

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A
ROBOTIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND
ROBOTICS

SPOLEHLIVOST TECHNICKÝCH SYSTÉMŮ

RELIABILITY OF TECHNICAL SYSTEMS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. RADEK PAŘIL

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. MILOŠ HAMMER, CSc.

BRNO 2009

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky

Akademický rok: 2008/2009

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Radek Pařil

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Konstrukce strojů a zařízení (2302T010)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Spolehlivost technických systémů

v anglickém jazyce:

Reliability of technical systems

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Diplomová práce je zaměřena na spolehlivost technických systémů, konkrétně elektrických strojů točivých, které nacházejí uplatnění v energetice. Je rozebrána jejich diagnostikovatelnost, a to s důrazem na popis v praxi využívaných diagnostických metod. Důraz je kladen na rozbor výsledků z provozních měření na reálných elektrických strojích.

Cíle diplomové práce:

Cílem práce je rozbor diagnostikovatelnosti a spolehlivosti elektrických strojů točivých z průmyslové energetické praxe.

Seznam odborné literatury:

HAMMER,Miloš: Metody umělé inteligence v diagnostice elektrických strojů.1.vydání.Praha: BEN-technická literatura,2009.410 s.
ISBN 978-80-7300-231-2.

MYKYSKA,Antonín: Bezpečnost a spolehlivost technických systémů.2. přepracované vydání.
Praha: Nakladatelství ČVUT,2006. 206 s.
ISBN 80-01-02868-2.

MENTLÍK,Václav aj. Diagnostika elektrických zařízení.1.vydání.Praha: BEN-technická literatura,2008,440 s.
ISBN 978-80-7300-232-9.

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Miloš Hammer, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2008/2009.

V Brně, dne 1.12.2008

L.S.

Ing. Petr Blecha, Ph.D.
Ředitel ústavu

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

Abstrakt:

Tato diplomová práce je zaměřena na rozbor diagnostikovatelnosti a spolehlivosti elektrických strojů točivých z průmyslové energetické praxe. Jsou zde rozebrány diagnostické metody, které se využívají v praxi. Dále je proveden rozbor výsledků z provozních měření na reálných elektrických strojích.

Abstract:

The diploma thesis is focused on the analysis of reliability and diagnostics of the electric rotary machines originated in industrial energetic practice. There are diagnostic methods in the diploma thesis having been used in practice and analysis of measurement results of the functional measurement on the real electric machines.

Klíčová slova:

diagnostika, spolehlivost, údržba, bezporuchovost, udržitelnost, životnost, opravitelnost, technický systém

Key words:

Diagnostics, reliability, maintenance, failure-free operation, maintainability, durability, reparability, technical system

PAŘIL, R. *Spolehlivost technických systémů*, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 50 s. Vedoucí diplomové práce Doc. Ing. Miloš Hammer, CSc.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: Spolehlivost technických systémů vypracoval samostatně, na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a s použitím odborné literatury.

V Brně dne 29.5.2009

.....
Bc. Radek Pařil

Poděkování:

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Miloši Hammerovi, CSc. za jeho odborné vedení a poskytnutí konzultací, včetně podkladových materiálů pro úspěšné vypracování diplomové práce na téma: Spolehlivost technických systémů.

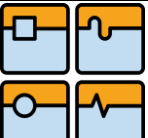
V Brně dne 29.5.2009

.....
Bc. Radek Pařil

OBSAH DIPLOMOVÉ PRÁCE:

1 SPOLEHLIVOST	3
1.1 Obecné principy zajišťování spolehlivosti	3
1.1.1 Vymezení a obecná východiska	3
1.1.2 Odpovědnost ve vztahu ke spolehlivosti	3
1.1.3 Základní definice	4
1.2 Spolehlivost technických objektů	5
1.2.1 Východiska zkoumání spolehlivosti	5
1.2.2 Porucha, poruchový stav	5
1.2.3 Východiska kvantifikace poruchy	7
1.3 Spolehlivost technických systémů	8
1.3.1 Specifikace požadavků na spolehlivost	9
1.3.2 Charakteristika analýz rizik a spolehlivosti	10
1.4 Provozní spolehlivost	11
1.4.1 Údržba a její zajištění	12
1.4.2 Sběr dat pro hodnocení spolehlivosti	13
1.4.3 Zkoušky spolehlivosti	15
2 DIAGNOSTIKA	18
2.1 Současná diagnostika	18
2.2 Diagnostický objekt	18
2.3 Diagnostika elektrických strojů	19
2.4 Diagnostika velkých točivých elektrických strojů	20
2.5 Diagnostické metody	20
2.5.1 Vizuální kontrola statorového vinutí	21
2.5.2 Měření izolačního odporu a výpočet polarizačního indexu statorového vinutí	21
2.5.3 Měření izolačního odporu a výpočet polarizačního indexu rotorového vinutí	22
2.5.4 Měření napěťové závislosti izolačního odporu na stejnosměrném napětí	22
2.5.5 Měření kapacity, ztrátového činitele $\tan \delta$ a výpočet časové konstanty statorového vinutí	23
2.5.6 Měření částečných výbojů statorového vinutí galvanickou metodou	24
2.5.7 Zkouška statorového vinutí střídavým napětím 50 Hz	24
2.5.8 Zkouška statorového napětí stejnosměrným napětím	24
2.5.9 Zkouška statorového vinutí napětím velmi nízkého kmitočtu	25
2.5.10 Zkouška závitové izolace statorového vinutí proudovými impulsy	25
2.6 Hydroalternátor	25
3 DATOVÝ SOUBOR	27
3.1 Hydroalternátor EŠT-TG1	27
3.1.1 Izolační odpor statoru TG1	27
3.1.2 Nabíjecí proudy statoru TG1	28
3.1.3 Polarizační index TG1	30
3.1.4 Ztrátový činitel TG1	31

3.2 Hydroalternátor EŠT-TG2.....	32
3.2.1 Izolační odpor statoru TG2.....	33
3.2.2 Nabíjecí proudy statoru TG2.....	34
3.2.3 Polarizační index TG2.....	36
3.2.4 Ztrátový činitel TG2.....	37
3.3 Hydroalternátor EŠT-TG3.....	38
3.3.1 Izolační odpor statoru TG3.....	38
3.3.2 Nabíjecí proudy statoru TG3.....	39
3.3.3 Polarizační index TG3.....	41
3.3.4 Ztrátový činitel TG3.....	42
4 ZHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ.....	43
4.1 Parametry použitých strojů.....	43
4.2 Určování teplotní odolnosti izolantů.....	43
4.3 Popis vlastností hydroalternátoru TG1.....	44
4.4 Popis vlastností hydroalternátoru TG2.....	45
4.5 Popis vlastností hydroalternátoru TG3.....	47
4.6 Závěr.....	48
Seznam použitých zdrojů.....	50

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 3
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

1 SPOLEHLIVOST

1.1 OBECNÉ PRINCIPY ZAJIŠŤOVÁNÍ SPOLEHLIVOSTI

1.1.1 VYMEZENÍ A OBECNÁ VÝCHODISKA

Z hlediska obecné jakosti ve smyslu schopnosti uspokojovat splnění požadavků jsou dominantní vlastnosti (jakostní znaky) - funkčnost, bezpečnost a spolehlivost [1]. Požadavky na jakost jsou dány smluvními vztahy, ale v řadě případů závazné, vyplývající z právních předpisů. Tento případ se týká zejména bezpečnosti, kdy stát pomocí právních předpisů formuluje požadavky na výrobky, procesy a systémy, aby chránil své obyvatelstvo tak, aby rizika poškození zdraví osob, životního prostředí nebo materiálových ztrát byla omezena na přijatelnou úroveň. Obsah termínu spolehlivost se vyvíjel a je chápán v širším a užším pojetí. Spolehlivost v širším pojetí je chápána jako stálost užitných vlastností objektu po stanovenou dobu a za stanovených podmínek užívání. Takto obecně chápáná spolehlivost se v jednotlivých konkrétních příkladech vyjadřuje dílčími vlastnostmi – životností, bezporuchovostí, udržitelností, zajištění údržby, skladovatelností, provozní bezpečností atd., a jejich kombinacemi např. pohotovostí, operační pohotovostí, technickým využitím apod.. Spolehlivost je podle norem ČSN EN ISO 9000 a ČSN IEC 50(191) definována jako souhrnný termín používaný pro popis pohotovosti a činitelů, které ji ovlivňují: bezporuchovost, udržitelnost a zajištění výroby.

Je třeba zdůraznit, že vymezení bezpečnosti a spolehlivosti objektů je vždy úzce vázáno na vymezení jejich požadovaných funkcí pro stanovené podmínky užívání a stanovenou dobu. Spolehlivost se zabývá studiem, kvalitativními i kvantitativními charakteristikami a ovlivňováním těch znaků jakosti, které se mění s časem, a celým souborem konstrukčních, technologických a provozních opatření, která schopnost plnit požadované funkce ovlivňují. To zjednodušeně vyjadřuje, že spolehlivost se zabývá jakostí v čase. Obecným východiskem řešení problematiky spolehlivosti je vyjádřit ztrátu jejich schopnosti plnit požadované funkce při jejich užívání a následků, které to vyvolá (výskyt poruchy, kritické poruchy, mezního stavu atd.), a to za stanovených podmínek a po stanovenou dobu.

1.1.2 ODPOVĚDNOST VE VZTAHU KE SPOLEHLIVOSTI

Odpovědnost ve vztahu ke spolehlivosti není jen záležitostí výrobců, ale je sdílena i zákazníky [1]. Výrobce obecně zodpovídá za stanovení požadavků na bezpečnost a spolehlivost pro stanovené podmínky a dobu užívání, jejich vkonstruování do návrhu či projektu, dále za inherentní bezpečnost, životnost, bezporuchovost atd. realizovanou během výrobních etap, za stanovení politiky údržby a podstatnou měrou za zajištění údržby jak po poruše, tak preventivní. Zákazník má obecně odpovědnost především za dodržování stanovených podmínek užívání, tj. zejména provozních podmínek – zatížení, namáhání, podmínky prostředí. Dále za zacházení, za kvalifikovanost obsluhy a za zajištění preventivní údržby.

1.1.3 ZÁKLADNÍ DEFINICE

SPOLEHLIVOST – Obecný termín vyjadřující stálost funkčních a dalších vlastností objektu během jeho používání za stanovených podmínek.

BEZPEČNOST – Vlastnost objektu při plnění požadovaných funkcí být ve stavu, ve kterém je riziko ohrožení zdraví, života osob, životního prostředí nebo poškození majetku omezováno na přijatelnou úroveň.

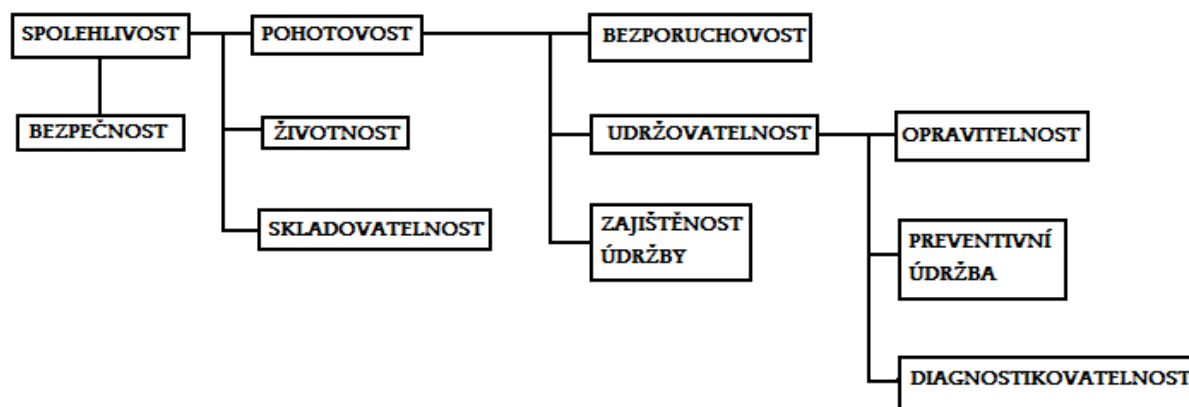
ŽIVOTNOST – Schopnost objektu plnit požadovanou funkci v daných podmínkách používání a údržby do mezního stavu, který lze charakterizovat ukončením užitečného života, nevhodností z důvodů ekonomických, technických nebo jinými závažnými faktory.

POHOTOVOST – Schopnost objektu být ve stavu schopném plnit požadovanou funkci v daných podmínkách, vdaném časovém intervalu za předpokladu, že jsou zajištěny požadované vnější prostředky.

BEZPORUCHOVOST – Schopnost objektu plnit bez poruchy požadovanou funkci v daných podmínkách a v daném časovém období.

UDRŽOVATELNOST – Schopnost objektu v daných podmínkách používání setrvat ve stavu nebo se vrátit do stavu, v němž může plnit požadovanou funkci. Jestliže se údržba provádí v daných podmínkách a používají se stanovené prostředky a postupy.

ZAJIŠTĚNOST ÚDRŽBY – Schopnost organizace poskytující údržbářské služby zajišťovat dle požadavků v daných podmínkách prostředky potřebné pro údržbu.



Obr. 1. Vymezení spolehlivosti [1]

1.2 SPOLEHLIVOST TECHNICKÝCH OBJEKTŮ

1.2.1 VÝCHODISKA ZKOUMÁNÍ SPOLEHLIVOSTI

Výchozím krokem řešení problematiky spolehlivosti každého konkrétního objektu je vymezení chápání jeho spolehlivosti a posouzení rizik nebezpečných událostí, které mohou ohrozit oprávněné zájmy [1].

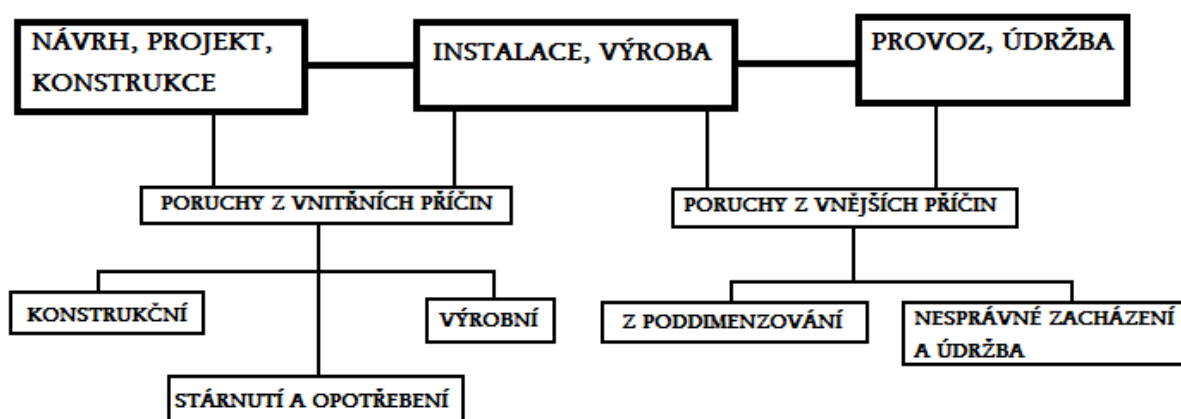
Řešení problematiky spolehlivosti objektu začíná vždy vymezením jeho spolehlivosti, tj. vyjádřením ztráty schopnosti plnit požadované funkce pro stanovené podmínky provozu. V dalších krocích se pak uplatňují dva vzájemně se prolínající přístupy zkoumání.

KVALITATIVNÍ – Spočívající ve vymezení spolehlivosti souboru objektů téhož typu ve vazbě na studium a analýzu příčin, druhů, způsobů, projevů a důsledků poruch a analýze možností předcházet jim nebo odstraňovat jejich příčiny a následky.

KVANTITATIVNÍ – Pracuje s použitím číselných vyjádření, pomocí ukazatelů umožňuje formulovat kvantitativní požadavky a ověřovat, prokazovat je v předvýrobních etapách v podobě předpovědí, v povýrobních etapách v podobě jejich zajištění inherentních a provozních hodnot.

Východisko řešení problematiky spolehlivosti lze tedy charakterizovat jako studium a zkoumání zákonitostí příčin vzniku poruch a poruchových stavů, jejich druhů, závislostí projevů a následků, možnosti jim předcházet, a to v závislosti na množině náhodných vlivů působících na objekt ve všech etapách jeho životního cyklu.

1.2.2 PORUCHA, PORUCHOVÝ STAV



Obr. 2. Vymezení poruchy [1]

Porucha je jev, spočívající v ukončení schopnosti objektu plnit požadovanou funkci [1]. Objekt po poruše je v poruchovém stavu. Poruchový stav je takový stav objektu charakterizovaný jeho neschopností plnit požadovanou funkci s výjimkou

neschopnosti během preventivní údržby nebo jiných plánovaných činností nebo způsobených nedostatkem vnějších prostředků např. elektrické energie.

Vymezení, kvalitativní a následně i kvantitativní hodnocení spolehlivosti objektů se provádí na základě analýzy požadované funkční činnosti objektu pro stanovené podmínky užívání v závislosti na množině náhodných vlivů, které působí na objekt. Zpravidla se vyjadřují požadované funkce objektu v podobě pozorovatelných znaků, parametrů a charakteristik a zkoumají se jejich závislosti na možných mechanismech poruch a dalších možných příčinách ztráty schopnosti plnit požadovanou funkci.

KRITÉRIUM PORUCHY – Vyjadřuje ztrátu schopnosti objektu plnit požadovanou funkci pomocí souhrnu pozorovatelných znaků, parametrů a charakteristik a požadavků na ně. Pro daný objekt má být součástí jeho technické specifikace.

MECHANISMUS PORUCHY – Je souhrn fyzikálních, chemických a dalších procesů vedoucích k poruše, tj. ukončení schopnosti plnit požadovanou funkci.

Tab. 1. Klasifikace poruchových stavů [1]

PORUCHOVÝ STAV	VYMEZENÍ
KRITICKÝ	Poruchový stav, o kterém lze soudit, že může způsobit úraz osob, značné materiální škody, nebo může mít jiné nepříjemné následky.
ZÁVAŽNÝ	Poruchový stav ovlivňující funkci pokládanou za zvlášť důležitou.
NEZÁVAŽNÝ	Poruchový stav neovlivňující žádnou funkci pokládanou za důležitou.

Další používaným hlediskem sloužícím ke klasifikaci poruch nebo poruchových stavů je hodnocení příčin vzniku poruch. Toto hledisko používáme především pro vyjasnění ve které fázi životního cyklu mají svůj původ a tedy kde je možné provést nápravná opatření k odstranění jejich příčin.

Nejčastější příčiny poruch:

PROCESY STÁRNUTÍ, OPOTŘEBENÍ A KOROZE – Nevratné procesy kumulace dílčích poškození, ubývání odolnosti a změny struktury materiálů. Tyto procesy vedou ke vzniku mezních stavů. Jsou to typické mechanismy poruch pro hodnocení životnosti objektů. Jejich důsledkem jsou poruchové stavy způsobené stárnutím a opotřebením. Projevují se jako poruchy postupné a částečné, jsou tedy nejčastější příčinou degeneračních poruch. Lze je očekávat na základě předchozího zkoumání nebo sledování a někdy jim lze předcházet pomocí preventivní údržby.

PŘETÍŽENÍ – Náhodná, krátkodobá přetížení u mechanických prvků s následkem poruchy typu křehký lom, u elektrotechnických prvků typu přerušení vodiče, zkrat atd..

VYBOČENÍ PARAMETRŮ PROSTŘEDÍ – Náhodné krátkodobé vybočení parametru prostředí mimo meze stanovené pro užívání objektu znamená jednu z typických příčin poruch způsobenou nesprávným používáním.

NEDOSTATKY – Rozlišujeme chyby a nedostatky vznikající při konstruování a projektování a chyby při výrobě a montáži.

NESTABILITA ZDROJŮ ENERGIE – Způsobuje obtíže u technických zařízení, které ke své činnosti potřebují napájení energií.

Tab. 2. Poruchy podle původu příčin a časového průběhu [1]

NÁZEV PORUCHY	VYMEZENÍ PORUCHY
konstrukční	Způsobená nesprávným návrhem, projektem nebo konstrukcí objektu.
výrobní	Způsobená neshodou výrobního provedení nebo určených výrobních postupů s návrhem objektu.
z poddimenzování	Způsobená poddimenzováním, slabostí objektu, jestliže je objekt vystaven namáhání v rámci stanovené způsobilosti.
stárnutí a opotřebení	Porucha, jejichž pravděpodobnost výskytu vzrůstá s časem jako důsledek vnitřních procesů objektu.
nesprávné použití	Porucha způsobená při namáháních překračující stanovenou způsobilost objektu.
nesprávné zacházení	Porucha způsobená nesprávným zacházením s objektem, nebo nedostatkem péče o objekt.
náhlá porucha	Porucha, která nemohla být očekávána na základě předchozího zkoumání a pozorování.
postupná porucha	Porucha způsobená postupnou změnou daných charakteristik objektu v čase.
trvalá porucha	Poruchový stav, který trvá do provedení údržby po poruše.
dočasná porucha	Poruchový stav, který má omezenou dobu, po jejíž uplynutí má znovu objekt schopnost plnit požadovanou funkci, aniž by byla provedena údržba po poruše.
úplná porucha	Porucha, která způsobí úplnou neschopnost objektu plnit všechny požadované funkce.
částečná porucha	Porucha, která způsobí neschopnost objektu plnit některé, nikoliv však všechny požadované funkce.

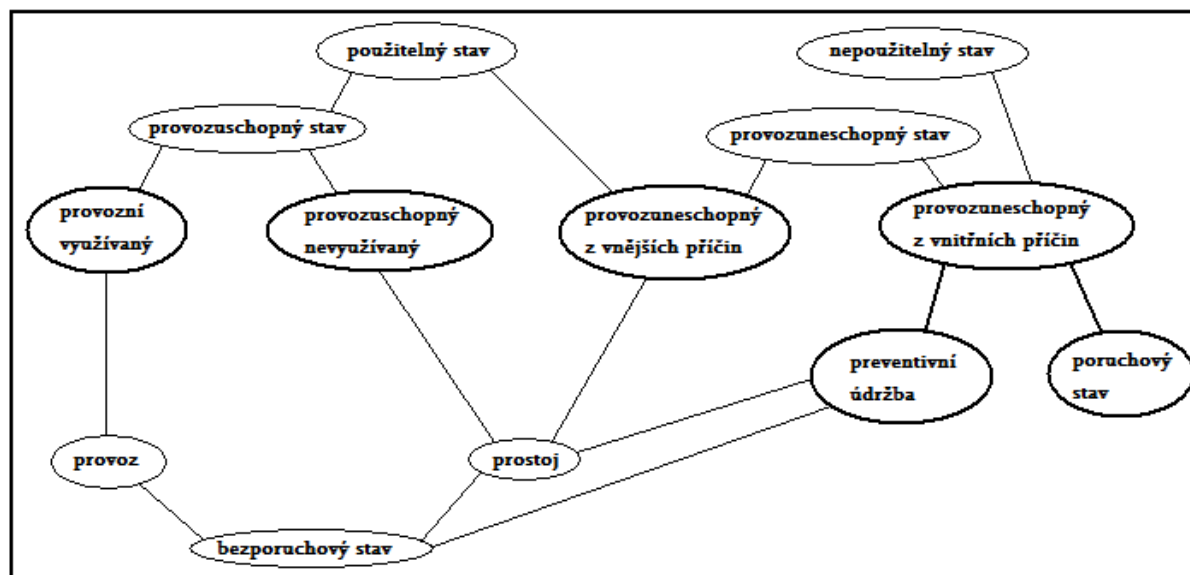
1.2.3 VÝCHODISKA KVANTIFIKACE PORUCHY

Při vymezení spolehlivosti objektu a následném určení požadavků na bezpečnost je nutné zvážit jejich plánované užívání jako opravované nebo

neopravované [1]. Neopravované objekty jsou určeny pro užívání jako neopravované, ale mohou být opravitelné i neopravitelné. Jedná se o objekty, které jsou po vzniku poruchy vyřazeny, protože jejich oprava není možná z ekonomických, provozních nebo jiných důvodů. U opravovaných objektů je po jejich poruše plánována oprava. Jsou chápány jako objekty s plánovanou údržbou po poruše během jejich používání. Mezi typické neopravované objekty patří elektronické součástky (odpory, tranzistory, kondenzátory, diody, integrované obvody, hybridní obvody), elektrotechnické součástky (vypínače, žárovky, pojistky), strojírenské konstrukční díly (šrouby, nýty, řemeny, ložiska) a složitější technická zařízení, u nichž obnova provozuschopnosti po poruše není možná z důvodu způsobu jejich využívání (družice, rakety, objekty z oblasti vojenství). Jako opravované objekty užíváme složitější technická zařízení, u nichž po vzniku poruchy při jejich užívání je plánována jejich obnova opravou nebo výměnou poškozeného dílu. U neopravovaných objektů se vymezuje jejich spolehlivost zejména jejich poruchovostí nebo životností, protože úplná porucha je jejich mezním stavem.

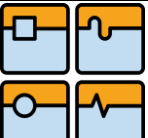
Po kvalitativním vymezení spolehlivosti následuje většinou kvantifikace, která umožňuje vyjádřit požadavky na spolehlivost číselně. Kvantifikace vymezené spolehlivosti spočívá ve volbě jejich číselných měr, které se nazývají ukazatele spolehlivosti. Kvantitativní vyjádření spolehlivosti je založeno na pravděpodobnostních modelech. Zkoumáme chování náhodných veličin a posloupností. V praxi rozlišujeme stavy objektů často podrobněji. Zkoumáme, zda se objekt nachází v provozuschopném nebo v neprovozuschopném, v použitelném nebo nepoužitelném stavu.

Obr. 3. Třídění stavů objektu



1.3 SPOLEHLIVOST TECHNICKÝCH SYSTÉMŮ

Objekty typu technických zařízení mají různou složitost a chápeme je většinou jako objekty, které jsou složené z funkčně vzájemně vázaných komponent [1]. Takovým objektům říkáme systémy a prvky. Systémem nazýváme souhrn vzájemně souvisejících nebo vzájemně působících prvků, v souvislosti se spolehlivostí pak se

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 9
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

stanoveným účelem, který je vyjádřen pomocí požadovaných funkcí a podmínek používání. Dále se budeme zabývat řešením problematiky spolehlivosti v předvýrobních etapách životního cyklu. To znamená v oblasti návrhu, konstrukce a vývoje. Realizování optimální spolehlivosti se dělí do tří hledisek. První je hledisko manažerské, zejména programy spolehlivosti a plány spolehlivosti – bezporuchovosti, udržitelnosti, programy oficiálního přezkoumání, programy stanovení nákladů životního cyklu, programy růstu bezporuchovosti atd. Druhé je hledisko technické, uplatnění vhodných metod analýz rizik a spolehlivosti, udržitelnosti a zajištění údržby, metod a postupů růstu bezporuchovosti a zkoušek spolehlivosti. Třetí je hledisko ekonomické, to realizuje program na stanovení nákladů životního cyklu. Význam systémového přístupu se výrazně zvyšuje, ale je uplatnění v praxi bývá podstatně složitější z důvodu vazeb na subdodavatele komponent systému a na budoucí uživatele.

1.3.1 SPECIFIKACE POŽADAVKŮ NA SPOLEHLIVOST

Protože spolehlivost, bezporuchovost, životnost atd. patří mezi základní znaky jakosti, které mají rozhodující vliv na uspokojení požadavků zákazníka, je jedním z výchozích kroků před zahájením vývoje projektu specifikovat požadavky na ně [1]. Obecné požadavky na spolehlivost jsou dány řadou právních předpisů a na ně navazujících norem, které musíme vždy pro daný technický systém dodržet. Dalším krokem k zajištění spolehlivosti bývá vypracování modelu přípustných a nepřípustných rizik, který navazuje na určité právní předpisy. Oblast nepřijatelných rizik musí být ošetřena v rámci uplatnění managementu rizik, což musí být prokázáno analýzou bezpečnosti a popřípadě odpovídajícími zkouškami.

V dnešní době je stále více důležitá nutnost navrhovat nebo projektovat systémy s předem specifikovanou spolehlivostí. Protože skutečně dosahovaná bezpečnost, životnost bezporuchovost, udržitelnost, zajištění údržby a pohotovost při užívání systému podstatně závisí na podmínkách provozu, musí být součástí specifikace spolehlivosti stanovení podmínek skladování, přepravy, instalace a užití, které se musí dodržet.

Znaky spolehlivosti stanovujeme takto:

SPECIFIKACE VYPRACOVANÉ VÝROBCEM – Používají se u systémů, u kterých se při přijetí na trh nevyžaduje, aby měly určité znaky spolehlivosti.

SPECIFIKACE VYPRACOVANÉ ZÁKAZNÍKEM – Používají se u systémů, které musí splňovat určité znaky na požadavky spolehlivosti (bezporuchovost, udržitelnost), aby uspokojily potřeby zákazníka.

SPECIFIKACE VZÁJEMĚ DOHODNUTÉ – Jsou to specifikace vypracované výrobcem i zákazníkem. Většinou se používají při realizaci systémů na zakázku nebo v případě změn jejich společného návrhu.

Požadavky na spolehlivost vyjadřujeme kvantitativně a to podle potřeb zákazníka nebo požití systému. Musí být realistické a musí se shodovat se současným stavem technologie. Použijeme-li dohodu mezi zákazníkem a

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 10
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

dodavatelem, musí požadavky na spolehlivost tvořit součást dohody, která je provedena společně i s dohodnutím metod a postupů ověřování. Zvlášť důležité je vždy přesně definovat systém (zařízení, u kterého budeme požadavky uplatňovat) a kritéria, na jejichž základě se bude spolehlivost a bezpečnost posuzovat. Výrobce je vždy zodpovědný za shodu systému s požadavky na spolehlivost, je nutné, aby věnoval pozornost formě vyjádření požadavků, opatřením pro zajištění údržby a metodám, které se používají pro posuzování požadovaných znaků. Na dosahovanou úroveň spolehlivosti mají vliv podmínky, za nichž je systém instalován a provozován, je proto nezbytnou součástí specifikace požadavků na spolehlivost vyjádření:

- Jeho zamýšlených funkcí a definice poruchového stavu. To znamená, co je podstatou poruchového stavu v tomto určitém systému při jeho zamýšleném použití.
- Jak bude instalován a jak se bude používat.
- Různých provozních podmínek a podmínek prostředí, za nichž bude systém používán. Pokud možno včetně doby strávené za těchto relativních podmínek.
- Povinností a zodpovědností zákazníka, dodavatele nebo jakýchkoliv dalších třetích stran.
- Postupů a metod určených k ověřování souladu s požadavky.
- Potřebných kvalifikací a zodpovědností pracovníků zodpovědných za provozování a údržbu výrobku.
- Politiky údržby, která se má uplatňovat, a příslušných postupů a opatření zajištění údržby. Úroveň zajištění údržby je velmi často dána podmínkami použití a nebývá vnitřním požadavkem samotného systému.

Ve specifikaci na bezpečnost a spolehlivost musí být upozornění na různé faktory, které pravděpodobně ovlivní náklady na bezpečnost, bezporuchovost, udržitelnost a spolehlivost. Patří sem očekávaná životnost, požadavky na recyklaci nebo likvidaci po ukončení technického života.

1.3.2 CHARAKTERISTIKA ANALÝZ RIZIK A SPOLEHLIVOSTI

Používají-li se v předvýrobních etapách kvantitativní analýzy, využívají se za situace, kdy systém ještě fyzicky neexistuje [1]. Všechny druhy výpočtů v době návrhu musíme provádět pomocí teorie pravděpodobnosti a výsledky mají tzv. predikční charakter, to znamená charakter předpovědi. Jde o předpovídání spolehlivosti dříve, než je systém realizován a uveden do provozu. Význam spočívá v poskytnutí předem určité záruky budoucím uživatelům, že systém bude z hlediska spolehlivosti vyhovovat. Dalším rysem výpočtů ukazatelů spolehlivosti systémů v období jejich návrhu je jejich iterační charakter. Jejich řešení je zpočátku založeno na velmi malém množství informací. Analýzy a výpočty mají zpočátku charakter orientačních odhadů. Tyto odhady umožňují posoudit, zda můžeme dosáhnout zadaných hodnot pro různé varianty návrhů technického řešení. A zároveň posouzení jejich efektivity z ekonomického hlediska. S postupem vývoje systému se informovanost zvyšuje, avšak možnosti změn v konstrukčním řešení pomocí přesnějších analýz spolehlivosti jsou stále složitější a nákladnější. Proto podrobné

hodnocení spolehlivosti provádíme v etapě postupného upřesňování návrhu s přechodem ke konečné struktuře projektovaného systému.

Analýzy spolehlivosti se provádějí většinou v etapách konstrukce, návrhu a vývoje. Můžeme je ale také provádět v etapě provozu a to na různých úrovních a stupních rozkladu systému na prvky. Výsledky analýz se porovnávají se specifikovanými požadavky. To nám umožňuje vyhodnotit kvalitativní charakteristiky a odhadnout ukazatele bezpečnosti, životnosti, bezporuchovosti atd. Tyto ukazatele popisují dlouhodobé provozní chování systémů pro stanovené podmínky užívání.



Obr. 4. Postup analýzy spolehlivosti

1.4 PROVOZNÍ SPOLEHLIVOST

Provozní spolehlivost je pojem, kterým se rozumí spolehlivost fyzicky zhotovených systémů [1]. Takovým systémům říkáme výrobky. Výrobky mohou být nejrůznější funkční složitosti, různě složitá technická zařízení, technické systémy, podsystemy, moduly, bloky, výrobní linky, stroje a jejich komponenty až po součástky. Problematika provozní spolehlivosti spočívá v jejím sledování, hodnocení a řízení. Má stránku manažerskou, motivační a technickou. V období užívání výrobku sleduje a hodnotí jeho schopnost plnit požadované funkce při užívání ke stanovenému účelu ve stanovených podmínkách a za stanovenou dobu. To znamená sledovat a hodnotit její spolehlivost. Výsledky sledování a hodnocení se

použijí k řídicím zásahům s cílem dosáhnout maximální ekonomickou efektivnost nebo maximální úroveň spolehlivosti.

Podmínky užívání jsou významnou okolností určující provozní spolehlivost. Uživatel nebo provozovatel výrobku má odpovědnost za správné zajištění správného způsobu užívání, podmínek prostředí a za realizaci koncepce údržby. Tato koncepce má mimořádnou úlohu při zajištění provozní spolehlivosti a popisuje vztahy mezi místy údržby a stupni údržby, které mají být pro jeho údržbu použity

Požadavky na spolehlivost výrobků, mají význam, jestliže je lze prokázat a ověřit jejich plnění a z jejich případného neplnění vyvozovat důsledky, opatření k nápravě a postihy. Sledování a hodnocení skutečně dosahované úrovně bezporuchovosti je nedílnou součástí managementu spolehlivosti v rámci systému jakosti, případně programu nebo plánu spolehlivosti. Systémové a koncepční řešení problematiky hodnocení spolehlivostních vlastností výrobků ve skutečných podmínkách užívání vyžaduje návrh a realizaci potřebného sběru, přenosu, zpracování a využívání dat pomocí informačního systému spolehlivosti, který se realizuje v návaznosti na informační systém organizace podniku. V současné době používáme k jeho realizaci prostředků výpočetní techniky, vhodného softwaru a v řadě případů i s nutností automatického měření a předzpracování primárních údajů.

1.4.1 ÚDRŽBA A JEJÍ ZAJIŠTĚNOST

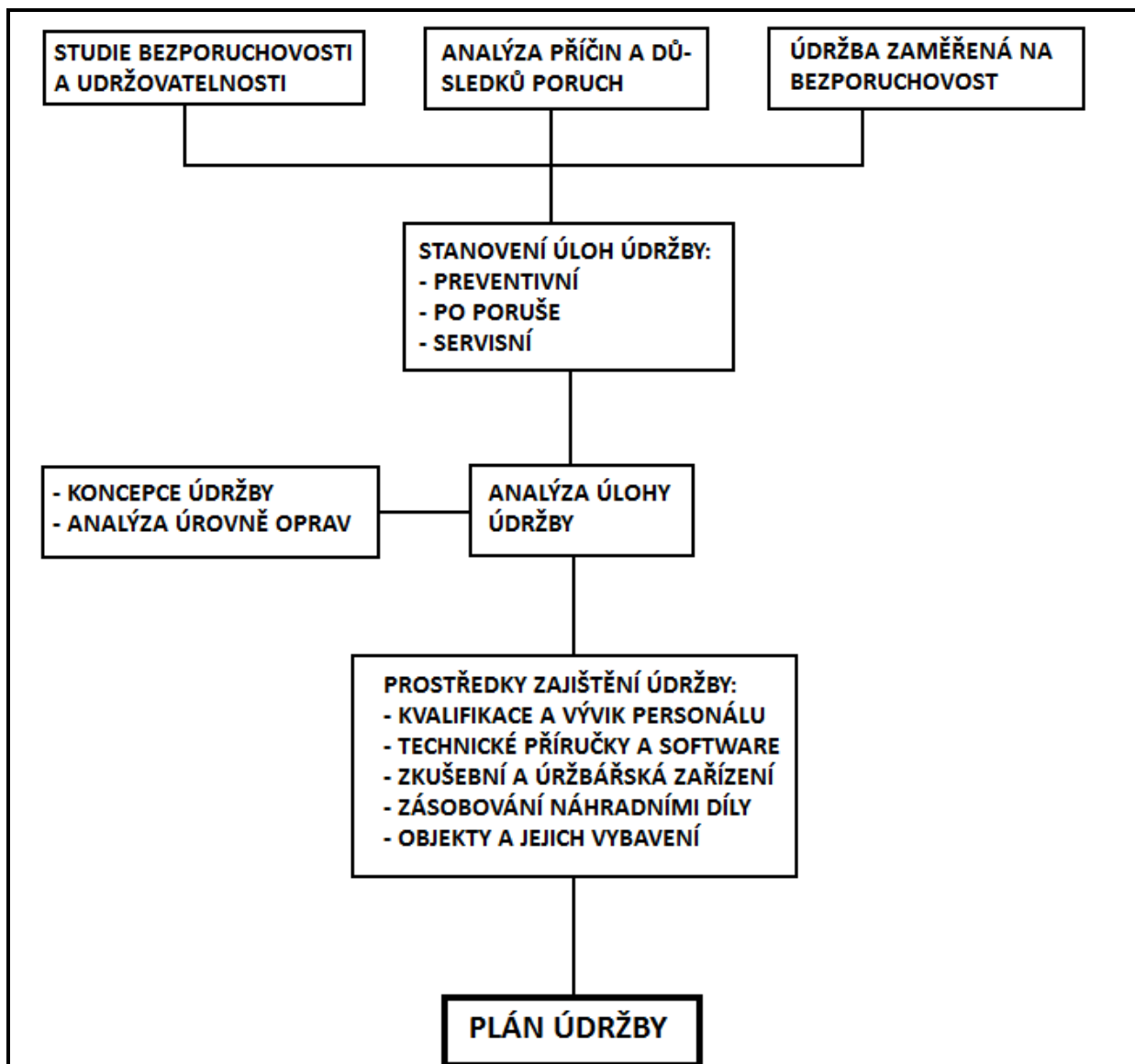
Analýzy, hodnocení, zjišťování a řízení udržitelnosti a zajištění údržby souběžně s bezporuchovostí jsou nedílnými součástmi řešení problematiky spolehlivosti [1]. Tuto problematiku je nutno řešit ve všech etapách životního cyklu výrobku. Řešení problematiky udržitelnosti a zajištění údržby spočívá v určování a hodnocení nároků na udržitelnost, sestavení a provádění příslušných programů atd.. Návod k řešení problémů analýz, hodnocení, řízení a zabezpečování udržitelnosti a zajištění údržby jsou obsahem různých norem.

Východiskem řízení a zabezpečování bezporuchovosti a udržitelnosti mohou být programy nebo plány bezporuchovosti a udržitelnosti. Program bezporuchovosti a udržitelnosti je dokumentovaný soubor časově plánovaných činností, prostředků a jevů sloužících k vytvoření organizační struktury, odpovědností, postupů, činností, způsobilostí a prostředků, které ve svém souhrnu zajišťují splnění požadavků na bezporuchovost a udržitelnost.

Plánování údržby a její zajištění vyžaduje analyzovat, řešit a hodnotit tyto okruhy problémů:

- Vypracovat koncepci údržby, začlenit požadavky na údržbu a její zajištění do specifikace pro vývoj a návrh systému.
- Stanovit dopad návrhu udržitelnosti systému do požadavků na zajištění údržby s následnou optimalizací koncepce údržby.
- Definovat požadavky na zajištění údržby a plán údržby.
- Specifikovat nezbytné prostředky.

Výrobce nebo dodavatel musí připravit podklady pro sestavení koncepce údržby a pro sestavení plánu údržby výrobku. Plán údržby definuje celkové prostředky údržby a jejich zajištění s cílem dosáhnout provozní požadavky při optimálních nákladech na životní cyklus.

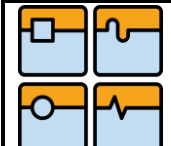


Obr. 5. Schematický postup vypracování plánu údržby [1]

1.4.2 SBĚR DAT PRO HODNOCENÍ SPOLEHLIVOSTI

Sledování a hodnocení provozní spolehlivosti vyžaduje systematický sběr a využívání dat a informací z provozu, pro něž obecně existuje sedm cílů [1]:

- 1) Umožnit průzkum skutečných úrovní výkonností a chování sledovaných výrobků v provozu s jejich využíváním pro informování vrcholového managementu organizace, plánování, funkce zajištění provozu a údržby, zajištění výcviku pracovníků.
- 2) Zjistit případné nutnosti nebo možnosti zlepšení výrobků již instalovaných v provozu. Další výrobků, které se mají dodávat. Struktury systému a dokumentace výrobku.
- 3) Ovlivnit vývoj budoucích návrhů výrobku

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 14
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

- 4) Zjistit druhy poruchových stavů, příčin poruch a mechanismy poruchových stavů.
- 5) Porovnat specifikované ukazatele výrobku s jeho skutečným chováním v provozu.
- 6) Zlepšit databáze a postupy pro specifikace.
- 7) Informovat dodavatele o chování a výkonnosti svých výrobků.

Systematické využívání a sběr dat z provozu členíme podle cílů a druhu objektu, které jsou předmětem pro zkoumání spolehlivosti.

SPOLEHLIVOST OBJEKTŮ TYPU FINÁLNÍCH VÝROBKŮ – V tomto případě zkoumáme spolehlivostní parametry výrobku, přičemž výsledky hodnocení a analýz spolehlivosti jsou cenné informace ve formě zpětné vazby pro výzkum a vývoj výrobků a pro prokazování spolehlivosti výrobku potenciálním odběratelům a zákazníkům.

SPOLEHLIVOST OBJEKTŮ TYPU VÝROBNÍCH ZAŘÍZENÍ A SYSTÉMŮ – Zkoumáme spolehlivostní parametry strojů, zařízení výrobních linek a technologických systémů, které realizují vlastní produkci v podniku. Hlavním cílem je pomocí zprůhlednění procesů spojených s preventivní údržbou a opravami, analýzou příčin poruch, poruchových a dalších prostojů těchto zařízení dosáhnout ekonomicky efektivní stabilizace výrobního procesu.

Při zajištění co největší přesnosti a úplnosti sběru dat o spolehlivosti můžeme zlepšovat jakost výrobků a jejich částí a usnadní se výměna informací mezi zákazníky a výrobci.

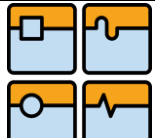
CÍLE A OMEZENÍ SBĚRU DAT – Při sběru dat je důležité jasně určit a definovat jeho prvořadý účel. Přitom je nutné respektovat dvě základní hlediska:

- Od počátku stanovit cíle sběru dat.
- Informace, které se sběru dat získáme, jsou omezeny rozsahem získaných informací.

Systém sběru dat, který je vypracován jako co nejširší a nejdůkladnější, má své zřejmé výhody. Někdy však bývá nutné sběr dat z ekonomických důvodů omezit na minimum. Pro dosažení maximální účinnosti sběru dat je nutná vzájemná spolupráce všech zúčastněných stran.

ZDROJE A METODY SBĚRU DAT – Cílem je navrhnout z hlediska nákladů co nejefektivnější systém sběru dat. Dále předpokládáme, že některá data využijeme pro více účelů. Data z provozu se sbírají nejčastěji v těchto situacích:

- Je znám celý soubor a výkazy o datech z provozu jsou dodávány pravidelně.
- Výběr je považován za reprezentativní vzorek celého souboru a používá se jako zdroj dat z provozu na základě pravidelně podávaných výkazů.
- Data z provozu jsou dodávána z blíže nerozčleněného souboru a jsou dodávány výkazy pouze o části poruch.
- Za základ analytických studií se bere průzkum názorů zákazníků, nebo reklamace odběratelů.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 15
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

Obvykle nejčastějšími zdroji dat jsou:

- Preventivní údržba.
- Opravárenské úkony při údržbě po poruše.
- Reklamační oddělení.
- Záznamy o chování výrobků v provozu (záznamy z diagnostických, inspekčních a technických prohlídek, výkazy o anomáliích, měření dopravního provozu, provozní deníky, měření parametrů prostředí apod.).
- Inventurní informace (instalační a skladové seznamy, pravidelně aktualizovaná databáze, záznamy o úpravách apod.).

Požadavky na nejčastější zdroje dat:

- Výkazy o provozu: Mají zahrnovat informace o podmínkách používání. (provoz, pohotovostní stav, změna sestavy, zkoušky, přeprava, skladování).
- Výkazy o poruchách: mají zahrnovat všechny pozorované poruchy včetně informací, které mohou pomoci při jejich popisu. Způsob zápisu musí být vhodně rozčleněn, aby poskytoval maximum jednoznačných informací
- Výkazy o údržbě: Mají obsahovat všechny informace související se všemi úkony prováděným k obnově provozuschopného stavu. Zahrnují čas, počet a druh pracovníků a stav systému.

VOLBA POŽADOVANÉHO ROZSAHU SBÍRANÝCH DAT – Volba rozsahu sbíraných dat závisí především na podstatě a druhu vyhodnocovaných nebo odhadovaných ukazatelů spolehlivosti. Sběr dat bývá definován požadavky, které zajišťují:

- Základní informace a jednoznačnou identifikaci objektu, kterého se data týkají.
- Třídy odolnosti zařízení proti vlivům prostředí.
- Podmínky prostředí.
- Provozní podmínky.
- Záznamy o chování objektu v provozu.
- Podmínky zajištění údržby.

Volba vhodných metod vyhodnocování je ovlivněna různými faktory, např. časovou závislostí procesu, skutečností, že k datům se může vztahovat více než jedna příčina poruchy. Data získaná sběrem se často řídí některým typem statistického rozdělení, pro jehož stanovení lze použít:

- Inženýrské posouzení založené na analýze fyzikálního procesu, který data vytváří.
- Grafické metody s požitím speciálních diagramů.
- Statistické testy dobré shody empirických rozdělení s předpokládanými teoretickými shodami.

Musí být zvážena i vhodná forma prezentace a dovolují li to podmínky používáme spíše než podrobný přehled číselných hodnot raději zhuštěné formy v podobě grafické prezentace, diagramů, histogramů apod.

1.4.3 ZKOUŠKY SPOLEHLIVOSTI

Zkoušky spolehlivosti jsou základním experimentálním prostředkem k určení nebo ověření dosažené úrovně spolehlivosti výrobku nebo systému v podobě číselných hodnot jednotlivých ukazatelů spolehlivosti (bezporuchovosti,

udržovatelnosti, pohotovosti a životnosti). Znalost hodnot v závislosti na ovlivňujících faktorech umožňuje řešit široký okruh problémů [1]:

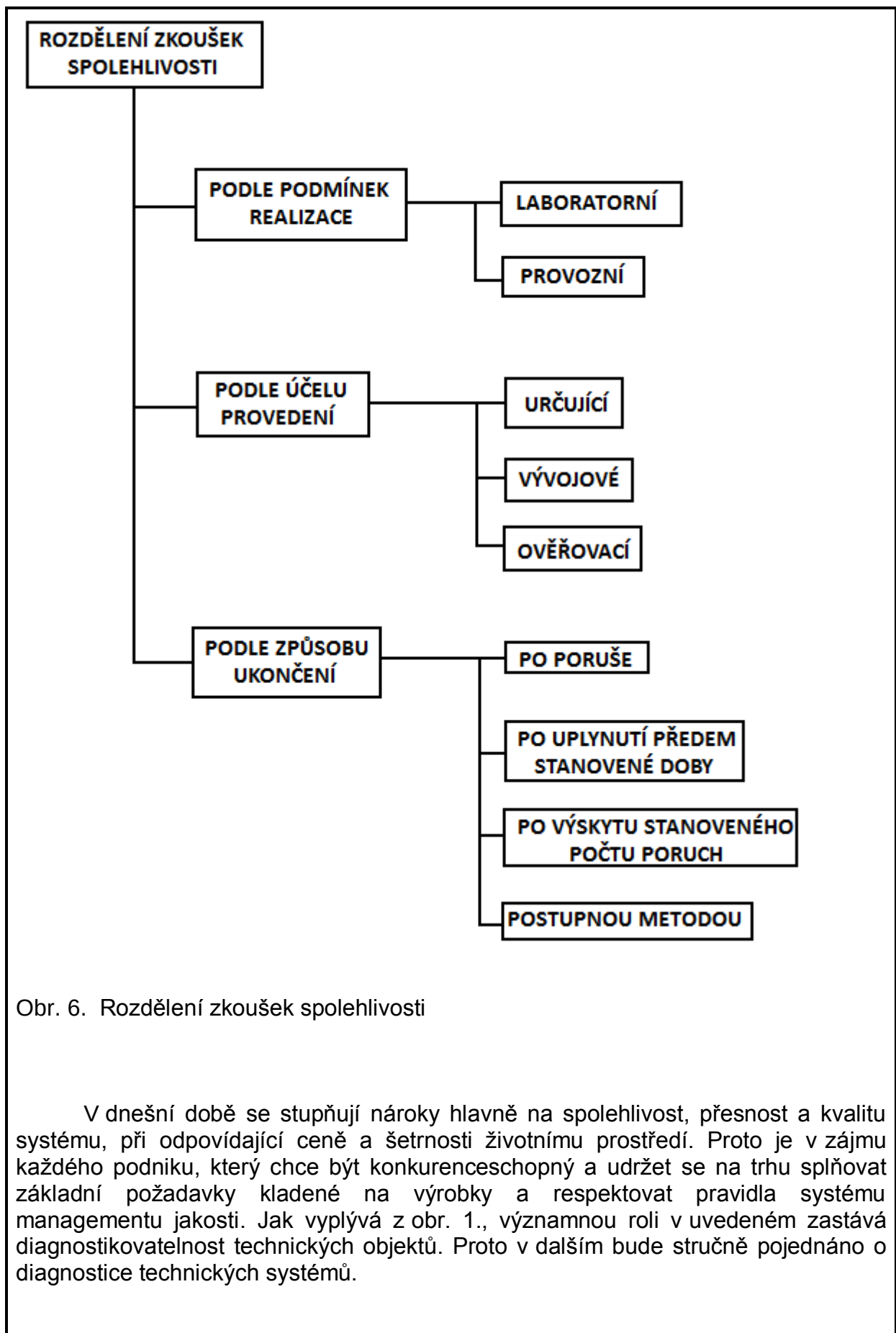
- Zjištění kritických prvků a možnosti provedení opatření k nápravě.
- Prověрку předpovědí získaných výpočty v návrhové etapě životního cyklu.
- Prověření jakosti technologického procesu ve výrobě.
- Využití racionálního systému údržby.
- Prokázání požadovaných ukazatelů spolehlivosti v etapě návrhu, konstrukce, vývoje a výroby.
- Získání podkladů k hodnocení spolehlivosti výrobku pro jeho přejímku.

Při zpracování a využívání zkoušek spolehlivosti je nezbytné vycházet z klasifikace poruchových stavů.

Tab. 3. Poruchové stavy z hlediska interpretace a využitelnosti výsledků zkoušek spolehlivosti [1]

NÁZEV PORUCHY, PORUCHOVÉHO STAVU	VYMEZENÍ
započítávaná (platná) porucha	Porucha, kterou je třeba začlenit do interpretace výsledků zkoušek nebo provozu nebo do výpočtu hodnoty ukazatele spolehlivosti.
nezapočítávaná (neplatná) porucha	Porucha, kterou je třeba vyloučit z interpretace výsledků zkoušek nebo provozu nebo do výpočtu hodnoty ukazatele spolehlivosti.
systematická porucha	Porucha, kterou jednoznačně způsobila určitá příčina a kterou je možno odstranit jen změnou návrhu, výrobního procesu, provozu nebo dokumentace.
jednoznačný poruchový stav	Poruchový stav, kdy u objektu vytvářejícího na nějakou operaci odezvu, je tato odezva na všechny operace stejná.
nejednoznačný poruchový stav	Poruchový stav, při kterém u objektu, který vytváří odezvu na operaci závisí chyba ovlivňující odezvu na použité operaci.
systematický poruchový stav	Poruchový stav vznikající jako výsledek systematické poruchy.

Při zkouškách spolehlivosti se prověřují parametry objektů, které určují jejich stav, tj. kritérium mezního stavu, pro kterého jsou ukazatele spolehlivosti zjišťovány. Platí, že zkoušky spolehlivosti objektů je nutné provádět v režimech stanovených jejich technickou dokumentací a při nich provádět technickou obsluhu podle technické dokumentace.



	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 18
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

2. DIAGNOSTIKA

2.1 SOUČASNÁ DIAGNOSTIKA

Diagnostika je věda, která zjišťuje, zkoumá a určuje stavy objektů [3]. Moderní technické systémy potřebují věrohodné informace o všech jevech, které se u daného systému vyskytují. Jde zde o systémové informace ze všech fází jeho vzniku i provozního života. Význam diagnostických informací je zcela nezastupitelný, proto diagnostika ovlivňuje všechny fáze výrobních činností. Diagnostika je věda, která zjišťuje, zkoumá a určuje stavy objektů. V dnešní době se stupňují nároky hlavně na spolehlivost, přesnost a kvalitu systému, při odpovídající ceně a šetrnosti životnímu prostředí. Proto je v zájmu každého podniku, který chce být konkurenceschopný a udržet se na trhu splňovat základní požadavky kladené na výrobky a respektovat pravidla systému managementu jakosti. Všechny informace, které diagnostika zajišťuje, jsou nezbytné v oblasti prvků, podsystémů i systémů. Diagnostika se stává provazujícím a spojujícím článkem všech ostatních odvětví, které se podílejí na vzniku a provozu strojů, kde je respektována úloha řídicích procesů jak ve výrobě, tak v diagnostice.

V technologii jsou informace získané pomocí diagnostiky velmi důležité. Provádí se vstupní a posléze mezioperační kontroly. Těmito kontrolami se včas z výrobního procesu vyloučí špatné díly, což má značný ekonomický efekt, neboť zabraňuje dalšímu postupu výrobku se špatnou částí. Jako další následují výstupní kontroly. Ty se zabývají odzkoušením již hotového výrobku. Tato diagnostika má opět značný ekonomický efekt spočívající v omezení záručních oprav na minimum, nebo jejich úplném odstranění. Všechny tyto kontroly zvyšují životnost a spolehlivost výrobku.

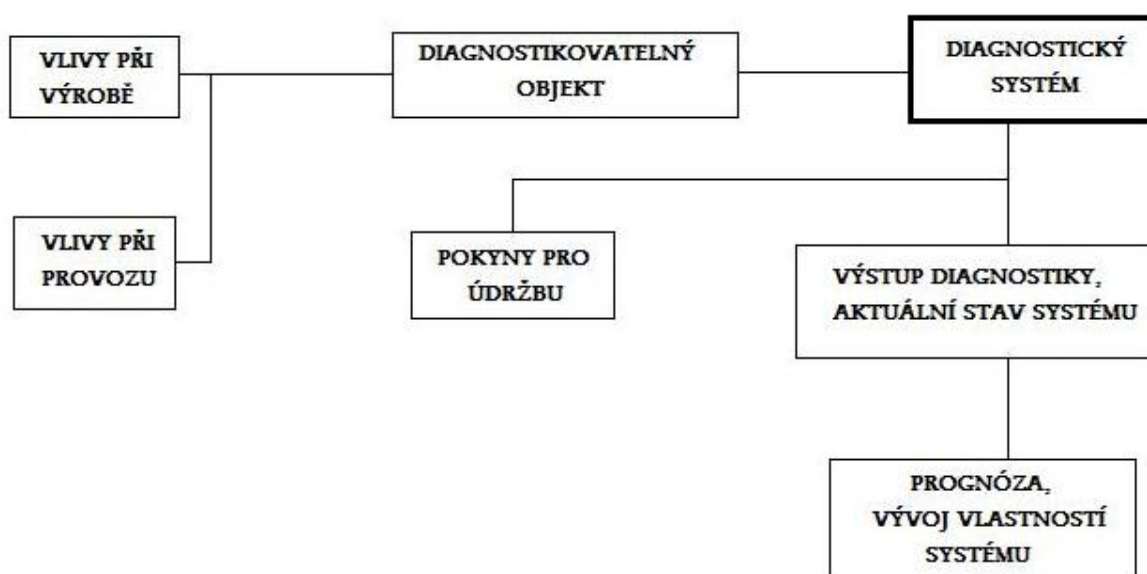
Dopady diagnostiky převádíme do rozboru příčin poruch, ke kterým dochází během provozu zařízení. Vzniklé poruchy třídíme, zaznamenáváme a archivujeme v databázích. Z jejich rozboru získáme cenná fakta a informace. Jestliže se poruchy opakují, použijeme tyto informace ke změnám konstrukce, pomocí kterých odstraníme prvky a části, které byly příčinou opakovaných poruch.

2.2 DIAGNOSTIKOVANÝ OBJEKT

Hlavními prvky celého diagnostického procesu jsou diagnostikovaný objekt a diagnostický systém [3]. Diagnostikovaný objekt reaguje při své výrobě s výrobními vlivy a dále pak během svého života s provozními podmínkami a činiteli prostředí. Stav objektu zachycuje diagnostický systém. Výstupy z diagnostiky zobrazují okamžitý stav objektu. V případě potřeby vydávají pokyny pro údržbu a mohou vytvářet prognózu jeho dalšího vývoje. Diagnostikované objekty dělíme do dvou skupin:

S NEPŘÍSTUPNOU STRUKTUROU – U těchto objektů sledujeme pouze odpovídající přiřazení vstup – výstup. Nestaráme se o procesy, které se odehrávají ve struktuře objektu. Při této diagnostice jde pouze o procesní vlastnosti, které jsou podstatné pro cílové chování diagnostikovaného objektu z hlediska jeho funkce a technického stavu.

S PŘÍSTUPNOU STRUKTUROU – U těchto objektů sledujeme kromě vstupů a výstupů také dění v jejich struktuře. Kontrolujeme vstupy a výstupy jednotlivých prvků popisujících fyzikální, chemické a jiné vlastnosti diagnostikovaného objektu.



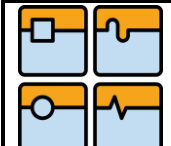
Obr. 7. Základní souvislosti diagnostiky [3]

Nositelem informace o technickém stavu diagnostikovaného objektu je diagnostická veličina. Je stochastického charakteru, musíme tedy respektovat její rozptyl a využívat statistické charakteristiky.

2.3 DIAGNOSTIKA ELEKTRICKÝCH STROJŮ

Diagnostika elektrických strojů je vědní obor, který se zabývá postupy, metodami a prostředky zjišťování technického stavu objektu [2]. V energetické praxi se setkáváme především s diagnostikou na točivých a netočivých strojích. Tyto stroje můžeme obecně označit jako spolehlivostní řetězec, v němž výpadek jednoho článku znamená ukončení činnosti celého stroje. Při sledování těchto strojů se záměrně zaměřujeme na jejich nejcitlivější místo. U elektrických strojů zvláště velkých výkonů je toto místo izolační systém.

Diagnostikou vysokonapěťových izolačních systémů se zabývá několik pracovišť a jsou vytvořeny komplexní systémy pro diagnostická měření na konkrétních strojích. Na těchto strojích se zkoumá jejich izolace pomocí souboru diagnostických metod a vyhodnocuje se její stav, především stárnutí, a to s ohledem na další spolehlivost provozu stroje. Na základě výsledků těchto diagnostických metod je možné odhadnout chování stroje v dalším provozu.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 20
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

V energetické praxi dělíme diagnostické metody do těchto skupin:

DIAGNOSTIKA VSTUPNÍ – Provádí se na strojích nových nebo na strojích převinutých. Jedná se o soubor měření, která jsou prováděna při přejímce před uvedením do provozu u nového nebo opraveného stroje, u něhož byl proveden zásah do izolačního systému statorového vinutí.

DIAGNOSTIKA MALÁ – Jedná se o soubor měření, která se provádějí při odstávce zařízení zpravidla jednou do roka, v návaznosti na běžnou opravu. Čas pro měření zpravidla nepřesahuje 24 hodin.

DIAGNOSTIKA VELKÁ – Je prováděna pověřenou organizací v rámci generální opravy. Rozsahem odpovídá minimálně diagnostice malé. Jedná se tedy o diagnostiku malou, která je rozšířená o další vybraná doplňková měření. Čas měření nepřesahuje 48 hodin.

DIAGNOSTIKA MIMOŘÁDNÁ – Diagnostika mimořádná se používá pro objasnění poruchy.

2.4 DIAGNOSTIKA VELKÝCH TOČIVÝCH ELEKTRICKÝCH STROJŮ

V provozu velkých energetických strojů, mezi které neodmyslitelně patří turboalternátory, hydroalternátor a také vysokonapěťové motory, je důležitým aspektem jejich bezporuchový chod [3]. Během provozu těchto strojů jsou všechny jejich podsystémy a prvky vystaveny nejrůznějším provozním namáháním, které má za následek jejich postupné stárnutí. Nemusí jít však jenom o stárnutí mechanické (opotřebení, únava), chemické (koroze a jiné chemické změny) ale také o stárnutí způsobené elektrickým namáháním (kombinace působení vysoké teploty a vlastního elektrického pole). Diagnostika těchto strojů má své nevýhody, k nimž patří zejména to, že musí být prováděna na místě. Další nevýhodou jsou značně vyšší investiční náklady.

V diagnostice velkých točivých strojů jsou stroje rozdělovány podle typu izolačního systému. S malými odchylkami jsou prováděna stejná diagnostická měření na všech typech strojů (turbogenerátory, hydrogenerátory, vysokonapěťové motory). Měření se provádí jak na nových strojích, tak na strojích v provozu. Pro vyhodnocení výsledků zkoušek existují pro každou skupinu strojů kritériální hodnoty, jejichž překročení signalizuje nutnost rozhodovat o odstávce, opravě atd.

2.5 DIAGNOSTICKÉ METODY

Před uvedením stroje do provozu, ale i za jeho provozu se provádí v intervalu 1 až 2 roky následující zkoušky [3]:

- Vizuální kontrola statorového vinutí
- Měření izolačního odporu a výpočet polarizačního indexu statorového vinutí
- Měření izolačního odporu a výpočet polarizačního indexu rotorového vinutí
- Měření napěťové závislosti izolačního odporu na stejnosměrném napětí

- Měření kapacity, ztrátového činitele δ a výpočet časové konstanty statorového vinutí
- Měření částečných výbojů statorového vinutí galvanickou metodou
- Zkouška statorového vinutí střídavým napětím 50 Hz
- Zkouška statorového vinutí stejnosměrným napětím
- Zkouška statorového vinutí napětím velmi nízkého kmitočtu
- Zkouška závitové izolace statorového vinutí proudovými impulsy

2.5.1 VIZUÁLNÍ KONTROLA STATOROVÉHO VINUTÍ

Vizuální kontrola stroje patří k nejjednodušším, ale zároveň k velmi důležitým metodám, kterými sledujeme stav izolačního systému statorového vinutí a celého jeho izolačního systému [3]. Vizuální kontrola statoru se provádí sledováním jeho konstrukčních částí. Statorové vinutí je v provozu vystaveno různým namáháním, jako je teplota, chemické a mechanické namáhání, nečistoty atd. Působení těchto vlivů lze velmi často identifikovat i vizuální kontrolou a lze tak získat první diagnostické informace o stavu izolačního systému.

Následky jednotlivých vlivů namáhání jsou velmi dobře patrné a rozlišitelné. Působení vysokých teplot může způsobit uvolnění klínů v drážkové části vinutí, jelikož díky teplotě mění izolační systém svůj objem. Mezi teplotní namáhání patří i výbojové činnosti, které mohou viditelně poškodit izolaci povrchovými výboji. Tyto výboje ve spojení s chladícím vzduchem vytváří kyslíkaté látky, které podporují narušování izolačního systému.

Vizuální kontrolu provádíme na odpojeném a demontovaném točivém elektrickém stroji s vyjmutým rotorem. Vizuální kontrola se provádí především na statorovém vinutí. Kontrolují se průchodky, stav teflonových hadic, průchodek vodního systému, systém měření teplot vinutí atd.

2.5.2 MĚŘENÍ IZOLAČNÍHO ODPORU A VÝPOČET POLARIZAČNÍHO INDEXU STATOROVÉHO VINUTÍ

Izolační systém elektrického stroje je složitá dielektrická soustava, kterou tvoří dvě elektrody. Jedna elektroda je tvořena vodičem vinutí dané fáze [3]. Druhou elektrodu tvoří železo statoru, které má všechny části uzemněné. Pro měření se používá stejnosměrné napětí. Ve zkušebním obvodu se odehrávají přechodové děje spojené s nabíjením geometrické kapacity, absorpčním a ustáleným vodivostním proudem. Před uvedením stroje do provozu se izolační odpor měří na vyčištěném stroji. Je-li to technicky možné, před samotným měřením se rozpojí uzel vinutí. Při tomto měření nemusí být ze stroje vyjmutý rotor, ale je-li stroj chlazený vodou, musí se tato voda z chladicího okruhu vypustit a vodiče se musí vysušit. Měření probíhá v rozsahu 5 až 30°C. Hydrogenerátory se měří při chladnutí z provozní teploty. Vinutí musí mít teplotu 20 až 30°C.

Izolační odpor se odečítá v časech 15, 60, 120 až 600 s po připojení měřicího napětí a z těchto naměřených hodnot se vypočítá jednodinutový a desetinutový polarizační index P_i .

$$P_{i60} = R_{iz60}/R_{iz15} [-]$$

$$P_{i600} = R_{iz600}/R_{iz60} [-]$$

R_{iz15} – Je hodnota izolačního odporu v $M\Omega$ odečtená v čase 15 s po zapojení měřícího napětí.

R_{iz60} – Je hodnota izolačního odporu v $M\Omega$ odečtená v čase 60 s po zapojení měřícího napětí.

R_{iz600} – Je hodnota izolačního odporu v $M\Omega$ odečtená v čase 600 s po zapojení měřícího napětí.

Hodnota izolačního odporu a polarizačního indexu je ovlivněna zejména absorbovanou vlhkostí a celkovým znečištěním stroje. Je-li hodnota polarizačního indexu větší než 2, znamená to, že absorpční proudy ve statorové izolaci trvaly poměrně dlouhou dobu. To znamená, že izolace je dobrá, nedegradovaná a nenavlhla. Blíží-li se polarizační index 1, znamená to navlhlost, znečištěnou nebo degradovanou izolaci.

2.5.3 MĚŘENÍ IZOLAČNÍHO ODPORU A VÝPOČET POLARIZAČNÍHO INDEXU ROTOROVÉHO VINUTÍ

Izolační odpor rotorového vinutí je důležitým diagnostickým parametrem všech eklektických točivých strojů [3]. Měření izolačního odporu provádíme buďto na rotoru, který je vyjmutý ze stroje, nebo se měření provede na stroji ve smontovaném stavu. Pokud se měření provádí na stroji ve smontovaném stavu, musí být stroj zajištěn proti samovolnému spuštění. Před měřením musíme odpojit zemní ochranu rotoru a budící obvod. Budící obvod odpojíme vyjmutím kartáčů sběracích kroužků. Měříme izolační odpor vinutí magnetového kola, přívodních plastů a sběracích kroužků. Měření probíhá v rozmezí teplot 20 až 30 °C. U strojů s vyniklými póly se měří při chladnutí stroje z provozní teploty. Po ukončení měření je nutné vybit vinutí po dobu 5 minut. Toto vybití se provádí zkratováním vinutí na hmotu magnetového kola.

Měřený izolační odpor se odečítá v čase 15 a 60 s po připojení měřícího napětí. Z těchto hodnot se počítá jednominutový polarizační index P_i rotorového vinutí.

$$P_{i60} = R_{iz60}/R_{iz15} [-]$$

2.5.4 MĚŘENÍ NAPĚŤOVÉ ZÁVISLOSTI IZOLAČNÍHO ODPORU NA STEJNOSMĚRNÉM NAPĚTÍ

Při měření závislosti izolačního odporu na čase při konstantním napětí vzrůstá velikost izolačního odporu až na jistou ustálenou mez danou vodivostí dielektrika [3]. Na rozdíl od tohoto postupu při zkoušce napěťové závislosti izolačního odporu tento odpor se zvyšujícím se napětím klesá. Tento jev se nazývá odchylka od Ohmova zákona a signalizuje blížící se nezvratné změny v systému. Do jisté hodnoty stejnosměrného napětí je izolační odpor téměř konstantní, pak začne klesat. Se

zvyšujícím se napětí se izolační odpor i nadále zmenšuje až k hodnotám, které se blíží nule. Po dosažení těchto hodnot dochází k průrazu izolace. Velikost protékajícího proudu izolačním systémem je přímo závislé na kvalitě použité izolace.

Nevýhodou této diagnostické metody je její časová náročnost, protože k ustálení proudu může dojít za poměrně dlouhou dobu. V praxi proto považujeme ustálený stav měření probíhající v čase 10 minut po připojení napětí.

2.5.5 MĚŘENÍ KAPACITY, ZTRÁTOVÉHO Činitele δ A VÝPOČET ČASOVÉ KONSTANTY STATOROVÉHO VINUTÍ

Měření ztrátového činitele spočívá v určení prvků náhradního schématu dielektrika [2]. Pro získání objektivního diagnostického obrazu je nutné správně měřit závislost ztrátového činitele $\tan \delta$ na napětí, teplotě a frekvenci. Dalším rozhodujícím faktem je frekvenční závislost těchto parametrů. To znamená, že podle zvolené frekvence volíme různé metody měření. V průmyslové praxi při měření na elektrických strojích se používají tzv. můstkové metody.

METODY MĚŘENÍ $\tan \delta$:

- Metoda Scheringova můstku
- Metoda čtyřkapacitního můstku
- Automatický můstek pro měření dielektrických ztrát

V diagnostice elektrických zařízení je nejpoužívanějším principem metod pro měření $\tan \delta$ zapojení Scheringova můstku. Výrobci můstků rozvíjejí tyto metody z hlediska přesnosti a zjednodušení obsluhy. Toto opatření eliminuje lidský faktor a jím zanášených nepřesností do měření.

Měření kapacity vychází z poznatku, že pokud je vinutí elektrického zařízení v pořádku, jsou jeho kapacity měřené při různých frekvencích a různých teplotách stejné. Jestliže je vinutí navlhle jsou hodnoty kapacit měřených při různých frekvencích nebo různých teplotách rozdílné.

Výpočet časové konstanty vinutí je důležitým diagnostickým ukazatelem a provádí se pro odstranění vlivu typu stroje, jeho napětí a výkonu na naměřené veličiny. Velikost časové konstanty není závislá na geometrických rozměrech vinutí stroje. To umožňuje porovnávat vlastnosti izolačních systémů u typově rozdílných strojů. Z naměřených hodnot lze vypočítat destiminutovou časovou konstantu T_{600} .

$$T_{600} = R_{iz600} / C_{0,2U_{fn}} [-]$$

R_{iz600} – Je izolační odpor v $M\Omega$ odečtený v čase 600 s po připojení měřícího napětí.

C – Je kapacita vinutí měřené fáze střídavého generátoru v μF při $0,2U_{fn}$.

U_{fn} – Je jmenovitá hodnota fázového napětí.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 24
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

2.5.6 MĚŘENÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ STATOROVÉHO VINUTÍ GALVANICKOU METODOU

Měřením částečných výbojů lze odhadnout celkový stupeň znehodnocení izolace izolačního systému a zaznamenat vznik lokálních vad [3]. Částečné výboje mohou vznikat v elektrických strojích buď i izolaci vodičů, mezi izolací a vodičem, mezi izolací a dnem drážky statoru nebo na povrchu izolace mimo drážku statoru. Každý impuls částečného výboje vzniká ve specifickém místě vinutí. Proudový impuls se šíří od místa vzniku částečného výboje až do přípojnice stroje, kde je zaznamenán měřicí technikou. Před měřením se musí rozpojit uzel vinutí, Měřená fáze se připojí na zdroj regulovaného střídavého napětí 50 Hz a neměřené fáze se zkratují a uzemní. Rotor nemusí být vyjmutý ze stroje.

Hlavním měřeným parametrem je maximální velikost amplitudy částečného výboje. To je velikost největšího pulsu částečných výbojů. Diagnostika částečných výbojů je srovnávací test, který může určit, jaká fáze má největší úroveň výbojové činnosti a tím pádem je nejvíce degradována. Na základě výsledků testu je teoreticky možné porovnávat jednotlivé stroje a hodnotit jejich stav. Nejdůležitějším hodnotícím faktorem je ovšem sledování konkrétního stroje v průběhu času a sledování trendů výbojové činnosti v závislosti na době provozu elektrického stroje.

2.5.7 ZKOUŠKA STATOROVÉHO VINUTÍ STŘÍDAVÝM NAPĚTÍM 50Hz

Tato zkouška patří do skupiny zkoušek se zvýšeným napětím [3]. Základní vlastností izolačního systému, na které přímo závisí provozuschopnost stroje, je průrazné napětí (elektrická pevnost kolačního systému). I když je při konstrukci izolační systém značně předimenzován, tak v průběhu jeho provozu dochází k degradaci izolačního systému. Tím dojde ke snížení elektrické pevnosti. Pokud dosáhne kritická pevnost kritickou mez, dojde k průrazu dielektrika a k havárii stroje.

V praxi není možné zvyšovat přiložené napětí až do průrazu izolace. Proto je během této zkoušky izolační systém měřené fáze namáhán zvýšeným elektrickým napětím průmyslové frekvence po dobu 60 s. Hodnota elektrické pevnosti izolace vinutí je dána velikostí zkušebního napětí v době zkoušky.

nový stroj – 100% U_{zk}
ostatní stroje – 80% U_{zk}

Při zkoušce je rozloženo napětí na vinutí v poměru kapacit, to odpovídá provoznímu namáhání. Výsledkem zkoušky je výrok, zda během testu došlo, či nedošlo k přeskoku nebo k průrazu. Izolace se považuje za vyhovující, pokud nedojde k průrazu nebo přeskoku.

2.5.8 ZKOUŠKA STATOROVÉHO VINUTÍ STEJNOSMĚRNÝM NAPĚTÍM

K vývoji této zkoušky vedly obavy z přílišné degradace izolačního systému při zkoušce zvýšeným napětím průmyslového kmitočtu [3]. Metoda je založena na zvýšeném elektrickém namáhání izolačního systému. Používá se však stejnosměrný zdroj o relativně malém výkonu (řádově stovky VA). Provádí se kontrola elektrické pevnosti izolace vinutí. Napětí je rozloženo na vinutí v poměru odporů vinutí. To však

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 25
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

zcela neodpovídá skutečnému provoznímu namáhání izolačního systému. Před měřením se musí rozpojit uzel vinutí. Rotor nemusí být vyjmutý. Po ukončení měření je nutné jednotlivé fáze vybit a viditelně zkratovat. Velikost zkušebního stejnosměrného napětí při této zkoušce se určuje jako:

$$U_{zkss} = 1,7 U_{zkst} [\text{kV}]$$

U_{zkss} – Je zkušební stejnosměrné napětí.

U_{zkst} – Je zkušební střídavé napětí.

2.5.9 ZKOUŠKA STATOROVÉHO VINUTÍ NAPĚTÍM VELMI NÍZKÉHO KMITOČTU

Tato zkouška se svým charakterem velmi blíží zkoušce s průmyslovou frekvencí [3]. Ale při použití frekvence 0,1 Hz nedochází při opakovaných zkouškách k degradaci dielektrika. Před uvedením alternátoru do provozu se tato zkouška provádí na vyčištěném stroji. Před měřením se musí, je-li to možné, rozpojit uzel vinutí. Rotor nemusí být vyjmutý ze stroje. Je-li vinutí chlazeno vodou, musí nejdříve vyhovět hodnoty izolačních odporů. Po ukončení měření je nutné jednotlivé fáze vybit a viditelně zkratovat, protože na vinutí se může nacházet nebezpečný zbytkový náboj.

2.5.10 ZKOUŠKA ZÁVITOVÉ IZOLACE STATOROVÉHO VINUTÍ PROUDOVÝMI IMPULSY

Tato zkouška představuje nejdůkladnější metodu určování kvality mezizávitové izolace vinutí [3]. Dokáže na rozdíl od ostatních zkoušek detekovat počínající stádia poruchy izolace mezi jednotlivými závity vinutí.

Napěťový impuls s vysokou strmostí náběhu injektovaný do vinutí stroje vyvolá nerovnoměrné rozložení napětí ve vinutí. Toto napětí vyvolává mezizávitovou napěťovou diferenci. Se zvyšujícím se napětí pulsu se zvyšuje i mezizávitové napětí. Dojde-li během testu k průrazu mezizávitové izolace vinutí, změní se poměry impedance vinutí stroje. To má za následek zvyšování frekvence pozorované na osciloskopu oproti frekvenci bez zkratu.

2.6 HYDROALTERNÁTOR

Hydroalternátor patří mezi velké točivé elektrické stroje synchronní [4]. Synchronní stroje dělíme na synchronní generátory, tzv. alternátory, synchronní motory a synchronní kompenzátory, které se používají pro zlepšování účinnosti v sítích. Elektrickou energii získáváme dnes výhradně přeměnou mechanické energie v trojfázových alternátorech poháněných turbínami v parních nebo vodních elektrárnách.

Provedení synchronních alternátorů se dělí podle druhu, velikosti a rychlosti hnacího stroje. Ve vodních elektrárnách se pohánějí malé alternátory turbínou s řemenovým převodem. Ve vodních elektrárnách s velkým spádem mívají

alternátory střední velikosti vodorovný hřídel a jsou spojeny se spirální Francisovou nebo Peltonovou turbínou. Největší alternátory mají svislý hřídel pevně spojený s hřídelem oběžného kola vodní turbíny.

Důležitou hodnotou u alternátorů, poháněných vodními turbínami, je tzv. průběžná rychlost otáčení. Na tuto rychlost otáčení, která dosahuje někdy i více než dvojnásobku jmenovité rychlosti otáčení, se musí hydroalternátor zkoušet. Protože odstředivá síla je úměrná druhé mocnině rychlosti otáčení, je kontrola mechanického namáhání otáčejících se částí stroje při průběžné rychlosti otáčení velmi důležitá.

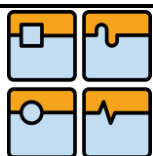
Alternátory poháněné vodními turbínami stavíme dnes převážně svislé, což je jediné řešení pro stroje největších výkonů. Rychlost otáčení vodních turbín velkých výkonů je malá, proto tyto svislé alternátory mívají velký počet pólů a tím i velké průměry.



Obr. 8. Stator hydroalternátoru



Obr. 9. Pohled na hydroalternátor v provozu



3 DATOVÝ SOUBOR

Pro práci mi byly poskytnuty data vedoucím diplomové práce.

3.1 HYDROALTERNÁTOR EŠT-TG1

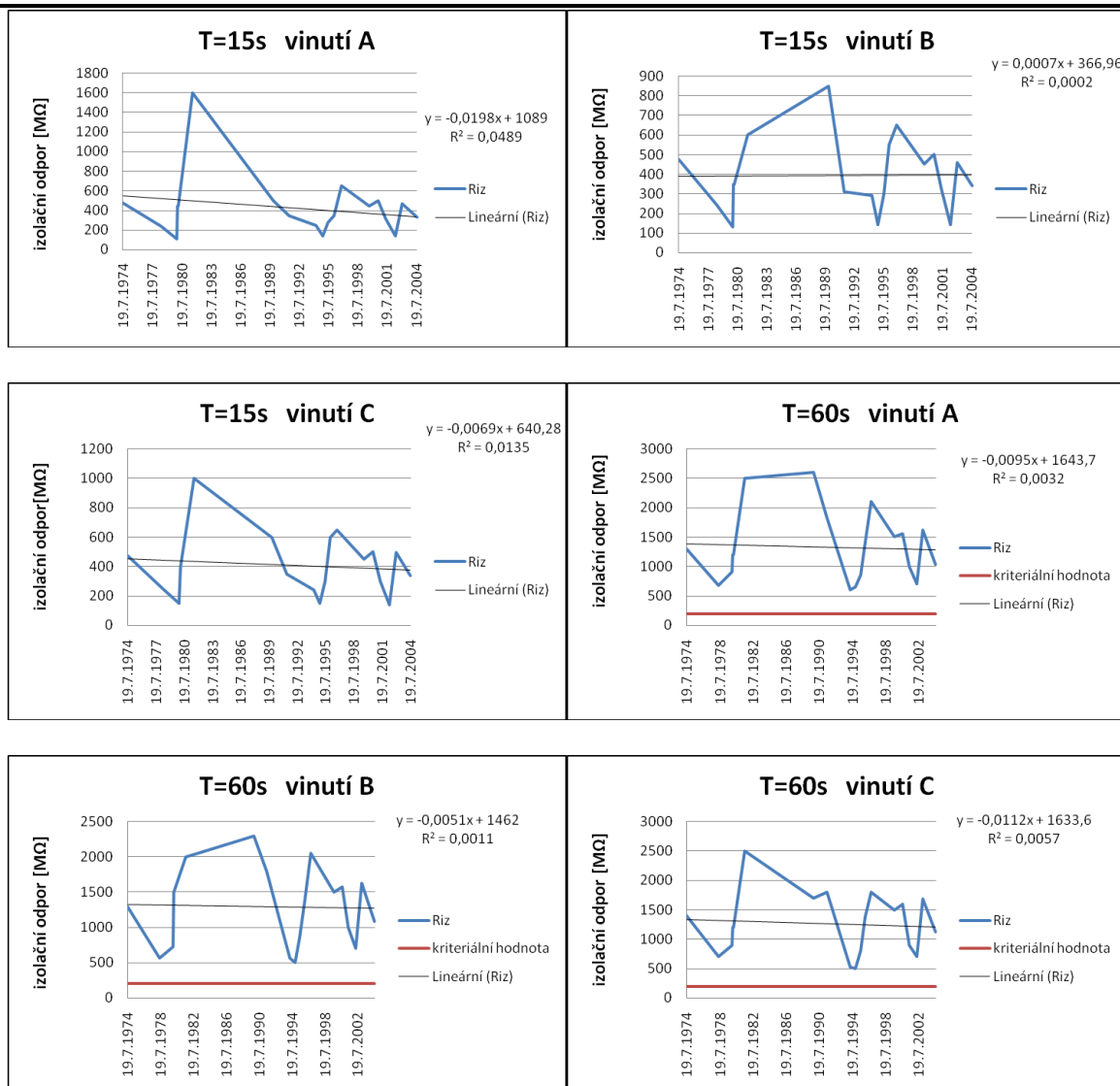
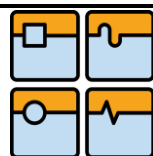
Tab. 4. Výrobní štítek TG1

ROK VÝROBY:	1943	Us:	10,5 kV
TYP:	VTA-650/175x36	Ur:	420 V
VÝROBNÍ ČÍSLO:	121008	Is:	825 A
OTÁČKY:	166,6 ot/min	cos:	0,75
VÝKON:	11000 kVA	f:	50 Hz
TYP IZOLACE:	F		

3.1.1 IZOLAČNÍ ODPOR STATORU TG1

Tab. 5. Izolační odpor statoru TG1

IZOLAČNÍ ODPOR STATORU [MΩ]						
T [s]	15			60		
vinutí	A	B	C	A	B	C
19.7.1974	475	475	475	1300	1300	1400
5.6.1978	240	240	240	680	560	700
25.1.1980	110	130	150	900	720	900
4.3.1980	450	350	400	1200	1500	1200
13.3.1980	450	350	400	1200	1500	1200
21.8.1981	1600	600	1000	2500	2000	2500
1.12.1989	500	850	600	2600	2300	1700
6.7.1991	350	310	350	1820	1800	1800
2.5.1994	245	290	240	600	560	520
1.1.1995	140	140	150	650	500	500
25.7.1995	280	300	300	850	850	800
27.2.1996	350	550	600	1400	1380	1380
14.11.1996	650	650	650	2100	2050	1800
17.9.1999	450	450	450	1500	1500	1500
11.9.2000	500	500	500	1550	1580	1600
18.6.2001	320	320	300	1000	1000	900
28.5.2002	140	140	140	700	700	700
19.2.2003	468	460	494	1620	1630	1690
23.8.2004	328	342	340	1030	1090	1130



Obr. 10. Závislost izolačního odporu na čase TG1

3.1.2 NABÍJECÍ PROUDY STATORU TG1

Tab. 6. Nabíjecí proudy statoru TG1

nabíjecí proudy [μA]	I 60								
Vinutí	A			B			C		
U _{ss} [kV]	5	10	15	5	10	15	5	10	15
5.6.1978	4	5	7	6	9,2	11		8,8	11
4.3.1980	2,2	4	6,5	2	4	4,4	2	3,8	5,1
13.3.1980	2,2	4	6,5	2	4	4,4	2	3,8	5,1
1.12.1989	2	3,1	4,2	1,8	3	4	2	3,2	4,1
6.7.1991	0,77	2,9	3,9	2	3	3,7	1,9	3,1	3,3
25.7.1995	2,6	3,5	2,9	3,6	4,1	3,4	4,6	5	4
14.11.1996	2	2	1,8	3	2,6	2,4	3,1	3	3,3



17.9.1999	3,6	4,8	5,4	4	4,8	5,4	3,8	4	4,5
11.9.2000	3,8	4,4	5,3	3,6	4,4	5,1	3,3	4	5
18.6.2001	3,25	4	4,75	4,12	4,25	4,75	3,5	4,25	5
28.5.2002	5,32	6,32	7,5	5,2	6,5	7,5	4,2	4,6	5
23.8.2004	4,8	5,3	6,4	4,25	4,85	6,5	4,5	5,5	7,4

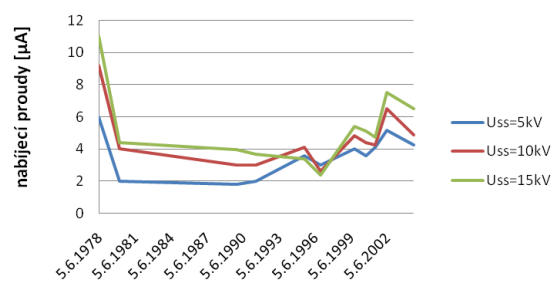
Tab. 7. Nabíjecí proudy statoru TG1

nabíjecí proudy [μA]	I 600								
Vinutí	A			B			C		
U _{ss} [kV]	5	10	15	5	10	15	5	10	15
5.6.1978	1	2,4	4,1	1,8	4,7	6,7	2,3	4,4	6,1
4.3.1980	1	2	3,2	0,6	1,4	2,6	0,8	1,6	2,5
13.3.1980	1	2	3,2	0,6	1,4	2,6	0,8	1,6	2,5
1.12.1989	0,3	0,6	0,9	0,3	0,6	0,9	0,3	0,6	0,9
6.7.1991	0,33	0,55	0,8	0,7	0,55	0,8	0,5	0,65	0,75
25.7.1995	0,6	0,6	0,1	0,9	1	0,2	1,2	1,4	0,5
14.11.1996	0,4	0,5	0,5	0,6	0,8	0,8	0,8	1	1
17.9.1999	0,8	1,3	1,6	0,8	1,2	1,5	0,25	0,56	0,87
11.9.2000	0,7	1	1,3	0,7	1	1,3	0,6	1	1,3
18.6.2001	0,75	1	1,37	0,87	1,12	1,37	0,87	1,12	1,5
28.5.2002	0,6	0,92	2,15	0,6	1,15	1,85	0,6	0,65	1,2
23.8.2004	0,65	1,15	1,7	0,4	0,61	1,5	0,6	1,2	2

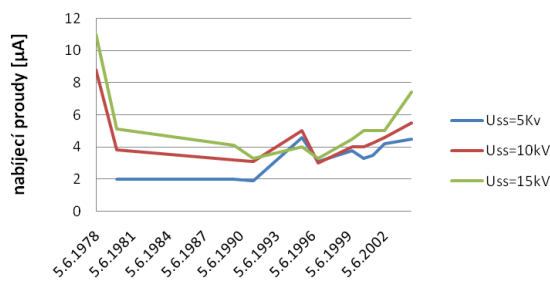
I 60, vinutí A



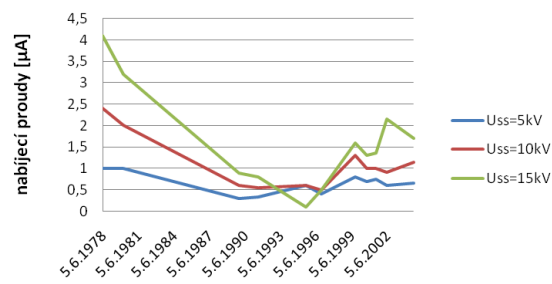
I 60, vinutí B

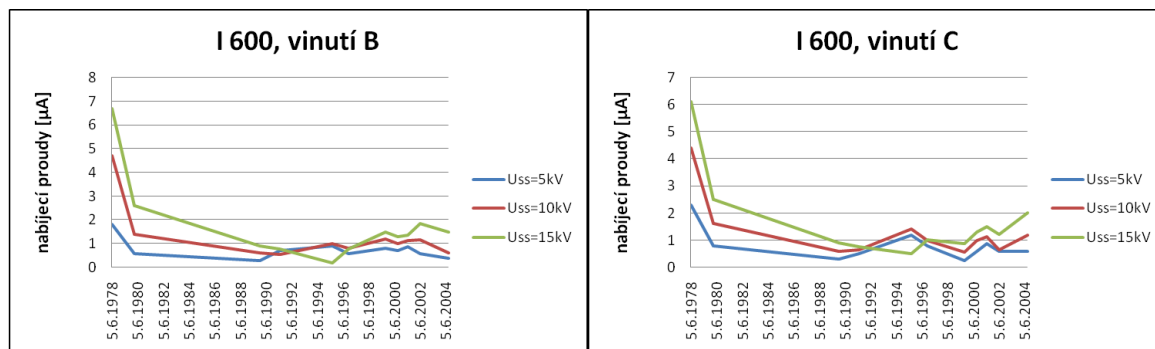
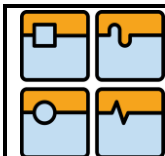


I 60, vinutí C



I 600, vinutí A



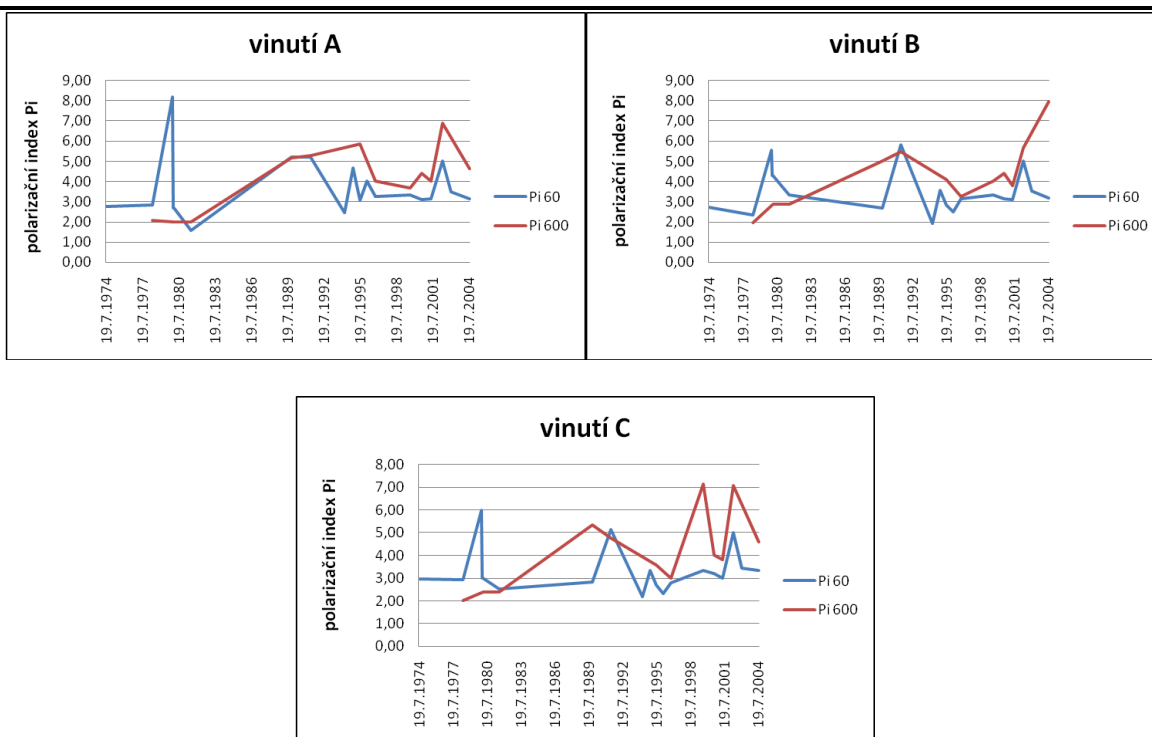
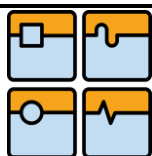


Obr. 11. Závislost nabíjecího proudu na čase TG1

3.1.3 POLARIZAČNÍ INDEX TG1

Tab. 8. Polarizační index TG1

POLARIZAČNÍ INDEX P_i												
VINUTÍ	Pi 60			Pi 600								
	A	B	C	A			B			C		
Uss [kV]				5	10	15	5	10	15	5	10	15
19.7.1974	2,74	2,74	2,95									
5.6.1978	2,83	2,33	2,92	4,00	2,08	1,71	3,33	1,96	1,64		2,00	1,80
25.1.1980	8,18	5,54	6,00									
4.3.1980	2,67	4,29	3,00									
13.3.1980	2,67	4,29	3,00	2,20	2,00	2,03	3,33	2,86	1,69	2,50	2,38	2,04
21.8.1981	1,56	3,33	2,50	2,20	2,00	2,03	3,33	2,86	1,69	2,50	2,38	2,04
1.12.1989	5,20	2,71	2,83	6,67	5,17	4,67	6,00	5,00	4,44	6,67	5,33	4,56
6.7.1991	5,20	5,81	5,14	2,33	5,27	4,88	2,86	5,45	4,63	3,80	4,77	4,40
2.5.1994	2,45	1,93	2,17									
1.1.1995	4,64	3,57	3,33									
25.7.1995	3,04	2,83	2,67	4,33	5,83	29,00	4,00	4,10	17,00	3,83	3,57	8,00
27.2.1996	4,00	2,51	2,30									
14.11.1996	3,23	3,15	2,77	5,00	4,00	3,60	5,00	3,25	3,00	3,88	3,00	3,30
17.9.1999	3,33	3,33	3,33	4,50	3,69	3,38	5,00	4,00	3,60	15,20	7,14	5,17
11.9.2000	3,10	3,16	3,20	5,43	4,40	4,08	5,14	4,40	3,92	5,50	4,00	3,85
18.6.2001	3,13	3,13	3,00	4,33	4,00	3,47	4,74	3,79	3,47	4,02	3,79	3,33
28.5.2002	5,00	5,00	5,00	8,87	6,87	3,49	8,67	5,65	4,05	7,00	7,08	4,17
19.2.2003	3,46	3,54	3,42									
23.8.2004	3,14	3,19	3,32	7,38	4,61	3,76	10,63	7,95	4,33	7,50	4,58	3,70

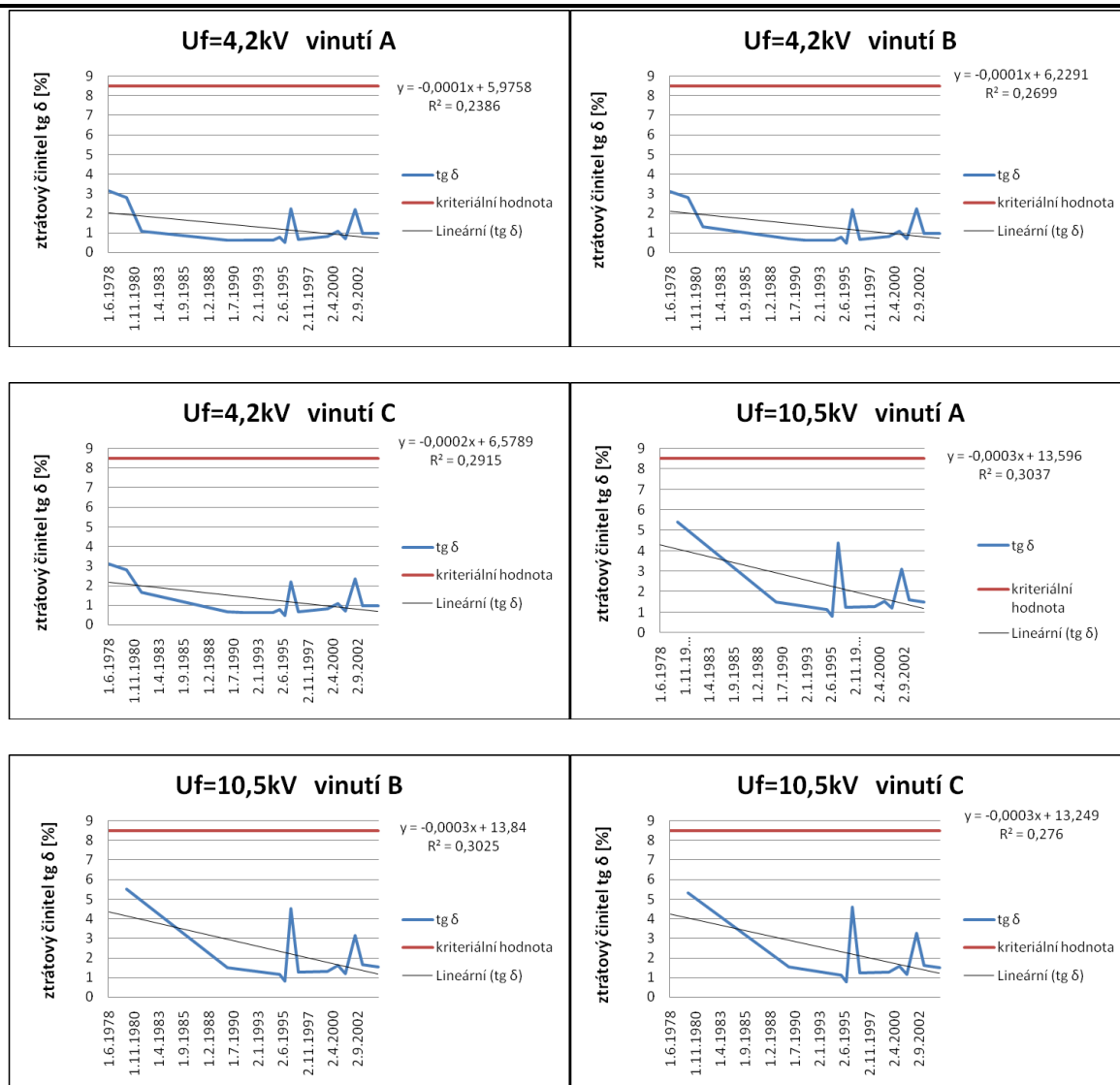


Obr. 12. Závislost polarizačních indexů na čase TG1

3.1.4 ZTRÁTOVÝ ČINITEL $\tan \delta$ TG1

Tab. 9. Ztrátový činitel $\tan \delta$ TG1

ZTRÁTOVÝ ČINITEL $\tan \delta$ [%]						
Uf [kV]	4,2			10,5		
Vinutí	A	B	C	A	B	C
5.6.1978	3,13	3,09	3,1			
13.3.1980	2,78	2,78	2,78	5,41	5,5	5,32
21.8.1981	1,06	1,3	1,63			
1.12.1989	0,62	0,67	0,67	1,5	1,5	1,55
6.7.1991	0,61	0,62	0,62			
2.5.1994	0,61	0,62	0,62			
1.1.1995	0,77	0,77	0,78	1,13	1,14	1,12
25.7.1995	0,49	0,46	0,46	0,8	0,8	0,78
27.2.1996	2,2	2,17	2,2	4,4	4,5	4,6
14.11.1996	0,63	0,64	0,64	1,25	1,25	1,22
17.9.1999	0,79	0,8	0,79	1,26	1,29	1,26
11.9.2000	1,06	1,07	1,07	1,55	1,59	1,57
18.6.2001	0,69	0,69	0,68	1,2	1,2	1,17
28.5.2002	2,19	2,2	2,33	3,12	3,14	3,25
19.2.2003	0,95	0,95	0,95	1,61	1,63	1,63
23.8.2004	0,96	0,96	0,96	1,5	1,51	1,52

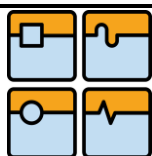


Obr. 13. Závislost ztrátového činitele na čase

3.2 HYDROALTERNÁTOR EŠT-TG2

Tab. 10. Výrobní štítek TG2

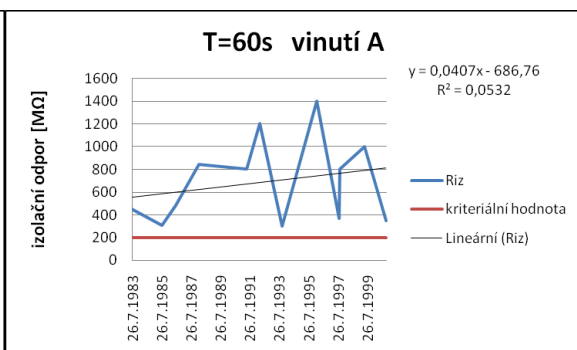
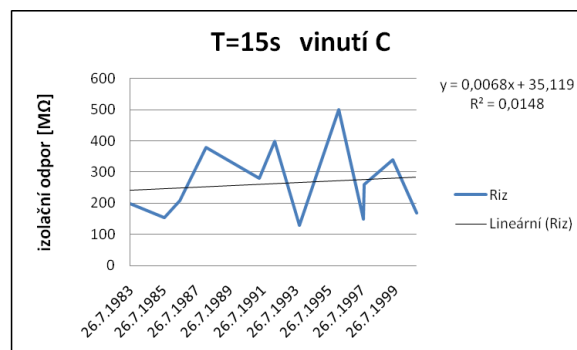
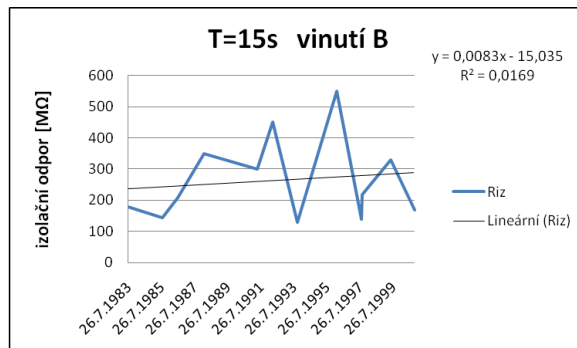
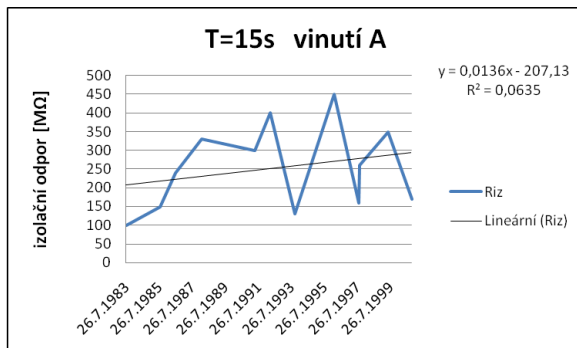
ROK VÝROBY:	1943	Us:	10,5 kV
TYP:	VTA-650/175x36	Ur:	425 V
VÝROBNÍ ČÍSLO:	121010	Is:	825 A
OTÁČKY:	166,6 ot/min	cos:	0,75
VÝKON:	11250 kVA	f:	50 Hz
TYP IZOLACE:	B		

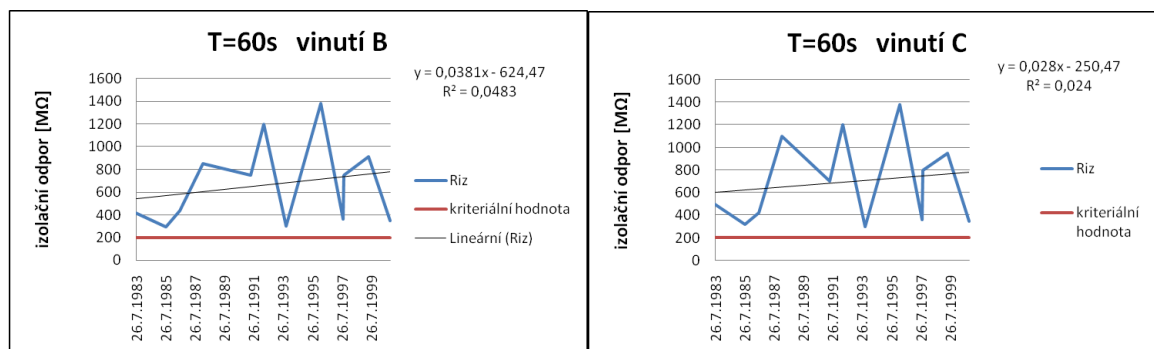


3.2.1 IZOLAČNÍ ODPOR STATORU TG2

Tab. 11. Izolační odpor statoru TG2

IZOLAČNÍ ODPOR STATORU [Ω]						
T [s]	15			60		
vinutí	A	B	C	A	B	C
26.7.1983	100	180	200	450	420	500
6.8.1985	150	145	155	305	295	320
25.7.1986	240	210	210	480	440	420
22.2.1988	330	350	380	840	850	1100
13.5.1991	300	300	280	800	750	700
15.4.1992	400	450	400	1200	1200	1200
13.10.1993	130	130	130	300	300	300
27.2.1996	450	550	500	1400	1380	1380
29.8.1997	160	140	150	370	360	360
15.9.1997	260	220	260	800	750	800
24.5.1999	350	330	340	1000	910	950
8.11.2000	170	170	170	350	350	350



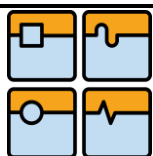


Obr. 14. Závislost izolačního odporu na čase TG2

3.2.2 NABÍJECÍ PROUDY STATORU TG2

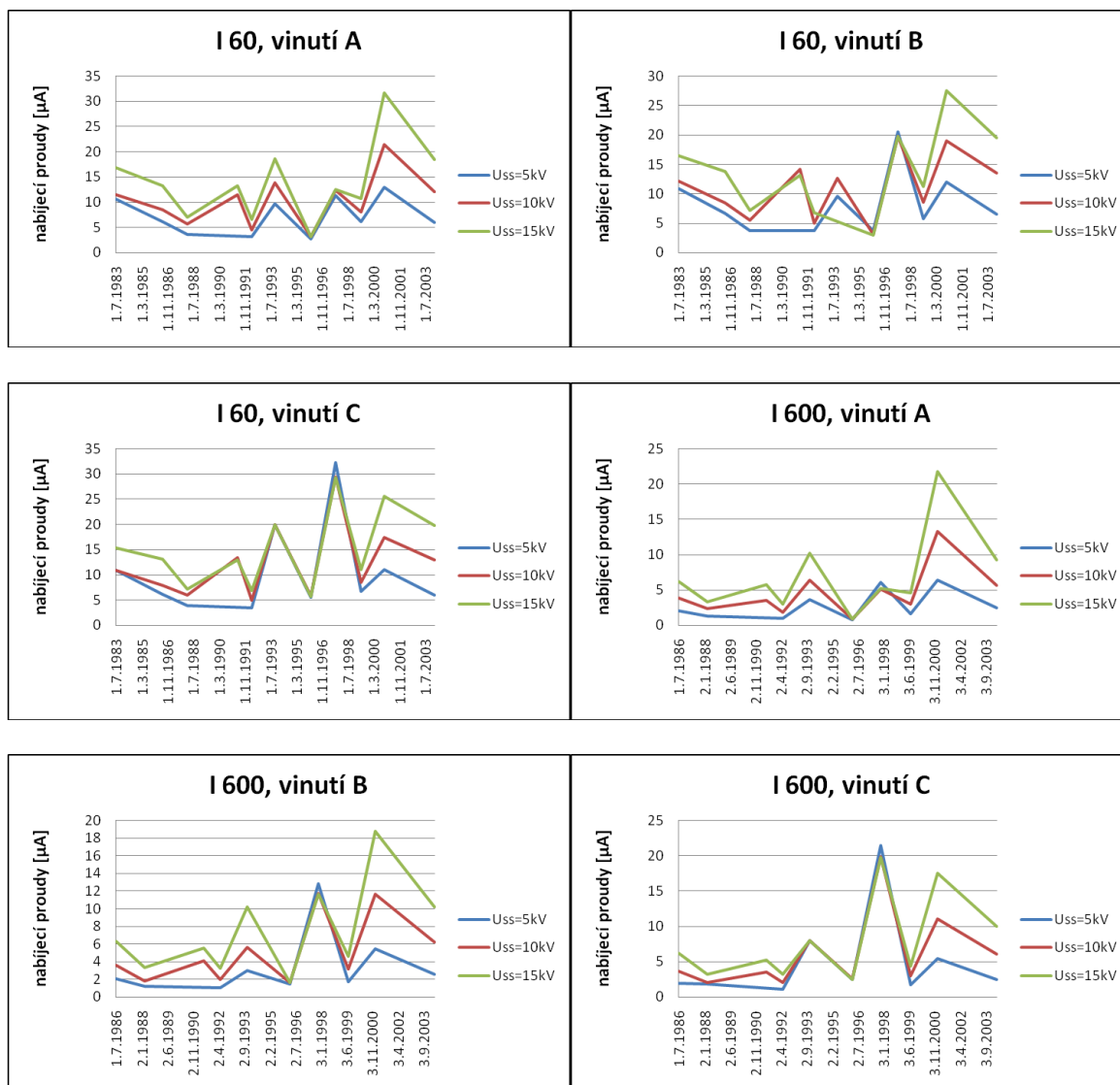
Tab. 12. Nabíjecí proudy statoru TG2

nabíjecí proudy [μ A]	I 60								
vinutí	A			B			C		
U _{ss} [kV]	5	10	15	5	10	15	5	10	15
26.7.1983	10,6	11,4	16,9	10,8	12,2	16,4	10,9	11	15,4
25.7.1986	6,2	8,4	13,2	6,7	8,4	13,8	6,1	8	13,2
22.2.1988	3,7	5,6	7	3,8	5,5	7,2	3,9	6	7,2
13.5.1991		11,4	13,2		14,2	13,2		13,5	13
15.4.1992	3,25	4,5	6,63	3,75	5	6,75	3,5	5	7
13.10.1993	9,8	13,8	18,6	9,6	12,6		20	20	20
27.2.1996	2,75	3,13	3,13	3,75	3,13	3	5,6	5,9	5,75
15.9.1997	11,38	12,38	12,5	20,5	19,75	19,75	32,23	29,5	29,25
24.5.1999	6,13	8	10,75	5,75	8,62	11,25	6,75	8,62	11,12
8.11.2000	13	21,37	31,75	12	19	27,5	11	17,5	25,5
5.2.2004	6	12	18,5	6,5	13,5	19,5	6	13	19,8



Tab. 13. Nabíjecí proudy statoru TG2

nabíjecí proudy [μA]	I 600								
Vinutí	A			B			C		
Uss [kV]	5	10	15	5	10	15	5	10	15
25.7.1986	2	3,8	6,2	2,1	3,6	6,3	2	3,6	6,2
22.2.1988	1,3	2,4	3,3	1,2	1,8	3,3	1,8	2	3,2
13.5.1991		3,5	5,8		4,1	5,5		3,5	5,3
15.4.1992	0,93	1,87	3,05	1,05	2	3,25	1,1	2,05	3,25
13.10.1993	3,6	6,4	10,2	3	5,6	10,2	8	8	8
27.2.1996	0,75	0,88	0,88	1,5	1,63	1,63	2,5	2,5	2,5
15.9.1997	6	5,13	5,25	12,88	11,75	11,63	21,5	19,88	19,75
24.5.1999	1,62	3	4,62	1,75	3,12	4,62	1,75	3	4,37
8.11.2000	6,37	13,25	21,75	5,5	11,68	18,75	5,5	11	17,5
5.2.2004	2,4	5,6	9,3	2,6	6,25	10,2	2,5	6	10

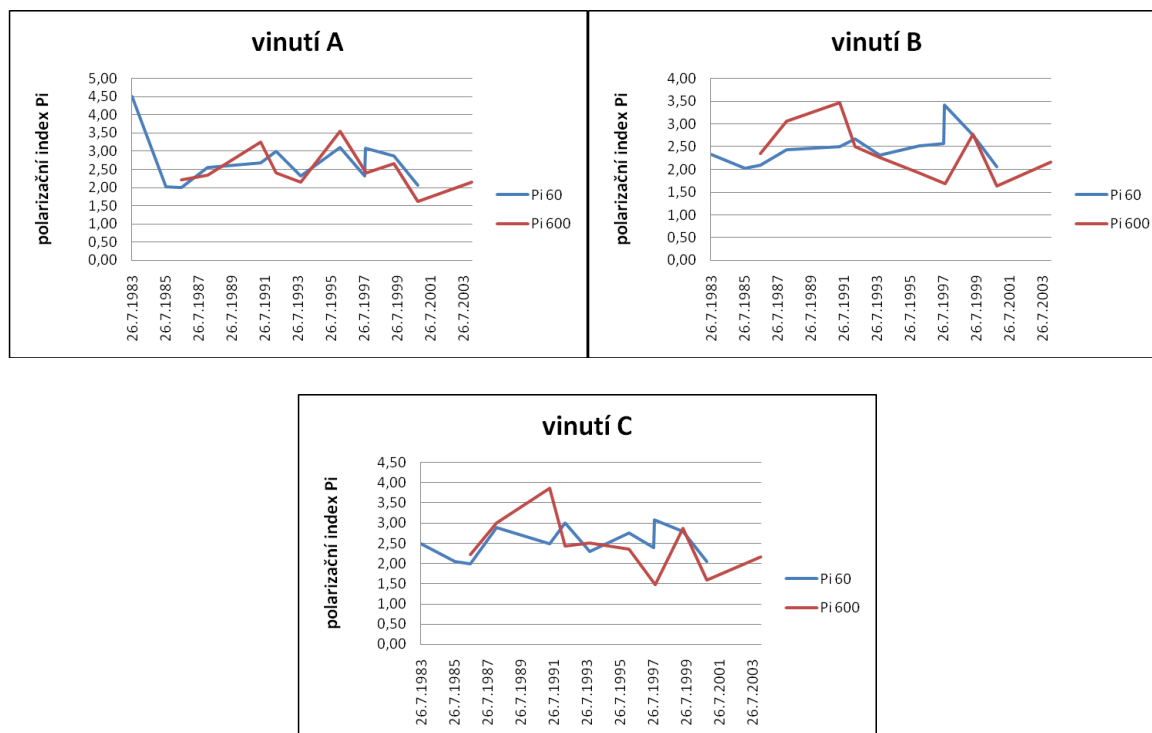


Obr. 15. Závislost nabíjecího proudu na čase TG2

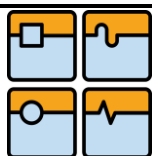
3.2.3 POLARIZAČNÍ INDEX TG2

Tab. 14. Polarizační index TG2

POLARIZAČNÍ INDEX P_i												
VINUTÍ	A	Pi 60		Pi600								
		B	C	A			B			C		
				5	10	15	5	10	15	5	10	15
26.7.1983	4,50	2,33	2,50									
6.8.1985	2,03	2,03	2,06									
25.7.1986	2,00	2,10	2,00	3,10	2,21	2,13	3,19	2,33	2,19	3,05	2,22	2,13
22.2.1988	2,55	2,43	2,89	2,85	2,33	2,12	3,17	3,06	2,18	2,17	3,00	2,25
13.5.1991	2,67	2,50	2,50		3,26	2,28		3,46	2,40		3,86	2,45
15.4.1992	3,00	2,67	3,00	3,49	2,41	2,17	3,57	2,50	2,08	3,18	2,44	2,15
13.10.1993	2,31	2,31	2,31	2,72	2,16	1,82	3,20	2,25		2,50	2,50	2,50
27.2.1996	3,11	2,51	2,76	3,67	3,56	3,56	2,50	1,92	1,84	2,24	2,36	2,30
29.8.1997	2,31	2,57	2,40									
15.9.1997	3,08	3,41	3,08	1,90	2,41	2,38	1,59	1,68	1,70	1,50	1,48	1,48
24.5.1999	2,86	2,76	2,79	3,78	2,67	2,33	3,29	2,76	2,44	3,86	2,87	2,54
8.11.2000	2,06	2,06	2,06	2,04	1,61	1,46	2,18	1,63	1,47	2,00	1,59	1,46
5.2.2004				2,50	2,14	1,99	2,50	2,16	1,91	2,40	2,17	1,98



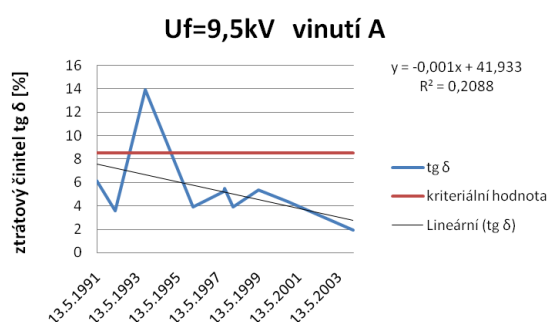
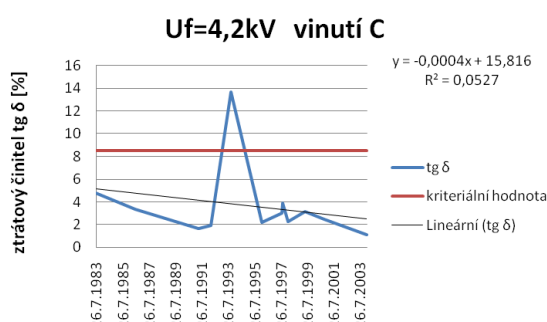
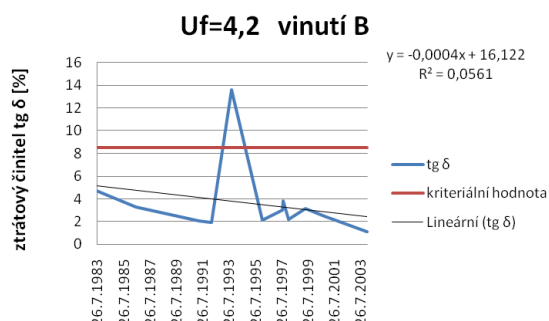
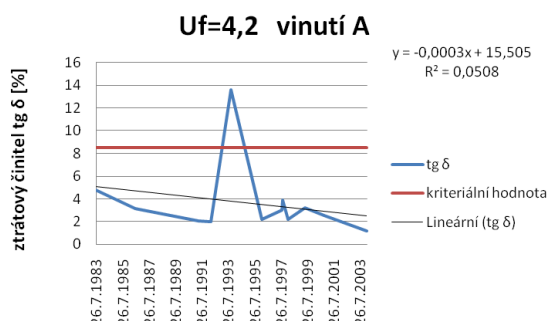
Obr. 16. Závislost polarizačních indexů na čase TG2

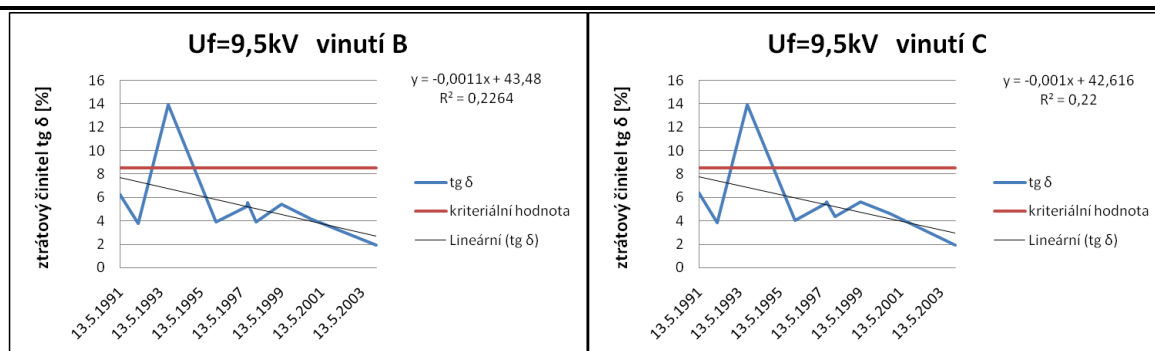


3.2.4 ZTRÁTOVÝ ČINITEL $\tan \delta$ TG2

Tab. 15. Ztrátový činitel TG2

ZTRÁTOVÝ ČINITEL $\tan \delta$ [%]						
U _f [kV]	4,2			9,5		
Vinutí	A	B	C	A	B	C
26.7.1983	4,72	4,72	4,76			
25.7.1986	3,12	3,32	3,35			
13.5.1991	2	2,1	1,7	6,16	6,26	6,37
15.4.1992	1,95	1,94	1,96	3,58	3,75	3,79
13.10.1993	13,59	13,6	13,64	13,9	13,9	13,9
27.2.1996	2,18	2,17	2,19	3,9	3,9	4,05
29.8.1997	3	3	3,02	5,22	5,2	5,45
15.9.1997	3,89	3,87	3,88	5,47	5,52	5,58
22.2.1998	2,2	2,19	2,28	3,9	3,93	4,35
24.5.1999	3,17	3,17	3,19	5,37	5,43	5,59
8.11.2000	2,49	2,47	2,49	4,41	4,19	4,63
5.2.2004	1,15	1,134	1,13	1,95	1,93	1,91





Obr. 17. Závislost ztrátového čítele tg na čase TG2

3.3 HYDROALTERNÁTOR EŠT-TG3

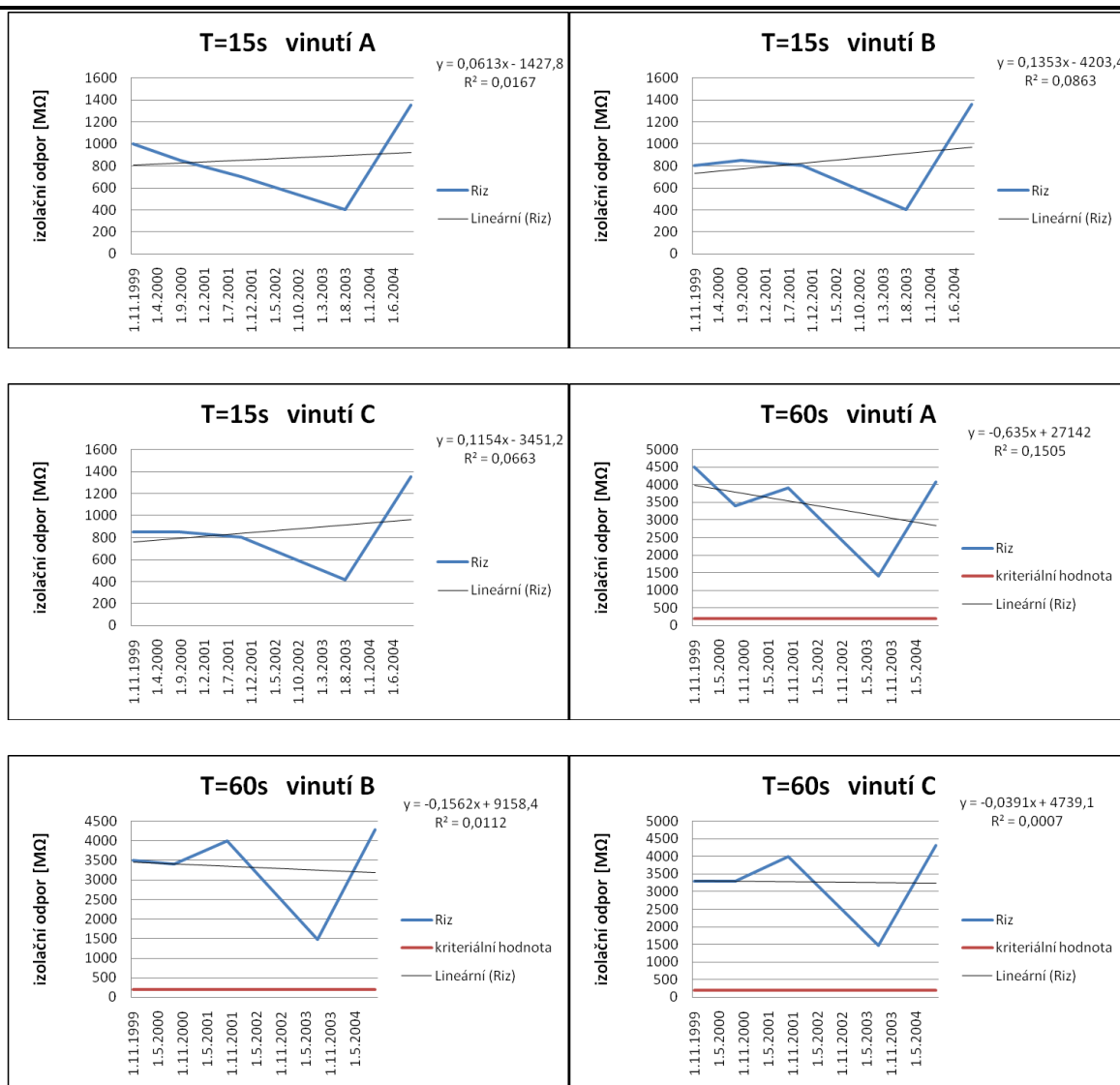
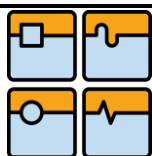
Tab. 16. Výrobní štítek TG3

ROK VÝROBY:	1995	Us:	13,8 kV
TYP:	HVY-710740/10	Ur:	335 V
VÝROBNÍ ČÍSLO:	34260	Is:	2217 A
OTÁČKY:	600 ot/min	cos:	0,75
VÝKON:	53000 kVA	f:	50 Hz
TYP IZOLACE:	F		

3.3.1 IZOLAČNÍ ODPOR STATORU TG3

Tab. 17. Izolační odpor statoru TG3

IZOLAČNÍ ODPOR STATORU [Ω]						
T [s]	15			60		
vinutí	A	B	C	A	B	C
2.11.1999	1000	800	850	4500	3500	3300
20.9.2000	850	850	850	3400	3400	3300
16.10.2001	700	800	800	3900	4000	4000
21.8.2003	400	400	414	1400	1480	1480
8.10.2004	1350	1360	1350	4080	4280	4320



Obr. 18. Závislost izolačního odporu na čase TG3

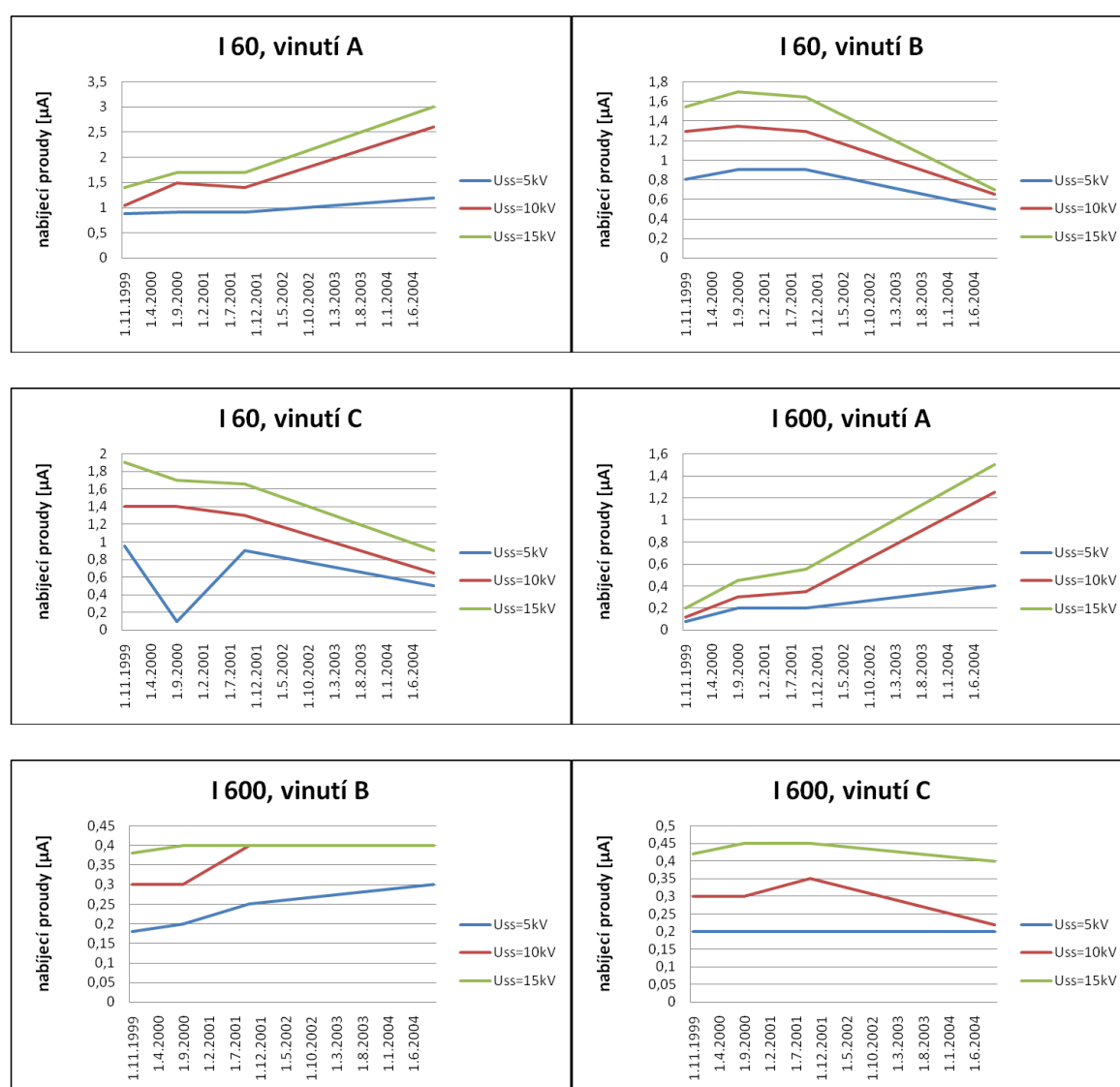
3.3.2 NABÍJECÍ PROUDY STATORU TG3

Tab. 18. Nabíjecí proudy statoru TG3

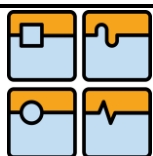
nabíjecí proudy [μA]	I 60								
vinutí	A			B			C		
U _{ss} [kV]	5	10	15	5	10	15	5	10	15
2.11.1999	0,875	1,05	1,4	0,8	1,3	1,55	0,95	1,4	1,9
20.9.2000	0,9	1,5	1,7	0,9	1,35	1,7	0,1	1,4	1,7
16.10.2001	0,9	1,4	1,7	0,9	1,3	1,65	0,9	1,3	1,65
8.10.2004	1,2	2,6	3	0,5	0,65	0,7	0,5	0,65	0,9

Tab. 19. Nabíjecí proudy statoru TG3

nabíjecí proudy [μA]	I 600								
vinutí	A			B			C		
U _{ss} [kV]	5	10	15	5	10	15	5	10	15
2.11.1999	0,08	0,12	0,2	0,18	0,3	0,38	0,2	0,3	0,42
20.9.2000	0,2	0,3	0,45	0,2	0,3	0,4	0,2	0,3	0,45
16.10.2001	0,2	0,35	0,55	0,25	0,4	0,4	0,2	0,35	0,45
8.10.2004	0,4	1,25	1,5	0,3	0,4	0,4	0,2	0,22	0,4



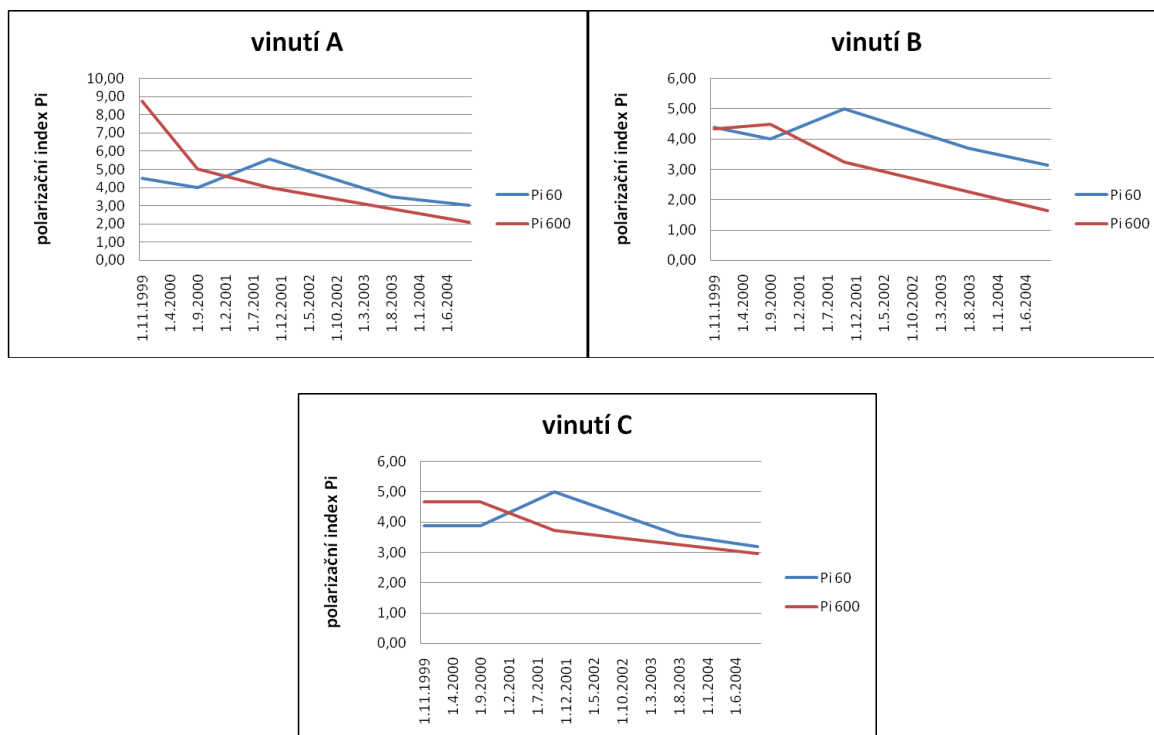
Obr. 19. Závislost nabíjecích proudů statoru na čase TG3



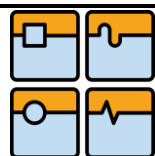
3.3.3 POLARIZAČNÍ INDEX TG3

Tab. 20. Polarizační index TG3

POLARIZAČNÍ INDEX P_i												
VINUTÍ	Pi 60			Pi600								
	A	B	C	A			B			C		
Uss [kV]				5	10	15	5	10	15	5	10	15
2.11.1999	4,50	4,38	3,88	10,94	8,75	7,00	4,44	4,33	4,08	4,75	4,67	4,52
20.9.2000	4,00	4,00	3,88	4,50	5,00	3,78	4,50	4,50	4,25	0,50	4,67	3,78
16.10.2001	5,57	5,00	5,00	4,50	4,00	3,09	3,60	3,25	4,13	4,50	3,71	3,67
21.8.2003	3,50	3,70	3,57									
8.10.2004	3,02	3,15	3,20	3,00	2,08	2,00	1,67	1,63	1,75	2,50	2,95	2,25



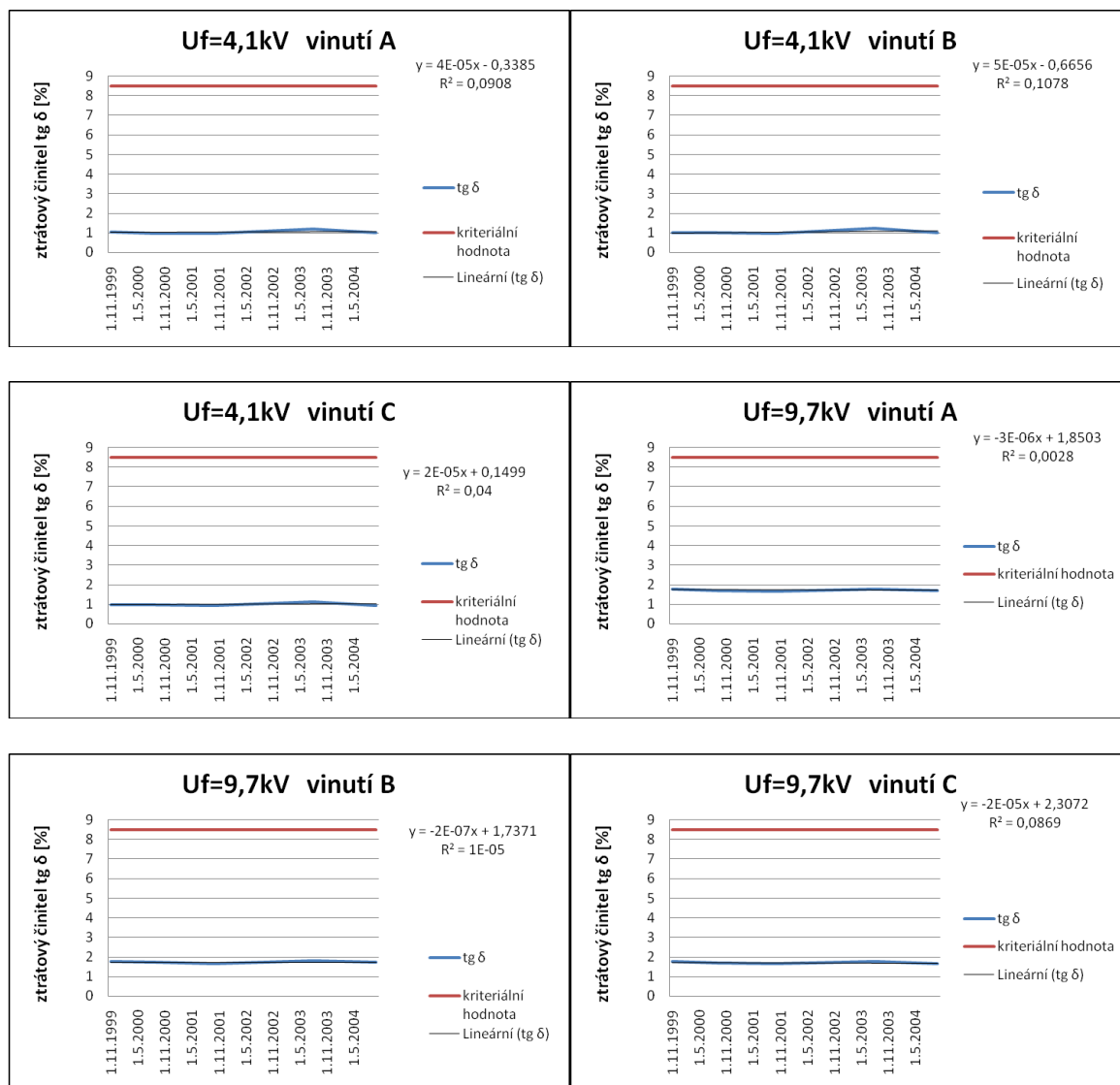
Obr. 20. Závislost polarizačních indexů na čase TG3



3.3.4 ZTRÁTOVÝ ČINITEL $\tan \delta$ TG3

Tab. 21. Ztrátový činitel TG3

ZTRÁTOVÝ ČINITEL $\tan \delta$ [%]						
Uf [kV]	4,1			9,7		
vinutí	A	B	C	A	B	C
2.11.1999	1,04	1,02	0,98	1,77	1,77	1,74
20.9.2000	0,99	0,99	0,96	1,71	1,71	1,69
16.10.2001	0,98	0,97	0,93	1,67	1,66	1,67
21.8.2003	1,2	1,22	1,13	1,78	1,79	1,75
8.10.2004	1	0,99	0,93	1,71	1,71	1,66



Obr. 21. Závislost ztrátového činitele na čase TG3

4. ZHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

4.1 PARAMETRY POUŽITÝCH STROJŮ

K dispozici máme naměřená data ze tří hydroalternátorů dodnes fungujících v energetické praxi. Všechny stroje pracují v elektrárně Štěchovice. První dva stroje, TG1 a TG2 jsou podstatně starší než třetí hydroalternátor TG3. TG1 a TG2 byly vyrobeny v roce 1943. Oba stroje byly provozovány, ale nejsou k dispozici naměřená data. U TG1 jsou první data k dispozici v roce 1974 a u TG2 až v roce 1983. Od té doby jsou stroje pravidelně měřeny. Třetí stroj TG3 je podstatně novější a mladší stroj. Byl vyroben v roce 1995 a za celou svou dosavadní životnost je pravidelně měřen.

Stroje jsou rozdílné, co se týče jejich výkonu. Stroje TG1 a TG2 mají výkon zhruba stejný. TG1 má výkon 11000 kVA a TG2 11250 kVA. Třetí hydroalternátor má výkon 53000 kVA. Z toho vyplývá, že TG3 má asi pětikrát větší výkon než TG1 a TG2. Stroj je tím pádem větší a je u něho použito více izolace.

Stroje se také liší použitým typem izolace. U strojů TG1 a TG3 byla použita izolace typu F a u stroje TG2 byla použita izolace typu B. Různé označení typů izolací nám slouží k určení teplotní odolnosti izolačních materiálů.

4.2 URČOVÁNÍ TEPLOTNÍ ODOLNOSTI IZOLANTŮ

Klasifikace odolnosti všech elektrických zařízení závisí také na tepelné odolnosti izolačního systému, který většinou tvoří nejslabší článek z hlediska spolehlivosti celého zařízení [2]. Na elektrická zařízení je nutno pohlížet z hlediska spolehlivosti jako na spolehlivostní sériový řetězec. Proto je nutno zajistit dostatečnou spolehlivost každého článku řetězce k dosažení požadované celkové spolehlivosti.

Odolnost izolačního materiálu vůči teplotě je jedním z kritérií, podle nichž se hodnotí a třídí izolanty. Materiály s přibližně shodnými tepelnými vlastnostmi se řadí na základě dlouholetých zkušeností do tzv. tepelných tříd. Každé třídě je přiřazena maximální teplota, do níž jsou použitelné. Toto rozdělení je hrubé, protože je obtížné najít takovou zkoušku, která by izolanty objektivně rozřadila do jednotlivých tříd. Nejpresnější by byly ověřovací zkoušky při maximální provozní teplotě v podmínkách odpovídajících skutečnému provozu. To je však obtížné, zdlouhavé a nákladné.

Tab. 1 – Přehled tepelných tříd při izolačních materiálech [2]

TŘÍDA	70	Y	A	E	B	F	H	200	220	250
TEPLOTNÍ HRANICE	70°C	90°C	105°C	120°C	130°C	155°C	180°C	200°C	220°C	250°C

Zkoušky, které se pro hodnocení materiálů vzhledem k určení jejich tepelné odolnosti používají, napodobují provozní podmínky ve zjednodušeném uspořádání.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 44
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

4.3 POPIS VLASTNOSTÍ TG1

IZOLAČNÍ ODPOR STATORU:

Izolační odpor statoru TG1 byl měřen ve dvou časových intervalech. První měření probíhalo v čase 15 s po přiložení zkušebního napětí a druhé měření probíhalo v čase 60 s po přiložení zkušebního napětí. Obě měření se prováděly na všech třech fázích vinutí A, B, C.

Po proložení naměřených hodnot přímkou jsem zjistil, že při měření v čase 15 s mají trendy u vinutí A a u vinutí C klesající tendenci, u vinutí B je tendence mírně rostoucí. U měření probíhajícího v čase 60 s je tendence klesající u všech třech vinutí.

U měření izolačního odporu statoru mám k dispozici jeho kritériální hodnoty pouze pro měření probíhající v čase 60 s. Pro měření probíhající v čase 15 s není kritériální hodnota udávána. Toto měření slouží dále pro výpočet polarizačního indexu. Kritériální hodnota pro izolační odpor v jedné minutě je $R_{iz} > 2M\Omega$. Doporučená hodnota pro standartní technickou bezpečnost je $R_{iz} > 200M\Omega$. Na tuto hodnotu však neklesne ani na jednom vinutí po celou dobu měření. Svého maxima dosahuje v letech 1981 a 1989, svého minima u měření probíhajícího v čase 15 s v roce 1980 a u měření probíhajícího v čase 60 s v roce 1994.

NABÍJECÍ PROUDY STATORU:

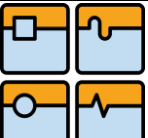
Izolační proudy statoru TG1 byly měřeny ve dvou časových intervalech. První měření probíhalo v čase 60 s po přiložení zkušebního napětí a druhé měření v čase 600 s po přiložení zkušebního napětí. Obě měření se prováděly na všech třech fázích vinutí A, B, C a při napětích 5 kV, 10 kV a 15 kV.

U měření probíhajícího v čase 60 s se projevují polarizace, proto pro lepší posouzení kvality izolace používáme hodnoty naměřené v čase 600 s. V tomto čase již polarizace odezněly a projevují se pouze vodivostní proudy. Z vynesení závislostí vidíme, že na vinutí A u obou měření a při všech třech napětích nabíjecí proudy statoru mají tendenci pozvolna klesat až do svého minima v roce 1995. U vinutí B a C, při obou měřeních a při všech třech napětích nabíjecí proudy statoru prudce klesají do roku 1980. Dále je jejich průběh pozvolný až do svého minima také v roce 1995. Při zbývajících měřeních je průběh na vinutí A, B i C stejný. Potvrdila se zde platnost Ohmova zákona, že se zvětšujícím se napětím proud roste.

POLARIZAČNÍ INDEX:

Polarizační index TG1 byl měřen ve dvou časových intervalech. První měření probíhalo v čase 60 s po přiložení zkušebního napětí a druhé měření v čase 600 s po přiložení zkušebního napětí. Obě měření se prováděly na všech třech fázích vinutí A, B, C.

U měření polarizačního indexu máme k dispozici kritériální hodnotu. Měření vyhovuje při splnění podmínky: $Pi600 > Pi60$. Tato podmínka byla dodržena při všech měřeních a na všech vinutích A, B i C od roku 1981 až dosud. Pouze v roce 1991 se hodnoty obou polarizačních indexů velmi přiblížili. Při měřeních před rokem 1981

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 45
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

podmínka dodržena nebyla. To však mohla způsobit nedostatečně vytvrdlá pryskyřice v izolaci po převinutí stroje.

ZTRÁTOVÝ ČINITEL $\tan \delta$:

Ztrátový činitel $\tan \delta$ byl měřen při různých hodnotách napětí. První měření probíhalo při napětí 4,2 kV a druhé měření probíhalo při napětí 10,5 kV. Obě měření se prováděly na všech třech fázích vinutí A, B i C.

Po proložení všech naměřených hodnot přímkou jsme zjistili, že všechny trendy při obou napětích a na všech třech vinutích mají klesající charakter.

Pro měření ztrátového činitele máme k dispozici kritériální hodnotu. Pro obě měřená napětí je tato hodnota 8,5%. Při prvním měření na napětí 4,2 kV jsou hodnoty naměřené na vinutích A, B i C velmi podobné. Svého maxima dosahují v letech 1978, 1996 a 2002. Kritériální hodnoty však nedosáhly nikdy. Při druhém měření na napětí 10,5 kV jsou naměřené hodnoty na vinutích A, B i C také velmi podobné. Svého maxima dosahují v letech 1980, 1996 a 2002. Kritériální hodnoty nedosáhly nikdy.

4.4 POPIS VLASTNOSTÍ TG2

IZOLAČNÍ ODPOR STATORU:

Izolační odpor statoru TG2 byl měřen ve dvou časových intervalech. První měření probíhalo v čase 15 s po přiložení zkušebního napětí a druhé měření probíhalo v čase 60 s po přiložení zkušebního napětí. Obě měření se prováděly na všech třech fázích vinutí A, B, C.

Po proložení naměřených hodnot přímkou jsem zjistil, že jak u měření probíhajícího v čase 15 s, tak u měření probíhajícího v čase 60 s mají trendy na všech fázích vinutí rostoucí tendenci.

U měření izolačního odporu statoru mám k dispozici jeho kritériální hodnoty pouze pro měření probíhající v čase 60 s. Pro měření probíhající v čase 15 s není kritériální hodnota udávaná. Toto měření slouží dále pro výpočet polarizačního indexu. Kritériální hodnota pro izolační odpor v jedné minutě je $R_{iz} > 2M\Omega$. Doporučená hodnota pro standartní technickou bezpečnost je $R_{iz} > 200M\Omega$. Na tuto hodnotu však neklesne ani na jednom vinutí za celou dobu měření. Při měření probíhajícím v čase 15 s dosáhl izolační odpor svého maxima v roce 1996 a svého minima v roce 1983. Při měření probíhajícím v čase 60 s dosáhl izolační odpor svého maxima v roce 1996 a svého minima v roce 1985 a 1983.

NABÍJECÍ PROUDY STATORU:

Izolační proudy statoru TG2 byly měřeny ve dvou časových intervalech. První měření probíhalo v čase 60 s po přiložení zkušebního napětí a druhé měření v čase 600 s po přiložení zkušebního napětí. Obě měření se prováděly na všech třech fázích vinutí A, B, C a při napětích 5 kV, 10 kV a 15 kV.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 46
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

U měření probíhajícího v čase 60 s se projevují polarizace, proto pro lepší posouzení kvality izolace používáme hodnoty naměřené v čase 600 s. V tomto čase již polarizace odezněly a projevují se pouze vodivostní proudy. Z vynesných závislostí je patrné, že naměřené hodnoty u všech měření a obou časech pozvolna klesají až do svého minima. Tohoto minima dosáhly hodnoty nabíjecích proudů při měření probíhajícího v čase 60 s v roce 1991 a při měření probíhajícího v čase 600 s v roce 1992. Dále jsou naměřené hodnoty každý rok měření velmi rozdílné. Svého maxima dosahují hodnoty nabíjecích proudů při obou časech měření na vinutí A i B v roce 2000, na vinutích C v roce 1997. Opět se potvrdila platnost Ohmova zákona, že se zvětšujícím se napětí proud roste. Z grafů můžeme dále pozorovat větší rozptyl naměřených hodnot ve všech třech měřících napětích na konci měření v roce 2004 než na začátku v letech 1983 a 1986.

POLARIZAČNÍ INDEX:

Polarizační index TG2 byl měřen ve dvou časových intervalech. První měření probíhalo v čase 60 s po přiložení zkušebního napětí a druhé měření v čase 600 s po přiložení zkušebního napětí. Obě měření se prováděly na všech třech fázích vinutí A, B, C.

U měření polarizačního indexu máme k dispozici kritériální hodnotu. Měření vyhovuje při splnění podmínky: $Pi600 > Pi60$. Z vynesných závislostí je patrné, že u vinutí B a C byla tato podmínka splněna od počátku měření v roce 1983 až do roku 1992. Dále až dosud kritériální podmínka splněna není. Pouze v roce 1999 se naměřené hodnoty dostaly zhruba na stejnou hodnotu. U vinutí A byly po celou dobu měření sledovány hodnoty s minimálním rozdílem. Vynesné závislosti se velmi prolínají.

ZTRÁTOVÝ ČINITEL tg δ:

Ztrátový činitel tg δ byl měřen při různých hodnotách napětí. První měření probíhalo při napětí 4,2 kV a druhé měření probíhalo při napětí 9,5 kV. Obě měření se prováděly na všech třech fázích vinutí A, B i C.

Po proložení všech naměřených hodnot přímkou jsme zjistili, že všechny trendy při obou napětích a na všech třech vinutích mají klesající charakter.

Pro měření ztrátového činitele máme k dispozici kritériální hodnotu. Pro obě měřená napětí je tato hodnota 8,5%. Z vynesných závislostí je patrné, že při prvním měření probíhajícího při napětí 4,2 kV, jsou si naměřené hodnoty velmi podobné. Po celou dobu měření se nedostanou nad kritériální mez, kromě měření v roce 1993, kdy dosáhly svého maxima. Svého minima dosáhly v roce 2004. Při druhém měření probíhajícího při napětí 9,5 kV jsou naměřené hodnoty na všech třech vinutích také velmi podobné. Po celou dobu měření se nedostanou nad kritériální mez, kromě měření v roce 1993, kdy dosáhly svého maxima. Svého minima dosáhly také v roce 2004.

4.5 POPIS VLASTNOSTÍ TG3

IZOLAČNÍ ODPOR STATORU:

Izolační odpor statoru TG3 byl měřen ve dvou časových intervalech. První měření probíhalo v čase 15 s po přiložení zkušebního napětí a druhé měření probíhalo v čase 60 s po přiložení zkušebního napětí. Obě měření se prováděly na všech třech fázích vinutí A, B, C.

Po proložení naměřených hodnot přímkou jsem zjistil, že u měření probíhajícího v čase 15 s mají trendy po celou dobu měření rostoucí tendenci. U měření probíhajícího v čase 60 s mají trendy po celou dobu měření na všech fázích vinutí klesající tendenci.

U měření izolačního odporu statoru mám k dispozici jeho kritériální hodnoty pouze pro měření probíhající v čase 60 s. Pro měření probíhající v čase 15 s není kritériální hodnota udávána. Toto měření slouží dále pro výpočet polarizačního indexu. Kritériální hodnota pro izolační odpor v jedné minutě je $R_{iz} > 2M\Omega$. Doporučená hodnota pro standartní technickou bezpečnost je $R_{iz} > 200M\Omega$. Tuto hodnotu po celou dobu měření naměřené hodnoty nepřesáhnou. U měření probíhajícího v čase 15 s dosáhly naměřené hodnoty izolačního odporu na všech třech vinutích svého maxima v roce 2004 a svého minima v roce 2003. U měření probíhajícího v čase 60 s dosáhly naměřené hodnoty izolačního odporu svého maxima na vinutí A v roce 1999, na vinutích B a C v roce 2004 a svého minima na všech třech vinutích v roce 2003.

NABÍJECÍ PROUDY STATORU:

Izolační proudy statoru TG2 byly měřeny ve dvou časových intervalech. První měření probíhalo v čase 60 s po přiložení zkušebního napětí a druhé měření v čase 600 s po přiložení zkušebního napětí. Obě měření se prováděly na všech třech fázích vinutí A, B, C a při napětích 5 kV, 10 kV a 15 kV.

U měření probíhajícího v čase 60 s se projevují polarizace, proto pro lepší posouzení kvality izolace používáme hodnoty naměřené v čase 600 s. V tomto čase již polarizace odezněly a projevují se pouze vodivostní proudy. Z vynesných závislostí je patrné, že při měření probíhajícího v čase 60 s mají trendy u vinutí A rostoucí tendenci, svého maxima dosahují v roce 2004 a svého minima v roce 1999. U vinutí B a C mají trendy tendenci klesající, svého maxima dosahují u vinutí B v roce 2000 a u vinutí C v roce 1999. Svého minima dosahují u vinutí B i C v roce 2004, pouze u vinutí C při zkušebním napětí 5 kV dosahují naměřené hodnoty svého minima v roce 2000. U měření probíhající v čase 600 s mají trendy na všech třech vinutích tendenci rostoucí, až na vinutí C při zkušebním napětí 10 kV. Zde je tendence klesající. Na vinutích A a B dosahují naměřené hodnoty svého maxima v roce 2004 a svého minima v roce 1999. U vinutí C dosahují naměřené hodnoty svého maxima v roce 2001 a svého minima v roce 2004.

POLARIZAČNÍ INDEX:

Polarizační index TG3 byl měřen ve dvou časových intervalech. První měření probíhalo v čase 60 s po přiložení zkušebního napětí a druhé měření v čase 600 s po přiložení zkušebního napětí. Obě měření se prováděly na všech třech fázích vinutí A, B, C.

U měření polarizačního indexu máme k dispozici kritériální hodnotu. Měření vyhovuje při splnění podmínky: $P_{i600} > P_{i60}$. Z vynesných závislostí je patrné, že tato podmínka byla dodržena od začátku měření v roce 1999 do roku 2001. Od roku 2001 Na žádném vinutí až dosud kritériální podmínka dodržena není.

ZTRÁTOVÝ ČINITEL $\tan \delta$:

Ztrátový činitel $\tan \delta$ byl měřen při různých hodnotách napětí. První měření probíhalo při napětí 4,1 kV a druhé měření probíhalo při napětí 9,7 kV. Obě měření se prováděly na všech třech fázích vinutí A, B i C.

Po proložení všech naměřených hodnot přímkou jsme zjistili, že všechny trendy při obou napětích a na všech třech vinutích mají velmi mírně klesající charakter.

Pro měření ztrátového činitele máme k dispozici kritériální hodnotu. Pro obě měřená napětí je tato hodnota 8,5%. Z vynesných hodnot je patrné, že naměřené hodnoty jak u měření probíhajícího při zkušebním napětí 4,1 kV, tak při zkušebním napětí 9,7 kV jsou téměř totožné a kritériální hodnoty po celou dobu měření nedosáhnou.

4.6 ZÁVĚR

V kapitole 1.1.3 je definována spolehlivost jako obecný termín vyjadřující stálost funkčních a dalších vlastností objektu během jeho používání za stanovených podmínek. Jako sledované objekty byly použity stroje – hydrogenerátory, jejichž parametry jsou blíže popsány v kapitole 4.1. U těchto strojů byly v určitých časových intervalech měřeny tyto diagnostické veličiny:

- Izolační odpor statoru R_{iz}
- Nabíjecí proudy statoru I_{60} a I_{600}
- Polarizační indexy P_{i60} a P_{i600}
- Ztrátový činitel $\tan \delta$

Podrobnosti o jednotlivých diagnostických veličinách jsou popsány v kapitole 2.5. V celé diplomové práci je sledována stálost funkčních vlastností sledovaných objektů.

Měření izolačního odporu je jednou z nejstarších a nejdůležitějších metod pro ověřování stavu izolačního systému elektrických strojů točivých. Po porovnání naměřených hodnot všech tří zadaných hydroalternátorů jsem zjistil že, všechny hodnoty izolačního odporu mají stoupající trendy pouze u stroje TG2 a to na všech fázích a obou časech měření oproti stroji TG1, který má kromě fáze B při měření

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 49
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

v čase 15 s všechny trendy klesající. Stroj TG3 má na všech třech fázích stoupající trend pouze u měření v čase 15 s. V čase 60 s jsou všechny trendy klesající. Z hlediska izolačního odporu jsem shledal všechny tři stroje za vyhovující, protože žádná naměřená hodnota neklesla pod kritériální mez 200 MΩ.

Po položení naměřených hodnot nabíjecích proudů při různých zkušebních napětích proti času jsem zjistil že, stroj TG1 má při starších měřeních větší rozptyl hodnot než u novějších měření oproti stroji TG2, který má při starších měřeních rozptyl menší než u novějších měření. U stroje TG3 nemám k dispozici tak rozsáhlá data, abych ho mohl porovnat se stroji TG1 a TG2 z hlediska nabíjecích proudů.

Polarizační index je hodnota, která nám charakterizuje stav izolace, především přítomnost vlhkosti. Po porovnání vypočtených hodnot všech tří strojů jsem zjistil, že u stroje TG1 u měřeních staršího data ani na jedné fázi nebyla splněna kritériální podmínka, u novějších měření tato podmínka splněna je. Oproti tomu stroj TG3 a TG2 kromě fáze A, kde není kritériální podmínka splněna po celou dobu měření, má kritériální podmínku u starších měření splněnu a u novějších ji neplní. Nesplnění kritériální podmínky z hlediska porovnání polarizačních indexů nám signalizuje navlhlý nebo silně znečištěný stroj.

Ztrátový činitel $\tan \delta$ je tangentou ztrátového úhlu, který doplňuje do $\pi/2$ rozdíl fází přiloženého napětí a proudu procházejícího zkoušeným materiálem. Po porovnání naměřených hodnot u všech tří strojů jsem zjistil že, trendy u všech provedených měření na všech fázích mají klesající charakter. U stroje TG3 je klesání trendu oproti strojům TG1 a TG2 velmi mírné z důvodu malého množství naměřených dat. U strojů TG1 a TG3 nedosáhne kritériální hodnoty ani jedno měření. U stroje TG2 je v jednom roce kritériální hodnota překročena a to na všech fázích.

Ve své diplomové práci jsem se snažil přispět k diagnostikovatelnosti elektrických strojů točivých používaných v energetické praxi. Zároveň jsem se snažil naznačit možnosti posouzení spolehlivosti vybraných technických systémů v mém případě elektrických strojů točivých – hydroalternátorů.

	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky	Str. 50
	DIPLOMOVÁ PRÁCE	

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ:

- [1] Mykyska, Antonín: *Bezpečnost a spolehlivost technických systémů*. 2.přepracované vydání. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2006. 206 s. ISBN 80-01-02868-2.
- [2] HAMMER, Miloš: *Metody umělé inteligence v diagnostice elektrických strojů*. 1. vydání. Praha: BEN-technická literatura, 2009. 410 s. ISBN 978-80-7300-231-2.
- [3] MENTLÍK, Václav: *Diagnostika elektrických zařízení*. 1. vydání. Praha: BEN-technická literatura, 2008. 440 s. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [4] JAROLÍM, Karel: *Elektrické přístroje a stroje*. 5. vydání. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1971. 368 s. L 25-C2-II-84/55113/IV.
- [5] Podniková norma ČEZ, a.s. 2006. *Profylaktika izolačního systému strojů točivých – turbogenerátory, hydrogenerátory a vn motory*. ČEZ, a.s., Praha, 2006, 15 s.