

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Diagnostika izolačních systémů točivých elektrických  
strojů**

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin SMĚŠNÝ**  
Osobní číslo: **E13N0027P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Název tématu: **Diagnostika izolačních systémů točivých elektrických strojů**  
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Popište užívané izolační systémy velkých točivých elektrických strojů - porovnejte systémy Resin-rich a VPI.
2. Proveďte rozbor poruch izolačních systémů uvedených strojů.
3. Stanovte diagnostický systém pro sledování poruch izolačních systémů velkých točivých elektrických strojů.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Mentlík, V.: Dielektrické prvky a systémy, BEN Praha 2006
2. Mentlík, V., et all. Diagnostika elektrických zařízení, BEN Praha 2008

Vedoucí diplomové práce: Prof. Ing. Václav Mentlík, CSc.  
Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: 15. října 2014  
Termín odevzdání diplomové práce: 11. května 2015

  
Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



  
Doc. Ing. Vlastimil Škočil, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

## **Abstrakt**

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na diagnostiku izolačních systémů a poruchy velkých točivých strojů. V první kapitole je stručně popsána základní konstrukce turbogenerátorů a hydrogenerátorů. Další kapitola je zaměřena na izolační systémy VPI a resin-rich, kde jsou podrobněji popsány používané materiály, postup výroby, použití a porovnání vlastností těchto výrobních technologií. Ve třetí kapitole je proveden rozbor nejčastějších poruch a jejich příčin. Poslední kapitola se zabývá diagnostickým systémem a používanými metodami pro sledování stavu degradace velkých točivých strojů.

## **Klíčová slova**

Turbogenerátor, hydrogenerátor, izolační systém, VPI, resin-rich, degradace, stárnutí, vlivy, namáhání, poruchy, příčiny poruch, spolehlivost, údržba, opravy, diagnostika off-line, profylaktická diagnostika, diagnostika on-line, monitoring,

## **Abstract**

The presented master thesis is focused on diagnostics of insulation systems and failures of large rotating electrical machines. In first chapter is shortly described basic construction of turbo-generators and hydro-generators. Next chapter is focused on insulation systems VPI and resin-rich, there are compared used materials, manufacturing process, their usage and properties of these technologies in more details. In third chapter is accomplished common faults and root cause analysis. Last chapter deals with diagnostics system and used methods for monitoring progress of degradation large rotating electrical machines.

## **Key words**

Turbo-generator, hydro-generator, insulation system, VPI, resin-rich, degradation, stress, ageing, failures, root causes, reliability, maintenance, repairs, diagnostics off-line, prophylactic diagnostics, diagnostics on-line, monitoring

## **Prohlášení**

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 10.5.2015

Martin Směšný

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Prof. Ing. Václavu Mentlíkovi, CSc. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále bych chtěl poděkovat rodině a mým blízkým za podporu při studiu.

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>11</b>
<b>1 VELKÉ TOČIVÉ ELEKTRICKÉ STROJE</b> .....	<b>12</b>
1.1 TURBOGENERÁTORY.....	13
1.1.1 Konstrukční části rotoru turbogenerátoru.....	14
1.1.2 Konstrukční části statoru turbogenerátoru.....	16
1.2 HYDROGENERÁTORY.....	20
1.2.1 Konstrukční části hydrogenerátoru.....	21
<b>2 IZOLAČNÍ SYSTÉMY TOČIVÝCH ELEKTRICKÝCH STROJŮ</b> .....	<b>24</b>
2.1 IZOLAČNÍ MATERIÁLY PRO TOČIVÉ STROJE MENŠÍCH VÝKONŮ.....	24
2.1.1 Drážková izolace.....	24
2.1.2 Nomex®.....	25
2.1.3 Kapton®.....	26
2.1.4 Kompozitní materiály.....	26
2.1.5 Impregnační materiály.....	27
2.2 IZOLAČNÍ SYSTÉMY VELKÝCH TOČIVÝCH STROJŮ.....	28
2.2.1 Elektroizolační materiály na bázi slídy.....	28
2.2.2 Resin-rich.....	30
2.2.3 VPI (Vacuum pressure impregnation).....	34
2.2.4 Porovnání VPI a Resin-rich.....	39
<b>3 ROZBOR PORUCH IZOLAČNÍCH SYSTÉMŮ</b> .....	<b>42</b>
3.1 DETERIORACE IZOLAČNÍHO SYSTÉMU.....	42
3.1.1 Tepelné stárnutí.....	45
3.1.2 Elektrické stárnutí.....	47
3.1.3 Mechanické stárnutí.....	49
3.1.4 Působení dalších vlivů.....	50
3.2 PORUCHY A INTENZITA PORUCH V ČASE.....	51
3.3 SPOLEHLIVOST A ŽIVOTNOST ELEKTRICKÉHO STROJE.....	53
3.4 ROZBOR JEDNOTLIVÝCH PORUCH A JEJICH PŘÍČIN.....	59
3.4.1 Poruchy hydrogenerátorů.....	60
3.4.2 Poruchy turbogenerátorů.....	63
3.4.3 Časté poruchy a jejich příčiny.....	65
<b>4 DIAGNOSTICKÝ SYSTÉM PRO SLEDOVÁNÍ PORUCH</b> .....	<b>77</b>
4.1 DIAGNOSTICKÉ METODY A ZKOUŠKY.....	79
4.2 DIAGNOSTIKA PŘI VÝROBĚ STROJE.....	81
4.2.1 Kontrola vstupního materiálu a mezioperační zkoušky.....	81
4.2.2 Výstupní kusové a prototypové zkoušky.....	82
4.2.3 Vstupní diagnostika a uvádění stroje do chodu.....	83
4.3 DIAGNOSTIKA V PROVOZU STROJE.....	84
4.3.1 Profylaktická diagnostika.....	86
4.3.2 Údržba a opravy elektrických strojů točivých.....	87
4.3.3 Diagnostika on-line.....	91
4.4 VYBRANÁ DIAGNOSTICKÁ MĚŘENÍ.....	93
4.4.1 Diagnostika off-line.....	94
4.4.2 Diagnostika on-line.....	112
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>117</b>



<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....</b>	<b>120</b>
<b>PŘÍLOHY .....</b>	<b>1</b>
<i>P 1: Fotografie poruch statorového vinutí .....</i>	<i>1</i>
<i>P 2: Fotografie poruch jádra statoru .....</i>	<i>5</i>
<i>P 3: Fotografie poruch rotorového vinutí turbogenerátoru .....</i>	<i>6</i>
<i>P 4: Fotografie poruch konstrukčních částí rotoru turbogenerátoru .....</i>	<i>8</i>
<i>P 5: Fotografie poruch vinutí hydrogenerátorů .....</i>	<i>9</i>
<i>P 6: Fotografie poruch pomocných zařízení a elektrických spojení.....</i>	<i>10</i>

## Úvod

Velké točivé stroje jsou základním prvkem při výrobě elektrické energie. Provozem tyto stroje jako každý jiný materiál podléhají stárnutí, opotřebování a jsou vystaveny dalším provozním vlivům. Navíc největší část generátorů v provozu tvoří stroje starší než 30 let nebo naopak nové stroje, vyrobené z moderních materiálů, které ještě nejsou v praxi dostatečně odzkoušeny, a je tak u nich mnohem větší pravděpodobnost poruchy než na zaběhnutých strojích. Pro zajištění bezporuchovosti provozu je potřeba sledovat stav a stupeň degradace nejslabšího místa z hlediska spolehlivosti - izolačního systému. Pro stanovení prognózy, budoucího chování a životnosti stroje je nutné provádět pravidelnou údržbu stroje a profylaktická diagnostická šetření, jejichž cílem je včasné odhalení počínajících degračních změn, které by mohly způsobit poruchu a v horším případě havárii stroje. Neplánované odstávky vlivem poruchy stroje jsou pak pro provozovatele značně finančně nákladné. Jedná se o náklady spojené nejen s cenou nových dílů a opravou stroje, ale také značné náklady za prostoje.

Předkládaná diplomová práce se zaměřuje na velké točivé elektrické stroje, jejich konstrukci, izolační systémy a poruchy, které mohou při provozu nastat. Mezi hlavní cíle této práce patří rozbor jednotlivých poruch a jejich příčin a také stanovení diagnostického systému pro sledování stupně stárnutí a zajištění bezporuchového chodu stroje.

Diplomová práce je rozdělena do čtyř hlavních kapitol. První část je věnována konstrukci a principu funkce turbogenerátorů a hydrogenerátorů. Druhá kapitola je zaměřena na materiály, které mohou být používány pro izolační systémy těchto velkých točivých elektrických strojů. V rámci této kapitoly jsou podrobněji popsány izolační systémy resin-rich a VPI, kde jsem porovnal jejich použití a hlavní výhody a nevýhody. Velká část práce je věnována nejčastějším poruchám, jejich četnosti a příčinám vzniku těchto poruch u velkých točivých strojů. V přílohách lze nalézt fotografie a konkrétní příklady jednotlivých poruch. Poslední kapitola charakterizuje jednotlivé diagnostické metody od zkoušek výrobních a mezioperačních po zkoušky v provozu stroje, a také popisuje diagnostický systém pro sledování stárnutí izolačních systémů velkých točivých elektrických strojů.

## Seznam symbolů a zkratk

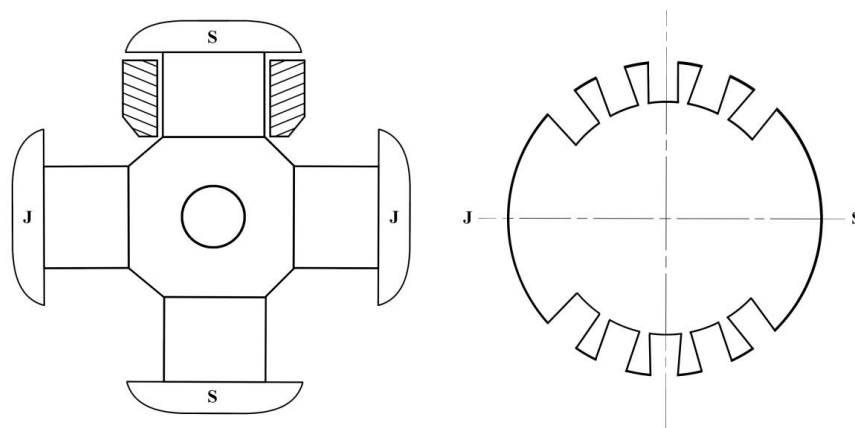
ATE .....	Stanovený index tepelné odolnosti
EIS .....	Elektroizolační systém
EIM.....	Elektroizolační materiál
$E$ .....	Intenzita elektrického pole [kV/mm]
$E_p$ .....	Elektrická pevnost [kV/mm]
$f$ .....	Frekvence (kmitočet) [Hz]
$p_{i60}$ .....	Jednominutový polarizační index [-]
$p_{i600}$ .....	Desetiminutový polarizační index [-]
PET (PETP) .....	Polyethylentereftalát
PEN.....	Polyethylennaftalát
$q$ .....	Zdánlivá hodnota náboje částečných výbojů [pC]
$R$ .....	Univerzální plynová konstanta
$R_{iz15}$ .....	Izolační odpor [ $M\Omega$ ] po čase 15 sekund od přiložení napětí
$R_{iz60}$ .....	Izolační odpor [ $M\Omega$ ] po 60 sekundách od přiložení napětí
$R_{iz600}$ .....	Izolační odpor [ $M\Omega$ ] po 600 sekundách od přiložení napětí.
RTE.....	Relativní index teplotní roztažnosti
$T$ .....	Absolutní teplota [ $^{\circ}C$ ]
$\text{tg } \delta$ .....	Ztrátový činitel [-]
$\text{tg } \delta_{U_n}$ .....	Ztrátový činitel při jmenovitém napětí [-]
$U_i$ .....	Zapalovací napětí částečných výbojů [V]
$U_n$ .....	Jmenovité napětí [V]
VIB .....	Vakuově tlaková impregnace jednotlivých tyčí ( angl.. Vacuum Impregnated Bar Method)
VIW .....	Vakuově tlaková impregnace celého vinutí ( angl. Vacuum Impregnated Winding Method)
VPI.....	Vakuově tlaková impregnace ( angl. Vacuum Pressure Impregnation)
VS .....	Vibrační jiskření (angl. Vibration Sparking nebo také Spark Erosion)
$W_a$ .....	Aktivační energie procesu [eV]
$\epsilon_r$ .....	Relativní permitivita [-]
$\tau$ .....	Životnost izolace [h]
$\lambda$ .....	Intenzita poruch [ $h^{-1}$ ]

# 1 Velké točivé elektrické stroje

Elektrický točivý stroj je zařízení schopné přeměnit elektrickou energii na mechanickou nebo naopak přeměnit mechanickou energii na energii elektrickou. Točivé elektrické stroje se rozdělují na stroje stejnosměrné, asynchronní a synchronní. Velké točivé elektrické stroje, na které je tato diplomová práce zaměřena, jsou nejčastěji synchronní generátory. Všechny točivé elektrické stroje se skládají z rotoru a statoru, kde každá část má svoje vinutí a magnetický obvod.

Ve statoru synchronního stroje je v drážkách uloženo střídavé trojfázové vinutí. Na rotoru je umístěno budící vinutí, které je napájeno stejnosměrným proudem pomocí budičů či usměrňovačů. Synchronní generátory rozdělujeme podle provedení rotoru a počtu pólů na dva základní typy: stroje s hladkým rotorem (turbogenerátory) a stroje s vyniklými póly (hydrogenerátory). Přestože mají odlišnou konstrukci a provedení, princip funkce je stejný. Na každém pólu jsou nasazeny budící cívky a spojeny tak, aby sousedními cívkami protékal proud opačného směru. Takto se vytvoří v blízkosti vzduchové mezery střídavě severní a jižní magnetický pól. Budící proud protékající vinutím vytvoří magnetický tok  $\Phi$ , který vystupuje ze severního pólu vzduchové mezery a přes statorové zuby prochází do jha statoru. Zde je tento magnetický tok rozdělen na dvě části: na proud jha statoru a proud procházející zuby statoru na jižním pólu vzduchové mezery. Obě části se uzavírají opět v severním pólu.

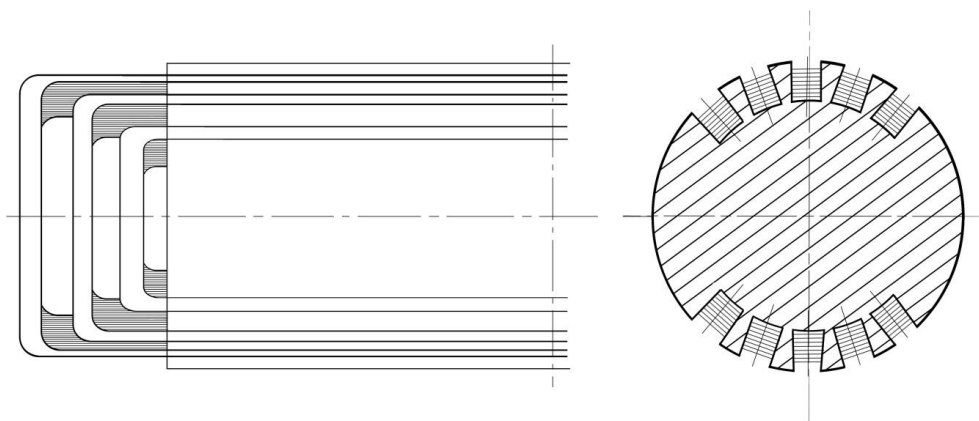
Synchronní generátory velkých výkonů se rozdělují podle konstrukce rotoru a rychlosti jeho otáčení na turbogenerátory (stroje s hladkým rotorem) a hydrogenerátory (stroje s rotorem s vyniklými póly).



Obr. 1.1 Provedení a tvar rotoru a) hydrogenerátoru b) turbogenerátoru

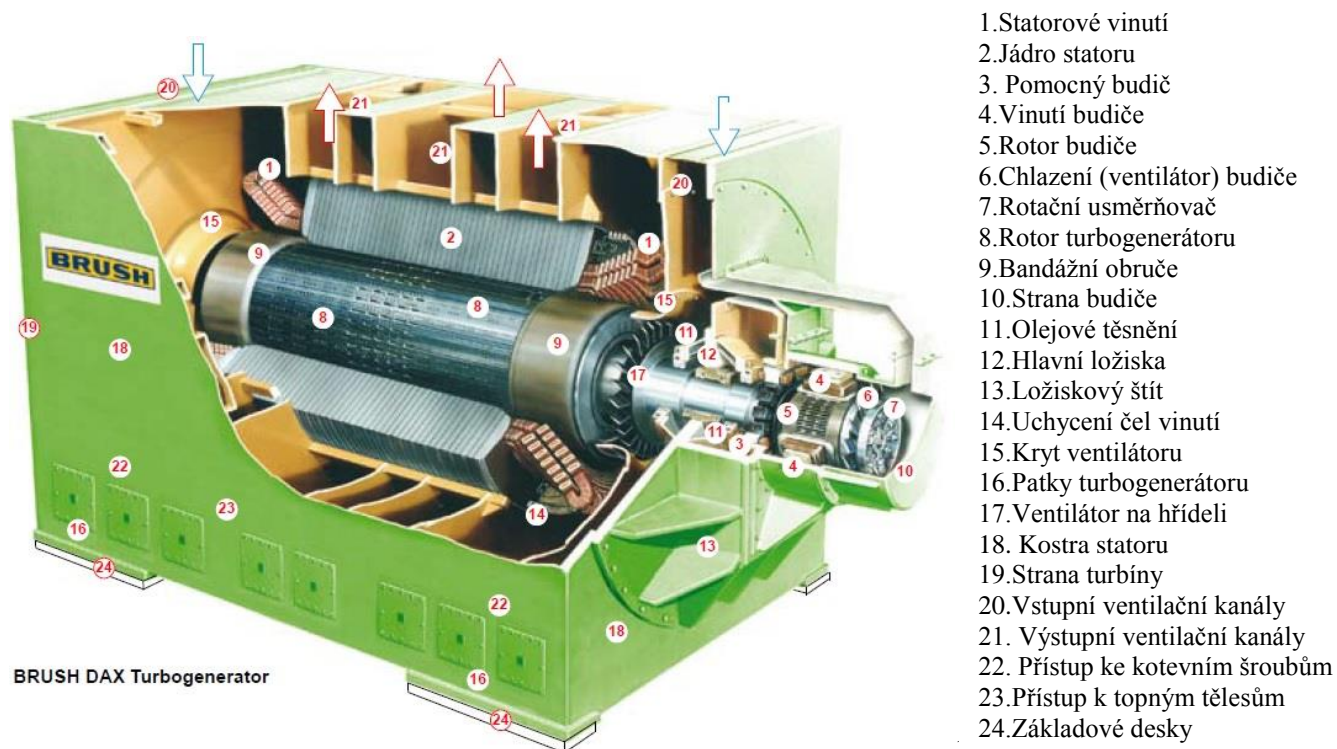
## 1.1 Turbogenerátory

Turbogenerátory jsou rychloběžné stroje s hladkým rotorem ve tvaru válce, poháněné parními turbínami. Rotor turbogenerátoru je spojen s nízkotlakým stupněm turbíny pevnou spojkou. Konstrukce rotoru je uzpůsobena tak, aby při frekvenci 50 Hz dosahoval rychlosti otáček  $3000 \text{ min}^{-1}$ . Na sítích o kmitočtu 60 Hz se mohou turbogenerátory vyrábět jako čtyřpólové, pak mají rychlost otáček  $1800 \text{ min}^{-1}$ .



Obr. 1.2 Uložení vinutí v drážkách rotoru turbogenerátoru

Hladký rotor se vyrábí nejčastěji z jednoho kusu chromniklové oceli s přísadou molybdenu. Tvar vyfrézovaných drážek a větracích štěrbin závisí na způsobu chlazení. Vinutí je uloženo ve vyfrézovaných drážkách tak, že vznikne dvupólový magnet s póly na povrchu válce. Ve dvupólových strojích vznikají v důsledku vysokých otáček a velké obvodové rychlosti značné odstředivé síly, které působí na rotor. Proti odstředivé síle se vinutí v rotorových drážkách zachycuje pomocí kovových klínů, na čelech vinutí pomocí ocelových obručí. Pod drážkami s vinutím mohou být ventilační drážky, ze kterých se vyfukuje větracími štěrbinami vzduch, nebo mohou být stroje chlazeny přímo otvory v rotorových vodičích. [9]



Obr. 1.3 Vzduchem chlazený turbogenerátor (převzato z [6])

Na *obr 1.3* je turbogenerátor se vzduchovým chlazením pomocí ventilátoru na hřídeli a komorovým větráním. Kostra je rozdělena přepážkami na lichý počet komor a vzduch je tlačěn z obou stran do sudých vstupních ventilačních kanálů (komor). Prochází větracími štěrbinami radiálně dovnitř a přes vzduchovou mezeru do štěrbin statoru, to se děje větracím účinkem rotoru, a poté do lichých výstupních komor. Rotorové vinutí je také chlazeno vzduchem, který se z obou stran ventilátory profukuje ventilačními kanály pod jeho drážkami.

### 1.1.1 Konstrukční části rotoru turbogenerátoru

**Vinutí rotoru** turbogenerátorů je vyrobeno nejčastěji z měděných pásů a uloženo ve vyfrézovaných drážkách tak, aby vyplnily celou její šířku. Při větším teplotně mechanickém namáhání, vznikajícím při častých a velkých změnách teploty, se používají ke krytí špičkového zatížení vodiče z elektrolytické mědi s příměsí stříbra. Pro přímo chlazená vinutí generátorů větších výkonů se pro omezení vodíkové nemoci používá bezkyslíkatá elektrolytická měď. Podle druhu chladiva a způsobu chlazení se odlišně vytvářejí cívky a používají různé tvary vodičů. [9,12]

Drážky jsou většinou rovnoběžné a obdélníkového průřezu, pro přímé chlazení vinutí jsou drážky několikrát odstupňované a mohou být s rovnoběžnými stěnami, lichoběžníkové nebo smíšeného tvaru. Rotorová vinutí se až na výjimky vyrábějí jako

soustředná, to znamená, že vodiče jedné cívkové strany jsou uspořádány v jedné drážce a oblouky cívek jsou vně axiálně odstupňovány. Takto provedené vinutí vykazuje závitová napětí jen několik voltů. [12]

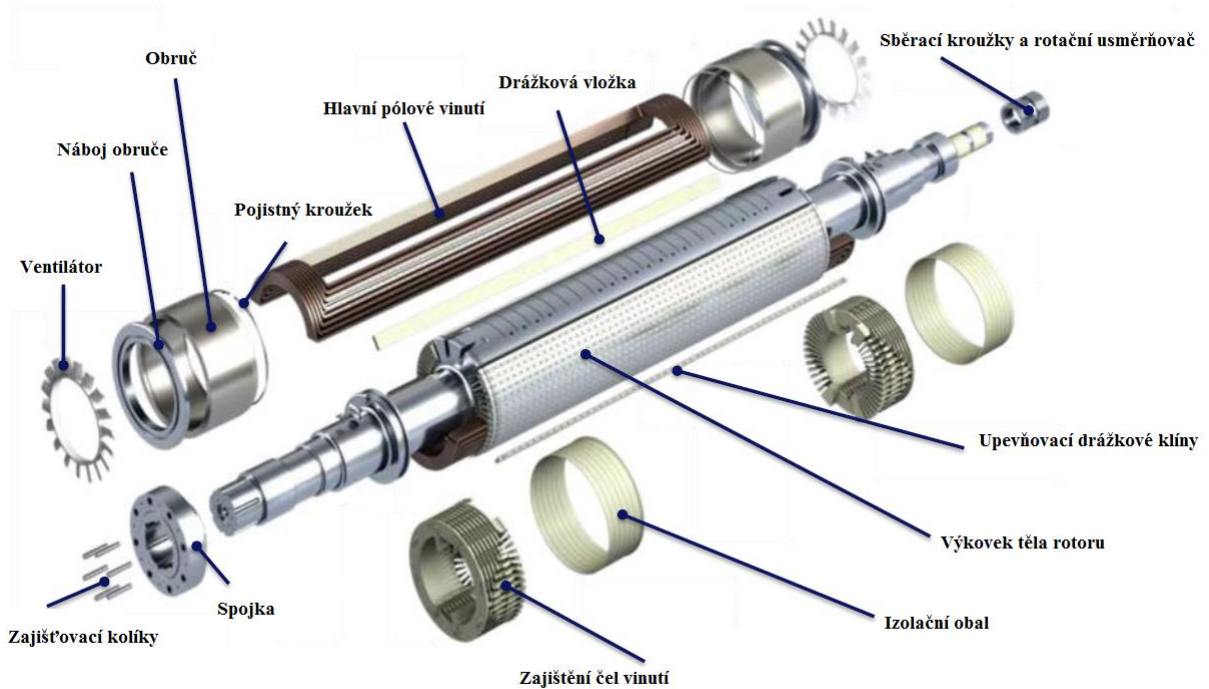
Před vložením měděných pásů do drážky se drážka vykládá drážkovými vložkami, korýtky a úhelníky, které jsou tvořeny slídou, skleněnou tkaninou, tvrzeným nebo polyamidovým papírem či jiným izolačním materiálem. Jednotlivé pásy jsou od sebe vzájemně izolovány před vkládáním nebo při vkládání vinutí do drážky. Izolují se i čela vinutí proti obruči rotoru. Drážka se po slisování upevní pomocí klínu, který je z nemagnetické oceli, mosazi nebo pevných slitin mědi. Proti odstředivé síle a dostatečné chladicí a větrací ploše musí být klínování dokonalé. Po slisování a dokončení vinutí se poté nasazuje obruč a koncové kruhy, které jsou jako drážkové závěrné klíny vyrobeny z nemagnetických ocelí. [9,12]

**Ložiska** turbogenerátorů jsou umístěna ve vodorovné poloze a slouží jako podpěry rotoru. Působí na ně celá řada zatížení například váha součástí umístěných na hřídeli, nevyváženosti, magnetický tah. Ložiska strojů menších a středních výkonů jsou uložena v ložiskových štítech, které jsou připevněny ke kostře a zároveň plní funkci krytů čel statorového vinutí. U velkých strojů se používají ložiskové stojany, které tvoří nosnou konstrukci ložisek. [14]

Funkce ložisek je podmíněna vytvořením potřebného olejového filmu mezi třecími plochami. Aby nedošlo k porušení olejového filmu vlivem tlaku, nesmí být zatížení ložiska moc velké. Toto zatížení a mezní síla závisí hlavně na rychlosti otáčení čepu, čím rychleji se otáčí, tím hustší a nosnější je olejový film. Pro vytvoření olejového filmu je nutné, aby sklon třecích ploch byl pod malým úhlem a aby olej byl tlačěn spárou od širšího konce filmu k užšímu. [9]

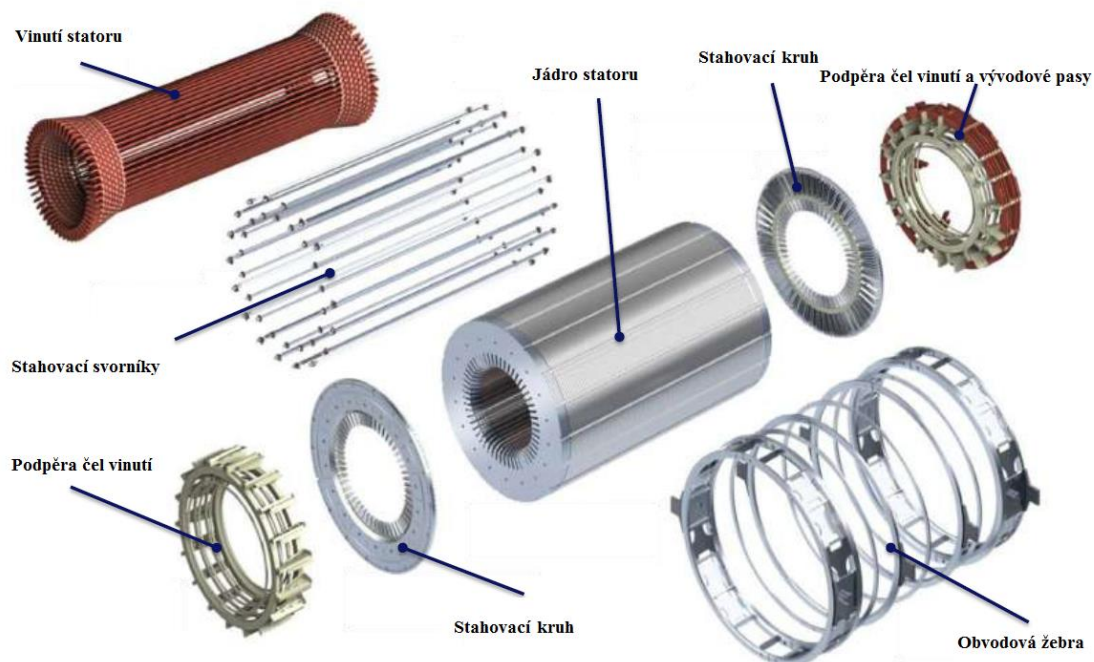
Kluzná ložiska mohou být podle typu stroje a jeho způsobu provozu radiální nebo axiální. Pro malé stroje se používají ložiska valivá, kuličková nebo válečková. Radiální valivá ložiska menších strojů mají jednoduché bronzové pánve, které jsou mazané knotem nebo kroužkem. Větší stroje mají kluzná ložiska s kroužkovým nebo oběhovým mazáním. Větší pánve jsou vyráběny z ocelolitiny a vyráběny jako dvoudílné se dvěma mazacími kroužky z důvodů bezpečnosti. Ložiskové pánve jsou umístěny ve stojanech a přišroubovány na společnou základní desku se statorem stroje. Aby do ložiska nevnikaly nečistoty a nevytéká olej, jsou na ložisku po obou koncích několikanásobné stírací kruhy

pro dokonalé utěsnění a olejová komora s výpustným otvorem pro vypouštění oleje. Pro stroje větších rychlostí a většího zatížení se vyrábějí ložiska s výměnou oleje, ložiska s kroužkovým mazáním a přídatným chlazením oleje a ložiskové stojany s oběžným mazáním. V obou principech je olej odebírán z olejové komory, chlazen chladičem, filtrován a čerpán zpět do ložiska. [9, 14]



Obr. 1.4 Konstrukční části rotoru turbogenerátoru (převzato z [7])

### 1.1.2 Konstrukční části statoru turbogenerátoru



Obr. 1.5 Konstrukční části statoru turbogenerátoru (převzato z [7])

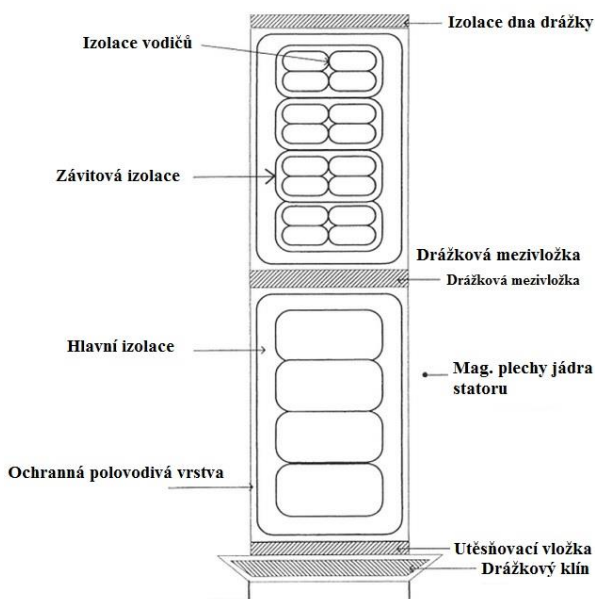


**Magnetický obvod statoru** se skládá z plechů, obvykle jsou to plechy s vyšším obsahem křemíku válcované za tepla. Po vnitřním obvodu plechů jsou vylisované drážky pro uložení statorového vinutí. Drážky synchronního stroje jsou provedeny jako otevřené. Statorové plechy pro stroje menších vnějších průměrů přibližně do 1 metru jsou lisovány v celku, pro větší průměry statoru jsou plechy rozděleny na segmenty. Tyto segmenty se ke kostře připevňují pomocí klínů, lišt a svorníků, proto se na vnějším obvodu segmentů souměrně lisují drážky odpovídajícího tvaru pro připevnění. Pro turbogenerátory nebo stroje menších obvodů je vhodné použít zalícování do vrtání kostry. [9,12,14]

**Statorové vinutí** velkých synchronních strojů je provedeno pomocí umělých a permutovaných tyčí, které jsou konstruovány na vysoké jmenovité proudy. Tyto tyče jsou rozdělené na dílčí vzájemně izolované vodiče, nejčastěji obdélníkového průřezu nebo z plochých vodičů, které v průběhu své délky prostřídají jednotlivé polohy. Toto prostřídání vodičů se provádí proto, aby vinutím procházel stejný magnetický tok, omezily se vířivé proudy a zabránilo se vytvoření vnitřních vyrovnávacích proudů.

Nejrozšířenější a nejvhodnější pro střední a velké synchronní generátory jsou tzv. Roeblovy tyče. Ploché dílčí vodiče jsou uspořádány vedle sebe ve sloupcích a jsou po své délce společně zkrouceny tak, aby každý dílčí vodič v průběhu drážkou provedl otočení o  $360^\circ$ , takže se všechny vodiče alespoň jednou vzájemně oběhnou a vystřídají své pozice. Pro potlačení přídavných ztrát a vyrovnání působení cizích polí na čela vinutí se používají tyče se zkroucením o  $540^\circ$  v drážkové části a o  $\pm 180^\circ$  v čelech vinutí. Tato transpozice je však vhodnější pro větší stroje s dostatkem místa pro zkroucení. [2,12]

Často se vinutí vyrábí jako dvouvrstvé, kdy strany jedné cívky vyplňují jen polovinu hloubky drážky. Vodiče se jednotlivě nebo společně odvinou z daných cívek, převinou na smyčky a roztahovacími stroji se tvarují před vložením do drážky do tvaru šestiúhelníku, lichoběžníku nebo oválu.



Obr. 1.6 Řez drážkou statoru (převzato z [15])

Izolace dílčích vodičů pro nižší napětí tvoří vytvrzená laková vrstva. Pro cívky na vyšší jmenovité napětí se používá například opředení vodičů skelnými a polyesterovými vlákny v kombinaci s pojivým lakem či pryskyřicí, ale také ovinutí fólií nebo páskami na bázi slídy. Slídové pásky s polyesterem jako nosným materiálem dosahují vysoké elektrické pevnosti a odolnosti proti částečným výbojům, ale nejsou vhodné pro Roeblovy tyče. Pro Roeblovy tyče je vhodné použít například materiál nazývaný Daglas, jedná se o skleněný nebo polyesterový vláknitý materiál (směs), který lze aplikovat na holý nebo smaltovaný vodič. Tento materiál jednou nebo dvakrát ovinutý na vodič je více odolný na ohyb, který je pro Roeblovy tyče typický. Hlavní izolaci vinutí je možné provést dvěma způsoby resin-rich nebo vakuově tlakovou impregnací (VPI), oběma těmito izolačním systémům je věnována celá druhá kapitola této diplomové práce. [12,30]



Obr. 1.7 Druhy a provedení Roeblových tyčí (převzato z [33])

Pro velké proudy, proudové hustoty a s nimi spojené vysoké ztráty ve vinutí, se využívá vnitřního chlazení tyčí. To může být provedeno například dutým vodičem mezi dílčími plochými masivními vodiči nebo mohou být dílčí vodiče duté, také je možné vložit mezi sloupce jednotlivých dílčích vodičů profilové trubky z odporového materiálu pro průchod chladiva.

**Chlazení turbogenerátorů** je komplikovanější než u hydrogenerátorů, protože ztráty jsou velké a rozměry rotoru malé. Používá se více způsobů chlazení, například vzduchem, vodíkem, vodou nebo kombinované chlazení vodou a vodíkem. Vlastní chlazení vzduchem může být dvojího provedení: komorové a kapsové, oba způsoby řeší problém zavedení chladícího vzduchu do středu délky statorového vinutí. Často používaný je oběžný způsob chlazení. Chladící médium se nasává do stroje po obou stranách ventilátory a po průchodu stroje se vyfukuje do základu, kde projde chladičem a přes filtr se vrací zpět do stroje. Oběžné chlazení udrží prostředí stroje čisté, bez prachu a tím se snižuje nebezpečí vzniku požáru. Norma [17] stanovuje, že pro vzduchové chlazení generátorů má být přednostně použit systém ventilace s uzavřeným okruhem vzduchu. Pokud je dohodnut jiný způsob, je potřeba dbát právě na to, aby se zabránilo kontaminování ventilačních kanálů nečistotami, nadměrnému oteplení a znečištění izolovaných povrchů. Protože ventilační kanály se snadno zanesou nečistotami a čištění bez převinutí není téměř možné, používá se uzavřený ventilační systém. [9]

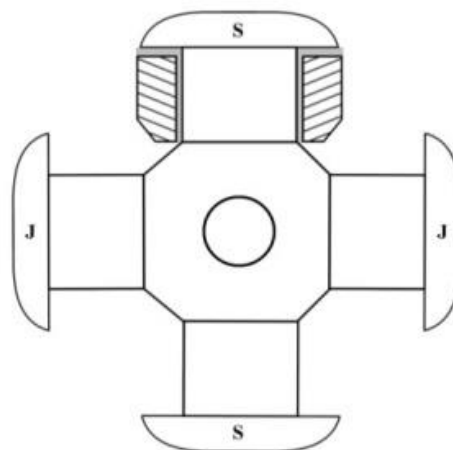
Chlazení generátorů pro nejvyšší jmenovité výkony je velmi obtížné, protože z poměrně malých chladících ploch je nutné odvádět velká množství tepla. Proto účely chlazení se používá vodík, který má řadu předností oproti jiným druhům chlazení: snížení ventilačních ztrát na desetinu ztrát ve vzduchu, zvýšení součinitele přestupu tepla přibližně o 40 %, tepelná vodivost vodíku je sedmkrát vyšší než vzduchu, izolační systémy s vodíkovým chlazením navíc stárnou mnohem pomaleji. Nevýhodou použití vodíku je složitější konstrukce stroje a hlavně jeho výbušnost. Protože vodík se vzduchem tvoří výbušnou směs, je nutno sledovat jeho čistotu, která by za normálních podmínek neměla být nižší než 95 %. Čistota vodíku proto při dodání nesmí být nižší než 99 % jeho objemu. Pokud jeho čistota při provozu klesne na 90 %, je potřeba stav vodíku doplnit nebo se musí stroj odstavit, než čistota klesne na 85 %. Pro opatření, která mají být učiněna při použití vodíkem chlazených strojů, platí řada bezpečnostních pokynů a předpisů. Tyto bezpečnostní pokyny a předpisy jsou se strojem dodávány v oficiálním návodu na provoz a údržbu, za který je zodpovědný výrobce. [17,45]

Generátory, jejichž aktivní části jsou chlazené vodíkem nebo kapalinou, musí být navrženy tak, aby plášť generátoru a veškerá víka namáhána tlakem chladicího vodíku vydržely bez ohrožení obsluhy, vnitřní výbuch výbušné směsi. Z tohoto důvodu se provádí zkouška hydrostatickým tlakem, při absolutní hodnotě tlaku alespoň 9 barů (900kPa) po dobu 15 minut, aby se zkontrolovala pevnost pláště a vík. [17]

V souladu s další normou [18] musí být generátory chlazené vodíkem nebo kapalinou opatřeny alespoň šesti teploměrnými sondami, aby se dodržely maximální dovolené teploty chladiva a tím i mezní dovolená hodnota teploty mezi stranami cívek pro zabránění nadměrného ohřevu izolace od jádra. Sondy by měly být umístěny tak, aby byly v kontaktu s chladivem. Pro chlazení vinutí plynem by měly být umístěny co nejblíže výstupnímu chladicímu kanálu cívky. Pokud je vinutí chlazeno vodou, instalují se sondy do potrubí uvnitř kostry generátoru nebo co nejblíže místu výstupu chladiva z kostry. Tyto údaje získané z teploměrných sond mohou být použity pro monitorování činnosti chladicího systému vinutí generátoru.

## 1.2 Hydrogenerátory

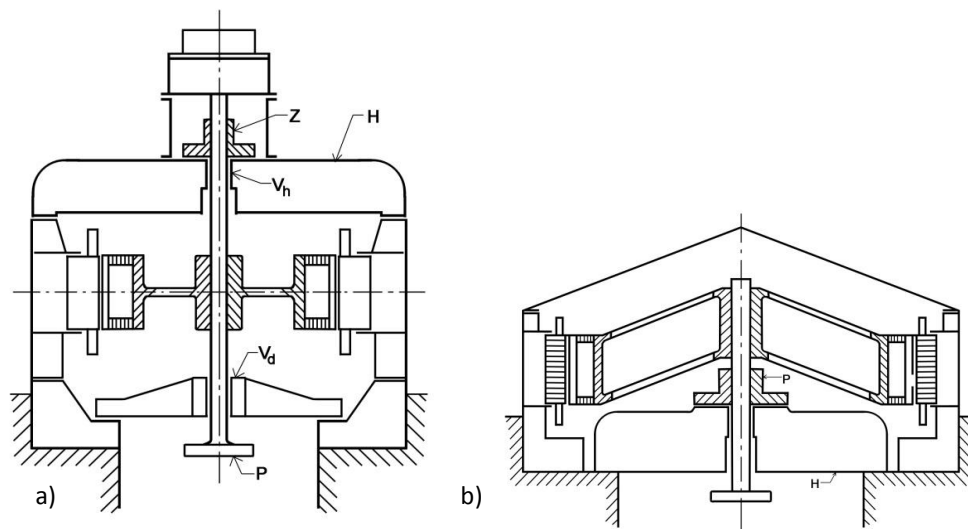
Hydrogenerátory jsou pomaloběžné stroje, přímo spojené s vodními turbínami. Mají téměř vždy svislý hřídel a jejich rotor se vyrábí s vyniklými póly pro otáčky od  $100 \text{ min}^{-1}$  do  $1500 \text{ min}^{-1}$ .



Obr. 1.8 Tvar rotoru hydrogenerátoru

Podle umístění axiálního ložiska se hydrogenerátory dále rozdělují na stroje se závěsným ložiskem *obr 1.9 a)* a podpěrným ložiskem *obr 1.9 b)*. Závěsné ložisko  $Z$  hydrogenerátoru se umísťuje nad generátor a spolu s horním vodícím ložiskem  $V_h$  je

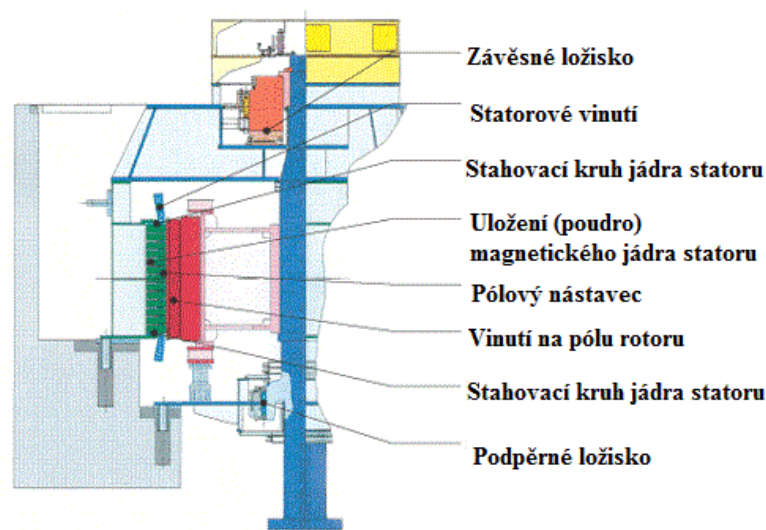
uloženo do nosné hvězdy H. Tato nosná hvězda je upevněna ke kostře a jsou na ni jsou připevněny ještě budiče. Pod generátorem je umístěno další vodící ložisko  $V_d$ . Spodní konec hřídele generátoru je spojen přírubou s hřídelí vodní turbíny. Provedení s podpěrným ložiskem P je vhodné hlavně pro stroje velkého průměru a malé osové délky. Tomuto provedení hydrogenerátoru se někdy říká deštníkové, protože ramena hvězdy jsou šikmá, aby těžiště rotoru bylo co nejnižší. Podpěrné ložisko je totiž umístěno pod generátorem, kombinuje se s vodícím ložiskem  $V_d$ . Nosná hvězda H je uložena přímo na základě a vydrží větší mechanické namáhání než základna hydrogenerátoru se závěsným ložiskem, protože má kratší ramena. [9]



Obr. 1.9 Základní konstrukce hydrogenerátoru a) provedení se závěsným ložiskem b) provedení s podpěrným ložiskem [9]

### 1.2.1 Konstrukční části hydrogenerátoru

Základní konstrukční části hydrogenerátoru jsou znázorněny na obr. 1.10 níže.



Obr. 1.10 Řez hydrogenerátorem (převzato z [34])

**Magnetickým obvodem stroje s vyniklými póly** protéká magnetický tok, který se uzavírá v rotoru mezi dvěma sousedními póly a jhem magnetového kola. Póly se skládají z plechů pro omezení povrchových ztrát. Většina hydrogenerátorů je velkého průměru, proto jsou plechy ze segmentů. Tyto segmenty se zachycují v kostře stroje zalícováním do kostry, nebo klínovými pravítky. Plechy jsou poté klínovány ve statorových žebrech pomocí obdélníkových klínů. Klínová pravítka se nasazují na plechy velkých průměrů a velké osové délky. Plechy velkých osových délek jsou rozděleny na svazky a mezi ně jsou umístěny větrací štěrbin, každý svazek má po stranách tlustší plechy, na které jsou přivařeny ventilační vložky. Způsob provedení pólů závisí na velikosti a otáčkách stroje, jeho obvodové rychlosti a také na tom, zda má stroj tlumič v pólových nástavcích. Póly jsou vyráběny například z ocelolitiny a kované oceli. Pro masivní póly se pólové nástavce soustruží, menší póly je možné vyrobít v celku s magnetovým kolem, často se také u menších strojů pólové nástavce přišroubovávají. Póly se přišroubovávají k magnetovému kolu. Budící cívky jsou nasazeny na póly obdélníkového průřezu a jsou zajištěny pólovými nástavci. [9]

**Vinutí rotoru** strojů s vyniklými póly menších výkonů jsou cívky vyrobeny z vodiče kulatého nebo pravoúhlého průřezu, vinutého na pouzdro, které je z lepenky nebo mosazného plechu. U malého počtu pólů jsou cívky odstupňovány ke středu tak, aby vznikl potřebný izolační prostor a prostor pro chladicí kanály. Z důvodu lepší mechanické pevnosti a možnosti chlazení jsou cívky vinuté v jedné vrstvě a tvořeny holým pásem ohýbaným na hranu, jednotlivé závity se od sebe izolují například slídovou páskou, lepenkou nebo lakem. Pro další zvětšení chladícího povrchu lze použít profilované vodiče nebo jednotlivé závity nechat vyčnívat. Proti odstředivé síle se pólové cívky zachycují rozpěrkami, které musí být uprostřed délky stroje a mají zabránit vyboulení cívek směrem k pólu. [9]

Tlumící (rozběhové) vinutí se ukládá do drážek v pólových nástavcích rotoru. Toto vinutí slouží k omezení kývání rotoru, zeslabení zpětné točivé složky pole při nesouměrném zatížení a k zamezení dynamických přetížení při nesouměrném zkratu. Tlumící vinutí se skládá z určitého počtu tyčí a segmentů nakrátko, které uzavírají všechny tyče na čelech pólů a spojují segmenty sousedních pólů, tak vytváří uzavřený obvod. Proti odstředivé síle se cívka zajišťuje po stranách pólovými nástavci a v čelech o přečnávající konce pólových postranic. [14]

Hydrogenerátory využívají **vzduchové chlazení**. Stroje s vyniklými póly se sami o sobě velmi dobře chladí, protože póly fungují jako ventilátor, který vhání vzduch do dutin statoru i větracích štěrbin. U strojů s nízkým počtem otáček proto není potřeba instalace dalších ventilátorů a stačí pouze větrací účinek vyniklých pólů. U strojů s vyšším počtem otáček se používají ventilátory, jsou umístěny na obou stranách magnetového kola, které ofukují čela statoru. Takový způsob se nazývá oboustranné tlačné větrání.

**Kluzná ložiska hydrogenerátorů** mohou být provedena jako závěsná ložiska nebo podpěrná ložiska strojů. Axiální ložiska jsou nejčastěji vyráběna jako segmentová. Pro menší zatížení mají ložiska třecí plochu tuhou a dělenou drážkami, kterými vchází olej do třecí plochy. Touto drážkou je olej vtahován mírným přechodem do třecí plochy. Větší ložiska mají třecí plochu rozdělenou pevně nebo také rozdělitelně na segmenty, tyto segmenty jsou odděleny drážkami pro olej a uloženy na pružných podložkách. V každém segmentu je opora a dva čepy, které zabraňují otáčení segmentů. Mazací olej je přiváděn do kruhového potrubí kolem ložisek a dýzami je stříkán do drážek mezi segmenty. [9]

## 2 Izolační systémy točivých elektrických strojů

Pojem izolační systém je definován normou [16], jako izolační struktura obsahující jeden nebo více izolačních materiálů aplikovaných na vodivé části, použité v elektrických točivých strojích. Izolačních systémů může mít stroj více než jeden a tyto systémy mohou být navrženy na různé tepelné třídy, například rotorové a statorové vinutí. Tato vinutí mohou být složena z několika komponent izolace, přičemž každá část (drážková, závitová a izolace čel vinutí) je navržena na různé provozní namáhání a kritéria.

Při provozu každého elektrického zařízení dochází k celkovému oteplení stroje a tedy i jeho izolačního systému, který je z hlediska náročnosti nejdůležitější částí elektrického zařízení a je tedy nutné, aby materiály používané jako izolanty vyhovely všem náročným provozním požadavkům a byly odolné proti působení vnějším vlivům.

Izolační systémy elektrických strojů se rozdělují podle pracovního napětí a použitých materiálů na nízkonapěťové a vysokonapěťové.

### 2.1 Izolační materiály pro točivé stroje menších výkonů

Izolační materiály slouží k izolaci částí s různým elektrickým potenciálem. Použité izolační materiály v oblasti elektrických točivých strojů musí kromě velmi dobrých elektrických (velká elektrická pevnost, vhodná elektrická permitivita, malá vodivost, malé dielektrické ztráty) a tepelných vlastností (teplotní odolnost, nehořlavost, malá teplotní roztažnost, dobrá tepelná vodivost), vyhovovat také požadavkům mechanického charakteru: vysoká pevnost v tahu a tlaku, pružnost, ohebnost a odolnost proti vibracím. [12]

Nízkonapěťové izolační systémy se skládají z izolací vodičů, drážkové izolace a impregnačního laku.

#### 2.1.1 Drážková izolace

Drážková izolace tvoří přídatnou izolaci mezi vinutím a stěnami drážky. Její hlavní funkcí je chránit vinutí před poškozením o stěny drážky. Drážková izolace musí vydržet zkušební napětí, které je dáno příslušnými normami a mít i odpovídající vlastnosti jako např. vysokou elektrickou pevnost a izolační odpor, ale také dobré mechanické vlastnosti,



aby vydržela tlak, který na tuto izolaci drážek působí při tvarování čel cívek statoru nebo navíjení bandáže rotorového vinutí.

Používaných materiálů pro tuto izolaci je celá řada, lze říci, že v dnešní době se používají vícevrstvé elektroizolační materiály, obvykle složené ze dvou až tří různých materiálů. Ve většině případů je základním materiálem polyethylentereftalátová (PETP) folie, na kterou jsou nanášeny další materiály, protože kombinací těchto materiálů se dosahuje vyšší elektroizolační i mechanické pevnosti při zachování stejné tloušťky izolace.

Příklady několika používaných materiálů dle [1] a [5] pro vícevrstvé drážkové izolace a jejich označení jsou uvedeny v *tab. 2.1*. Název drážkové izolace je tvořen z písmenného označení, které charakterizuje použitý příslušný materiál a z číselného označení, které udává poměr celkové tloušťky izolace k tloušťce středové vrstvy, obojí je udáváno v  $\mu\text{m}$ . Označení NEN 300/75 znamená třívrstvou izolaci o celkové tloušťce 300  $\mu\text{m}$  se středovou vrstvou tvořenou PETP folií o tloušťce 75  $\mu\text{m}$ . Písmeno N, zde znamená, že použitý materiál je polyesterová rohož.

*Tab. 2.1 Příklady používaných materiálů pro drážkovou izolaci a jejich označení [1,5]*

Název izolace				Teplotní třída
NEN 300/75	N-polesterová rohož	E-PETP folie	N-polesterová rohož	B(130°C) F(155°C)
NE 200/125	N-polesterová rohož	E-PETP folie		B(130°C) F(155°C)
LEL 300/125	L-aramidový papír Nomex <sup>®</sup>	E-PETP folie	L-aramidový papír Nomex <sup>®</sup>	
LKL 35/5	L-aramidový papír Nomex <sup>®</sup>	K-Kapton <sup>®</sup>	L-aramidový papír Nomex <sup>®</sup>	H(180°C)
ERS 160/36	E-PETP folie	R-slídový papír	S-skleněná tkanina	Do 220°C

### 2.1.2 Nomex<sup>®</sup>

Nomex<sup>®</sup> je syntetický materiál složený z krátkých vláken a malých vláknitých částic aromatického polyamidu – aramidu. Tyto částičky jsou zpracovány do podoby papíru pomocí běžných papírenských technologií, ten se poté dále zpevňuje kalandrováním, to je válcování mezi válci s vysoce lesklým povrchem, které probíhá při vysokých teplotách. Nomex<sup>®</sup> má výborné elektrické vlastnosti  $E_p = 40 \text{ kV/mm}$ , relativní permitivitu  $\epsilon_r = 2,5$ . Je velmi odolný vysokým teplotám, nehořlavý a má vysokou pevnost v tahu. Lze jej velmi dobře laminovat do více vrstev nebo kombinovat s jinými materiály, dobře se na jeho povrch nanáší různé pryskyřice, které umožňují spojení Nomexu<sup>®</sup> a jiných materiálů. [1]

U točivých strojů se tento materiál používá například pro izolace vodičů, cívek, drážek, vývodů motorů i generátorů. Pro použití ve vysokonapětových transformátorech se dodává ve verzi s 50% slídy, a to jako nekalandrovaný, který lépe nasaje impregnované materiály, tak v kalandrovaném provedení. [1]

### 2.1.3 Kapton®

Kapton® je materiál, který se používá k izolování vinutí elektrických strojů. Jeho aplikací lze například snížit hmotnost trakčního stroje o 5% a zároveň zvýšit výkon o 8%. Kapton® je polyimid, který se dodává ve formě folií, má výborné elektrické vlastnosti, relativní permitivita je mezi 3 a 3,5,  $E_p = 5,8$  kV/mm až 7,7 kV/mm, u Kaptonu záleží na tloušťce. Má výbornou tepelnou odolnost, vydrží teploty okolo 250°C po dobu 8 let nebo 300°C po dobu 3 měsíce. Působením tepla netaje a nehoří, také má dobré mechanické vlastnosti. Jeho nevýhodou je choulostivost na mechanické poškrábání, proto se používá ve spojení s jinými materiály, které jej chrání. Pro speciální aplikace byl vyvinut Kapton CR®, který dokáže odolávat působením částečných výbojů. [1]

### 2.1.4 Kompozitní materiály

Kompozitní materiály jsou základem moderních izolačních systémů elektrických strojů. Tyto materiály jsou v elektrotechnice velmi používané, zvláště tam, kde je potřeba spojit mechanické a elektrické vlastnosti.

Kompozitní materiály vznikají spojením nosné složky, pojiva a plniva. Jako nosná složka se může používat například bavlněná tkanina, skleněná tkanina, polyesterová, polyethlenaftalátová, polyethlentereftalátová, polyimidová fólie, polyesterové roundo. Pojivem je nejčastěji epoxidová, polyesterová nebo silikonová pryskyřice. Hlavní částí je plnivo, ve většině případů se používá rekonstruovaná slída ve formě slídového papíru.

Tyto kompozitní materiály dosahují nejlepších elektroizolačních a tepelných vlastností, kterých by nebylo možno docílit použitím jednoho typu materiálu samostatně.

Postup výroby těchto kompozitních materiálů začíná přípravou lakovaných listů, které jsou tvořeny podkladovým nosným materiálem a naneseným pojivem – reaktoplastickou pryskyřicí v termoplastickém stavu B. Poté jsou tyto listy prokládány ocelovými plechy a vloženy do etážového lisu, kde se za působení teploty a tlaku vytvrdí do konečného stavu. Použitím tzv. kontaktní pryskyřice, není potřeba vytvrzovat listy za vysokého tlaku, ale na

druhou stranu je nutno použít bezrozpuštědlové pryskyřice, aby při vytvrzování nedošlo k uvolnění vedlejších produktů. Drážkové klíny a další různě tvarované součástky se vyrábí kontinuálním způsobem, při němž se svazek skleněné příze nasytí pryskyřicí nejčastěji polyesterovou a vyhřeje se na gelovou teplotu. Následuje vytvarování a vytvrzení na finální profil. Nejlepších vlastností dosahují výrobky s obsahem skleněné příze od 70 do 80%. [1]

Kompozitní izolační materiály a pásy jsou neustále inovovány nejen pro zlepšení elektroizolačních, mechanických a tepelných vlastností, ale také pro lepší aplikaci strojním ovíjením a zachování stabilních vlastností během garantované skladovatelnosti těchto materiálů.

### **2.1.5 Impregnační materiály**

Proces impregnace se provádí jako poslední operace při navíjení vinutí stroje. Impregnace vytváří izolační povlak, zvyšuje elektrickou i mechanickou pevnost vinutí, zlepšuje přestup tepla mezi vodiči a svazkem v drážce, dále také chrání použité izolační materiály před navlhnutím, tím zvyšuje jejich životnost a zachovává elektroizolační vlastnosti. Impregnační proces lze rozdělit do tří hlavních kroků: vysušení vinutí, impregnaci, vytvrzení. Vysušení vinutí je potřeba pro úplné odstranění vlhkosti v izolaci. Samotné sušení se provádí v peci při teplotách přesahujících 100 °C po dobu několika hodin.

Impregnace se může pro stroje menších výkonů provádět několika způsoby: máčením, zaplavováním, zakapáváním. Zakapávání probíhá tak, že se na otáčející svazek vinutí postupně nakapává impregnační lak, dokud není pokryto celé vinutí. Nejdokonalejší způsob je impregnace vakuová. Zde jsou svazky umístěny do kotle, kde je vypuštěn vzduch a vytvořeno vakuum, až poté se napustí impregnační lak. Snadný a při opravách vinutí často využívaný způsob je impregnování máčením. Proces máčením probíhá tak, že po vysušení v peci, se stator nebo rotor nechá vychladnout na teplotu kolem 40 až 50 °C a poté je ponořen do nádoby s impregnanem, dokud z něj nepřestanou unikat vzduchové bublinky, aby se lak dostal do celého vinutí. Poté se stator nebo rotor vyjme z nádoby a lak nechá odkapat. Proces vytvrzování probíhá v peci, kde je možno pomocí termostatu nastavit příslušnou teplotu, protože samotná teplota a doba vytvrzování je závislá na druhu použitého impregnačního laku a může se značně lišit. Po vytvrzení, aby lak nezabraňoval

správnému uložení rotoru nebo statoru, se provádí oškrabání například ploch pro ložiskové štíty a závitové otvory. [5]

Používaných impregnačních laků je značné množství, lze je rozdělit podle stupňů teplotní odolnosti a použitelnosti podle jednotlivé třídy izolace. Dále je možné rozdělit laky na rozpouštědlové a bezrozpouštědlové. Rozpouštědlové laky jsou nejčastěji syntetické, schnoucí na vzduchu nebo v peci po odpaření rozpouštědel. Bezrozpouštědlové laky tvrdnou pomocí katalyzátoru, jedná se hlavně o polyesterové nebo epoxidové pryskyřice. Pro impregnování máčením za atmosférického tlaku, vakua i tlaku se používají například jednosložkové polyesterové pryskyřice, které neobsahují styren a umožňují vytvrzení při nízkých teplotách pro teplotní třídu H (180). Pro máčení a zaplavování za rotace se mohou používat laky na bázi nenasyčené polyesterimidové pryskyřice, které se vytvrzují elektrickým proudem a UV zářením, používají se také pro teplotní třídu H (180). Pro zakapávání a izolační systém pro teplotní třídu F (155), lze použít například roztok nenasyčené polyesterimidové pryskyřice ve styrenu. Pro zalévání volných technologických prostor se při stavbě elektrických strojů používají dvousložkové polyuretanové látky, které mají formu tvrdé gumy a vytvrzují za normální teploty, jejich trvalá teplotní odolnost je 130 °C. [1,12]

Rozpouštědlové impregnační laky nejsou vhodné pro impregnaci hlavní izolace vysokonapěťových točivých strojů, protože odpařování rozpouštědel může zanechávat vzduchové dutinky. U těchto strojů tyto laky lze použít jako konečný a ochranný nátěr kostry stroje. [30]

## **2.2 Izolační systémy velkých točivých strojů**

Izolační systémy velkých točivých elektrických strojů se rozdělují podle druhu použité technologie na dvě metody: resin-rich a VPI (Vacuum Pressure Impregnation). Obě tyto metody mají různý postup výroby, omezení v provedení a použitých materiálech. Společné pro obě metody je použití kvalitních kompozitních materiálů.

### **2.2.1 Elektroizolační materiály na bázi slídy**

Základním materiálem pro vysokonapěťové izolační systémy točivých elektrických strojů je slídová páska, skládající se ze slídového papíru, nosných materiálů jako například skleněná tkanina, organického materiálu ve formě fólie nebo rouna a pojivem. Slídových

pásek je více druhů, které mají různé parametry, proto výběr správné slídové pásky pro danou aplikaci je nutno zvážit. Rozhodujícími faktory pro použití slídové pásky je její tloušťka a obsah slídy.

Vlastnosti slídy jsou dány kovalentní vazbou kyslíku a křemíku ve vrstvách oxidu křemičitého. Je to přírodní materiál vyskytující se v přírodě v mnoha modifikacích. Pro elektroizolační účely jsou důležité dva druhy: muskovit a flogopit. Slída má neměnné vlastnosti, až do tzv. kalcinační teploty při které ztrácí vázanou vodu ve své struktuře. Tato teplota je u muskovitu kolem 750 °C a u flogopitu okolo 950 °C. Při překročení této kalcinační teploty nastává skoková změna vlastností a slída je dále prakticky nepoužitelná.

Izolační materiály na bázi slídy můžeme rozdělit na mikanity a materiály z rekonstruované slídy. V mikanitech je slída použita v základní formě slídových lístků a krystalů. V druhém případě je slída aplikována v rekonstruované podobě ve formě slídového papíru, jehož podkladovým materiálem je papír nebo skleněná tkanina. Složka, která pojí tyto materiály k sobě, je syntetická pryskyřice. Tento slídový papír je základem pro výrobu izolačních materiálů.

V izolačních systémech velkých točivých strojů jsou používány dva druhy: kalcinovaný a nekalcinovaný slídový papír. Mají rozdílný postup výroby, ale hlavně také vlastnosti. Nekalcinovaný slídový papír se používá hlavně v izolačním systému VPI (Vacuum pressure impregnation) pro jeho výbornou nasákavost impregnačního materiálu. Kalcinovaný slídový papír je hutnější a má lepší mechanické vlastnosti než nekalcinovaný.

Slídové papíry jsou podobného složení na bázi malých částic slídy destičkového charakteru, ale jsou nazývány a označovány různě, podle jejich výrobců například: Remika, Samica, Cogemika. Proto další kompozitní materiály a izolační pásy vyráběné z těchto slídových papírů nesou podobné názvy jako např.: Relanex®, Relastik®, Kalastik®, Samicatherm atd.

U kvalitních kalcinovaných slídových papírů se dosahuje nízké plošné hmotnosti kolem 30g/m<sup>2</sup> při parametrech vhodných pro další zpracování. Slídová kašovina se vyrábí termochemickým způsobem, při kterém se ztrácí přibližně 50% vody z krystalické struktury slídy. Výsledná suspenze po tomto složitém termochemickém procesu se zpracovává na slídový papír pomocí papírenského stroje. Velikost získaných částic se pohybuje v rozmezí od 0,04 do 0,8 mm s největším podílem zrn kolem 0,25 mm. Vzniklý

kalcinovaný slídový papír má nízkou plošnou hmotnost, která umožňuje výrobu izolačních pásek s malou tuhostí a velmi dobrou aplikací v ohybech svazku vodičů o malých poloměrech. Izolační systémy s kalcinovaným slídovým papírem vykazují vyšší počáteční hodnoty elektrické pevnosti. [1,8,22]

Nekalcinovaný slídový papír se vyrábí hydromechanickým způsobem zachovávajícím veškeré vlastnosti slídy. Dezintegrace se provádí mechanicky proudem vody na překážku. Při této technologii nejsou použity žádné chemikálie. Další možnost výroby slídové kašoviny je termomechanický způsob. Struktura surové slídy se naruší částečným zbavením molekul vody vázaných v krystalické mřížce a poté následuje standardní štěpení hydromechanickým způsobem. Velikost zrn při hydromechanickém procesu výroby je o něco vyšší než při použití termochemického procesu a to od 0,04 do 2 mm s největším množstvím zrn kolem 0,4 mm. Pevnost v tahu je oproti kalcinovanému slídovému papíru nižší při zachování stejné plošné hmotnosti. Izolační systémy obsahují nižší obsah pojiva a tím i nižší hodnoty ztrátového činitele při zvýšené teplotě, ve srovnání s kalcinovaným slídovým papírem. Nekalcinovaný papír o příliš nízké plošné hmotnosti je tedy hůře strojně zpracovatelný a proto je jeho tloušťka při použití pro pásy resin-rich oproti kalcinovanému papíru o cca 0,20 mm vyšší. Jeho hlavní výhodou je dlouhodobá napěťová odolnost, velmi dobrá impregnovatelnost a používá se pro savé pásy pro technologii VPI. [1,8,22]

### 2.2.2 Resin-rich

Jak již bylo řečeno na začátku této kapitoly, izolační systémy velkých točivých elektrických strojů mohou být dvojího provedení: resin-rich a VPI (Vacuum Pressure Impregnation).

Resin-rich lze do češtiny volně přeložit jako: „již obsahující pryskyřici“. Základ této metody tvoří tříslůžkový kompozit s předimpregnovaným izolačním materiálem obsahujícím přibližně 30 až 40 % pojiva, který se dodává ve formě polotovaru. Nosnou částí je skleněná tkanina. Běžnou skleněnou tkaninu tvoří stáčená vlákna, celková tloušťka tkaniny je přibližně 0,14 mm. Novější technologií je použití skleněné tkaniny s rovinnými vlákny o celkové tloušťce 0,12 mm při zachování mechanických vlastností. Tato změna plochy průřezu s sebou přináší lepší kontakt s pojivou pryskyřicí, navíc je elektrická pevnost pásy vyrobené touto novější technologií přibližně o 7% vyšší a vykazuje nižší dielektrické ztráty. Dále také vykazuje lepší odolnost pulsnímu namáhání a částečným

výbojům, jak lze vidět z výsledků studie [23]. Plnivo neboli izolační bariéru tvoří nejčastěji kalcinovaný slídový papír, který je hutnější, pevnější, ale méně nasákový než nekalcinovaný. Pojivem spojujícím obě složky dohromady může být například reaktoplastická, bezrozpuštědlová, novolaká nebo cykloalifatická, epoxidová pryskyřice. Velmi důležité je, že pojivo se dodává v takzvaném B stavu, tedy částečně předtvrzené. Pro zachování vlastností musí být materiál suchý, nelepivý a s co nejdelší skladovatelností. Potřebná tloušťka tohoto materiálu se pohybuje v závislosti na velikosti pracovního napětí stroje od 0,15 do 0,2 mm. [1]

Samotné ovíjení cívek vinutí může být provedeno dvěma způsoby a to kontinuální nebo diskontinuální technologií. U diskontinuálního způsobu je rovná část vinutí tvořena foliovým materiálem, na který v čelech vinutí navazuje ovin páskou. Tomuto přechodu mezi drážkovou částí a čelem vinutí je nutno věnovat zvýšenou pozornost. V případě použití kontinuální technologie je vinutí po celé délce, v drážkové části i na čelech vinutí, ovinuto materiálem ve formě pásky nejčastěji o šířce 20 mm. Překrytí pásky může být poloviční, třetinové nebo dvoutřetinové.

Pro menší a střední cívková vinutí se častěji používá **diskontinuální způsob** ovíjení a vytvrzování. Nejdříve se ručně ovine drážková část vinutí pomocí pásky, poté se nechá vytvrdit v lisu při působení zvýšené teploty a tlaku. Při ručním ovíjení, aby se zabránilo tvoření vrásek, které by snižovaly hodnotu průrazného napětí, je potřeba, aby páska byla rovnoměrně napínána. Toho se docílí navinutím fólie před samotným ovíjením nejprve na dřevěný hranol nebo trubku. Takto se dosahuje velké a rovnoměrné síly při napínání. Čela vinutí se izolují jiným typem pásky, která se vytvrzuje až po navinutí cívek do jha statoru. Ovinutí čel probíhá od místa přechodu a zároveň se natírají těsníci pryskyřicemi a laky nebo dalšími materiály. Přejechod mezi drážkovou izolací a izolací čel vyžaduje zvýšenou pozornost, aby byl tento přechod elektricky bezpečný a odolný proti vnějším vlivům. Počet vrstev izolace čel je závislý na požadované elektrické pevnosti a mechanickém namáhání. Pokud se izolování čel provádí, až po vytvrzování izolace rovných částí cívek, je nutno dbát na dostatečné překrytí jednotlivých izolací. Pokud se izolace čel vinutí provádí před lisováním rovné drážkové části, aplikuje se jen jedna nebo dvě vrstvy, které se doplní potřebným počtem vrstev po izolování rovné části. V místech přechodu se musí dodržet velikost maximální tloušťky izolace, dále se nedoporučuje umisťovat místo spojení do drážky statoru nebo překrývat protikoronovou ochranou drážkové části. Velkou výhodou diskontinuálního způsobu je, že při vytvrzování čel odpadá nutnost použití forem. Pro

izolaci drážkové části je možné použít například materiály typu Relanex® 45.011, 45.031, 45.033 nebo Relastik® 45.006, 45.013, 45.036, 45.037. Pro izolaci čel se mohou použít materiály Relastik® 45.007 nebo Remikaflex®, které jsou vyrobeny z kalcinovaného slídového papíru a teplem smrštitelné PET fólie. [12,20]

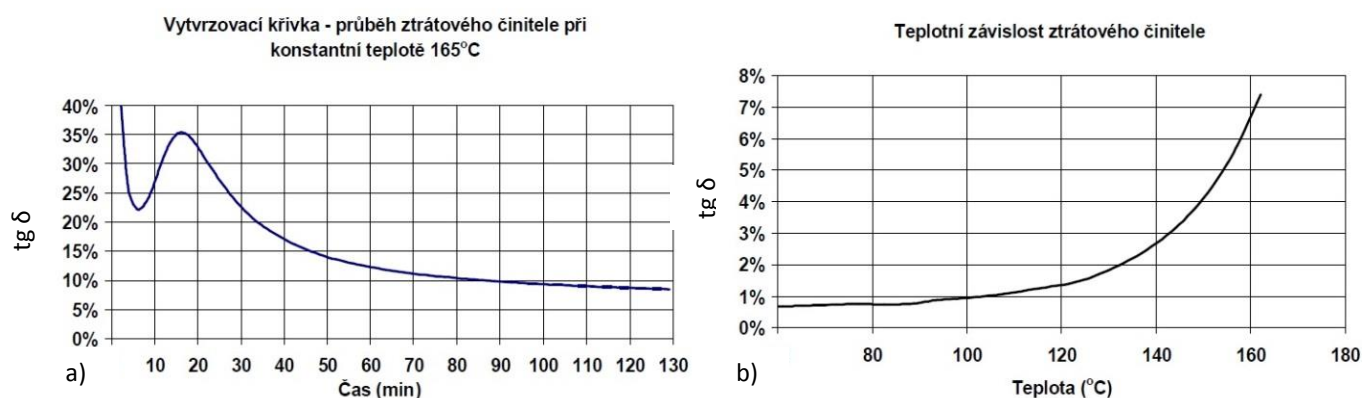
Kontinuální ovíjení a diskontinuální vytvrzování se používá spíše pro střední a velká cívková vinutí. Ovinutí probíhá ručně nebo strojně jedním typem izolační pásky, obvykle s 50% překrytím, pro lepší konečné vlastnosti izolace se doporučuje ovíjení v jednom směru. Ovinutí probíhá tak, že se nejprve izoluje rovná část cívky 30 až 40 % požadovaného počtu vrstev a poté se kontinuálně izoluje celá cívka zbývajícím počtem vrstev. Před tvrzením v lisovací formě se mohou aplikovat pásky s protikoronovou ochranou. Vytvrzování drážkové část probíhá v lisu za zvýšeného tlaku a teploty, izolace čel se opatřuje přídatnými lisovacími formami, protože vytvrzování čel se provádí, až po vložení celých cívek do jha statoru. Tento způsob je vhodný pro izolační systémy a pro napětí až do 11 kV a jeho výhodou je dobrá homogenita v místech výstupu cívek z drážek statoru. Vhodným materiálem pro technologii je například Relanex® 45.033 nebo Relastik® 45.006, 45.036, 45.037. [20,22]

Po ovinutí následuje vytvrzení, které probíhá ve formách pro stažení izolace na požadovaný rozměr. Cívka se vkládá do předehřátého lisu o teplotě přibližně 60 °C s nižším tlakem. Poté se teplota zvyšuje, dokud se nedosáhne gelační teploty pryskyřice – tj. přibližně 100°C, pak se forma uzavře, dotáhne nadoraz a aplikuje se plný tlak. Zmeškání tohoto momentu může být fatální, protože při probíhající reakci již není dotažení možné. Aby bylo zajištěno stejných vlastností izolace po celé délce, doporučuje se takzvané odplynění, které se provádí ještě před dosažením gelového stádia, tak že se formuje za nižšího tlaku nebo pootevřením formy pro odchod plynných složek. Před vytvrzením je nutné provést ještě řádné vysušení, protože pryskyřice je částečně těkavá a značně vlhká. Proces vytvrzení pak probíhá při teplotách 160 až 170 °C po dobu přibližně jedné hodiny, tato doba závisí na druhu použité pryskyřice a tloušťce izolace, může se tedy lišit. Velmi důležitý je proces ochlazování přibližně na 60 °C, který musí být pozvolný, aby nedocházelo k defektům vznikajícím různými chladnutími zejména jádra a izolační tyče. Aby se zabránilo slepení výrobku s formou, používá se tzv. separační fólie. Dále se izolace opatřuje ochrannými polovodivými páskami a nátěry, které pomáhají eliminovat výbojovou činnost v izolaci. Tyto polovodivé vrstvy se mohou nanášet jako dodatečná



vrchní vrstva nebo mohou být součástí izolace a vytvrzeny dohromady. Takto zhotovená tyč vinutí je po vyjmutí z formy a ochlazení připravena k montáži do stroje. [1,12,20]

Samotný proces vytvrzování lze ověřovat měřením skutečné teploty cívky nebo měřením ztrátového činitele během vytvrzování. Autor článku [22] prováděl měření vytvrzovací křivky a teplotní závislosti ztrátového činitele materiálu Relanex® 45.033 o šířce 20 mm strojně aplikovaného na tyčový vzorek s polovičním překrytím. Celková izolace o tloušťce izolační vrstvy 2,8 mm a délce 950 mm, byla nanášena na ocelové tyče se zaoblenými hranami o rozměrech 10 x 36 mm a délce 1200 mm.



Obr. 2.1 a) vytvrzovací křivka a b) teplotní závislost ztrátového činitele materiálu Relanex® 45.033 (převzato z [22])

Volba vhodného materiálu pro výrobní technologii resin-rich závisí na požadovaných konečných vlastnostech izolačního systému. Tyto údaje jsou dostupné z katalogových listů jednotlivých výrobců. Pro porovnání používaných materiálů pro různé části cívek, jsem vybral jednotlivé izolační materiály od společnosti COGEBI a.s. Tato společnost neustále vyvíjí a inovuje izolační materiály pod názvem Relanex® s nosnou skleněnou tkaninou nebo Relastik® s nosnou PET (PETP) nebo PEN folií. V obou případech se jedná o kompozitní izolační materiály z kalcinovaného slídového papíru, epoxy-novolakové pryskyřice v B stavu pro třídu teplotní odolnosti 155 (F). Výjimkou je Remikaflex®, jedná se o velmi flexibilní materiál vyrobený ze skleněné tkaniny a modifikované expoxidové pryskyřice v B stavu, který je z obou stran polepen PETP folií. Velmi perspektivní je materiál Relanex® 45.033, který je možno použít k ovíjení v drážkové části i čel vinutí, navíc vykazuje velmi dobrou pevnost v tahu. Vývoj materiálových vlastností vede k navýšení pevnosti v tahu, což s sebou přináší lepší možnosti aplikace, dále zkrácení doby vytvrzovacího cyklu, zvýšení doby skladovatelnosti a lepší teplotní závislosti ztrátového činitele vytvrzeného materiálu. [20,21,22]

Tab. 2.2 Porovnání vlastností materiálů typu Relanex® [21]

	Relanex® 45.033 - 0.22	Relanex® 45.031 - 0.21	Relanex® 45.031 - 0.18	Relanex® 45.011 - 0.18	Relanex® 45.011 - 0.21
Tloušťka [mm]	0.22 ± 0.035	0.21 ± 0.02	0.18 ± 0.02	0.19 ± 0.02	0.21 ± 0.02
Hmotnost [g/m <sup>2</sup> ]	301 ± 27	300 ± 20	258 ± 20	263 ± 15	295 ± 20
Skleněná tkanina [g/m <sup>2</sup> ]	33 ± 2	33 ± 2	33 ± 2	33 ± 2	33 ± 2
Remika® [g/m <sup>2</sup> ]	160 ± 12	150 ± 10	120 ± 5	130 ± 5	150 ± 8
Obsah pojiva [g/m <sup>2</sup> ]	108 ± 13	117 ± 15	105 ± 13	100 ± 13	112 ± 15
Min. pevnost v tahu [N/10mm]	150	150	150	80	80
Skladovatelnost při 20 °C [měs.]	6	6	6	6	6

Tab. 2.3 Porovnání vlastností materiálů typu Relastik® [21]

	Relastik® 45.037	Relastik® 45.036	Remikaflex® 45.005	Relastik® 45.006	Relastik® 45.013	Relastik® 45.007-0.17
Tloušťka	0.17 ± 0.02	0.17 ± 0.02	0.14 ± 0.02	0.17 ± 0.02	0.16 ± 0.01	0.17 ± 0.02
Hmotnost [g/m <sup>2</sup> ]	259 ± 19	267 ± 18	192 ± 22	267 ± 18	240 ± 12	268 ± 20
Nosná složka (typ folie) [g/m <sup>2</sup> ]	(PEN) 34 ± 3	(PET) 42 ± 2	PETP 2x(17 ± 2) skl. tkan. 33 ± 3	(PETP) 42 ± 2	(PETP) 32 ± 2	(PETP) 43 ± 4
Remika® [g/m <sup>2</sup> ]	150 ± 8	150 ± 8	75 ± 5	150 ± 8	150 ± 5	150 ± 8
Obsah pojiva [g/m <sup>2</sup> ]	75 ± 8	75 ± 8	50 ± 10	75 ± 8	58 ± 5	75 ± 8
Min. pevnost v tahu [N/10mm]	30	30	120	30	30	15
Skladovatelnost při 20 °C [měs.]	4	4	6	4	6	4

Kromě materiálů pro hlavní izolaci se používají ještě další ochranné vrstvy, které mají funkci dokončující, zpevňovací a krycí navíc mají za úkol chránit izolaci proti vnějším vlivům a mechanickému namáhání. Tyto krycí vrstvy se používají hlavně u technologie resin-rich. Často se používají ochranné laky a vrstvy, omezující vznik částečných výbojů a zmírnění skokové změny intenzity elektrického pole na výstupu vinutí z drážek.

### 2.2.3 VPI (Vacuum pressure impregnation)

Tento izolační systém získal svůj název podle klíčové výrobní operace: vakuově tlakové impregnaci. Hlavním komponentem je zde savý izolant nejčastěji ve formě slídové pásky, který je prosycen impregnačním materiálem při procesu impregnace. Nosnou složku tvoří skleněná tkanina, polyesterové rouno nebo fólie například polyimidová. Pojiva

obsahuje přibližně 7 % a musí být kompatibilní s impregnantem, aby nedošlo ke vzájemnému znehodnocení. Primární vlastností je savost pásy, protože je nutné dokonalé prosycení impregnačním materiálem při větším počtu vrstev například deseti i více. Základem je tedy použití savého nekalcinovaného slídového papíru, který je hrubšího zrnění a má odpovídající mechanické vlastnosti, hlavně ohebnost a pevnost v tahu při ovíjení. Aby nedošlo k porušení slídového papíru, nesmí být pevnost v tahu menší než 80 N na 1 cm šířky. Jako impregnant se používají bezrozpuštědlové epoxidové, polyesterové a silikonové pryskyřice se stoprocentním obsahem sušiny, aby velmi dobře vyplnily prostor, navíc mají dobré elektrické i mechanické vlastnosti a relativně krátkou vytvrzovací dobu. Tyto pryskyřice se používají pro teplotní třídy 180 (H) a 200. [1]

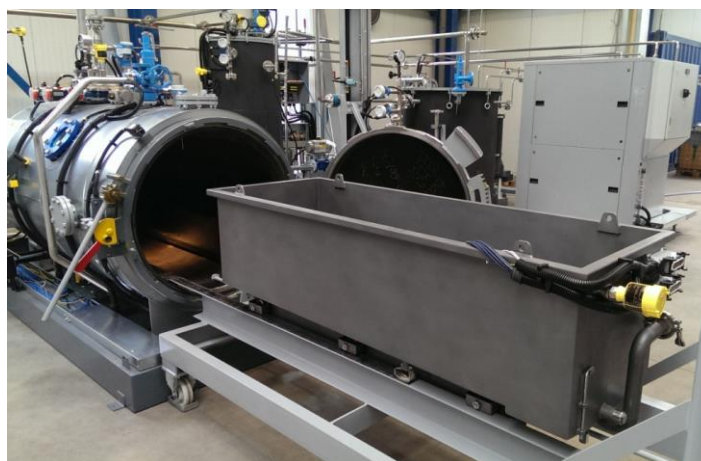
Slídové pásy s polyesterovou fólií jsou často používány pro menší stroje do jmenovitého napětí 6,6 kV, hlavně pro jejich nízkou cenu. Přestože mají polyesterové fólie ve srovnání se skleněnou tkaninou vyšší elektrickou pevnost při působení stárnutí, vlastnosti limitující jejich použití pro vyšší napěťové hladiny jsou hlavně snížená impregnovatelnost a nižší mechanická pevnost. Pásy pro VPI vyztužené polyesterimidovou fólií, po stranách prosycené pryskyřicí, se používají spíše pro stroje do napětí přibližně 15 kV a také jsou cenově výhodné. Třívrstvé pásy jsou robustnější, protože slída je chráněna po obou stranách, ale konečná izolace obsahuje méně slídy. [29,30]

Zařízení pro metodu VPI tvoří impregnační kotel, který musí být tlakotěsný a vakuotěsný. Tento kotel je dále vybaven kromě ohřívacího a chladicího zařízení také zásobníkem, ve kterém je skladován impregnant za snížené teploty a přetlaku inertního plynu. Takto je možné docílit co nejdelší doby skladování bez ztráty požadovaných vlastností. Tento impregnant před samotnou impregnační prochází přes ohřívací zařízení, kde se ohřeje na danou teplotu a za stálého míchání dojde k odplynění ve vakuu. Po skončení procesu impregnace je zbylý impregnační materiál ochlazen a odčerpán zpět do zásobníku. Velmi důležitou součástí impregnačního zařízení je také sušárna s teplotním rozsahem do 200 °C, kde dochází k vytvrzení naimpregnovaného vinutí. Dále k zařízení patří ještě další komponenty například vývěvy, kompresory, chladicí zařízení, vymrazovací zařízení na sušení vzduchu a soustava potrubí a měřidel. Soustava zařízení a vybavení potřebných pro technologii VPI je oproti resin-rich značně finančně nákladná. [1,24]



Obr. 2.2 Zařízení a vybavení pro technologii VPI (převzato z: [24])

V problematice vakuově tlakové impregnace se můžeme setkat se zkratkami VIW (Vacuum Impregnated Winding Method) a VIB (Vacuum Impregnated Bar Method), také se používají termíny globální a individuální VPI. Globálního VPI neboli VIW znamená, že celé vinutí je impregnováno jako jeden celek, u individuálního VPI či VIB jsou impregnovány jednotlivé tyče vinutí zvlášť, což s sebou přináší řadu výhod. Tyto tyče se před impregnováním mohou vkládat do forem, ve kterých zůstávají během procesu impregnace a vytvrzování. Takové formy přinášejí řadu výhod, například impregnování velkého počtu tyčí vinutí najednou a také odpadá nutnost tvarování tyčí s naimpregnovaným vinutím, protože tyče se tvarují před umístěním do forem. Hlavní výhodou individuálního VPI je, že při poruše není nutno převíjet celé statorové vinutí, ale jen jeho poškozené části.



Obr. 2.3 Impregnační kotel vhodný pro metodu VIB (převzato z: [24])

Na obr. 2.3 je impregnační kotel vhodný například pro technologii VIB, kde jsou impregnovány jednotlivé tyče vinutí zvlášť.

Důležitým faktorem pro VPI izolaci je výběr správného impregnačního materiálu, kterého v konečné izolaci bývá kolem 20 až 30 % obsahu. Kvalita impregnantu má

významný vliv na proces impregnace a vytvrzování a také rozhoduje o teplotní třídě izolačního systému. Jejich úkolem je přilnout k izolovanému materiálu, vyplnit dutinky v izolaci, poskytnout mechanickou pevnost a chránit vinutí proti chemikáliím, prachu a vlhkosti. Dále musí mít vhodné elektrické, tepelné a mechanické vlastnosti, aby byl splněn požadavek na dlouhou životnost stroje.

Používané pryskyřice pro impregnaci lze rozdělit do pěti skupin: polyesterové (UP), polyesterimidové (UPI), hybridní epoxidové pryskyřice (EP-HY), které jsou směsí epoxidové a polyesterové nebo polyesterimidové pryskyřice, anhydridové epoxidové (EP-AH) a epoxidové pryskyřice (EP). Požadavky kladené na pryskyřice nezávisí pouze na velikosti a rozměrech vyráběného stroje, ale také na výrobním procesu a použitém vybavení, tak jako na ostatních použitých materiálech použitých při výrobě izolace. [29,30]

Tab. 2.4 Porovnání vlastností jednotlivých pryskyřic používaných pro VPI [29,30]

	Polyesterová pryskyřice (UP)	Polyesterimidová pryskyřice (UPI)	Hybridní epoxidové pryskyřice (EP-HY)	Anhydridová epoxidová pryskyřice (EP-AH)	Katalysovaná epoxidová pryskyřice (EP)
Teplotní třída	155 (F)	180 (H)	155 (F)	155 (F)	155 (F)
Doba skladovatelnosti	+	++	+	+	+
Teplota při skladování	+	++	0	+	+
Impregnační teplota	++	++	++	+	+
Rozpouštědlové	Ano	Ano	Ano	Ano	Ne
Odolnost proti vlhkosti	Ano	Ano	Ne	Ne	Ano
Gelační čas při 120 °C [min]	15 - 30	2 - 3	4 - 6	4 - 6	> 100
Vytvrzovací cyklus	+	++	+	++	+
Tepelné vlastnosti	+	++	+	+	+
Elektrické vlastnosti	0	++	++	++	+
Mechanické vlastnosti	+	+	++	++	++
Použití pro napětí [kV]	6,6	15	30	30	30
Cena	++	++	++	+	+

(++ velmi dobré vlastnosti; + dobré vlastnosti; 0 průměrné vlastnosti)

Všeobecně se v technice vysokého napětí preferují pryskyřice s nižší viskozitou, protože se snáze impregnují na vrstvy slídové pásky a snižují dobu trvání celého VPI cyklu. Navíc by teplota skladování a impregnování těchto pryskyřic měla být ideálně rovna pokojové teplotě, tím by odpadl proces chlazení a ohřívání impregnantu a ušetřily by se

energie, čas a náklady na celý impregnační proces. Dále se řeší skladování, tedy při jaké teplotě a jak dlouho, lze pryskyřice skladovat, záleží také na tom jak často a v jakém množství ji budeme používat a doplňovat, aby byla zachována její viskozita. Velkou výhodou nejen při manipulaci je odolnost pryskyřic proti vlhkosti, nízká toxicita, zdravotní a ekologická nezávadnost. Při výběru vhodnosti pryskyřice se snažíme, aby měla co nejkratší čas gelace při impregnování a zabránilo se ztrátám při vytvrzování. Na druhou stranu krátký gelační čas znamená snížení skladovatelnosti této pryskyřice, ale je žádoucí pro zkrácení doby trvání celého impregnačního cyklu. [30]

Velký vliv na kvalitu izolačního systému má také ovíjení páskou, rozhodující je správné nastavení parametrů pro ovíjení jako například správné napnutí a překrytí pásky, protože pevně ovinuté slídové pásky v izolaci s vysokým obsahem slídy, ale velmi dobrou a poměrně stálou elektrickou pevností, jsou poté složitější na prosycení a správnou impregnaci. Permeabilitu izolace lze měnit pomocí překrytí pásky, obvykle se používá 48 až 50% překrytí páskou, čím méně jsou pásky překryty, tím rychlejší je proces impregnace. [29]

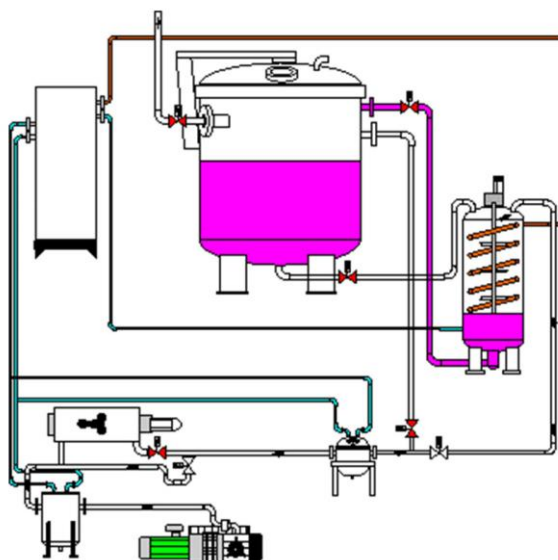
Parametry každého VPI cyklu se liší v závislosti na typu a velikosti stroje, vlastnostech a kvalitě použitých izolačních materiálů, stupně ochrany konečné izolace a také podle toho jakým vnějším vlivům bude stroj v provozu vystaven. VPI cyklus se obvykle skládá z pěti kroků [29]:

1. Sušení	1 – 24 h	70 – 140 °C	
2. Vytvoření vakua	1 – 8 h	20 – 70 °C	
3. Zaplavení vakuem	0,1 – 2 h	20 – 70 °C	
4. Přetlaková fáze	2 – 12 h	20 – 70 °C	2 – 7 bar
5. Vytvrzování	8 – 20 h	120 – 180 °C	

Impregnační proces začíná sušením pro odstranění vlhkosti při teplotách kolem od 70 do 140 °C po určitou dobu v závislosti na velikosti vinutí. Po vychladnutí na teplotu okolo 50 až 60 °C se vinutí nebo jeho části přenesou do impregnačního kotle, kde se zavede vakuum a ode dna se začne zaplavovat impregnantem. Zaplavení probíhá přibližně po dobu jedné hodiny, aby se izolant dostatečně prosytil. Velmi důležitá je přilnavost pásky k pryskyřici a správné nastavení parametrů VPI cyklu. Poté se zruší vakuum a po dobu přibližně jedné hodiny se pomocí kompresoru vytvoří přetlak. Po zrušení přetlaku se zbylý impregnat vypustí zpět do zásobníku. Naimpregnované vinutí se přemístí do sušárny, kde se suší a dotvrzuje. Proces sušení probíhá ve dvou krocích, v prvním je vinutí sušeno za

sníženého tlaku, aby se urychlilo odčerpání těkavých složek. Následné vytvrzení se děje prouděním teplého vzduchu za normálního tlaku. Proces impregnace může být pro dosažení lepších vlastností opakován. [1,12,29]

Vytvrzovací proces pryskyřic je obvykle urychlován pomocí tvrdidel a katalyzátorů. Pro technologii VPI se tyto katalyzátory mohou nacházet v izolační pásce nebo pryskyřici. Izolační systémy se slídovými páskami obsahujícími katalyzátory nabízí řadu výhod, například delší dobu skladovatelnosti pryskyřice a menší odtékání pryskyřice po impregnaci. [29]



Obr. 2.4 Zjednodušené schéma impregnačního procesu (převzato z: [24])

Díky celkové impregnaci je vinutí zapouzdřeno a má homogenní vlastnosti po celém izolačním systému, velmi dobrý odvod tepla a vysokou odolnost proti vlivům prostředí a namáhání.

#### 2.2.4 Porovnání VPI a Resin-rich

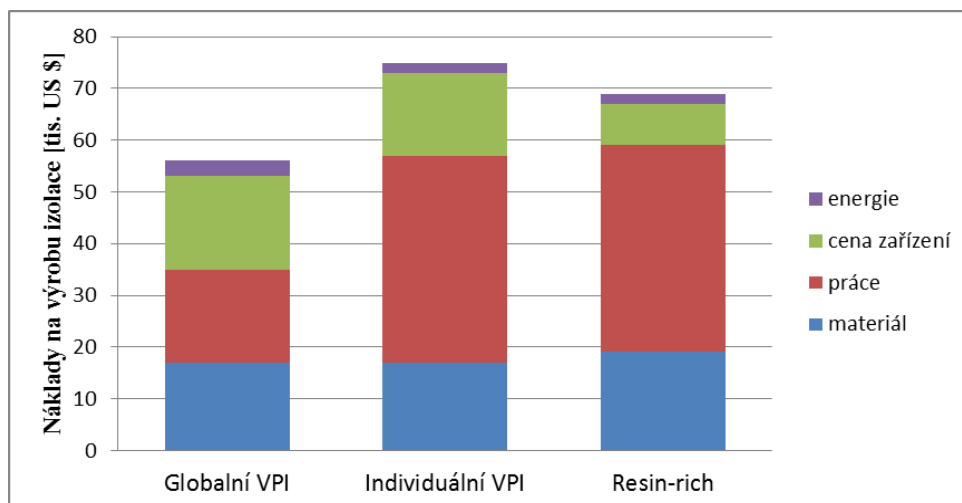
Rozdíly obou technologií jsou hlavně v náročnosti a pořizovací ceně zařízení potřebných pro výrobu. Pořizovací cena výrobních zařízení pro technologii VPI je vyšší, a vyplatí se spíše pro sériově vyráběné stroje. Izolační systém VPI vykazuje homogenní vlastnosti, které technologie resin-rich nemá, rozdílné vlastnosti jednotlivých částí vinutí se u této technologie projevují hlavně při použití diskontinuálního ovíjení tyčí vinutí.

Další významné rozdíly mezi těmito technologiemi jsou v používaných izolačních materiálech. Technologie VPI využívá vysoké savosti pásky s malým obsahem pojiva (přibližně do 7 až 8 %) vyrobené z nekalcinovaného slídového papíru, pro dostatečné

prosycení impregnačním lakem. Technologie resin-rich používá izolační materiály nejčastěji na bázi kalcinovaného slídového papíru, s obsahem pojiva 30 až 40 %, kde nosnou složku tvoří skleněná tkanina nebo PEN, PET (PETP) fólie. Po vytvrzení hlavní izolace obou izolačních systémů resin-rich i VPI je obsah pryskyřice kolem 25 – 30 %.

U technologie resin-rich je potřeba přesně sledovat teploty a doby při vytvrzování. Vytvrzování zde probíhá v lisu za zvýšeného tlaku a teploty, izolaci čel je nutno opatřit přídatnými lisovacími formami, protože vytvrzování čel se provádí, až po vložení celých cívek statoru. Hlavní výhodou technologie resin-rich je možnost výměny jednotlivých vadných tyčí. Systém VPI-VIW, kde je celé vinutí impregnováno jako jeden celek, je rychlejší, ale opravy se provádějí velmi obtížně, protože vyjmutí tyče je téměř nemožné.

Náklady na výrobu izolačního systému pro vysokonapěťové stroje závisí hlavně na výkonu a jmenovitém napětí stroje. Na *obr. 2.5* níže jsou porovnány cenové náklady na výrobu generátoru spalovací turbíny o výkonu 100 MW různou výrobní technologií. Jak lze z grafu vidět, cena silně závisí na jednotlivých výrobních podmínkách. Prostor pro snížení nákladů při zachování kvality výroby se nachází ve výběru vhodných izolačních materiálů a optimalizaci výrobního procesu, u VPI technologie se jedná hlavně o optimalizaci správných parametrů při zaplavování vakuem, fázi přetlaku a samotném vytvrzení, které jsou pro tento izolační systém kritické. [29]



Obr. 2.5 Cenová kalkulace výroby 100 MW generátoru různými technologiemi [29]

Na často pokládanou otázku, která z výrobních technologií vykazuje delší životnost izolace stroje, nelze přesněji odpovědět, ale lze konstatovat, že kalcinovaný slídový papír přináší do izolačního systému vyšší hodnoty elektrické pevnosti. [30]



Tab. 2.5 Porovnání technologií resin-rich a VPI

	Resin-rich	VPI	
		VIW	VIB
<b>Technické zařízení</b>	Vytvrzovací formy a pece	Vakuotěsné impregnační zařízení a kotel	
<b>Náročnost výroby</b>	Jednodušší přípravky	Vyšší cena náročného zařízení	
<b>Montáž</b>	Po vytvrzení tyčí	Před vytvrzením a impregnací	Po vytvrzení jednotlivých tyčí
<b>Rozměry stroje</b>	Neomezeny	Omezeny rozměry impregnačního kotle	
<b>Možnost oprav</b>	Možnost opravy jednotlivých tyčí	Obtížná	Možnost výměny tyčí
<b>Použitelnost</b>	Větší stroje, kusová výroba	Menší stroje, sériová výroba	Větší stroje, sériová výroba
	Pro vyšší jmenovitá napětí,	Pro nižší jmenovité napětí (15 kV), nevhodné pro Roeblovy tyče	
<b>Vlastnosti izolace</b>	Vysoká dielektrická pevnost	Homogenní systém, lepší izolační vlastnosti a odvod tepla	
<b>Výhody</b>	Snadná opravitelnost, možnost testování jednotlivých tyčí	Hermetizace vinutí, lépe odolává dynamickým silám	
	Nižší investice do zařízení	Rychlost	
<b>Nevýhody</b>	Možnost výskytu nehomogenit	Nemožnost opravy	Časová náročnost
	Vytlačení přebytečné pryskyřice při lisování	Vysoké pořizovací náklady	Nejnákladnější z technologií
	Pro každý stroj jiná vytvrzovací forma	Nutnost skladování a chlazení impregnantu	
	Přípravky na vytvrzování, časově náročnější	Drahé a složité zařízení	

Každý způsob má své výhody a nevýhody, proto nelze jednoznačně říci, jaká technologie je lepší. Rozhodnutí jakou výrobní technologii zvolit by mělo záviset hlavně na tom, jak velké stroje, do jakého prostředí a provozního namáhání, dále v kolika kusech bude výrobce stroje vyrábět a také na požadované životnosti a možnosti opravy strojů. Izolační systém resin-rich je vhodnou volbou pro velké stroje, které jsou příliš velké pro zařízení nutné k technologii VPI, hlavně kvůli ponoru ve vakuovém impregnačním kotli. Dále je výrobní technologie resin-rich vhodná pro hydrogenerátory, které nemohou být odmontovány a poslány do opravy, tak se převinutí musí provádět na místě. Technologie VPI se doporučuje spíše pro sériově vyráběné stroje, protože cena potřebného zařízení a vybavení je vysoká a je na jednotlivých výrobcích, jestli se tato investice vyplatí. VPI se doporučuje do nevlídných pracovních prostředí, kde se nachází abrasivní materiály jako poletující prach nebo chemikálie, které mohou napadat izolační systém, protože vodiče a izolace jsou kompletně zapouzdřeny a chráněny proti vlhkosti, prachu a korozi.

### 3 Rozbor poruch izolačních systémů

Velké točivé stroje jsou základními komponenty energetických bloků, proto se vyžaduje jejich bezporuchový chod. V provozu jsou tyto stroje vystaveny nejrůznějším provozním namáháním a vnějším vlivům, jejichž následky hlavně izolační systém postupně stárne. Generátor je složen z velkého počtu dílů a součástí, proto se může porouchat na více místech, různými způsoby a z různých příčin. Je velmi důležité z hlediska oprav a prevence tyto poruchy identifikovat, zjistit jejich rozsah a hlavně skutečnou příčinu, která poruchu způsobila.

#### 3.1 Deteriorace izolačního systému

Stárnutí izolační soustavy lze definovat jako nevratnou změnu způsobující ztrátu schopnosti plnit požadované funkce této soustavy, kde jsou změny charakterizovány počtem poruch, vzrůstajících s časem. Vznikající poruchy jsou následkem uvedených změn stárnutí. Faktor stárnutí je definován normou [16] jako faktor vlivu ovlivňující stárnutí. Faktory vlivu jsou namáhání způsobené provozními podmínkami, prostředím nebo zkouškou, která může ovlivnit stárnutí nebo dobu života izolačního systému.

Na sledovaný stroj mohou působit následující faktory stárnutí: elektrické, tepelné, mechanické včetně vlivů prostředí způsobující stárnutí systému, které ovlivňují dobu života stroje a vedou ve svém důsledku k poruše. Stárnutí sledovaného elektroizolačního systému může probíhat v jednotlivých etapách, ve kterých je namáhán různými vlivy. Mohou to být kombinace působících faktorů nebo také může být dominantní pouze jeden. Na střední a velké stroje působí teplota a prostředí, ale také může být důležitým faktorem stárnutí elektrické a mechanické namáhání. Na velmi velké stroje provozované ve vodíkovém prostředí, elektrické a mechanické namáhání působí ve větší míře než teplota a prostředí. V praxi jsou prováděny zrychlené zkoušky životnosti, srovnávací zkoušky a další testy, které se zabývají působením degračních faktorů jednotlivě nebo v kombinaci s dalšími faktory. Celkově musí izolační systém splňovat celou řadu náročných vlastností a parametrů, které jsou pro jeho použití ve stroji nezbytné. [3]

Pro návrh stroje s určitou mírou spolehlivosti je tedy nutno zahrnout kromě náročných elektrických a mechanických parametrů, také namáhání a stárnutí, kterým bude stroj v provozu vystaven. S návrhem je tedy spojeno i pochopení a následné modelování jevů, ke kterým během deteriorace dochází. Pro popis a modelování těchto jevů vzhledem

k životnosti materiálu se používají modely stárnutí. Modely stárnutí mohou být matematické nebo fyzikální, jednoparametrické či více parametrické, zahrnující pouze jeden i více faktorů stárnutí. V podstatě lze říci, že čím více získáme informací o fyzikálně chemických vlastnostech, probíhajících procesech v materiálu a jejich měřitelných projevech jako například izolační odpor, doby do průrazu a průrazná napětí, tím lepší model stárnutí lze sestavit. Samozřejmě není možno do těchto modelů zahrnout všechny faktory stárnutí působící na izolační systém. Základní modely tepelného a elektrického stárnutí jsou zmíněny v kapitole 3.1.1 a 3.1.2, pro modelování mechanického stárnutí lze použít například Odिंगův model nebo model dle Decht'ara a Usipova. Dále se používají vícefaktorové fyzikální modely, které zahrnují současné působení zvýšené teploty a elektrického pole, v dnešní době jsou používány například modely dle: Simoniho, Criena nebo Ramuův a Faluův model. Všechny tyto modely jsou blíže popsány například v [3],[4],[25].

Pro hodnocení izolačních systémů se používají srovnávací funkční zkoušky. Izolační systém zkoušený za účelem určení jeho odolnosti proti faktorům stárnutí, označovaný normou [16] jako kandidátský, se porovnává s referenčním izolačním systémem, jehož vlastnosti byly stanoveny na základě uspokojivých provozních zkušeností. Oba systémy jsou při těchto srovnávacích funkčních zkouškách vystaveny ekvivalentním zkušebním podmínkám. Funkční hodnocení probíhá na základě porovnávání diagnostických údajů kandidátského a referenčního systému, nejčastěji pomocí střední doby do poruchy. Funkční zkouška kandidátského izolačního systému je považována za úspěšnou, pokud 90% konfidenční interval daného percentilu použitého rozdělení pravděpodobnosti, který představuje střední hodnotu, je nad nebo spadá do intervalu získaného z referenčního systému. Takový postup dovoluje srovnání a kvalifikaci, ale nelze zcela stanovit přednosti jednotlivých izolačních systémů. Takové informace lze získat pouze z širokých provozních zkušeností. [16]

Generátory a jejich izolační systémy jsou obvykle velmi spolehlivé s očekávanou životností více než 30 let. Při provozu působí na izolační systém celá řada degradačních procesů, které postupně snižují elektrickou a mechanickou pevnost izolace, až do bodu, kdy může dojít k poruše. Některé degradační procesy a poruchy jsou způsobeny různými konstrukčními či výrobními vadami, ale velká část poruch je způsobena stárnutím izolace vlivem teplotních, mechanických, elektrických a vnějších vlivů, které se objevují při provozu stroje.

Tab. 3.1 Faktory ovlivňující stárnutí izolačního systému točivého stroje [7,10]

<b>Faktory stárnutí působící na izolační systém točivého stroje</b>				
<b>Postižená část</b>	<b>Tepelné</b>	<b>Elektrické</b>	<b>Mechanické</b>	<b>Prostředí</b>
<b>Magnetický obvod</b>	Nepřiměřené chlazení Celkové přehřátí Místní přehřátí Přehřátí vysokou teplotou	Přebuzení Podbuzení Výrobní defekty Zkrat	Tření a uvolňování jádra Přehřátí plechů	Absorpce vlhkosti Chemická kontaminace Prach a nečistoty
<b>Stator</b>	Vystavení zvýšeným teplotám Postupné rozpínání izolace Výkyvy teplot Praskliny po obvodu izolace Uvolňování čel vinutí	Částečné výboje Klouzavé výboje Vytváření vodivých cest na povrchu Absorpce vlhkosti Pulzní napětí Nesouměrný zdroj napětí	Vibrace Elektromagnetické síly na čelech vinutí Drsné a hrubé materiály	Absorpce vlhkosti Chemická kontaminace Prach a nečistoty Biologické vlivy
<b>Rotor</b>	Uvolňování cívek v drážkách	Dočasné přepětí Nestálé buzení Absorpce vlhkosti Vytváření vodivých cest na povrchu	Odstředivé síly Drsné a hrubé materiály Provozní kroucení spojky	

Izolační systémy mohou být v provozu vystaveny vysoké teplotě, zvýšenému napěťovému namáhání, vibracím, mechanickým silám a vlivům prostředí. Jednotlivé faktory mohou působit individuálně nebo v kombinaci s dalšími faktory a postupně tak způsobovat opotřebování a stárnutí izolačního systému.

### 3.1.1 Tepelné stárnutí

Tepelné stárnutí provází fyzikální a chemické změny, které vznikají důsledkem chemických degradačních reakcí vlivem teploty. Teplota vinutí tedy podstatně ovlivňuje dobu života izolace. Souvislost mezi délkou života sledovaného objektu  $\tau$  [h] a teplotou  $T$  [°C] popisuje Montsingerova rovnice:

$$\tau = A \cdot e^{-BT} \quad (3.1)$$

kde  $A$  a  $B$  jsou materiálové konstanty, které se určují experimentálně. Stárnutí izolace a doba života lze také určit z Arrheniovy rovnice:

$$\tau = a \cdot e^{-\frac{W_a}{RT}} \quad (3.2)$$

kde  $W_a$  aktivační energie procesu [eV],  
 $R$  univerzální plynová konstanta,  
 $a$  konstanta závislá na koncentraci vzniklých aktivních molekul,  
 $T$  absolutní teplota.

Souvislost chemické reakce a působení tepelného stárnutí popisuje Büssingův teorém:

$$\tau = C \cdot e^{\frac{b}{T}} \quad (3.3)$$

kde  $\tau$  životnost izolace [h],  
 $b, C$  materiálové konstanty,  
 $T$  absolutní teplota. [3,8]

Doba života sledovaného materiálu je tedy vždy exponenciální funkcí teploty stárnutí, to znamená, že se zvýšením teploty se exponenciálně zkracuje délka života izolace. Stárnutí izolace a její životnost velmi dobře vystihuje tzv. Montsingerovo pravidlo, které říká, že zvýšením teploty o 8 až 10 °C nad dovolené zatížení, se životnost izolace zkracuje zhruba o polovinu. Toto pravidlo bylo odvozeno empiricky pro transformátory s izolační soustavou olej-papír, proto neplatí pro všechny případy.

Teplotní odolnost celého stroje je určena jeho nejslabším a nejcitlivějším místem - izolačním systémem. Izolační materiály a izolační systém se zařazují do tepelných tříd na základě výsledků ze zrychlených zkoušek tepelného stárnutí.

Teplotní třída je číselné označení, rovné doporučené maximální hodnotě ve stupních Celsia pro nepřetržité použití, která je doporučena v normálních provozních podmínkách.

Zařazování materiálů podle teplotní odolnosti se doporučuje normou [19] ČSN EN 60085 ed.2 Elektrické izolace - Tepelné hodnocení a značení. V této normě je také definován relativní index teplotní roztažnosti RTE, jako číselná hodnota ve stupních Celsia kandidátského referenčního izolačního systému, který je porovnáván se známým stanoveným indexem tepelné odolnosti ATE referenčního izolačního systému, pokud jsou oba vystaveny stejným stárnutím a stejným diagnostickým postupům v porovnávací zkoušce. Stanovený index tepelné odolnosti ATE je číselná hodnota ve stupních Celsia, odvozená ze známých provozních zkušeností nebo ze známého porovnávacího funkčního hodnocení. Vystavení izolačního systému provozním teplotám převyšujícím jeho přiřazenou tepelnou třídu může způsobit zkrácení očekávané životnosti.

Tab. 3.2 Teplotní klasifikace izolačních systémů [19]

Index tepelné odolnosti RTE nebo ATE	Teplotní třída	Předchozí značení
> 90-105	90	Y
> 105-120	105	A
> 120-130	120	E
> 130-155	130	B
> 155-180	155	F
> 180-200	180	H
> 200-220	200	N
> 220-250	220	R
> 250-275	250	-

Pomocí tepelných funkčních zkoušek, lze ověřit teplotní odolnost a stanovit tepelnou třídu nového izolačního systému, než se jeho vlastnosti ověří v praxi. Zkušební postup se skládá z několika zkoušek stárnutí, které jsou provedeny při různých teplotách stárnutí. Při každé teplotě je stanovena zkušební doba života stroje. Na základě výsledků těchto zkušebních dob života se odhaduje životnost při teplotě třídy ve vztahu k životnosti známého referenčního izolačního systému při jeho teplotě třídy. Pro každý vzorek a každou teplotu se musí zaznamenat určitý počet hodin tepelného stárnutí do konce zkoušky a poté se výsledky stárnutí kandidátského a referenčního izolačního zanesou do grafu tepelné odolnosti. Pokud mají grafy zřetelně rozdílný sklon, tak se jejich procesy stárnutí výrazně liší a není možné provést platnou klasifikaci. [16]

Z důvodu dovoleného oteplení tlumícího vinutí mají synchronní generátory předepsán maximální počet spouštění například za den. Pokud nastane porucha, tak se pak následně zjišťuje, zda byl tento požadavek dodržen. Životnost vinutí turbogenerátoru závisí především na počtu spouštění a odstavení. Protože měď a železo mají rozdílný součinitel teplotní roztažnosti, dochází ke vzájemnému posouvání a mechanickému namáhání izolace. [8]

Postupná degradace vlivem zvýšené provozní teploty se projeví i na vzhledu izolace, proto je vhodné při odstávkách a diagnostických šetřeních nezanedbávat vizuální kontrolu vinutí. Typické jasně viditelné projevy degradace izolace jsou: smršťování, tvrdnutí, samovolné praskání, vznik prasklinek a vlasových trhlinek, ztráta pevnosti, křehnutí, blednutí, kroucení, deformace a v extrémních případech zuhelnatění. Kromě přehřátí izolace způsobují degradaci izolace také výkyvy teplot, které mohou vyvolat zvýšené mechanické namáhání.

### 3.1.2 Elektrické stárnutí

Mezi nejdůležitější elektrické parametry izolačního systému generátoru patří hodnota průrazného napětí a tloušťka elektroizolačního materiálu. Průrazné napětí je hodnota elektrického napětí, při kterém dojde k elektrickému průrazu izolace. Velikost průrazného napětí musí být větší, než je jmenovité napětí vinutí stroje a úzce souvisí s tloušťkou elektroizolačního materiálu. Důležitou otázkou, z hlediska ekonomické výroby a přestupu tepla v izolačním materiálu, je určit tyto elektrické parametry tak, aby byla zachována požadovaná bezpečnost a spolehlivost stroje, protože v současnosti je při výrobě strojů tlak na snižování rozměrů a tím i tloušťky elektroizolačního materiálu.

Modely elektrického stárnutí jsou odvozeny spíše empiricky, protože v porovnání s tepelným stárnutím, toho o elektrickém stárnutí není tolik známo. Navzdory tomu následující modely popisují proces stárnutí velmi dobře a výsledná doba života se nevzdaluje od reality.

Mocninný model:

$$\tau = k \cdot E^{-n} \quad (3.4)$$

Exponenciální model:

$$\tau = a \cdot e^{-bE} \quad (3.5)$$

kde	$\tau$	životnost izolace [h],
	$E$	intenzita elektrického pole [kV/mm],
	$a, k, n, b,$	konstanty určené empiricky.

Tyto modely popisují empiricky vliv intenzity elektrického pole na stárnutí izolačního materiálu. Nejsou závislé na struktuře systému, konfiguraci elektrod ani rozložení elektrického pole, jsou vhodné hlavně pro výpočet životnosti při pulzním namáhání, ale při nižších hladinách intenzity elektrického pole tyto modely selhávají a nelze je použít. [3,25]

Dominantním faktorem ovlivňujícím stárnutí izolačního systému je degradace elektrickým namáháním a spočívá zejména v důsledku kombinace působení zvýšené teploty a elektrického pole. Přesto se samotné elektrické stárnutí izolace vyskytuje spíše následkem přítomnosti materiálové vady například dutinek vznikajících nedokonalostí impregnace izolace, ve kterých se objevují částečné výboje.

Elektrické namáhání lze rozdělit na namáhání napětím stejnosměrným, střídavým napětím sinusového průběhu a pulsním napětím. V dnešní době jsou sledovány hlavně účinky vysokofrekvenčního pulsního napětí s různou frekvencí, tvarem a amplitudou, to se týká hlavně strojů menších a středních výkonů, které jsou napájeny z pulsních měničů napětí nebo měničů frekvence. Tyto stroje jsou používány například jako pohony výrobních linek, ale i jako elektrické trakční motory. V izolačním systému točivého stroje vzniká povrchová výbojová činnost, jedná se o drážkové výboje mezi izolovanými tyčemi vinutí a stěnou drážky a klouzavé výboje na výstupech vinutí z drážky, které způsobují značnou povrchovou degradaci. Tyto výboje je možné pozorovat již při napájení střídavým napětím sinusového tvaru, ale při pulzním namáhání jsou tyto jevy značně posíleny, protože vznikají na nižších napěťových hladinách. Z výsledků studie [25] byl měřen vývoj elektrických parametrů různých izolačních materiálů při namáhání pulsním napětím a pro porovnání a zvýraznění rozdílů byly hodnoty vztaženy k výsledkům naměřeným pro elektrické stárnutí sinusovým napětím 50 Hz. Pulzní namáhání způsobuje zvýšenou degradaci nejen hodnotou napětí, ale také vlivem strmých nárůstů napětí v izolaci o hodnotách několika kV za jednotky  $\mu$ s, které se pomocí vysoké frekvence velmi rychle periodicky opakují v řádech jednotek až desítek kHz, tato vysoká frekvence také způsobuje dielektrický ohřev materiálu. Dále může pulzní napětí způsobovat například růst ztrátového činitele, pokles izolačního odporu, lokální přehřátí vlivem zvýšených ztrát, ložiskové proudy způsobující stárnutí ložisek, přepětí v obvodech s měniči, částečných výbojů, jak drážkových, tak klouzavých výbojů na výstupu vinutí z drážek.[26,27]



V izolačním systému točivého stroje tedy vzniká slabé místo z hlediska spolehlivosti celého systému a to vlivem skokové změny elektrického pole na výstupu vodiče z drážky. Protože okolí izolovaného vodiče v drážce je magnetický obvod, na výstupu tyčí vinutí z drážky a čele vinutí se v okolí vodiče nachází vzduch. Zlepšení poměrů intenzity elektrického pole na výstupu izolovaných tyčí vinutí z drážek a ochraně povrchu před klouzavými výboji se provádí například dodatečnou izolací, která může být provedena dvěma způsoby: ovinem vodičů speciálními páskami s určitou vodivostí nebo nátěrem ochrannými laky s postupně se snižující vodivostí ve směru od magnetického obvodu stroje. Tato provedení mají však několik nevýhod: například nehomogenitu nanesení této ochranné vrstvy, omezenou životnost a teplotní odolnost. Proto problémem odstranění těchto nevýhod a zároveň omezením klouzavých výbojů, vznikajících na výstupech izolovaných vodičů vinutí z drážek, se v dnešní době zabývá celá řada pracovišť. V článku [26] bylo představeno řešení omezení výbojové činnosti pomocí dodatečné stínící vložky, díky které by bylo možné zvýšit maximální provozní teplotu a značně omezit maximální hodnotu intenzity elektrického pole. Nevýhodou použití v praxi by byla změna a větší náročnost výrobní technologie. [26,27,28]

Proces degradace elektrickým namáháním může být značně urychlen zvýšením kmitočtu zkušebního napětí. Proto se zvýšený kmitočet často používal pro urychlení elektrického stárnutí s předpokladem, že doba provádění zkoušky je úměrná zvýšenému kmitočtu. Samozřejmě toto tvrzení nemusí platit vždy. Konec doby života se projeví při vystavení elektrickému namáhání jako průraz nebo jako porucha při diagnostické zkoušce. [16]

### 3.1.3 Mechanické stárnutí

Mechanické namáhání je samo o sobě nebo v kombinaci s jiným druhem namáhání nejčastější příčinou poruchy a opotřebení. Jedná se o vibrace, přítomnost cizích materiálů, uvolněné části stroje, posun izolace, praskliny, fraktury, uvolnění vinutí v drážkách, namáhání zkratovými proudy. Již při průchodu magnetického toku do statoru působí na vinutí značné síly. Mechanické stárnutí je způsobeno hlavně vibračním namáháním, elektrodynamickými silami, termomechanickým namáháním. Vinutí je za provozu namáháno chvěním a dynamickými silami. Chvění vzniká nevyvážeností rotujících částí a způsobuje uvolňování drážkových klínů a tyčí vinutí. Dynamické síly poškozují hlavně čela vinutí a vznikají například při najíždění, odstavení stroje a při mimořádných jevech

jako jsou blízké zkraty a vnější přepětí. Stárnutí čistě mechanického charakteru je například opotřebení nebo různé únavové jevy materiálu. [8,12,16,43]

### 3.1.4 Působení dalších vlivů

Stárnutí může být v některých případech ovlivňováno přítomností dalších působících faktorů prostředí jako například: vlhkosti, kyslíku, chemikálií, mikroorganismů, radiací. Přítomnost těchto faktorů v prostředí může značně ovlivnit rychlost degradace izolačního systému. Jedná se hlavně o chemicky nebo fyzicky aktivní nebo vodivé látky v průmyslovém prostředí, vysoký obsah vlhkosti okolního vzduchu, prostředí kontaminované plísněmi nebo mikroby, dále to mohou být mechanicky abrazivní materiály jako například písek v chladícím vzduchu. [16]

**Vlhkost** absorbují různé materiály v různém množství. Voda a vlhkost jsou nejčastějším degradačním jevem zhoršujícím elektrické vlastnosti izolačních materiálů jako například permitivitu, rezistivitu a elektrickou pevnost, ale také ovlivňuje mechanické vlastnosti, hlavně pevnost. Povrchová vlhkost a námraza způsobují povrchové jevy jako jsou povrchové eroze a přeskoky. [3,13]

**Kyslík** způsobuje oxidaci a tím nevratné změny vlastností elektroizolačních materiálů. Jeho působení závisí na dalších faktorech jako: chemické složení, přítomnost antioxidantů, teploty a vlhkosti. [3]

**Chemikálie** způsobují různá poškození a je potřeba jim přikládat dostatečnou pozornost, protože v praxi je možno se setkat s interakcí různých chemických vlivů při působení odlišných okolních podmínek. Celková chemická odolnost elektroizolačního materiálu se může lišit od odolnosti jednotlivých látek nebo materiálů. Po materiálech použitých v elektrických strojích žádáme odolnost proti ozónu a chemickou nezávadnost vzhledem k používaným lakům a zalévacím pryskyřicím. [3,12]

**Mikroorganismy** jsou degradačním faktorem, který působí hlavně na elektroizolační materiály na organické bázi. Jedná se zejména o bakterie a plísně, které jsou tím agresivnější, čím vyšší je v okolním prostředí vlhkost a teplota. Působení mikroorganismů může souviset s působením povětrnostních vlivů. [3]

**Povětrnostní vlivy** s sebou přináší, zvláště u vzduchem chlazených strojů, výkyvy teplot, znečišťující látky, záření atd. Mechanické částice unášené prouděním vzduchu

narušují povrchové vrstvy elektroizolačního materiálu a umožňují zrychlené pronikání znečišťujících látek a vlhkosti do materiálu.

**Znečišťující látky** mohou být jak přírodního tak umělého charakteru. Za přítomnosti vlhkosti způsobují povrchovou vodivost, vznik kyselých či zásaditých roztoků a chemické i elektrolytické jevy v elektroizolačním materiálu. [3]

**Úniky chladicího média** jsou také velmi častou příčinou poruch. Při úniku vody nebo vodíku dojde k porušení izolace a následným zkratům.

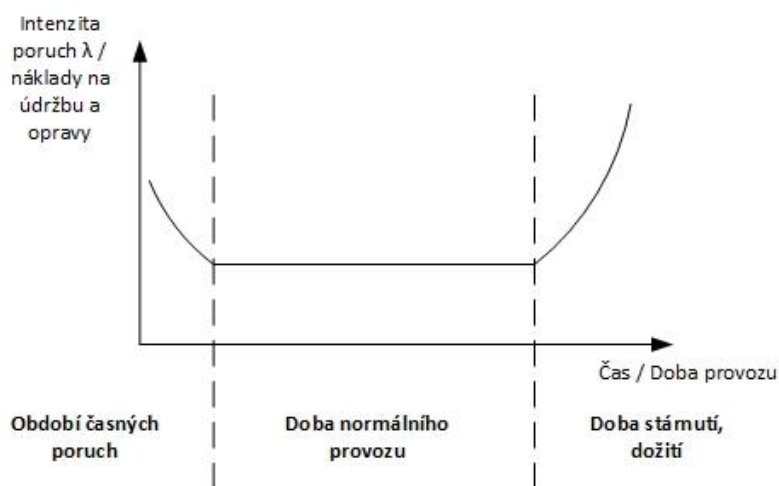
Vlastnosti izolačního systému také může ovlivnit více než jeden faktor vlivu. Hlavně tepelné a elektrické faktory vlivu působí současně. Tento typ kombinovaného stárnutí se může vyskytovat u mechanicky nebo termomechanicky vysoce namáhaných strojů. Kombinovanými jevy může být například koroze pod napětím, drážkové výboje (vznik u vibrační vinutí drážek) a klouzavé výboje na výstupech vinutí z drážek.

### 3.2 Poruchy a intenzita poruch v čase

Porucha je událost, která způsobí narušení provozuschopného stavu. Poruchy mohou být **náhlé** nebo **postupné**. Náhlou poruchou je například zkrat, přerušení vodiče, zadření ložisek, tedy vedou k úplnému přerušení provozu stroje. Postupné poruchy vedou vlivem stárnutí a opotřebení ke změně parametrů jednotlivých dílů a součástí stroje. Důležité je také rozdělení poruch na **poruchy z vnějších a vnitřních příčin**. Poruchou z vnějších příčin se rozumí porucha způsobená nedodržením stanovených provozních předpisů a podmínek pro zatěžování, obsluhu a údržbu. Porucha z vnitřních příčin vzniká vlastní nedokonalostí stroje, při zachování správných stanovených předpisů a provozních podmínek. Mezi poruchy z vnitřních příčin patří hlavně poruchy spojené se záběhem stroje, časné poruchy a poruchy spojené se stárnutím stroje, poruchy dožitím. Dále se mohou poruchy dělit: na náhlé a postupné, částečné a úplné, trvalé a dočasné. **Částečné** nebo **postupné** poruchy jsou také nazývány jako degrační poruchy, **náhlé** a **úplné** jako poruchy havarijní. [4,39]

Četnost (intenzita) poruch a související náklady na údržbu a opravy v závislosti na době provozování se řídí tzv. „vanovou křivkou“, znázorněnou na *obr. 3.1*. Nejvyšší intenzita poruch a tedy i náklady jsou při instalaci stroje a jeho uvádění do provozu. Tyto případné poruchy by měly být zamezeny už v průběhu výroby a uvádění stroje do provozu diagnostickými šetřeními, hlavně tedy výstupními a prototypovými zkouškami a také

vstupní diagnostikou. V období časných poruch neboli v době záběhu se poruchy řídí normálním rozdělením, jedná se hlavně o zkušební provoz a zabíhají se součástky a odstraňují se vzniklé závady. U některých zařízení toto období časných poruch chybí, jedná se potom o dobře kontrolované výrobky, které se zabíhají již u výrobce. Po zaběhnutí stroje nastává doba normálního provozu. Provoz stroje probíhá bez závad, jen zřídka se vyskytují náhlé poruchy, provoz tedy nevyžaduje údržbu a tím jsou i náklady minimální. Četnost výskytu poruch v období normálního provozu je téměř konstantní a řídí se exponenciálním rozdělením. Důležité je rozpoznat okamžik, kdy se začínají objevovat poruchy opotřebením a stroj začíná stárnout. V tomto okamžiku je potřeba jeho údržba, oprava nebo náhrada za nový.



Obr. 3.1 Vanová křivka znázorňující dobu technického života stroje

Z průběhu této křivky *obr. 3.1*, lze naplánovat termíny údržby a opravy tak, aby během normálního provozu nedocházelo ke zbytečným údržbám či opravám a tím i zvýšeným nákladům a větším počtům odstávek stroje. Optimálním okamžikem je přechod mezi dobou normálního provozu a dobou stárnutí. Snažíme se tedy zvolit takovou strategii pro údržbářské a opravárenské práce, abychom dosáhli zajištění provozní spolehlivosti stroje a minima vynaložených nákladů.

Přestože jsou generátory poměrně dost spolehlivé stroje, tak se čím dál tím častěji setkáváme s jejich poruchami. To je dáno hlavně tím, že většina generátorů v provozu je starší více než 20-30 let, často se jedná již o starší opotřebené a vysloužilé stroje, které jsou stále v provozu. Naopak poruchy nových generátorů jsou spojeny se snahou výrobců vyrábět výkonnější, efektivnější stroje při nižších výrobních nákladech a úspoře materiálu.

Dále výrobci používají vylepšené konstrukce a nové materiály, které ještě nebyly řádně v provozu odzkoušeny. [2,43]

### 3.3 Spolehlivost a životnost elektrického stroje

Spolehlivost a životnost jsou velmi důležité parametry každého zařízení. S rostoucími požadavky na vyšší výkony, otáčky, menší a lehčí konstrukce jsou stroje vystavovány vyššímu namáhání použitých materiálů a tím se snižuje provozní spolehlivost stroje. Spolehlivější a bohatě dimenzovaný stroj je samozřejmě možné vyrobit, ale bude vzhledem k ostatním zařízením ve výrobním procesu elektrické energie velmi předimenzovaný a drahý. Proto je výrobce nucen zajistit číselné vyjádření parametrů spolehlivosti pro optimální dimenzování a požadovanou provozní spolehlivost požadovanou zákazníkem. [4,8]

**Spolehlivost** je obecná vlastnost objektu plnit požadovanou funkci za určitých podmínek a po stanovenou dobu. Je dána pravděpodobností, že v určitém časovém úseku a za určitých podmínek bude objekt pracovat stanoveným způsobem. Spolehlivost je definována dalšími dílčími vlastnostmi jako jsou: bezporuchovost, životnost, opravitelnost, bezpečnost, udržovatelnost atd. Bezporuchovost je vlastnost stroje nepřetržitě plnit předepsané funkce po určitou dobu a za daných podmínek. Míra spolehlivosti je doba mezi poruchami, určená podmínkou, že do uvažovaného okamžiku porucha nevznikla. **Životnost** je schopnost stroje plnit požadované funkce do mezního stavu při stanoveném systému údržby a oprav. Číselně ji lze vyjádřit pomocí doby technického života nebo středního technického života, udávají se v jednotkách času, zpravidla v rocích. Samotná životnost se udává v počtech funkčních úkonů, například v počtu spouštění a odstavení, počtu vypnutí a zapnutí. [4,39]

Současné hydrogenerátory jsou vyráběny z přibližně jednoho milionu částí, takový počet součástek značně ovlivňuje provozní spolehlivost, protože není možné všechny součástky navrhnout tak, aby všechny podléhaly stárnutí rovnoměrně. Různé díly se opotřebovávají různou rychlostí, proto je nutné počítat u některých součástek s výměnou a náhradou za díly nové. [8]

Elektrický stroj je nutné posuzovat jako výrobek sestavený ze sériově spojených prvků například vinutí, ložisek, budiče. Porucha libovolného prvku s sebou přináší poruchu celého stroje. Izolace vinutí elektrických strojů značně ovlivňuje spolehlivost zařízení,

protože k poruše izolace může dojít vlivem řady příčin, například teploty, vlhkosti, vibrací, prachu atd. [14]

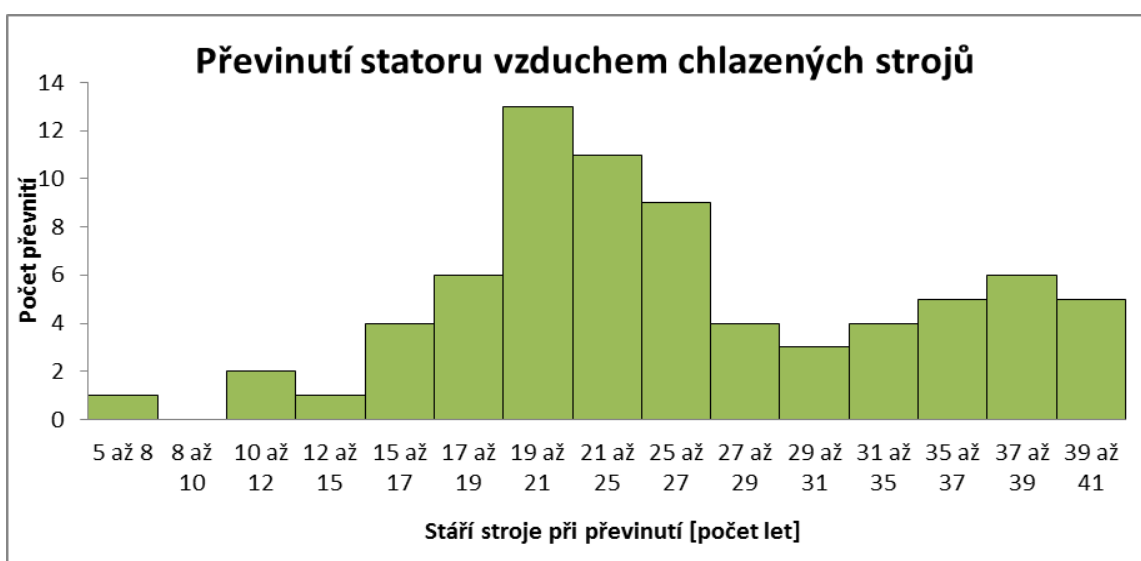
Každé elektrické zařízení i stroj, lze uvést opravou nebo náhradou vadných dílů do původního stavu. V pokročilém věku ale neustále vzrůstá počet poruch a pravděpodobnost závad, viz *obr. 3.1* a také náklady na opravy a údržbu. Vyřazení stroje z provozu je vhodné, když náklady na opravu a náklady spojené s přerušением provozu vlivem poruchy jsou větší než cena stroje nového. To znamená, že spolehlivost úzce souvisí s hospodárnou dobou života a životností. Pro spolehlivost má význam i konstrukce zařízení s ohledem na další vývoj modernějších a výkonnějších strojů s lepšími parametry. Protože jen ve výjimečných případech se stane, že po vyřazení stroje po uplynutí doby jeho života je nahrazen stejným typem. Proto by životnost stroje měla být navržena tak, aby se během provozu stroj zamortizoval a předpokládala se také doba, kdy současná konstrukce již bude zastaralá a oproti moderním strojům bude zaostávat. Ideálním případem je také navržení stroje tak, aby k jeho výměně došlo v době, kdy se zvyšují náklady na jeho údržbu a zároveň jsou na trhu dostupné modernější typy při úspoře energie a komfortu obsluhy. [5,8]

Střední doba života vzduchem chlazených alternátorů s vysokonapětovou slídivou izolační soustavou činí zhruba 120000 provozních hodin, to odpovídá přibližně 25 až 30 let při běžném provozu stroje. Střední doba života izolačního systému je však podstatně kratší, protože izolační systémy stárnou rychleji, v příznivých podmínkách cca 15 let, záleží na provozních podmínkách příslušného stroje, prostředí, teplotě, vlhkosti atd. [8]

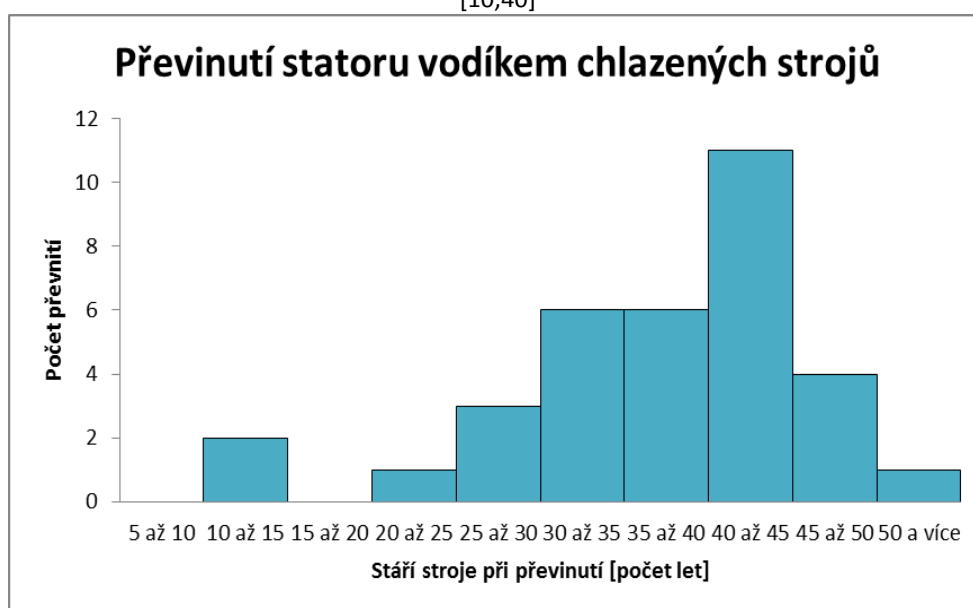
Navzdory vysoké spolehlivosti a kvalitě nejsou generátory odolné proti stárnutí. Doba života elektrických strojů a hlavně jejich izolačních systémů je tedy závislá na době a intenzitě, po jaké byly vystaveny nepříznivým provozním namáháním a vnějším vlivům. Dobu života lze prodloužit jeho modernizací nebo přestavbou. Jedná se například o vložení úplně nového vinutí do starého rotoru stroje, který je jinak zcela v pořádku. Protože izolační materiály a celý systém mají dobu života podstatně kratší, než je doba života celého stroje, protože jsou vystavovány většímu provoznímu namáhání. Doba života turbogenerátoru závisí také počtu spouštění a odstavení, protože vlivem oteplení tlumícího vinutí a rozdílné teplotní roztažnosti mědi a železa dochází k vzájemnému posunu a mechanickému namáhání izolace Norma ČSN EN 60034–3 ed.2 stanovuje, že rotory synchronních generátorů musí být konstruovány tak, aby umožnily během doby svého

života minimálně 3000 rozběhů a v případě rotorů pro každodenní druhy provozu s pravidelnými rozběhy a zastaveními umožnily minimálně 10 000 rozběhů. [8, 12]

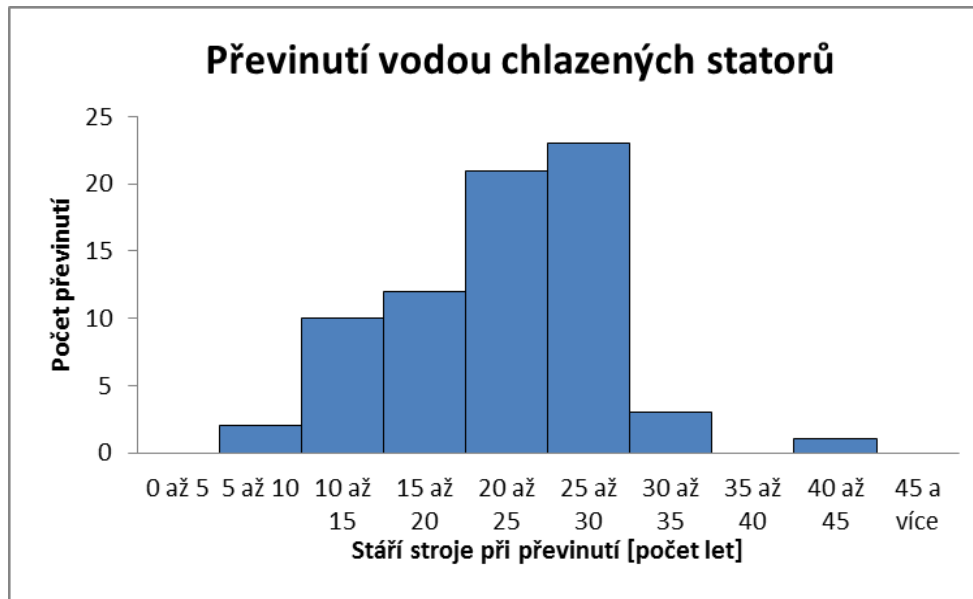
Ze statistik [15],[40] společností zabývajících se údržbou a opravami turbogenerátorů, vyplývá, že k největšímu počtu převinutí statorů strojů z důvodu modernizace nebo degradace dochází po cca 20 letech provozu vzduchem chlazených strojů a po 40 letech u strojů chlazených vodíkem. Statistika počtu převinutí vodou chlazených strojů společností GE [40] udává, že nejvíce dochází k opravám vinutí a jejich výměně mezi 20 a 30 lety provozu. Rotory turbogenerátorů degradují rychleji a je nutno podrobovat je opravám mnohem častěji, největší počet převinutí byl proveden po 10 a 22 letech provozu.



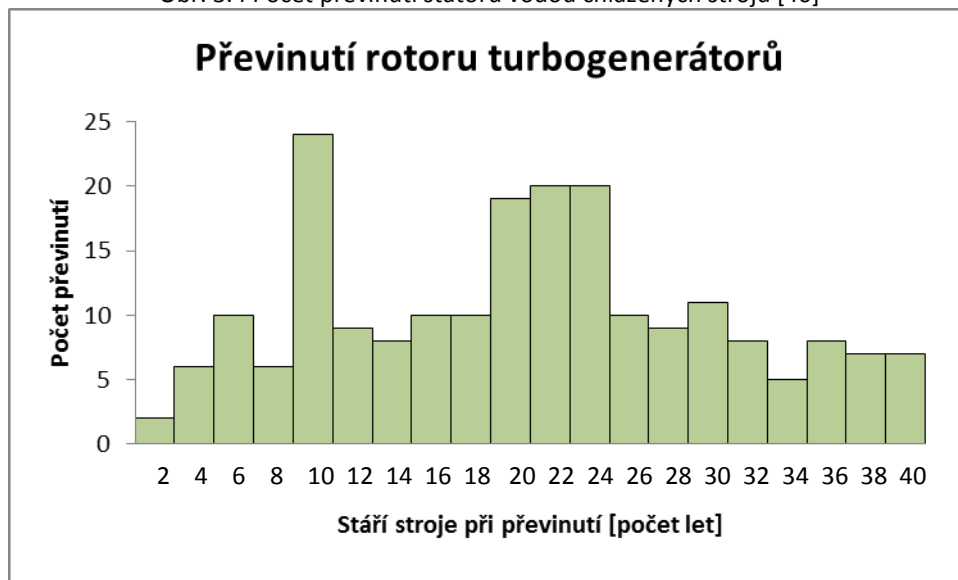
Obr. 3.2 Počet převinutí statorového vinutí turbogenerátorů vzduchem chlazených závislosti na jejich stáří [10,40]



Obr. 3.3 Počet převinutí statorového vinutí turbogenerátorů vodíkem chlazených strojů [10,40]



Obr. 3.4 Počet převinutí satorů vodou chlazených strojů [40]



Obr. 3.5 Počet a stáří turbogenerátoru při převinutí rotorového vinutí [10]

Přestože jsou vinutí generátorů obvykle velmi spolehlivá, s předpokládanou dobou života 25 let i více, existuje mnoho degradačních mechanismů zkracující dobu života generátorů. Některé tyto mechanismy souvisí s konstrukcí nebo výrobou stroje, některé jsou přisuzovány zhoršeným provozním podmínkám a údržbě. Provozních podmínek a vlivů ovlivňujících výskyt poruch, spolehlivost a dobu života stroje je celá řada a patří mezi ně hlavně [2,43]:

**Cyklické zatěžování stroje** - nepříznivě ovlivňuje izolaci satorového vinutí, způsobuje uvolnění jádra a uložení vinutí v drážkách, narušuje systém uložení čel vinutí, také způsobuje mechanickou degradaci, posun izolace rotoru, praskliny a deformaci cívkových vodičů.



**Počet rozběhů** – generátory jsou citlivé na cyklické zatěžování, zvláště na opakované rozběhy a odstávky, tyto cykly mají vliv hlavně na rotor a všechny jeho části: drážky, cívky vodičů, obruče, ozubení, sběrače.

**Vysoké/nízké teploty** – vysoké teploty způsobí degradaci izolačního systému, malý nárůst teploty může mít velký dopad na vlastnosti vodiče, naopak nízké teploty mohou mít vliv na pevnost kovů.

**Čistota a znečištění** – znečištění stroje je vážný problém, hlavně u rotorů. Vodivé prachové částice a kovy patří mezi hlavní problémy vyskytující se na rotoru i statoru.

**Přetěžování** – i mírné přetížení může výrazně ovlivnit životnost stroje. Urychluje hlavně tepelné a mechanické stárnutí izolačního systému a způsobuje elektromagnetické vibrační síly působící na statorové vinutí.

**Nevyváženost proudového zatížení statoru** – vytváří negativní sled statorových proudů úměrné nerovnoměrnosti rozložení, které může střídavě vytvářet proud o dvojnásobné frekvenci na povrchu rotoru (drážek, výkovku těla rotoru, obručí), tento zvýšený proud může zase způsobit přehřátí rotoru. Tyto negativní účinky lze částečně redukovat tlumícím vinutím.

**Odstávka** – negativní vliv na životnost stroje má také odstávka, při které může být stroj vystaven hlavně vlhkosti. Proto se doporučuje skladovat v prostředí, které je vytápěné, čisté a suché.

**Selhání sběracího ústrojí** – často vyskytující se příčina nucené odstávky generátoru. Tyto odstávky netrvají dlouho a nemusí mít nejvyšší dopad na pohotovost. Údržba a diagnostika sběračů se často přehlíží nebo provádí nedostatečně. Je nutné provádět každodenní kontrolu pracovníkem údržby, zda mezi kartáči a kroužky nejiskří, nejde slyšet šumění, kontroluje se tlak a teplota, a také zda se mezi kartáči nenachází nějaké nečistoty nebo olej. Při běžné údržbě (ale časté) se provádí kontrola celého sběracího ústrojí, stav kartáčů a připojení kabelů, měří se izolační odpor a polarizační index. Mezi nejčastější příčiny poruchy sběracích ústrojí patří: kontaminace olejové vrstvy, rezivění, jiskření, nedostatečné chlazení, odstupňování kartáčů a nesprávná proudová hustota, špatné zavěšení a kontaktní plocha kartáčů mají za následek nadměrné vibrace, poté jejich poskakování, opalování až dojde průrazu.

**Zkratové proudy** – patří mezi nejdestruktivnější události, které mohou generátor postihnout. Mohou rozlomit ukotvení, hřídel, zničit ventilační kanály, nebo vytrhat tyč vinutí z drážek.

**Problémy se synchronizací** – jsou podobného charakteru jako zkratové proudy. Výchylka pole o několik stupňů by neměla způsobit poškození. Vychýlení natočení pole rotoru s polem statoru o  $180^\circ$  je nejhorším případem pro ohrožení statorového vinutí zkratovými proudy. Vychýlení natočení o  $120^\circ$  vytváří vysoké točivé momenty, které mohou poškodit hřídel.

**Úniky chladiva** – částečný únik může poškodit izolaci, ale nemusí mít závažnější následky. Ztráta celého média je velmi závažná a může dojít ke zničení celého izolačního systému vlivem zvýšené teploty a rozpínání izolace.

**Úniky a poruchy mazacího oleje** – patří mezi nejzávažnější závady, často způsobí totální zničení stroje vibracemi nebo požárem. Olejový systém je navržen tak, aby zabránil únikům a ztrátě oleje v ložiscích, ale často může vhnět olej z nádrže přímo do ohně. Uniklý olej ve stroji způsobuje stárnutí drážek statorového vinutí a izolačních materiálů, může ucpat ventilační kanály a zvyšovat množství hromadění nečistit.

**Překročení otáček** – síly působící na stroj jsou úměrné mocnině rychlosti. Způsobuje vyšší zatížení materiálů a následně jejich praskání.

**Ztráta buzení** – ztráta buzení při zatížení stroje způsobí asynchronní provoz, generátor pokračuje v provozu a přenáší zatížení jako asynchronní generátor. Rychlost otáček rotoru se zvýší o několik procent a má za následek vznik proudů tekoucích výkovkem těla rotoru, které nahrazují budící proudy a jsou podobné nevyváženému statorovému proudu. Ztráta buzení způsobuje velmi ničivé poškození rotoru, pokud přetrvává.

**Přemagnetování** – může být mimořádně ničivé a navíc velmi rychle může zničit jádro statoru. Lze ho objevit pouze off-line diagnostickými metodami při odstávce stroje. Budič může snadno vytvářet 2,5 až 3 krát vyšší proudy tekoucí statorem, které způsobují vysoké nasycení jádra statoru a vytvářejí napětí na svornících, klínech a uchyceních, ale také proudy tekoucí stahovacími a těsníci komponenty jádra.

**Poruchy pomocných systémů** – příslušenství a pomocná zařízení stroje je nutno v menší míře, ale často podrobovat údržbě. Obvykle způsobují jen vedlejší problémy, ale pokud se jim nebude dostávat dostatečné pozornosti a péče, mohou způsobit problémy závažnějšího charakteru i havárii stroje. To se týká hlavně závad systému vodíkového hospodářství a utěsnění, silného proudění chladicího plynu, hromadění tekutin a vlhkosti na detektorech, nízkého tlaku oleje, atd.

### 3.4 Rozbor jednotlivých poruch a jejich příčin

Poruchy generátorů se objevují stále častěji a mnohem dříve, než by se dalo očekávat. Příčin může být několik: například tlak vyrábět nové stroje rychleji, z levnějších materiálů a při nižších nákladech výrobních procesů. Dále konstrukce těchto moderních strojů je mnohem náročnější a složitější, než konstrukce strojů starších. V dnešní době má také negativní dopad automatizace výroby, snižování počtu zaměstnanců a odchod starších zkušených zaměstnanců, kteří nestačí předat svoje znalosti. Know-how podniků tedy upadá, objevují se starší problémy a vymýšlí se již vymyšlená řešení. Z toho všeho plyne, že úroveň technické podpory a diagnostiky nejen ze strany výrobců upadá a proto je stále těžší rozhodovat o opravě či odstávce, určit správnou příčinu a rozsah poruchy. [43]

Diagnostikovat příčinu poruchy generátoru je poměrně náročný úkol. Hlavně proto, že generátory jsou složitá zařízení, problematika a teorie funkce generátoru je velmi rozsáhlá a v elektrárně ji podrobně ovládá zpravidla jen několik osob. To se týká hlavně pracovníků údržby a provozu stroje, kteří mohou značně pomoci při určování, proč došlo k poruše zařízení. Generátory mohou selhat mnoha způsoby a z mnoha příčin. Provozovatelé často od výrobců slýchávají: „S takovým typem poruchy jsme se ještě nesetkali“, tak jsou právem skeptičtí, ale pravdou je, že existuje mnoho příčin vedoucích k poruše na generátoru, tak tato poznámka může být často naprosto pravdivá a přesná. Dokonce i s nejmodernějším vybavením pro monitoring generátoru, které by mohlo vysvětlit příčinu poruchy, je to někdy problém, protože často chybí dostatek uložených záznamů a informací z provozu stroje. [35,36]

Pokud dojde k poruše generátoru po sjednané záruční době mezi výrobcem a provozovatelem, zbývá provozovatelům zařízení pro určení příčiny a rozsahu této poruchy několik možností. Nejjednodušším řešením je zaměstnávat několik expertů s požadovanými schopnostmi pro diagnostikování poruch nebo tlačít na výrobce generátoru, aby provozovatelům poskytlo svoje techniky. Ze zřejmých důvodů nemusí být

tento tlak vždy úspěšný. Další možností jsou údržbářské a opravárenské společnosti nebo nezávislí poradci, kteří se mají potřebnou úroveň znalostí pro specifickou poruchu a vyšetřování její příčiny. [43]

Nesprávné diagnostikování příčiny poruchy generátoru může být zvláště nákladné. Pokud se určí příčina poruchy špatně, často se může porucha po opravě stroje znovu opakovat a celá oprava a odstávka stroje je potom úplně zbytečná. Opakem může být špatný závěr provést opravu nebo převinutí stroje na základě diagnostického šetření, přestože se nejedná o závažnou poruchu a stroj by mohl dále několik let pracovat bez poruchy.

Je velmi důležité rozlišovat mezi příčinami poruch, které k poruše vedou postupně a mohou být odhaleny pomocí diagnostických šetření, a způsoby poruchy, kterou tyto příčiny končí. Po poruše se totiž pracovník diagnostiky nebo údržby snaží zpětně postupně dohledat, co vedlo k této poruše, od jejího vzniku až k příčině, aby zjistil skutečný následek této poruchy. Toto je proces analýzy příčiny poruchy, neboli zjišťování proč se tato porucha vyskytla. Příčiny poruch mohou být následující [13,15]:

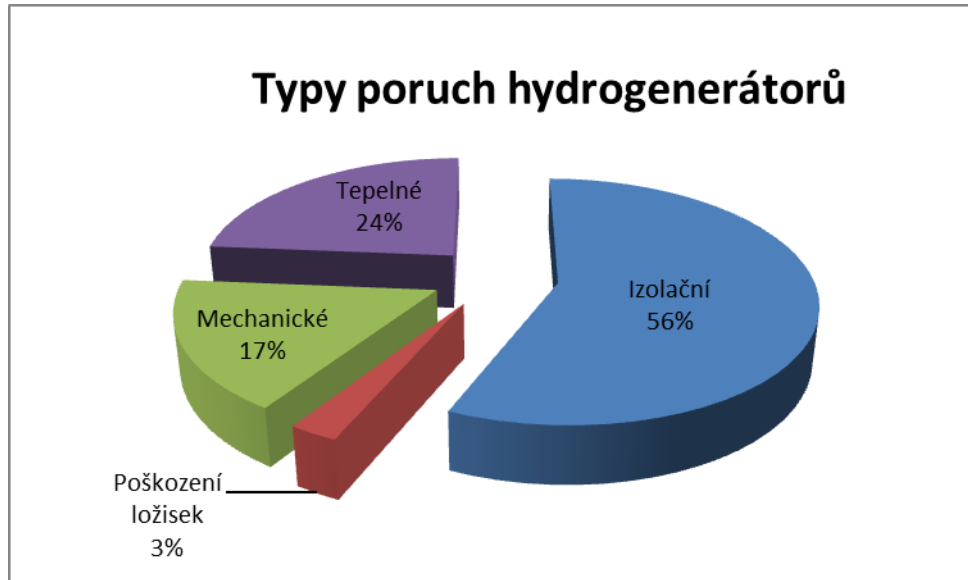
- Vada konstrukce nebo výroby
- Vada materiálu nebo součástí
- Vada montáže
- Vada údržby nebo provozu
- Přetížení
- Překročení otáček
- Únavové jevy
- Nárazové zatížení
- Nadměrné vibrace
- Porucha součástí
- Nadměrné teploty vinutí nebo ložisek
- Nadměrné dočasné nebo stálé elektrické namáhání
- Koroze
- Špína a nečistoty

Jednotlivým poruchám, jejich výskytu a příkladům je věnována následující část diplomové práce.

### 3.4.1 Poruchy hydrogenerátorů

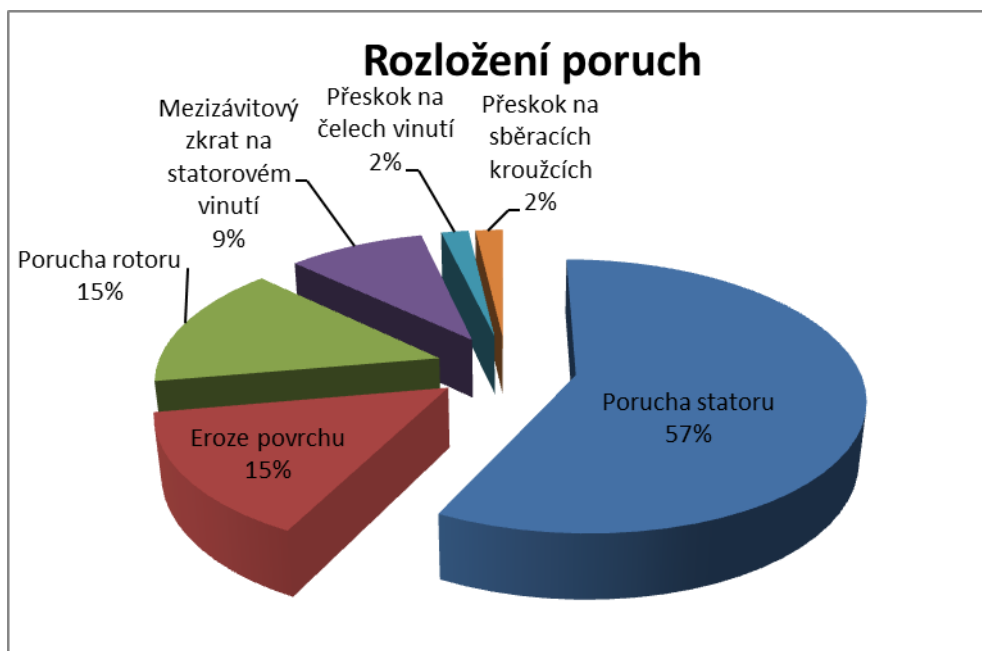
Pro přehled jednotlivých poruch hydrogenerátorů byly použity statistické údaje z [41] provedené CIGRE working group A1.10. Průzkum je zaměřen na hydrogenerátory o

výkonu vyšším než 10 MVA, které jsou v provozu více než 10 let. Získané údaje byly zaslány od 17 provozovatelů a jednoho výrobce, kteří provozují dohromady přibližně 1200 hydrogenerátorů. Následující grafy, rozdělení a četnost poruch byly vytvořeny na základě 69 případů poruch.



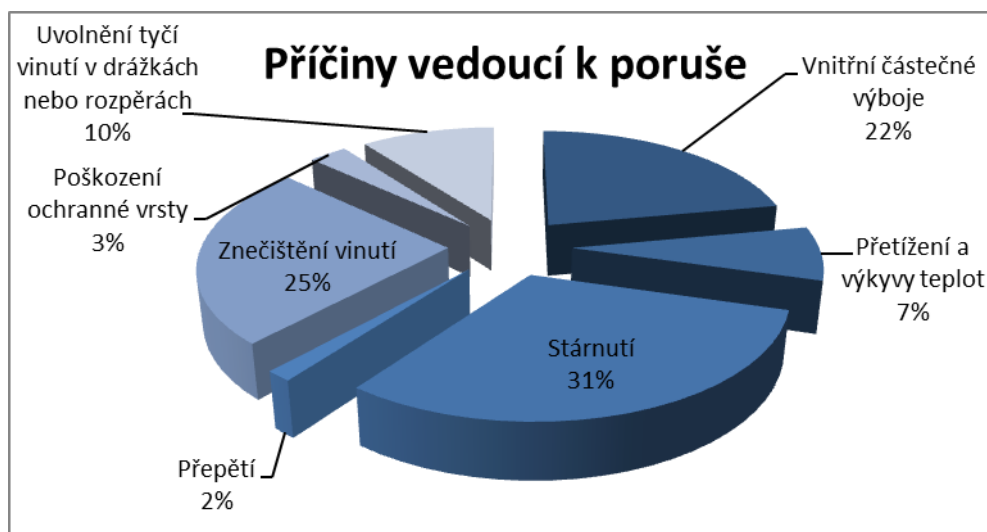
Obr. 3.6 Rozdělení poruch podle typu poškození [41]

Lze konstatovat, že největší část (více než 50 %) poruch hydrogenerátorů je způsobena poškozením izolace. Následující grafy *obr 3.7* a *obr 3.8* znázorňují rozdělení těchto poruch do jednotlivých kategorií. Autoři studie [41] uvádějí, že přibližně 40 % poruch souvisí se zkratem mezi fází statoru a uzemněným jádrem nebo mezifázovým zkratem izolace a přibližně 12% tvoří spálení izolace.



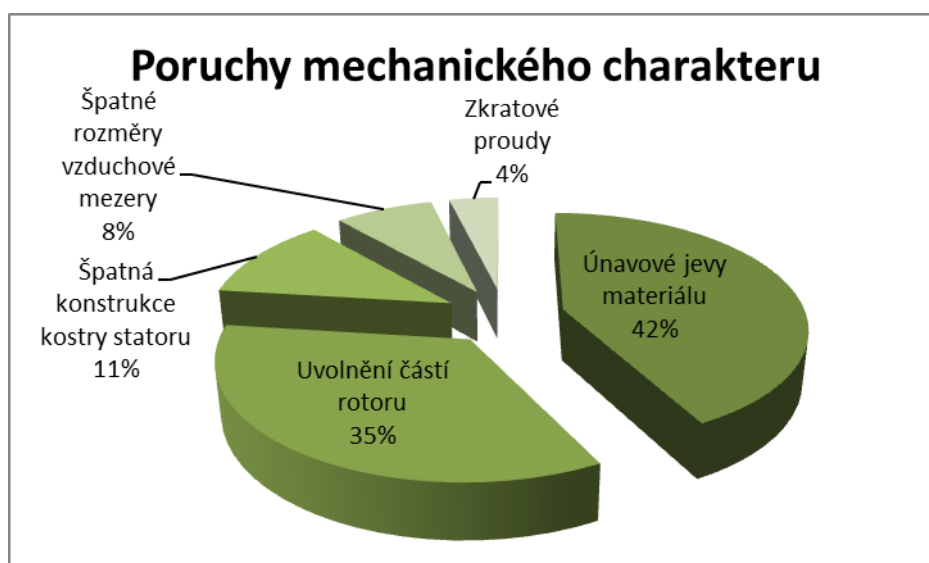
Obr. 3.7 Rozložení poruch dle místa vzniku poruchy izolace [41]

Jednotlivé příčiny, které vedly k poruchám z obr. 3.7, jsou rozděleny do 7 skupin a znázorněny v obr. 3.8 níže.



Obr. 3.8 Příčiny poškození izolace [41]

Na výše uvedených grafech poruch dominují tři hlavní příčiny poruchy a to: stárnutí izolace (31 %), znečištění vinutí (25 %) a vnitřní částečné výboje (22 %), tyto poruchy provází uvolněné části rotoru a únavové jevy izolačních materiálů. Poruchy izolace vnitřními částečnými výboji jsou dány kvalitou izolace, protože již při výrobě izolačního systému mohou vznikat vlivem nehomogenit v izolaci vzduchové bublinky, které poté představují nejslabší místo celého izolačního systému. Právě v těchto nehomogenitách vznikají vnitřní částečné výboje, na které jsou náchylnější spíše stroje s izolačním systémem resin-rich než VPI.



Obr. 3.9 Příčiny poruch mechanického charakteru [41]

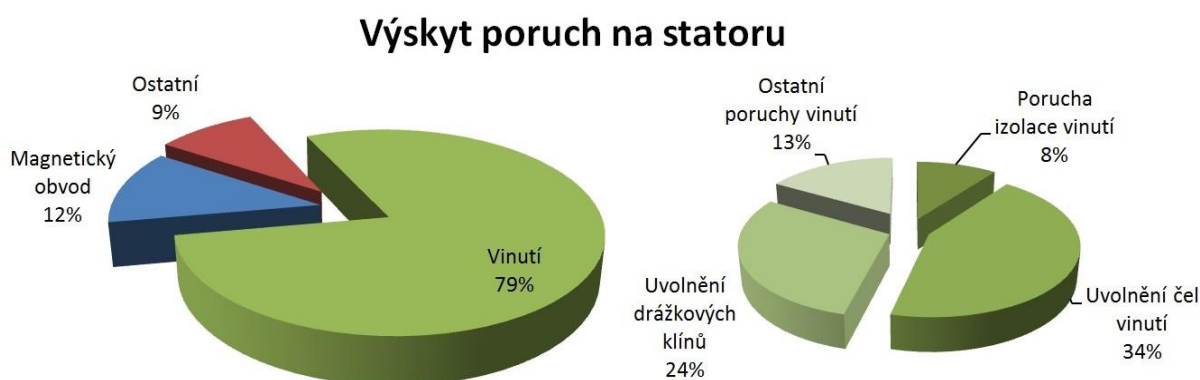
Přestože jsou generátory elektrické stroje, příčina jejich poruch často souvisí s mechanickými deградаčními mechanismy, jako například: vibrace způsobené

elektromagnetickými silami, stálé nebo cyklické zatížení vlivem působení odstředivých, roztažných a dalších sil, ale také poškození cizími předměty.

Výsledkem studie [41] bylo dokázáno, že nejčastější poruchy (téměř 57 %) byly izolačního charakteru a tvořily největší rozsah poškození (v některých případech kolem 30 %). Příčiny vzniku poruch izolace se vyvíjí rychleji než ostatní tepelné a mechanické příčiny poruch. Odpovědnost za snížení těchto poruch padá na výrobce, protože je nutné, aby používali kvalitní materiály, pracovní standardy a přesné konstrukce izolačních systémů strojů. Na druhou stranu záleží také na provozovatelích strojů, zda provádějí pravidelnou diagnostiku nebo monitoring pro sledování stupně degradace a možného vzniku poruchy.

### 3.4.2 Poruchy turbogenerátorů

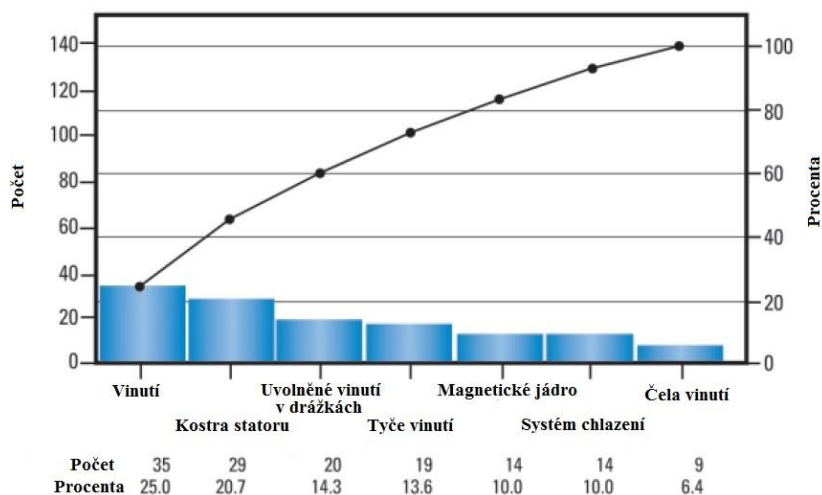
Turbogenerátory jsou zatěžovány hlavně značnými odstředivými a elektromagnetickými silami, které způsobují vibrace. Tím vznikají poruchy uvolněním vinutí z drážek, jak lze vidět z *obr. 3.10* a *obr. 3.11*, kde tyto poruchy tvoří největší procento. Přestože se nejvíce poruch vyskytuje na vinutí, je nutno věnovat pozornost také pomocným zařízením stroje, jako jsou například: budiče, sběrací ústrojí a kartáče, vodíkové hospodářství a chladicí systémy, ale také kontrolovat stav a těsnost kostry stroje a ložiskových štítů, zvláště u větších strojů. [40]



Obr. 3.10 Rozdělení jednotlivých poruch statoru [7]

Nejcitlivějším místem z hlediska spolehlivosti celého stroje je jednoznačně izolační systém, protože je při provozu vystaven nejen tepelnému a elektrickému namáhání, ale také elektrodynamickým silám při zkratech, vibracím mechanického i magnetického původu, teplotnímu roztahování vodiče i izolace drážky, vlhkosti, prachu a dalším vlivům prostředí.

Většina generátorů ze studie GE Energy [40] je starší než 30 let nebo naopak se jedná o stroje nové, které jsou v provozu méně než 10 let, proto se mohou výsledky tohoto souboru dat oproti ostatním trochu lišit. Protože stáří a stupeň opotřebení částí generátorů má značný vliv na jeho životnost a spolehlivost. Paretovy diagramy na *obr. 3.10* a *obr. 3.12* znázorňují podíl jednotlivých částí rotoru a statoru na celkovém počtu poruch v provozu.

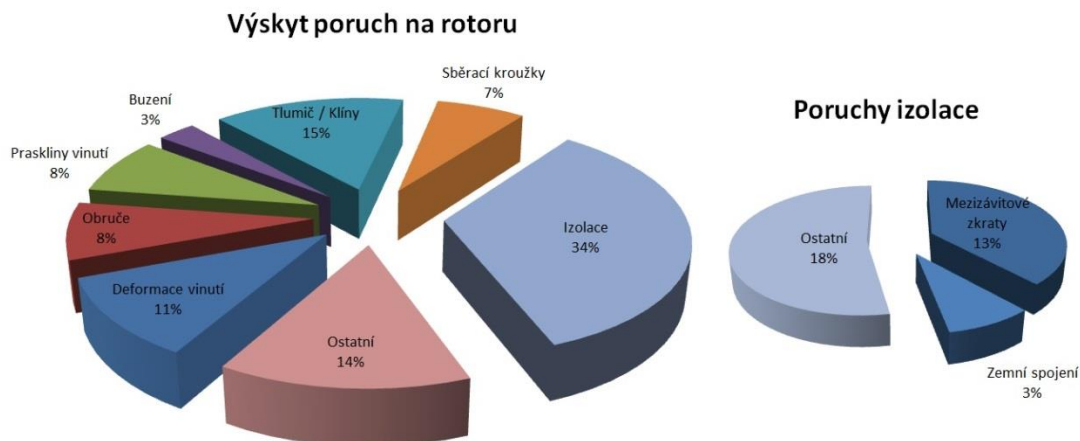


Obr. 3.11 Paretoův diagram poruch statoru (převzato z [40])

Na rotor turbogenerátoru působí v důsledku vysokých otáček a velké obvodové rychlosti značné odstředivé síly. Tyto odstředivé síly způsobují značná mechanická namáhání a únavové jevy materiálů, které se projevují například uvolňováním drážkových klínů, poškozením ocelových obručí a vibracemi částí stroje. Mezi časté poruchy vyskytující se na rotoru patří například:

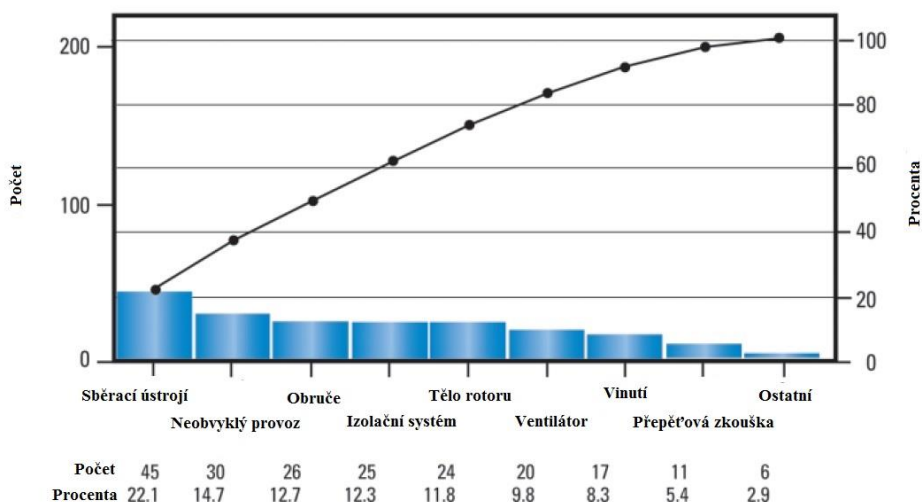
- Poruchy ložisek a olejového hospodářství
- Deformace a posun vinutí rotoru
- Migrace a praskliny mezizávitové izolace
- Mezizávitové zkraty
- Praskliny obručí
- Poruchy na těle rotoru
- Nevyrovnanost rotoru a ložisek
- Mechanická nebo teplotní nevyváženost





Obr. 3.12 Rozdělení jednotlivých poruch rotoru [7]

Na obr. 3.12 z [7] je více než třetina všech poruch závažného charakteru jako: mezikábitové zkraty (13 %), deformace vinutí (11%) a praskliny vinutí (8%).



Obr. 3.13 Paretův diagram poruch rotoru (převzato z [40])

Protože velká část generátorů ze studie [40] je starší než 30 let, tak v obr. 3.13 převládají oproti obr. 3.12 z [7] poruchy spojené se stářím stroje: poškození sběracích ústrojí, neobvyklý provoz a mechanická opotřebení obručí, těla rotoru a ventilátorů.

### 3.4.3 Časté poruchy a jejich příčiny

Určit příčinu poruchy může být v některých případech velmi obtížné. To je dáno hlavně tím, že k poruše mohlo dojít z více příčin, ale také mohla být zjevná příčina při kontrole přehlédnuta nebo špatně vyložena.

Naštěstí velkou část problémů provází nečistoty (prach, špína, mazivo), barevné skvrny, posunutí, trhliny a praskliny, pokřivení a deformace nebo proniknutí cizích předmětů.

Mezi nejčastější a opakující se problémy patří [10,43]:

- Praskliny dílčích vodičů statorových tyčí
- Deformace a praskliny rotorových cívek
- Vibrace tyčí v drážkách statoru a uvolněné drážkové klíny (vznik výbojů vlivem vibrací, opotřebení a mechanické stárnutí)
- Uvolnění čel a vibrace čel vinutí
- Poškození jádra
- Nízká elektrická pevnost způsobená nečistotami a vlhkostí
- Částečné výboje
- Závitové a zemní zkraty rotoru
- Problémy se sběracími kroužky a kartáči

Mezi méně časté, ale způsobující větší poškození a delší odstavení stroje, patří:

- Zemní zkraty statorového vinutí způsobené vibracemi
- Poruchy hlavní izolace
- Poruchy jádra statoru
- Mezizávitové a zemní zkraty na rotoru
- Fázové poruchy
- Poruchy vývodů a průchodek

Současné důležité problémy hlavně u větších strojů:

- Materiály obručí
- Praskliny výkovku těla rotoru
- Úniky chladícího média z vodičů statorového vinutí
- Eroze vodičů statorového vinutí
- Opotřebovávání jádra

Problémy provozu a údržby:

- Provoz po poplašném signálu
- Škody způsobené cizími materiály
- Přetěžování
- Uvolněné a chybějící součástky
- Nenamontované součástky

### 3.4.3.1 Poruchy na statoru

Mezi nahodilé poruchy, které mohou na statoru nastat, patří přítomnost cizích materiálů a vady způsobené nedbalostmi při výrobě. Nepozorností při výrobě, transportu nebo montáži generátoru mohou vzniknout škrábance, zářezy nebo jiná poškození izolace, které působením dalších vlivů mohou vést k poruše. Cizí materiály se mohou do statoru dostat při výrobě, odstávce, údržbě nebo při provozu stroje. Jedná se hlavně o předměty

vypadlé z kapes, uvolněné části a úchyty, úlomky, špína nebo také zapomenuté nářadí a pracovní pomůcky.

Předčasnou degradaci a poruchy velkých hydrogenerátorů způsobují hlavně špatně provedené spoje statorových tyčí, uvolněné tyče ve statorových drážkách, vibrační jiskření, špatně navržená ochranná vrstva a nedostatečné vzdálenosti statorových tyčí na čelech vinutí. [42]

Nejvíce poruch na statoru vzniká na vinutí, protože může být ovlivněno všemi druhy namáhání: elektrickým, tepelným, mechanickým i vlivem okolního prostředí. Mezi nejčastější poruchy statorového vinutí patří hlavně uvolnění částí vinutí, drážkových klínů a poruchy izolace vzniklé závitovými, zemními a fázovými zkraty. Uvolnění částí vinutí a jejich podpěr, poškození izolační vrstvy nebo patří mezi běžnější příčiny poruchy, které jsou způsobeny mechanickým namáháním, vibracemi, třením a tendencí drážkových klínů smršťovat se. Závažnější poruchy jako například fázové a zemní zkraty mohou vznikat kombinací působení vlhkosti (vzniklé kondenzací, výměnou tepla nebo nevlídným počasím) a kontaminací prachem nebo různými nečistotami.

### ***Částečné výboje***

V izolačním systému vznikají vlivem nehomogenit v izolaci malé dutinky. Tyto vzduchové dutinky vznikají i při dodržení všech podmínek a technologických postupů výroby. Dutinky jsou vyplněny plynem, jehož relativní permitivita se blíží jedné, relativní permitivita okolního pevného izolantu je  $\epsilon_r$  krát vyšší a také má mnohem vyšší elektrickou pevnost. Proto při působení elektrického pole je plyn v dutinkách mnohem více namáhán než okolní pevná izolace a z těchto důvodů dochází k průrazům v dutinkách při mnohem nižší hladině napětí, než je průrazné napětí izolace. Tyto výboje se nazývají částečné. [8]

Detekce částečných výbojů je v diagnostice elektrických strojů velmi důležitým diagnostickým signálem, protože částečné výboje významným způsobem negativně ovlivňují vlastnosti izolace a tím snižují životnost a spolehlivost stroje. Tyto částečné výboje působí na stroj elektrickými, tepelnými, erozivními a chemickými vlivy. Částečné výboje způsobují hlavně chemickou degradaci dielektrika a bombardování stěn dutiny částicemi, tím vznikají reakční děje, které provází vlhkost a produkty odloučené od vzduchu. Tyto jevy mají erozivní účinky, které způsobují rozšiřování a zvětšování nehomogenit, které mohou vést až k průrazu izolace. Při částečných výbojích dochází tedy

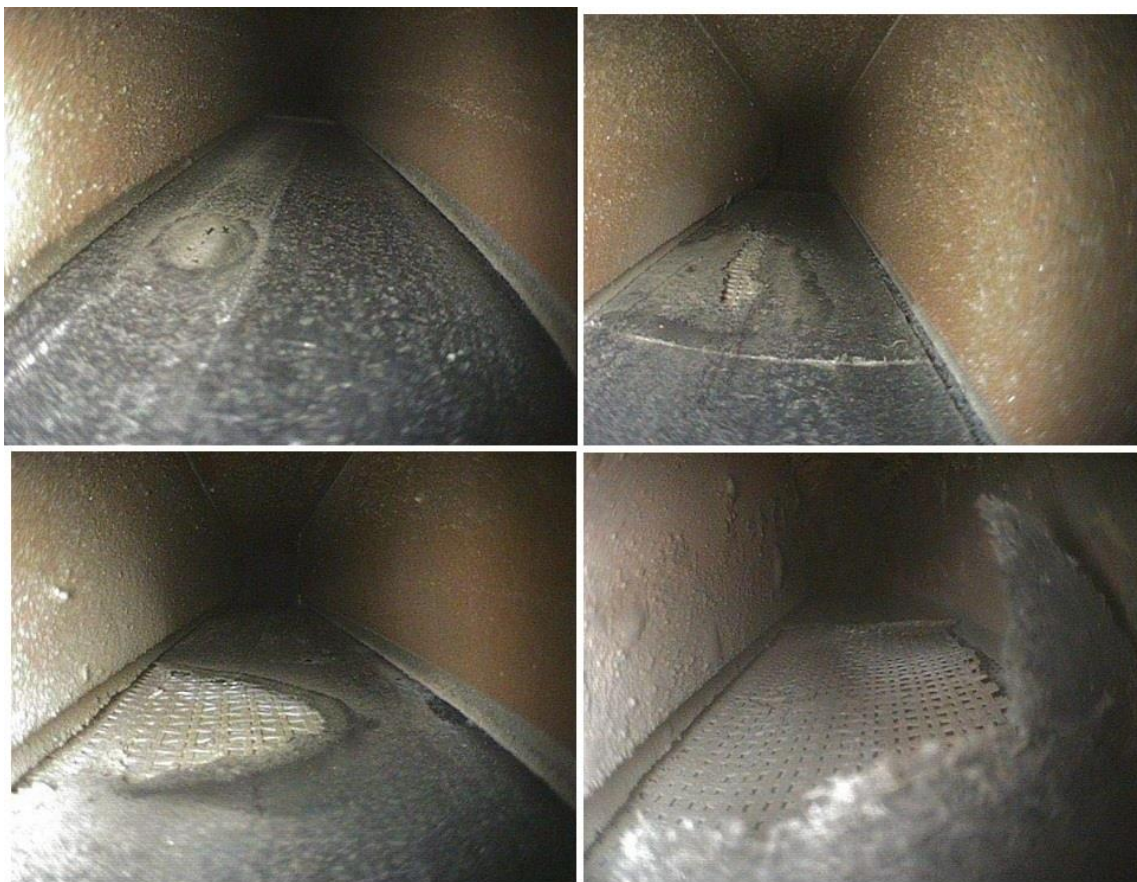
obvykle k nevratným fyzikálním i chemickým změnám. Výbojová činnost působí různě na jednotlivé typy materiálů. Anorganické materiály jako například slída a porcelán jsou obecně proti částečným výbojům odolnější a jejich degradace probíhá velmi pomalu. Naopak organické materiály PET, PEN, PTFE, PE a kompozitní materiály obsahující epoxidová nebo silikonová pojiva podléhají degradaci vlivem částečných výbojů během krátkého časového období. [3,8]

Částečné výboje vyvolávají několik mechanismů, které jsou agresivní a napadají části izolace. Jedná se hlavně o lokální přehřátí izolace, vytváření volných nábojů a iontů a tvoření kyseliny dusičné rozkladem vzduchu. Silné částečné výboje vytvářejí ozón, který chemicky napadá izolaci a místa, kde dochází k působení částečných výbojů, se rozšiřují. Mohou se nacházet uvnitř hlavní izolace vinutí vlivem mikrodutinek a nehomogenit v izolaci, na povrchu tyčí procházejících drážkami magnetického obvodu, dále na přechodech mezi výstupem z drážkové části a čel vinutí a také mezi jednotlivými tyčemi na čelech vinutí. Ale nejčastěji je lze vidět právě na hlavní izolaci tyče vinutí v rozích a na vnějším povrchu. Způsobí se zblednutí a poté erozi izolační vrstvy.

Tyče vinutí vyššího napětí umístěné vedle dalších tyčí vyššího napětí na jiné fázi vyžadují alespoň minimální oddělení pro zabránění vzniku částečných výbojů ve vzduchové mezeře mezi jednotlivými tyčemi. Částečné výboje budou jinak postupně narušovat hlavní izolaci, až může dojít k mezifázovému zkratu statorové vinutí. Čím vyšší je jmenovité napětí stroje a užší izolace, tím větší rozestupy musí být mezi jednotlivými tyčemi. [42]

Částečné výboje ve statorových drážkách jsou mnohem závažnější a ničivější než na čelech vinutí. K zabránění vzniku částečných výbojů mezi vodičem a hlavní izolací se používají ochranné materiály aplikované již na stažené dílčí vodiče tyče vinutí. Vhodnými materiály jsou například vodivá páska nebo tmel pro vyplnění dutinek na povrchu a vespod Roeblových tyčí. Drážkové částečné výboje, známé také jako drážkové výboje, se objevují v drážkách v části mezi povrchem hlavní izolace a vrstveným jádrem statoru, kde velikost elektrického pole převyšuje určitou úroveň, ale také na povrchu tyče viz *obr. 3.14*. Jako ochranu proti těmto vnějším částečným výbojům lze použít vodivou vrstvu mezi hlavní izolací a jádrem statoru, obvykle ve formě pásky nebo nátěru. Je nutné, aby vodivost vrstvy byla správná a aby si uchovala svoje vlastnosti po celou dobu životnosti stroje. Aby se vylepšily poměry skokové změny intenzity elektrického pole na výstupu tyčí vinutí

z drážky, navazuje na dodatečnou ochrannou vrstvu ovin vodičů speciálními páskami s určitou vodivostí nebo nátěr ochrannými laky s postupně se snižující vodivostí ve směru od magnetického obvodu stroje. [28,30]



Obr. 3.14 Postup degradace izolace tyče statoru v drážce vlivem působení částečných výbojů (převzato z [48])

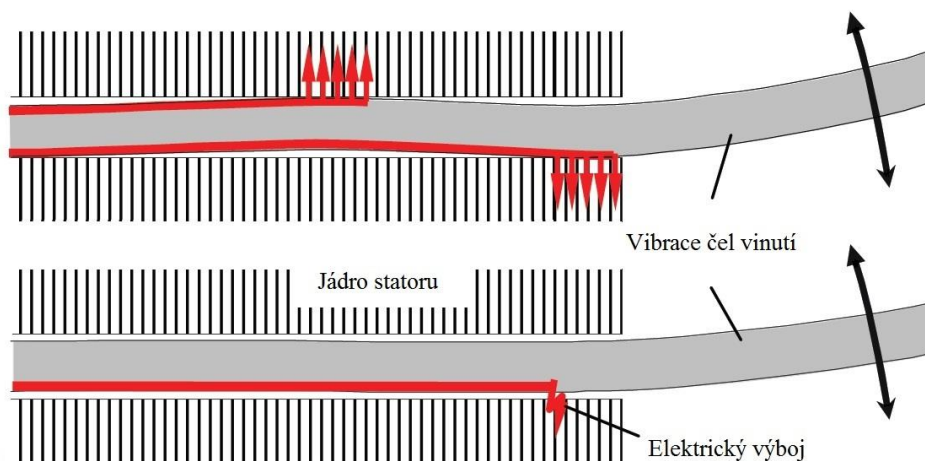
Mezi tři hlavní zdroje vzniku částečných drážkových výbojů v drážkách patří: uvolněné tyče, špatně provedená ochranná drážková vrstva, špatné spojení ochranné drážkové vrstvy a hlavní izolace. Uvolněné tyče v drážkách obrousují a ničí ochrannou drážkovou a hlavní izolaci. K uvolnění tyčí může dojít zvýšenými elektromagnetickými silami, smršťováním vrstev materiálu v drážkách nebo již při výrobě. Špatně provedená ochranná vrstva neplní správně svoji funkci vlivem nepřiměřeného počátečního odporu nebo špatného použití nebo vadami izolační vrstvy hlavní izolace. Také špatné spojení ochranné vrstvy s hlavní izolací způsobí to, že tyče nejsou dostatečně izolovány mezi drážkou a jádrem statoru. Při některých výrobních procesech mohou vzniknout v izolaci pod drážkovou ochrannou vrstvou bublinky, ve kterých vznikají částečné výboje, vytvářejí ozon, který napadá izolaci. Ve všech těchto případech se tyto procesy vyskytují pouze na koncích tyčí vyššího napětí každé fáze. [50,51]

Částečné výboje jsou velmi pomalu působícím degradačním mechanismem v izolačních systémech obsahujících slídu. Je dokázáno, že dobře provedené izolační systémy na bázi slídy vykazují velmi dobrou odolnost proti částečným výbojům. Porucha u těchto izolačních systémů nemusí tedy nastat ani za 20 až 30 let bez působení dalších vnějších vlivů, vibrací a defektů izolace tyčí. Naopak jsou známy případy, kdy částečné výboje způsobily poruchy strojů s izolačními systémy bez obsahu slídy ve velmi krátkém čase, přibližně během 18 měsíců. [50,51]

### ***Vibrační jiskření***

Vibrační jiskření v anglických literaturách nazývané „vibration sparking“ nebo také „spark erosion“ je podobným, ale zároveň zcela odlišným degradačním procesem jako drážkové částečné výboje. Jejich vznik je řízen tokem parazitního proudu z ochranné vrstvy do jádra statoru přes vzduchovou mezeru a oproti částečným výbojům, které se vyskytují na tyčích vyššího napětí, vibrační jiskření (dále jen VS) se může vyskytovat na jakékoli části vinutí včetně zemnicích přívodů. Přestože jsou VS výrazně ničivější není toho o tomto jevu v porovnání s částečnými výboji tolik známo. Díky této chybějící informaci je pravděpodobně velká část generátorů vystavena závažným poškozením vlivem VS, protože jejich příčina a diagnóza poruchy byla špatně identifikována. [51,52]

Příčinou vzniku vibračních jiskření je příliš nízký odpor drážkové ochranné vrstvy spolu s vibracemi tyče statoru. Největší vibrace se objevují na výstupech tyčí z drážek vlivem přídavného působení vibrací čel vinutí, naneštěstí je to také místo, kde parazitní proudy protékají z vnějších ochranných vrstev do jádra statoru. Pokud se povrch tyče dotýká stěn drážky na více místech, dovoluje to parazitnímu proudu téct bez následků. Problém nastává, když tyč ztratí kontakt mezi ochrannou vrstvou a stěnou drážky. Otázkou je, zda přestane téct křížový parazitní proud díky vysokému odporu ochranné vrstvy tyče nebo dojde k elektrickému přeskoku. Tok parazitních proudů ochrannou vrstvou izolace statorových tyčí je nevyhnutelný, proto musí být ochranná vrstva již při konstrukci stroje správně navržena, aby k VS nedocházelo. [51,52]



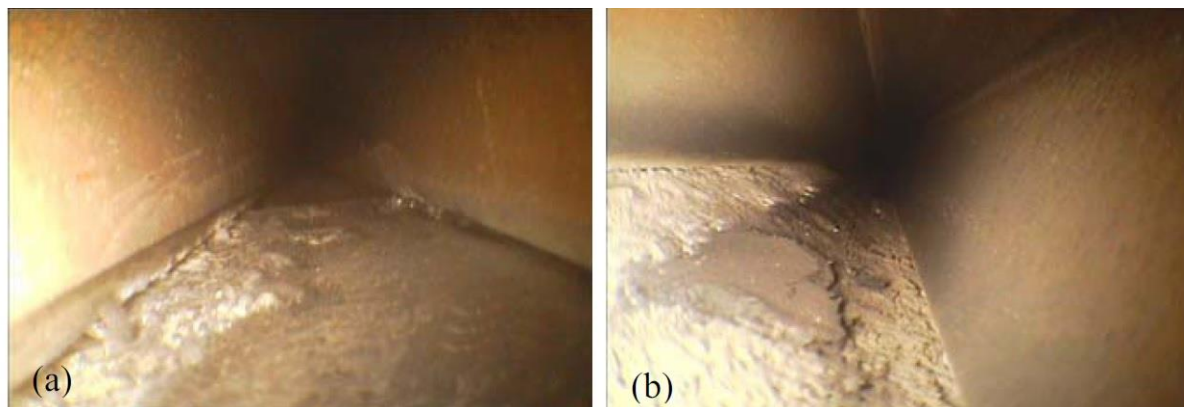
Obr. 3.15 Příčina vzniku vibračního jiskření (převzato z [52])

VS jsou relativně rychlým degradačním mechanismem a způsobují poruchy v relativně krátkém čase. Na *obr. 3.16* a *obr. 3.17* níže je znázorněn průběh a stádia poškození moderní resin-rich izolace vlivem VS. Autoři [42],[48], [50] a [51] uvádí, že satorové vinutí generátoru podobné konstrukce selhalo již po 4 letech provozu a přibližně 30 000 hodinách provozu. V článku [49] se uvádí, že po provedení inspekce a zhodnocení úrovně degradace na více než 40 generátorech bylo nutné provést kompletní převinutí již po 55 000 hodinách provozu, na některých strojích došlo k výměně vinutí již mnohem dříve, protože menší eroze izolace vlivem VS byly zaznamenány v počátečním stádiu po 15 000 provozních hodinách.

Poškození vlivem VS probíhá tak, že v prvotním stádiu se na izolaci začínají objevovat oblasti s tmavším zbarvením a tyto oblasti se dále velmi rychle rozrůstají vlivem působení elektrických výbojů do větších kráterů. [49]



Obr. 3.16 Počáteční stádium poškození erozí izolace vlivem vibračního jiskření (převzato z [49])



Obr. 3.17 Stádia vibračního jiskření (převzato z [48])

Příznaky vibračního jiskření lze tedy rozpoznat degradací izolace tyčí na koncích čel nižších napětí jednotlivých fází statorového vinutí, na rozdíl od částečných výbojů, které se nacházejí jen na částech tyčí vyššího napětí. Dále lze působení VS pozorovat černým zuhelnatělým prachem izolace nebo zřetelnými důlky na izolaci způsobené působením elektrických přeskoků. [49,52]

### ***Uvolnění a vibrace tyčí***

Vibrace tyčí v drážkách jsou již velmi dlouho problémem všech statorů vyrobených z termosetových izolačních systémů. Příčinou problému je, že při plném zatížení působí na vinutí magnetické síly o dvojnásobné frekvenci, které způsobí vibrace tyčí a ty již nejsou těsně drženy v drážce. Izolace se otírá o vrstvené stěny jádra statoru, které mají velmi drsný povrch. Nejdříve je obroušena ochranná vrstva a poté hlavní izolace. Tato degradace bývá také často přisuzována drážkovým výbojům, protože jak se obrousí ochranná vrstva, objeví se částečné výboje mezi jádrem a povrchem tyče, což zvýší úroveň degradace. [42]

Vibrace tyčí tedy značně urychlují proces degradace, způsobují poškození, obušování, opotřebování, erozi a drážkové výboje izolace.

Často se u velkých strojů můžeme setkat s lokálním nebo celkovým uvolněním čel vinutí, které provází vibrace. Vibrace mohou působit na celá čela vinutí, ale obvykle postihují jen části vinutí. V obou případech je ale nutné zjistit správnou příčinu, kterých může být více například nedostatečné propojení vrstev, nedostatečné provedení podpěr čel vinutí, rezonance, uvolnění vlivem sil zkratových proudů. [35,43]



### ***Závitové a skupinové zkraty dílčích vodičů***

Mezi časté poruchy patří u generátorů s více závitovým cívkovým vinutím průrazy závitové izolace. Výsledný zkratový obvod mezi vodiči jednotlivých závitů vyvolá značný proud tekoucí cívkou a vedoucí k rychlé degradaci a poruše. Závitové zkraty jsou velmi destruktivní, spalují izolaci a taví měděné vodiče. [13]

Závitové, skupinové zkraty a zemní spojení statoru jsou vždy velmi závažné, ale naštěstí se nevyskytují tak často. Při zkratových proudech mohou vznikat mnohonásobně vyšší síly, až 100 krát vyšší než při běžném provozu, které přerušují vazby, posouvají tyče, lámou podpěry, také jsou často zjištěny pomocí nepatrných trhlinek na izolaci tyčí, mohou vést až k celkovému zlomení deformované tyče. Velmi těžko se odhalují diagnostikou, obvykle se na ně přijde až při poruše. Výsledkem je v lepším případě převinutí statoru, v horším případě je potřeba nové jádro či celé vinutí, převinutí rotoru a rozsáhlé čištění kostry stroje. [43,45]

### ***Úniky chladicí kapaliny***

Mnoho velkých generátorů používá přímé nebo nepřímé chlazení statorového vinutí kapalinou, ve většině případů se jedná o chlazení vodou, ale také se používá kombinované chlazení voda-vodík nebo jen chlazení vodíkem. Tyto způsoby chlazení dovolují tok velkých proudových hustot vinutím, ale je zde riziko, že chladicí médium následkem úniku nebo zhoršením čistoty degraduje izolaci nebo části stroje. Úniky chladicího média poškozují izolaci velmi rychle a při závažnějším úniku je nutné převinutí statoru. [13,43]

### ***Jádro statoru***

Nejvíce poruch jádra statoru je viditelných z vnitřního průměru statoru, proto se často zjistí, až při vyjmutí rotoru nebo po poruše. Magnetické jádro statoru může být poškozeno například mechanicky při montáži (demontáži), vniknutím cizích předmětů a materiálů, proražením plechů a přemagnetováním. K poruchám jádra také dochází, pokud jsou jednotlivé plechy vodivě spojeny, poruchou izolace mezi nimi, ale také zkratovými proudy vlivem různých příčin jako například právě přítomností cizích předmětů a nečistot. Mezi časté poruchy patří: znečištění, lokální přehřátí, uvolnění a menší mechanické poškození. Mezi méně časté, ale závažnějšího charakteru jsou větší mechanická poškození, silné přehřátí, hoření, přetavení a také vibrace. Lokální přehřátí jádra může také značně tepelně degradovat izolaci v drážce a způsobit tak její průraz. [2,13,43]

Nejčastější poškození jádra je způsobeno při montáži nebo demontáži rotoru ze stroje a odstávkách, při kterých se do jádra dostanou cizí materiály. Nemusí být snadno odhalitelné, ale je opravitelné, pokud nebylo značně poškozeno. Uvolnění jádra je často se vyskytující problém. U celkového uvolnění lze jádro připevnit a utěsnit, ale pokud je izolace opotřebovaná, hrozí její zvýšené ohřívání. Pokud se jedná o lokální uvolnění, je možné vložit klíny a podložky. Proražení plechu jádra a přemagnetování patří mezi nejzávažnější poruchy, při kterých hrozí roztavení jádra. Je nutné znovu navrstvit, převinout rotor, nové statorové vinutí a řádně vyčistit kostru a chlazení stroje. [2,43]

### 3.4.3.2 Poruchy na rotoru

Rotor turbogenerátoru je vystaven vysokým otáček, velké obvodové rychlosti a tím i značným odstředivým silám. Tyto odstředivé síly a zvýšené mechanické namáhání způsobují například uvolňováním drážkových klínů, poškozením ocelových obručí a vibracemi částí stroje, deformace a posunu vinutí rotoru, migrací a prasklinami mezizávitové izolace, mezizávitovými zkraty.

#### *Poškození obručí*

Nevyvážené zatížení, kmitání, vibrace a další typy abnormálního provozu stroje mohou vyvolat změnu proudů rotoru tekoucí přes zuby, drážky a obruče. Právě obruče jsou nejvíce namáhaným komponentem generátoru, protože jsou zatěžovány odstředivými silami nejen vlastními, ale také celého čela vinutí. Poruchy a praskliny obručí způsobují silné vibrace, poškozují přívody oleje a chlazení, poškozují statorové vinutí. Tyto poruchy nejsou časté, ale téměř vždy se jedná o havárii velkého rozsahu. Protože části obruče mohou být velkými odstředivými silami ze stroje odhozeny přes celou elektrárnu a ohrozit tak životy pracovníků. [2,43]

Zvlášť náchylné na poškození a praskliny byly obruče vyráběné z nemagnetické oceli s příměsí 18 % manganu a 5% chromu. Tyto obruče se mohly porouchat a způsobit havárii ve velmi krátkém časovém období, řádově za několik měsíců až pár let, v některých případech rychleji, pokud byly vystaveny vlhkosti. Obruče vyrobené z tohoto materiálu byly celoplošně podrobeny zkouškám, aby se havárie neopakovaly. Na základě výsledků společnosti GE [46], která provedla v letech 1982 až 1995 kontrolu 238 obručí vyrobené z oceli 18Mn-5Cr, bylo nutné vyměnit 55 obručí a 119 opravit, tedy 73 % všech obručí muselo být nahrazeno nebo opraveno.

### ***Poškození těla rotoru***

Nejčastější poruchy na těle rotoru jsou vyvolané hlavně nesymetrickým, nevyváženým zatížením a asynchronním provozem stroje. Příčinou těchto stavů jsou zvýšené proudy tělem rotoru, které způsobují hlavně lokální přehřátí. Toto přehřátí může dále způsobovat široké spektrum příčin, například připojení stroje přímo na síti při zastaveních, menších problémech se synchronizací, poklesu proudu rotoru při trvalém přenášení nižší nebo naopak vyšší zátěže. Pokud jsou k dispozici kvalitní záznamy o provozu stroje, příčinu poruchy lze snadno zjistit. Rotor stroje může být také poškozen prasklinami. Praskliny se nacházejí nejčastěji pod obručkami na lícování, hranách pólu blízko osy rotoru a také na koncích drážkových klínů blízko osy rotoru. [2,35]

### ***Vinutí rotoru***

Mezizávitové izolace rotoru se mohou vlivem výkyvů teplot, mechanických a odstředivých sil vodorovně v drážkách posunovat, tím může dojít k zablokování radiálních chladících kanálků rotoru, které má za následek nesouměrné ohřívání rotoru, nadměrné vibrace a vyšší zatěžování. Absencí mezizávitové izolace může docházet také k mezizávitovým zkratům. Tyto závitové zkraty se často objevují u starších vinutí, ale také se mohou nacházet u nových a převinutých rotorových vinutí.

Mezizávitové zkraty provází vznik abnormálních vibrací a chvění rotoru, v některých případech silné vibrace způsobí snížení zatížení rotoru a při delším působení této poruchy dochází k větším ztrátám vyrobené elektrické energie. Nesouměrný magnetický tok, oteplení a následná zvýšená teplota při zkratu poškozuje mezizávitovou izolační vložku a mezizávitový zkrat se stává stále závažnější, až způsobuje zemní zkrat. Dále tento mezizávitový zkrat může zmagnetovat hřídel rotoru a tím zhoršovat vibrace, které poškozují ložiska. [2,45,47]

Právě mezizávitové zkraty jsou častou příčinou problémů a pokud k nim dochází, doporučuje se převinutí rotorového vinutí. Převinutí vinutí se také doporučuje pro častou poruchu vyskytující se na rotorovém vinutí: jednofázové a dvoufázové zemní zkraty. Rotor s jednofázovým zemním spojením může zůstat v provozu, protože magnetické i elektrické poměry se nezměnily, teprve při vzniku druhého zemního spojení je část vinutí spojena nakrátko a vzniká magnetická nesouměrnost a jednostranné magnetické tahy. Dvoufázový zemní zkrat je závažný, protože může v místě poruchy vzniknout elektrický výboj a poškodit tak nejen vinutí, ale také tělo rotoru. Zemní spojení vznikají vlivem nízkého

odporu rotorového vinutí. Rotorové vinutí může mít nízký nebo nulový zemní odpor z několika příčin: celkového nebo lokálního znečištění, prasklin a přerušení závitů vinutí, zkratem mezi cívkami. Obvykle se zemní spojení snadno vyhledá, ale je velmi těžké zjistit příčinu jeho poruchy. [13,43,45]

Výkyvy teplot mohou také způsobit podstatné deformace a pokřivení pólových vinutí, to se projevuje především u krajních závitů cívek. Tyto posuny vodičů mohou vést k závitovým, cívkovým ale také pólovým zkratům a silným vibracím. [7]

### ***Poruchy ložisek***

Velkou část poruch turbogenerátorů tvoří problémy s olejovým hospodářstvím. Jedná se hlavně o znečištění oleje nečistotami a vodou, ale také o ztrátu tlaku oleje. Také vlivem magnetické nesouměrnosti stroje se může vytvořit napětí mezi hřídelí rotoru a statorem a průchodem proudu může dojít k poškození ložisek. Proto se u novějších strojů izolují ložiskové pánve. [43]

Ložiska elektrických strojů jsou vystaveny otěru v důsledku proniknutí prachu, drobných částic nebo produktů koroze, což vede k postupnému opotřebení ložiskových kuliček nebo válečků a drážek. Pro správnou funkci ložiska jsou měřeny a monitorovány jeho parametry jako teplota, která je měřena obvykle na vnějším kroužku, na povrchu ložisek, a také na jejich krytu. Dále se monitoruje například doba doběhu, hluk a spektrum vibračních frekvencí. Nepravidelný provoz ložiska provází prudké zvýšení teploty, značný hluk, zvětšený odpor při otáčení, vytékání maziva a v konečném stádiu porušení nebo úplné zadření. [13,14]

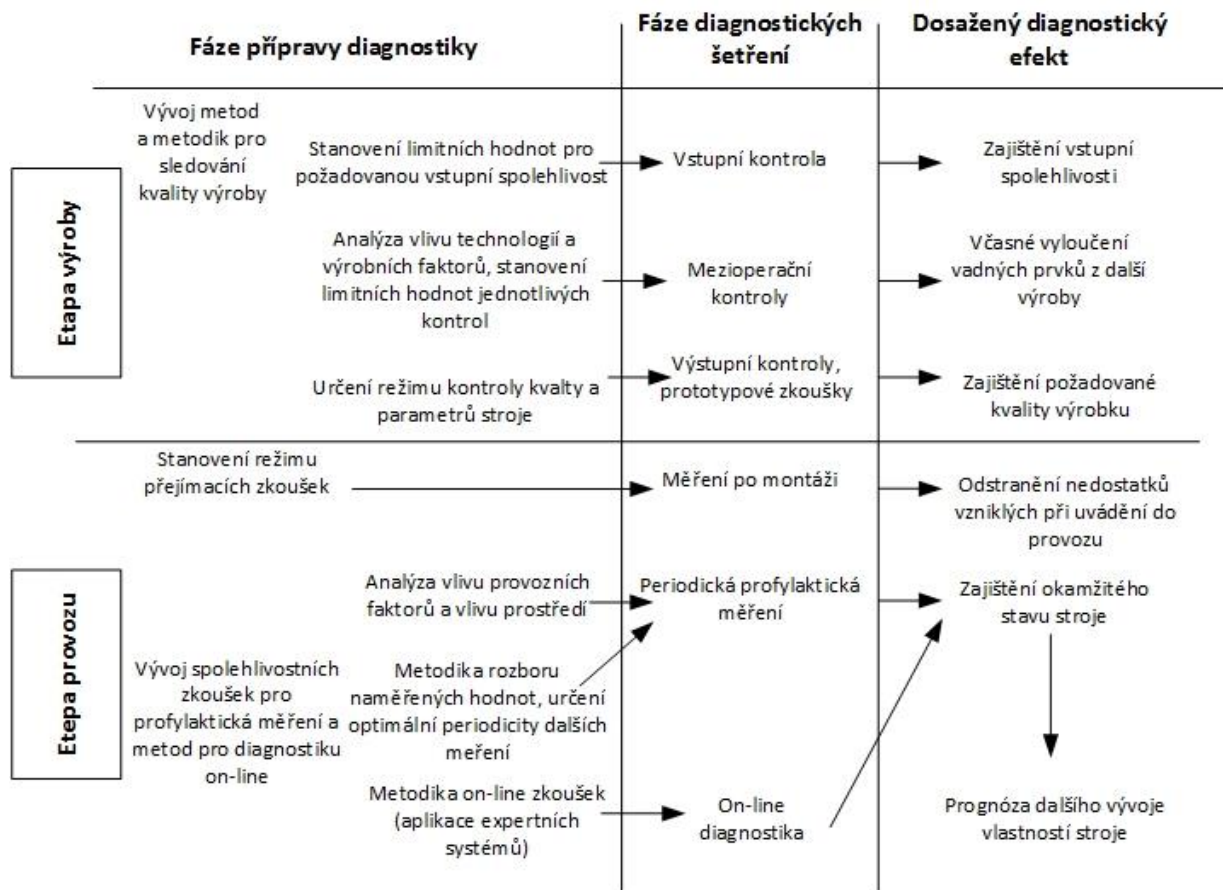
Porucha vlivem ztráty mazacího oleje je vždy závažná a při provozu ložisek nasucho, bez mazacího oleje, dochází k vzplanutí ložisek, které může ohrozit celou elektrárnu. Proto je možné provést několik zálohování dodávky mazacího oleje do ložisek.

## 4 Diagnostický systém pro sledování poruch

Základem obecné diagnostiky a všech diagnostických zkoušek je zjistit stav a vlastnosti sledovaného objektu, aby bylo možné na základě těchto zkoušek učinit požadované závěry. Hlavními prvky diagnostiky jsou diagnostikovaný objekt a diagnostický systém. Na diagnostikovaný objekt působí řada vnějších vlivů, jedná se o vlivy výrobní (např. použité technologie a podmínky při výrobě) a provozní. Provozní vlivy jsou zejména podmínky při provozu a činitelé prostředí. Aktuální stav diagnostikovaného objektu zachycuje diagnostický systém. Výstupem tohoto diagnostického systému je informace, na základě které se vydávají pokyny pro údržbu nebo s využitím předchozích údajů se vytváří prognóza dalšího chování diagnostikovaného objektu. Diagnostické systémy se mohou dělit podle toho, kdy je prováděna diagnostika z hlediska technického života objektu: diagnostiku při výrobě, provozu, servisu a údržbě.

Diagnostický systém tvoří soubor diagnostický prostředků, diagnostikovaný objekt a obsluha. Diagnostickými prostředky se rozumí soubor všech technických zařízení, pracovních postupů a programových vybavení. Při tvorbě diagnostického systému je potřeba nejprve objekt, který má být diagnostikován, řádně prostudovat a vytvořit matematický model k zobrazení všech poruchových i bezporuchových chování objektu. Dále se stanoví postup vlastní diagnostiky a to nejen stanovením vlastních diagnostických operací a jejich optimalizací, ale také stanovení jednotlivých kroků diagnózy. To vše se provádí s respektováním ekonomických aspektů. Další nedílnou součástí pro odpovídající provedení diagnostiky jsou zkušenosti pracovníků se znalostmi na požadované úrovni. Hloubka a preciznost diagnostiky potom úzce souvisí s cenou diagnostikovaného zařízení. [3]

Diagnostika zasahuje do celé oblasti doby života stroje, a to jak do etapy jeho výroby, tak i do etapy provozu. Nejprve prochází fází příprav a následně fází procesů, tedy fází samotných diagnostických šetření. Souvislosti, vazby a stádia diagnostických činností jsou znázorněny na *obr 4.1*.



Obr. 4.1 Souvislosti v diagnostice elektrických strojů [3]

Ve fázi přípravy diagnostiky se provádí vývoj metod a zkoušek v obou etapách výroby elektrických strojů, jedná se o zkoušky pro vstupní kontrolu a vlastní výrobu. Velmi důležité jsou právě mezioperační zkoušky, u kterých je potřeba vyhledat vhodné místo pro zařazení zkoušek ve výrobě tak, aby se včas vyřadily případné vadné díly. Záleží také na režimu jejich provedení, nesmí dojít k poškození zkoušeného výrobku. Toto je důležité hlavně u zkoušek přiloženým napětím, jeho hladina nesmí zkoušený předmět narušit a navíc samotná zkouška musí být účinná a s jasně prokazatelným výsledkem. Důležitá je také analýza vlivu použitých technologií, provádí se řada laboratorních měření a následně se z jejich výsledků stanovuje zkušební režim. [3]

V přípravné fázi provozní etapy se vychází ze zkoušek v laboratorních podmínkách. Vliv provozních faktorů i prostředí se ověřuje zkrácenými zkouškami zvýšeným namáháním pro jejich urychlení, výsledky se poté přepočítají pro reálné podmínky. V této fázi přípravy se také zaměřujeme na možnosti záznamu a registrace naměřených hodnot v databázích. Tato část je rozhodující, protože záznam dat neboli sledování vývoje vlastností v čase je výchozí pro prognózu dalšího chování stroje, která je vrcholem diagnostické činnosti. Velmi důležitá je u off-line metod jejich periodicitu. Pro určení

intervalů mezi jednotlivými šetřeními se vychází spíše ze zkušeností v dané oblasti, což je velmi problematické, protože pokud budou zvoleny dlouhé intervaly, může dojít ke zničení stroje, naopak krátké intervaly a časté zkoušky jsou příliš nákladné. Problematika volby správných intervalů pro off-line diagnostiku a údržbu stroje je blíže popsána v kapitole 4.3.2 Údržba a opravy elektrických strojů točivých. [3]

Diagnostický systém se tedy skládá ze souboru zkoušek, které zahrnují metody a zkoušky již od přijímací kontroly vstupního materiálu, přes zkoušky mezioperační, až po zkoušky při dokončení stroje a při předání zákazníkovi. Následují diagnostické zkoušky a metody, jejichž cílem je včas odhalit stav a počínající degradaci izolace stroje. Jedná se hlavně o zkoušky aplikované v provozu stroje, které mají odhalit stupeň degradace izolačního systému a jeho slabá místa. Na základě dat, zjištěných diagnostikou, se rozhoduje o opravě nebo výměně celého izolačního systému. Do problematiky je nutno započítat i hlediska ekonomická, protože vzhledem k časové i finanční nákladnosti diagnostických šetření a potřebného zařízení, je potřeba uvážit význam a důležitost stroje z hlediska hospodárnosti a bezpečnosti provozu.

Důležitou otázkou diagnostiky je určit, kdy se objekt dostal do stavu, v němž již není schopen plnit požadovanou funkci. Velmi důležitou otázkou také je, jak se objekt do tohoto stavu dostal, ale základní a často nejdůležitější otázkou technické diagnostiky je včasné upozornění na počátek této degradace a stanovení rychlosti jejího dalšího postupu. [8]

Jak již bylo řečeno, diagnostiku lze rozdělit na měření prováděné při výrobě a provozu stroje. S malými odchylkami se tato měření provádějí stejně na všech typech strojů. Pro každou skupinu strojů je určena kritická hodnota, při jejímž překročení je potřeba rozhodovat o odstávce nebo opravě.

#### **4.1 Diagnostické metody a zkoušky**

V dnešní době se v diagnostice elektrických strojů pro zjištění stavu izolačního systému, zajištění bezporuchovosti a odhadnutí zbývající doby života stroje používá velké množství diagnostických metod. Na základě jediné zkoušky z těchto diagnostických metod nelze rozhodovat jednoznačně a komplexně o stavu stroje. Proto se používá vždy soubor zkoušek, které se navzájem doplňují, pro každé diagnostické pracoviště se tento soubor zkoušek může měnit, záleží na výběru jednotlivých metod z hlediska vybavení pracoviště,

stupeň ohrožení izolace při měření, výpovědischopnosti jednotlivých metod a požadavků na přerušeni provozu.

Jednotlivé diagnostické metody se posuzují dle nároků na přerušeni provozu, možnosti ohrožení izolace při měření a výpovědischopnosti metody. Lze je rozdělit přibližně do sedmi jednotlivých skupin dle *tab. 4.1*.

*Tab. 4.1 Porovnání jednotlivých diagnostických metod [11]*

Porovnání diagnostických metod (nejvyšší) - 5 (nejnižší)	Hodnocení: 1 Přerušeni provozu	Ohrožení vinutí	Výpovědi- schopnost
<b>ZKOUŠKY ZVÝŠENÝM NAPĚTÍM</b>			
Výdržná zkouška: 50 Hz	2	3	3
ss napětí	2	3	4
0,1 Hz	2	3	2 - 3
půlvlna napětí	2	2	2 - 3
impulzy	2	2	2
Průrazná zkouška	4	5	2
<b>STEJNOSMĚRNÁ MĚŘENÍ</b>			
Izolační odpor	2	1	4
Polarizační index Polarizace/depolarizace = f(t)	2	1	4
Polarizace v 100% rel. vlhkosti	2	1	2 - 4
	5	1	1 - 3
<b>MŮSTKOVÁ MĚŘENÍ</b>			
Změna tgδ, změna C	2	2	3
Analyzátor dielektrických ztrát	2	2	2 - 3
RC (izolační časová konstanta)	2	2	2 - 3
<b>PULZNÍ A VF MĚŘENÍ</b>			
Detektor částečných výbojů	2	2	2
Analýza signálů v nulovém vodiči	2 *	2	1 - 3
Drážková sonda manuální	4	2	2
Drážková sonda automatická	2 *	1	2
Impulzní analýza částečných výbojů	1 *	1	1
<b>MÉCHANICKÉ A AKUSTICKÉ TESTY</b>			
Rázové impulzy (ložiska)	1 *	1	1
Ultrazvuk (lokace částečných výbojů) Akustická emise	2 - 4 4 ?	2 2?	2 - 3 2 ?
<b>TEPELNÉ A CHEMICKÉ TESTY</b>			
Teplota	1 *	1	1 - 4
Plyny z přehřáté izolace	2 *	1	2
Plyny z návěstidel	1 *	1	1
<b>SMYSLOVÁ KONTROLA</b>	2-4		
Test částečných výbojů ve tmě			
Ochrana proti koróně: drážky, čela			
Stav izolace: drážky, čela			
Klínování, upevnění, spoje			
Statorové plechy			

Vybraným diagnostickým šetřením a metodám, které lze použít při diagnostice velkých točivých elektrických strojů, je věnována samostatná kapitola 4.4 Vybraná diagnostická měření.



## 4.2 Diagnostika při výrobě stroje

Diagnostické zkoušky zařazené do výrobního pochodu slouží pro výrobce k získání přehledu o jakosti vyráběných předmětů a jejich částí. Snahou výrobce je zabezpečit technologii výroby tak, aby odpovídala předpokládané životnosti. Diagnostika má svůj význam, již při vstupu materiálů a prvků do vlastního výrobního procesu, protože je potřeba znát, zda materiál, který chceme použít, má požadované vlastnosti s příslušnými tolerancemi. Velmi důležité jsou také mezioperační elektrické a mechanické zkoušky při výrobě a posledním diagnostickým úkonem před expedicí stroje k odběrateli, je provádění výstupních typových a kusových zkoušek na dokončeném stroji.

### 4.2.1 Kontrola vstupního materiálu a mezioperační zkoušky

Aby byl zajištěn požadavek optimální spolehlivosti a životnosti, již výrobce elektrického zařízení zařazuje do výrobního pochodu soubor zkoušek: jedná se o zkoušky mezioperační, přejímací a kontroly vstupního materiálu. Tyto zkoušky mají dopad nejen na zvýšení vstupní spolehlivosti, ale také ekonomiky výroby, protože včasné vyloučení vadného kusu z výroby s sebou přináší úspory zbytečných nákladů a práce do něj vložených. Proto se provádějí statistické přejímky, přejímací zkoušky a kontroly základního vstupního materiálu již před samotným výrobním procesem. Tyto zkoušky se provádějí pro ověření, že použité izolační materiály a postupy výrobního procesu jsou na očekávané úrovni kvality. Výroba z kvalitních materiálů, předcházení možným vadám a včasné odhalení vadných dílů a součástí je levnější a méně pracné, než vyrábění vadných dílů, které je nutné vyřadit.

Materiály vstupující do výroby musí splňovat předepsané technické parametry, které jsou dány teplotní třídou, prostředím nebo také předpokládaným zatížením stroje. Tyto požadavky a technické parametry jsou předem specifikovány již ve fázi návrhu stroje. Pro zajištění požadované kvality a spolehlivosti musí být sledovány veškeré technologické postupy během výroby. Samotná kvalita výroby nezávisí pouze na kvalitních vstupních materiálech, ale také na řadě dalších faktorů. Velmi důležitý je také výběr subdodavatelů, tedy dodávek hotových dílů, které jsou pouze dopracovány a zapojeny do výrobního procesu. Nejen, že tento způsob snižuje náklady výroby, ale také při dodávce dílu v přesně stanoveném čase, zvyšuje její rychlost. [3]

Kontroly vstupujícího izolačního materiálu, jsou elektrického charakteru. Nejvíce vypovídající o kvalitě materiálu jsou zkoušky průrazným napětím, kde se testuje izolační schopnost. Dále se mohou měřit absorpční a rezorpční charakteristiky, polarizační index a ztrátový činitel a jako doplňkové se používají zkoušky mechanického charakteru. Vstupními zkouškami se hodnotí použitelnost daného materiálu pro jednotlivé aplikace při výrobě točivých strojů. [3]

Při výrobě vinutí velkých točivých strojů se provádí kontrola základního vstupního materiálu, například pro technologii resin-rich je to tříložkový kompozitní materiál, měří se jeho tloušťka, obsah pojiva a těkavých látek, dále pevnost v tahu a na vybraných vzorcích se provádí zkouška průrazným napětím.

Mezioperační zkoušky jsou například napěťové zkoušky jednotlivých tyčí vinutí po každém podstatném výrobním postupu a před vložením do statoru. Vhodné jsou hlavně zkoušky střídavým napětím, které se provádějí již při spečení dílčích vodičů v permutovanou tyč a opakují se po každém pracovním chodu: po ohýbání čel vinutí, po sestavení několika vodivých tyčí, po provedení drážkové izolace. Zkoušky dostatečné elektrické pevnosti závitové izolace plným zkušebním napětím se provádějí až po provedení drážkové izolace. Velmi vypovídajícím ukazatelem pro posouzení kvality výroby drážkové izolace je měření činitele ztrát  $\tan \delta$ . Dále se kontrolují duté vodiče pro tekutá chladiva. Existují zkušební přístroje, které odhalují trhliny vzniklé vířivými proudy, chyby v materiálu a odchylky v geometrických rozměrech. U dutých permutovaných vodičů se dále provádějí tlakové zkoušky tlakem přibližně 1,5 MPa a zkoušky těsnosti po připojení vodních komor ponořením do vody při zvýšeném tlaku plynu uvnitř tyče. Kromě kusových zkoušek izolace tyčí a vinutí, lze také provádět namátkové měření činitele ztrát  $\tan \delta$  v závislosti na napětí, jejichž úkolem je ověřit, zda se izolace při oteplení nezhoršuje. [12]

Správné rozvržení kontrolního místa pro mezioperační zkoušky má vliv na úspory materiálu a práce, které jsou vynaloženy do vadného výrobku, který byl by vyřazen výstupními zkouškami nebo způsobil poruchu v provozu.

#### **4.2.2 Výstupní kusové a prototypové zkoušky**

Výstupní zkoušky se provádějí na kompletně smontovaných strojích. Rozdělují se na zkoušky typové a kusové. Kusové zkoušky se provádějí na každém vyrobeném stroji

během výroby nebo po vyrobení, s účelem zjistit, zda stroj vyhovuje určitým požadavkům a kritériím. Typové zkoušky jsou prováděny na každém novém typu, při podstatné změně konstrukce, použitých materiálů nebo parametrů stroje, aby se zjistilo, zda konstrukce odpovídá určitým specifikacím.

Vlastnosti satorové izolace jsou poprvé měřeny výrobcem ještě před uvedením do provozu, ideálně v době, kdy je stator kompletně smontován, jsou na něm ukončeny všechny pracovní úkony a ve stroji ještě není instalován rotor. Výsledky těchto měření jsou základem pro posouzení provozuschopnosti izolační soustavy a slouží jako výchozí údaje pro další diagnostická šetření.

Zkoušky před uvedením do provozu jsou prováděny výrobcem na hotových a kompletně smontovaných strojích, pro ověření správnosti návrhu, splnění specifikovaných parametrů a požadavků daných projektem.

Minimální rozsah výrobních kusových zkoušek je upraven normou ČSN EN 60034-1 ed.2 [18] :

- Měření odporu vinutí (za studena)
- Ztráty naprázdno při účinníku rovném jedné nebo měření budícího odporu naprázdno při jmenovitém napětí při zkoušce naprázdno
- Kontrola sledu fází
- Zkouška výdržným (zvýšeným) napětím

Následující zkoušky před uvedením do provozu popsané v [54] jsou prováděny společností BRUSH SEM s.r.o. na turbogenerátorech o výkonu 200 MW vzduchem chlazených. Tyto zkoušky lze rozdělit na elektrické a mechanické.

- Mechanický chod turbogenerátoru
- Charakteristika naprázdno
- Charakteristika nakrátko
- Oteplovací zkoušky
- Měření náhlých zkratů
- Přejížděná časová konstanta naprázdno
- Měření vibrací
- Měření hluku

#### **4.2.3 Vstupní diagnostika a uvádění stroje do chodu**

Před samotným uvedením stroje do provozu a před uplynutím záruční doby se provádí tzv. vstupní diagnostika, zahrnující následující metody [3]:

- Vizuální kontrola statorového vinutí
- Měření izolačního odporu a výpočet polarizačního indexu statorového a rotorového vinutí
- Měření napěťové závislosti izolačního odporu na stejnosměrném napětí
- Měření kapacity a ztrátového činitele a výpočet časové konstanty statorového vinutí
- Měření částečných výbojů statorového vinutí střídavým napětím o frekvenci 50 Hz
- V případě nemožnosti použití střídavého napětí o frekvenci 50 Hz je možno provést zkoušku stejnosměrným napětím
- Zkouška rotorového vinutí střídavým napětím 50 Hz
- Frekvenční analýza proudu a rozptylového magnetického pole (pouze pro asynchronní stroje a synchronní stroje s asynchronním rozběhem)

Dále se po dohodě s výrobcem mohou aplikovat další vybrané doplňkové měření a zkoušky [3]:

- Měření částečných výbojů statorového vinutí akustickou sondou
- Měření částečných výbojů statorového vinutí diferenciální elektromagnetickou sondou
- Zkouška statorového vinutí napětím velmi nízkého kmitočtu
- Analýza rozběhového proudu (pouze pro asynchronní stroje a synchronní stroje s asynchronním rozběhem)
- Měření hluku
- Zkouška závitové izolace statorového vinutí proudovými impulzy
- Zkouška závitové izolace rotorového vinutí s vyniklými póly

Je známo, že nové vysokonapěťové izolace se v počátcích svého provozu ještě dotvrzují, nejvýraznější změny probíhají do prvních 3000 provozních hodin, obvykle se vlastnosti izolace zlepšují. Ale aby bylo možné tyto změny sledovat, je nutné uskutečnit měření například již po půl roce provozu. Po uplynutí této doby se již izolační vlastnosti ustálí a je možné prodloužit intervaly jednotlivých diagnostických měření na dva až tři roky. [8]

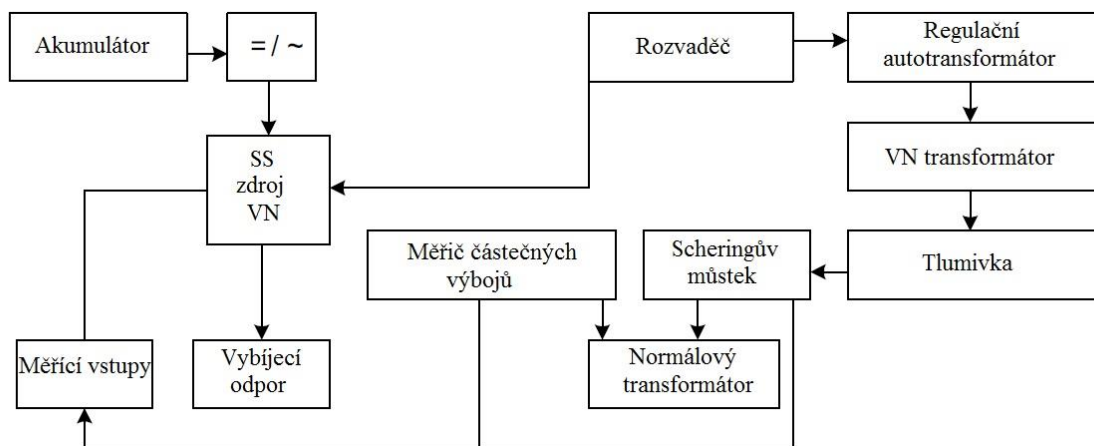
### 4.3 Diagnostika v provozu stroje

V předchozím textu byla popsána diagnostická šetření při výrobě stroje, tedy od zkoušek vstupních, přes zkoušky mezioperační a výstupní, až po zkoušky vstupní (přejímací), které tvoří přechod k další skupině diagnostických zkoušek, jejichž cílem je včasné odhalení počínajících degradačních změn, které by mohly způsobit poruchu a v horším případě havárii stroje.

Zkoušky aplikované v provozu stroje se nazývají profylaktické, jejich cílem je odhalit slabá místa v izolačním systému a stanovit stupeň jeho postupného znehodnocování. Výsledek těchto **profylaktických zkoušek** nám dává informaci o tom, zda je nutná oprava nebo celková výměna izolace. Velký význam zvláště pro stroje nejvyšších výkonů má také **on-line diagnostika** neboli **monitoring** stavu zařízení. Nepřetržité sledování veličin a vlastností umožní sledovat okamžitý stav a předpovídat další chování stroje. Hlavní výhodou je to, že na sledovaný stroj při provádění měření a diagnostických testů nepůsobí žádná další přídavná namáhání vnějším zdrojem jako u off-line diagnostiky. Nevýhodou jsou vysoké finanční náklady na investici do monitorovacího systému.

Pro spolehlivý provoz je velmi důležitá první revize, která se výrobcí doporučuje provádět nejpozději do tří let. Jedná se o první komplexní prohlídku, kontrolu a měření v provozu sledovaného stroje. Výrobce před uvedením stroje do provozu stroj odzkouší a prokáže, že vyhovuje předepsaným parametrům, ale nemůže se zaručit, že nebude během krátké doby potřeba něco dotáhnout, definitivně dořídit, nastavit, opravit, protože mnohé drobnější závady se projeví až v tomto období a není možné je pozorovat dříve. Například izolační materiály použité při výrobě mohou časem měnit svůj objem, většinou zmenšovat. Takový rozdíl v rozměrech není velký, ale vzhledem k rostoucímu namáhání dnešních izolačních soustav je nutno tomuto jevu věnovat pozornost. Zmenšování objemu se projeví již na počátku provozu stroje a teplotním a mechanickým namáháním se postupně zhoršuje. Proto je nutné v prvním až třetím roce stroj prohlédnout a izolační soustavu fixovat. Pokud by k tomu upevnění nedošlo, stroj by mohl pracovat klidně i několik let, než by došlo k poruše, která ale bývá většího rozsahu a náklady na opravu značně přesáhnou náklady na doporučenou prohlídku. [8]

Diagnostika velkých točivých strojů je specifická v tom, že veškerá diagnostická šetření musí být prováděna na místě. Pro tento účel jsou používána **mobilní diagnostická pracoviště**. Měřicí vůz je rozdělen na dvě základní části: měřicí a vysokonapět'ovou zkušební část. Ovládací část obsahuje měřicí přístroje, ovládací zdroje napětí atd. Vysokonapět'ovou část tvoří: vlastní zdroje, akumulátor se střídačem, rozvaděč, normálový kondenzátor, vybíjecí odpor a další. Moderní měřicí vozy jsou vybaveny také počítačem pro automatizované měření a vyhodnocování nasbíraných dat. [3]



Obr. 4.2 Doporučené vybavení přístrojů a zařízení v měřícím voze [3]

### 4.3.1 Profylaktická diagnostika

Způsob provozu a zatížení stroje tedy značně ovlivňuje životnost stroje. Diagnostikou vlastností izolačního systému, lze včas odhalit možnou poruchu, dlouhodobě provozovat stroj v bezporuchovém provozu, prodloužit a předpovídat další životnost stroje. Pro stanovení prognózy, budoucího chování stroje a doby jeho života se používá soubor pravidelných měření, která se nazývají profylaktická. Tato měření (běžné revize) se provádějí pravidelně přibližně každé 3 roky, hlavní revize, kde je stroj podroben většímu počtu měření se provádí přibližně každých 8 let. Pomocí těchto profylaktických měření, lze získat přehled o zestárnutí stroje a včas odhalit blížící se konec doby života vinutí a to v plánované odstávce nahradit, aby se předešlo neplánované poruše, v horším případě havárii.

V provozu stroje se pravidelně v intervalu 1 až 3 roky provádí tzv. malá diagnostika obsahující následující zkoušky [3,31]:

- Vizuální kontrola statorového vinutí
- Měření izolačního odporu a výpočet polarizačního indexu statorového a rotorového vinutí
- Měření napěťové závislosti izolačního odporu na stejnosměrném napětí
- Měření kapacity, ztrátového činitele a výpočet časové konstanty statorového vinutí
- Měření částečných výbojů statorového vinutí galvanickou metodou
- Indikace ozónu v chladícím vzduchu
- Frekvenční analýza proudu a rozptylového magnetického pole (pouze pro asynchronní stroje a synchronní stroje s asynchronním rozběhem)
- Měření hluku

Velká diagnostika obsahuje malou diagnostiku a další doplňkové měření a zkoušky. Velká diagnostika se provádí, pokud po provedení malé diagnostiky nevyhovuje některý s kritériálních parametrů zkoušek nebo pravidelně, přibližně každých 8 letech provozu stroje. Širší rozsah zkoušek má svůj význam i před prováděním plánované generální opravy, aby se identifikovaly ty části stroje, kterým musí být věnována zvýšená pozornost při údržbářských činnostech. Doplňkové měření a zkoušky jsou následující [3,31]:

- Měření částečných výbojů statorového vinutí akustickou sondou
- Měření částečných výbojů statorového vinutí diferenciální elektromagnetickou sondou
- Zkouška statorového vinutí střídavým napětím 50 Hz
- Zkouška rotorového vinutí střídavým napětím 50 Hz
- Zkouška statorového vinutí stejnosměrným napětím
- Zkouška statorového vinutí napětím velmi nízkého kmitočtu
- Diferenční termická analýza
- Analýza rozběhového proudu (pouze pro asynchronní stroje a synchronní stroje s asynchronním rozběhem)
- Zkouška závitové izolace statorového vinutí proudovými impulzy
- Zkouška závitové izolace rotorového vinutí s vyniklými póly

#### 4.3.2 Údržba a opravy elektrických strojů točivých

Hlavní požadavky, které se snažíme udržet po celou dobu provozu elektrického stroje, jsou: bezporuchovost, spolehlivost a úspornost. Stroj je v provozuschopném stavu, pokud je schopen plnit požadovanou funkci a hodnoty jeho stanovených parametrů jsou udržovány ve stanovených mezích. Abychom tyto požadavky mohli zajistit, je třeba věnovat pozornost údržbě a opravám těchto strojů a zařízením, které s jejich provozem souvisí.

**Údržba** je činnost stanovená technickými podmínkami provozu a je prováděna za účelem udržení objektu v provozuschopném stav. Skládá se z pravidelných kontrol a preventivních zásahů, které slouží hlavně pro zpomalení stárnutí stroje a předcházení poruchám. **Oprava** je souhrn činností prováděných po poruše za účel navrácení stroje zpět do provozuschopného stavu.

##### 4.3.2.1 Hlavní činnosti v oblasti údržby a oprav

Činnosti prováděné v oblasti údržby a oprav se dají rozdělit na běžnou údržbu, prohlídku a obnovu. **Běžnou údržbou** se rozumí provádění preventivních kontrol jako

čištění a ošetřování dle pokynů kontrolního stanoviště údržby. Prohlídkou se rozumí činnosti jako měření, kontroly, evidence. Za obnovu se považují opravy a renovace.

Každý elektrický stroj musí být opatřen výkonnostním štítkem, na kterém jsou označeny základní provozní a identifikační údaje. Součástí tohoto štítku může být také označení směru otáčení, druh maziva a termín pro mazání ložisek. Pokud obsluha a údržba stroje vyžaduje speciální pokyny, dodává výrobce také technický návod. Pokud uživatel nedodrží štítkové údaje a pokyny pro obsluhu a údržbu, při výskytu poruchy stroje se vystavuje nebezpečí, že nebude moci uplatnit záruční lhůtu stroje. Naopak dodržení těchto podmínek je základem pro bezporuchový, úsporný a spolehlivý chod každého stroje.

Na základě technických údajů stroje, způsobu jeho použití a důležitosti se stanovuje časový plán a postup běžné kontroly. Cílem této údržby je snižování procesu opotřebení jednotlivých částí stroje a udržení jeho normálního provozu. [5]

Při běžné údržbě se provádí zejména [5]:

- Kontrola čistoty a stavu stroje
- Kontrola mechanických a elektrických spojů
- Kontrola mazání ložisek
- Kontrola spojení s poháněným (poháněcím) zařízením
- Kontrola kmitání
- Kontrola hluku
- Kontrola oteplení
- Kontrola komutace

Čistota stroje má velký vliv na chlazení stroje. Nejen, že prach zhoršuje přestup tepla do okolního prostředí, ale může také dojít k ucpání chladících kanálů a tím dojde k přehřátí vinutí a jeho zničení. Pokud je prach hořlavý, může dojít při přehřátí vinutí stroje také k požáru. Proto je potřeba stroj pečlivě očistit na povrchu, ale také vyfoukat prach zevnitř stroje. Za chodu stroje je možné kontrolovat dotažení šroubových spojů ochranného krytu, vibrace a hluk. Při vypnutém stroji se kontroluje dotažení všech šroubových spojů ve svorkovnici, aby se vyloučil vliv přechodných odporů. [5,43]

Všechny výše uvedené kontroly běžné údržby slouží k udržení normálního bezporuchového stavu a včasnému zabránění vzniku závady před havárií stroje. O údržbě se provede záznam, v případě nejasností nebo podezření na závadu se přistupuje k detailnější prohlídce stroje, jejímž cílem je určit závadu a její příčinu.



Hlavní cíl prohlídky je určení stavu stroje, tedy příčiny a následku závady a zhotovení zprávy pro opravu stroje nebo jeho zpětné uvedení do normálního provozu. V praxi neexistuje obecný postup pro určení závady, protože závada může vzniknout z více příčin. Proto se vždy musí postupovat z širších souvislostí a vylučovat nepravděpodobné příčiny závad, až se dospěje k možné příčině.

**Prohlídka** stavu stroje je tedy diagnostikou, což obecně znamená prostředkem pro zjišťování (určení) stavu a hledání její příčiny. Diagnostice a diagnostickým metodám je v této diplomové práci podrobně věnována celá třetí kapitola.

Často se vyskytují závady, které středisko údržby není schopno identifikovat ani opravit. Proto je vhodné se obrátit na renomované společnosti a zkušené diagnostiky s vhodnými prostředky, zkušenostmi a vybavením např. s mobilním diagnostickým pracovištěm, tak je možné v krátkém čase lokalizovat příčinu poruchy.

Obnovou se stroj uvádí do původního nebo inovovaného stavu, pro zajištění jeho spolehlivého, úsporného a bezporuchového provozu.

**Obnova** do původního stavu se provádí ze tří hlavních důvodů. Nejčastějším důvodem je, že vlivem závady došlo k poškození nebo havárii, na základě prohlídky se vytipovaly vadné části, které se musely opravit. Musíme také obnovovat stroje, které již byly provozovány a chceme je znovu použít. Stroj tedy odpracoval požadované hodiny a je potřeba obnovit jeho původní spolehlivost. V tomto případě je nutné na základě prohlídky vytipovat vadné díly a součásti, které je nutno opravit nebo vyměnit, provádíme tedy renovaci stroje. Posledním důvodem, je když stroj pracuje zcela spolehlivě, ale je potřeba ho vybavit snímači otáček, proudu a napětí. Příkladem může být přechod na napájení a řízení otáček asynchronního stroje pomocí měničů kmitočtu. V takovém případě je nutno stroj upravit pro dodatečnou montáž snímačů a čidel, chlazení, provádí se tedy modernizace. [5]

#### 4.3.2.2 Údržba a opravy podle časového plánu

Nejčastěji používaným přístupem je provádění údržby, prohlídky a oprav podle předem stanoveného časového plánu, který je stanoven na základě dlouhodobých provozních zkušeností. Termíny jsou naplánovány v závislosti na odstavení výrobního procesu. Obvykle se nepodaří zajistit optimální dobu údržby, proto dochází k výměně dílů

velmi brzo nebo naopak pozdě. Výhodou je, že lze odstavení strojů předem naplánovat, ale není vyloučeno, že dojde k poruše mezi dvěma prohlídkami. [5,43]

Bylo prokázáno, že stáří stroje není rozhodujícím faktorem podmiňujícím stav statorového vinutí. Modernější stroje tedy nemusí mít spolehlivější izolační systém a provádět tak údržbu podle časového plánu nemusí být vhodné.

Způsob údržby podle časového plánu lze vylepšit zavedením pravidelné kontroly nebo průběžného sledování. Pravidelná kontrola znamená, že pracovník údržby podle časového plánu (denního, týdenního, měsíčního) hodnotí chování stroje dle dlouhodobých zkušeností nebo provádí měření či hodnocení vybraných veličin jako: kmitání, teploty ložisek, hluku atd. Poté zpracuje pravidelný záznam, podle kterého je poté možno naplánovat přesnější stanovení doby údržby stroje. Pro průběžné sledování je potřeba stroj vybavit senzory a čidly pro kontrolu teplot ložisek, vinutí a také např. kmitání ložiskových uzlů. [5]

#### **4.3.2.3 Údržba a opravy podle skutečného stavu zařízení**

Ideální volbou pro stanovení intervalů pro údržby a opravy je dle skutečného stavu stroje. Abychom mohli znát tento skutečný stav stroje, je potřeba instalovat měřící čidla, která stroj nepřetržitě monitorují.

Naměřené hodnoty z čidel mohou být předávány v určitých časových intervalech nebo průběžně na kontrolní stanoviště, kde jsou uloženy a porovnány s dovolenými a předchozími hodnotami. Na základě takto vyhodnocených měření se provádí odhad doby, kdy některá z veličin překročí dovolenou mez. Tento způsob odhadu se nazývá trendová analýza. [5]

Údržba podle skutečného stavu zařízení je nejdražší na zavedení, ale vykazuje nejvyšší úspory nákladů. Podle tohoto způsobu je možné naplánovat přesné termíny údržby, zajistit včasné a ekonomické objednání součástí na opravu a odstavení výrobního procesu. V současnosti je tento způsob využíván u nejdražších strojů a zařízení a tam, kde by vznikly velké hospodářské ztráty nebo byla ohrožena bezpečnost provozu. [5]

Pro určité druhy strojů jsou vhodné různé měřené veličiny a zároveň jsou ze všech měřených veličin pouze některé velmi vhodné pro průběžné sledování stavu zařízení: např. teplota, kmitání, tlak, otáčky atd. Další veličiny je vhodné měřit a vyhodnocovat jen v případech, kdy nelze z náhlé změny monitorovaných veličin určit vznikající závadu,

jedná se hlavně o elektrické veličiny a hluk. Poslední kategorii tvoří veličiny, jejichž sledování je značně finančně a technicky náročné a používají se pouze ve speciálních případech poruch např. sledování přepětových kmitů na vstupu motoru, určení tvaru kmitů, teplotní rozložení pomocí infrakamery atd.[5]

Rozdělení měřených veličin z hlediska sledování stavu točivých strojů [5]:

a) Velmi vhodné

- Veličiny související s kmitáním stroje (amplituda, rychlost a zrychlení kmitání)
- Otáčky
- Mechanické veličiny (posun, protažení)
- Teploty (ložisek, vinutí)
- Čas (doby rozběhu, doběhu, trvání přechodného děje)
- Točivý moment

b) Vhodné

- Hluk
- Elektrické veličiny (napětí, proud, výkon)
- Mechanické veličiny (průhyb)

c) Vhodné za určitých podmínek

- Sledování přepětových špiček a proudových nárazů v delším časovém období
- Zjišťování provozních tvarů kmitu stroje nebo celého zařízení
- Určení vzniku místního přehřátí pomocí infrakamery
- Sledování excentricity vzduchové mezery

### 4.3.3 Diagnostika on-line

Přestože se většina diagnostických šetření provádí v režimu off-line, na odstavených strojích při prohlídkách, odstávkách a revizích, v současné době jsou díky rostoucím požadavkům na spolehlivost, stále více skloňovány on-line monitorovací systémy. Jejich hlavní výhodou je především to, že v případná porucha nebo změny stavu izolačního systému se projeví téměř okamžitě a je tedy možné rozhodovat o dalším provozu stroje, sledovat rozvoj poruchy nebo naplánovat její odstranění. Mezi další výhody diagnostiky on-line patří předpověď dalšího chování stroje na základě velkého počtu snímaných hodnot. On-line diagnostika také nezpůsobuje žádná další přídavná namáhání, tato namáhání jsou způsobena u off-line metod externím zdrojem napětí, který zatěžuje stroj jiným a často větším napětím než je napětí v provozu. [3,11]

Nevýhodou on-line diagnostiky je její složitost a vysoké pořizovací náklady na monitorovací systém, který je potřeba pro každé sledované zařízení samostatný. Tato investice se vyplatí spíše u strojů vyšších výkonů, například více než 300 MW, chlazených vodou nebo vodíkem, protože tyto stroje jsou dražší, důležitější z hlediska provozu celé elektrizační soustavy, náchylnější na poruchy a jejich výpadek by znamenal značné následky nejen finanční.

Diagnostické metody používané pro on-line měření veličin lze rozdělit do dvou skupin: na provozní a monitorovací metody. Při monitoringu jsou všechna čidla a snímače připojeny ke stroji a vyhodnocování měřených veličin probíhá v reálném čase. Signály a naměřené veličiny z provozní diagnostiky jsou také získány při provozu stroje, ale nejsou vyhodnocovány přímo v reálném čase. V praxi jsou při měření on-line stroje trvale osazeny čidly a snímači. Samotný sběr dat a jejich vyhodnocování se provádí z těchto snímačů v intervalech, které jsou kompromisem mezi požadavky provozovatele měřit co nejčastěji a možnostmi vyhodnocovacího týmu. Pro zjištění závady okamžitě po jejím vzniku a dostatku času pro naplánování rozsahu a termínu opravy je lepší nepřetržité sledování (monitoring) stroje. [3,11]

Studie CIGRE [38], rozeslala dotazník týkající se on-line monitoringu turbogenerátorů, kde respondenti odpovídali hlavně na to, jaké parametry jsou u nich monitorovány a jakými zařízeními jsou měřeny. Odpověď zaslalo celkem 13 respondentů z 8 zemí světa a z těchto výsledků lze říci, že pro on-line monitoring stavu turbogenerátorů jsou sledovány následující parametry a veličiny:

- Tepelný rozklad izolačních materiálů u vodíkem nebo vzduchem chlazených strojů
- Těsnost a úniky vodíku
- Čistota plynu vodíku
- Bod kondenzace vodíku
- Monitoring teploty statorového vinutí
- Přímé chlazení statorového vinutí vodíkem
- Stav chladicí vody statorového vinutí
- Aktivita částečných výbojů ve statorovém vinutí
- Vibrace čel vinutí
- Vibrace kostry a jádra statoru
- Vibrace statorových plechů
- Vibrace tyčí statoru
- Stav kartáčů budicího systému
- Porucha usměrňovače u bezkartáčových budicích systémů

- Zkratové proudy rotorového vinutí
- Vibrace hřídele v ložiskách
- Vibrace hřídele rotoru turbosoustrojí
- Chvění hřídele rotoru
- Poruchy obruče
- Napětí a uzemnění hřídele

On-line monitorovací zařízení dovolují předpovídat další chování stroje a tím i efektivněji naplánovat strategii údržby a oprav. Přechod z údržby podle časového plánu na údržbu podle skutečného stavu zařízení s sebou přináší řadu výhod jako například lepší naplánování odstávek a s nimi spojenou spolehlivost a flexibilitu provozu, efektivnější využití a výměnu náhradních dílů. Největší výhodou včasné detekce vznikajících poruch jsou značné úspory, které by byly jinak vynaloženy na opravy. Účelem monitoringu je tedy snaha předcházet značným katastrofickým poruchám a ty přeměnit spíše na poruchy, které lze opravit při plánované odstávce a podstatně tak snížit náklady. Ale často i s nejmodernějším vybavením pro monitoring generátoru může být těžké určit příčinu poruchy, protože někdy chybí dostačené uchování záznamů a údajů z provozu stroje.

Hlavní výhody on-line monitoringu jsou tedy: prevence proti poruchám, snížení počtu nucených odstávek stroje, lepší vyhodnocení provozních rizik a zlepšení přesnosti stanovení příčiny poruchy, zvýšení životnosti stroje, přechod z údržby podle časového plánu na údržbu podle skutečného stavu zařízení a s tím související snížení počtu plánovaných odstávek a off-line diagnostiky.

Nevýhodou monitorovacích systémů je, že nedokáží rozpoznat pomalu se rozvíjející poruchy například izolace a nemohou plně nahradit inspekci a diagnostiku při odstávkách stroje. Poruchy monitorovacích systémů mohou vést k předčasným odstávkám generátoru. Interpretace naměřených dat se musí provádět kvalifikovanou osobou, sledováním trendů hodnot a na základě dřívějších zkušeností. [38]

#### 4.4 Vybraná diagnostická měření

Jak již bylo řečeno v předchozím textu, diagnostická šetření lze rozdělit podle toho, v jaké části technického života objektu jsou prováděna: na diagnostiku při výrobě, provozu, servisu a údržbě. Ale hlavní rozdělení diagnostických měření je, zda jsou prováděna při plánovaných odstávkách nebo při provozu stroje, na off-line a on-line metody.

#### 4.4.1 Diagnostika off-line

Většina diagnostických šetření provádí v režimu off-line, tedy na odstavených strojích při plánovaných prohlídkách a odstávkách stroje. Používá se soubor více metod, které se navzájem doplňují, protože neexistuje jedna metoda, která by mohla odhalit všechny možné vznikající poruchy a zjistit skutečný stav stroje.

##### 4.4.1.1 Vizuální kontrola statorového vinutí

Pro sledování stavu izolačního systému jsou základem vizuální kontroly vinutí. Tyto vizuální kontroly jsou velmi důležité a zároveň poměrně jednoduché pro zkušeného pracovníka diagnostiky. Při provozu stroje na vinutí a další konstrukční části působí teplotní, chemické a mechanické namáhání a další faktory vlivu. Působení těchto faktorů vlivu a stárnutí, lze často identifikovat vizuálně a získat tak první informaci o stavu izolačního systému. Například působením teploty může izolační systém měnit svůj objem a vliv teplotního namáhání lze poznat díky uvolnění klínů v drážkové části vinutí. Výbojové činnosti způsobují lokální ohřev dielektrika a viditelně poškozují izolaci povrchovými výboji. Chvění a další mechanické vlivy mají za následek uvolňování klínů a poškozování úvazků čel. [3]

Vizuální kontrola je nejčastěji prováděna po vyjmutí rotoru na demontovaném stroji. Kontroluje se hlavně statorové vinutí, průchodky, teflonové hadice, průchodky vodního systému, systém měření teplot vinutí, plynu a stav paketu. V drážkové části vinutí se kontroluje pevnost a uvolnění drážkových klínů, odpor mezi polovodivou vrstvou rovné části a vodičem statoru. Čela vinutí jsou kontrolována na tuhost a uvolnění rozpěrných palců u výstupu tyčí z drážek a tuhost rozpěrek a bandáží. Při kontrole čelních partií je také možné poklepekem kladívka nebo použitím přístroje pro měření tuhosti klínů sledovat frekvenční nebo akustické odezvy. [3]

Vizuální kontrolu lze také provádět v místech, kam se lze dostat například odmontováním krytů a obručí a používá se také různého náčiní a vybavení jako například zrcátek a kladívek. V současné době se používají k vizuální kontrole také roboti, kteří jsou vybaveni kamerou, mají přístup do stroje přes otvory a není potřeba vyjmout rotor ani kryty.

Kritickou částí generátoru je drážková část vinutí, protože jsou zde nejvyšší elektromagnetické síly, bohužel je k této části stroje omezený přístup a špatně se vyhodnocuje. Kontroluje se, zda se na izolaci nenachází poškození jako škrábance, prach a oděrky vzniklé vibracemi tyčí a náznaky působení částečných výbojů, dále se kontrolují drážkové klíny, jejich uvolnění a poškození.

Tab. 4.1 Oblasti vizuální prohlídky stroje [40]

		Přítomnost cizích materiálů	Nečistoty	Uvolnění nebo ztráta částí	Chod	Mechanické poškození	Deteriorace	Koroze	Opotřebení a stav povrchu	Uníky vody	Praskliny	Opotřebované části	Spáleniny	Ucpaná ventilace	Jiskření tyčí vinutí	Posun pásky	Zničení obložení	Prorážení vlivem zkratu	Těsnost jádra
<b>Stator</b>	Všechny části	X	X	X	X	X	X												
	Tyče vinutí									X	X	X	X		X	X			
	Uložení čel cívek										X	X		X					
	Uložení drážkové části vinutí											X		X	X				
	Spodní vývody									X	X	X	X				X		
	Vysokonapět'ové průchodky									X	X		X	X					
<b>Jádro statoru</b>	Všechny části	X	X	X	X	X	X	X										X	X
	Stažení a složení jádra										X		X	X					
	Ventilační kanály													X					
	Vrstvení a plechy												X					X	X
	Sestavovací tyče plechů jádra																		X
<b>Rotor</b>	Všechny části	X	X	X	X	X	X	X	X										
	Tělo a klínování										X		X	X	X				
	Obruče										X		X						
	Ventilátory										X								
	Hřídel										X	X							
	Vinutí													X	X				
	Sběrací ústrojí											X	X						

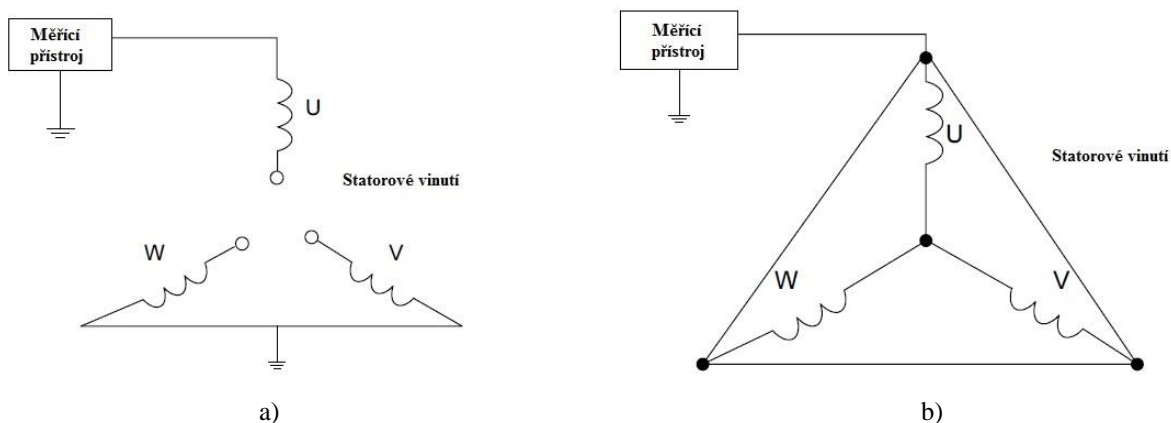
#### 4.4.1.2 Měření izolačního odporu a výpočet polarizačního indexu

Měření izolačního odporu generátoru patří k základním diagnostickým metodám. Provádí se před uvedením stroje do provozu, ale také hlavně před zkouškou přiloženým napětím, protože nám dává informaci o tom, zda není stroj navlhlý nebo hrubě poškozena izolace. Změřená hodnota izolačního odporu je hodnota informativní, závislá na teplotě a vlhkosti, nelze tedy na základě této hodnoty rozhodovat o bezvadném stavu izolace, který lze zjistit jen zkouškami přiloženým napětím. Izolační odpor dále závisí například: na velikosti stroje, druhu použité izolace, impregnaci a velikosti použitého měřicího napětí. Při nižším zkušebním napětí se obvykle změří vyšší izolační odpor. [44]

Izolační systém stroje si lze představit jako dielektrickou soustavu mezi dvěma elektrodami, kde jedna elektroda je tvořena vodičem vinutí určité fáze a druhá elektroda kostrou statoru se všemi uzemněnými částmi. Přiložením stejnosměrného zkušebního napětí vznikají ve stroji přechodové děje spojené s kapacitním, absorpčním a ustáleným proudem. Pro měření izolačního odporu před uvedením stroje do provozu je nutné stroj řádně vyčistit. Při měření není potřeba vyjmout rotor, ale pokud je to technicky možné, rozpojí se uzel vinutí. Teplota turbogenerátoru při měření by měla být v rozsahu 5 až 30 °C, pro hydrogenerátory měření probíhá při postupném chladnutí stroje z provozní teploty a měřené vinutí by mělo být v rozsahu 20 až 30 °C. Po ukončení měření izolačního odporu je z bezpečnostních důvodů nutné vždy zajistit odstranění kapacitního náboje z jednotlivých vinutí. [3]

Měření izolačního odporu se provádí pro rotorové a statorové vinutí zvlášť pomocí speciálních přístrojů s vlastním zdrojem stejnosměrného napětí. Měřená fáze je před přiložením měřicího napětí 1 až 5 kV vyzkratována po dobu alespoň 30 minut pro odvedení elektrického náboje. Měření se provádí na všech fázích samostatně, jen několikafázové vinutí, které nemá začátky a konce jednotlivých fází vyvedené na zvláštní svorky, jsou zkoušeny jako jeden celek. Měřené vinutí se připojuje na záporný pól zdroje napětí a na kladný pól je připojena kostra, která je uzemněna a spojena s ostatními vinutími. [3,8]





Obr. 4.3 Schéma zapojení pro měření izolačního odporu statorového vinutí a) s rozpojeným uzlem b) s nerozpojeným uzlem [3]

Izolační odpor po přiložení napětí s časem roste, proto se měřené hodnoty odečítají v časech 15, 60, 120 a 600 sekund. Z takto naměřených hodnot se vypočítá jednodominutový a desetiminutový polarizační index  $p_i$  dle vztahů [3]:

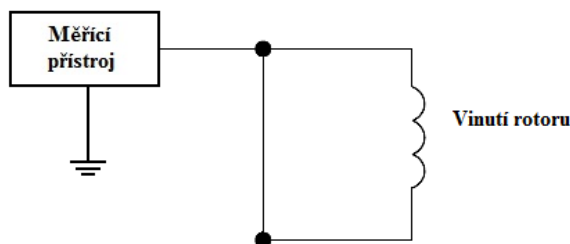
$$p_{i60} = \frac{R_{iz60}}{R_{iz15}} \tag{3.1}$$

$$p_{i600} = \frac{R_{iz600}}{R_{iz60}} \tag{3.2}$$

kde:

- $p_{i60}$  jednodominutový polarizační index,
- $p_{i600}$  desetiminutový polarizační index,
- $R_{iz15}$  hodnota izolačního odporu v  $M\Omega$  odečtená po čase 15 sekund od přiložení napětí,
- $R_{iz60}$  hodnota izolačního odporu v  $M\Omega$  odečtená po čase 60 sekund od přiložení napětí,
- $R_{iz600}$  hodnota izolačního odporu v  $M\Omega$  odečtená po čase 600 sekund od přiložení napětí.

Měření izolačního odporu rotorového vinutí se může provádět na rotoru vyjmutém ze stroje nebo umístěném ve stroji. Pokud je rotor umístěn ve stroji, je nutné odpojit všechny zemnicí ochrany, budicí obvod a vyjmut kartáče sběracích kroužků, aby se zabránilo samovolnému spuštění. Při zkoušce je měřen izolační odpor vinutí magnetového kola. Teplota vinutí při měření je doporučena v rozmezí 20 až 30 °C, u měření hydrogenerátorů je měřena při chladnutí stroje z provozní teploty. Měří se stejnosměrným napětím o hodnotě 0,5 až 1,5 kV a odečítá se izolační odpor v čase 15 a 60 sekund od přiložení měřicího napětí. [3]



Obr. 4.4 Schéma zapojení pro měření izolačního odporu rotorového vinutí. [3]

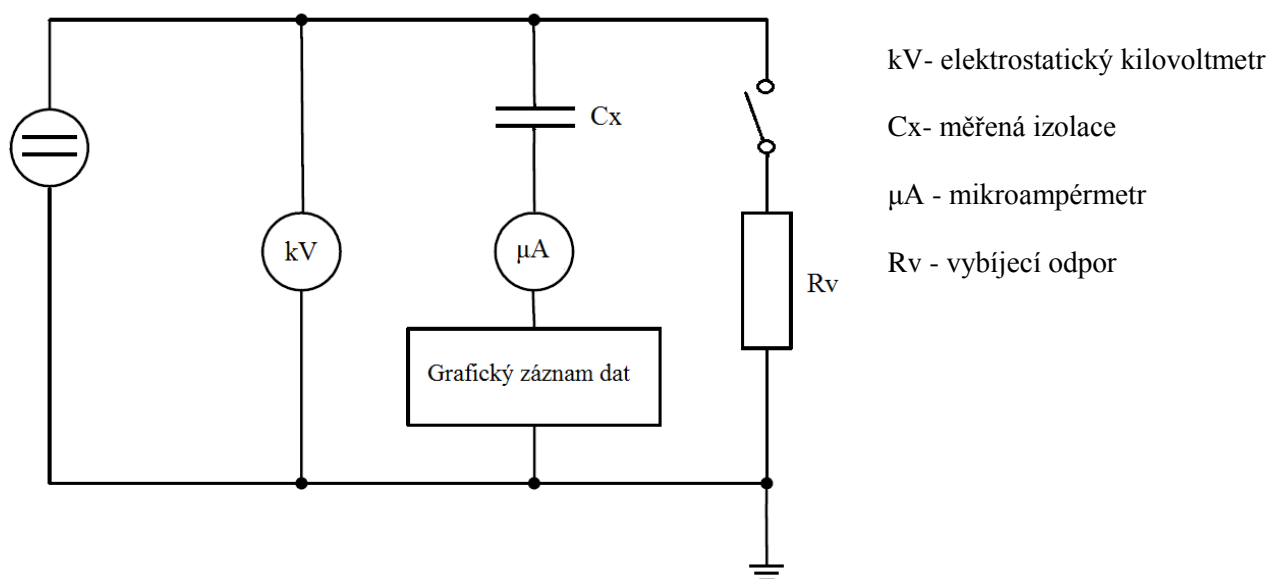
Výsledkem měření je závislost izolačního odporu na čase. Velikost izolačního odporu a polarizačního indexu je závislá zejména na absorbované vlhkosti, znečištění stroje, produktech vzniklých degradací izolačního systému a také na samotné konstrukci stroje. Při měření izolačního odporu satorové izolace generátoru dochází k ukončení absorpčních jevů za dobu řádově desítek minut. Výsledná hodnota polarizačního indexu  $p_i$  vyšší než 2 znamená, že tyto absorpční proudy trvaly dlouhou dobu, což značí nenavlhlou izolaci v dobrém stavu. Hodnoty blíží se jedné značí, že izolace je navlhla, znečištěná nebo degradovaná. Sledováním změny polarizačního indexu v závislosti na stáří stroje, lze sledovat stav izolace a její případné degradační procesy. [3,8]

Podniková norma [31] ČEZ a.s. stanovuje minimální hodnotu izolačního odporu satorového vinutí odečtené po 60 sekundách od přiložení napětí  $R_{iz60} \geq 2\text{M}\Omega/\text{kV}$ , ale doporučuje pro standardní technickou bezpečnost  $R_{iz60} \geq 200\text{M}\Omega$ . V případě nového stroje  $R_{iz600} \geq 800\text{M}\Omega$ . Polarizační jednominutový index se hodnotí dle typu, stavu izolace a konstrukce izolačního systému, jehož hodnoty se obvykle pohybují kolem  $p_{i60} = 1,5 < 4$  a musí platit  $p_{i600} > p_{i60}$ . Aby zkouška rotorového vinutí vyhovovala musí být  $R_{iz60} \geq 0,5\text{M}\Omega$  a  $p_{i60} \geq 1$ .

#### 4.4.1.3 Měření napěťové závislosti izolačního odporu na stejnosměrném napětí

Závislost izolačního odporu při konstantním napětí je rostoucí s časem, až do ustálené hodnoty odporu dané vodivostí dielektrika. Při měření napěťové závislosti izolačního odporu je tento izolační odpor do určité velikosti napětí téměř konstantní a od určité hodnoty napětí začne klesat. Pokud budeme napětí stále zvyšovat, izolační odpor se bude zmenšovat, až do hodnot blízkých nule, při kterých dojde k průrazu izolace. [3,8]

Měření před uvedením stroje do provozu se provádí na vyčištěném stroji, pokud je to možné, tak je před měřením rozpojen uzel vinutí. Stejnoseměrné napětí je přivedeno na vstup měřené fáze a ostatní dvě fáze jsou na svém vstupu uzemněny a druhé konce fází zůstanou nezapojeny. Poté se přiložené stejnosměrné napětí zvyšuje krokově a zároveň se sleduje čas s protékajícím proudem, tak dlouho dokud nedosáhne ustálené hodnoty vodivostního proudu. Ustálený izolační odpor se vypočítá pomocí Ohmova zákona. Tento postup se opakuje pro jednotlivé napěťové hladiny, dokud se prokazatelně neprojeví zmenšení izolačního odporu. Hodnota měřicího napětí nesmí překročit hodnotu zkušebního napětí sledované izolace. Po celou dobu měření je digitálním osciloskopem nebo jiným přístrojem graficky zaznamenáván protékající nabíjecí proud a výsledný izolační odpor se vypočte z Ohmova zákona, podílem přiloženého napětí k protékajícímu ustálenému proudu. Nevýhodou této metody je délka měření, protože k ustálení proudu může dojít až za relativně dlouhou dobu, tak se v praxi uvažuje maximální čas do ustálení proudu přibližně 10 minut od připojení napětí. [3,8]



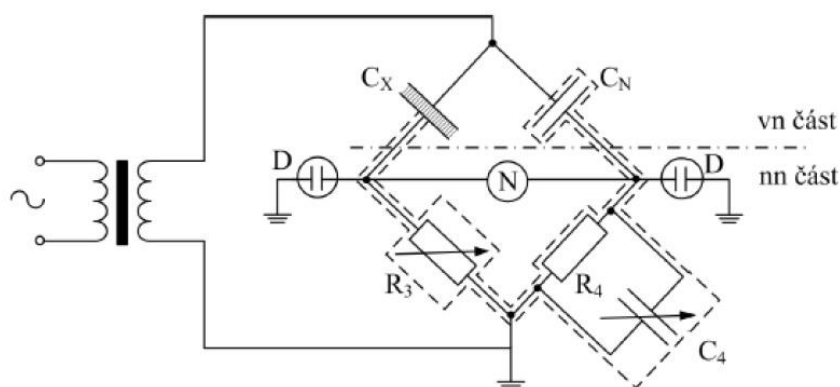
Obr. 4.5 Schéma zapojení pro měření napěťové závislosti izolačního odporu na stejnosměrném napětí [3]

Dle podnikové normy [31] ČEZ a.s. by měl izolační odpor  $R_{iz600}$  na všech napěťových hladinách stoupat, výjimkou jsou stroje přímo chlazené vodou, kde proud protékající izolačním systémem stoupat nesmí.

#### 4.4.1.4 Měření kapacity a ztrátového činitele, výpočet časové konstanty statorového vinutí

Izolaci vodičů si lze pro měření ztrátového činitele představit jako dielektrikum řady kondenzátorů, kde elektrody tvoří vinutí a železo magnetického obvodu. Princip diagnostických metod tedy spočívá v určení prvků náhradního schématu dielektrika, měřením závislosti  $\operatorname{tg} \delta$  a  $\epsilon_r$  na napětí, teplotě a frekvenci. [1,3,8]

Nejpoužívanějším principem pro měření ztrátového činitele je metoda Scheringova můstku. Dále se můžeme setkat ještě se čtyřkapacitním můstkem nebo můstkem pro automatické měření dielektrických ztrát. Scheringův můstek je složen ze dvou hlavních částí. Jedna jeho část je umístěna ve vysokonapěťovém prostoru zkušebny a druhá slouží k vyvažování mimo tento prostor. Galvanické oddělení tvoří měřená fáze a kapacitní normál, který je obvykle proveden jako vysokonapěťový kondenzátor o kapacitě přibližně 100 pF se zanedbatelnými ztrátami  $\operatorname{tg} \delta < 10^{-5}$ . Vyvažování můstku se provádí pomocí nízkonapěťové části tvořené odporovou dekádou  $R_3$  a kapacitní dekádou  $C_4$ . Vyvážení můstku indikuje nulový indikátor N. Před vyvážením můstku je potřeba eliminovat parazitní kapacity pomocí potenciálního regulátoru, který je součástí můstku. [1,3,8]



Obr. 4.6 Scheringův vysokonapěťový můstek [1]

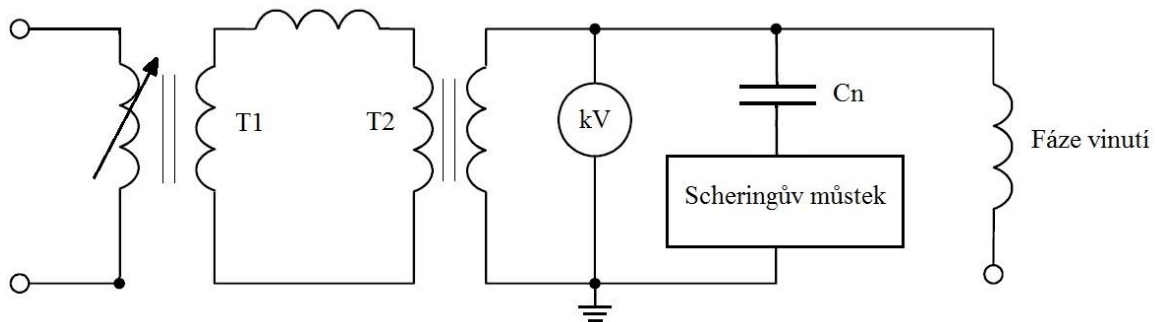
Pro vyvážený můstek platí:

$$C_x = C_n \cdot \frac{R_4}{R_3} \quad (3.3)$$

$$\operatorname{tg} \delta = \omega \cdot R_4 \cdot C_4 \quad (3.4)$$

$$\operatorname{tg} \delta = 0,1 \cdot C_4 \text{ pro } R_4 = 1000 / \pi \quad (3.5)$$

Měření se provádí pro každou fázi samostatně. Zkušební napětí je přivedeno na vstup měřené fáze, ostatní fáze jsou uzemněny. Při této zkoušce se měří napěťová závislost ztrátového činitele a kapacity v intervalu od  $(0,2 - 1) U_n$  a to postupně po jednotlivých krocích  $0,2 U_n$ , kde  $U_n$  je sdružená hodnota jmenovitého napětí. [3,8]



Obr. 4.7 Schéma zapojení pro měření ztrátového činitele  $\operatorname{tg} \delta$  a kapacity statorového vinutí [3]

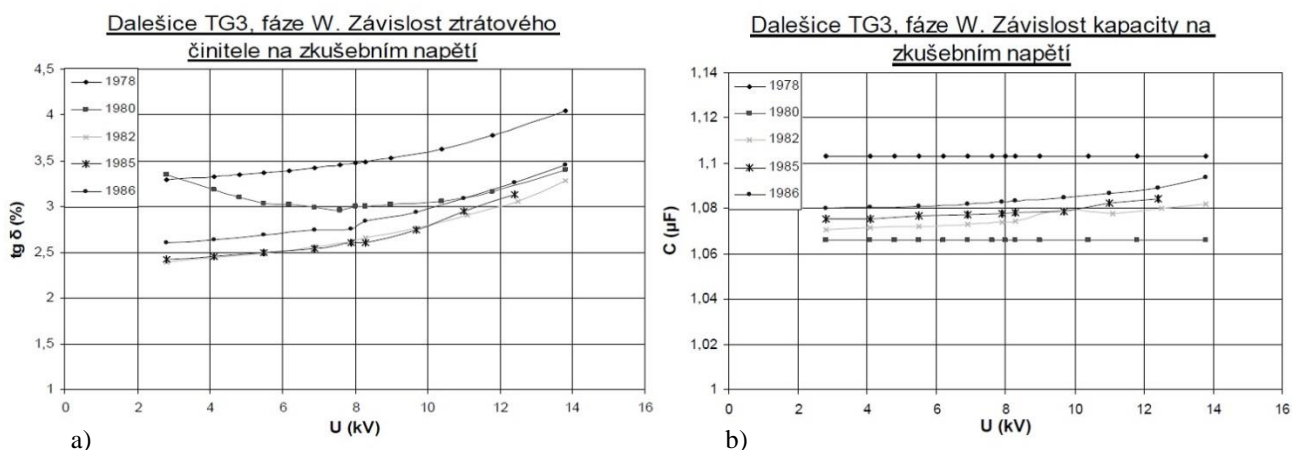
Důležitým diagnostickým ukazatelem je výpočet časové konstanty vinutí. Velikost časové konstanty nezávisí na geometrických rozměrech vinutí stroje, proto je vhodné jej používat pro porovnání vlastností izolačních systémů typově rozdílných strojů. Výpočet desetiminutové časové konstanty izolace  $\tau_{600}$  se provede dle vztahu [3]:

$$\tau_{600} = R_{iz600} \cdot C_{40,2U_{fn}} \quad (3.6)$$

kde  $R_{iz600}$  izolační odpor odečtený v čase 600s od připojení měřícího napětí [ $M\Omega$ ],  
 $C_{40,2U_{fn}}$  kapacita vinutí fáze střídavého generátoru v  $\mu F$  při  $0,2 \cdot U_{fn}$   
 $U_{fn}$  jmenovitá hodnota fázového napětí.

S rostoucím se napětím roste velikost dielektrických ztrát izolantu a tím i ztrátový činitel. Ztrátový činitel se měří pro izolaci celé jedné fáze vinutí. Z naměřených výsledků obvykle nelze zjistit přítomnost slabých míst, které by mohly ovlivnit životnost a provozní spolehlivost stroje. Tato slabá místa se nemusí při měření projevit a izolace může vykazovat rovnoměrné celkové zestárnutí, které nemusí ohrozit provozuschopnost generátoru. Metoda měření ztrátového činitele v kombinaci s dalšími diagnostickými metodami umožňuje rozpoznat lokální poškození a celkové zestárnutí izolačního systému. Pokud dojde například k proražení jedné tyče vinutí při napěťové zkoušce, je možné z periodických měření ztrátového činitele celého vinutí odhadnout, zda je izolace celkově degradovaná nebo zda došlo k lokálnímu poškození. Příkladem toho je měření ztrátového

činitele hydrogenerátoru 100 MW z článku [37], kdy z průběhu měření nebyly zjištěny žádné anomálie, jen v prvním měření byly hodnoty ztrátového činitele a kapacity větší, což je spojováno s dotvrzováním nové izolace ve stroji během provozu. Navzdory těmto výsledkům z obr. 4.8 neindikujícím blíží se poruchu, došlo ve fázi W u měření na odstaveném stroji k průrazu jedné cívky izolace, která byla následně vyměněna, provoz stroje mohl pokračovat. Měřené průběhy tedy informují o celkovém stavu izolace, ale neodhalí jeho slabá místa. [8]



Obr. 4.8 a) Závislost ztrátového činitele na napětí b) Závislost kapacity na napětí (převzato z [37])

V podnikové normě [31] ČEZ a.s. je psáno, že kapacita po celou dobu provozu stroje musí být  $\pm 15 \%$  kapacity stroje nového. Nový stroj by měl vyhovovat  $\text{tg } \delta_{U_n} \leq 0,035$  a doporučená hodnota pro stroj v provozu je  $\text{tg } \delta_{U_n} \leq 0,085$  a  $\text{tg } \delta_{0,2U_n} \leq 0,035$ .

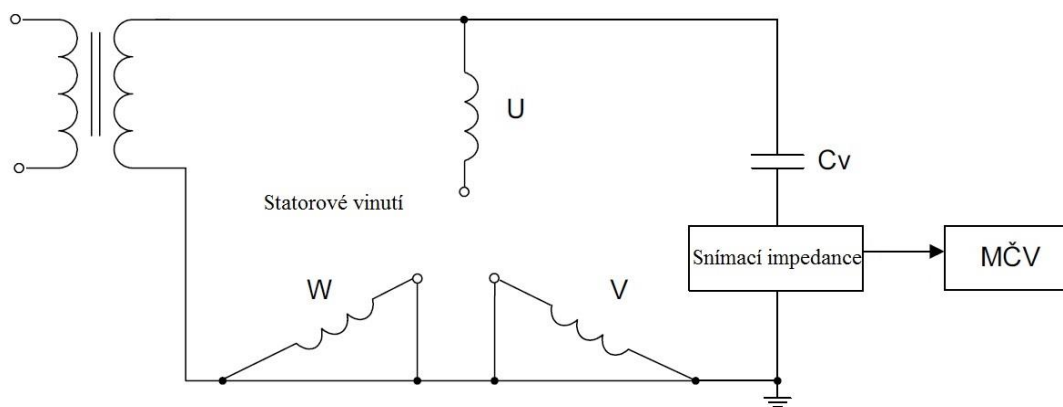
#### 4.4.1.5 Měření částečných výbojů statorového vinutí galvanickou metodou

Částečné výboje v izolačním systému točivých strojů mohou vznikat na více místech: přímo v izolaci, mezi izolací a vodičem, mezi izolací a dnem drážky statoru (drážkové výboje) nebo na povrchu izolace mimo drážku statoru. Jedná se hlavně o klouzavé výboje na povrchu izolace v místech výstupu tyčí z drážek statoru a povrchové výboje na čelech vinutí nebo korónu. Jednotlivé impulzy částečných výbojů tedy vznikají na určitém místě stroje a tento proudový impulz se šíří od místa jeho vzniku a projeví se také na výstupní přípojnici stroje, kde mohou být detekovány měřicí technikou. [3]

Pro měření výbojové činnosti se používá více metod, které se neustále vyvíjí a každá metoda má svoje výhody i nevýhody. Existují metody neelektrické, které detekují částečné výboje například akusticky, opticky nebo termoelektricky. Elektrické metody jsou

založeny na principu postupné vlny, rušivého elektrického pole, snímání impedancí, kapacitní a induktivní sondy. V dnešní době jsou také používány metody, které jsou schopny detekovat částečné výboje bez nutnosti odstávky stroje, tedy on-line metody.

Velmi používaná metoda pro sledování stavu vysokonapěťových izolačních systémů je metoda měření částečných výbojů pomocí galvanické metody. Metoda je založena na přímém snímání proudových impulzů. Impulzy částečných výbojů, které jsou superponovány na napájecím napětí, se oddělují pomocí snímací impedance. Velmi důležitý je také vazební kondenzátor  $C_v$  s co největší kapacitou, aby se dosáhlo co nejvyšší citlivosti měření. Samotné měření probíhá tak, že na prošetřované fázi se postupně zvyšuje napětí, až do hodnoty jmenovitého napětí  $U_n$ . Výbojová činnost nad limitní mezí, která je obvykle  $q = 1000$  pC pro nové vinutí, je zaznamenána pomocí hodnoty zapalovacího napětí částečných výbojů  $U_i$ . Až se dosáhne hodnoty jmenovitého napětí  $U_n$ , setrvává se na této napěťové hladině po dobu alespoň 30 minut, protože částečné výboje v okamžiku připojení zkušebního napětí vykazují zvýšené hodnoty amplitudy i četnosti než po stanoveném čase. Po uplynutí doby 30 minut se napětí po  $0,2U_n$  snižuje a měří se hodnoty zdánlivého náboje  $q$  nebo jiné další diagnostické parametry. Tyto diagnostické hodnoty se měří v obou půlperiodách napájecího zkušebního napětí a pro vyhodnocení se uvažuje vždy ta vyšší z nich. [3,11]



Obr. 4.9 Schéma zapojení pro měření částečných výbojů galvanickou metodou [3]

Diagnostika točivého stroje měřením částečných výbojů galvanickou metodou je především srovnávací test jednotlivých fází, který může určit, jaká fáze je nejvíce degradována a má nejvyšší úroveň výbojové činnosti. Měření je vhodné provádět při stejných měřicích postupech a teplotách, pak lze porovnávat jednotlivé naměřené hodnoty podobných strojů a tak hodnotit jejich stav, ale nejvíce vypovídající je sledování stavu vývoje výbojové činnosti konkrétního stroje v průběhu jeho doby provozu. [3,11]

Výhodou této metody je vysoká citlivost měření a velmi dobrá výpovědischopnost. Jako možnou nevýhodu pro použití této metody jsou vysoké pořizovací náklady a citlivost na rušení, nejen z vnějších důvodů, ale i rušení použitého měřicího vybavení.

#### **4.4.1.6 Měření částečných výbojů statorového vinutí akustickou sondou**

Metoda měření částečných výbojů pomocí akustické sondy se používá pro přímou lokalizaci míst ve vinutí, kde dochází k částečným výbojům. Je vhodná zejména po off-line diagnostiku stroje po demontáži rotoru nebo je vhodné ji také použít jako mezioperační zkoušku pro kontrolu izolace jednotlivých tyčí cívek před vložením do drážek stroje.

Tato metoda je založena na principu detekce akustických signálů, které provází částečné výboje. Zvukové vlny vyvolané částečnými výboji lze pak zachytit pomocí mikrofону nebo dalších akustických detektorů a přes vhodné zesilovače a zobrazovací jednotky sledovat jejich průběh. Pro měření celého statorového vinutí je zkušební napětí připojeno na vinutí a plynule se zvyšuje do jmenovitého napětí. Směrový mikrofon akustické sondy je ručně nasměrován na předpokládané místo výbojové činnosti, výskyt výboje indikuje výchylka indikátoru měřicího přístroje nebo akustický signál. Velikost a četnost lokalizovaných výbojů je nutno provést například pomocí galvanické metody. Na trhu jsou k dostání i akustické systémy a kamery, které dokáží detekovat, lokalizovat i kvantifikovat úroveň akustického tlaku vyvolaného částečnými výboji. [3,11]

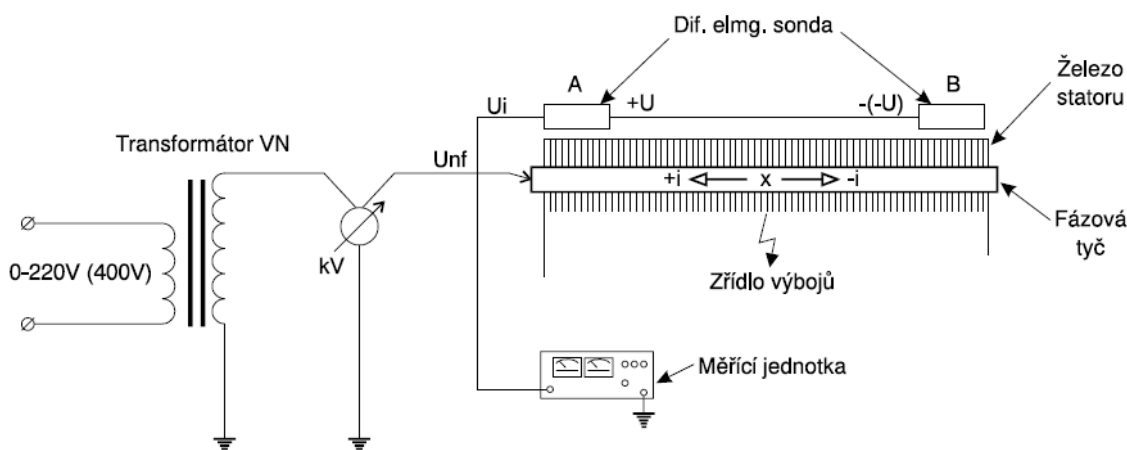
#### **4.4.1.7 Měření částečných výbojů statorového vinutí diferenciální elektromagnetickou sondou**

Diferenciální elektromagnetická sonda se používá k lokalizaci míst v jednotlivých drážkách vinutí, kde dochází k částečným výbojům. Elektromagnetickou sondou vyhledáváme místa výbojových činností a podle kvantitativního hodnocení posuzujeme, zda stroj může nadále pracovat nebo bude nutné tyč vinutí opravit nebo vyměnit. Je vhodné ji použít, pokud galvanickou nebo jinou globální metodou měření částečných výbojů byla zjištěna nepřijatelná úroveň výbojové činnosti. Diferenciální sonda je tvořena dvěma sériově spojenými snímači umístěnými na opačných koncích testované tyče vinutí statoru. V případě výskytu částečného výboje sonda vyhodnotí nabíjecí impulz, který vlivem výbojové činnosti prochází drážkou v opačném směru oproti signálu ze zdravé tyče vinutí, následně identifikuje maximální zdánlivý náboj  $q$  částečných výbojů. Kromě



detekce částečných výbojů v drážkách, lze použít i pro zjišťování výbojové činnosti na výstupu vinutí z drážek. [3]

Měření je prováděno v těch drážkách stroje, ve kterých je uloženo vinutí prošetřované fáze. Pokud sondu nelze vsunout do vzduchové mezery mezi rotorem a statorem, je nutno rotor ze stroje vyjmout. Zkušební napětí je během testu zvyšována od nuly po  $0,2U_{fn}$  do  $U_{fn}$  (fázová hodnota jmenovitého napětí). Sondy se přikládají na okraje statorového paketu zkoušené drážky v diferenciálním zapojení. Pokud se na zkoušené drážce objeví částečný výboj, je zaznamenána amplituda napěťové odezvy  $U_v$  a zapalovací napětí  $U_i$  tohoto výboje. Měření je vhodné provádět po 30 minutách od přiložení zkušebního napětí, protože částečné výboje v okamžiku připojení zkušebního napětí vykazují vyšší hodnoty amplitudy i četnosti než po stanoveném čase.



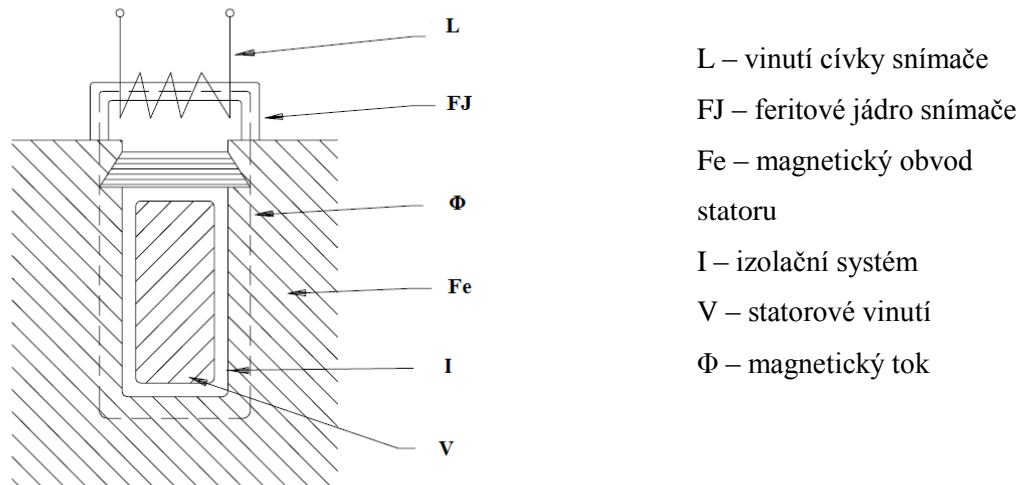
Obr. 4.10 Schéma pro měření metodou diferenciální elektromagnetické sondy (převzato z [11])

Naměřené hodnoty jednotlivých drážek vinutí se porovnávají mezi sebou, aby byla zajištěna kvalita celého vinutí, případně je nutné opravit nebo vyměnit tyče vinutí v těch drážkách, ve kterých byla zjištěna úroveň částečných výbojů převyšující průměrnou hodnotu úrovně výbojové činnosti prošetřované fáze nebo celého vinutí stroje. Velikosti zdánlivého náboje  $q$  vyšší než 1000 pC jsou hodnoty mírně zvýšené, ale ještě přípustné, hodnoty od 10000 pC již signalizují rozvíjející se závadu v izolaci tyče a hodnoty vyšší než 30000 pC jsou již fatální. [31]

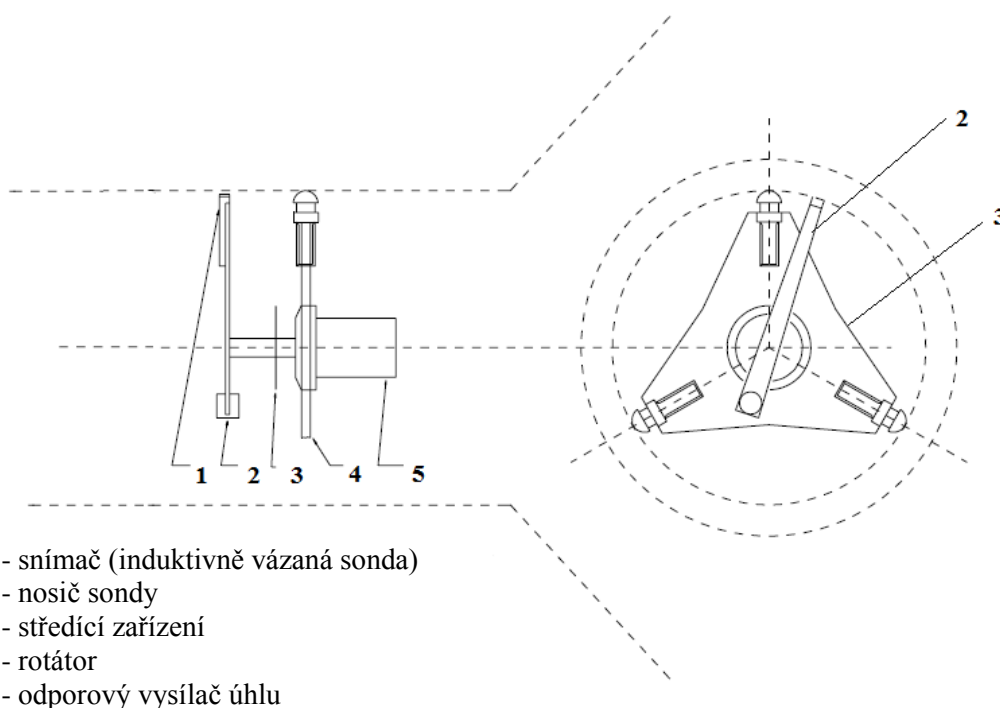
#### 4.4.1.8 Měření částečných výbojů statorového vinutí induktivně vázanou sondou

Tato metoda je určena pro detekci a přesnou lokalizaci místa vzniku částečných výbojů v drážce stroje. Měření pomocí induktivní sondy se provádí u strojů s vyjmutým

rotorem. Induktivní snímač se přiloží na drážku vinutí a s magnetickým obvodem statoru a tyčí stroje vytváří proudový transformátor, na sekundáru tohoto transformátoru se indukují pulzy, které jsou vyvolány dobíjecími proudy částečných výbojů na tyči vinutí. [3]



Obr. 4.11 Přiložení induktivně vázané sondy k drážce vinutí [11]



Obr. 4.12 Uložení induktivně vázané sondy ve statoru (převzato z [3])

Měření se provádí u strojů s vyjmutým rotorem. Zařízení pro přesné vedení sondy se umístí do středu statoru stroje a na stroj se přivede zkušební napětí, které se po jednom kV zvyšuje, až do hodnoty jmenovitého napětí. Postup se opakuje pro každou fázi zvlášť. Samotné měření se provádí pro každou drážku stroje při frekvencích 0,1 a 5Mhz.

Výstupem této metody je grafický průběh kvazivrcholové hodnoty zdánlivého náboje v každé drážce stroje. [3,11]

#### 4.4.1.9 Zkouška statorového vinutí střídavým napětím 50 Hz

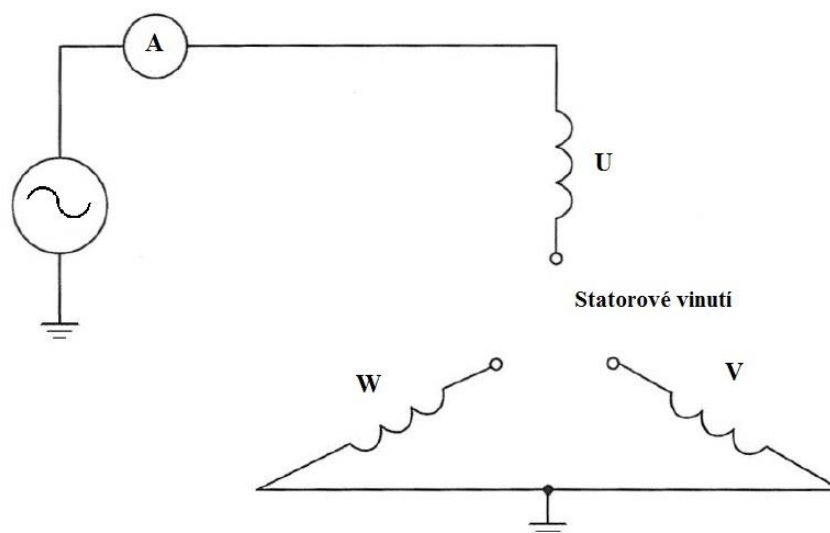
Pod soubor zkoušek zvýšeným napětím patří hlavně zkouška střídavým napětím 50 Hz statorového vinutí. Jednou ze základních vlastností určující životnost a provozuschopnost stroje je průrazné napětí neboli elektrická pevnost izolačního systému. Statorová izolace generátorů je konstruována tak, aby byla několikanásobně předimenzována vzhledem k jmenovitému napětí stroje, ale v průběhu provozu dochází k degradaci, která hodnotu elektrické pevnosti zmenšuje a pokud klesne pod kritickou mez, dojde k průrazu izolace a tím i havárii stroje. Úbytek elektrické pevnosti je individuální u každého stroje a k průrazu může dojít téměř kdykoliv během života stroje. Proto se provádějí při plánovaných měřeních a odstávkách zkoušky zvýšeným napětím, které dokáží odhalit nejslabší místo izolačního systému. [3,8]

Hodnotu průrazného napětí lze zjistit jen destruktivním způsobem tak, že se na izolaci přivede napětí, jehož velikost se postupně zvyšuje, dokud nedojde k průrazu izolace. Velikost napětí v okamžiku průrazu značí průrazné napětí izolace. Tato metoda nelze použít při diagnostických šetřeních generátorů, ale má široké využití například při mezioperačních a laboratorních zkouškách při zkoušení vzorků. [3,8]

Měření zvýšeným napětím probíhá tak, že se přiloží napětí, které odpovídá maximálně 50 % plného zkušebního napětí, které se postupně v jednotlivých krocích zvyšuje. Doporučuje se, aby hodnota jednotlivých kroků by nebyla vyšší než 5 % a zvyšování zkušebního napětí na plnou hodnotu by mělo trvat nejméně 10 sekund. Po dosažení plné hodnoty zkušebního napětí se počítá zkušební doba, obvykle 60 sekund, po této době se napětí sníží na 1/3 a odpojí. Zkoušené vinutí je poté potřeba spojit s kostrou, aby byl vybit náboj vzniklý při zkoušce. Izolace je vyhovující, pokud při zkoušce nedošlo k průrazu, přeskočení nebo hrubému porušení izolace, které lze zjistit pomocí měření izolačního odporu před a po zkoušce zvýšeným napětím. Tímto se dokáže, že průrazné napětí izolace bylo v době zkoušky vyšší než přiložené zkušební napětí. [8]

Napěťové zkoušky se periodicky opakují každé 2 až 3 roky. Protože průrazné napětí stroje s dobou provozu klesá, snižuje se také hodnota zkušebního napětí. Tato hodnota se udává různými empirickými vzorci a je dána normami a předpisy. Při první zkoušce plným

napětím jsou na novém stroji odhaleny technologické závady, dále se s dobou provozu stroje velikost zkušebních napětí snižuje, protože pravděpodobnost průrazu je zde nižší než u nového stroje a také proto, aby se omezilo nepříznivé působení těchto opakovaných zkoušek na životnost izolace. [8]

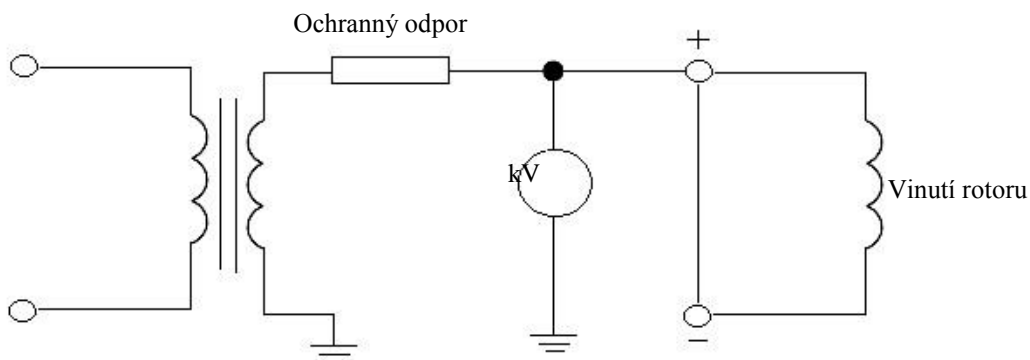


Obr. 4.13 Schéma zapojení pro zkoušku statorového vinutí střídavým napětím 50 Hz [3]

Při zkoušce střídavým napětím se zkušební napětí připojuje mezi konec zkoušeného vinutí a kostru stroje vodivě spojenou se zemí a ostatními vinutími. Veškeré konstrukční části a připojené měřicí zařízení připojené na zkušební potenciál se také spojí s kostrou stroje. Zkouší se každé vinutí samostatně. Zkušební napětí na vinutí je rozloženo v poměru kapacit a odpovídá tak reálnému provoznímu namáhání. [3]

#### 4.4.1.10 Zkouška rotorového vinutí střídavým napětím 50 Hz

Měření se provádí na vyčištěném rotoru vyjmutém ze stroje. Měření stroje s vyniklými póly se provádí v klidu stroje. U strojů s hladkým rotorem je měření také prováděno v chodu naprázdno při jmenovitých otáčkách rotoru. Při měření musí být odpojen budicí obvod vyjmutím kartáčů ze sběracího ústrojí a vyložení vhodnou izolací mezi kruhy proti přeskoku. Dále se provede uzemnění budicího obvodu a také vinutí statoru. Stroj je zkoušen ve studeném stavu a před samotným měřením je potřeba zjistit, zda izolační odpor vyhovuje předepsaným minimálním hodnotám. [3]

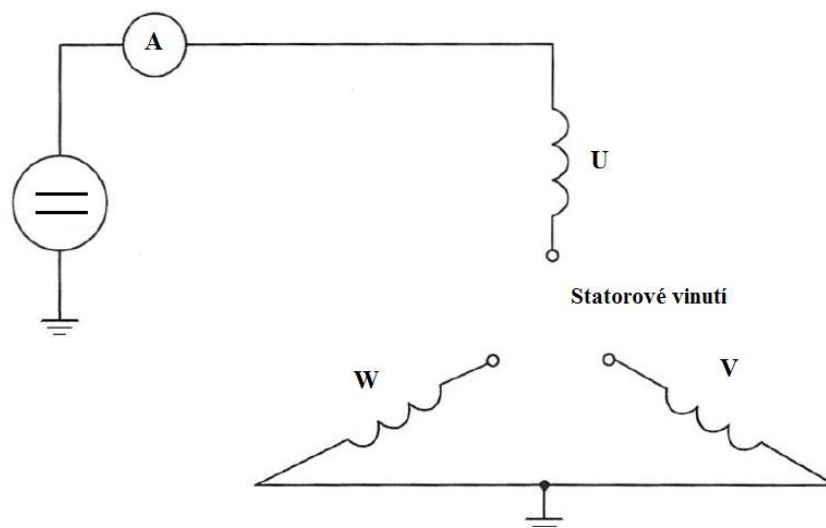


Obr. 4.14 Schéma zapojení pro zkoušku rotorového vinutí střídavým napětím 50 Hz [3]

Zkušební napětí se přivede mezi spojené vývody rotorového vinutí a magnetové kolo rotoru. Po dosažení 1/3 zkušebního napětí se napětí zvyšuje rychlostí 1 kV za 10 sekund. Výsledek měření je stejný jako při měření statorového vinutí napětím 50 Hz, je tedy vyhovující pokud nedošlo k průrazu, přeskoku nebo hrubému porušení izolace. [3]

#### 4.4.1.11 Zkouška stejnosměrným napětím

Tato metoda byla vyvinuta z obavy z degradace izolačního systému zkouškou střídavým napětím průmyslového kmitočtu a také nutnosti použití napájecího zdroje velkého výkonu při této zkoušce. Zkušební zdroje stejnosměrného napětí jsou jednodušší konstrukce a menších výkonů, řádově stovky VA. Navzdory tomu není tato zkouška tolik věrohodná jako zkouška střídavým napětím, protože napětí při této zkoušce je rozděleno v poměru odporů vinutí a neodpovídá tak provoznímu namáhání izolačního systému. Nevýhodou je také to, že se liší rozložení napětí v drážkách a na koncích cívek, zvláště pokud jsou opatřeny polovodivým lakem. Tento nátěr způsobuje při střídavém napětí jeho rovnoměrné rozložení, při napájení stejnosměrným napětím způsobuje zvýšené a nerovnoměrné namáhání těchto částí izolace. I přes uvedené nevýhody jsou zkoušky stejnosměrným napětím značně rozšířené, v některých literaturách se uvádí, že lze tímto způsobem lépe a s větší pravděpodobností zjistit vady izolace (například trhlinky, dírky a jiná poškození izolace) než se zkouškou střídavým napětím. [3,8,44]



Obr. 4.15 Schéma zapojení pro zkoušku statorového vinutí stejnosměrným napětím [3]

Měřeným parametrem u zkoušky stejnosměrným napětím je proud protékající izolačním systémem, který vyhovuje, pokud při zkoušce tento proud nevzrůstá nebo nedojde k průrazu či přeskoku. [31]

#### 4.4.1.12 Zkouška statorového vinutí napětím velmi nízkého kmitočtu

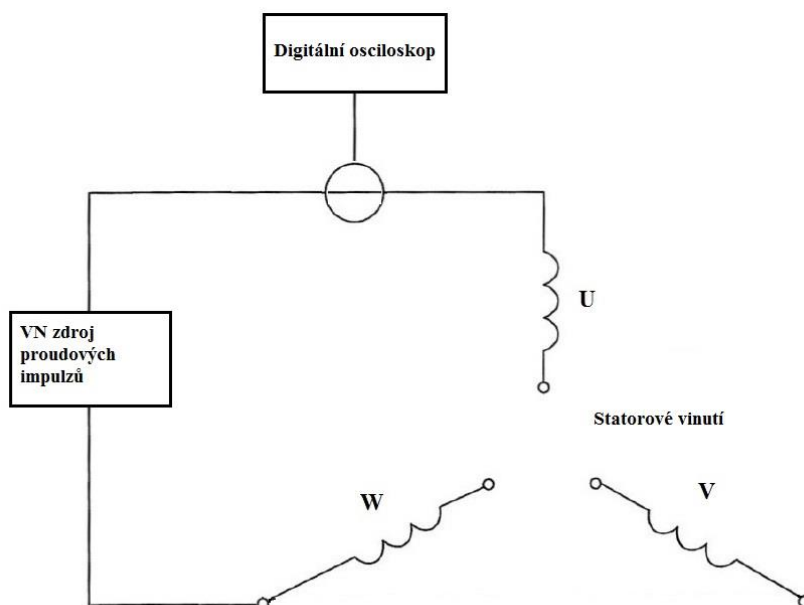
Tato metoda byla vyvinuta díky nevýhodě zkoušky střídavým napětím průmyslového kmitočtu. Hlavní výhodou této zkoušky s kmitočtem 0,1 Hz je, že ani při opakovaném měření nezpůsobuje degradaci dielektrika, pokud je hodnota průrazného napětí dielektrika větší než zkušební napětí. Rozložení zkušebního napětí do jednotlivých vrstev izolace je obvykle shodné s provozním namáháním, jen díky polovodivým nátěrům je rozložení napětí u výstupu tyčí z drážek odlišné. [3,8]

Schéma zapojení pro měření statorového vinutí napětím velmi nízkého kmitočtu je stejné jako pro měření střídavým napětím 50 Hz. Zkušební napětí se zvyšuje konstantní rychlostí až do maximální hodnoty zkušebního napětí, po dosažení této hodnoty setrvá na této hladině napětí po dobu 10 minut. Poté se pozvolna snižuje na nulu. Špičková hodnota zkušebního napětí o kmitočtu 0,1 Hz je 1,63 násobkem efektivní hodnoty zkušebního napětí o kmitočtu 50 Hz. [3]

#### 4.4.1.13 Zkouška závitové izolace statorového vinutí proudovými impulzy

Zkouška proudovými impulzy a srovnávací zkouška proudovými impulzy jsou nejdůležitějšími metodami pro určování kvality mezizávitové izolace vinutí a cívek, protože dokáže detekovat již začínající stádia poruchy izolace mezi jednotlivými závitovými vinutí. Princip srovnávací zkoušky proudovými impulzy je založen na reakci zkoušeného vinutí na proudový impulz, jehož průběhy jsou porovnány a vyhodnoceny. Přiložený napěťový impulz s vysokou strmostí vyvolá nerovnoměrné rozložení napětí ve vinutí stroje, které se projeví mezizávitovou napěťovou diferencí. Zvyšováním napětí injektovaných pulzů se zvyšuje i napětí mezizávitové. Pokud během testu dojde k průrazu mezizávitové izolace vinutí, změní se velikost impedance a také indukčnost vinutí stroje, tím se zvýší frekvence oscilací injektovaného pulzu sledovaného osciloskopem oproti impulzu bez tohoto mezizávitového zkratu. [3]

Pro měření se připojí zdroj proudových impulzů mezi dvě fáze zkoušeného vinutí stroje a pomocí proudové sondy se sledují oscilace proudu v obvodu. Poté co se uloží referenční měření do paměti osciloskopu, se provede měření zbývajících fází a naměřené křivky se porovnají s retenčním měřením. [3]



Obr. 4.13 Schéma zapojení pro zkoušku závitové izolace statorového vinutí proudovými impulzy [3]

Závitová izolace statorového vinutí vyhovuje, pokud se všechny tři křivky shodují. Pokud některá křivka vykazuje odchylky ve velikosti nebo časovém posuvu, nachází se v měřené fázi porucha závitové izolace. [31]

#### 4.4.1.14 Zkouška závitové izolace rotorového vinutí s vyniklými póly

Během provozu stroje s vyniklými póly může dojít k uvolnění jednovrstvých cívek vinutí pólů rotoru a následně vyprašování nebo vylézání jejich mezizávitové izolace. Pokud dojde k porušení mezizávitové izolace dochází k mezizávitovým zkratům. Závitů nakrátko se projevují zvýšeným chvěním vlivem nesouměrného magnetického toku, nestejným oteplením rotoru a také snížením charakteristiky naprázdno a zvětšením budicího proudu. [3,45]

Přiložením napětí dochází ve vinutí rozložení potenciálů na jednotlivé cívky rotoru a díky tomu je možné lokalizovat zkratové závitů elektromagnetickou sondou a sledovat průběh pomocí osciloskopu. Zkouška se provádí na vyjmutém rotoru usazeném na podstavci nebo hřídelových podpěrkách, pokud je stroj smontován, je nutno jej zajistit a odpojit budicí obvod. Zdroj zkušebního napětí, napájecí transformátor s frekvencí 50 Hz, napájí celé nebo část rotorového vinutí magnetového kola tak, aby napětí na jeden závit bylo v rozmezí 1 až 2 V. Zkouška se provádí na jednotlivých pólech nebo dvojici pólů. Vyhledávání vadných závitů pomocí porovnávání, termovize nebo použitím tónového generátoru. Při napájení jednotlivých pólů protéká pólem se zkratovaným závitěm vyšší proud než ostatními, protože závit nakrátko působí snížením impedance. Přesné místo na pólu lze lokalizovat například pomocí termovize, protože po deseti minutách měření od přiložení napětí mají závitů nakrátko podstatně vyšší teplotu než jejich okolí. Další metodou lokalizace je použití tónového generátoru, který pracuje na principu měření magnetického pole podél zkoušené pólové cívky a porovnává magnetický tok zdravého závitů oproti magnetickému toku závitů nakrátko. [3]

#### 4.4.2 Diagnostika on-line

Diagnostické metody pro on-line měření veličin lze dále rozdělit do dvou hlavních skupin: na provozní a monitorovací metody. Při monitoringu probíhá měření a vyhodnocování veličin v reálném čase, všechna čidla a snímače jsou často trvale připojeny ke stroji.

##### 4.4.2.1 Detekce ozónu v chladícím vzduchu

Přítomnost ozónu v chladícím vzduchu značí přítomnost částečných výbojů vzniklých na satorovém vinutí nebo tyčích vlivem uvolněním čel vinutí, degradací polovodivé vrstvy



nebo dalších jiných teplotních namáhání izolace. Pravidelným měřením koncentrace ozónu v chladicím vzduchu je možné detekovat výbojovou činnost již v počátečních stádiích a zabránit tak větší degradaci izolace. Koncentrace ozónu je udávána v ppm a určuje se jako poměr objemového množství ozónu k objemu odebraného vzorku vzduchu. Z hlediska diagnostiky je vhodnější sledovat trend vývoje koncentrace ozónu než absolutní hodnoty. [3,15]

Způsobů měření koncentrace ozónu ve vzduchu je více, ale mezi nejpoužívanější patří: kolorimetrické, fotometrické a elektrochemické metody. Kolorimetrická metoda je založena na absorpci a reakci ozónu v chloroformovém indikačním roztoku, při které dochází k odbarvování modrého roztoku indiga. Princip fotometrické metody spočívá ve schopnosti ozónu absorbovat UV záření, kde se měřený vzorek porovnává s referenčním vzorkem plynu bez ozonu. [3]

Výhodou metod detekce ozonu je jejich jednoduchost, nízké náklady a možnost měření za provozu stroje bez nutnosti odstávky.

Obdobou pro detekci ozonu v chladicím vzduchu je detekce příměsí v chladicím médiu strojů u větších strojů s vodíkovým chlazením. Protože v chladicím vodíku se mohou nacházet příměsí vzniklé tepelným namáháním izolačního systému stroje. Pro odběr vzorků se používají ventily pro to určené a umístěné na spodní straně stroje.

#### 4.4.2.2 Měření hluku

U točivých elektrických strojů se můžeme setkat se třemi zdroji hluku: hluk elektromagnetického původu, mechanického a ventilačního původu. Hlavním zdrojem hluku točivých strojů jsou vibrace způsobené mechanickou nerovnováhou rotorového systému. Tyto vibrace se přenáší do všech částí stroje. Dalším zdrojem hluku mohou být vibrace magnetického obvodu po nabuzení stroje, ložisek, kartáčů, špatné vyvážení rotujících částí, špatné uložení stroje a také tření vzduchu, které může být způsobeno jeho cirkulací v chladicím systému. Magnetický hluk je způsoben magnetickými silami, v drážkové části harmonickými magnetického pole, nerovnoměrností vzduchové mezery atd. [44,54]

Úkolem diagnostiky hluku je detekovat změny mechanického stavu jádra a jeho částí, ale je možné tu metodu použít i pro stanovení změny mechanického stavu valivých ložisek,

protože tyto změny se projevují změnou velikosti hladiny akustického tlaku hluku, který je vyzařován strojem. Diagnostikou hluku se nesledují maximální a absolutní hodnoty, ale trendy a změny měřených veličin v závislosti na intenzitě hluku a čase provozu stroje. [3]

#### 4.4.2.3 Sledování vibrací rotoru

Vibrace vznikají otáčením rotoru stroje, jeho nesymetrií a nevyvážeností. Tyto vzniklé vibrace se přenášejí do částí stroje přes ložiska a projevují se jako periodický pohyb v řádech jednotek až tisíců mikrometrů. Zvyšují hladinu hluku a mají negativní dopad na životnost stroje. Největší vliv na velikost chvění turbogenerátorů mají vlastní frekvence všech částí stroje. Turbogenerátor lze rozložit na mechanickou soustavu: těleso (rotor) kmitající na pružině (olejový film, ložiska a štíty stroje). Průběh vzniklých kmitů je periodický a neharmonický. [54]

Rotující části jsou měřeny relativním bezdotykovým snímačem. Měří se výchylka a výsledná hodnota vibrací je vztahena k části stroje, na kterou je snímač upevněn. Nejvíce používané snímače pracují na principu vířivých proudů. Tato metoda není vhodná pro měření vibrací čepu rotoru, kvůli kostře stroje. Vibrace statických částí jsou měřeny absolutními seismickými snímači, které vztahují výslednou hodnotu vibrací k zemské hmotě. Jsou používány například pro měření vibrací ložisek nebo vibrací čel vinutí. Nejčastěji používané seismické snímače jsou dvojího provedení: elektrodynamické a piezoelektrické. Elektrodynamický snímač měří pomocí elektromagnetické indukce. Hlavním komponentem tohoto snímače je statická cívka, uchycená pomocí membrán, do níž se pomocí permanentních magnetů kopíruje pohyb vibrujícího tělesa a tím se do cívky indukuje napětí, které je úměrné rychlosti chvění. Pro funkci piezoelektrického snímače je potřeba vyhodnotit signál, který vzniká na piezoelektrických krystalech, pomocí nábojového zesilovače. Vlivem namáhání, ohybu, tlaku nebo smyku vzniká na piezoelektrických krystalech náboj, velikost tohoto náboje je převáděna nábojovým zesilovačem na napětí měřitelného pomocí osciloskopu. [54]

#### 4.4.2.4 Vibrace čel statorového vinutí

Vibrace čel vinutí patří mezi častější příčiny poruchy, proto jsou často snímány senzory (akcelometry), jejichž výstupem je elektrický signál úměrný velikosti detekované výchylky vibrace. Pro tyto aplikace jsou používány senzory s optickými vlákny, které neobsahují žádné kovové části, aby neovlivnily rozložení elektrického potenciálu v čelech

vinutí. Obvykle se zapojují do měřených lokalit dva snímače, protože dokáží měřit vibrace jen v jednom směru, ale za to dokáží přesně celkem přesně stanovit velikost a směr vibrace. [3,15]

Tato metoda monitoringu čel vibrací patří mezi nejdražší, proto se používá spíše v případech, kdy na základě ostatních diagnostických šetření je podezření, že právě vibrace čel vinutí způsobují poruchy stroje. [3,15]

Maximální povolená vibrace čel vinutí není přesněji stanovena a závisí na velikosti a konstrukci statoru. Ale lze konstatovat, že pokud senzory zaznamenají posun větší než 0,25 mm, značí to přítomnost vibrací a pokud je výchylka již 0,4 mm, je nutno těmto vibracím věnovat zvýšenou pozornost. [15]

#### 4.4.2.5 Online monitoring částečných výbojů

Částečné výboje mohou být příznakem i příčinou vzniku poruch stroje, je známo několik poruchových stavů, při kterých mohou nastat a zároveň mohou přímo souviset s vytvářením částečných výbojů [40]: vibrace statorových tyčí a připojovacích obručí, kontaminace čel vinutí, poškození opěr čel vinutí, poškozené izolace a vodiče a jiskření sběracích kartáčů.

Monitoring částečných výbojů přímo detekuje vznik výbojové činnosti ve statorovém vinutí za normálního provozu stroje. Velkým problémem on-line měření je zamezení nebo filtrování celé řady rušivých signálů, které provoz stroje vždy provází. Při měření částečných výbojů off-line metodami jsou tato rušení minimální nebo jsou známa, tak není nutno použít speciální metody měření oddělující signál od šumu. [3]

Pro on-line měření částečných výbojů statorového vinutí se používá více metod, které detekují vznik částečných výbojů nejrůznějšími způsoby. Citlivost měření závisí na strategii redukce rušivých signálů a velikosti kapacity připojených kondenzátorů. Ze studie [38] CIGRE bylo zjištěno, že pro detekci částečných výbojů jsou stroje trvale osazeny následujícími zařízeními a senzory:

- Vazební kondenzátory a vysokofrekvenční proudové transformátory připojené k zemnímu přívodu stroje
- Vazební kondenzátory připojené na fáze izolovaných sběrníkových tyčí – jeden nebo dva kondenzátory na fázi
- Vazební kondenzátory připojené přímo na vysokonapěťové vývody generátoru

- Vazební průchozí transformátor nebo přídavný kondenzátor připojený na zemnicí přívod generátoru
- Širokopásmová anténa (drážková sonda) umístěná do vybrané drážky statorového vinutí
- Použití izolovaných vodních rozvodů přímého chlazení vodou statorového vinutí jako antény pro částečné výboje uvnitř generátoru.

Pro měření na generátorech velkých výkonů je vhodnější vzhledem k vyšší hladině výstupního svorkového napětí a tím i vyšší úrovni rušení umisťovat senzory a detektory částečných výbojů co nejbližší statorovému vinutí.

#### 4.4.2.6 Sledování vzduchové mezery

Monitorování vzduchové mezery se používá hlavně u strojů s více póly a větších průměrů jako jsou hydrogenerátory. Měří se nejčastěji různé mechanické problémy, vzniklé uvolněním částí nebo pohybu základny stroje, jako posunutí rámu statoru nebo jádra a jeho částí, distorzí oběhového kola rotoru, opotřebením ložisek vlivem špatného vyvážení a také závitové zkratky ve vinutí rotoru. Protože vznik těchto mezizávitových zkratů způsobí nevyvážený magnetický tah na rotor a pól, kde se nachází tento zkrat, má mít menší magnetické pole než ostatní póly. Tato nesymetrie způsobuje kolísání rotoru, vibrace v ložiskách a také změnu ve vzduchové mezeře. [3,15]

Pro měření touto metodou se stroje osazují 4 až 16 kapacitními snímači, záleží na velikosti a průměru stroje, na které je přivedeno vysokofrekvenční napětí a mezi senzorem a uzemněným pólem v podstatě vznikne kondenzátor, jehož kapacita závisí na vzdálenosti mezi rotorem a statorem. Na základě měření odezvy senzoru se určuje velikost vzduchové mezery. [3,15]

## Závěr

Diplomová práce je zaměřena na životnost a spolehlivost velkých točivých strojů. Popisuje jednotlivá stádia doby života strojů od jejich konstrukce, postup výroby izolačního systému, přes uvádění stroje do provozu, údržbu, profylaktická a diagnostická šetření, až po jejich degradaci a analýzu příčin poruch.

Cílem této diplomové práce bylo popsat a porovnat mezi sebou izolační systémy velkých točivých elektrických strojů resin-rich a VPI, provést rozbor poruch těchto strojů a navrhnout diagnostický systém pro sledování poruch a stupně degradace izolačních systémů.

Přestože jsou velké točivé stroje navrhovány na dlouhou životnost a vysokou spolehlivost, jako každý jiný materiál podléhají stárnutí, opotřebením a jsou vystaveny v provozu různým druhům namáhání a vnějším vlivům, jež mohou způsobit jejich degradaci. Mimo to může být závada stroje způsobena i důsledkem konstrukčních či výrobních vad. Ze statistik [15] a [40] společností zabývajících se údržbou a opravami turbogenerátorů vyplývá, že přibližně po cca 20 letech provozu vzduchem chlazených strojů a přibližně po 40 letech u strojů chlazených vodíkem je nutno statorové vinutí stroje kompletně převinout. Výskyt poruch točivých strojů je v dnešní době stále častější, to může být dáno tím, že značná část generátorů v provozu je tvořena stroji staršími než 30 let nebo naopak stroji novými, které ještě nebyly řádně zaběhnuté. Nejslabším článkem stroje je jednoznačně izolační systém, který je nejvíce namáhaným místem, tedy degraduje rychleji.

Hlavní rozdíl mezi izolačními systémy resin-rich a VPI je především v pořizovací ceně a náročnosti vybavení a zařízení potřebných pro výrobu. Výhoda VPI spočívá v tom, že vykazuje homogenní vlastnosti po celém vinutí a je odolnější proti provoznímu a vnějšímu namáhání. U resin-rich je pak velkou předností možnost vyjmutí a opravy jednotlivých tyčí statoru. Použití izolačních systémů VPI u velkých strojů je totiž limitováno rozměry impregnační kotle, proto lze říci, že jsou více používány pro stroje sériově vyráběné a nižších či středních výkonů. Nicméně se lze ve výjimečných případech v praxi setkat s tímto izolačním systémem i u strojů obrovských rozměrů. Izolační systém resin-rich se tedy naopak využívá spíše pro stroje vyšších výkonů a to hlavně pro jejich snazší transport a již zmíněnou možnost montáže přímo v místě provozu stroje. Podrobnější porovnání

jednotlivých vlastností, používaných materiálů a postupů výroby je provedeno v kapitole 2.2.4. Z výše uvedeného je zřejmé, že každá výrobní technologie má své výhody a nevýhody, proto je velmi těžké určit, který z těchto izolačních systémů vykazuje delší životnost nebo je pro stroj vhodnější. Rozhodnutí jakou technologii zvolit tak závisí vždy na výrobcích, a to v závislosti na okolnostech – jak velké stroje, v jakém počtu chtějí vyrábět, ale také zejména na tom, jak velké pořizovací náklady chtějí do výroby investovat.

Na základě dat ze studií [7],[40],[41], lze konstatovat, že nejvíce poruch vzniká na satorovém vinutí stroje. Jedná se o závady spojené s uvolněním vinutí z drážek, stárnutím izolace, znečištěním vinutí či vnitřními částečnými výboji. Závažnějšími závadami satorového vinutí jsou pak dvoufázové zkraty vinutí, částečné výboje a vibrační jiskření. Mezi další poruchy závažnějšího charakteru patří také různé defekty jádra satoru a úniky chladicí kapaliny. Na rotoru převládají poruchy vzniklé vlivem vysokých otáček a odstředivých sil, které způsobují únavové jevy materiálu, migraci izolace, závitové zkraty, uvolnění částí vinutí, ale také nerovnoměrné zatížení stroje, které může mít za následek lokální přehřátí vinutí i částí rotoru. Také poruchy ostatních zařízení stroje jako například sběracího ústrojí, chlazení stroje, ložisek a olejového hospodářství, mohou svou nesprávnou funkcí způsobit nejen havárii stroje, ale také celé elektrárny.

Generátory mohou selhávat mnoha způsoby a z různých příčin, z tohoto důvodu pro hledání původu poruch neexistují všeobecná pravidla. Velké množství informací lze zjistit až na místě z pracovních podmínek a dat o předchozím provozu stroje. Určit správnou příčinu poruchy je pro provozovatele stroje často těžký úkol, jelikož problematika a teorie funkce generátoru je velmi rozsáhlá a v elektrárně ji podrobně ovládá zpravidla jen několik osob. V dnešní době také klesá úroveň technické podpory a diagnostiky, a to nejen ze strany výrobců, ale může za to i negativní dopad automatizace výroby, snižování počtu zaměstnanců a odchod starších zkušených techniků, kteří nestačí předat svoje znalosti a často se tak řeší problémy, které již byly v minulosti vyřešeny nebo nejsou předmětné. Určení původu poruchy může být často problém i s nejmodernějším vybavením pro monitoring generátoru, pokud chybí dostatek uložených záznamů a informací z provozu stroje.

Nesprávné diagnostikování příčiny poruchy generátoru může být i velmi nákladné. Pokud je totiž určena špatně, existuje možnost, že závada se bude opakovat a celá oprava a odstávka stroje tak byla zcela zbytečná. Na druhou stranu je také nevhodné rozhodnout

o opravě nebo převinutí stroje, přestože se nejedná o závadu závažného charakteru a stroj by tak mohl dále pracovat bez poruchy několik let.

Nejlepším možným řešením je poruchám předcházet pravidelnou údržbou stroje a profylaktickými diagnostickými šetřeními, protože jedině tak je možné včas odhalit počínající degradační změny. Při diagnostice se vždy používá soubor více zkoušek, jelikož na základě jediné zkoušky nelze učinit jednoznačné a komplexní rozhodnutí o stavu stroje, natož pak zajistit jeho bezporuchovost či odhadnout zbývající dobu života. Tyto zkoušky mohou být prováděny pravidelně například každé 3 roky nebo v závislosti na skutečném stavu zařízení. Diagnostika zasahuje do celé oblasti doby života stroje.

Výrobci zařazují již do výrobního procesu soubor zkoušek: přijímací zkoušky, kontroly vstupního materiálu a především mezioperační zkoušky. Používání kvalitních materiálů a předcházením možných vad na dílech a součástkách stroje je totiž levnější a méně pracné, než vyrábění vadných dílů, které je poté nutno vyřadit i nahradit díly novými. Pro mezioperační zkoušky jsou vhodné zejména zkoušky zvýšeným střídavým napětím, které se provádějí po každém podstatném kroku výroby vinutí. Když je stroj ve výrobě kompletně smontován, je podroben zkouškám ještě před expedicí, tyto zkoušky se nazývají výstupní nebo kusové. Další kontrola probíhá po montáži přímo v elektrárně, ještě před samotným uvedením stroje do provozu, v této fázi je sledován zejména při spouštění a zabíhání, protože právě v prvních měsících provozu stroje se mohou projevit vady výroby, konstrukce či špatné montáže. Z tohoto důvodu je zapotřebí provést první diagnostiku stroje nejpozději do jednoho roku od jeho spuštění, aby se tyto vady zjistily už v počátku. Dále se pro stanovení prognózy, budoucího chování a životnosti stroje provádí již zmíněná pravidelná profylaktická diagnostika. Větší a důležitější stroje se pak vyplatí sledovat pomocí monitorovacích systémů a online diagnostiky. Pro provozovatele stroje je určitě výhodné provádět diagnostiku, protože z výsledků diagnostických zkoušek lze snadno zjistit aktuální stav a stupeň degradace. Tak lze alespoň částečně předejít neplánovaným odstávkám v případě poruchy stroje, které bývají často velmi nákladné.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] MENTLÍK, V. *Dielektrické prvky a systémy*. Praha: BEN – technická literatura, 2006. 240 s. ISBN 80-7300-189-6
- [2] KLEMPNER, G., I. KERSZENBAUM. *Handbook of large turbo-generator operation and maintenance*. 2nd ed. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2008, xxiii, 856 p. ISBN 978-047-0167-670.
- [3] MENTLÍK, V., PIHERA, J., POLANSKÝ, R., PROSR, P., TRNKA, P. *Diagnostika elektrických zařízení*. Praha: BEN – technická literatura, 2008. 440s. ISBN 978-80-7300-232-9
- [4] MENTLÍK, V., TRNKA, P., TRNKOVÁ, M., ŠAŠEK, L. *Spolehlivostní aspekty elektrotechnologie*. Praha: BEN – technická literatura, 2011. 120 s. ISBN 978-80-7300-412-5
- [5] HAVELKA, J., DRESLER, J., JÍLEK, V. *Montáž, údržba a opravy elektrických strojů točivých*. STROM Praha, 1995. 227 s.
- [6] BRUSH GROUP. *FRAME DESIGNATION DAX TURBOGENERATORS*. Leicestershire, United Kingdom, 2008 [cit. 10.3.2015]. Dostupné z: <http://www.brush.eu/en/file/get/DESIGNATION.pdf>
- [7] TURBINE GENERATOR MAINTENANCE, Inc. *Generator Aging Factors: Uncovering Value and Instilling Confidence through The Ability to Visually Recognize Generator Aging Factors*. NAES Plant Managers Conference, 2014 [cit. 1.4.2015]. Dostupné z: <http://www.turbinegenerator.com/index.php/en/our-company/more-information/conferences--papers>
- [8] BARTÁK, A., MRAVINÁČ, L., NEUMANN, J., VAŘÁK, J. *Diagnostika poruch izolací elektrických strojů*. 1. vyd. Praha. SNTL, 1984. 256 s.
- [9] CIGÁNEK, L. *Stavba elektrických strojů*. Praha: STNL, 1958. 176 s.
- [10] TURBINE GENERATOR MAINTENANCE, Inc. *Minimizing the Impact of Generator Repairs: Turbine Generator Testing and On-Site Repairs*. 2013 ARIPPA Technical Symposium, 2013 [cit. 1.4.2015]. Dostupné z: <http://www.turbinegenerator.com/index.php/en/our-company/more-information/conferences--papers>
- [11] ZÁLIŠ, K.: *Částečné výboje v izolačních systémech elektrických strojů*. 1. vydání. Praha: Academia, nakladatelství Akademie věd České republiky, 2005. 142 s. ISBN 80-200-1358-X.
- [12] SEQUENZ, H.; et al. *Technologie vinutí elektrických strojů točivých*. Praha: SNTL, 1980. 312 s.
- [13] TAVNER, P., R. LI, J. PENMAN a H. SEDDING. *Condition monitoring of rotating electrical machines*. London, U.K.: Institution of Engineering and Technology, 2008, xxii, 282 p. IET power and energy series, 56. ISBN 08-634-1741-8.
- [14] KOPYLOV, I.P.; et al. *Stavba Elektrických strojů*. Praha: STNL, 1988. 688 s.
- [15] STONE, G.C.; E.A. BOULTER; I. CULBERT; H. DHIRANI. *Electrical insulation for rotating machines: design, evaluation, aging, testing, and repair*. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience, 2004, xviii, 371 p. ISBN 04-714-4506-1.
- [16] ČSN EN 60034-18-1 ED.2. *Točivé elektrické stroje - Část 18-1: Funkční hodnocení izolačních systémů - Všeobecné návody*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [17] ČSN EN 60034-3 ED.2. *Točivé elektrické stroje - Část 3: Specifické požadavky na synchronní generátory poháněné parními turbínami nebo spalovacími plynovými turbínami*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [18] ČSN EN 60034-1 ED.2. *Točivé elektrické stroje - Část 1: Jmenovité údaje a vlastnosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [19] ČSN EN 60085 ED.2. *Elektrické izolace - Tepelné hodnocení a značení*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2008.
- [20] BEZDĚK, Z. COGEBI A.S. *RESIN RICH IZOLAČNÍ SYSTÉM pro vysokonapěťová vícezávitová cívková vinutí točivých strojů třídy F (155 °C)*. Tábor, 2009 [cit. 19.3.2015]. Dostupné z: [http://www.vukitrade.sk/content/download/Brochure%20coils%20RR\\_2009%20CZ.pdf](http://www.vukitrade.sk/content/download/Brochure%20coils%20RR_2009%20CZ.pdf)
- [21] COGEBI GROUP: MEMBER OF THE ELINAR GROUP. *Katalogové listy jednotlivých materiálů: FKA Eng Co. Exclusive Representative of Elinar and Cogebi in Iran* [online]. Iran, 2009 [cit. 19.3.2015]. Dostupné z: <http://www.fkaeng.com/>



- [22] BEZDĚK, Z. *Slídové materiály typu Resin Rich s nosnou skleněnou tkaninou pro vysokonapětové izolace točivých elektrických strojů* [online]. Diagnostika '09. Plzeň: Západočeská univerzita, 2009[cit. 20.3.2015]. ISBN 978-80-7043-793-3. Dostupné z: <http://ketsrv.fel.zcu.cz/diagnostika/konference/Sbornik/Sekce3/60.pdf>
- [23] MENTLÍK, V., PIHERA, J., TÁBOŘÍK, O., TRNKA, P. *Sledování změn výbojové činnosti namáhaných variant izolačního systému*. In *Diagnostika '07*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2007. s. 54-57. ISBN: 978-80-7043-557-1
- [24] GEMO-TEC. *VPI Technology: VPI Plant* [online]. 2014 [cit. 8.3.2015]. Dostupné z: <http://www.gemo-tec.com/products/impregnation/vpi-technology/station-vpi.html>
- [25] TRNKA, P. Elektrické a kombinované stárnutí izolačních materiálů. *ElectroScope*, 2007, roč. 2007, č. 1, s. 1-7. ISSN: 1802-4564
- [26] MENTLÍK, V., TRNKA, P., PIHERA, J., HAMAR, R. Zvýšení provozní spolehlivosti motorů s měniči s rychlými spínacími prvky. *Elektro*, 2008, roč. 18, č. 12, s. 4-8. ISSN: 1210-0889
- [27] TRNKA, P. Zbytková životnost elektroizolačních systémů. *Elektrorevue*, 2009, roč. 10, č. 22, s. 1-7. ISSN: 1213-1539
- [28] TRNKA, P. Problematika ochranných vrstev vinutí elektrických točivých strojů při pulzním namáhání. *Electroscope*, 2008, roč. 2008, č. 1, s. 1-4. ISSN: 1802-4564
- [29] BRUTSCH, R., J. ALLISON a T. THALER. Factors determining cost and quality of the electrical insulation in the VPI-process. In: *Conference Record of the 1996 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*. Montreal, Que: IEEE, 1996, pp.259-262. ISBN 0-7803-3531-7. DOI: 10.1109/ELINSL.1996.549331. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=549331>
- [30] BRUTSCH, R. a M. CHAPMAN. Insulating systems for high voltage rotating machines and reliability considerations. In: *2010 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*. San Diego, CA: IEEE, 2010, pp.1-5. ISBN 978-1-4244-6298-8. DOI: 10.1109/ELINSL.2010.5549737. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5549737>
- [31] *Profylaktika izolačního systému strojů točivých turbogenerátory, hydrogenerátory a vn motory*, ČEZ, PN, 2006 . Dostupný z: <http://www.cez.cz/edee/content/file/kontakt/pn-0006.pdf>
- [32] Roebel Bar: Components for Generators and Motors. © ASTA ELEKTRODRAHT GMBH. *ASTA ENERGY TRANSMISSION COMPONENTS* [online]. 2014 [cit. 7.4.2015]. Dostupné z: <http://asta.at/files/img/02-produkte/fuer-transformatoren/asta-produkte-roebelstaebe.jpg>
- [33] High voltage generator stator windings. PENNWELL CORPORATION. *PennWell* [online]. 2013 [cit. 7.4. 2015]. Dostupné z: <http://s36.a2zinc.net/clients/pennwell/PGB2014/Custom/ProductLarge8023.jpg>
- [34] MG SERVIS D.O.O. *SERVICING OF HYDROGENERATORS: Place of losses* [online]. 2013 [cit. 7.4.2015]. Dostupné z: <http://www.mg-servis.hr/assets/Slike/hydro-graph.gif>
- [35] MAUGHAN, C.V. Root-cause diagnostics of generator service failures. In: *IEEE International Conference on Electric Machines and Drives*. San Antonio, TX: IEEE, 2005, s. 1927-1935. ISBN 0-7803-8987-5. DOI: 10.1109/IEMDC.2005.195983. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1531601>
- [36] MAUGHAN, C., V. MAUGHAN GENERATOR CONSULTANTS. *PREMATURE FAILURE OF MODERN GENERATORS* [online]. 2014 [cit. 2.4. 2015]. Dostupné z: [http://sites.ieee.org/schenectady/files/2014/02/premature\\_failure\\_of\\_modern\\_generators.pdf](http://sites.ieee.org/schenectady/files/2014/02/premature_failure_of_modern_generators.pdf)
- [37] Petr. J., Antfeist, F., Marek V. *Diagnostika izolačních systémů elektrických strojů pomocí ztrátového činitele a kapacit*. [online]. Diagnostika '09. Plzeň: Západočeská univerzita, 2009[cit. 21.3.2015]. ISBN 978-80-7043-793-3. Dostupné z: <http://ketsrv.fel.zcu.cz/diagnostika/konference/Sbornik/Sekce2/03.pdf>
- [38] CIGRÉ, Working group A1.11. *Guide for on-line monitoring of turbogenerators*. Paris: CIGRÉ, 2010. ISBN 978-285-8731-251.
- [39] VROŽINA, M., DAVID. J. *Spolehlivost a diagnostika* [online]. Vyd. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2012, 1 CD-ROM [cit. 15.2. 2015]. ISBN 978-80-248-2595-3. Dostupné z: <http://www.person.vsb.cz/archivcd/FMMI/SD/Spolehlivost%20a%20diagnostika.pdf>

- [40] LEMBERG, A. a K. TORNROOS. GE ENERGY. *GE Generator Fleet Experience and Available Refurbishment Options: GER-4223* [online]. General Electric Company, © 2004 [cit. 2.4. 2015]. Dostupné z: [http://site.ge-energy.com/prod\\_serv/products/tech\\_docs/en/downloads/ger4223.pdf](http://site.ge-energy.com/prod_serv/products/tech_docs/en/downloads/ger4223.pdf)
- [41] CIGRÉ, Working Group A1.10. *Survey of hydrogenerator failures*. Paris: CIGRÉ, 2009. ISBN 978-285-8730-797.
- [42] STONE, G., C., R. WU. Examples of stator winding insulation deterioration in new generators. In: *2009 IEEE 9th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials*. Harbin: IEEE, 2009, s. 180-185. ISBN 978-1-4244-4367-3/ISSN 978-1-4244-4367-3. DOI: 10.1109/ICPADM.2009.5252475. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5252475>
- [43] MAUGHAN, C., V. MAUGHAN ENGINEERING CONSULTANTS. *Maintenance of Turbine-Driven Generators* [online]. Schenectady, NY, 2010 [cit. 10.4. 2015]. Dostupné z: <http://www.ccj-online.com/wp-content/uploads/2012/02/Maintenance-of-Turbine-Driven-Generators-by-Clyde-Maughan.pdf>
- [44] BAŠTA, J. a kol. *Měření na elektrických strojích: I. všeobecná část*. Praha: SNTL, 1959.
- [45] BAŠTA, J. a kol. *Měření na elektrických strojích 5. Měření na synchronních strojích*. Praha: SNTL, 1964
- [46] ZAWOYSK, R., J. *GE Generator Rotor Retaining Rings: Experience and Fleet Data*. GER-3930. GE Power Systems. 1995. [http://site.ge-energy.com/prod\\_serv/products/tech\\_docs/en/downloads/ger3930.pdf](http://site.ge-energy.com/prod_serv/products/tech_docs/en/downloads/ger3930.pdf)
- [47] ZHENGPING, Z. *A Novel Online Diagnosing Technique of Rotor Turn-to-Turn Fault of Large Turbine Generator*. Colloquium on new developments of rotating electrical machines. Chinese Society for Electrical Engineering. Beijing, China [online]. 2011 [cit. 2015-04-15]. Dostupné z [http://www.csee.org.cn/data/zt\\_cigreA1B1/index\\_a1.html](http://www.csee.org.cn/data/zt_cigreA1B1/index_a1.html)
- [48] MOORE, W., G. *Generator Stator Bar Deterioration due to Vibration Sparking and Partial Discharge*. Colloquium on new developments of rotating electrical machines. Chinese Society for Electrical Engineering. Beijing, China [online]. 2011 [cit. 2015-04-15]. Dostupné z [http://www.csee.org.cn/data/zt\\_cigreA1B1/index\\_a1.html](http://www.csee.org.cn/data/zt_cigreA1B1/index_a1.html)
- [49] MOORE, W., G. a A. KHAZANOV. Insulation degradation in generator stator bars due to spark erosion and partial discharge damage. In: *2010 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*. San Diego, CA: IEEE, 2010, pp.1-5. ISBN 978-1-4244-6298-8. DOI: 10.1109/ELINSL.2010.5549794. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5549794>
- [50] STONE, G., C., C., V. MAUGHAN, D. NELSON a R., P. SCHULTZ. Impact of Slot Discharges and Vibration Sparking on Stator Winding Life in Large Generators. *IEEE electrical insulation magazine: a publication of the IEEE Electrical Insulation Society on Volume: 24 , Issue: 5*. 2008., pp.14-21.
- [51] STONE, G.C. a C., V. MAUGHAN. Vibration Sparking and Slot Discharge in Stator Windings. In: *Conference Record of the 2008 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*. Vancouver, BC: IEEE, 2008, pp.148-152. ISBN 978-1-4244-2091-9. DOI: 10.1109/ELINSL.2008.4570298. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4570298>
- [52] LIESE, M. a M. BROWN. Design-dependent slot discharge and vibration sparking on high voltage windings. In: *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on Volume: 15 , Issue: 4*. IEEE, 2008, pp.927-932. ISSN 1070-9878. DOI: 10.1109/TDEI.2008.4591212. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4591212>
- [53] NOVÁK, P. Fotografie společnosti 1. SERVIS ENERGO
- [54] ZÁBRANSKÝ, V. a O. TŮMOVÁ. Zkoušky turbogenerátorů. *ElectroScope* [online]. 2013, roč. 2013, č. 3 [cit. 2015-02-18]. DOI: ISSN 1802-4564. Dostupné z: [http://147.228.94.30/images/PDF/Rocnik2013/Cislo3\\_2013/r7c3c10.pdf](http://147.228.94.30/images/PDF/Rocnik2013/Cislo3_2013/r7c3c10.pdf)

## Přílohy

### P 1: Fotografie poruch statorového vinutí



P 1.1 Zničená čela vinutí vadou ventilátoru (převzato z [10])



P 1.2 Poškození vinutí náhlým zkratem a jeho odpudivými silami mezi jednotlivými fázemi (převzato z [43])



P 1.3 Závažná prasklina vzniklá vlivem zkratových proudů (převzato z [43])



P 1.4 Částečné výboje na ochranné polovodivé vrstvě (převzato z [42])



P 1.5 Degradace a blednutí izolace v drážce vlivem působení částečných výbojů a ozonu (převzato z [49])



P 1.6 Tyč vinutí poškozená vibračním jiskřením (převzato z [43])



P 1.7 Zničená izolace tyče vinutí, ke které došlo po 2 hodinách provozu od celkového převnutí stroje (převzato z [43])



P 1.8 Zničení tyčí vinutí a jádra statoru zemním spojením (převzato z [43])

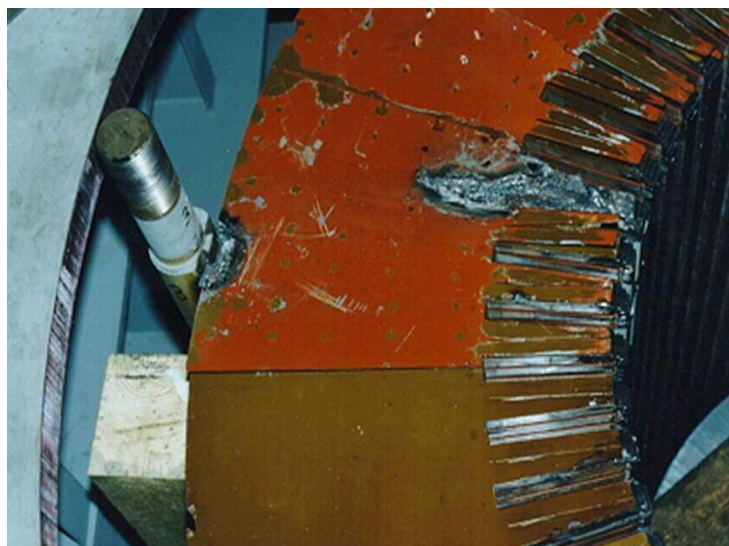


P 1.9 Kontaminace nečistotami a vlhkostí (převzato z [7])

## P 2: Fotografie poruch jádra statoru



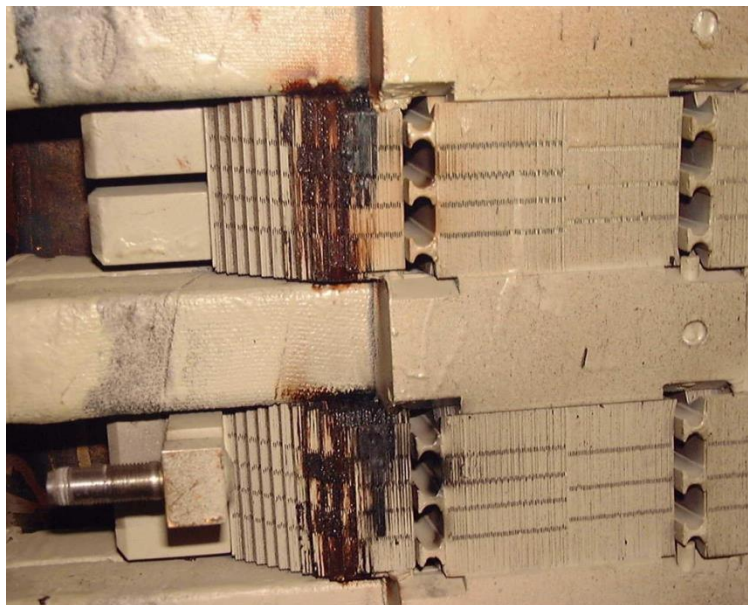
P 2.1 Roztavené jádro statoru (převzato z [43])



P 2.2 Závažné poškození jádra vlivem přemagnetování (převzato z [43])



P 2.3 Neopravitelné roztavení jádra statoru (převzato z [43])



P 2.4 Lokální uvolnění jádra (převzato z [43])

### P 3: Fotografie poruch rotorového vinutí turbogenerátoru



P 3.1 Zkrat vzniklý posunem krajního vodiče vlivem teplotního namáhání (převzato z [10])



P 3.2 Znečištění čelních prostor vinutí rotoru prachem pod obručemi turbogenerátoru [53]





P 3.3 Mezizávitový zkrat mezi 2. a 3. závitem (převzato z [47])



P 3.4 Zkrat mezi dvěma cívkami způsobil jejich roztavení (převzato z [35])



P 3.5 Přerušený závit vinutí rotoru. Příčina poruchy byla cyklycké zatížení v kombinaci s lokálním přehřátím a tavením mědi (převzato z [35])

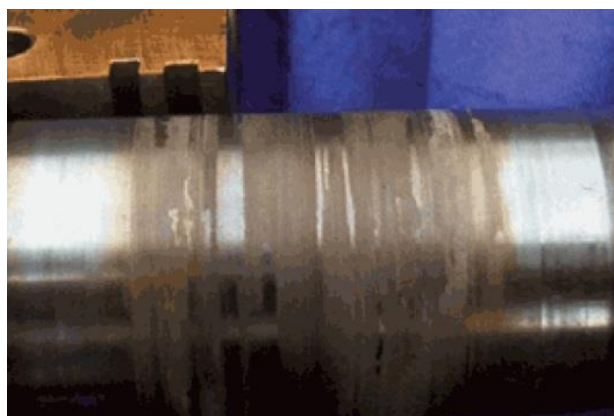
#### P 4: Fotografie poruch konstrukčních částí rotoru turbogenerátoru



P 4.1 Znečištěné ventilační otvory nemagnetické obruče rotoru [53]



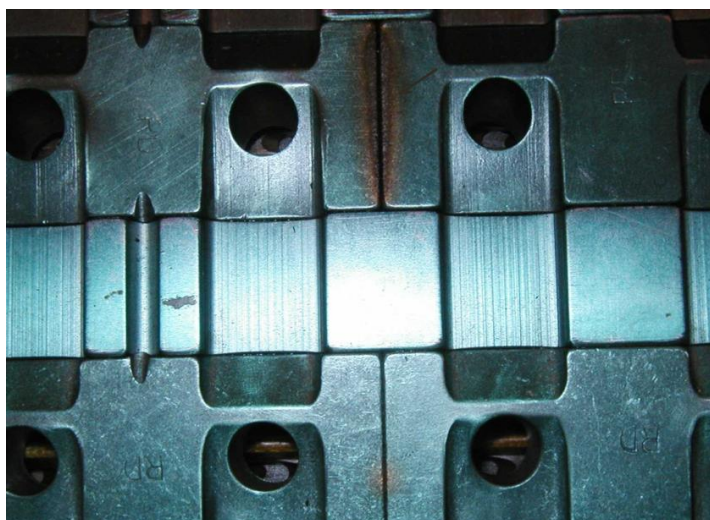
P 4.2 Porucha ložisek nerovnoměrným zatížením (převzato z [10])



P 4.3 Rez na hřídeli rotoru (převzato z [10])



P 4.4 Znečištění a ucpání ventilačních kanálek vzduchem chlazeného stroje (převzato z [43])



P 4.5 Lokální přehřátí a spálení klínů rotoru (převzato z [35])

## P 5: Fotografie poruch vinutí hydrogenerátorů



P 5.1 Mezizávitový zkrat na cívce pólu rotoru hydrogenerátoru [53]



P 5.2 Poškození cívky pólu hydrogenerátoru (převzato z [41])



P 5.3 Uvolněný šroub se dostal do vzduchové mezery a způsobil zadření stroje (převzato z [43])

### **P 6: Fotografie poruch pomocných zařízení a elektrických spojení**



P 6.1 Přerušení nulového vývodu statorového vinutí turbogenerátoru - pohled na průchodky vývodů [53]



P 6.2 Přerušeni nulového vývodu statorového vinutí turbogenerátoru - pohled statorové vinutí [53]



P 6.3 Mezilamelový zkrat na komutátoru kotvy budiče hydrogenerátoru [53]



P 6.4 Částečné výboje na vývodech mezi jednotlivými fázemi vyššího napětí (převzato z [42])