VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Ústav elektroenergetiky

Ing. Vladimír Blažek, CSc.

OPTIMALIZACE STRATEGIE ÚDRŽBY ELEKTROENERGETICKÝCH ZAŘÍZENÍ

OPTIMIZATION OF MAINTENANCE WORKS STRATEGY OF POWER DEVICES

ZKRÁCENÁ VERZE HABILITAČNÍ PRÁCE

VUTIUM

BRNO 2003

KLÍČOVÁ SLOVA
údržba, strategie, optimalizace, porucha, oprava, spolehlivost, teorie her, matematický model, diagnostika

KEY WORDS
Maintenance, Strategy, Optimization, Failure, Reparation, Reliability, Theory of Games, Mathematical Model, Diagnostic

MÍSTO ULOŽENÍ PRÁCE
Vědecké oddělení FEKT VUT v Brně.

ISBN 80-214-2294-7
ISSN 1213-418X

Obsah

O autorovi

Vladimír Blažek se narodil v roce 1953 ve Vyškově. V roce 1977 ukončil Fakultu elektrotechnickou VUT v Brně. Studoval obor „Silnoproudá elektrotechnika“, zaměření „Výroba, rozvod a užití elektrické energie“.

Po skončení vysoké školy krátce pracoval v Elektromontážních závodech Brno jako projektant. V letech 1978 až 1981 absolvoval interní vědeckou aspiranturu na katedře elektroenergetiky FE VUT v Brně. Kandidátskou disertační práci na téma „Vliv přesnosti konstant synchronních strojů a jejich budících soustav na přesnost souměrného zkratového proudu“ obhájil v roce 1982. Od 1. 2. 1981 dosud pracuje na Ústavu elektroenergetiky FEKT VUT v Brně jako odborný asistent.

Ve výuce i ve výzkumu se zaměřuje hlavně na oblast přenosu a rozvodu elektrické energie. Na inženýrském, později magisterském, studijním programu přednášel a cvičil předměty Elektroenergetika a Přenos a rozvod elektrické energie 1. Dále cvičil předměty Přenos a rozvod elektrické energie, Elektroenergetika 1 a Vybrané problémy z elektrických sítí. Na bakalářském studijním programu přednášel předmět Elektrické sítě a přenos elektrické energie. Mimo uvedené předměty na obou studijních programech přednášel a cvičil kratší dobu ještě několik dalších předmětů.

Je spoluautorem dvou titulů skript. Od roku 1998 je školitelem studentů doktorského studijního programu. V soutěži SVOČ, později Student FEI, vedl 12 prací. Dále byl vedoucím 25 diplomových prací, které byly obhájeny výborně. Jedna z nich získala Zvláštní cenu v 1. ročníku Soutěže diplomových a doktorských prací „Cena ČEZ“ v roce 1998.

V odborné oblasti je autorem nebo spoluautorem 37 publikací, z nichž 12 bylo prezentováno na mezinárodních konferencích. Je spoluřešitelem jednoho fakultního grantu a řešitelem jednoho grantu GA ČR. Dále je spoluřešitelem 14 tuzemských projektů. V praxi spolupracuje především s podniky JME a.s. Brno, ČEZ a.s. Praha, ČEPS a.s. Praha a EGÚ a.s. Brno.

Seznam symbolů a zkratek

Θ	- množina typů poruch (tvoří ji položky seznamu poruch)
Φ	- množina strategií údržby (tvoří ji položky seznamu strategií údržby)
β_k	- parametr rozložení pro *k*-tou poruchu v seznamu poruch
$\varepsilon_{o,k}$	- součinitel obnovy zařízení vlivem opravy po *k*-té poruše v seznamu poruch
$\varepsilon_{u,i}$	- součinitel obnovy zařízení vlivem *i*-té údržby v seznamu údržeb
A	- pomocná proměnná funkce F_1
A_p	- cena 1 h nefunkčnosti zařízení (nedodávky energie) vlivem poruchy
A_u	- cena 1 h nefunkčnosti zařízení (nedodávky energie) vlivem údržby
b_k	- relativní četnost *k*-té poruchy v seznamu poruch
cond (*podm*)	- stavová funkce, jejíž hodnota je: cond (*podmínka*) = 1 pro splněnou (pravdivou) podmínku a cond (*podmínka*) = 0 pro nesplněnou podmínku
c_w	- cena nedodané elektrické energie
D_N	- funkce pro aktualizaci nákladů (přepočet nákladů ke vztažnému okamžiku T_D)
$\lVert E \rVert$	- herní matice
$e_{m,k}$	- prvek herní matice odpovídající *m*-té strategii údržby a *k*-té poruše; průměrné roční náklady (resp. aktualizované náklady za zvolenou dobu) na údržbu, opravy poruch a škody způsobené přerušením dodávky vlivem údržeb a poruch
e_z	- základní hodnota prvku herní matice určená pro základní hodnoty parametrů modelu
$F_1()$	- funkce udávající počet poruch v časovém intervalu mezi údržbami. Má čtyři nezávisle proměnné (parametry). Délka intervalu je určena prvním parametrem, střední doba mezi poruchami druhým parametrem a distribuční funkce třetím a čtvrtým.
$F_2()$	- funkce udávající pravděpodobnost výskytu poruchy v posledních p_i procentech časového intervalu. Šestiparametrická funkce. Délka intervalu je určena prvním parametrem, střední doba mezi poruchami druhým parametrem a distribuční funkce třetím a čtvrtým. Pátým parametrem je procento p_i, šestým je prvek matice popisující vliv poruchy na údržbu.
f_k	- kód určující typ použité distribuční funkce pro *k*-tou poruchu v seznamu poruch
frac (*číslo*)	- funkce udávající necelou (desetinnou) část čísla
$F_T()$	- funkce určená pro výpočet střední doby mezi poruchami $\overline{T}_{v,k(q)}$ platné pro řešený časový interval
f_u	- kód určující druh použitého úročení: měsíční nebo roční
H	- množina hráčů
h	- pořadové číslo druhu časového intervalu v seznamu intervalů
i	- pořadové číslo druhu údržby v seznamu údržeb
int (*číslo*)	- funkce udávající celočíselnou část čísla
k	- pořadové číslo typu poruchy v seznamu poruch; je jich celkem N_F
K_{cs}	- celkové náklady na jednu strategii údržby za dobu života T_z, resp. aktualizované náklady za zvolenou dobu
$K_{pc,k}$	- střední náklady na opravu *k*-té poruchy v seznamu poruch
k_s	- součinitel stárnutí zařízení
$K_{uc,i}$	- střední náklady na *i*-tou údržbu v seznamu údržeb
m	- pořadové číslo strategie údržby v seznamu strategií; je jich celkem N_E
mod	- *(X)* mod *(Y)*, funkce modulo, zbytek po celočíselném dělení čísel *(X)* a *(Y)*
$\lVert M_s \rVert_{m(r)}$	- matice *m*-té strategie údržby

$\left\| M_{su} \right\|_{m(r)}$	-	submatice vyňatá z matice strategie $\left\| M_{s} \right\|_{m(r)}$, kterou je vektor pořadových čísel druhů údržeb
$M_{su,m(r)}$	-	pořadové číslo *r*-té údržby v rámci *m*-té strategie
$\left\| M_{st} \right\|_{m(r)}$	-	submatice vyňatá z matice strategie $\left\| M_{s} \right\|_{m(r)}$, kterou je vektor pořadových čísel druhů časových intervalů mezi údržbami
$M_{st,m(r)}$	-	pořadové číslo *r*-tého časového intervalu v rámci *m*-té strategie
N_E	-	celkový počet strategií údržby v seznamu strategií
N_F	-	celkový počet typů poruch v seznamu poruch
$N_{in(q)}$	-	společné symbolické označení pro $N_{oin(q)}$ a $N_{uin(q)}$
N_o	-	počet poruch (a tedy i oprav) za dobu života T_z, obecně necelé číslo
$N_{oin(q)}$	-	počet poruch (a tedy i oprav) v *q*-tém časovém intervalu během doby života, obecně necelé číslo
not *(X)*	-	logická negace hodnoty dvoustavové veličiny *(X)*
N_u	-	počet údržeb za dobu života T_z, obecně necelé číslo
$N_{uin(q)}$	-	počet údržeb v *q*-tém časovém intervalu během doby života, obecně necelé číslo
p_a	-	úroková míra
p_i	-	koeficient neprovedení *i*-té údržby, což je díl časového intervalu (měřeno od konce) vyjádřený v procentech délky časového intervalu. Vyskytne-li se v něm porucha, následující *i*-tá údržba se vynechá, pokud ji oprava zařízení nahradila.
P_{vp}	-	výkon nedodaný vlivem poruchy
P_{vu}	-	výkon nedodaný vlivem údržby
Q	-	celkový počet časových intervalů v rozmezí fyzické doby života zařízení T_z
q	-	index (pořadové číslo) časového intervalu v rozmezí fyzické doby života zařízení T_z
$q_{(T_a)}$	-	pořadové číslo časového intervalu, od jehož počátku se integrují náklady
$q_{(T_b)}$	-	pořadové číslo časového intervalu, do jehož konce se integrují náklady
r	-	cyklický index opakování v rámci *m*-té strategie údržby
R	-	počet údržeb v jednom opakujícím se cyklu *m*-té strategie údržby
round (*číslo*)	-	funkce udávající zaokrouhlené číslo k danému číslu
S	-	číslo optimální strategie údržby, tj. pořadové číslo, které má optimální strategie v seznamu strategií
s_u	-	úročitel; součinitel udávající roční nebo měsíční zhodnocení vkladu.
$t_{(q)}$	-	doba od počátku života zařízení do konce časového intervalu určeného pořadovým číslem *q*
T_a	-	okamžik zahájení integrace nákladů
T_b	-	okamžik ukončení integrace nákladů
$T_{c(q)}$	-	délka *q*-tého časového intervalu mezi dvěma údržbami
$T_{cx(q)}$	-	součet délek *q*-tého časového intervalu mezi údržbami a všech spojitě předcházejících časových intervalů, v nichž údržba neuvedla zařízení do výchozího stavu vzhledem ke *k*-té poruše
$T_{cy(q)}$	-	hodnota $T_{cx(q)}$ z předchozího časového intervalu. Nuluje se, proběhla-li údržba ovlivňující *k*-tou poruchu.
T_D	-	vztažný okamžik pro aktualizaci nákladů (přepočet nákladů v čase)
$T_{d,h}$	-	*h*-tý druh časového intervalu v seznamu intervalů
T_{d0}	-	doba mezi vztažným okamžikem pro přepočet nákladů T_D a začátkem zpracovávaného časového intervalu
T_{dj}	-	doba mezi vtažným okamžikem pro přepočet nákladů T_D a koncem zpracovávaného časového intervalu

$\overline{T}_{p,k}$ - střední doba výpadku vlivem k-té poruchy

$\overline{T}'_{p,k}$ - střední doba výpadku vlivem k-té poruchy od vzniku poruchy do zahájení opravy

$\overline{T}''_{p,k}$ - střední doba výpadku vlivem k-té poruchy od zahájení opravy do jejího ukončení

$\overline{T}_{u,i}$ - střední doba výpadku vlivem i-té údržby

$\overline{T}_{v,k}$ - střední doba mezi k-tými poruchami (střední život zařízení vzhledem ke k-té poruše)

T_z - fyzická (technická) doba života zařízení

V_1 - společné symbolické označení pro $V_{1p,k}$ a $V_{1u,i}$

$V_{1p,k}$ - výdaje na opravu jedné poruchy a výpadek v jejím důsledku; k-tá porucha v seznamu poruch

$V_{1u,i}$ - výdaje na jednu údržbu a výpadek v jejím důsledku; i-tá údržba v seznamu údržeb

V_p - celkové náklady na poruchy a výpadky vlivem poruch za dobu života T_z, resp. aktualizované náklady za zvolenou dobu

V_u - celkové náklady na údržby a výpadky vlivem údržeb za dobu života T_z, resp. aktualizované náklady za zvolenou dobu

x - obecné označení hodnoty parametru modelu (proměnné a parametru funkce)

x_z - obecné označení základní hodnoty parametru modelu

z - pomocná veličina pro zápis funkcí F_1 a F_2

z_1 - pomocná veličina pro zápis funkce F_2

$\left\| Z_{pu} \right\|_{k,i}$ - matice dvouhodnotových prvků popisující vliv poruch na údržby

$Z_{pu,k,i}$ - prvek matice $\left\| Z_{pu} \right\|$ odpovídající k-té poruše a i-té údržbě

$\left\| Z_{up} \right\|_{i,k}$ - matice dvouhodnotových prvků popisující vliv údržeb na poruchy

$Z_{up,i,k}$ - prvek matice $\left\| Z_{up} \right\|$ odpovídající i-té údržbě a k-té poruše

1 ÚVOD

Cílem práce bylo vytvoření matematického modelu umožňujícího optimalizaci strategie údržby elektroenergetických zařízení. Základem matematického modelu jsou nákladové funkce vztahující se na údržby a opravy poruch elektroenergetických zařízení a na škody způsobené přerušením dodávky elektrické energie v důsledku údržeb a poruch zařízení. Model respektuje vzájemně se prolínající provádění různých druhů údržeb a umožňuje volit různé délky časových intervalů mezi údržbami.

Nástrojem pro tvorbu matematického modelu byla teorie her a teorie pravděpodobnosti. Teorie her byla využita pro výpočet „výher“ údržbáře, proti kterému hraje náhoda, a teorie pravděpodobnosti posloužila k vyčíslení počtu poruch a jejich následků. Údržbář volí různé strategie údržby změnou druhu údržbových činností a vzájemného intervalu mezi nimi, náhoda má jako svůj prostředek k ovlivnění hry různé typy poruch nastávajících náhodně s určitou pravděpodobností. Jednotlivé strategie údržby se od sebe liší velikostí nákladů na ně. Nejlepší strategie je ta, ve které má údržbář nejmenší prohru, tj. když vynaloží co nejméně na udržení zařízení v provozu.

Jako metoda řešení matematického modelu byla zvolena numerická metoda. Obraz modelu byl zpracován ve formě programu, který transformuje množinu vstupních dat s popisem zvolených strategií, s parametry nákladových funkcí a s popisem možných poruch zařízení do herní matice, jejíž prvky představují průměrné roční náklady (resp. aktualizované náklady za zvolené období) pro jednotlivé strategie údržby a pro všechny zadané typy poruch. Další transformací se získá uspořádaná množina průměrných ročních nákladů (resp. aktualizovaných nákladů za zvolené období) s váženým uplatněním různých typů poruch podle druhu výběrového kritéria. Numerické řešení matematického modelu bylo realizováno pomocí počítače.

Základem habilitační práce byla „Závěrečná zpráva projektu Grantové agentury České republiky č. 102/00/1038“, jehož jsem byl řešitelem, s názvem „Stanovení optimální strategie údržby energetických zařízení“ [2]. Podstatné části práce byly publikovány ve sbornících mezinárodních konferencí [3-8]. Je mojí milou povinností na tomto místě poděkovat Grantové agentuře České republiky za poskytnutou grantovou podporu při řešení tohoto projektu, díky němuž vznikla tato habilitační práce.

2 ZÁKLADNÍ POJMY

Údržba je kombinace všech technických a administrativních činností, včetně činností dozoru, zaměřených na udržení zařízení ve stavu nebo na jeho navrácení do stavu, v němž může plnit požadovanou funkci. Je to činnost vykonávaná s cílem udržet vysokou spolehlivost zařízení během jeho fyzické doby života a minimalizovat náklady na opravy poruch a škody jimi způsobené. Jinak řečeno, je to činnost konaná za účelem udržet zařízení v bezporuchovém stavu po dobu stanovenou technickými podmínkami.

Preventivní údržba je údržba prováděná v souladu se stanoveným časovým plánem, to znamená, že je prováděna buď v pravidelných časových intervalech nebo v čase odvozeném z výsledků a vyhodnocení diagnostických zkoušek.

Preventivní údržba elektroenergetických zařízení se podle [15] člení na:

A) *pochůzkovou kontrolu (pochůzku)* – vizuální periodické vyšetření stavu zařízení za provozu
B) *funkční zkoušky* – ověření funkčnosti zařízení. Zařízení je mimo provoz
C) *prohlídku* – vizuální periodické vyšetření hlavních vlastností zařízení bez jeho demontáže. Toto vyšetření je všeobecně zaměřeno na zjištění stavu jednotlivých prvků zařízení, na tlaky a výšky hladin tekutin, těsnost, polohu relé, znečištění izolačních částí

včetně provádění činností, jako jsou mazání, čištění, umývání atd. Zařízení je mimo provoz.

D) *běžnou údržbu* – prohlídku spojenou s částečnou demontáží, doplněnou dalšími opatřeními, jako jsou měření a nedestruktivní zkoušky pro spolehlivé ověření stavu zařízení. Zařízení je mimo provoz.

E) *diagnostické zkoušky a měření* – porovnávací zkoušky charakteristických parametrů zařízení pro ověření funkce zařízení prováděné měřením jednoho nebo více těchto parametrů. Zařízení je mimo provoz.

F) *generální údržbu* – práce prováděné za účelem opravy nebo náhrady částí (u kterých bylo zjištěno, že neodpovídají daným tolerancím) a to takovým způsobem, aby zařízení bylo opět uvedeno do předepsaného stavu. Údržba je spojena s rozsáhlou demontáží a zařízení je mimo provoz.

Strategie údržby je jednoznačný popis způsobu střídání jednotlivých druhů údržby. Popis musí současně stanovit i délku časového intervalu, který každé údržbě předchází. Strategie může mít formu provozního předpisu stanovujícího po jaké době se má udělat jaký druh údržbové činnosti a jaká další údržba bude následovat. Je to souhrn přesně daných jednoznačných pravidel, kterými se řídí daný způsob provádění údržby.

Optimalizace strategie údržby je výběr takové strategie údržby, při které je nejnižší součet nákladů na údržbu zařízení, nákladů na opravy jeho poruch a nákladů na další škody způsobené poruchami (nedodaná elektrická energie apod.).

Optimalizace strategie údržby je plnohodnotným způsobem použitelná i ke stanovení provozních nákladů zařízení elektrizační soustavy. Bude-li nadále řeč o optimalizaci strategie údržby, může si čtenář k uvedenému pojmu dosadit i stanovení provozních nákladů, o které zde hlavně jde.

Důležitá připomínka se týká vztahu nákladů na údržbu a provozních nákladů. Provozní náklady zahrnují nejen náklady na údržbu, ale i náklady na opravy poruch a na jejich následky. Poruchy a údržba se vzájemně ovlivňují.

Hlavní princip optimalizace, tj. porovnání konečného počtu technicky možných strategií údržby pomocí jejich ekonomických efektů, tj. nákladů na ně, je možné aplikovat v zásadě dvěma způsoby:

a) optimalizace individuální (výběrová). Jde o určení optimální strategie údržby pro konkrétní elektroenergetické zařízení daného druhu a typu v síti, např. pro každý konkrétní vypínač 400 kV v sítí 400 kV, každý konkrétní vypínač 110 kV v sítí 110 kV atd. Za tím účelem je nutné sledovat a statisticky zpracovávat údaje o poruchách pro každé konkrétní zařízení zvlášť. Bohužel v tomto případě nelze získat dostatečný statistický soubor. Provozovatel sítě potřebuje poruchy předvídat a vyhodnocení statistiky na konci fyzické doby života konkrétního zařízení již nemůže pro optimalizaci jeho strategie údržby použít. Proto nelze provést optimalizaci strategie údržby speciálně pro každé konkrétní zařízení přesně tímto způsobem.

b) optimalizace globální. Jde o určení optimální strategie údržby pro všechna elektroenergetická zařízení daného druhu a typu v síti, např. pro všechny vypínače 400 kV tlakovzdušné v síti 400 kV, všechny vypínače 110 kV s SF_6 v síti 110 kV atd. Za tím účelem se sledují a statisticky zpracovávají údaje o poruchách všech zařízení daného druhu a typu a výsledky se použijí pro každé z nich. Optimalizaci strategie údržby potom již lze provést speciálně pro každé konkrétní zařízení s použitím těchto výsledků a s přihlédnutím k vlastnostem místa sítě, ve kterém zařízení pracuje. Vlastnostmi se myslí např. cena nedodané elektrické energie, velikost přenášeného a v případě poruchy nedodaného výkonu, náročnost odběratelů na spolehlivost dodávky, možnost manipulace v síti pro zajištění pokračování dodávky elektrické energie odběratelům v případě poruchy zařízení atd. Paradoxně jsou výsledky statistiky tím správnější, čím větší soubor zařízení daného druhu a typu je sledován a čím méně se jedno konkrétní zařízení v celém souboru uplatní. Ze zkušenosti víme, že v praxi se často provádí a zpracovává statistika o poruchách společně pro zařízení daného druhu všech typů, např. pro vypínače 110 kV tlakovzdušné, s SF_6, maloolejové atd.

Porucha je takový stav zařízení, kdy jeho činnost neodpovídá na něj kladeným požadavkům nebo vybočuje z normálu natolik, že zařízení je zcela nebo částečně nefunkční. Je to jev spočívající v ukončení schopnosti zařízení plnit požadovanou funkci za stanovených podmínek. Úplné obnovení bezporuchového (výchozího) stavu po poruše vyžaduje větší zásah obsluhy. Porucha je stochastický jev.

Poruchy zpravidla dělíme na náhlé, postupné a vzniklé opotřebením. Dále pak rozlišujeme poruchy nezávislé a závislé [9].

Náhlé poruchy způsobují náhlé přerušení činnosti normálně pracujícího zařízení. Jsou způsobeny náhodou a nelze jim zamezit.

Postupné poruchy jsou způsobeny časovými změnami některých parametrů zařízení. Poruchy tohoto typu lze zpravidla zjistit vhodnou zkušební metodou. Lze je omezit preventivní údržbou.

Poruchy způsobené opotřebením můžeme předpovídat podle známého stupně opotřebení a můžeme jim tedy předcházet přiměřenou preventivní údržbou.

Nezávislá porucha je porucha, jejíž výskyt není důsledkem jiných poruch. Může být jak náhlá tak i postupná nebo vzniklá opotřebením.

Závislá porucha se vyskytne jako následek nějaké prvotní, nezávislé poruchy.

Oprava je souhrn činností zaměřených na obnovení provozuschopného nebo bezvadného stavu zařízení po poruše. Jinak řečeno, je to činnost prováděná po výskytu poruchy za účelem navrátit zařízení do bezporuchového stavu.

Spolehlivost je pravděpodobnost, že činnost zařízení bude během jeho fyzické doby života a v daných provozních podmínkách přiměřená účelu zařízení [9]. V komplexnějším pojetí můžeme spolehlivostí rozumět jisté vlastnosti zařízení, které zaručují splnění požadavků kladených na jeho řádnou činnost za daných provozních podmínek. Stavy, ve kterých se zařízení může nacházet, jsou různé podle hlediska, ze kterého se zařízení posuzuje:

- z hlediska schopnosti zařízení plnit svoji funkci je zařízení ve stavu bezporuchovém nebo poruchovém. Porucha nastane v okamžiku přechodu zařízení ze stavu bezporuchového do stavu poruchového.
- z hlediska činnosti zařízení je zařízení buď ve stavu provozu, vykonává-li požadované funkce, nebo je ve stavu prostoje, pokud není z jakéhokoliv důvodu v provozu.

Je třeba podotknout, že pojem spolehlivosti bývá používán v obou významech, tedy jako pravděpodobnost bezporuchového stavu ale i v uvedeném komplexnějším pojetí.

Kvantitativně se spolehlivost určuje různými číselnými charakteristikami, např. střední dobou mezi poruchami, intenzitou poruch, měrným počtem poruch atd.

3 TEORIE HER

3.1 ÚVOD

Teorie her je matematickou disciplínou zabývající se rozborem konfliktních situací a vypracováním vhodných doporučení. Název teorie her pochází ze skutečnosti, že tato teorie buduje svůj formální aparát na základě jednoduchých modelů konfliktních situací, jakými jsou různé společenské hry [13]. Teorii her lze aplikovat rovněž na řešení naší úlohy.

Obecná teorie popisuje nejrůznější varianty her:

- hry s počtem hráčů od jednoho do N,
- hry konečné a nekonečné (s konečným nebo nekonečným počtem možných různých herních strategií),
- hry s konstantním (případně nulovým) a nekonstantním součtem, kde součtem se rozumí suma funkčních hodnot výplatní funkce pro všechny hráče,
- hry s konfliktní a nekonfliktní rozhodovací situací (strategie jednotlivých hráčů jsou nebo nejsou ve vzájemném konfliktu),
- hry s tahy záměrnými nebo náhodnými[1], podle toho, jsou-li tahy plně ovládané hráčem nebo jsou-li tahy určeny náhodou[2],
- hry s úplnou a neúplnou informací, podle úplnosti informací o tazích protihráče.

Pro řešenou úlohu se výběr teorie zjednoduší následovně: jde o konfliktní konečnou hru dvou hráčů a současně je to hra s nekonstantním součtem, s určitým podílem náhodných tahů a s neúplnou informací. Nekonstantnost součtu je dána různou výhrou při různých strategiích. Proti záměrným tahům hráče, údržbáře, vystupují náhodné tahy poruch určené náhodou. Náhoda je zde označena za hráče.

V případě, kdy vlivy nedovolující určit jednoznačné důsledky rozhodnutí mají náhodnou povahu, druhého účastníka konfliktu považujeme za jistý druh náhodného mechanismu, který volí svá rozhodnutí podle nějakého rozložení pravděpodobnosti. Toto rozložení první účastník buď zná, nebo nezná.

První hráč, údržbář, vybírá strategii údržby m ze seznamu technicky možných strategií, tj. způsobů údržby. Považujeme ho za inteligentního hráče. Druhý hráč, náhoda (náhodný mechanismus), volí poruchu k ze seznamu možných poruch zařízení.

Typ poruchy, který na zařízení nastane, a okamžik, kdy k poruše dojde, nastávají náhodně. Zjednodušeně lze říci, že „náhoda zvolila typ poruchy“. Zjednodušení spočívá v tom, že náhoda v matematickém pojetí není osobou nebo zařízením, aby něco volila nebo vybírala. Aby bylo možné vůbec nějaký výpočet provést, bere se na pomoc matematická statistika. Ta určí k jednotlivým typům poruch jejich distribuční funkci nebo funkci hustoty pravděpodobnosti. Parametry uvedených funkcí se obvykle vypočtou rozborem velkého množství poruch vzniklých u velkého množství udržovaných zařízení za dlouhé období.

Náhoda v matematickém slova smyslu tedy může, ale nemusí, být považována za hráče. Nejistý výsledek hry, v níž se uplatňuje náhoda, dává z pohledu hráče hře některé podobné vlastnosti jako hře se záměrnými tahy, kde místo náhody vystupuje inteligentní protihráč. Obecně jsou dva možné přístupy k chápání role náhody:

a) Náhoda je někdy označována za protihráče, hra se chápe jako střetnutí dvou hráčů, reálného údržbáře v roli hráče 1 a náhody v roli hráče 2. Údržbář volí strategie údržby. Náhoda volí typ poruchy a odstup mezi nimi a má tedy jakousi vlastní „strategii“ popsanou pomocí distribuční funkce rozložení pravděpodobnosti náhodné proměnné.

b) Náhoda nesleduje stejný cíl jako údržbář, tj. maximální vlastní výhru nebo maximální prohru protihráče, a nesplňuje tak základní požadavek kladený na hráče. Proto není považována za hráče, ale jen za okolnost hry. Touto okolností je hra ovlivňována, ale strategii volí pouze údržbář.

[1] Náhodný tah je obvykle tah určený náhodou jako řídící veličinou. Náhodný tah však může učinit i hráč, který neví jak táhnout a proto táhne, jak ho právě napadne.

[2] Náhoda je náhodný děj, jehož okamžik zahájení ani průběh přesně neznáme.

V našem případě byl uplatněn první přístup. Když náhoda ve hře zvolí typ poruchy, volí tím současně i střední dobu mezi poruchami a druh rozložení pravděpodobnosti náhodné proměnné, které typu poruchy odpovídá.

3.2 OPTIMÁLNÍ STRATEGIE PŘI RIZIKU A NEURČITOSTI

Předpokládáme již, že pouze jeden hráč je inteligentní (údržbář, který vystupuje v pozici prvního hráče), zatímco druhý hráč je lhostejný k výši své výhry a má charakter náhody (náhodného mechanismu) nezávislé na inteligentním účastníkovi. K popisu takové konfliktní situace použijeme hry v normálním tvaru

$$\{H;\Phi,\Theta;G_1(s_m,a_k)=G(s_m,a_k)=G(m,k)=e_{m,k}\}. \tag{1}$$

Hru v normálním tvaru (1) považujeme za matematický model rozhodovací situace. Výplatní funkci $G_2(m,k)$ nemusíme uvádět, neboť hráč 2 je lhostejný k výši své výhry, a funkce $G_2(m,k)$ tedy nemá vliv na jeho počínání. Tím méně pak může ovlivnit hráče 1, pro kterého chceme podat normativní návod k optimální volbě rozhodnutí, tj. k volbě optimální strategie údržby S. Hráč 2 se v rozhodovací situaci projevuje tím, že do výplatní funkce $G(m,k)$ prvního hráče dosazuje „strategii“ k-té poruchy, kterou volí s relativní četností b_k výskytu k-té poruchy v seznamu poruch. „Strategie“ k-té poruchy je definována distribuční funkcí F_k (přesněji F_{a_k}) rozložení pravděpodobnosti relativní doby mezi poruchami. Chování hráče 1 pochopitelně významně závisí na tom, zda zná nebo nezná relativní četnosti výskytu poruch v seznamu poruch.

Základními prvky rozhodovacího problému popsaného modelem (1) jsou:

a) Množina hráčů $H = \{1, 2\}$

b) Množina vzájemně se vylučujících strategií údržby (variant údržby) $\Phi=\{s_1,s_2,...,s_m,...,s_{N_E}\}$. Subjekt rozhodování, tj. údržbář, musí z této množiny vybrat právě jedno řešení. (Množinu tvoří položky seznamu strategií údržby)

c) Množina vzájemně se vylučujících typů poruch (stavů okolí) $\Theta=\{a_1,a_2,...,a_k,...,a_{N_F}\}$. (Množinu tvoří položky seznamu poruch)

d) Množina možných výsledků (užitností) $E=\{e_{1,1},...,e_{m,k},...,e_{N_E,N_F}\}$, charakterizujících efekt výběru řešení pro příslušný typ poruchy a_k, $(k = 1, 2,...,N_F)$ a příslušnou strategii údržby s_m, $(m = 1, 2,...,N_E)$. Tyto výsledky lze sestavit do matice, kterou nazýváme herní maticí (platební nebo rozhodovací maticí resp. maticí užitností) představující kvantitativní odhady výsledků procesu rozhodování [16].

Model rozhodovacího problému lze za předpokladu, že je počet prvků v množinách Φ a Θ konečný, vyjádřit právě pomocí herní matice:

$$\begin{array}{c} \text{Typ poruchy} \\ a_1 \;\; ..... \;\; a_k \;\; ..... \;\; a_{N_F} \\ \longrightarrow \end{array}$$

$$\|E\| = \begin{bmatrix} e_{1,1} & .. & .. & .. & e_{1,N_F} \\ .. & .. & & & .. \\ .. & & e_{m,k} & & .. \\ .. & & & .. & .. \\ e_{N_E,1} & .. & .. & .. & e_{N_E,N_F} \end{bmatrix} \quad \begin{array}{c} s_1 \\ \vdots \\ s_m \\ \vdots \\ s_{N_E} \end{array} \quad \text{Strategie údržby} \tag{2}$$

Herní matice představuje výplatní matici pro údržbáře. Prvek $e_{m,k}$ této matice představuje „výplatu“ pro údržbáře při volbě strategie údržby m hráčem 1 – údržbářem a poruchy typu k hráčem 2 – náhodou. Protože údržbář musí vždy platit náklady na údržbu, opravy poruch a prostoje odběratelů vlivem nedodávky elektrické energie, jsou prvky herní matice vesměs záporné.

Podle míry informovanosti o uvedených prvcích rozhodování (m, k, $e_{m,k}$) rozeznáváme v našem případě dva základní způsoby rozhodování:

1) *Riziko (nejistota).* Údržbář zná strategie údržby a jejich užitnosti při jednotlivých typech poruch a jsou známy pouze relativní četnosti $b_1,...,b_k,...,b_{N_F}$ výskytu těchto poruch v seznamu poruch.
2) *Neurčitost.* Údržbář zná strategie údržby a jejich užitnosti při jednotlivých typech poruch, není však známa relativní četnost výskytu těchto poruch v seznamu poruch.

Z uvedeného vyplývá, že při obou těchto mírách informovanosti jsou známy strategie údržby a jejich užitnosti (náklady na ně). Liší se pouze v informaci, který typ poruchy nastane. Při jistotě by existovala pouze jedna porucha o níž víme, že určitě nastane. Při nejistotě známe relativní četnosti výskytu jednotlivých typů poruch v seznamu poruch, kdežto při neurčitosti je neznáme.

3.3 VYHODNOCENÍ HERNÍ MATICE

Při rozhodování za rizika použijeme k vyhodnocení herní matice (2), tj. k výběru optimální strategie údržby S ze seznamu strategií údržby, Bayesovo kritérium. Kritérium odpovídá volbě smíšené strategie hráčem 2, tj. náhodné volbě poruch podle jejich zadané relativní četnosti výskytu v daném seznamu poruch. Toto kritérium nejvíce odráží reálnou skutečnost, vyžaduje však znalost relativního zastoupení poruch.

Platí:

$$B_m = \sum_{k=1}^{N_F} (e_{m,k}.b_k) \qquad m = 1,\ 2,...,N_E \qquad \text{a} \qquad \sum_{k=1}^{N_F} b_k = 1 \tag{3}$$

$$M = \max_{m=1,2,...,N_E}(B_m) \tag{4}$$

$$S = \operatorname*{index}_{m=1,2,...,N_E}(B_m = M) \tag{5}$$

Poznámka: Pro zjednodušení matematického zápisu jsme definovali funkci:

$$\operatorname*{index}_{m=1,2,3,4}(a_m = M)$$

Funkční hodnotou je hodnota indexu m, pro který platí zapsaná relace v dané množině prvků $\{a_1, a_2, a_3, a_4\}$. Jsou-li některé prvky stejné, funkce najde index prvního prvku vyhovujícího relaci.

Při rozhodování za neurčitosti použijeme k vyhodnocení herní matice (2) dvě kritéria:

a) kritérium Max-Min – odpovídá výběru takové strategie hráčem 2, která znamená pro hráče 1 nejmenší výhru, tj. největší ztráty – náklady. Tedy jakoby na zařízení vznikaly jen nejnákladnější poruchy. Dává pesimistické výsledky. Lze ho použít, jestliže vstupní data nejsou známa s dostatečnou přesností. Platí:

$$MIN_m = \min_{k=1,2,...,N_F}(e_{m,k}) \qquad m = 1,\ 2,...,N_E \tag{6}$$

$$M = \max_{m=1,2,...,N_E}(MIN_m) \tag{7}$$

$$S = \underset{m=1,2,\ldots,N_E}{\mathrm{index}}(MIN_m = M) \tag{8}$$

b) kritérium Hurwiczovo – odpovídá volbě smíšené strategie hráčem 2, kdy hráč volí pouze dvě poruchy a to poruchu s největšími a s nejmenšími požadavky na náklady. Poruchy jsou voleny s relativní četností 0,5. Platí

$$MIN_m = \min_{k=1,2,\ldots,N_F}(e_{m,k}) \qquad m = 1,\ 2,\ldots,N_E \tag{9}$$

$$MAX_m = \max_{k=1,2,\ldots,N_F}(e_{m,k}) \qquad m = 1,\ 2,\ldots,N_E \tag{10}$$

$$I_m = \frac{1}{2}.\left(MIN_m + MAX_m\right) \qquad m = 1,\ 2,\ldots,N_E \tag{11}$$

$$M = \max_{m=1,2,\ldots,N_E}(I_m) \tag{12}$$

$$S = \underset{m=1,2,\ldots,N_E}{\mathrm{index}}(I_m = M) \tag{13}$$

Poznámka: Při studiu rovnic (3) až (13) je třeba mít na paměti, že prvky $e_{m,k}$ herní matice jsou záporná čísla.

4 MATEMATICKÉ MODELY

4.1 ZÁKLADNÍ KONCEPCE A ŘÍDÍCÍ VELIČINY

Nejdůležitější rysy matematických modelů jsou:

- Model nepracuje s reálným časem, ale s jeho transformovanou hodnotou, tzv. obrazovým časem, reprezentovaným číselnou hodnotou od nuly do čísla odpovídajícího době života zařízení T_z. Okamžitý čas běhu života sledovaného zařízení je t:

$$t \in \left\langle 0; T_z \right\rangle . \tag{14}$$

  Nebude-li výslovně uvedeno jinak, platí pro popis modelu, že všechny zmínky o čase se týkají obrazového času.
- Čas je jednou z řídících proměnných modelu. Řídící proměnnou se rozumí veličina, která určuje ostatní proměnné a parametry modelu. Řídící veličiny mají charakter sumačních (integračních) proměnných či indexů.
- Transformace reálného času na obrazový je lineární. Převodní konstanta udává přepočet reálného času na číslo, vyjadřující obrazový čas v hodinách.
- Obrazový čas neplyne spojitě, ale je kvantován na jednotlivé časové intervaly mezi údržbami. Je-li to nutné pro zohlednění vlivu poruchy (a opravy) uvnitř intervalu na následující údržbu, dělí se časový interval dále na menší úseky.
- Plynutí kvantovaného času je monotónní a nerovnoměrné. Skoky, po kterých čas narůstá, jsou rovny délce jednotlivých časových intervalů. Intervaly mezi jednotlivými typy údržeb jsou obecně nestejné a jejich střídání a prokládání může být různé.
- Na rozhraní časových kvant se mění parametry[3] rovnic modelu. Je stanoven předpis, který pro libovolný čas t z intervalu (14) jednoznačně určuje, jaké parametry rovnic (pro kterou strategii údržby, typ poruchy a časový interval) jsou právě aktivní.

[3] Parametry jsou koeficienty, které jsou po dobu řešení jednoho zkoumaného (aktuálního) časového intervalu (jednoho kroku výpočtu) konstantní. Nelze je nazvat v pravém slova smyslu konstantami rovnic, protože se mění během výpočtu vždy při zahájení nového řešení soustavy rovnic matematického modelu, např. v každém dalším časovém intervalu nebo v každé iteraci.

- Další řídící proměnné jsou:
  - index q časového intervalu

    $$q = 1,\ 2,\ldots Q, \tag{15}$$

    $$t_{(q)} = T_{c(q)}, \qquad \text{pro } q = 1 \tag{16.a}$$

    $$t_{(q)} = t_{(q-1)} + T_{c(q)}, \qquad \text{pro } q = 2, 3, \ldots Q \tag{16.b}$$

    kde Q je mezní horní index, odpovídající dosažení $t_{(Q)} = T_z$ a $T_{c(q)}$ je q-tý časový interval mezi dvěma údržbami. Časový interval $T_{c(q)}$ je uzavřený pro $q = 1$ a polouzavřený, tj. zleva otevřený a zprava uzavřený, pro $q \geq 2$. V případě, že $t_{(Q)} > T_z$, je

    $$T_{c(Q)} = T_z - t_{(Q-1)} \tag{16.c}$$

  - cyklický index r opakování v rámci m-té strategie údržby

    $$r = 1, 2, 3, \ldots, R\text{-}2, R\text{-}1, R, 1, 2, \ldots, \tag{17}$$

    kde R je mezní horní index, odpovídající počtu údržeb v jednom opakujícím se cyklu m-té strategie. Následující hodnota po $r = R$ je $r = 1$ a cyklus se opakuje od počátku.

Jako metoda řešení modelů byla zvolena numerická metoda. Je to metoda současně:

- dosazovací,
- sekvenční,
- v omezeném rozsahu iterační.

Dosazovací proto, že se za všechny veličiny dosadí jejich numerické hodnoty. Výsledek předchozí rovnice se jako nová známá hodnota dosadí do rovnice následující. Po jednom průchodu soustavou rovnic je vyřešen jeden dílčí, zkoumaný, časový interval mezi dvěma údržbami.

Sekvenční proto, že k získání výsledků zkoumaného (aktuálního) intervalu je třeba znát hodnoty z předchozích intervalů. Jde o výpočet s využitím přenášených (posouvaných, sekvenčních) hodnot v časovém sledu z intervalu do intervalu. Výpočet okrajových intervalů, prvního a posledního, se řídí zvláštními algoritmy.

Iterační proto, že k vyjádření hodnot některých proměnných se používá cyklické iterace. Proměnná k výpočtu své hodnoty potřebuje samu sebe. Několikrát za sebou se dosadí poslední vypočtená hodnota proměnné zpět do výrazu, kterým je definována. Hodnota je uznána jako správná po několika cyklech, až rozdíl dvou po sobě následujících vypočtených hodnot je dostatečně malý. Použité výrazy se vyznačují velmi rychlou konvergencí s řádově jednotkami opakovaných dosazení.

4.2 MATEMATICKÝ MODEL M1

Prvek herní matice $e_{m,k}$, který představuje průměrné roční náklady na údržbu a opravy poruch elektroenergetického zařízení a na škody způsobené přerušením dodávky elektrické energie vlivem údržeb a poruch při volbě m-té strategie údržby údržbářem a k-té poruchy náhodou, lze vyčíslit řešením této soustavy rovnic:

$$e_{m,k} = -\frac{K_{cs}}{T_z} \qquad m = 1, 2, \ldots, N_E; \quad k = 1, 2, \ldots, N_F \tag{18}$$

kde $K_{cs} = V_p + V_u$ (19)

kde $V_p = \sum_{q=1}^{Q} V_{1p,k} \cdot N_{oin(q)}$ (20)

$$V_u = \sum_{q=1}^{Q} V_{1u,i} \cdot N_{uin(q)} \tag{21}$$

$$r = 1 + \left[(q-1)\,\mathrm{mod}(R)\right] \qquad \text{pro } q = 1, 2, \ldots Q \tag{22}$$

kde $V_{1p,k} = K_{pc,k} + A_p.\overline{T}_{p,k}$ (23)

$$V_{1u,i} = K_{uc,i} + A_u.\overline{T}_{u,i} \tag{24}$$

$$N_{oin(q)} = cond(t_q \le T_z)\left[F_1(T_{cx(q)}, \overline{T}_{v,k(q)}, f_k, \beta_k) - F_1(T_{cy(q)}, \overline{T}_{v,k(q-1)}, f_k, \beta_k)\right] \tag{25}$$

$$N_{uin(q)} = cond(t_{(q)} < T_z).\left[1 - F_2(T_{c(q)}, \overline{T}_{v,k(q)}, f_k, \beta_k, p_i, Z_{pu,k,i})\right] \tag{26}$$

$$i = M_{su,m(r)} \tag{27}$$

$$\overline{T}_{v,k(q)} = F_T(\overline{T}_{v,k(q-1)}, T_{c(q)}, \varepsilon_{u,i}, \varepsilon_{o,k}, k_s) \tag{28}$$

$$t_{(q)} = T_{c(q)} \qquad \text{pro } q = 1 \tag{29.a}$$

$$t_{(q)} = t_{(q-1)} + T_{c(q)} \qquad \text{pro } q = 2, 3, \ldots Q \tag{29.b}$$

kde $A_p = c_w.P_{vp}$ (30)

$$A_u = c_w.P_{vu} \tag{31}$$

$$\overline{T}_{p,k} = \overline{T}'_{p,k} + \overline{T}''_{p,k} \tag{32}$$

$$T_{c(q)} = T_{d,h} \tag{33.a}$$

$$T_{c(Q)} = T_z - t_{(Q-1)} \qquad \text{pro } t_{(Q)} > T_z \tag{33.b}$$

$$T_{cx(q)} = \mathrm{not}(Z_{up,i,k}).T_{cx(q-1)} + T_{d,h} \tag{34}$$

$$T_{cy(q)} = \mathrm{not}(Z_{up,i,k}).T_{cx(q-1)} \tag{35}$$

kde $h = M_{st,m(r)}$ (36)

Formálně lze prvek herní matice vyjádřit funkcí 19 proměnných:

$$e_{m,k} = \mathcal{F}\begin{pmatrix} T_z, k_s, c_w, P_{vp}, P_{vu}, \|T_d\|_h, \|\overline{T}_u\|_i, \|K_{uc}\|_i, \|\varepsilon_u\|_i, \|p\|_i, \|\overline{T}_v\|_k, \\ \|\overline{T}_P\|_k, \|K_{pc}\|_k, \|\varepsilon_o\|_k, \|f\|_k, \|\beta\|_k, \|Z_{pu}\|_{k,i}, \|Z_{up}\|_{i,k}, \|M_s\|_{m(r)} \end{pmatrix} \tag{37}$$

Funkce F_1, F_2 a F_T mají stejné tvary pro oba modely a jsou uvedeny společně v kapitole 4.4. Algoritmizací rovnic matematického modelu M1 vznikl program VOSA 1.

4.3 MATEMATICKÝ MODEL M2

Prvek herní matice $e_{m,k}$, který představuje aktualizované náklady za zvolenou dobu na údržbu a opravy poruch elektroenergetického zařízení a na škody způsobené přerušením dodávky elektrické energie vlivem údržeb a poruch při volbě *m*-té strategie údržby údržbářem a *k*-té poruchy náhodou, lze vyčíslit řešením této soustavy rovnic:

$$e_{m,k} = -K_{cs} \qquad m = 1, 2, \ldots, N_E; \quad k = 1, 2, \ldots, N_F \tag{38}$$

kde $K_{cs} = V_p + V_u$ (39)

kde $V_p = \sum_{q=q(T_a)}^{q(T_b)} D_N(t_{(q)}, T_{c(q)}, V_{1p,k}, N_{oin(q)}, T_D, p_a, f_u)$ (40)

$$V_u = \sum_{q=q(T_a)}^{q(T_b)} D_N(t_{(q)}, T_{c(q)}, V_{1u,i}, N_{uin(q)}, T_D, p_a, f_u) \tag{41}$$

$$r = 1 + \left[(q-1)\,\mathrm{mod}(R)\right] \qquad \text{pro } q = 1, 2, \ldots Q \tag{42}$$

kde $V_{1p,k} = K_{pc,k} + A_p.\overline{T}_{p,k}$ (43)

$V_{1u,i} = K_{uc,i} + A_u.\overline{T}_{u,i}$ (44)

$$N_{oin(q)} = cond(t_{(q)} \le T_z)\left[F_1(T_{cx(q)}, \overline{T}_{v,k(q)}, f_k, \beta_k) - F_1(T_{cy(q)}, \overline{T}_{v,k(q-1)}, f_k, \beta_k)\right] \quad (45)$$

$$N_{uin(q)} = \mathrm{cond}(t_{(q)} < T_z).\left[1 - F_2(T_{c(q)}, \overline{T}_{v,k(q)}, f_k, \beta_k, p_i, Z_{pu,k,i})\right] \quad (46)$$

$$i = M_{su,m(r)} \quad (47)$$

$$\overline{T}_{v,k(q)} = F_T(\overline{T}_{v,k(q-1)}, T_{c(q)}, \varepsilon_{u,i}, \varepsilon_{o,k}, k_s) \quad (48)$$

$t_{(q)} = T_{c(q)}$ pro $q = 1$ (49.a)

$t_{(q)} = t_{(q-1)} + T_{c(q)}$ pro $q = 2, 3, \ldots Q$ (49.b)

Je-li $N_{in} > 1$ a současně $T_{dj} > T_{d0}$, pak platí:

$$D_N = \sum_{g=1}^{\mathrm{int}(N_{in(q)})} V_1.s_u^{-\mathrm{int}\left[T_{d0} + \frac{g.(T_{dj} - T_{d0})}{N_{in(q)}}\right]} + V_1.\mathrm{frac}\left(N_{in(q)}\right).s_u^{-\mathrm{int}(T_{dj})} \quad (50.a)$$

Je-li $0 < N_{in} \le 1$, pak platí:

$$D_N = V_1.N_{in(q)}.s_u^{-\mathrm{int}(T_{dj})} \quad (50.b)$$

kde $A_p = c_w.P_{vp}$ (51)

$A_u = c_w.P_{vu}$ (52)

$\overline{T}_{p,k} = \overline{T}'_{p,k} + \overline{T}''_{p,k}$ (53)

$T_{c(q)} = T_{d,h}$ (54.a)

$T_{c(Q)} = T_z - t_{(Q-1)}$ pro $t_{(Q)} > T_z$ (54.b)

$T_{cx(q)} = \mathrm{not}(Z_{up,i,k}).T_{cx(q-1)} + T_{d,h}$ (55)

$T_{cy(q)} = \mathrm{not}(Z_{up,i,k}).T_{cx(q-1)}$ (56)

$$s_u = 1 + \frac{p_a}{100} \quad (57)$$

$T_{dj} = t_{(q)} - T_D$ (58)

$T_{d0} = t_{(q)} - T_{c(q)} - T_D$ (59)

kde $h = M_{st,m(r)}$ (60)

Formálně lze prvek herní matice vyjádřit funkcí 24 proměnných:

$$e_{m,k} = \mathcal{F}\begin{pmatrix} T_z, k_s, c_w, P_{vp}, P_{vu}, \|T_d\|_h, \|\overline{T}_u\|_i, \|K_{uc}\|_i, \|\varepsilon_u\|_i, \|p\|_i, \|\overline{T}_v\|_k, \|\overline{T}_p\|_k, \|K_{pc}\|_k, \\ \|\varepsilon_o\|_k, \|f\|_k, \|\beta\|_k, \|Z_{pu}\|_{k,i}, \|Z_{up}\|_{i,k}, \|M_s\|_{m(r)}, f_u, p_a, T_a, T_b, T_D \end{pmatrix} \quad (61)$$

Funkce F_1, F_2 a F_T mají stejné tvary pro oba modely a jsou uvedeny v kapitole 4.4. Algoritmizací rovnic matematického modelu M2 vznikl program VOSA 2.

4.4 FUNKCE F_1, F_2 A F_T

Funkce F_1 a F_2 jsou funkce pravděpodobnostní. Funkce F_1 udává očekávaný počet poruch v časovém intervalu T_c. Funkce F_2 udává pravděpodobnost výskytu poruchy v posledních p procentech časového intervalu T_c, tedy v intervalu délky $<T_c - p.T_c/100; T_c>$. Funkce F_T slouží k výpočtu střední doby mezi poruchami platné pro řešený interval ze známé hodnoty v předchozím intervalu.

Funkce F_1 a F_2 pracují s několika typy distribučních funkcí rozložení pravděpodobnosti náhodné proměnné, kterou je relativní doba mezi poruchami $t = T_v / \overline{T}_v$. Její střední, tj. očekávaná hodnota je identicky rovna jedné a náhodná proměnná T_v je chápána jako doba mezi poruchami. Lze použít distribuční funkce pro tato rozložení:

a) Speciální Gaussovo modifikované. Je to speciální případ Gaussova modifikovaného rozložení (viz b)) pro hodnotu parametru $\beta = 2$. Parametr β je nazván mírou rozptylu [12]; $f = 0$.
b) Gaussovo modifikované. Jde o aproximaci distribuční funkce Gaussova rozložení. Parametr $\beta > 1$ je nazván mírou rozptylu [12] ; $f = 1$.
c) Exponenciální. Je speciálním případem rozložení Weibullova s parametrem $\beta = 1$ [12]; $f = 2$.
d) Weibulovo. Vyžaduje znalost parametru $\beta > 0$ [12] ; $f = 3$.
e) Gaussovo modifikované počítané numericky. Parametr $\beta > 0$ je nazván směrodatnou odchylkou; $f = 4$.

Ze všech uvedených rozložení pro náš model nejlépe vyhovuje Weibullovo rozložení. Pro $\beta > 1$ platí: čím déle bylo zařízení v provozu, tím je větší pravděpodobnost poruchy v příštím krátkém časovém intervalu. To vysvětluje opodstatněnost vhodnosti použití tohoto rozložení v našem případě, protože elektroenergetická zařízení podléhají opotřebení a únavě. Naopak pro $0 < \beta \leq 1$ platí: čím déle bylo zařízení v provozu, tím menší je pravděpodobnost poruchy v příštím krátkém časovém intervalu. Tak je tomu u zařízení, u nichž k poruchám dochází v důsledku skrytých vad, nikoliv v důsledku opotřebení [17].

4.4.1 Funkce F_1

Hodnotu funkce F_1, která je rovna očekávanému počtu poruch v časovém intervalu T_c, můžeme vyjádřit výrazem

$$F_1 = \mathrm{int}\left(\frac{T_c}{\overline{T}_v}\right) + A, \tag{62}$$

kde A je pomocná proměnná lišící se podle zvoleného typu distribuční funkce.

Pro přehlednější zápis výrazů pro A zavedeme pomocnou veličinu z.

$$z = \mathrm{frac}\left(\frac{T_c}{\overline{T}_v}\right) \tag{63}$$

Pro speciální Gaussovo modifikované rozložení pak je

$$A = \frac{z^2}{3 + z^2}. \tag{64}$$

Pro Gaussovo modifikované rozložení je

$$A = \frac{(\beta - 1).z^\beta}{(\beta + 1) + (\beta - 1).z^\beta}. \tag{65}$$

Pro exponenciální rozložení je

$$A = 1 - e^{-z}. \tag{66}$$

Pro Weibullovo rozložení je

$$A = 1 - e^{-z^\beta}. \tag{67}$$

Pro Gaussovo modifikované rozložení počítané numericky je

$$A = \frac{1}{\beta.\sqrt{2\pi}}.\int_0^z e^{-\left(\frac{t-1}{\beta}\right)^2 . \frac{1}{2}} dt. \tag{68}$$

4.4.2 Funkce F_2

Hodnota funkce F_2 je rovna pravděpodobnosti výskytu poruchy v posledních p procentech časového intervalu délky T_c. Tato funkce také udává pravděpodobnost neprovedení údržby na konci časového intervalu mezi dvěma údržbami.

Pro zjednodušení zápisu výrazů pro F_2 použijeme mimo pomocné veličiny z dle (63) ještě pomocnou veličinu z_1:

$$z_1 = \left(1 - \frac{p}{100}\right) \cdot \frac{T_c}{\overline{\overline{T}}_v} - \text{int}\left(\frac{T_c}{\overline{\overline{T}}_v}\right). \tag{69}$$

Pokud platí

$$\text{int}\left(\frac{T_c}{\overline{\overline{T}}_v}\right) > \left(1 - \frac{p}{100}\right) \cdot \frac{T_c}{\overline{\overline{T}}_v}, \tag{70}$$

tzn. $z_1 < 0$, pak je $F_2 = 1$.

Pokud platí

$$\text{int}\left(\frac{T_c}{\overline{\overline{T}}_v}\right) \le \left(1 - \frac{p}{100}\right) \cdot \frac{T_c}{\overline{\overline{T}}_v}, \tag{71}$$

tzn. $z_1 \ge 0$, pak lze funkci F_2 pro jednotlivé typy rozložení zapsat výrazy:

Pro speciální Gaussovo modifikované rozložení je

$$F_2 = \frac{z^2}{3 + z^2} - \frac{z_1^2}{3 + z_1^2}. \tag{72}$$

Pro Gaussovo modifikované rozložení je

$$F_2 = \frac{(\beta - 1).z^\beta}{(\beta + 1) + (\beta - 1).z^\beta} - \frac{(\beta - 1).z_1^\beta}{(\beta + 1) + (\beta - 1).z_1^\beta}. \tag{73}$$

Pro exponenciální rozložení je

$$F_2 = e^{-z_1} - e^{-z}. \tag{74}$$

Pro Weibullovo rozložení je

$$F_2 = e^{-z_1^\beta} - e^{-z^\beta}. \tag{75}$$

Pro Gaussovo modifikované rozložení počítané numericky je

$$F_2 = \frac{1}{\beta.\sqrt{2\pi}} . \int_{z_1}^{z} e^{-\left(\frac{t-1}{\beta}\right)^2 . \frac{1}{2}} dt \tag{76}$$

Poznámka: Výpočet integrálu v rovnicích (68) a (76) je v programu řešen numericky Simpsonovým pravidlem.

4.4.3 Funkce F_T

Funkce F_T je určena pro výpočet střední doby mezi poruchami platné pro řešený časový interval ze známé hodnoty v předchozím intervalu. Střední doba mezi poruchami se během výpočtu opravuje a pro každý časový interval se počítá znovu. Tato doba se během fyzické doby života zařízení mění v důsledku stárnutí zařízení a vlivem obnovy při údržbách a opravách.

Protože na počátku výpočtu není známa poruchovost v předchozím ani v aktuálním časovém intervalu, je potřeba pro výpočet střední doby mezi poruchami rozlišovat dva typy výpočtových intervalů: první interval a ostatní intervaly. Pro každý typ intervalu je funkce F_T počítána jiným způsobem:

a) první interval, $q = 1$

Střední doba mezi poruchami se stanoví ze zadané hodnoty $\overline{T}_v$. Protože není předem znám počet oprav v prvním ani v předchozím intervalu, byl zvolen iterační způsob výpočtu. Počet oprav pro nultou iteraci položíme roven nule a pro $a = 1, 2, 3, \ldots, y$ pak iterujeme rovnice:

$$N_{oin(1)}^{(0)} = 0 \tag{77.a}$$

$$\overline{T}_{v(1)}^{(a)} = \overline{T}_v . \frac{\varepsilon_o^{N_{oin(1)}^{(a-1)}}}{k_s^{T_{c(1)}}}, \tag{77.b}$$

$$N_{oin(1)}^{(a)} = F_1(T_{c(1)}, \overline{T}_{v(1)}^{(a)}, f, \beta). \tag{77.c}$$

Iterace je ukončena, když rozdíl $\left|\overline{T}_{v(1)}^{(y)} - \overline{T}_{v(1)}^{(y-1)}\right| \le \xi$, kde ξ je dostatečně malé kladné číslo, dané požadovanou přesností výpočtu.

Protože musí být splněna podmínka, že $\overline{T}_{v(1)}^{(y)} \le \overline{T}_v$, můžeme funkci F_T vyjádřit jako

$$F_T = \mathrm{cond}(\overline{T}_{v(1)}^{(y)} \ge \overline{T}_v).\overline{T}_v + \mathrm{not}\left(\mathrm{cond}(\overline{T}_{v(1)}^{(y)} \ge \overline{T}_v)\right)\overline{T}_{v(1)}^{(y)}. \tag{78}$$

Střední doba mezi poruchami v prvním intervalu ($q = 1$) je pak rovna

$$\overline{T}_{v(1)} = F_T. \tag{79}$$

b) ostatní intervaly, $q = 2, 3, \ldots, Q$

Střední doba mezi poruchami se stanoví z hodnoty platné pro předchozí interval. Zavedeme pomocnou veličinu $\overline{T}'_{v(q)}$ takto:

$$\overline{T}'_{v(q)} = \overline{T}_{v(q-1)} . \frac{\varepsilon_o^{N_{oin(q-1)}} . \varepsilon_u^{N_{uin(q-1)}}}{k_s^{T_{c(q)}}}. \tag{80}$$

Protože musí být splněna podmínka, že $\overline{T}'_{v(q)} \le \overline{T}_{v(q-1)}$, můžeme funkci F_T vyjádřit jako

$$F_T = \mathrm{cond}(\overline{T}'_{v(q)} \ge \overline{T}_{v(q-1)}).\overline{T}_{v(q-1)} + \mathrm{not}\left(\mathrm{cond}(\overline{T}'_{v(q)} \ge \overline{T}_{v(q-1)})\right)\overline{T}'_{v(q)}. \tag{81}$$

Střední doba mezi poruchami v ostatních intervalech ($q \ge 2$) je pak rovna

$$\overline{T}_{v(q)} = F_T. \tag{82}$$

4.5 SELEKTIVITA MATEMATICKÝCH MODELŮ M1 A M2

Matematické modely jsou selektivní vzhledem k vlivu údržeb na poruchy a opačně vzhledem ke zpětnému vlivu poruch na údržby. Stručně řečeno, údržby jsou selektivní vzhledem k poruchám a poruchy jsou selektivní vzhledem k údržbám. Modely totiž dovolují předepsat:

- pro každou údržbu a každou poruchu pomocí matice $\left\|Z_{up}\right\|_{i,k}$ vlivu údržeb na poruchy
  - která i-tá údržba uvede zařízení z hlediska k-té poruchy do určitého výchozího stavu, kdy distribuční funkce rozložení pravděpodobnosti relativní doby mezi k-tými poruchami běží od počátku a
  - která i-tá údržba pravděpodobnost vzniku k-té poruchy neovlivní a kdy potom pro k-tou poruchu čas běží, jako kdyby k žádné i-té údržbě nedošlo
- pro každou poruchu a každou údržbu pomocí matice $\left\|Z_{pu}\right\|_{k,i}$ vlivu poruch na údržby, vznikne-li porucha v posledních p_i procentech délky časového intervalu mezi údržbami
  - která k-tá porucha a její následná oprava uvede udržované zařízení z hlediska budoucí i-té údržby do určitého výchozího stavu, kdy blízká následující plánovaná i-tá údržba se vynechá a

- která k-tá porucha a její následná oprava vykonání plánované i-té údržby neovlivní a kdy potom pro i-tou údržbu čas běží, jako kdyby k žádné předchozí opravě nedošlo.

4.6 ROZDÍLY MEZI MATEMATICKÝMI MODELY M1 A M2

Mezi hlavní rozdíly patří:

- Model M1 vyčísluje výsledné náklady jako průměrné roční.
- Model M2 vyčísluje výsledné náklady jako souhrnné (integrální) za předem určené období. Přepočítává je k libovolnému časovému okamžiku T_D. Jde o tzv. aktualizaci nákladů. Počátek T_a i konec T_b integračního intervalu lze libovolně volit. Podle nastavení integračních mezí pak výsledné náklady mohou představovat:
  - aktualizované náklady za celou fyzickou dobu života zařízení,
  - aktualizované náklady za libovolný podinterval fyzické doby života zařízení.
- Je-li u modelu M2 nastaveno $p_a = 0$ % a současně $T_D = 0$, nedochází k aktualizaci nákladů a podle nastavení integračních mezí T_a a T_b pak výsledné náklady mohou představovat:
  - náklady za celou fyzickou dobu života zařízení,
  - náklady za libovolný podinterval fyzické doby života zařízení.

Výsledné náklady vyčíslené modely M1 a M2 (prvky $e_{m,k}$) nemusí vždy představovat průměrné roční nebo aktualizované náklady za zvolenou dobu na údržbu, opravy poruch a na nedodanou elektrickou energii v důsledku údržeb a poruch. Výsledkem řešení modelů mohou být i dílčí náklady nebo libovolné kombinace jejich součtů. Toho lze dosáhnout dosazením nulových hodnot vhodných parametrů do modelů. Vypočítané náklady potom mohou představovat např. náklady na:

- údržbu (pro $c_w = 0$ a $K_{pc,k} = 0$),
- opravy poruch (pro $c_w = 0$ a $K_{uc,i} = 0$ pro všechna i),
- nedodanou energii v důsledku údržeb a poruch (pro $K_{pc,k} = 0$ a $K_{uc,i} = 0$ pro všechna i),
- údržbu a opravy poruch (pro $c_w = 0$) atd.

5 VLIV ZMĚN HODNOT PARAMETRŮ MATEMATICKÉHO MODELU NA ZMĚNU HODNOTY PRVKU HERNÍ MATICE – MODEL M1

5.1 VOLBA ZPŮSOBU ANALÝZY

Cílem následující analýzy[4] je vyšetření vlivu změn hodnot parametrů matematického modelu M1, tj. proměnných funkce (37), na změnu hodnoty prvku e herní matice. Lze též mluvit o vyšetření vlivu přesnosti hodnot parametrů matematického modelu na přesnost hodnoty prvku e herní matice. Při takovéto specifikaci stačí vyšetřit vliv jedné obecné údržby a jedné obecné poruchy s měnícími se hodnotami parametrů. Seznam údržeb a seznam poruch se zredukují na jednoprvkové. Použitá metodika spočívá ve stanovení základních hodnot parametrů obou prvků, tj. obecné údržby a obecné poruchy. Tyto základní hodnoty parametrů, stejně jako základní hodnoty prvku e_z z nich vypočítané, budeme považovat za přesné. V okolí těchto základních hodnot parametrů se mění hodnota jednoho parametru a sleduje se vliv této změny na hodnotu prvku e

[4] Analýzu lze také nazvat citlivostní analýzou matematického modelu, tj. zkoumat vlivy jednotlivých parametrů a jejich možných změn a posoudit, který z nich má vliv zanedbatelný a naopak, který parametr je třeba uvážlivě zpřesňovat tak, aby hodnota prvku e herní matice byla co nejblíže skutečnosti. Pak můžeme mluvit o citlivosti prvku e herní matice na velikost (změnu hodnot) vstupních parametrů matematického modelu. Citlivost prvku e herní matice budeme definovat jako absolutní resp. relativní změnu jeho hodnoty v hodnotovém resp. procentovém vyjádření při změně hodnoty zkoumaného parametru matematického modelu (proměnné funkce (37)).

herní matice. Hodnoty jsou voleny z intervalu povolených, prakticky možných, hodnot parametrů, metoda tedy vyžaduje stanovit i meze parametrů, tzv. toleranční interval.

K analýze můžeme použít dvou metod:

1) analytický rozbor funkce (37) založený na diferenciálním počtu
Pro vyjádření citlivosti prvku *e* herní matice na změnu hodnot proměnných lze využít rozvoje funkce (37) do Taylorovy řady kolem bodu základních hodnot a vyšší diferenciály, než první, zanedbat. Potom citlivost, tj. změna hodnoty prvku *e* při malé změně hodnot proměnných, je přibližně určena prvním diferenciálem v bodě základních hodnot proměnných. Pro výpočet diferenciálu je třeba určit parciální derivace funkce podle jednotlivých proměnných. Je zřejmé, že funkce (37) je složitá. Jak ukážeme dále, analytický rozbor citlivosti je reálně možný jen u menšího počtu jejích proměnných. Je platný jen pro nepatrné změny proměnných kolem jejich základních hodnot. V našem případě jsou ovšem změny značné. Je třeba podotknout, že výhodou analytického rozboru je obecná platnost výsledků, které lze v jednodušších případech vyjádřit rovnicemi. Kromě vlastní citlivosti prvku *e* herní matice na změnu hodnoty zkoumané proměnné x_r lze též posoudit vlivy, které na tuto citlivost mají ostatní proměnné x_g; $g \neq r$. Výsledek rozboru je komplexnější.
2) numerický rozbor funkce (37) vázaný na opakované numerické výpočty
Předmětem numerické analýzy je určit konečné diference funkčních hodnot funkce (37) vlivem konečných změn proměnných. Absolutní nebo relativní velikost diferencí pak představuje absolutní nebo relativní citlivost modelu. Tento způsob je aplikovatelný vždy, vyžaduje však množství výpočtů funkčních hodnot funkce (37), tj. řešení modelu pro konkrétní číselné hodnoty jeho parametrů. Protože počet výpočtů silně roste s požadavkem na současnou změnu hodnoty několika parametrů, bylo nutné se omezit na současnou změnu hodnoty pouze parametru jediného. Provedené výpočty tedy sledují vždy vliv změny hodnoty jednoho parametru při základních hodnotách ostatních parametrů. Protože matematický model M1 je realizován formou programu VOSA 1, zvolili jsme jako základní právě tuto metodu. Průměrné roční náklady údržbáře představují funkční hodnotu funkce (37). Funkci si lze představit jako plochu v patnáctirozměrném prostoru, která ještě závisí na dvou parametrech. Podrobná numerická analýza celé této plochy je prakticky neuskutečnitelná.

Při analýze vycházíme z faktu, že optimalizovanou veličinou bude vesměs délka intervalu mezi dvěma údržbami T_c. Proto tuto veličinu při rozboru považujeme za parametr funkce (37), nikoliv za její proměnnou – vliv je zjišťován a udáván parametricky. Rovněž kód distribuční funkce *f* je v dalším považován za parametr, nikoliv proměnnou funkce (37).

Poznámka: V dalším je třeba důsledně rozlišovat pojmy proměnná a parametr funkce a parametr modelu. Parametr modelu je souhrnný název pro parametr i proměnnou funkce (37) pro výpočet hodnoty prvku *e* herní matice. Celá analýza vlivu přesnosti hodnot parametrů matematického modelu na přesnost hodnoty prvku *e* herní matice je zaměřena na vypínače 400 kV. Z tohoto zaměření vychází volba základních hodnot parametrů, jejich mezí a volba zkoumaných hodnot parametrů. Rozbor je též omezen na takové strategie údržby, kdy délka časového intervalu T_c je menší než doba života zařízení T_z.

5.2 ANALYTICKÝ ROZBOR CITLIVOSTI MATEMATICKÉHO MODELU

Pro analytický rozbor citlivosti bude matematický model výpočtu hodnoty prvku *e* herní matice zjednodušen. Úprava se opírá o tyto skutečnosti:

a) nebude respektován koeficient neprovedení údržby p, tj. údržba bude provedena vždy. Neuvažovat fakt, že se neprovede plánovaná údržba, jestliže v posledních p procentech časového intervalu T_c byla provedena oprava, znamená dosadit do rovnice (37) $p = 0$. V takovém případě je funkce F_2 vždy identicky rovna 0 a proto platí:

$$N_{uin(q)} = 1 \qquad \text{pro } q = 1, 2, \ldots, Q \tag{83}$$

$$N_u = Q \tag{84}$$

b) nebude uvažován vliv obecně kratšího posledního časového intervalu, tj. předpokládá se, že poslední interval bude též délky T_c. To vyžaduje upravit fyzickou dobu života T_z tak, aby byla celistvým násobkem časového intervalu T_c a průměrné roční náklady údržbáře (prvek e) stanovit z takto upravené doby.

S respektováním výše uvedených skutečností lze soustavu rovnic (18) až (36) přepsat po drobných úpravách takto:

$$e = -\frac{1}{Q.T_c}\left[(K_{pc} + c_w P_{vp}\overline{T}_p).N_o + (K_{uc} + c_w P_{vu.}\overline{T}_u).Q\right], \tag{85}$$

kde $$Q = round\left(\frac{T_z}{T_c}\right), \tag{86}$$

$$N_o = N_{oin(1)} + \sum_{q=2}^{Q} N_{oin(q)}, \tag{87}$$

kde $$N_{oin(1)} = F_1(T_c, \overline{T}_{v(1)}, f, \beta), \qquad \text{pro } q = 1 \tag{88}$$

$$N_{oin(q)} = F_1(T_c, \overline{T}_{v(q)}, f, \beta), \qquad \text{pro } q = 2, 3, \ldots Q \tag{89}$$

kde $$\overline{T}_{v(1)} = \overline{T}_v \frac{\varepsilon_o^{N_{oin(1)}}}{k_s^{T_c}} \qquad \text{pro } q = 1 \tag{90}$$

$$\overline{T}_{v(q)} = \overline{T}_v \frac{\varepsilon_u^{(q-1)}}{k_s^{q.T_c}}.\varepsilon_o^{\left(\sum_{x=2}^{q} N_{oin(x-1)}\right)} \qquad \text{pro } q = 2, 3, \ldots Q \tag{91}$$

Formálně lze rovnici (85) zapsat ve tvaru, resp. rovnici (37) přepsat na tvar

$$e = \mathcal{F}(\underbrace{\underbrace{T_z, k_s, c_w, P_{vp}, P_{vu}, \overline{T}_u, K_{uc,} \varepsilon_u, p, \overline{T}_v, \overline{T}_p, K_{pc}, \varepsilon_o, \beta}_{C_1}, \underbrace{T_c, f}_{C_2}}_{C}) \tag{92}$$

$$e = \mathcal{F}(C_1, C_2) \tag{93}$$

$$e = \mathcal{F}(C) \tag{94}$$

kde C je vektor parametrů modelu (vektor argumentů funkce $\mathcal{F}$),
C_1 je vektor proměnných funkce $\mathcal{F}$,
C_2 je vektor parametrů funkce $\mathcal{F}$.

Pro vyjádření citlivosti funkce $\mathcal{F}$ na změnu hodnot proměnných lze využít rozvoje funkce do Taylorovy řady kolem bodu základních hodnot. Vektor těchto základních hodnot proměnných označíme C_{1z} (v dalším obecně index z u veličin) a můžeme psát:

$$e = \mathcal{F}(C_1, C_2) = \mathcal{F}(C_{1z}, C_2) + \frac{d\mathcal{F}(C_{1z}, C_2)}{1!} + \frac{d^{(2)}\mathcal{F}(C_{1z}, C_2)}{2!} + \ldots + Z \tag{95}$$

Vyšší než první diferenciály funkce zanedbáme. Potom lze citlivost, tj. změnu hodnoty prvku e při malé změně hodnot proměnných, vyjádřit takto:

$$\Delta e = \mathcal{F}(C_1, C_2) - \mathcal{F}(C_{1z}, C_2) \cong d\mathcal{F}(C_{1z}, C_2) \tag{96}$$

Změna je přibližně určena 1. diferenciálem v bodě základních hodnot proměnných. Diferenciál musí obsahovat parciální derivace podle těch proměnných, jejichž vliv se vyšetřuje. Tedy:

$$
\begin{aligned}
d\mathcal{F}(C_{1z},C_2) = {} & \underbrace{\left[\frac{\partial e}{\partial K_{pc}}\right]_{C_1=C_{1z}}.\Delta K_{pc}}_{A_1} + \underbrace{\left[\frac{\partial e}{\partial K_{uc}}\right]_{C_1=C_{1z}}.\Delta K_{uc}}_{A_2} + \underbrace{\left[\frac{\partial e}{\partial c_w}\right]_{C_1=C_{1z}}.\Delta c_w}_{A_3} + \\
& + \underbrace{\left[\frac{\partial e}{\partial P_{vu}}\right]_{C_1=C_{1z}}.\Delta P_{vu}}_{A_4} + \underbrace{\left[\frac{\partial e}{\partial P_{vp}}\right]_{C_1=C_{1z}}.\Delta P_{vp}}_{A_5} + \underbrace{\left[\frac{\partial e}{\partial \overline{T}_p}\right]_{C_1=C_{1z}}.\Delta \overline{T}_p}_{A_6} + \\
& + \underbrace{\left[\frac{\partial e}{\partial \overline{T}_u}\right]_{C_1=C_{1z}}.\Delta \overline{T}_u}_{A_7} + \underbrace{\left[\frac{\partial e}{\partial k_s}\right]_{C_1=C_{1z}}.\Delta k_s}_{A_8} + \underbrace{\left[\frac{\partial e}{\partial T_z}\right]_{C_1=C_{1z}}.\Delta T_z}_{A_9} + \\
& + \underbrace{\left[\frac{\partial e}{\partial \varepsilon_u}\right]_{C_1=C_{1z}}.\Delta \varepsilon_u}_{A_{10}} + \underbrace{\left[\frac{\partial e}{\partial \varepsilon_o}\right]_{C_1=C_{1z}}.\Delta \varepsilon_o}_{A_{11}} + \underbrace{\left[\frac{\partial e}{\partial \overline{T}_v}\right]_{C_1=C_{1z}}.\Delta \overline{T}_v}_{A_{12}} + \underbrace{\left[\frac{\partial e}{\partial \beta}\right]_{C_1=C_{1z}}.\Delta \beta}_{A_{13}}
\end{aligned}
\tag{97}
$$

Stanovení parciálních derivací:

$$\frac{\partial e}{\partial K_{pc}} = \frac{\partial \mathcal{F}(C)}{\partial K_{pc}} = D_1 = -\frac{N_o}{Q.T_c} \tag{98}$$

$$\frac{\partial e}{\partial K_{uc}} = \frac{\partial \mathcal{F}(C)}{\partial K_{uc}} = D_2 = -\frac{1}{T_c} \tag{99}$$

$$\frac{\partial e}{\partial c_w} = \frac{\partial \mathcal{F}(C)}{\partial c_w} = D_3 = -\left[\frac{N_o}{Q}\frac{\overline{T}_p}{T_c}P_{vp} + \frac{\overline{T}_u}{T_c}P_{vu}\right] \tag{100}$$

$$\frac{\partial e}{\partial P_{vu}} = \frac{\partial \mathcal{F}(C)}{\partial P_{vu}} = D_4 = -\frac{\overline{T}_u}{T_c}c_w \tag{101}$$

$$\frac{\partial e}{\partial P_{vp}} = \frac{\partial \mathcal{F}(C)}{\partial P_{vp}} = D_5 = -\frac{N_o}{Q}\frac{\overline{T}_p}{T_c}c_w \tag{102}$$

$$\frac{\partial e}{\partial \overline{T}_p} = \frac{\partial \mathcal{F}(C)}{\partial \overline{T}_p} = D_6 = -\frac{N_o}{Q.T_c}.c_w.P_{vp} \tag{103}$$

$$\frac{\partial e}{\partial \overline{T}_u} = \frac{\partial \mathcal{F}(C)}{\partial \overline{T}_u} = D_7 = -\frac{1}{T_c}c_w P_{vu} \tag{104}$$

Ve vztazích (98) až (104) je počet oprav N_o za celou fyzickou dobu života zařízení dán výrazy (87) až (91). Pro hrubý odhad této veličiny lze vycházet z představy, že je

$$k_s \cong \varepsilon_u \cong \varepsilon_o \cong 1. \tag{105}$$

V takovém případě je

$$\overline{T}_{v(1)} = \overline{T}_{v(q)} = \overline{T}_v \tag{106}$$

a tedy

$$N_{oin(1)} = N_{oin(q)} = N_{oin} = F_1(T_c, \overline{T}_v, f, \beta) \tag{107}$$

(počet oprav v každém intervalu délky T_c – je jich Q – je statisticky stejný).

Potom je

$$N_o = Q.N_{oin} = Q.F_1(T_c, \overline{T}_v, f, \beta) \tag{108}$$

Parciální derivace podle ostatních proměnných dávají výrazy velmi nepřehledné, těžko analyticky zpracovatelné. Jejich výpočet by byl možný snad jen numericky. Například parciální derivace podle k_s je naznačena soustavou rovnic (109) až (114):

$$\frac{\partial e}{\partial k_s} = -\frac{1}{Q.T_c}(K_{pc} + c_w P_{vp} \overline{T}_p)\frac{\partial N_o}{\partial k_s}, \tag{109}$$

kde $$\frac{\partial N_o}{\partial k_s} = \frac{\partial N_{oin(1)}}{\partial k_s} + \sum_{q=2}^{Q} \frac{\partial N_{oin(q)}}{\partial k_s} \tag{110}$$

kde $$\frac{\partial N_{oin(1)}}{\partial k_s} = \frac{\partial F_1}{\partial T_{v(1)}} \frac{\partial T_{v(1)}}{\partial k_s} \qquad \text{pro } q = 1 \tag{111}$$

$$\frac{\partial N_{oin(q)}}{\partial k_s} = \frac{\partial F_1}{\partial T_{v(q)}} \frac{\partial \overline{T}_{v(q)}}{\partial k_s} \qquad \text{pro } q = 2,3,\ldots Q \tag{112}$$

kde $$\frac{\partial \overline{T}_{v(1)}}{\partial k_s} = \frac{\partial}{\partial k_s}\left[\overline{T}_v \frac{\varepsilon_o^{N_{oin(1)}(k_s)}}{k_s^{T_c}}\right] \qquad \text{pro } q = 1 \tag{113}$$

$$\frac{\partial \overline{T}_{v(q)}}{\partial k_s} = \frac{\partial}{\partial k_s}\left[\overline{T}_v \frac{\varepsilon_u^{(q-1)}}{k_s^{q.T_c}}.\varepsilon_o^{\left(\sum_{x=2}^{q} N_{oin(x-1)}(k_s)\right)}\right] \qquad \text{pro } q = 2,3,\ldots Q \tag{114}$$

V poslední rovnici se mimo jiné objevuje součet prvků $N_{oin(q)}$ ze všech předchozích intervalů, každý z prvků je též funkcí k_s. Parciální derivace $\partial e / \partial k_s$ je tedy počítána pomocí parciálních derivací $\partial N_{oin(q)}(k_s) / \partial k_s$ ze všech předchozích intervalů. Výraz by byl vyčíslitelný pouze numericky. Podobné poznatky lze uvést o ostatních, zde neuvedených, parciálních derivacích. Proto nelze jednoduše vyjádřit výrazy A_8 až A_{13} ve vztahu (97).

Změní-li se současně jen jedna proměnná (viz výrazy A_1 až A_7), lze pro změnu hodnoty prvku e herní matice psát:

$$\Delta e = e - [e]_z \tag{115}$$

- změna K_{pc}:

$$\begin{aligned} \Delta e = D_1.\Delta K_{pc} &= -\left[\frac{N_o}{Q.T_c}\right]_z \left(K_{pc} - [K_{pc}]_z\right) \cong \\ &\cong -\frac{1}{T_c}.[F_1(T_c, \overline{T}_v, f, \beta)]_z \left(K_{pc} - [K_{pc}]_z\right) \end{aligned} \tag{116}$$

- změna K_{uc}:

$$\Delta e = D_2.\Delta K_{uc} \cong -\frac{1}{T_c}\left(K_{uc} - [K_{uc}]_z\right) \tag{117}$$

- změna c_w:

$$\begin{aligned} \Delta e = D_3.\Delta c_w &= -\left[\frac{N_o}{Q}\frac{\overline{T}_p}{T_c}P_{vp} + \frac{\overline{T}_u}{T_c}P_{vu}\right]_z \left(c_w - [c_w]_z\right) \cong \\ &\cong -\frac{1}{T_c}\left[F_1(T_c, \overline{T}_v, f, \beta).\overline{T}_p.P_{vp} + \overline{T}_u.P_{vu}\right]_z \left(c_w - [c_w]_z\right) \end{aligned} \tag{118}$$

- změna P_{vu}:

$$\Delta e = D_4.\Delta P_{vu} = -\left[\frac{\overline{T}_u}{T_c}c_w\right]_z \left(P_{vu} - [P_{vu}]_z\right) \cong -\frac{1}{T_c}[\overline{T}_u.c_w]_z \left(P_{vu} - [P_{vu}]_z\right) \tag{119}$$

- změna P_{vp}:

$$\Delta e = D_5.\Delta P_{vp} = -\left[\frac{N_o}{Q}\frac{\overline{T}_p}{T_c}c_w\right]_z\left(P_{vp} - \left[P_{vp}\right]_z\right) \cong$$
$$\cong -\frac{1}{T_c}\left[F_1(T_c,\overline{T}_v,f,\beta).\overline{T}_p.c_w\right]_z\left(P_{vp} - \left[P_{vp}\right]_z\right) \quad (120)$$

- změna $\overline{T}_p$:

$$\Delta e = D_6.\Delta\overline{T}_p = -\left[\frac{N_o}{Q.T_c}c_w.P_{vp}\right]_z\left(\overline{T}_p - \left[\overline{T}_p\right]_z\right) \cong$$
$$\cong -\frac{1}{T_c}\left[F_1(T_c,\overline{T}_v,f,\beta).P_{vp}.c_w\right]_z\left(\overline{T}_p - \left[\overline{T}_p\right]_z\right) \quad (121)$$

- změna T_u:

$$\Delta e = D_7.\Delta\overline{T}_u = -\frac{1}{T_c}\left[c_w P_{vu}\right]_z\left(\overline{T}_u - \left[\overline{T}_u\right]_z\right) \quad (122)$$

Výrazy v $[\ ]_z$ mají hodnotu vyčíslenou pro základní hodnoty proměnných; znaménko ≅ je třeba chápat jako „velmi přibližně“. Z výše uvedeného vyplývá, že analytický rozbor citlivosti je reálně možný jen u sedmi proměnných funkce (92). Je platný pro nepatrné změny proměnných kolem jejich základních hodnot. Skutečné změny mohou být ovšem značné. Proto jako základní metoda rozboru citlivosti modelu byl zvolen numerický rozbor. Tato kapitola však alespoň u sedmi zkoumaných proměnných x_r umožní posoudit vliv ostatních proměnných x_g na citlivost modelu při změně hodnot proměnných x_r, tj. umožní posoudit, za jakých okolností bude prvek e herní matice více či méně citlivý na změnu hodnoty proměnné x_r.

Aplikace vztahů (116) až (122) a konkrétní poznatky budou využity v kapitole 5.4.

5.3 NUMERICKÝ ROZBOR CITLIVOSTI MATEMATICKÉHO MODELU

Jak již bylo uvedeno v kapitole 5.1, budeme kvůli snížení počtu nutných výpočtů vyšetřovat vliv vždy jen jedné proměnné funkce (37), kterou jsme přepsali na tvar (92), pro zadané hodnoty parametrů T_c a f na velikost hodnoty prvku e herní matice (ostatní proměnné zůstanou při výpočtu vždy na základní hodnotě). Vyšetření vlivu tedy předpokládá provedení řady výpočtů hodnoty prvku e herní matice pro několik hodnot proměnné, jejíž vliv se zkoumá a pro každou zadanou hodnotu parametrů T_c a f. Tento přístup umožní významné snížení počtu výpočtů prováděných při analýze na únosnou míru (řádově stovky) a současně usnadní přehlednou grafickou a tabelární prezentaci výsledků i formulaci závěrů. Čím více hodnot zkoumané proměnné je však voleno, tím jsou výsledky representativnější, avšak pro velký počet řešení obtížněji zpracovatelné. Proto bylo nutné volit kompromis. Konkrétně zvolené hodnoty proměnných funkce (92) tvoří vektory hodnot proměnných o čtrnácti složkách. Konkrétně zvolené hodnoty parametrů funkce (92) tvoří vektory hodnot parametrů o dvou složkách. Vyšetření vlivu současné změny hodnot několika proměnných na změnu hodnoty prvku e herní matice nebylo tedy numericky provedeno pro neúměrný nárůst výpočtových variant a na možný vliv současné změny hodnot více proměnných bude dále usouzeno jen na základě analytického rozboru citlivosti. Pro analýzu je samozřejmě třeba znát také základní hodnoty prvku e_z herní matice, které zjistíme výpočtem funkční hodnoty funkce (92) pro základní hodnotu všech proměnných a pro každou zadanou hodnotu parametrů T_c a f.

Pro každý parametr modelu, tj. proměnnou i parametr funkce (92), bylo nutné určit:

- hodnotu základní,
- dolní mez,

- horní mez,
- zkoumané hodnoty.

Pro stanovení číselných hodnot byly jako základ vzaty údaje [10] získané statistickým zpracováním údajů ze záznamů rozvoden o provozu, údržbě a poruchách vypínačů 400 kV. Tyto údaje obsahují kromě základní hodnoty každého parametru i jeho horní a dolní mez. Tyto meze určují toleranční interval povolených hodnot. Jako zkoumané hodnoty parametrů byly vzaty jejich horní a dolní meze a několik dalších zvolených hodnot uvnitř tolerančního intervalu.

Pro vlastní analýzu byly sestaveny výpočtové varianty a pro ně vytvořena vstupní data tak, aby obsahovala zkoumané hodnoty jednotlivých parametrů v potřebných kombinacích. Byl proveden výpočet pro několik set variant vstupních dat programem VOSA 1. Výsledky byly zpracovány tabelárně a graficky.

5.4 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Ze zjištěných a zpracovaných výsledků je patrný značný vliv časového intervalu T_c na hodnotu prvku *e* herní matice. Tuto vlastnost modelu hodnotíme kladně, považujeme ji za žádoucí. Znamená to totiž, že nepříliš přesně stanovené ostatní parametry modelu nezmění vzájemné vztahy mezi prvky matice a tím nedojde ke změně pořadí výhodnosti strategií údržby lišících se časovými intervaly T_c.

Výsledky testovacích výpočtů ukázaly relativně malý vliv reálných parametrů poruchy. Je to důsledek malého počtu poruch N_o při dlouhé střední době mezi poruchami $\overline{T}_v$. Bude-li ve skutečnosti tato doba řádově kratší, může vliv parametrů poruchy značně vzrůst. Jestliže bude skutečná doba mezi poruchami řádově shodná s hodnotou použitou v testovaném souboru parametrů, lze pro určení optimální strategie údržby použít jednoprvkového, případně dvouprvkového seznamu poruch. Parametry jednoprvkového seznamu jsou potom určeny jako parametry libovolné poruchy – tj. ze statistického souboru všech možných poruch zařízení elektrizační soustavy daného druhu a typu. To je zřejmě snazší a schůdnější cesta, než určovat parametry každého typu poruchy zvlášť. Použije-li se v modelu jednoprvkový seznam poruch, dávají všechna použitá kritéria hodnocení herní matice týž výsledek. Užití jednoprvkového seznamu poruch ovšem podstatně snižuje využití možností vytvořených modelů a programů. Lze však doporučit tento postup: pro hrubý odhad optimální strategie údržby použít řešení modelu s jednoprvkovým seznamem poruch. Hodnoty parametrů poruchy nemusí být určeny příliš přesně. Jestliže hodnotové ukazatele výběru v seznamu strategií údržby seřazených podle výhodnosti jsou u jednotlivých strategií na začátku seznamu od sebe dosti vzdáleny (řádově desítky procent), lze výsledek považovat za dostatečně přesný. Při malých rozdílech hodnotových ukazatelů dvou po sobě následujících strategií lze očekávat od zpřesněného výpočtu změnu v pořadí výhodnosti a proto je třeba provést nový, zpřesňující výpočet. Při tomto výpočtu je už nutno pracovat s víceprvkovým seznamem poruch a přesněji zadanými parametry.

Výsledky testovacích výpočtů pro určení vlivu přesnosti hodnot parametrů modelu na přesnost hodnoty prvku *e* herní matice a rozbor výsledků umožňují rozdělit parametry modelu do tří skupin:

1) *Parametry mající velký vliv* na hodnotu prvku *e* herní matice a tedy podstatným způsobem mohou ovlivnit výběr optima. Je proto vhodné je určit pokud možno přesně, tj. ve shodě se skutečností.
   Do této skupiny můžeme zařadit:
   T_z, $\overline{T}_v$, $\overline{T}_u$, c_w, P_{vp}, K_{uc}, k_s při velkých T_c a T_z, P_{vu} je-li $\overline{T}_u > 0$, β je-li menší jak 1

2) *Parametry mající malý vliv* na hodnotu prvku e herní matice a proto stanovení těchto parametrů nemusí být zcela přesné, je možný jejich odhad.
Do této skupiny můžeme zařadit:
k_s, $\overline{T}_p$, ε_u, K_{pc}, β je-li větší jak 1

3) *Parametry mající zanedbatelný vliv* na hodnotu prvku e herní matice.
Do této skupiny můžeme zařadit:
p, ε_o, P_{vu} je-li $\overline{T}_u = 0$

Závěrem je třeba znovu podotknout, že výše uvedené poznatky a doporučení se opírají o základní hodnoty parametrů modelu a jejich meze uvedené v [10] pro vypínače 400 kV. Jiné hodnoty mohou zařazení parametrů změnit.

Výše uvedené zhodnocení výsledků se týká výsledků zjištěných pro matematický model M1. Závěry si všímají vlivu přesnosti „technických“ parametrů modelu M1 na přesnost výsledku, tj. průměrných ročních nákladů. Pro matematický model M2, pro jeho „technické“ parametry, platí stejné závěry. Model M2 má ještě „ekonomické“ parametry: úrokové procento p_a, druh úročení f_u, okamžik zahájení a ukončení integrace nákladů T_a a T_b a vztažný okamžik pro aktualizaci nákladů T_D. Tyto parametry mají jinou povahu než „technické“ parametry. Jsou předepsány či voleny bankou nebo provozovatelem zařízení elektrizační soustavy. Existuje jistě nesmírné množství kombinací hodnot těchto „ekonomických“ parametrů a výzkum jejich vlivu by byl zřejmě obtížný. Nebylo to ani cílem této práce.

6 OPTIMALIZACE STRATEGIE ÚDRŽBY KONKRÉTNÍHO ZAŘÍZENÍ

Optimalizace strategie údržby má smysl jen tehdy, lze-li vybírat z více odlišných strategií. Současný způsob údržby v praxi je dán provozními předpisy provozovatele zařízení (např. [15]), které respektují požadavky a doporučení výrobce zařízení a zkušenosti provozovatele zařízení s jeho provozem. Podle směru změny délky časového intervalu mezi údržbami se buď při zkrácení doby musí vynaložit vyšší náklady na četnější údržbu v rozporu s předpisem a přídělem finančních prostředků provozovatele, nebo se při prodloužení doby provozovatel vystavuje odpovědnosti za škody vzniklé vlivem zvýšené poruchovosti zařízení. To jsou argumenty směřující proti změnám daného stavu a proti optimalizaci.

Na druhé straně existují i vážné argumenty podporující optimalizaci. Vzhledem k velkému množství možností volby kombinací délek intervalů mezi údržbami nemusí být stav daný platnými předpisy optimem a nemusí být při něm dosaženo absolutního nebo alespoň lokálního extrému nákladových funkcí. Také obvyklá okrouhlost čísel předepsané délky intervalů mezi údržbami (1 rok, 2 roky, 5 let apod.) o tom svědčí.

Při optimalizaci strategie údržby konkrétního zařízení lze postupovat takto:

1. Shromáždění údajů o provozu, údržbě a poruchách co největšího počtu zařízení stejného druhu a typu.
2. Statistické zpracování souboru údajů a zjištění středních hodnot vstupních parametrů modelu.
3. Volba dostatečného počtu různých strategií údržby.
4. Příprava souboru vstupních dat a jeho zadání do programu.
5. Výpočet programem VOSA.
6. Výběr kritérií, tisk výsledků.
7. Vyhodnocení výsledků.
8. Výběr optimální strategie údržby.

9. Korekce stanovených lhůt podle dalších provozních hledisek a předpisů.
10. Zavedení nové strategie údržby zařízení do praxe.

Parametry nezbytné pro výpočet lze získat dlouhodobým sledováním všech zařízení stejného druhu a typu v síti v provozních podmínkách. Jako vstupní data výpočtu pro konkrétní zařízení se pak dosadí údaje získané z dlouhodobého sledování konkrétního zařízení nebo statisticky zpracované hodnoty získané od všech kusů téhož či podobného zařízení v síti.

V prvním případě mohou být výsledky výpočtu teoreticky přesnější, ale získání dostatečného množství údajů pro jedno zařízení je téměř nemožné, např. když je doba mezi poruchami řádově srovnatelná s fyzickou dobou života zařízení a když příslušné údaje nebyly mnoho let zpět sledovány.

Druhá možnost je zatížena určitou nepřesností díky tomu, že do statistického souboru se dostanou údaje od zařízení typově shodných, ale s nesrovnatelnými provozními režimy, které se svojí poruchovostí (např. pro výrobní vadu) vymykají běžnému stavu, čímž mohou ovlivnit výsledné hodnoty parametrů. Výhodou takového souboru dat je jeho obecnější platnost.

7 ROZŠÍŘENÁ OPTIMALIZACE STRATEGIE ÚDRŽBY KONKRÉTNÍHO ZAŘÍZENÍ

Tato kapitola je pouze úvahou o dalších možnostech zdokonalení v předchozích kapitolách této práce popsané metody optimalizace strategie údržby zařízení. Tato první metoda umožňuje optimalizovat provozní náklady zařízení optimalizací délek časových intervalů T_c mezi preventivními údržbami jejich zkracováním nebo prodlužováním a volbou pořadí a druhu údržby. Jde o časově závislou optimalizaci, v níž jsou poruchy v každém výpočtu pevně dány svými charakteristikami. Optimalizační algoritmus uzavírá zpětnovazební smyčku pomocí charakteristických veličin popisujících jednotlivé typy poruch. Hodnoty těchto veličin byly obvykle získány statistickým zpracováním souboru údajů o poruchách všech zařízení daného druhu a typu a odpovídají statisticky „průměrnému“ zařízení. Optimalizace strategie údržby konkrétního zařízení je potom provedena pro „průměrné“ zařízení s přihlédnutím k vlastnostem místa sítě, ve kterém konkrétní zařízení pracuje. Je-li zařízení málo poruchové, lze bez zvýšení nákladů na opravy poruch časový interval T_c prodloužit a naopak, je-li zařízení velmi poruchové, je třeba časový interval T_c zkrátit. V optimálním stavu dojde ke snížení provozních nákladů v obou případech. V prvním díky úsporám za zbytečně častou údržbu, v druhém díky úsporám za zbytečně časté opravy poruch.

Výrazným zlepšením výše popsané první metody může být zavedení další zpětné vazby do optimalizačního algoritmu pomocí veličin, jejichž hodnoty byly získány na základě diagnostiky (vyšetřování pomocí měření a zkoušek) a monitoringu (sledování a prohlídky) konkrétního zařízení. Tato druhá metoda je závislá na diagnostikovaném (skutečně zjištěném) stavu zařízení.

Rozšířená optimalizace strategie údržby vznikne spojením obou metod, tj. časově závislé optimalizace s optimalizací závislou na diagnostikovaném stavu zařízení, v jednom matematickém modelu a v algoritmu jeho řešení, který by měl dovolit:

1) optimalizovat strategii údržby v závislosti na čase pro statisticky „průměrné“ zařízení daného druhu a typu s přihlédnutím k vlastnostem místa sítě, ve kterém zařízení pracuje. Řešení této problematiky bylo již dříve v práci dostatečně popsané.
2) optimalizovat strategii údržby v závislosti na diagnostikovaném stavu konkrétního zařízení, zjištěného na základě jeho diagnostiky a monitoringu. Diagnóza by byla dalším vstupním údajem, ovlivňujícím optimalizaci strategie údržby. Předpokládaný matematický model rozšířené optimalizace strategie údržby a algoritmus jeho řešení by měl na základě výsledků diagnostiky umožnit:

a) změnit statistickou střední poruchovost stanovenou pro statisticky „průměrné“ zařízení, tj. změnit hodnoty charakteristických veličin popisujících jednotlivé typy poruch (parametr rozložení β, střední dobu mezi poruchami $\overline{T}_v$, součinitele stárnutí zařízení k_s atd.).
b) v případě, že je zařízení v bezvadném stavu, znovu provést časově závislou optimalizaci strategie údržby s upravenými hodnotami charakteristických veličin jednotlivých typů poruch. Časové intervaly T_c mezi údržbami se zřejmě prodlouží a volba pořadí a druhů údržby zůstanou zachovány.
c) v opačném případě, když diagnóza ukáže na závadu nebo blížící se poruchu, musí rozhodovací algoritmus doporučit provozovateli zařízení druh činnosti, který má provést. Nabízí se řada možností. Například:
   - zachovat dosavadní strategii údržby a závadu odstranit při nejbližší plánované údržbě,
   - znovu provést časově závislou optimalizaci strategie údržby s upravenými hodnotami charakteristických veličin jednotlivých typů poruch. Časové intervaly T_c mezi údržbami se zřejmě zkrátí a volba pořadí a druhu údržby, stejně jako jejich četnost, se změní.
   - aplikovat „rozšířené“ měření na tomtéž zařízení,
   - aplikovat „základní“ měření na jiných zařízeních stejného druhu, typu a generace (původu),
   - vyčkat m měsíců a pak provést opravu zařízení,
   - okamžitá oprava zařízení,
   - výměna zařízení.

3) optimalizovat strategii diagnostiky, tj. rozčlenit diagnostické metody na základní a rozšířené a stanovit rozhodovací algoritmus pro jejich výběr a četnost. Některé diagnostické metody jsou natolik finančně nebo časově náročné, že je nelze aplikovat na všechna zařízení sériově a v krátkých časových intervalech.V krajním případě by totiž mohlo dojít k tomu, že dokonalá diagnóza bude dražší než případné opravy poruch, před nimiž má být zařízení chráněno.
   Často existuje možnost rozpoznat skutečný stav zařízení jednoduššími metodami s levnějším přístrojovým vybavením apod. Takové metody mají méně průkazné výsledky, jsou méně přesné a spolehlivé, ale vzhledem k jejich jednoduchosti a láci je lze užít jako „prvosledové“, základní metody. Základní metody jsou dostatečně průkazné, jsou-li příznaky blížící se poruchy nebo vzniklé závady jednoznačné.
   Teprve při pochybnostech o možnosti vzniku závažné poruchy se vyplatí nasadit „druhosledový“ rozšířený scénář. Rozšířené metody poskytnou za vyšší cenu vyšší stupeň jistoty o skutečném stavu zařízení.
   Jde o výběr způsobu prokládání a volby časových intervalů mezi zjišťováním stavu sledovaného zařízení. Prokládáním se rozumí způsob střídání různých vyšetřovacích a sledovacích metod během života zařízení. Je to úloha formálně podobná optimalizaci strategie údržby, jak o ní byla naposledy řeč v úvodu této kapitoly. Proto i způsob řešení může být podobný. Nabízí se možnost optimalizovat pomocí součtu nákladů na diagnostiku s monitoringem a nákladů na opravy poruch. Optimální strategie diagnostiky musí mít tento součet nákladů ze všech navržených strategií minimální a menší než náklady na opravu poruch.
4) optimalizovat fyzickou dobu života zařízení, tj. určit zbytkovou dobu života zařízení s přihlédnutím k vlivu rozdílných nákladů na provoz starého a nového zařízení a k vlivu pořizovací ceny nového zařízení. Jde o odhad doby, po kterou ještě zařízení může zůstat v provozu bez výrazného nárůstu četnosti poruch a jejich oprav a bez prudkého zvýšení četnosti nezbytných údržeb. Stanovení zbytkové doby života zařízení souvisí zejména se stanovením trendu jeho poruchovosti podle statistického rozboru skutečné poruchovosti a výsledků předchozích diagnostických zkoušek. Jde o extrapolaci regresních funkcí faktické poruchovosti sledovaného zařízení a faktické dlouhodobé změny technických parametrů

sledovaného zařízení, vyplývající z výsledků opakované diagnostiky. Po určení trendu poruchovosti lze stanovit provozní náklady zařízení, o němž předpokládáme, že je již amortizované. Jeho zbytkovou dobu života chceme určit vzhledem k roku t_1 jeho života v síti. Za tím účelem předpokládejme v tomto roce jeho náhradu novým zařízením.

Pro nové zařízení musíme určit rovněž jeho provozní náklady, k čemuž potřebujeme znát jeho poruchovost. Tu by musel zřejmě zadat jeho výrobce a to pouze jako predikovanou, zejména tehdy, pokud zařízení v síti ještě nikdy nepracovalo. U nového zařízení je třeba ještě zohlednit vliv jeho pořizovací ceny např. formou ročních odpisů, které bychom museli k jeho provozním nákladům přičíst. V roce t_2, kdy by součet těchto nákladů byl menší než provozní náklady starého zařízení, by bylo efektivní provést jejich výměnu. Velmi přibližně, při zanedbání provozních nákladů nového zařízení, lze říci, že to bude rok, ve kterém provozní náklady starého zařízení budou vyšší než odpisy nového zařízení.

Zbytkovou dobou života starého zařízení by byla doba $\Delta t = t_2 - t_1$, stanová na základě ekonomického rozboru efektivnosti náhrady starého zařízení zařízením novým.

8 ZÁVĚR

V práci byl vytvořen matematický model M1, který ke stanovení optimální strategie údržby používá jako kriteriální veličinu průměrné roční náklady na údržbu, opravy poruch a škody způsobené přerušením dodávky elektrické energie vlivem údržeb a poruch. Po algoritmizaci rovnic tohoto modelu byl sestaven výpočetní program VOSA 1.

Dále byl vytvořen matematický model M2, který ke stanovení optimální strategie údržby používá jako kriteriální veličinu aktualizované náklady na údržbu, opravy poruch a škody způsobené přerušením dodávky elektrické energie vlivem údržeb a poruch. Tyto náklady lze určit za libovolně zvolenou dobu (část nebo celou dobu života) a aktualizaci je možné provést k libovolně zvolenému vztažnému okamžiku. Algoritmizací rovnic tohoto modelu vznikl výpočetní program VOSA 2.

Praktické výpočty potvrdily funkčnost obou modelů i programů na nich založených. Oba modely respektují vzájemně se prolínající provádění různých druhů údržeb a umožňují volit různé délky časových intervalů mezi nimi. Oba programy jsou schopny řešit strategie údržby složené až ze třiceti různých druhů údržeb. U každého druhu lze volit až třicet různých délek časových intervalů předcházejících údržbě, což je až devět set kombinací: druh údržby – délka intervalu. Pořadí a druh údržby lze libovolně kombinovat. Dá se vytvořit strategie opakující se v cyklech, kdy se v každém cyklu střídá pravidelně několik druhů údržby, ale dá se také vytvořit strategie zcela obecná, u níž se za dobu života zařízení nezopakuje tentýž druh údržby po stejné době ani jednou. Podobně jako druhů údržby lze zadat až třicet různých typů poruch. Programů lze využít k optimalizaci strategie údržby konkrétních elektroenergetických zařízení v elektrizační soustavě.

Dále byl zjištěn vliv přesnosti hodnot parametrů modelu M1 na přesnost hodnoty prvku herní matice, tj. na přesnost průměrných ročních nákladů, pro vypínače 400 kV. Těchto výsledků lze využít při zjišťování parametrů modelů potřebných při sestavování vstupních dat pro výpočet v případě optimalizace jejich strategie údržby.

V závěru práce je naznačena možnost dalšího rozvoje a zdokonalení uvedené metody optimalizace strategie údržby konkrétního elektroenergetického zařízení vytvořením dalšího matematického modelu pro tzv. rozšířenou optimalizaci strategie údržby.

Praktická aplikace metody optimalizace strategie údržby je v habilitační práci ukázána na dvou příkladech.

9 SEZNAM LITERATURY

[1] Angot, A.:Užitá matematika pro elektrotechnické inženýry, SNTL, Praha, 1972

[2] Blažek, V., Javora, R., Skala, P., Slatinský, R.: Stanovení optimální strategie údržby energetických zařízení. Závěrečná zpráva projektu Grantové agentury České republiky č. 102/00/1038, Brno, 2001

[3] Blažek, V., Javora, R.: Economical Maintenance of Power Devices. Proceedings of the 9th International Expert Meeting „Power Engineering 2000“, Vol. B, pp. 215 to 219. United Nations Economic Commission for Europe, Maribor, 2000, ISBN 86-435-0326-6

[4] Blažek, V., Javora, R.: Efficiency of Replacement of Power Devices Installed in Distribution Networks Prior to the Final Date of their Technical Service Life. Příspěvek je uložen na CD-ROM: 16th International Conference on Electricity Distribution CIRED pod označením 3.16., Amsterdam, 2001, ISBN 0-85296-735-7

[5] Blažek, V., Javora, R.: Optimization of Maintenance Works of Power Devices. Proceedings of the 11th International Conference on Electrical Drives and Power Electronics „EDPE 2000“, pp. 224 to 230, Dubrovnik, 2000, ISBN 953-6037-31-9

[6] Blažek, V., Javora, R.: Optimization of Maintenance Works of Power Devices by Using the Theory of Games. Proceedings of the Xth International Scientific Conference on Present-Day Problems of Power Engineering „APE ’01“, Vol. II, pp. 271 to 278, Gdansk-Jurata, 2001, ISBN 83-909885-1-8

[7] Blažek, V.: Optimization of maintenance works on electric drives and its manifestation in power station’s internal consumption. Proceedings of the 13th International Conference on Electrical Drives and Power Electronics „EDPE ´99“, pp. 447-453. High Tatras, Slovakia, 1999, ISBN 80-88922-06-2

[8] Blažek, V.: Optimization of the maintenance works of power devices. Sborník přednášek z IX. mezinárodní vědecké konference „Elektroenergetika `98“, str. 181-183. Vysoké Tatry – Stará Lesná, 1998, ISBN 88786-88-6

[9] Calabro, S. R.: Základy spolehlivosti a jejich využití v praxi, SNTL, 1965

[10] Dopis EGÚ Brno, a.s. ze dne 1. 11. 1995, Brno, 1995

[11] Klíma, J.: Optimalizace v energetických soustavách, Academia, Praha, 1985

[12] Kreul, J., Werner, F., Gumz, T.: Bericht zur Forshungsaufgabe „Prozessführung in EE – Systemen – Sekundärtechnik – Instandhaltung“, Institut für Energieversorgung Dresden, Dresden, 1976

[13] Maňas, M.: Teorie her a optimální rozhodování, SNTL, Praha, 1974

[14] Rektorys, K.: Přehled užité matematiky, SNTL, 1963

[15] Řád preventivní údržby zařízení přenosové soustavy. Účinnost od 25. 3. 1998, ČEZ-DPS Praha, Praha, 1998

[16] Vastl, J. a kol.: Řízení výrobních systémů, skriptum ČVUT FEL v Praze, Praha, 1990

[17] Zapletal, J.: Základy počtu pravděpodobnosti a matematické statistiky, skriptum VUT FEI v Brně, PC-DIR, Brno, 1995, ISBN 80-214-0711-5

Abstract

The habilitation work deals with the generation of the M1 mathematical model, used to determine the optimum maintenance strategy, in which as criterion the quantities such as the average annual costs on maintenance, the remedy of failures and damages caused by the interruption of power supply due to maintenance works and failures, are taken. Using an algorithm on the equations of the model the VOSA 1 computation program was composed.

Furthermore, the M2 mathematical model was created, using the quantities such as the present worth of costs on maintenance, for the remedy of failures and damages caused by the interruption of power supply due to maintenance works and failures as the criterion. These costs can be determined for a time period chosen at discretion (a part or the whole service life), with costs updating to be carried out at any reference time also chosen at one's own discretion. Also using algorithms on the equations of the model the VOSA 2 computation program was composed.

As a means for the generation of mathematical models the theory of games and the probability theory was chosen. The theory of games served for the computation of "winnings" to the maintenance man, against whom the coincidence was playing. The probability theory is then used for the enumeration of the number of failures and their consequences. The maintenance man chooses various maintenance strategies, by changing the kind of maintenance activity and the time interval between such maintenance activities. On the other hand, the coincidence may affect the game by choosing various types of failures, taking place at random and with some specific probability. The specific maintenance strategies differ one from the other only in the volume of costs to be disbursed at each specific strategy. The best strategy is that one in which the smallest loss is achieved by the maintenance man, which means the least efforts/costs to be expended at keeping the devices in operation.

As a method to solve the mathematical models the numerical method was chosen. The portrayal of each model was put together in form of a program which makes the transformation of the set of entry data with the description of strategies chosen, and the transformation of parameters of the cost functions coupled with the description of potential failures of the equipment, into a matrix of games in which the corresponding matrix elements represent the average annual costs (or the present worth of costs identified for a chosen period) to be expended on separate maintenance strategies and for all the specified kind of failures. Another transformation produces an arranged set of average annual costs (or the present worth of costs identified for a chosen period), with weighed implementation of various types of failures, in accordance with the kind of selection criterion chosen. The numerical computation of the mathematical model was done using computers. Practical computations have confirmed the functioning of both models and the programs based on them. Both the computation programmes may be used for the optimization of maintenance strategy implemented with power equipment actually installed in the power system.

Also the effect of accuracy of the parameters of the M1 model on the accuracy of the value of an element of the matrix of games was identified, i.e. the accuracy of the average annual costs to be expended on the 400 kV switch breakers. These results may be used for the identification of the parameters of models which are necessary at the time of compilation of the input data when computing the optimization of the breaker's maintenance strategy.

The final chapter suggests the possibility of further development and improvement of the above maintenance strategy optimization method for actual power equipment, by generating another mathematical model for the so called "extended optimization of maintenance strategy".

The practical application of the maintenance strategy optimization method in the habilitation work is shown at two examples.

I want to express my thanks to the Grant Agency of the Czech Republic for providing the means for the project No. 102/00/1038, dealing with the same scope of topics and thanks to which this habilitation work could come about.