkum spolehlivosti přenosové soustavy ČR na základě veřejně dostupných i interních dat společnosti ČEPS, a.s. a následné posouzení její spolehlivosti.

První dvě části práce se zabývají problematikou teorie pravděpodobnosti a spolehlivosti v energetice, přibližují základní pojmy z tohoto oboru a popisují možnosti výpočtu dílčích spolehlivostních vlastností.

Třetí část podrobně analyzuje dostupné zahraniční výzkumy, které se v minulosti věnovaly spolehlivosti elektrického vybavení v přenosové, popř. distribuční soustavě a stručně popisuje ty, které jsou vhodné pro porovnání s českou přenosovou soustavou.

Další část této práce porovnává vlastnosti dat, na jejichž základě byly provedeny analýzy spolehlivosti v jednotlivých výzkumech a na konci shrnuje získané poznatky do spolehlivostní databáze elektrických komponent.

Čtvrtá část se týká vlastního výzkumu spolehlivosti elektrického vybavení v přenosové soustavě ČR, který spočívá v tvorbě programu pro zpracování záznamů síťových přerušení v přenosové soustavě a provedení výpočtů spolehlivostních ukazatelů nadzemních vedení a elektrických zařízení.

Závěrečná část této práce se pak věnuje porovnání dosažených výsledků se spolehlivostní databází.

1 TEORIE SPOLEHLIVOSTI

1.1 DEFINICE SPOLEHLIVOSTI

Podle staré definice ČSN platné do roku 1993 je spolehlivost chápána jako vlastnost objektu spočívající ve schopnosti plnit požadované funkce při zachování hodnot stanovených provozních ukazatelů v daných mezích a v čase podle stanovených technických podmínek.

Současně platné normy chápou spolehlivost jako termín označující komplexní vlastnost, která zahrnuje dílčí spolehlivostní vlastnosti, jako např. bezporuchovost, udržitelnost, pohotovost a další. [1,3,4]

1.2 ZÁKLADNÍ POJMY

Bezporuchovost

Způsobnost objektu plnit nepřetržitě požadovanou funkci v daných podmínkách a v daném časovém období. Číselně ji vyjadřuje např. intenzita poruch nebo střední doba bezporuchového provozu. [1,2,3,4]

Udržitelnost

Schopnost objektu v daných podmínkách používání setrvat ve stavu nebo se vrátit do stavu, v němž může plnit požadovanou funkci, jestliže se údržba provádí v daných podmínkách a používají se stanovené postupy a prostředky. Číselně ji vyjadřuje např. pravděpodobnost provedení údržby ve stanovené době nebo střední doba údržby či intenzita údržby. [1,2,3,4]

Opravitelnost

Způsobnost objektu zjišťovat příčiny vzniku poruch a odstraňovat jejich následky opravou. Číselně ji vyjadřuje např. pravděpodobnost provedení opravy ve stanovené době, intenzita oprav nebo střední doba oprav. [1,2,3,4]

Pohotovost

Vlastnost objektu zahrnující bezporuchovost a opravitelnost objektu v provozních podmínkách. Číselně ji vyjadřuje ukazatel pohotovosti např. pomocí pravděpodobnosti, že se objekt bude nacházet v libovolně zvoleném časovém intervalu v provozuschopném stavu. [1,2,3,4]

Zajištění údržby

Schopnost dané organizace poskytující údržbářské služby zajišťovat dle požadavků v daných podmínkách (vztahují se jak na vlastní objekt, tak na podmínky používání i údržby) prostředky potřebné pro údržbu podle dané koncepce údržby. [1,2,3,4]

Oprava

Souhrn činností, které se provádí po výskytu poruchy na objektu za účelem navrácení objektu do provozuschopného stavu. [1,2,3,4]

Údržba

Pravidelná kontrola objektu prováděná za účelem udržení objektu v provozuschopném stavu po dobu stanovenou technickými podmínkami. [1,2,3,4]

Provozeroschopnost

Vlastnost objektu plnit stanovené funkce a dodržovat hodnoty stanovených parametrů v mezích stanovených v technické dokumentaci. [1,2,3,4]

Ukazatel spolehlivosti

Kvantitativní charakteristika jedné nebo několika vlastností, tvořící spolehlivost objektu. [1,2,3,4]

Objekt

Libovolně malý nebo libovolně velký celek, který jsme schopni hodnotit (např. el. obvod, el. zařízení, systém). [1,2,3,4]

Obnovovaný objekt (opravitelný)

Obnovovaný objekt je takový, který je po vzniku poruchy způsobilý k opravě, tzn., že se jeho schopnost plnit požadovanou funkci po vzniku poruchy obnovuje. Zpravidla se jedná o objekty s plánovanou technickou údržbou. [1,2,3,4]

Neobnovovaný objekt (neopravitelný)

Neobnovovaný objekt je takový, který není po vzniku poruchy způsobilý k opravě a nahrazuje se novým. Schopnost tohoto objektu plnit požadovanou funkci po vzniku poruchy se neobnovuje z technických, provozních, ekonomických či jiných důvodů. [1,2,3,4]

Závada

Termínem závada se označuje zhoršení schopnosti provozu, které ještě nezpůsobí poruchu. [1,2,3,4]

Porucha

Poruchou chápeme jev, kterým objekt ztrácí provozuschopnost. Podle způsobu vzniku se dělí na poruchy náhlé a postupné, podle vlivu na provozuschopnost na úplné a částečné.

Teorie spolehlivosti zkoumá pouze náhodné poruchy, které vznikají zcela nahodile bez zjevných příčin. Pokud porucha souvisí s jinou poruchou, označuje se za závislou, v opačném případě za nezávislou. Z hlediska doby trvání se poruchy dělí na trvalé a dočasné. Trvalé poruchy se odstraňují opravou nebo výměnou porouchaného objektu, dočasné poruchy mohou samovolně vymizet nebo trvají jen po dobu působení vnějšího vlivu. [1,2,3,4]

1.3 VLASTNOSTI SPOLEHLIVOSTI

Spolehlivost představuje komplexní vlastnost objektu, kterou nelze nějakým způsobem kvantifikovat. Pokud však použijeme pravděpodobnost a matematickou statistiku, lze jednotlivě vyhodnocovat některé veličiny (ukazatele spolehlivosti), které vypovídají o dílčích vlastnostech spolehlivosti, jež v souhrnu tvoří spolehlivost.

Ukazatele spolehlivosti mají náhodný charakter, z čehož vyplývají určitá pravidla pro jejich určování. [5,6,7,8,9,10]

Náhodná veličina

Náhodná nebo také stochastická veličina X je taková proměnná, jejíž každá hodnota je jednoznačně určena výsledkem náhodného pokusu, a která může současně nabývat libovolné hodnoty x z definovaného oboru hodnot s určitou pravděpodobností. Dělí se na spojité a diskrétní, kde oborem hodnot diskrétní náhodné veličiny je konečná nebo nekonečná posloupnost a oborem spojité náhodné veličiny je otevřený nebo uzavřený interval.

Náhodná veličina X je jednoznačně určena rozdělením pravděpodobnosti pomocí pravděpodobnostní funkce nebo distribuční funkce (popř. hustoty pravděpodobnosti). [5,6,7,8,9,10]

Pravděpodobnostní funkce

Ta nám říká, že každé hodnotě náhodné veličiny X je přiřazena pravděpodobnost, že náhodná veličina nabude této hodnoty. Matematicky ji lze zapsat jako:

$$F(x) = P(X = x) \quad (1)$$

kde funkční hodnota x představuje pravděpodobnost, že náhodná veličina X nabude hodnoty x . Pravděpodobnostní funkce se používá pouze k popisu náhodné diskrétní veličiny. [5,6,7,8,9,10]

Distribuční funkce

V praxi nás často zajímá pravděpodobnost, se kterou náhodná veličina X nabude hodnoty menší než je nějaká stanovená mez x . Tu lze určit pomocí distribuční funkce $F(x)$, která je definovaná jako:

$$F(x) = P(X < x) \quad (2)$$

Distribuční funkce se používá k popisu diskrétních i spojitých náhodných veličin. [5,6,7,8,9,10]

Pravděpodobnost poruchy objektu

Pokud přepíšeme obecný tvar výše uvedené distribuční funkce jako:

$$F(t) = P(\tau \leq t) \quad (3)$$

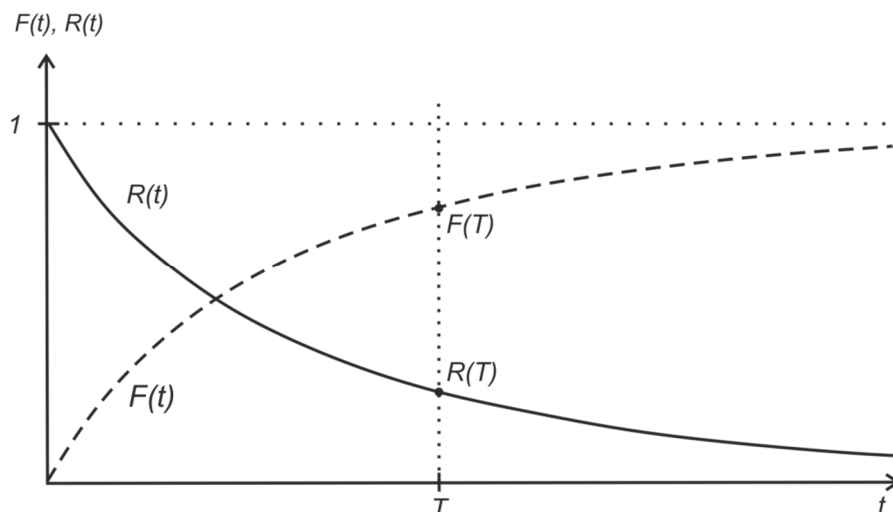
kde náhodná veličina τ symbolizuje dobu do poruchy objektu a t čas, který měříme od počátku uvedení objektu do provozu, pak distribuční funkce $F(t)$ má význam pravděpodobnosti poruchy objektu v časovém intervalu 0 až t . [5,6,7,8,9,10]

Pravděpodobnost bezporuchového provozu

Z pravděpodobnosti poruchy objektu lze také odvodit pravděpodobnost bezporuchového provozu objektu jako:

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (4)$$

Příklad distribuční funkce čas. intervalu do poruchy $F(t)$ a odpovídající spolehlivostní funkce $R(t)$ ukazuje obr. 1. [5,6,7,8,9,10]



Obr.1 – Hodnota $F(T)$ udává, s jakou pravděpodobností dojde k poruše do doby T , naopak $R(T)$ udává, s jakou pravděpodobností do doby T k poruše nedojde. [5]

Hustota pravděpodobnosti poruchy

Pokud je distribuční funkce spojitá a navíc hladká, existuje k ní funkce:

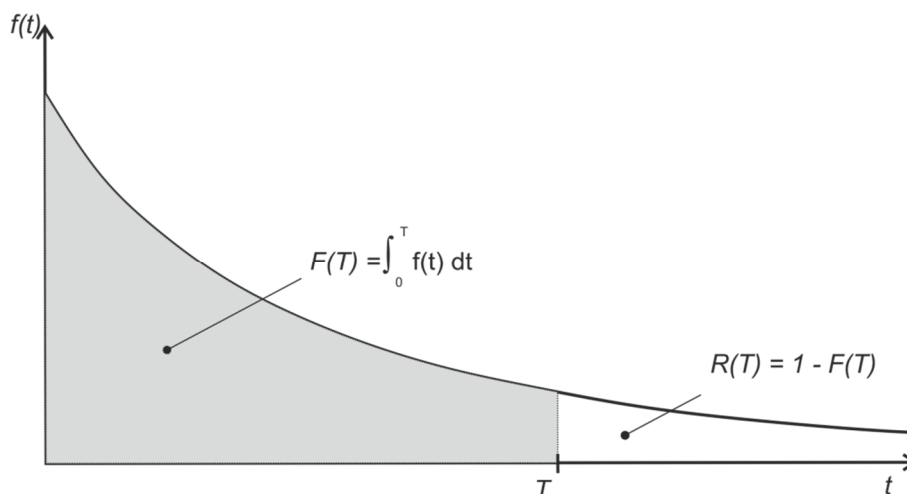
$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (5)$$

která se nazývá hustotou poruch. Pro hustotu poruch také platí:

$$\int_0^{\infty} f(t) dt = 1 \quad (6)$$

kde součin $f(t)dt$ dále udává pravděpodobnost, s jakou nastane v daném objektu porucha ve velmi krátkém intervalu dt následujícím za časovým okamžikem t .

Typický tvar funkce hustoty poruch znázorňuje obr. 2. [5,6,7,8,9,10]



Obr.2 – Funkce hustoty poruch $f(t)$ [5]

1.4 UKAZATELE SPOLEHLIVOSTI

Intenzita poruch $\lambda(t)$

Intenzita poruch λ patří mezi nejdůležitější spolehlivostní ukazatele, které se používají v praxi. Zjistíme ji jako poměr hustoty poruch a pravděpodobnosti bezporuchového provozu:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{1 - F(t)} \quad (7)$$

Veličiny $f(t)$ a $\lambda(t)$ mají rozměr (čas⁻¹) a obvykle se udávají v (h⁻¹) nebo (rok⁻¹). [5,6,7,8,9,10]

Střední doba bezporuchového provozu

Střední doba bezporuchového provozu je u neobnovovaných objektů někdy označována jako *střední doba do poruchy* a vyjadřuje provozní dobu objektu, během níž nenastala žádná porucha. Lze ji určit integrací funkce bezporuchovosti přes interval $(0, +\infty)$ [5,6,7,8,9,10]:

$$T_s = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (8)$$

Střední doba mezi poruchami (obnovované objekty)

Střední dobu mezi poruchami lze vyjádřit jako aritmetický průměr všech naměřených dob bezporuchového provozu od skončení opravy do výskytu následující poruchy:

$$T_s = \frac{t_p}{n} \quad (9)$$

kde t_p je celková doba provozu a n počet oprav. Intenzita poruch obnovovaného objektu je pak převrácenou hodnotou střední doby mezi poruchami:

$$\lambda = 1/T_s \quad (10)$$

kde λ jako převrácenou hodnotu T_s lze chápat jako střední frekvenci poruch systému nebo zařízení. [5,6,7,8,9,10]

Střední doba poruch (obnovované objekty)

Ukazatel střední doba poruch (v některé literatuře označen střední dobou oprav) představuje očekávaný časový interval, během kterého dojde k obnově systému či opravě zařízení po poruše. Lze ho určit jako:

$$T_p = \frac{t_0}{n} \quad (11)$$

kde n je počet poruchových stavů a t_0 celková doba poruchových stavů. [5,6,7,8,9,10]

Součinitel pohotovosti a prostoje (obnovované objekty)

Součinitel pohotovosti udává pravděpodobnost, že objekt v ustáleném provozním stavu bude provozuschopný v libovolném časovém okamžiku. Vypočte se jako:

$$k_{poh} = \frac{t_p}{t_p + t_n} \quad (12)$$

kde t_p vyjadřuje kumulativní dobu provozu objektu a t_n kumulativní dobu, kdy není objekt provozuschopný. [6]

Součinitel prostoje udává pravděpodobnost, že objekt nebude v libovolném okamžiku provozuschopný a lze ho stanovit jako doplněk součinitele pohotovosti do jedné. [6]

$$k_{pr} = 1 - k_{poh} \quad (13)$$

Vanová křivka

Vanová křivka (viz obr. 4) znázorňuje časový průběh intenzity poruch $\lambda(t)$ a používá se pro posouzení bezporuchovosti. Na začátku má křivka klesající charakter, který se od určitého okamžiku promění v téměř konstantní průběh a v poslední fázi začíná růst. Tyto 3 různé intervaly lze charakterizovat jako:

1. fáze – období časných poruch
2. fáze – období konstantní intenzity poruch
3. fáze – období dožívání

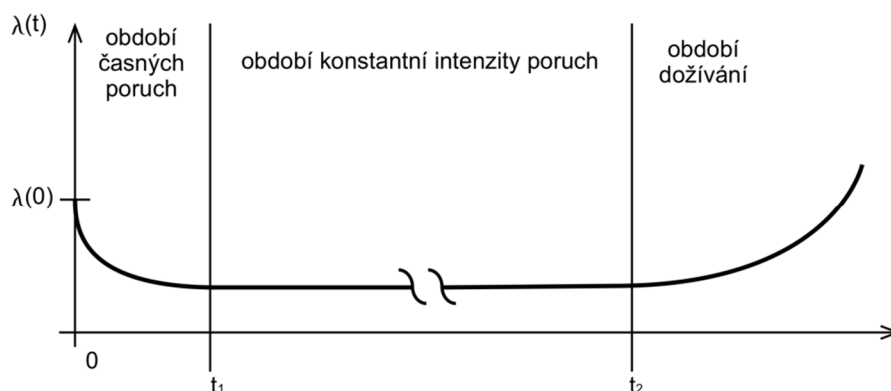
V první fázi se nejprve objeví zvýšené množství poruch způsobené neodhalenými nedostatky v konstrukci, výrobě a montáži nebo také nedodržením podmínek použití. Tato počáteční poruchovost velmi rychle klesá.

V druhé fázi, kdy jsou počáteční nedostatky odstraněny a zařízení je již zaběhlé, dochází k poruchám pouze vlivem náhodných mechanismů.

V poslední fázi dochází k trvalému nárůstu intenzity poruch, jelikož se začne projevovat únava, stárnutí a opotřebení materiálu.

V některých případech nemusí vanová křivka obsahovat první fázi (v případě, kdy je zařízení velmi pečlivě zkontrolováno nebo je před prvním použitím již zaběhnuto) nebo třetí fázi (v případě, že je zařízení vyřazeno z provozu dříve, než začne stárnout).

Pro výpočty spolehlivosti elektrotechnických systémů se obvykle používá předpoklad konstantní intenzity poruch, tzn., že se první a třetí fáze zanedbává.



Obr. 3 – Vanová křivka spolehlivosti – představa o intenzitě poruch v čase [11]

V teorii spolehlivosti existuje ještě celá řada ukazatelů, jako např. součinitel technického využití, střední doba provozu, střední doba prostoje a další. [5,6,7,8,9,10]

2 SPOLEHLIVOST V ENERGETICE

2.1 PŘERUŠENÍ

Beznapěťové stavy, vznikající v důsledku poruch na el. vybavení v přenosové nebo distribuční soustavě trvajících déle než 3 minuty, se nazývají přerušeními, která podle místa vzniku způsobují přerušení dodávek el. energie, přerušení přenosu el. energie nebo přerušení distribuce el. energie do odběrného či předávacího místa.

Přerušení lze podle jeho příčiny rozdělit do čtyř skupin:

a) Poruchové přerušení

K poruchovému přerušení dochází v důsledku:

- odstraňování vzniklých poruch
- samočinného vypnutí zařízení v PS nebo DS (např. úderem blesku)
- bezdůvodným vypnutím zařízení provozovatelem PS nebo DS
- poruch vzniklých mimo PS či DS nebo u výrobce el. energie

b) Vynucené přerušení

Vynucené přerušení vzniká v případě nutnosti vypnutí zařízení z důvodu požadavku či zásahu třetí osoby nebo také samočinným vypnutím zařízení PS nebo DS

c) Plánované přerušení

K plánovanému přerušení dochází v důsledku plánovaných údržeb či oprav na zařízeních PS nebo DS

d) Mimořádné přerušení

Mimořádné přerušení dodávek, přenosu a distribuce el. energie vzniká za účelem předcházení stavů nouze nebo z důvodu vyhnutí se stavům nouze v PS a DS. [19,20]

V interní směrnici ČEPS se používá pojem *výpadek*, který v podstatě odpovídá poruchovému přerušení a vyjadřuje neplánovanou a nechtěnou změnu stavu objektu PS vyvolanou poruchou prvku PS, případně nebezpečným provozním stavem PS nebo jinými vnitřními a vnějšími vlivy. Dále směrnice uvádí pojem plánovaná údržba, pod kterou si lze představit plánované přerušení nebo v některé literatuře používaný pojem plánovanou odstávkou.

Vzhledem k odlišnému použití terminologie v různých literárních zdrojích byly pro přehlednost použity v této práci následující pojmy:

- porucha – veškeré události vedoucí k dočasné či trvalé ztrátě provozuschopnosti objektu
- plánovaná odstávka – předem známá údržba na objektu vedoucí k dočasné ztrátě provozuschopnosti
- přerušení – veškeré beznapět'ové stavy el. komponent
- el. komponent – veškerá zařízení elektrizační soustavy včetně vodičů (vedení)

2.2 VÝPOČET SPOLEHLIVOSTI SÍTÍ

Pro výpočty spolehlivosti sítí existují dva možné přístupy:

- *empirický* – vstupní data pro výpočet spolehlivostních veličin jsou získány ze záznamů o provozu a poruchách daného zařízení (systému) nebo z podobného zařízení (systému), které pracuje v obdobných podmínkách.
- *apriorní* – vstupní data pro výpočet spolehlivostních veličin jsou získána z údajů výrobce daného zařízení bez známých informací o poruchách nebo o jiných spolehlivostních veličinách podobných zařízení

V praxi se většinou dává přednost empirickému přístupu při výpočtech spolehlivosti sítí, protože apriorním přístupem nelze vyjádřit obecnou spolehlivost prvku. Důvodem je fakt, že apriorní metody vyžadují individuální přístup ke každému prvku elektrizační soustavy, protože každý její prvek má jiné vlastnosti, funkci, konstrukci, význam atd.

Na druhou stranu je pro výpočet spolehlivosti empirickými metodami třeba mít k dispozici velký soubor přesných dat o poruchách zařízení sbíraných v poměrně dlouhém časovém období, aby bylo možné tento soubor dat považovat za statisticky významný. [1]

2.2.1 Intenzita poruch zařízení

Intenzitu poruch určitého zařízení lze vyjádřit podle následujícího vztahu jako:

$$\lambda = \frac{N}{Z \times X} \text{ [rok}^{-1}\text{]} \quad (14)$$

kde N [-] určuje počet poruch daného typu zařízení, Z [-] počet prvků daného typu v síti a X [rok] délku vyšetřovaného období. [1]

Intenzita poruch vedení

Intenzita poruch vedení je definovaná obdobným způsobem jako:

$$\lambda = \frac{N}{L \times 0,01 \times X} \text{ [rok}^{-1}\text{/100 km]} \quad (15)$$

kde N [-] je počet poruch vedení ve sledovaném období X [rok] a L [km] je délka vedení.

Podle výzkumu *Dalabeih et al.* (viz další kapitola) je také možné stanovit intenzitu poruch vedení pomocí metody minimálních čtverců, která patří mezi matematicko – statistické metody regresní analýzy a používá se pro aproximaci naměřených dat, u nichž lze předpokládat spojitou fyzikální závislost dvou reálných veličin x a $y = f(x)$. Principem této metody je nalézt takové parametry funkce f , pro které je součet čtverců odchylek (svislých vzdáleností) vypočtených hodnot od hodnot naměřených minimální. [21,22,23]

Předpokladem je lineární závislost počtu poruch na délce vedení, kterou lze matematicky vyjádřit jako rovnici přímky ve tvaru:

$$y = kx + q \quad (16)$$

kde y označuje odhadovaný počet poruch za rok, x délku vedení, parametr k směrnici přímky a parametr q udává hodnotu průsečíku přímky s osou y .

Parametry k a q je možné odvodit pomocí následujících vztahů:

$$k = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - (\sum_{i=1}^n x_i)(\sum_{i=1}^n y_i)}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \quad (17)$$

$$q = \frac{(\sum_{i=1}^n x_i^2)(\sum_{i=1}^n y_i) - (\sum_{i=1}^n x_i)(\sum_{i=1}^n x_i y_i)}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \quad (18)$$

kde proměnná n vyjadřuje počet linek přenosových vedení v provozu ve vyšetřovaném období. [13,21,22,23]

2.2.2 Střední doba poruchy

Střední doba poruchy určitého el. komponentu se vypočte podle vztahu:

$$T_p = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{N} \quad (19)$$

kde n je počet prvků daného el. komponentu, t_i [h] je doba poruchy i - tého prvku daného komponentu a N_p počet poruch prvku daného komponentu. [1]

Uvedené vztahy (15) a (19) platí i pro výpočty plánovaných odstávek.

2.2.3 Součinitel pohotovosti a prostoje

Součinitel pohotovosti pro daný el. komponent je dán vztahem:

$$k_{poh} = \frac{t_p}{t_p + t_n} \quad (20)$$

kde t_p je celková doba [h] bezporuchového provozu el. komponentu a vypočte se jako rozdíl vyšetřovaného období [h] a celkové doby [h] nepohotovosti. Hodnota t_n udává součet dob poruch a plánovaných odstávek ve vyšetřovaném období.

Součinitel prostoje lze vyjádřit ze součinitele pohotovosti jako:

$$k_{pr} = 1 - k_{poh} \quad (21)$$

[6]

3 RELEVANTNÍ SPOLEHLIVOSTNÍ DATA

3.1 TECHNICKÁ STUDIE VÝZKUMNÉHO ÚSTAVU EPRI

Výchozím dokumentem pro analýzu literárních zdrojů v problematice spolehlivosti el. komponent je technická studie výzkumného ústavu EPRI, která obsahuje užitečné informace týkající se spolehlivosti elektrického vybavení, jež je součástí elektrizační soustavy (distribuční a přenosové). Dokument popisuje intenzitu poruch (popř. plánované odstávky) elektrických komponent a dále se zabývá změnou této intenzity, která souvisí se stárnutím a opotřebením zařízení. Zpráva se také zaměřuje na kvalitativní dopad údržby, vliv přírodního prostředí a na monitorování spolehlivosti v souvislosti se stárnutím a opotřebením daných zařízení. Informace obsažené v tomto dokumentu jsou založeny na rozsáhlém průzkumu literatury (technických zpráv, odborných knih, článků), které přinesly zevrubné množství dat z oblasti spolehlivosti v energetice. [12]

3.1.1 Záměr studie

Cílem této studie bylo posoudit, zda existuje dostatek publikovaných informací k vytvoření kvantitativní spolehlivostní analýzy, která by odrážela stárnutí elektrizační soustavy.

Primární cíle studie byly:

- posouzení současného stavu informačních zdrojů o stárnutí el. komponent soustavy,
- vytvoření informační databáze o spolehlivosti a stárnutí jednotlivých prvků elektrizační soustavy,
- shromáždění informací o tom, jakým způsobem mohou odlišná údržba a přírodní podmínky ovlivňovat spolehlivost el. komponent,
- identifikace způsobu, jakým byl modelován dopad stárnutí a opotřebením na spolehlivost
- posouzení, jakým způsobem mohou informace o spolehlivosti konkrétních komponent přispět k optimalizaci údržby, monitorování a rozhodování o výměně komponent.

Jelikož existuje nejednotnost v rozdělení napět'ových hladin v různých koutech světa, rozděluje tato studie elektrizační soustavu na distribuční a přenosovou následujícím způsobem:

- I. zařízení v distribuční soustavě pracující do napět'ové hladiny 34,5 kV včetně a
- II. zařízení v přenosové soustavě pracující s napětím vyšším než 34,5 kV.

Výzkum EPRI se zaměřil především na zařízení pracující v distribuční soustavě do 34,5 kV. Z druhé skupiny zařízení se výzkum věnuje hlavně přípojnicím, vypínačům a transformátorům. [12]

3.1.2 Klasifikace informačních zdrojů

Databáze informačních zdrojů člení dostupnou literaturu do čtyř přehledných skupin:

- a) publikace o poruchách, monitorování a údržbě,
- b) publikace zabývající se finančními a technickými modely,
- c) publikace s matematickým popisem poruch,
- d) publikace týkající se ostatních témat.

Příčiny přerušení nebo rychlého stárnutí výzkum rozdělil do 3 skupin:

- přírodní podmínky – např. vlhkost, vítr, led, teplota
- provoz – např. provozní stavy v síti
- údržba – např. nátěry, prořezávání stromů a výměna kapalin.

EPRI dospěl k závěru, že většina analyzovaných publikací poskytuje informace o tom, jakým způsobem různé podmínky či okolnosti ovlivňují stárnutí el. zařízení. Některé z nich specifikují i doporučení, jak snížit dopad těchto příčin na poruchovost. Každopádně až na jednu výjimku neposkytuje žádná literatura modely, které kvantitativně slučují monitorování nebo údržbu el. zařízení s intenzitou poruch či se spolehlivostí [12]

Na základě analýzy tohoto výzkumu informačních zdrojů, bylo možné vzhledem k vlastnostem české přenosové soustavy použít 5 zdrojů. Ovšem dvě knižní publikace amerických autorů nebylo možné získat v ČR, a proto byly vybrány jiné studie, které zkoumaly zařízení v nižších napěťových hladinách.

3.2 SEZNAM ZDROJŮ SPOLEHLIVOSTNÍCH DAT

3.2.1 Dalabeih et al.

Tato studie se zabývá statistickou analýzou spolehlivostních dat získaných z jordánské přenosové soustavy za účelem odhadnutí intenzity poruch (plán. odstávek) a střední doby poruch (plán. odstávek) el. komponent pracujících v napěťové hladině 132 kV.

Studie rozděluje spolehlivostní data do 2 kategorií podle druhu přerušení:

- FOR (Forced Outage Rate) = intenzita poruch vycházející z havarijních podmínek, které přímo souvisejí s požadavky na el. zařízení, a které jsou okamžitě odstraněny

servisním zásahem.

- SOR (Scheduled Outage Rate) = intenzita plánovaných odstávek nastávající v případě, že je el. komponent úmyslně odebrán ze systému servisním zásahem v předem známý čas z důvodu instalace, údržby či opravy.

Doby trvání přerušení pak dělí na:

- FOD (Forced Outage Duration) = střední doba poruchy, po kterou je el. komponent mimo provoz (doba od počátku poruchy do opravy či údržby) z důvodu náhlé poruchy.
- SOD (Scheduled Outage Duration) = střední doba plán. odstávek, po kterou je el. komponent mimo provoz při plánované údržbě či opravě.

Uvažovanými komponenty přenosové soustavy v této studii jsou:

- a) přenosová vedení
- b) transformátory
- c) vypínače
- d) přípojnice

(1) Přenosová vedení

Jordánská přenosová soustava obsahuje 24 linek (údaj z r. 1993), jejichž délka se pohybuje mezi 7 – 24 km.

Zaznamenaná data obsahují:

- celkový počet kilometrů vedení v každé lince
- celkový počet přerušení (poruch a plán. odstávek) v každé lince
- seznam obsahující dobu trvání výpadků v daných linkách

Intenzita poruch

K odhadu intenzity poruch přenosových vedení tato studie používá regresní analýzu, konkrétně metodu minimálních čtverců.

Studie předpokládá lineární závislost mezi počtem poruch na el. vedení a jeho délkou, což vyjadřuje lineární regresní rovnicí ve tvaru:

$$Y = kX + q \quad (22)$$

kde Y představuje průměrný počet poruch za rok pro linku mající X kilometrů, k reprezentuje sklon přímky a q průsečík s osou y . Koeficienty k a q se získají z n datových bodů pro určitou skupinu linek jako:

$$k = \frac{n \sum_{i=1}^n X_i Y_i - \sum_{i=1}^n X_i \sum_{i=1}^n Y_i}{n \sum_{i=1}^n X_i^2 - (\sum_{i=1}^n X_i)^2} \quad (23)$$

$$q = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i - k \sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (24)$$

Střední doba trvání poruch

Střední dobu trvání poruch studie odhaduje podle vztahu:

$$r = \sum_{i=1}^n t_i \frac{1}{n} \quad (25)$$

kde t_i je délka trvání i -tého výpadku a n počet výpadků.

(2) *Ostatní komponenty*

Zaznamenaná data ostatních komponent (transformátory, vypínače, přípojnice) obsahují:

- celkový počet provozních zkoušek každého komponentu za rok
- celkový počet poruch každého komponentu
- seznam obsahující dobu trvání poruchy

Intenzita poruch

Studie předpokládá, že délka časových intervalů mezi jednotlivými výpadky má exponenciální charakter a odhad intenzity poruch λ daného komponentu za rok lze spočítat jako:

$$\lambda = \frac{f}{T} \quad (26)$$

kde f je počet poruch, které byly sledovány s růstem času, a T je součin počtu prvků v síti a délky sledovaného období (angl. unit-year(s) of exposure), do češtiny volně přeloženo jako “komponent-roky“.

Doba trvání výpadku

Pro odhad střední doby trvání výpadků byla použita stejná metoda jako v případě přenosových vedení. [13]

Výše uvedené vztahy studie používá i pro plánované odstávky.

Závěrečné výsledky z této studie jsou uvedeny ve třetí a čtvrté tabulce v příloze 1.

3.2.2 Hale et al.

Tento dokument představuje rozsáhlý výzkum, během něhož byla shromažďována provozní a údržbová data o elektrických komponentech v distribuční i přenosové soustavě za účelem získání představy o jejich spolehlivosti.

K analýze dat v této studii byl použit program PREPIS, který používá k výpočtu spolehlivosti Booleovu algebru založenou na modelovací technice využívající individuální hodnotu spolehlivosti zařízení. Tento program používá údaje o spolehlivosti el. komponent z různých zdrojů pocházejících již z padesátých, šedesátých a sedmdesátých let. Později (r. 1998) byl program převeden do nejrozšířenějšího databázového systému Microsoft Office Access, čímž vznikla aplikace s flexibilními možnostmi výstupu shromažďující informace o zařízeních obsahující více než 6 000 záznamů o jejich provozu a údržbě.

Výpočetní vztahy používané ve studii:

1) *spolehlivost založená na exponenciálním rozdělení z teorie pravděpodobnosti:*

$$Spol = e^{-\lambda t} \quad (27)$$

kde λ je intenzita poruch el. komponentu a t doba sběru dat v kalendářních hodinách vydělená hodnotou 8 760 (= celkový počet hodin v nepřestupném roce).

2) *intenzita poruch (za rok):*

$$IP = \frac{\text{celkový počet poruch}}{T_p/8760} \quad (28)$$

kde T_p představuje celkovou dobu v hodinách, po kterou byla data sbírána a *celkový počet poruch* znamená celkový počet zaznamenaných poruch jednoho konkrétního typu komponentu během sledovaného období T_p .

3) *střední doba mezi poruchami (průměrná doba mezi vzniklými poruchami):*

$$SDMP = \frac{T_p}{\text{celkový počet poruch}} \quad (29)$$

4) *střední doba do opravy (průměrná doba k uskutečnění opravy el. komponentu):*

$$SDO = \frac{DO}{\text{celkový počet poruch}} \quad (30)$$

kde DO (doba opravy) je celkový čas potřebný na opravu poruch el. komponent.

5) *střední doba údržby (průměrná doba k provedení údržby na el. komponentu):*

$$SDÚ = \frac{DÚ}{\text{celkový počet údržby}} \quad (31)$$

kde $DÚ$ (doba údržby) je celkový čas potřebný na údržbu plánovaných odstávek el. komponent.

6) *střední doba mezi všemi aktivitami (průměrná doba mezi plánovanými odstávkami a poruchami):*

$$SDMA = \frac{T_p}{\text{všechny aktivity (údržba, oprava)}} \quad (32)$$

7) *střední doba prostoje (průměrný čas zapříčiněný plánovanými odstávkami a poruchami):*

$$SDP = \frac{DO + DÚ}{\text{všechny aktivity (údržba a oprava)}} \quad (33)$$

Výsledky výše uvedených spolehlivostních ukazatelů různých druhů el. komponent ukazuje tabulka v příloze 2. [14]

3.2.3 IEEE

Tento rozsáhlý výzkum, který byl sponzorován institutem pro elektrotechnické a elektronické inženýrství IEEE, se zabývá spolehlivostí průmyslových závodů. Celkem obsahuje 6 oddělených částí, z nichž každá se věnuje jinému tématu. Nejužitečnější z hlediska spolehlivostní analýzy je část první, která zkoumá spolehlivost el. komponent.

Intenzita poruch

K výpočtu intenzity poruch el. komponent tato studie používá expertní odhad podle vztahu:

$$\hat{\lambda} = \frac{f}{T} \quad (34)$$

kde f je počet zaznamenaných poruch a T představují komponent-roky

V souvislosti s odhady intenzit poruch se tato studie zabývá i přesností těchto odhadů pomocí tzv. intervalů spolehlivosti. Pro účely této práce však není nutné se jimi dále zabývat.

Doba výpadku

Expertní odhad pro průměrnou dobu výpadku nebo dobu opravy pro konkrétní druh el. komponentu tato studie počítá jako průměr zaznamenaných dob prostojů konkrétního zařízení.

Výsledky intenzit poruch a průměrných dob prostojů při poruše jsou uvedeny v tabulce v příloze 3. [15,16]

3.2.4 Horton et al.

Tato studie analyzovala 85 venkovských a 95 městských nadzemních distribučních sítí účelem vytvoření obecné představy o intenzitě poruch elektrických komponent.

Výzkum proběhl na typické nadzemní distribuční síti o přenášeném výkonu 10 MW (dle uspořádání) v napěťové hladině 12 kV až 22 kV. Tyto sítě obsahují (dle upořádání) 100 mil (160,9 km) nadzemních vodičů, 500 distribučních transformátorů, 30 úsečníků, 50 pojistek, několik kompenzačních zařízení, napěťových regulátorů a recloserů. Analyzovanými komponenty v této studii jsou tedy:

- transformátory
- úsečníky
- pojistky
- kompenzační zařízení
- reclosery
- napěťové regulátory
- vodiče

Kromě zprávy o intenzitě poruch el. komponent se studie zabývala jejich využitím v distribuční síti a jejich celkovým počtem, aby bylo možné vypočítat intenzitu poruch jednotlivých komponent ve zkoumaném časovém období. Dostupná data však nejsou dostatečně kompletní k tomu, aby bylo možné stanovit intenzitu poruch jednotlivých komponent, ovšem je možné vypočítat obecnou intenzitu poruch každého typu el. vybavení sítě.

Rozsah studie

Následující tabulka 1 uvádí přesné počty analyzovaných komponent, počty záznamů o poruchách a jednotku “komponent-roky“, resp. “komponent-km.roky“.

Tabulka 1 – Rozsah studie [17]

Venkovské síť			
KATEGORIE	<i>počet</i>	<i>kompone- nt- roky</i>	<i>počet poruch</i>
<i>transformátory</i>	33 686	154 762	42
<i>úsečnický</i>	1 233	5 570	7
<i>délka vodičů [míle]</i>	7 465	33 985	417
<i>délka vodičů [km]</i>	12 013,8	54 693,6	
Městské síť			
KATEGORIE	<i>počet</i>	<i>kompone- nt- roky</i>	<i>počet poruch</i>
<i>transformátory</i>	18 522	74 962	46
<i>úsečnický</i>	1 858	7 745	6
<i>délka vodičů [míle]</i>	2 439	9 454	187
<i>délka vodičů [km]</i>	3 925,2	15 214,7	

Pozn.: u vodičů se uvažuje jednotka *kompone-nt-km.roky*

Intenzita poruch

Intenzity poruch el. zařízení byly v této studii stanoveny na základě vztahu:

$$\text{Intenzita poruch el. zařízení} = \frac{\sum \text{poruch komponent}}{\sum \text{komponent} - \text{roky}} \quad (35)$$

Intenzity poruch vodičů byly stanoveny na základě vztahu:

$$\text{Intenzita poruch vodičů} = \frac{\sum \text{poruchy vodičů}}{\sum \text{komponent} - \text{km} . \text{roky}} \quad (36)$$

kde *kompone-nt-km.roky* představuje součin počtu vodičů v km s délkou vyšetřovaného období.

Výsledné intenzity poruch el. zařízení a vodičů jsou uvedeny v první tabulce v příloze 4.

Studie také prokázala, že poruchy uvedených komponent se podílejí jen z 15 % na celkovém počtu utrpěných výpadků v síti. Zbýlých 85 % bylo způsobeno vnějšími faktory (75 %) a ztrátou dodávky el. energie (10 %). Tabulka 2 přehledně znázorňuje míru zastoupení jednotlivých příčin výpadků zaznamenaných v této studii. [17]

Tabulka 2 – Podíl poruch dle příčiny výpadku [17]

PŘÍČINA VÝPADKU	PORUCHY			
	venkovská síť		městská síť	
	počet	%	počet	%
<i>porucha zařízení</i>	545	14	285	18
<i>vnější faktor</i>	3020	78	1113	72
<i>ztráta dodávky el. energie</i>	301	8	148	10
<i>celkový součet</i>	3866	100	1546	100

3.2.5 Volkmann et al.

Tato studie se zabývá hodnocením stupně spolehlivosti elektrické distribuční soustavy pomocí programu DREAM, který vyvinula organizace PG&E ve spolupráci s California Polytechnic State University v San Luise Obispo. Tento program pracuje s historickými záznamy o poruchách, které obsahují intenzity poruch síťových komponent a odhady dob trvání výpadků a oprav. Ty pak následně využívá k výpočtu očekávané frekvence výpadků el. energie postihující zákazníka a jejího trvání. Stupně spolehlivosti distribuční sítě tento výzkum vyjadřuje anglickým termínem FAIFI, neboli česky index průměrné frekvence síťových výpadků a FAIDI, neboli index průměrné doby síťových výpadků.

DREAM metodologie je založená na odhadu intenzity poruch zařízení, který se následně použije k získání statistických odhadů očekávaných hodnot FAIDI a FAIFI. Tato metodologie závisí na schopnosti PG&E zareagovat na výpadky, na individuálních dobách oprav zařízení a na konfiguraci sítě.

Program DREAM je sjednocen s databází distribuční soustavy PG&E a dalšími programy pro plánování, které usnadňují stanovení očekávaného zlepšení spolehlivosti navržené modifikace sítě.

Intenzita poruch

Intenzita poruch el. komponent je zde vypočtena stejně, jako ve studii *Horton et al.* Výsledky jsou uvedené v druhé tabulce v příloze 4.

Výpadky nadzemních vedení – vnější příčiny

Zajímavým zjištěním tohoto průzkumu je skutečnost, že více než 80 % poruch v nadzemních vedeních způsobily vnější faktory nebo příčiny nesouvisející s poruchami síťových komponent. Jako příklad těchto faktorů studie uvádí např.: stromy, ptáky, blesky, přerušení v přenosové soustavě atd. Autoři studie tyto faktory rozdělují do 3 skupin:

- I. příčinou je ztráta dodávky el. energie
- II. příčinou je vnější faktor a místo poruchy je známé
- III. příčinou je vnější faktor a místo poruchy je neznámé

Tedy z celkových 80 % poruch přisuzovaných vnějším faktorům bylo 10 % zařazeno do první skupiny, 68 % do druhé a zbylých 22 % do třetí skupiny. [18]

4 POROVNÁNÍ LITERÁRNÍCH ZDROJŮ

Další část diplomové práce se věnuje porovnáním spolehlivostních dat z různých výzkumů, které byly podrobeny analýze ve třetí části diplomové práce. Součástí této kapitoly je tvorba samotné spolehlivostní databáze z analyzovaných záznamů.

4.1 POROVNÁNÍ DAT Z DOSTUPNÝCH ZDROJŮ

Pro vypovídající představu o spolehlivosti el. komponent v elektrizační soustavě je třeba mít k dispozici kvalitní informace o chování daných zařízení a jejich údržbě. Pokud se provádí analýza spolehlivosti nějakého zařízení či systému, je třeba posoudit kvalitu datových záznamů z několika hledisek:

- i. místo sběru dat
- ii. charakter dat
- iii. časový interval sběru dat
- iv. populaci dat
- v. aktuálnost dat

Při porovnávání populace dat je třeba si uvědomit, že celkové hodnoty populací dat obsahují v souhrnech buď *komponent-roky* a *komponent-km.roky* nebo *komponent-míle.roky*. Studie IEEE obsahuje v součtech dokonce jednotku *komponent-stop.roky*. Je tedy lepší porovnávat množství záznamů o poruchách, nežli populace dat.

4.1.1 Dalabeih et al.

Specifikace studie

- studie probíhala v jordánské přenosové soustavě v napěťové hladině 132 kV

Vyšetřované období:

- mezi roky 1989 – 1993

Vlastnosti dat:

- záznamy o nadzemních vedeních obsahují:
 - celkový počet km každé linky
 - celkový počet přerušení (poruch a plán. odstávek) jednotlivých linek
 - seznam dob trvání přerušení pro každou linku
- záznamy o ostatních komponentech (rozvodné transformátory, vypínače, přípojnice) obsahují:
 - celkový počet *komponent-roky* každého druhu komponentu
 - celkový počet přerušení (poruch a plán. odstávek) jednotlivých druhů komponent
 - seznam dob trvání přerušení pro každé zařízení

Populace dat:

- 697 záznamů o poruchách
- 2 160 komponent-roky (zahrnutý délky vodičů v km)

4.1.2 Hale et al.

Specifikace studie

- data pro tuto studii byla shromažďována nepřetržitě na 204 místech v USA zahrnujících výrobu el. energie, její přenos, distribuci i spotřebu

Vyšetřované období:

- od října 1991 do začátku roku 1994
- k analýze byly použity i aktualizované záznamy o provozu a údržbě el. komponent z 50., 60. a 70. let

Vlastnosti dat:

- záznamy splňují následující podmínky:
 - minimálně 5 let provozních záznamů o daném komponentu
 - minimálně 40 různých vzorků jednotlivých komponent
 - maximálně 10 stejných vzorků komponent na jednom místě
 - minimálně 3,5 mil. kalendářních hodin provozu každé skupiny zařízení

Populace dat:

- 6 000 záznamů o provozu a údržbě a 3 500 záznamů identifikujících informační zdroje

- 6 263 záznamů o poruchách
- cca 1 306 088 komponent-roky (zahrnutý délky vodičů v mílech)

4.1.3 IEEE

Specifikace studie

- výzkum byl proveden ve 30 společnostech zahrnujících 68 průmyslových závodů na území USA a Kanady

Vyšetřované období:

- mezi roky 1971 – 1972
- některé společnosti poskytly i záznamy přesahující toto vyšetřované období

Vlastnosti dat:

- pro výpočet intenzit poruch jednotlivých druhů el. komponent byla použita pouze data, která obsahují minimálně 8 zaznamenaných poruch na daném zařízení

Populace dat:

- 1 982 záznamů o poruchách
- 620 000 komponent-roky (zahrnutý délky vodičů na 1000 stop)

4.1.4 Horton et al.

Specifikace studie

- tento výzkum probíhal na 85 venkovských a 95 městských el. distribučních sítí PG&E

Vyšetřované období:

- mezi roky 1984 – 1989

Vlastnosti dat:

- data k analýze poskytla PG&E ve formě zpráv o síťových omezeních, které zaznamenávají terénní pracovníci ke každé poruše
- zprávy obsahují například: datum a čas poruch, lokalizaci poruchy, příčinu poruchy, počet postižených zákazníků, maximální dobu nepohotovosti v minutách atd.
- některé zprávy neobsahují kompletní údaje z důvodu nezjistitelných příčin poruch nebo neznámé lokalizace poruchy

Populace dat:

- 705 záznamů o poruchách

- 312 947 komponent-roky (zahrnutý délky vodičů v mílich)

4.1.5 Volkmann et al.

Specifikace studie

- metodologie DREAM integrovaná s distribučním systémem PG&E
- obsahem jsou detailní informace o každém zařízení, které je součástí 2 800 paprskových sítí PG&E
- studie 85 venkovských a 95 městských el. distribučních sítí PG&E (viz předchozí zdroj)

Vyšetřované období:

- mezi roky 1984 – 1989

Vlastnosti dat:

- data k analýze jsou shodná s předchozím zdrojem
- výpočty jsou provedeny pomocí metodologie DREAM

Populace dat:

- shodné s předchozím zdrojem

4.1.6 Shrnutí analýzy dat

Většina výzkumných studií popsaných v této DP probíhala na území USA nebo Kanady. Pouze studie, kterou se zabýval pan Dalabeih et al., proběhla v Jordánsku.

Z hlediska rozsahu napěťových hladin podávají nejobsáhlejší výsledky studie Hale et al. a IEEE, neboť výzkumy v těchto dvou zdrojích proběhly v celé elektrizační soustavě. Technické zprávy od pana Hortna, Goldberga a Volkmana se věnují pouze distribuční soustavě a studie pana Dalabeiha pouze soustavě přenosové.

Kromě studie IEEE všechny uvedené analyzovaly záznamy o provozu a údržbě el. komponent, které byly monitorovány přibližně 5 let. I když studie IEEE prováděla sběr dat pouze jeden rok, byly pro spolehlivostní analýzu použity další údaje o provozních a udržovacích procesech zařízení z 50., 60. a 70. let.

Největší objem dat (více než 6 000 záznamů) měla k dispozici studie Hale et al. Následuje výzkum IEEE, který zpracoval necelých 2000 záznamů. Oproti tomu studie pana Hortna, Goldberga a Volkmana analyzovaly shodně zhruba 700 záznamů o poruchách. Poslední výzkum pana Dalabeiha měl k dispozici necelých 700 záznamů o poruchách.

Nejstarší záznamy nalezneme ve studii IEEE (50. – 70. léta) a nejnovější pak ve studii Hale et al., která probíhala mezi roky 1991 – 1994.

4.2 SPOLEHLIVOSTNÍ DATABÁZE

Z důvodu neúplných záznamů v některých uvedených zdrojích byly před vytvořením spolehlivostní databáze dopočteny některé údaje z intenzit poruch, které uvádí všechny výše zmíněné studie. Tím jsou myšleny *komponent-roky*, jež byly dopočteny u studie *Horton et al.*, *Volkman et al.* a *Dalabeih et al.* ze známé intenzity a počtu poruch jako:

$$\text{komponent} - \text{roky} = \frac{\text{počet poruch}}{\text{intenzita poruch}} \quad (37)$$

Dále bylo třeba upravit hodnoty (pouze v kategoriích *vodiče*) u všech studií na stejné jednotky *komponent-km.roky* a následně přepočítat odpovídající intenzity poruch. Převod na metrické jednotky byl realizován pomocí vztahů:

$$1 \text{ míle} = 1,609344 \text{ km} \quad (38)$$

$$1000 \text{ stop} = 0,3048 \text{ km} \quad (39)$$

Výsledná spolehlivostní databáze je uvedena v příloze 5.

5 VÝZKUM SPOLEHLIVOSTI PS

Výzkum spolehlivosti přenosové soustavy ČR byl proveden na základě veřejně dostupných a také interních¹ dat společnosti ČEPS, a.s., a to na následujících komponentech přenosové soustavy:

- blokových, hraničních a přenosových vedení
- transformátorech
- vypínačích
- odpojovačích

Záměrem výzkumu bylo určit podíl trvalých a dočasných poruch v sítích PS a dále stanovit následující spolehlivostní ukazatele:

- intenzitu poruch přenosových vedení

¹ interní záznamy společnosti ČEPS, a.s. byly použity v míře neporušení vnitřních směrnic o výměně informací mezi veřejností a ČEPS, a.s.

- intenzitu plánovaných odstávek přenosových vedení
- intenzitu poruch zařízení
- střední dobu poruch přenosových vedení
- střední dobu plánovaných odstávek
- součinitele prostoje a pohotovosti jednotlivých linek přenosových vedení

Programy vytvořené v aplikaci MS Excel pro zpracování veřejně dostupných dat síťových omezení a plánovaných odstávek jsou popsány v příloze 6 a přiloženy k diplomové práci na CD nosiči.

5.1 CHARAKTER PŘENOSOVÉ SOUSTAVY ČR

Úkolem přenosové elektrizační soustavy je propojení výroben el. energie s distribučními sítěmi, které ji dále rozvádějí (z velkých rozvodů) ke spotřebitelům. Dále přenosová soustava udržuje rovnováhu mezi výrobou a spotřebou el. energie v každém okamžiku a zajišťuje propojení s celoevropskou elektroenergetickou soustavou. Za provoz a údržbu přenosové soustavy v ČR je zodpovědná společnost ČEPS, a.s.

Veškeré el. vybavení přenosové soustavy se dělí podle typu na silová zařízení a sekundární techniku.

Mezi silová zařízení patří:

- rozvodná zařízení mimo sekundární techniku
- transformátory a venkovní vedení pro sítě 400 kV a 200 kV
- zařízení pro sítě 110 kV v majetku ČEPS, a.s.

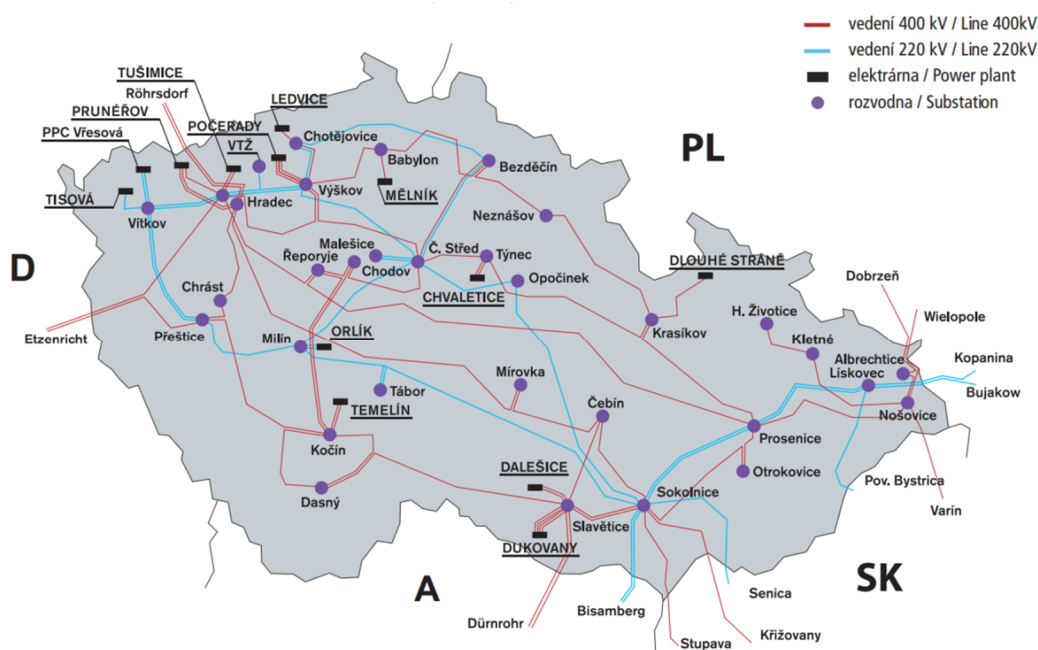
Do sekundární techniky patří systémy chránění PS, např. systémy chránění přenosových vedení, blokových vedení, systémových transformátorů, systémy chránění zařízení mezi přenosovou a distribuční soustavou a další.

Přibližné počty objektů a el. komponent přenosové soustavy:

- rozvodny – 41
- vedení 400 kV – 3500 km v 68 linkách
- vedení 220 kV – 1900 km v 32 linkách
- vedení 110 kV – 80 km v 6 linkách
- transformátory – 71
- spínací přístroje – 2500
- rozvodná pole – 400

- vypínače – 370

Struktura přenosové soustavy ČR je znázorněna na obrázku 4. [19,20,24,25]



Obr. 4 – Struktura přenosové soustavy ČR [25]

5.2 SÍŤOVÁ OMEZENÍ – VEŘEJNĚ PŘÍSTUPNÁ DATA

Pro zpracování záznamů o síťových omezeních (poruchách) v přenosové soustavě ČR byla použita veřejně dostupná data z webových stránek společnosti ČEPS, a.s. z let 2010 – 2013, která obsahují následující informace:

- časové záznamy o začátcích a koncích poruch
- identifikaci vedení (linek)
- typ vedení (blokové, hraniční, přenosové)
- příčiny poruch zaznamenaných dispečery

Z výše uvedených dat byly zjištěny s využitím programu MS Excel následující údaje:

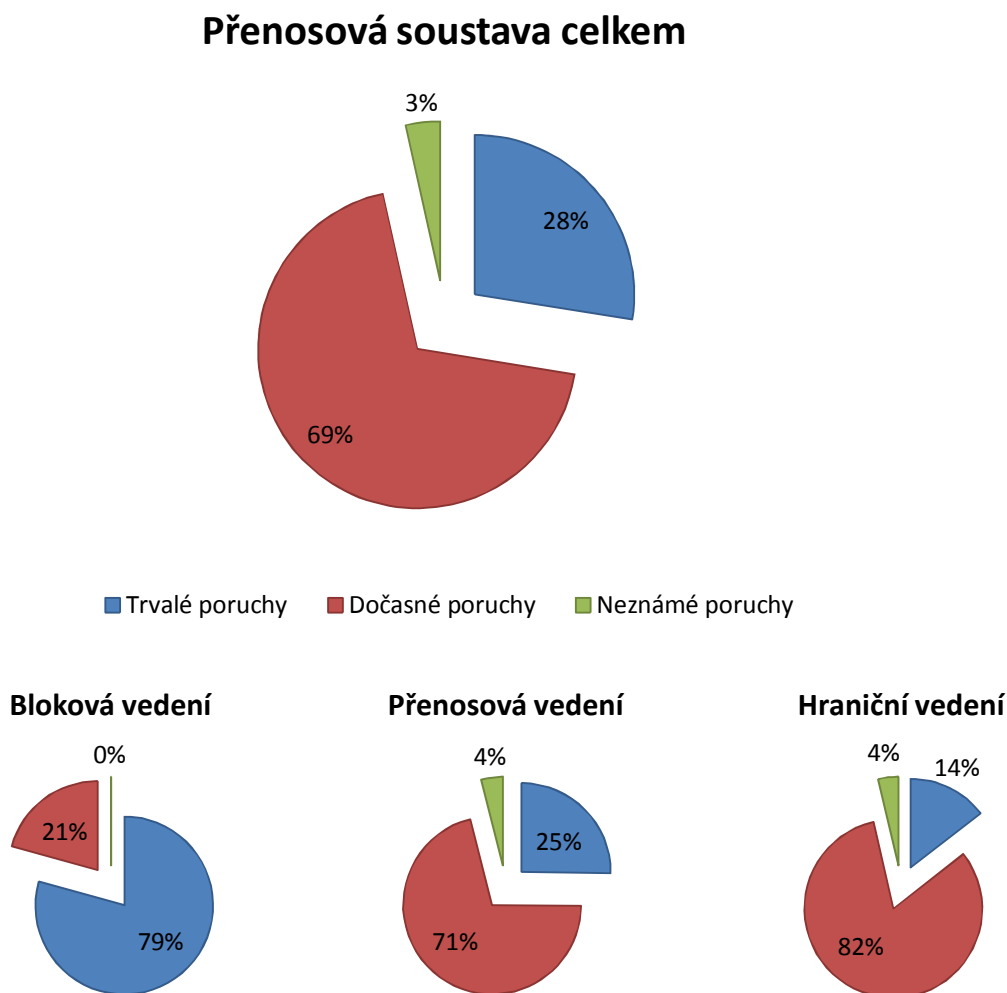
- poměr dočasných a trvalých poruch v celé PS
- střední doba poruch přenosových vedení
- intenzita poruch přenosových vedení

5.2.1 Poměr dočasných a trvalých poruch v PS

Kritériem pro rozlišení dočasných a trvalých poruch byl čas trvání jednotlivých výpadků. Poruchy, jejichž trvání nepřesáhlo 1 minutu (takové poruchy vymizí samovolně nebo trvají jen po dobu působení vnějšího vlivu a jsou vyřešeny automatikou OZ), byly označeny za

dočasné. Všechny ostatní poruchy, tedy s dobou trvání větší než 1 min., byly identifikovány jako trvalé. Poruchy označené jako neznámé jsou takové, které byly zaznamenány, avšak jejich dobu trvání nebylo možné stanovit z důvodu chybných nebo neúplných časových údajů.

Obrázek 5 ukazuje grafické zpracování poměru trvalých a dočasných poruch v jednotlivých typech vedení a v celé přenosové soustavě.



Obr. 5 – Podíl trvalých a dočasných poruch v PS ČR v letech 2010 – 2013

5.2.2 Střední doba poruch přenosových vedení

Střední doba poruch přenosových vedení byla vypočtena souhrnně za všechny linky podle vztahu (19):

- celkový počet poruch ve všech linkách: $N = 175$
- celková doba poruch ve všech linkách: $\sum t_i = 1453,66$ [hod]
- střední doba poruch T_p :

$$T_p = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{N} = \frac{1453,66}{175} = 8,3 \text{ hod}$$

5.2.3 Intenzita poruch přenosových vedení

Intenzita poruch byla vypočtena ze záznamů o poruchách ve všech dílčích linkách přenosových vedení ve vyšetřovaném období a to dvěma různými způsoby.

a) Výpočet podle vztahu (15):

- celkový počet poruch ve všech linkách: $N = 175$
- vyšetřované období: $X = 4$ roky
- celková délka vedení v provozu: $L = 4380,6$ km
- intenzita poruch přenosových vedení λ :

$$\lambda = \frac{N}{L \times 0,01 \times X} = \frac{175}{4380,6 \times 0,01 \times 4} = \mathbf{0,999 \text{ rok}^{-1}/100 \text{ km}}$$

b) Výpočet pomocí metody minimálních čtverců, vztahy (17) a (18):

- počet linek v provozu: $n = 57$
- celková délka vedení v provozu: $\sum x_i = 4\,380,6$ km
- průměrný počet poruch za rok ve všech linkách: $\sum y_i = 44$
- $\sum x_i y_i = 4\,147,9$
- $\sum x_i^2 = 462\,046,0$
- $(\sum x_i)^2 = 19\,189\,656,4$
- strmost regresní přímky k :

$$k = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - (\sum_{i=1}^n x_i)(\sum_{i=1}^n y_i)}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} = \frac{57 \times 4\,147,9 - 4\,380,6 \times 44}{57 \times 462\,046,0 - 19\,189\,656,4} = \mathbf{0,00624}$$

- průsečík s osou y q :

$$q = \frac{(\sum_{i=1}^n x_i^2)(\sum_{i=1}^n y_i) - (\sum_{i=1}^n x_i)(\sum_{i=1}^n x_i y_i)}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} = \frac{462\,046,0 \times 44 - 4\,380,6 \times 4\,147,9}{57 \times 462\,046,0 - 19\,189\,656,4} = \mathbf{0,28794}$$

- intenzita poruch na 100 km je tedy:

$$\lambda = k \times 100 = \mathbf{0,624 \text{ rok}^{-1}/100 \text{ km}}$$

5.3 PLÁNOVANÉ ODSTÁVKY – VEŘEJNĚ PŘÍSTUPNÁ DATA

Pro zpracování záznamů o plánovaných odstávkách v přenosové soustavě ČR byla použita rovněž veřejně dostupná data z webových stránek společnosti ČEPS, a.s. z let 2010 – 2013, které obsahují:

- časové záznamy o předpokládaném začátku a konci odstávky
- identifikaci vedení (linky)
- typ vedení (blokové, hraniční, přenosové)

Z výše uvedených dat byly zjištěny s využitím programu MS Excel následující údaje:

- střední doba plánovaných odstávek přenosových vedení
- intenzita plánovaných odstávek přenosových vedení

5.3.1 Střední doba plánovaných odstávek

Střední doba plánovaných odstávek přenosových vedení byla vypočtena souhrnně za všechny linky tohoto vedení podle vztahu (19):

- o celkový počet odstávek ve všech linkách: $N = 1336$
- o celková doba odstávek ve všech linkách: $\sum t_i = 312867,0$ [hod]
- o střední doba odstávek T_p :

$$T_p = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{N} = \frac{312867,0}{1336} = 234,2 \text{ hod}$$

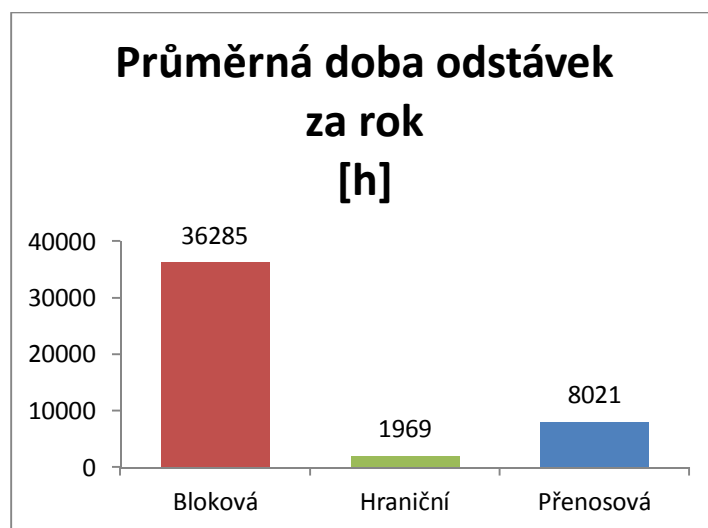
5.3.2 Intenzita plánovaných odstávek

Pro stanovení intenzity plánovaných odstávek přenosových vedení byl použit vztah (15):

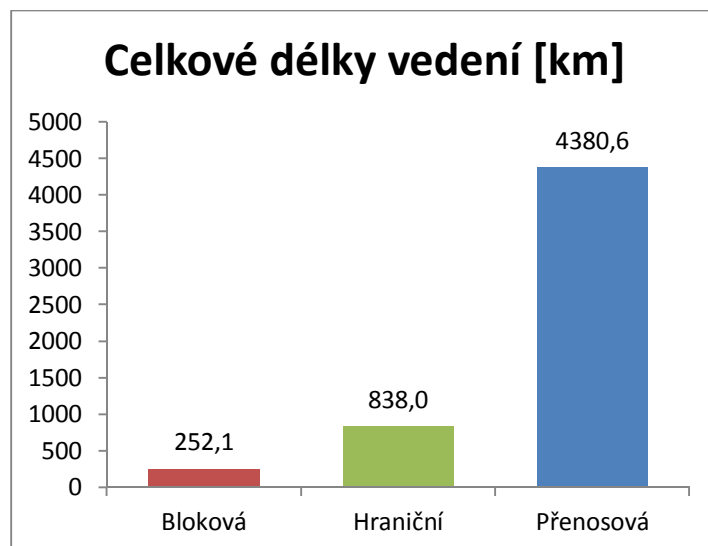
- o celkový počet odstávek ve všech linkách: $N = 1336$
- o vyšetřované období: $X = 4$ roky
- o celková délka vedení, na nichž došlo k odstávkám: $L = 4380,6$ km
- o intenzita odstávek přenosových vedení λ :

$$\lambda = \frac{N}{L \times 0,01 \times X} = \frac{1336}{4380,6 \times 0,01 \times 4} = 7,625 \text{ rok}^{-1}/100 \text{ km}$$

Porovnání celkových dob odstávek v jednotlivých typech vedení s jejich celkovou délkou ukazují obrázky 6 a 7.



Obr. 6 – Podíl trvalých a dočasných poruch v PS ČR v letech 2010 – 2013



Obr. 7 – Celkové délky vedení PS ČR v letech 2010 – 2013

5.3.3 Součinitel prostoje a pohotovosti

Součinitelé prostoje a pohotovosti jednotlivých linek přenosových vedení byly vypočteny podle vztahů (20) a (21). Příklad výpočtu pro linku V401:

- celková doba všech poruch a odstávek linky: $t_n = 7350,48 \text{ hod.}$
- celková doba bezporuchového provozu: $t_p = 27689,52$

$$k_{poh} = \frac{t_p}{t_p + t_n} = \frac{27689,52}{27689,52 + 7350,48} = \mathbf{0,653} \quad (40)$$

$$k_{pr} = 1 - k_{poh} = 1 - 0,653 = \mathbf{0,347} \quad (41)$$

Výsledky součinitelů ostatních linek jsou uvedeny v příloze 7.

5.4 SÍŤOVÁ OMEZENÍ – INTERNÍ DATA

Výpočty intenzit poruch přenosových vedení byly pro srovnání rozšířeny o interní záznamy ČEPS, a.s. (síťová omezení na vedeních PS mezi roky 2001 – 2009), které obsahují:

- seznam linek přenosové soustavy
- délky jednotlivých linek
- počty závad
- počty poruch
- počty OZ

Z těchto informací byla následně stanovena intenzita poruch přenosových vedení v období 2001 – 05 a 2006 – 09 podle již zmíněných výpočtů. Výsledky prezentuje tabulka 3 a 4.

Tabulka 3 – Výpočet intenzit poruch klasickým výpočtem

období	X [rok]	L [km]	N [-]	λ [rok ⁻¹ /100 km]
2001 – 2005	5	4 313,2	284	1,31689
2006 – 2009	4	4 313,2	171	0,99114

Tabulka 4 – Výpočet intenzit poruch metodou nejmenších čtverců

období	Σx	Σy	Σxy	Σx^2	$(\Sigma x)^2$	n	k	q	λ [rok ⁻¹ /100 km]
2001 - 2005	4 313,2	56,8	5 731,65	457533,42	18 603 651,1	56	0,0108	0,1804	1,08265
2006 - 2009	4 313,2	42,75	4 233,78	457533,42	18 603 651,1	56	0,0075	0,1850	0,75094

Hrubá data, ze kterých byly vypočteny hodnoty v tabulkách 3 a 4, nebylo možné zveřejnit z důvodu případného zneužití třetí osobou.

5.5 VÝPADKY A PORUCHY ZAŘÍZENÍ – INTERNÍ DATA

Pro výpočty intenzit poruch zařízení (transformátorů, vypínačů a odpojovačů) v přenosové soustavě ČR byla použita také interní data ČEPS, a.s. (poruchy a výpadky v letech 2003 – 2013) obsahující:

- počty zařízení
- počty poruch
- počty závad
- doby trvání poruch a závad transformátorů

Z těchto informací byla následně stanovena intenzita poruch každého typu zařízení podle vztahu (14) a střední doba poruch transformátorů podle vztahu (19).

Příklad výpočtu intenzity poruch pro transformátory v letech 2010 – 2013:

- vyšetřované období: $X = 4$
- celkový počet poruch ve vyšetřovaném období: $N = 24$
- střední hodnota počtu zařízení ve vyšetřovaném období: $Z = 70,5$
- intenzita poruch λ :

$$\lambda = \frac{N}{Z \times X} = \frac{24}{70,5 \times 4} = \mathbf{0,0851} \text{ [rok}^{-1}\text{]}$$

Výsledky intenzit poruch zařízení ukazuje tabulka 5.

Tabulka 5 – Intenzity poruch zařízení PS v letech 2003 – 2010

Období	Zařízení	počet (stř. hodnota)	N	λ [rok ⁻¹]
2003 - 2005	Transformátory vvn a zvn	65,0	12	0,0615
	Vypínače SF ₆ vvn a zvn	284,7	15	0,0176
	Odpojovače vvn a zvn	3331,0	19	0,0019
Období	Zařízení	počet (stř. hodnota)	N	λ [rok ⁻¹]
2006 - 2009	Transformátory vvn a zvn	70,0	23	0,0821
	Vypínače SF ₆ vvn a zvn	293,5	19	0,0162
	Odpojovače vvn a zvn	3170,0	57	0,0045
Období	Zařízení	počet (stř. hodnota)	N	λ [rok ⁻¹]
2010 - 2013	Transformátory vvn a zvn	70,5	24	0,0851
	Vypínače SF ₆ vvn a zvn	331,0	22	0,0166
	Odpojovače vvn a zvn	3259,3	78	0,0060

Střední doba poruch transformátorů v letech 2006 – 2009:

- o počet poruch: $N = 23$
- o celková doba trvání poruch: $\sum t_i = 679,8 \text{ hod}$

$$T_p = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{N} = \frac{679,8}{23} = \mathbf{29,6 \text{ hod}}$$

Střední doba poruch transformátorů v letech 2009 – 2013:

- o počet poruch: $N = 24$
- o celková doba trvání poruch: $\sum t_i = 4943,3 \text{ hod}$
- o střední doba poruch T_p :

$$T_p = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{N} = \frac{4943,3}{24} = \mathbf{206,0 \text{ hod}}$$

Stejně jako v případě hrubých dat (síťová omezení) nebylo možné ani tato data k výpočtům spolehlivosti zařízení přenosové soustavy zveřejnit.

5.6 ZHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

5.6.1 Přehled získaných výsledků

Výsledky výzkumu spolehlivosti přenosové soustavy ČR přehledně shrnují následující tabulky:

Tabulka 6 – Výpočty intenzit poruch a jejich střední doby v letech 2001 – 2013

Období	komponent- km.roky	N	λ [rok ⁻¹ /100 km]		T _p [h]
			klasíc. výpočet	metoda min čtverců	
2001 – 2005	21 566,0	284	1,317	1,083	
2006 – 2009	17 252,8	171	0,991	0,751	
2010 – 2013	17 522,4	175	0,999	0,625	8,3

Tabulka 7 – Výpočty intenzit plán. odstávek a jejich střední doby v letech 2010 – 2013

Období	komponent- km.roky	N	λ [rok ⁻¹ /100 km]	T _p [h]
2010 – 2013				
Plán. odstávky	17522,4	1336	7,625	234,2

Tabulka 8 – Maximální součinitele prostoje v linkách přenosového vedení v letech 2010 – 2013 a průměrné hodnoty všech přenosových vedení

Identifikace linky	Délka vedení [km]	Doba poruch [h]	Doba odstávek [h]	t _n [h]	k _{poh} [-]	k _{pr} [-]
V420	209,6	52,29	29438,0	29490,3	0,086	0,914
V473	35,6	0,00	19042,0	19042,0	0,296	0,704
V433	142,8	0,00	18639,5	18639,5	0,306	0,694
V207	168,9	0,00	14825,0	14825,0	0,405	0,595
Přenosová vedení průměr:	76,9	25,50	5488,90	5514,40	0,753	0,247

Tabulka 9 – Výpočty intenzit poruch el. zařízení přenosové soustavy ČR v letech 2003 – 2005

Období	Zařízení	komponent-roky	N	λ [rok ⁻¹]
2003 - 2005	Transformátory vvn a zvn	195	12	0,0615
	Vypínače SF ₆ vvn a zvn	854,1	15	0,0176
	Odpojovače vvn a zvn	9993	19	0,0019

Tabulka 10 – Výpočty intenzit poruch el. zařízení a střední doby poruch transformátorů přenosové soustavy ČR v letech 2006 – 2013

Období	Zařízení	komponent -roky	N	λ [rok ⁻¹]	T _p [h]
2006 - 2009	Transformátory vvn a zvn	280,0	23	0,0821	29,6
	Vypínače SF ₆ vvn a zvn	1174,0	19	0,0162	
	Odpojovače vvn a zvn	12680,0	57	0,0045	
Období	Zařízení	komponent -roky	N	λ [rok ⁻¹]	T _p [h]
2010 - 2013	Transformátory vvn a zvn	282	24	0,0851	206
	Vypínače SF ₆ vvn a zvn	1324	22	0,0166	
	Odpojovače vvn a zvn	13037,2	78	0,0060	

5.6.2 Porovnání hodnot se spolehlivostní databází

Intenzity poruch

Všechny získané hodnoty intenzit poruch u nadzemních vodičů ve vyšších napěťových hladinách se pohybují v intervalu 0,26 až 2,5 (rok⁻¹/100 km). V české přenosové soustavě pak mezi hodnotami 0,63 – 1,3 (rok⁻¹/100 km). Poměrně široké rozpětí hodnot je dáno tím, že některé studie zahrnovaly do výpočtů nadzemní vodiče v napěťových hladinách, které v českých poměrech odpovídají spíše distribučním sítím. Nejvíce se intenzity poruch v české přenosové soustavě blížily studii Dalabeih et al., kde se dokonce v posledním vyšetřovaném období tyto hodnoty vypočtené metodou minimálních čtverců bezmála shodovaly. Důvodem je zřejmě podobnost napěťových hladin obou soustav vzhledem k ostatním studiím.

Dále z analýzy zahraniční literatury i z vlastního výzkumu vyšlo najevo, že nejvíce poruch v nadzemních vedeních mělo dočasný charakter a bylo způsobeno vnějšími vlivy (přírodními podmínkami). I toto zjištění může mít tedy svůj podíl na různých hodnotách intenzit poruch v různých studiích, neboť každý průzkum probíhal v jiné lokalitě s různými povětrnostními podmínkami a v jiném období.

Transformátory v českém prostředí v porovnání se zahraničními výzkumy vykazují vyšší míru poruchovosti. Hodnoty intenzit poruch ležící v intervalu 0,062 – 0,085 rok⁻¹ jsou zhruba 5x až 6x vyšší, než uvádějí zahraniční výzkumy u transformátorů ve vyšších napěťových hladinách (Dalabeih et al. 0,015 rok⁻¹ a IEEE 0,013 rok⁻¹). Jelikož žádná studie neuvádí bližší popis parametrů zkoumaných zařízení, lze tyto rozdíly přičíst velkému spektru různých typů a velikostí těchto strojů, jež byly zahrnuty do výpočtů.

Vypínače ve vyšších napěťových hladinách jsou v české přenosové soustavě asi 3x spolehlivější v porovnání se studií Dalabeih et al. ($\lambda = 0,036 \text{ rok}^{-1}$). Studie IEEE naopak vykazuje o něco nižší poruchovost (průměrná intenzita poruch $\lambda = 0,011 \text{ rok}^{-1}$) ve srovnání s českou přenosovou soustavou. V případě těchto zařízení se naopak ukázalo, že různé typy vypínačů v různých napěťových hladinách vykazují podobnou spolehlivost.

Ostatní spolehlivostní ukazatele

Co se týče ostatních spolehlivostních ukazatelů, bylo možné porovnat jen střední doby poruch transformátorů a nadzemních vedení se studií Dalabeih et al.

Hodnota střední doby poruch transformátorů dosáhla v jordánské přenosové soustavě 1,95 h. V české přenosové soustavě je tato hodnota 29,6 h v prvním, resp. 206,0 h v druhém období. Jelikož se hodnoty velmi liší jak v rámci české přenosové soustavy, tak v porovnání se zahraničím, museli bychom mít k dispozici ještě další informace, abychom mohli vyvozovat nějaké závěry o středních dobách poruch těchto strojů.

Střední doba poruch nadzemních vedení (3,44 h) vychází v jordánském výzkumu zhruba 2,5x nižší, než v českém prostředí, kde dosáhla na hodnotu 8,31 h. Ovšem jordánská přenosová soustava je co do délky svých vedení zhruba 4,5x menší než česká, tudíž výsledek z českého prostředí vychází lépe.

Odpojovače nebylo možné porovnat s databází, neboť se jimi žádná analyzovaná zahraniční literatura nezabývá. Naopak přípojnicemi se zabývaly všechny zahraniční studie, ovšem z české přenosové soustavy o nich nebyly získány žádné konkrétní provozní záznamy, tudíž nebylo možné provést porovnání. Nejvyšší spolehlivostní vlastnosti přípojnic ve vyšších napěťových hladinách udává studie Hale et al. ($\lambda = 0,018$ až $0,041 \text{ rok}^{-1}$).

ZÁVĚR

V rámci této diplomové práce byla vytvořena spolehlivostní databáze elektrických komponent na základě detailní analýzy zahraničních studií, které se v minulosti zabývaly spolehlivostí v energetice. Z těch bylo vybráno pět nejrozsáhlejších, které byly v této práci stručně popsány, vzájemně porovnány a následně zahrnuty do databáze. Dále byl proveden výzkum spolehlivosti nadzemních vedení přenosové soustavy ČR, k němuž byly použity veřejně dostupné záznamy z let 2010 až 2013 společnosti ČEPS, a.s. Pro zpracování těchto záznamů byly vytvořeny tři programy v aplikaci MS Excel, jejichž výstupem je výpočet nejdůležitějších spolehlivostních ukazatelů přenosových vedení a grafické znázornění dalších vlastností přenosové soustavy. Tyto ukazatele byly dále rozšířeny o výpočty intenzit poruch přenosových vedení v letech 2001 – 2009 z interních zdrojů ČEPS, a.s. V další fázi výzkumu byla provedena analýza interních dat ČEPS, a.s., na jejímž základě byly stanoveny spolehlivostní ukazatele ostatních elektrických komponent přenosové soustavy mezi roky 2003 – 2013. Dosažené výsledky byly v závěru práce porovnány se spolehlivostní databází.

Z analýzy zahraniční literatury vyšlo najevo, že metody výpočtu intenzity poruch, byly napříč všemi studii totožné, až na výpočet ve výzkumu Dalabeih et al., kde byla použita metoda nejmenších čtverců. Ačkoliv byly všechny studie relativně rozsáhlé, zabývala se každá trochu jinými spolehlivostními ukazateli, tudíž nebylo možné vytvořit zcela kompletní spolehlivostní databázi.

Výzkum spolehlivosti nadzemních vedení přenosové soustavy ČR přinesl řadu zajímavých poznatků. Jedním z nich bylo zjištění, že téměř $\frac{3}{4}$ všech poruch přenosových vedení měly krátkodobý charakter, z čehož lze usuzovat, že jejich příčinou byly zejména přírodní faktory. To také napovídá tomu, že jejich spolehlivost není významně ovlivněna poruchovostí ostatních zařízení v síti. Hodnoty intenzit poruch vedení se ve všech sledovaných obdobích pohybovaly mezi 0,63 – 1,32 ($\text{rok}^{-1}/100 \text{ km}$), při čemž výpočty metodou minimálních čtverců vykazovaly o něco lepší výsledky. Intenzita plánovaných odstávek přenosových vedení byla vypočtena pouze v posledním vyšetřovaném období, kde dosáhla hodnoty 7,6 ($\text{rok}^{-1}/100 \text{ km}$). Střední doby poruch a plánovaných odstávek mezi roky 2010 – 2013 činily 8,3 h na poruchu, resp. 234 h na odstávku. Průměrný prostoj všech přenosových vedení v tomto období dosahoval asi 25 %. Nejvyšší mírou se na této hodnotě podílely linky V473, V433 a V420, která navíc byla i nejporuchovější.

Rostoucí trend intenzit poruch byl zaznamenán ve sledovaných obdobích u odpojovačů, jejichž poruchovost se mezi prvním a druhým vyšetřovaným obdobím více než zdvojnásobila (z $0,0019$ na $0,0045 \text{ rok}^{-1}$) a v dalším období opět vzrostla zhruba o 35 % na hodnotu $0,006 \text{ rok}^{-1}$. Příčinou této tendence může být postupné stárnutí zařízení nebo vyšší, i nižší frekvence užívání. Naopak mírným poklesem poruchovosti (z $0,0176$ na $0,0166 \text{ rok}^{-1}$) se projevíly vypínače, patrně díky vzrůstajícímu počtu vypínačů SF_6 v přenosové síti, které jsou obecně spolehlivější než starší tlakovzdušné. Transformátory v prvním vyšetřovaném období vykazovaly vyšší spolehlivost než v obdobích následujících. Intenzity poruch se pohybovaly mezi hodnotami $0,0625 \text{ rok}^{-1}$ až $0,0851 \text{ rok}^{-1}$ ve všech obdobích. Střední doby poruch byly stanoveny pouze u transformátorů, kde hodnota 206 h zjištěná v druhém období byla téměř 7x vyšší než v prvním. Podle dostupných informací byla příčinou tak velkého rozdílu exploze průchodky a následný požár jednoho stroje v tomto vyšetřovaném období.

Závěrečným srovnáním spolehlivosti české přenosové soustavy se spolehlivostní databází vyšlo najevo, že vypínače vykazují lepší spolehlivost v českém prostředí, naopak transformátory jsou o něco poruchovější. Nadzemní vodiče leží zhruba v lepší polovině pomyslné stupnice spolehlivosti.

Dosažené výsledky v této práci mohou být dále využity například v problematice zabývající se monitorováním rizik v přenosových soustavách a pravděpodobnostnímu hodnocení bezpečnosti.

SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ

- [1] MARTÍNEK, Zbyněk a Josef HÁJEK. Teorie spolehlivosti v energetice. 1. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2002, 150 s. ISBN 80-708-2894-3.
- [2] MARTÍNEK, Zbyněk a Josef HÁJEK. Analýza spolehlivosti přenosových a rozvodných sítí ES ČR. 1. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2002, 92 s. ISBN 80-708-2895-1.
- [3] BRIS, R. INNET - VŠB. Základy teorie spolehlivosti [online]. 2012 [cit. 2014-04-12]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~bri10/Teaching/Statistika%20II/skriptum/4_Teorie_spolehlivosti.PDF
- [4] VROŽINA, M. a J. DAVID. Spolehlivost a diagnostika. 2012. Dostupné z: <http://www.person.vsb.cz/archivcd/FMMI/SD/Spolehlivost%20a%20diagnostika.pdf>
- [5] PowerWiki. Spolehlivost a zabezpečení soustav: Spolehlivost v elektroenergetice - část 6 [online]. 1998 [cit. 2013-12-18]. Dostupné z: <http://www.powerwiki.cz/attach/X15ZSE/Kap01.pdf>
- [6] HUSÁK, M. Spolehlivost systémů. 2009. Dostupné z: <http://www.micro.feld.cvut.cz/home/X34EVS/prednasky/12%20Spolehlivost%20systemu.pdf>
- [7] LEITNER, B. Názvosloví a základní pojmy teorie spolehlivosti. 2013. Dostupné z: http://fsi.utc.sk/ktvi/leitner/2_predmety/Inf1/text_na_vyuku1.doc
- [8] OTIPKA, P. a V. ŠMAJSTRLA. Náhodná veličina [online]. 2007 [cit. 2014-03-30]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~oti73/cdpast1/KAP03/PRAV3.HTM>
- [9] TORELL, W. a V. AVELAR. Střední doba mezi poruchami: vysvětlení a standardy. 2004. Dostupné z: <http://gabben.wbs.cz/mtbf1.pdf>
- [10] NOVOTNÝ, R. Analýzy vad při zabezpečování spolehlivosti elektronických součástek. Elektrověda [online]. 2001, 2001/28 [cit. 2014-03-30]. Dostupné z: <http://www.elektrověda.cz/clanky/01028/index.html>
- [11] FUCHS, P., D. VALIŠ, J. CHUDOBA, J. KAMENICKÝ a J. ZAJÍČEK. Řízení jakosti a spolehlivosti. Ústav řízení systémů a spolehlivosti, 2011. Dostupné z: <http://www.rss.tul.cz/index.php?page=studium/predmet&zkod=rjs>
- [12] ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE. Review of the Reliability of Electric Distribution System Components: EPRI White Paper. [online]. 2001, N/A, s. 192 [cit. 2013-12-11]. Dostupné z:

- <http://www.epri.com/abstracts/Pages/ProductAbstract.aspx?ProductId=00000000001001873>
- [13] DALABEIH, D.M. a Y.A. JEBRILL. Determination of data for reliability analysis of a transmission system. In: VENUE, University of Warwick a BEAMA AL]. Second International Conference on 'The Reliability of Transmission and Distribution Equipment': 29-31 March 1995 [online]. London: Institution of Electrical Engineers, 1995 [cit. 2014-04-24]. ISBN 0852966288. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=396019&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel3%2F3157%2F8975%2F00396019.pdf%3Farnumber%3D396019>
- [14] HALE, P.S. a R.G. ARNO. Survey of reliability and availability information for power distribution, power generation, and HVAC components for commercial, industrial, and utility instalations. In: SOCIETY .., Co-sponsored by the IEEE Industry Applications.. Conference record: papers presented at the 2000 Annual Meeting, Sheraton Sand Key Resort, Clearwater Beach, Florida, May 7 - 11, 2000 [online]. Piscataway, NY: IEEE Operations Center, 2000 [cit. 2014-04-24]. ISBN 0780358430. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=854354>
- [15] GANNON, P.E., M.D. HARRIS, C.R. HEISING, D.W. MCWILLIAMS, R.W. PARISIAN, A.D. [16] PATTON a W.J. PEARCE. Annex A: Report on Reliability Survey of Industrial Plants. In: HARRIS, D. W. MCWILLIAMS a A. D. PATTON. Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. [online]. Atlanta, Georgia, 1973 [cit. 2014-04-24]. Dostupné z: <http://standards.ieee.org/downloads/493/493-2007/493-2007.AnnexA.pdf>
- [16] GANNON, P.E., M.D. HARRIS, C.R. HEISING, D.W. MCWILLIAMS, R.W. PARISIAN, A.D. PATTON a W.J. PEARCE. Annex B: Report on Reliability Survey of Industrial Plants. In: HARRIS, MCWILLIAMS, PATTON, D. W. HARRIS, MCWILLIAMS a PATTON. Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. [online]. Denver, Colorado, 1974 [cit. 2014-04-24]. Dostupné z: <http://standards.ieee.org/downloads/493/493-2007/493-2007.AnnexB.pdf>
- [17] HORTON, W.F., S. GOLDBERG a C.A. VOLKMANN. The failure rates of overhead distribution system components. In: Proceedings of the 1991 IEEE Power Engineering Society [online]. Piscataway, NJ: Available from IEEE Service Center, c1991 [cit. 2014-04-24]. ISBN 0780302214. Dostupné z: http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=169563&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D169563
- [18] VOLKMANN, C.A., S. GOLDBERG a W.F. HORTON. A probabilistic approach to distribution system reliability assesment. In: GOLDBERG. Third International Conference on Probabilistic Methods Applied to Electric Power Systems, 3-5 July 1991 [online]. London: The Institution, 1991 [cit. 2014-04-24]. Conference

- publication (Institution of Electrical Engineers), no. 338. ISBN 0852965133. Dostupné z:
<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=151842&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel3%2F1212%2F3982%2F00151842.pdf%3Farnumber%3D151842>
- [19] Kodex PS. Čeps, a.s. [online]. 2014 [cit. 2014-05-06]. Dostupné z: <http://www.ceps.cz/CZE/Data/Legislativa/Kodex/Stranky/default.aspx>
- [20] HONIŠ, R., M. KONEČNÝ, M. GALETKA a I. ULLMAN. Přenosová soustava České Republiky. ISBN 978-80-905392-3-5. Dostupné z: <http://partnerstvi-energetiky.msek.cz/wp-content/uploads/2013/01/01-Prenosova-soustava-Ceske-republiky.pdf>
- [21] TESKOVÁ, Libuše. Lineární algebra. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2005, 243 s. ISBN 80-704-3413-9.
- [22] ČERVENKA, M. Metoda nejmenších čtverců. Dostupné z: <http://herodes.feld.cvut.cz/mereni/mnc/mnc.php>
- [23] KLOUDA, K. Metoda minimálních čtverců.. Dostupné z: <http://www.kloudak.eu/metoda-nejmensich-ctvercu/>
- [24] Přenosová soustava. CenyEnergie [online]. 2010 [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: <http://www.cenyenergie.cz/prenosova-soustava/>
- [25] Publikace ČEPS. ČEPS, a.s. [online]. 2012 [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: https://www.ceps.cz/CZE/Media/Ke-stazeni/Documents/Profil_CEPS_2012_web.pdf

SEZNAM PŘÍLOH

- P1: Tabulky Dalabeih et al.
- P2: Tabulka Hale et al. – vybrané kategorie
- P3: Tabulka IEEE – vybrané kategorie
- P4: Tabulka Horton et al. – vybrané el. komponenty
Tabulka Volkmann et al. – vybrané el. komponenty
- P5: Spolehlivostní databáze
- P6: Popis programů pro zpracování dat ČEPS, a.s.
- P7: Součinitelé pohotovosti a prostoje jednotlivých linek přenosových vedení
- P8: Programy pro zpracování veřejně dostupných dat ČEPS, a.s.

PŘÍLOHY

Příloha 1 – tabulky Dalabeih et al.

Intenzity poruch a plán. odstávek přenosových vedení 132 kV

TYP	q průsečík s osou y	k [přerušení/km.rok]	n datové body	$\sum X_i$	$\sum X^2$	$\sum Y$	$\sum Y^2$	$\sum XY$
poruchy	0,4505	0,0064	18	951,69	96 261,9	14,2	21,88	1 045,9
plánované odstávky	1,657	0,0399	17	616,5	34 514,2	52,8	219,2	2 400,4

Střední doby trvání poruch a plán. odstávek přenosových vedení 132 kV

TYP	r [h]	$\sum t_i$
poruchy	3,44	14 462
plánované odstávky	8,44	136 225

Intenzity poruch a plán. odstávek komponent v přenosové soustavě

TYP	ZAŘÍZENÍ	λ [přerušení/ komponent- roky]	počet přerušení	T [komponent- roky]
poruchy	132/33 kV transformátory	0,015	5	330
	132 kV vypínače	0,036	33	915
	132 kV přípojnice	0,011	3	260
plánované odstávky	132/33 kV transformátory	0,584	73	125
	132 kV vypínače	1,197	491	410
	132 kV přípojnice	0,766	92	120

Doby trvání poruch a plán. odstávek komponent v přenosové soustavě

TYP	ZAŘÍZENÍ	r [h]	n datové body	$\sum t_i$
poruchy	132/33 kV transformátory	1,95	5	585
	132 kV vypínače	1,95	33	5 055
	132 kV přípojnice	3,17	3	570
plánované odstávky	132/33 kV transformátory	9,03	73	39 529,8
	132 kV vypínače	4,19	283	71 134,8
	132 kV přípojnice	2,49	120	17 896,2

Příloha 2 – tabulka Hale et al. – vybrané kategorie

KATEGORIE	spolehlivost	komponent-roky	počet poruch	IP intenzita poruch [poruch/rok]	SDMP střední doba mezi poruchami	SDO střední doba do opravy	SDÚ střední doba údržby	SDP střední doba prostoje	SDMA střední doba mezi údrž. a opravami
Přípojnicové rozvody									
všechny typy	0,999696290	1 679,0	0	0,0003	x	x	x	x	x
Vodiče /km									
nadzemní > 600V ≤ 5 kV	0,997171966	54,9	0	0,00928	3 093 176,0	0,00	0	x	x
nadzemní vodiče ≤ 15 kV	0,953928762	10 611,5	311	0,02931	185 725,9	1,82	0	1,817	185 726
nadzemní vodiče > 15 kV	0,995896395	49 704,4	127	0,00255	2 130 325,0	2,54	0	2,081	1 680 443
Vypínače									
vypínače 3f fixní	0,999996551	147 880,9	5	0,00000	25 400 557,0	x	8,2967	8,376	1 152 516
vypínače výsuvné	0,998892235	7 217,8	8	0,00111	7 903 437,0	3,13	2,0596	2,059	12 706
vypínače vakuové	0,980129686	1 943,2	39	0,02007	436 464,0	10,74	0,4031	0,480	3 263
Přípojnice									
holé přípojnice (> 5 kV)	0,982216877	780,2	14	0,01794	488 208,8	2,27	1,0000	1,296	8 079
izolované přípojnice (> 5 kV)	0,995913049	732,5	3	0,00410	2 139 024,0	37,33	14,0000	14,434	38 657
Transformátory suché									
chlazené vzduchem	0,999882198	4 329,0	0	0,00012	74 357 512,0	x	4,2724	4,272	77 078
≤ 500 kVA	0,999775100	2 267,4	0	0,00022	38 946 258,0	0,00	4,0000	3,826	863 591
> 500 kVA ≤ 1 500 kVA	0,999582527	1 221,4	0	0,00042	20 979 011,0	0,00	6,0000	6,000	465 187
> 1 500 kVA ≤ 3 000 kVA	0,999393210	840,2	0	0,00061	14 432 242,0	0,00	4,0000	4,206	16 503

Transformátory olejové									
nucený oběh vzduchu	0,989259891	2 593,0	28	0,01080	811 246,2	132,43	21,1758	22,066	6 494
≤ 10 000 kVA	0,992879584	419,8	3	0,00715	1 225 880,0	248,00	23,0000	23,677	2 606
≤ 5 000 kVA	0,987452327	1 821,5	23	0,01263	693 748,2	3,65	1,0000	0,976	76 345
> 10 000 kVA ≤ 50 000 kVA	0,994329760	351,7	2	0,00569	1 540 524,0	1440,00	22,0000	23,203	1 641
přirozený oběh vzduchu	0,997113141	6 226,1	18	0,00289	3 030 057,0	5,44	0,7600	0,850	58 270
≤ 3 000 kVA	0,998891114	5 407,8	6	0,00111	7 895 436,0	5,00	10,0000	8,394	2 153 301
> 10 000 kVA ≤ 50 000 kVA	0,982624792	627,6	11	0,01753	499 773,8	6,09	1,0000	0,648	6 081
> 3 000 kVA ≤ 10 000 kVA	0,994771048	190,7	1	0,00524	1 670 904,0	1,00	3,0000	2,500	167 090

Pozn.: u vodičů uvažujeme *komponent-km.roky*

Pozn.: x – *neznámý údaj*

Příloha 3 – tabulka IEEE – vybrané kategorie

ZAŘÍZENÍ	komponent- roky	počet poruch	intenzita poruch [poruch/rok]	Průměr. doba prostojů při poruše [hod/poruchu]			
				Průměr za celý průmysl	Min. průměr za závod	Medián průměr za závod	Max. průměr za závod
Transformátory olejové	15 210	63	0,0041	529	2	219	3 744
601 V - 15 kV - všechny	13 210	39	0,0030	174	2	49	840
300-750 kVA	3 002	11	0,0037	61	4,5	10,7	336
751-2 499 kVA	6 040	15	0,0025	217	2	64	840
> 2499 kVA	4 036	13	0,0032	216	24	60	403
> 15 kV	1 848	24	0,0130	1 076	12,8	1 260	3 744
Transformátory suché	4 937	18	0,0036	153	0,5	28	720
0 - 15 kV	4 937	18	0,0036	153	0,5	28	720
Vypínače fixní	9 501	49	0,0052	5,8	0,5	4	72
0 - 600 V - všechny	8 990	40	0,0044	4,7	0,5	4	11
0 - 600 A	7 643	27	0,0035	2,2	0,5	1	9
> 600 A	1 347	13	0,0097	9,6	5	8	11
> 600 V	510	9	0,0176	10,6	1,5	3,8	72
Vypínače výsvnné	40 770	124	0,0030	129	0,3	7,6	890
0 - 600 V - všechny	24 490	66	0,0027	147	0,2	4	894
0 - 600 A	11 270	26	0,0023	3,2	0,2	1	4
> 600 A	13 220	40	0,0030	232	0,2	5	894
> 600 V	16 280	58	0,0036	109	1,1	168	883
Přípojnice							
holé 0 - 600 V	32 280	11	0,0003	550	2	24	2 520
holé > 600 V	20 560	13	0,0006	17,3	6,9	13	48
izolované 601 V - 15 kV	11 740	20	0,0017	261	5	26,8	1 613
Přípojnicové rozvody	160 400	20	0,0001	128	0,5	9,5	2 160
Nadzemní vodiče /km							
0 - 15 kV	1 580,4	98	0,0620	42,5	1	4	3 600
> 15 kV	445	11	0,0247	17,5	0,4	12	48

Pozn.: u vodičů uvažujeme *komponent-km.roky*

Příloha 4- tabulka Horton et al. – vybrané el. komponenty

TYP SÍŤE	ZAŘÍZENÍ	intenzita poruch /rok	počet komponent	komponent-roky	počet poruch
venkovská	<i>transformátory</i>	0,000271	33 686	154 762	42
	<i>úsečnický</i>	0,001257	1 233	5 570	7
městská	<i>transformátory</i>	0,000614	18 522	74 962	46
	<i>úsečnický</i>	0,000775	1 858	7 745	6
TYP SÍŤE	VODIČE	intenzita poruch /km.rok	délka vodičů [km]	komponent-km.roky	počet poruch
venkovská	<i>nadzemní v.</i>	0,007581	12 013,8	54 693,5	417
městská	<i>nadzemní v.</i>	0,012303	3 925,2	15 214,7	187

- tabulka Volkmann et al. – vybrané el. komponenty

ZAŘÍZENÍ	<i>Venkovská síť</i>		<i>Městská síť</i>	
	intenzita poruch /rok	průměr. doba oprav [h]	intenzita poruch /rok	průměr. doba oprav [h]
<i>transformátory</i>	0,000271	3,08	0,000614	3,83
<i>úsečnický</i>	0,001260	1,58	0,000775	1,93
VODIČE	intenzita poruch /km.rok	průměr. doba oprav [h]	intenzita poruch /km.rok	průměr. doba oprav [h]
<i>nadzemní v.</i>	0,007581	3,58	0,011992	3,10

Příloha 5 – Spolehlivostní databáze

KATEGORIE	komponent -roky	počet poruch	Intenzita poruch [poruch/rok]	Střední doba poruch [h]	SDMP střední doba mezi poruchami	SDO střední doba do opravy	Prostoj v hod/poruchu (medián průměr za závod)	SDP střední doba prostoje	zdroj
Přípojnicové rozvody									
všechny typy	160 400	20	0,000125	x	x	x	9,50	x	IEEE
všechny typy	1 679,0	0	0,000300	x	x	x	x	x	Hale et al.
Vodiče / km									
nadzemní > 600V ≤ 5 kV	54,9	0,5	0,009284	x	3 093 176,0	0,00	x	x	Hale et al.
nadzemní ≤ 15 kV	10 611,5	311	0,029310	x	185 725,9	1,82	x	1,817	Hale et al.
nadzemní > 15 kV	49 704,4	127	0,002554	x	2 130 325,0	2,54	x	2,081	Hale et al.
nadzemní 0 - 15 kV	1 580,4	98	0,062010	x	x	x	4,00	x	IEEE
nadzemní > 15 kV	445	11	0,024719	x	x	x	12,00	x	IEEE
nadzemní 132 kV	10 937,5	70	0,006400	3,44	x	x	x	x	Dalabeih et al.
nadzemní 12 - 22 kV (prům.)	69 908,3	604	0,009942	x	x	3,58	x	x	Horton et al.
nadzemní 12 - 22 kV	x	x	0,009786	x	x	3,10	x	x	Volkman et al.
Vypínače									
vypínače 3f fixní	147 880,9	5	0,000034	x	25 400 557,0	x	x	8,376	Hale et al.
0 - 600 V	8 990	40	0,004449	x	x	x	4,00	x	IEEE
> 600 V	510	9	0,017647	x	x	x	3,80	x	IEEE
vypínače typu "metal clad"	7 217,8	8	0,001110	x	7 903 437,0	3,13	x	2,059	Hale et al.
0 - 600 V	24 490	66	0,002695	x	x	x	4,00	x	IEEE
> 600 V	16 280	58	0,003563	x	x	x	168,00	x	IEEE
vypínače vakuové	1 943,2	39	0,020070	x	436 464,0	10,74	x	0,480	Hale et al.
132 kV	915	33	0,036000	1,95	x	x	x	x	Dalabeih et al.

(Úsečníky)									
na hladině 12 - 22 kV	12 795	13	0,001016	x	x	x	x	x	Horton et al.
na hladině 12 - 22 kV	x	x	0,001016	x	x	x	x	x	Volkman et al.
Přípojnice									
holé > 5 kV	780,2	14	0,017940	x	488 208,8	2,27	x	1,296	Hale et al.
holé 0 - 600 V	32 280	11	0,000341	x	x	x	24,00	x	IEEE
holé > 600 V	20 560	13	0,000632	x	x	x	13,00	x	IEEE
izolované > 5 kV	732,5	3	0,004100	x	2 139 024,0	37,33	x	14,434	Hale et al.
izolované 601 V - 15 kV	11 740	20	0,001704	x	261	5	26,80	x	IEEE
132 kV	260	3	0,011000	3,17	x	x	x	x	Dalabeih et al.
Transformátory									
132/33 kV	330	5	0,015000	1,95	x	x	x	x	Dalabeih et al.
na hladině 12 - 22 kV	99 435	88	0,000885	x	x	x	x	x	Horton et al.
na hladině 12 - 22 kV	x	x	0,000885	x	x	x	x	x	Volkman et al.
Transformátory suché									
0 - 15 kV	4 937	18	0,003646	x	x	x	28,00	x	IEEE
chlazené vzduchem	4 329,0	0	0,000120	x	74 357 512,0	x	x	4,272	Hale et al.
Transformátory olejové									
601 V - 15 kV	13 210	39	0,002952	x	x	x	49,00	x	IEEE
> 15 kV	1 848	24	0,012987	x	x	x	1260,00	x	IEEE
nucený oběh vzduchu	2 593,0	28	0,010800	x	811 246,2	132,43	x	22,066	Hale et al.
přirozený oběh vzduchu	6 226,1	18	0,002890	x	3 030 057,0	5,44	x	0,850	Hale et al.

Pozn.: x - neznámý údaj

Pozn.: u vodičů uvažujeme *komponent-km.roky*

Příloha 6 – Popis programů pro zpracování dat ČEPS, a.s.

1. POPIS

Programy pro práci se síťovými omezeními a plánovanými odstávkami byly vytvořené v aplikaci MS Excel na základě dostupných historických záznamů o provozu přenosové soustavy ČR. Při jejich tvorbě byla respektována možnost pozdějšího vkládání aktuálních provozních záznamů z PS s automatickým přepočítáváním konečných výsledků.

Hlavní funkce programu pro zpracování síťových omezení:

- výpočet a grafické znázornění podílu trvalých a dočasných poruch v PS
- výpočet intenzity poruch přenosových vedení klasickým výpočtem
- výpočet intenzity poruch přenosových vedení metodou nejmenších čtverců
- výpočet střední doby poruch přenosových vedení

Hlavní funkce programu pro zpracování plánovaných odstávek:

- výpočet intenzity odstávek přenosových vedení klasickým výpočtem
- výpočet střední doby odstávek přenosových vedení

Oba programy (v prostředí MS Excel označeny termínem sešit) jsou propojeny se sešitem *seznam_vedeni*, který obsahuje soupis jednotlivých linek PS České Republiky.

Celý programový soubor tedy obsahuje následující sešity:

a) Sešit seznam_vedeni

Tento sešit obsahuje seznam jednotlivých linek PS. Do tohoto sešitu je možné přidávat nové linky, o které se díky propojení s ostatními sešity automaticky aktualizují konečné výsledky.

List *Vsechna* zahrnuje všechny linky PS. Další listy obsahují pouze rozdělení linek do příslušné kategorie vedení (*Blokova*, *Hraniční*, *Prenosova*). Všechny listy uvedené v tomto sešitu zahrnují následující informace:

- Line ID (identifikace linky)
- Substation A a Substation B (místo začátku a konce linky)
- Line length (délka linky v km)

List *Vsechna* navíc obsahuje sloupec *Typ vedení* (blokové, hraniční, přenosové).

b) Sešity sitova_omezeni a planovane_odstavky

Tyto sešity slouží k výpočtům a prezentaci výsledků, které realizují prostřednictvím několika listů:

- List *Data orig.* obsahuje originální historické záznamy o provozu PS a je určen pro další vkládání aktuálních záznamů.
- List *Mezivypocty* automaticky rozděluje originální data dle názvu jednotlivých linek a přiřazuje jim vlastnost *Typ vedení* (blokové, hraniční, přenosové). K tomu používá propojení se sešitem *seznam_vedeni*. Dále jsou v tomto listu vypočteny doby poruch (v hodinách) z jednotlivých časových záznamů o poruchách nebo plán. odstávkách z originálních dat.
- List *Vypocty* je také propojen se sešitem *seznam_vedeni*. Jeho úkolem je automaticky rozdělit všechny linky PS dle vlastnosti *Typ vedení* do tří skupin všem linkám přiřadit vlastnost *Délka vedení*. V tomto listu jsou následně vypočteny celkové doby poruch (resp. odstávek) a počty poruch (resp. odstávek) v jednotlivých linkách na základě záznamů v listu *Mezivypocty*. Dále obsahuje pomocné výpočty pro zjištění parametrů q a k , které popisují lineární regresní přímku (viz stanovení intenzity poruch pomocí metody nejmenších čtverců).
- List *Vysledky* je určen pro přehledné zobrazení konečných výsledků a grafů.
- List *Kriteria* je součástí pouze sešitu *sitove_poruchy* a obsahuje kritéria používaná v databázové funkci DPOČET pro výpočty poměru trvalých a dočasných poruch v PS.

c) Sešit *pohot_prostoje*

Tento sešit je propojen se sešity *sitova_omezeni* a *planovane_odstavky* a automaticky vypočítává součinitele prostoje a pohotovosti jednotlivých linek přenosových vedení. Po otevření tohoto sešitu je třeba zadat data do pole *Vyšetřované období* data, která musí být shodná s vyšetřovaným obdobím síťových omezení i plánovaných odstávek.

2. PRÁCE S PROGRAMY SITOVA_OMEZENI A PLANOVANE_ODSTAVKY

- I. Před samotným vložením aktuálních dat do programů je třeba zjistit poslední datum aktualizace databáze v listu *Vysledky* (pole *vyšetřované období*) a na základě tohoto zjištění stáhnout z internetových stránek společnosti ČEPS, a.s. záznamy ve formátu.xlsx od tohoto data dále. Dále je nutné zjistit, např. z kodexu ČEPS, a.s., zda nedošlo k odstavení některých přenosových linek či k uvedení do provozu nových a o tyto záznamy aktualizovat sešit *seznam_vedeni*.
- II. Po otevření programu se nejprve musí ručně aktualizovat pole *vyšetřované období* v listu *Vysledky*. Pokud se záznamy pouze vkládají k již existujícím, zadá se pouze datum do pole (*do*). Pokud je třeba vložit kompletně novou databázi, vyplní se obě pole (*od* a *do*). Aktuální záznamy se přidávají do listu *Data orig.* za již existující data. Zcela nové záznamy se do stejného sešitu přidávají až po kompletním smazání původní databáze v listu *Data orig.*

- III. Jelikož všechny nově stažené záznamy obsahují hlavičku (popis sloupců), je třeba tyto údaje smazat před vložením ke stávající databázi. Pokud se vkládá zcela nová databáze, musí hlavičky sloupců odpovídat formátu již existující databáze.
- IV. Pokud jsou dodržena výše uvedená pravidla, dojde k automatickému aktualizování všech hodnot, s nimiž jednotlivé listy počítají. Výsledky lze pak nalézt v listu *Výsledky*

3. FUNKCE POUŽITÉ PŘI VÝPOČTECH

Při výpočtech požadovaných hodnot bylo kromě základních matematických funkcí (*suma, rozdíl, průměr, a, nebo* atd.) použito složitějších vyhledávacích a databázových funkcí. Nejčastěji byly využity tyto funkce:

- `když(podmínka;[ano];[ne])`
- `svyhledat(hledat;tabulka;sloupec;[typ])`
- `sumif(oblast;kritéria;[součet])`
- `countif(oblast;kritérium)`
- `dpočet(databáze;pole;kritéria)`

4. OMEZENÍ

Oba programy jsou navrženy tak, aby byly schopny zpracovat okamžitě 5 000 záznamů o přerušeních a to z max. 300 linek ve všech typech vedení (v každém 100). Pro rozšíření výpočtové oblasti při přesahujícím počtu zpracovávaných záznamů je třeba do nových buněk vložit vzorce jednoduchým přetažením stávajících výpočtových oblastí.

Příloha 7 – Součinitelé pohotovosti a prostoje jednotlivých linek přenosových vedení

ID. LINKY	Délka vedení [km]	doba poruch [h]	doba odstávek [h]	celková doba prostoje [h]	součinitel pohotovosti k_{poh}	součinitel prostoje k_{pr}
V1344	30,2	0,0006	210,0	210,0	0,988085	0,011915
V1345	30,2	0,0000	352,0	352,0	0,980108	0,019892
V201	85,1	0,0006	12003,5	12003,5	0,489685	0,510315
V202	71,3	0,0000	1452,0	1452,0	0,920421	0,079579
V203	136	14,0500	1222,4	1236,4	0,931833	0,068167
V204	59,5	0,0000	7080,0	7080,0	0,663818	0,336182
V205	19,8	0,0000	532,0	532,0	0,970089	0,029911
V206	19,8	0,0000	4084,0	4084,0	0,791228	0,208772
V207	168,9	0,0003	14825,0	14825,0	0,405395	0,594605
V208	86,2	0,0000	6172,0	6172,0	0,700476	0,299524
V209	68,4	760,9708	5351,0	6112,0	0,702956	0,297044
V210	98	78,8669	3279,7	3358,6	0,825067	0,174933
V211	30,4	0,0000	6495,3	6495,3	0,687238	0,312762
V216	63,8	0,0833	7443,0	7443,1	0,649598	0,350402
V221	86,1	4,0833	5120,0	5124,1	0,744843	0,255157
V222	86,1	47,7147	5034,7	5082,4	0,746654	0,253346
V223	70	0,0000	3984,5	3984,5	0,795795	0,204205
V224	70	0,0000	3792,5	3792,5	0,804674	0,195326
V225	30,7	0,0003	5266,5	5266,5	0,738677	0,261323
V226	48,5	0,0000	1498,5	1498,5	0,917977	0,082023
V251	83,9	0,0000	1530,5	1530,5	0,916299	0,083701
V252	83,9	34,0608	1639,0	1673,1	0,908857	0,091143
V253	71,1	0,0000	976,5	976,5	0,945775	0,054225
V254	71,2	0,3839	1114,5	1114,9	0,938327	0,061673
V400	46,2	1,3169	4198,5	4199,8	0,785941	0,214059
V401	103,8	10,9833	7339,5	7350,5	0,653201	0,346799
V402	87,6	0,0000	5603,5	5603,5	0,724261	0,275739
V403	79,4	63,8167	2052,0	2115,8	0,886111	0,113889
V410	97,1	0,0000	518,0	518,0	0,970865	0,029135
V411	45,3	0,0000	2652,0	2652,0	0,85928	0,14072
V412	116,9	2,5167	10490,4	10492,9	0,539105	0,460895
V413	283,7	0,0000	6092,7	6092,7	0,703755	0,296245
V414	29,5	0,3500	3879,4	3879,8	0,800626	0,199374
V415	35,1	295,0667	1876,5	2171,6	0,883285	0,116715
V417	74,1	31,2575	3284,4	3315,7	0,82711	0,17289
V418	37,7	0,0000	2561,0	2561,0	0,86378	0,13622
V420	209,6	52,2950	29438,0	29490,3	0,086002	0,913998
V422	88,5	2,4786	4641,0	4643,5	0,765974	0,234026
V423	38,3	0,0000	3835,0	3835,0	0,802701	0,197299

V430	82,4	1,4833	1290,0	1291,5	0,928906	0,071094
V431	32,6	0,0000	1378,7	1378,7	0,924284	0,075716
V432	115,8	0,0000	1350,5	1350,5	0,925777	0,074223
V433	142,8	0,0000	18639,5	18639,5	0,305526	0,694474
V434	50,7	0,0000	2560,5	2560,5	0,863805	0,136195
V435	55,7	0,0003	6187,0	6187,0	0,699857	0,300143
V436	55,4	0,0003	6963,0	6963,0	0,668452	0,331548
V450	72,3	0,0000	1918,1	1918,1	0,896202	0,103798
V451	53,5	0,0000	1600,0	1600,0	0,912664	0,087336
V452	68,3	0,0000	12998,5	12998,5	0,45883	0,54117
V453	84,1	25,5169	8090,5	8116,0	0,623876	0,376124
V454	67,6	0,0000	6174,5	6174,5	0,700372	0,299628
V459	95,5	13,0500	13108,6	13121,6	0,4551	0,5449
V460	16,6	0,0667	504,0	504,1	0,971637	0,028363
V473	35,6	0,0000	19042,0	19042,0	0,29581	0,70419
V474	42,9	0,0000	12389,5	12389,5	0,477561	0,522439
V475	137,8	7,5583	5664,0	5671,6	0,721378	0,278622
V476	129,1	5,6836	4087,0	4092,7	0,79083	0,20917