

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích
Přírodovědecká fakulta

Bakalářská práce

**Správa a údržba elektrických točivých strojů v
Jaderné elektrárně Temelín**

Václav Longin

Školitel: doc. RNDr. Vítězslav Straňák, Ph.D.

České Budějovice 2013

Longin, V., 2013: Správa a údržba elektrických točivých strojů v Jaderné elektrárně Temelín. [Electric rotary machines management and maintenance in the nuclear power plant Temelin.] - 56p., Faculty of Science, University of South Bohemia, České Budějovice, Czech Republic.

Anotace

Předložená práce se zabývá problematikou správy a údržby vysokonapěťových asynchronních elektromotorů v Jaderné elektrárně Temelín. Hlavním cílem práce je vypracování nového návrhu revize pracovního postupu na kontrolu elektromotoru hlavního cirkulačního čerpadla.

Anotation

This work deals with a management and maintenance of high-voltage induction motors in nuclear power plant Temelin. The main purpose of this work is to develop a new draft revision to check the main electric motor of circulation pump.

Prohlášení

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské práce, a to v nezkrácené podobě elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách, a to se zachováním mého autorského práva k odevzdanému textu této kvalifikační práce. Souhlasím dále s tím, aby toutéž elektronickou cestou byly v souladu s uvedeným ustanovením zákona č. 111/1998 Sb. zveřejněny posudky školitele a oponentů práce i záznam o průběhu a výsledku obhajoby kvalifikační práce. Rovněž souhlasím s porovnáním textu mé kvalifikační práce s databází kvalifikačních prací [Theses.cz](http://theses.cz) provozovanou Národním registrem vysokoškolských kvalifikačních prací a systémem na odhalování plagiátů.

V Týně nad Vltavou 23. dubna 2013

Václav Longin

Poděkování

Rád bych na tomto místě poděkoval doc. RNDr. Vítězslavu Straňákovi, Ph.D. za aktivní přístup, pomoc a odborné vedení při realizaci mé bakalářské práce.

OBSAH:

1. ÚVOD A CÍL PRÁCE	7
2. HLAVNÍ CIRKULAČNÍ ČERPADLO	8
2.1 TECHNICKÉ PARAMETRY HLAVNÍHO CIRKULAČNÍHO ČERPADLA	10
2.2 KOMPONENTY HLAVNÍHO CIRKULAČNÍHO ČERPADLA	10
2.2.1 <i>Elektromagnetické odlehčovací zařízení</i>	10
2.2.2 <i>Antireverzní zařízení a zkrutná spojka</i>	11
3. ELEKTROMOTOR HLAVNÍHO CIRKULAČNÍHO ČERPADLA	12
3.1 KONSTRUKČNÍ POPIS A TECHNICKÉ PARAMETRY ELEKTROMOTORU.....	13
3.2 STATOR.....	14
3.3 ROTOR.....	16
3.4 LOŽISKA A MAZACÍ SYSTÉM	17
3.5 CHLAZENÍ A CHLADÍCÍ SYSTÉM.....	18
4. VÝZNAM A POŽADAVKY NA ÚDRŽBU V JADERNÉ ELEKTRÁRNĚ TEMELÍN	19
4.1 SYSTÉM A METODY ÚDRŽBY	19
4.2 VÝKON ÚDRŽBY, PŘÍKAZY: P, R A B.....	21
4.3 PŘEDÁVÁNÍ A PŘEBÍRÁNÍ ZAŘÍZENÍ DO A Z OPRAVY.....	22
5. MĚŘENÍ IZOLAČNÍHO ODPORU A POLARIZAČNÍHO INDEXU	23
5.1 POSTUP MĚŘENÍ	25
5.2 ANALÝZA VÝSLEDKŮ A NAMĚŘENÝCH HODNOT	27
6. MĚŘENÍ ZÁVISLOSTI IZOLAČNÍHO ODPORU NA STEJNOSMĚRNÉM NAPĚTÍ	30
6.1 POSTUP MĚŘENÍ	31
6.2 ANALÝZA VÝSLEDKŮ A NAMĚŘENÝCH HODNOT	32
7. MĚŘENÍ KAPACITY A ZTRÁTOVÉHO Činitele	35
7.1 POSTUP MĚŘENÍ	38
7.2 ANALÝZA VÝSLEDKŮ A NAMĚŘENÝCH HODNOT	38
8. MĚŘENÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ	40
8.1 DETEKCE ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ	46
8.2 METODY PRO DETEKCI ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ.....	47
8.3 POSTUP MĚŘENÍ GALVANICKOU METODOU	48
8.4 ANALÝZA VÝSLEDKŮ A NAMĚŘENÝCH HODNOT	48
9. ZKOUŠKA ELEKTRICKÉ PEVNOSTI IZOLACE VINUTÍ STATORU PŘILOŽENÝM STRÍDAVÝM NAPĚTÍM	50
9.1 POSTUP MĚŘENÍ	51
9.2 ANALÝZA VÝSLEDKŮ A NAMĚŘENÝCH HODNOT	52
10. ZÁVĚR	53
11. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	55
12. SEZNAM PŘÍLOH	56

1. POUŽITÉ MĚŘÍCÍ PŘÍSTROJE - TECHNICKÉ PARAMETRY.....	56
2. TABULKA NAMĚŘENÝCH HODNOT, MĚŘENÍ IZOLAČNÍHO ODPORU A VÝPOČET POLARIZAČNÍHO INDEXU.....	56
3. TABULKA NAMĚŘENÝCH HODNOT, MĚŘENÍ ZÁVISLOSTI IZOLAČNÍHO ODPORU NA STEJNOSMĚRNÉM NAPĚTÍ.....	56
4. TABULKA NAMĚŘENÝCH HODNOT, MĚŘENÍ KAPACITY A ZTRÁTOVÉHO ČINITELE.....	56
5. TABULKA NAMĚŘENÝCH HODNOT, MĚŘENÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ.....	56
6. PRACOVNÍ POSTUP „PPO M57DP2CM001 REV.006“.....	56

1. ÚVOD A CÍL PRÁCE

Práce je zaměřena na oblast diagnostických měření a kontrol při údržbě vysokonapěťových asynchronních elektromotorů v Jaderné elektrárně Temelín. Jedná se o typ údržby, který je v odborné literatuře označován jako off-line, tj. kdy je údržba realizovaná v době plánované odstávky stroje.

Diagnostické měřicí metody zkoumají kvalitu technického stavu izolace vinutí statoru elektromotoru. Pokud se aplikují pravidelně a dlouhodobě ve stanovených intervalech, mohou výsledky zobrazené v časovém trendu předurčovat vývoj technického stavu. Je možné včas odhalit počínající závady, tomu podřídit plány údržby a zabránit nahodilým výpadkům provozuschopnosti technologie i ztrátám na výrobě. Odborně se tento postup označuje řízení životnosti nebo řízené stárnutí.

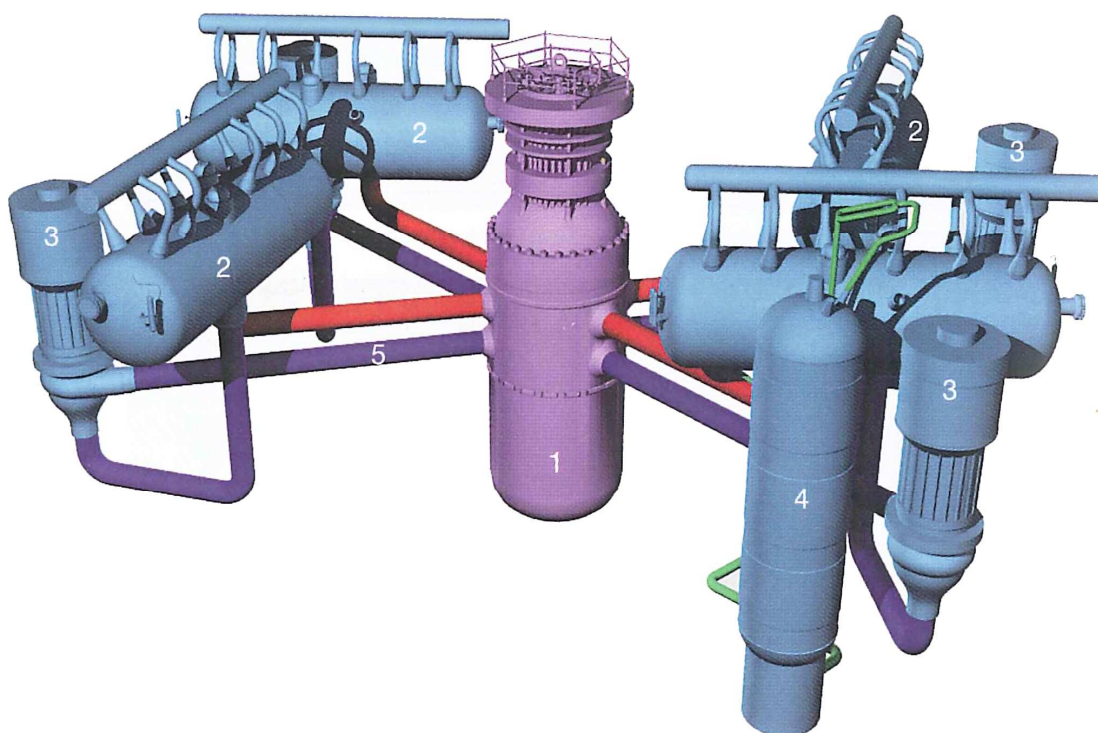
Stěžejní část práce se podrobně zaměřuje na elektromotor hlavního cirkulačního čerpadla. Cílem práce je zpracovat přehled o rozsahu údržby, která se provádí v pravidelných intervalech na vinutí statoru elektromotoru. Ostatní činnosti revizního charakteru jsou v práci uvedeny pouze okrajově, a to jen tehdy, pokud mají přímý vliv na funkci vinutí statoru, nebo elektromotoru jako celku.

Cílem je také popsat použité metody technické diagnostiky, objasnit jejich fyzikální podstatu a analyzovat konkrétní výsledky a naměřené hodnoty měření a kontrol. Poté porovnat výsledky s kritérii uvedenými v předpisu výrobce nebo obecně platnými technickými normami a provést vyhodnocení technického stavu vinutí statoru.

Nedílnou součástí práce je vypracování nového pracovního postupu pro pravidelnou údržbu elektromotoru. V něm detailně zpracovat veškeré poznatky z analyzovaných výsledků diagnostických měření a kontrol. Předpokládá se, že údržba elektromotoru podle nového pracovního postupu bude mít pozitivní vliv k udržení dlouhodobé kvality, bezpečnosti a technické životnosti izolačního systému vinutí statoru elektromotoru v průběhu dalšího provozu.

2. HLAVNÍ CIRKULAČNÍ ČERPADLO

Hlavní cirkulační čerpadlo (HCČ) zabezpečuje nucenou cirkulaci chladiva primárního okruhu přes aktivní zónu reaktoru. Tím zajišťuje odvod tepla vznikajícího při štěpné reakci a jeho přenos přes teplosměnnou plochu parogenerátoru do vody sekundárního okruhu. HCČ je umístěno ve studené větvi každé cirkulační smyčky mezi parogenerátorem a reaktorem [1].



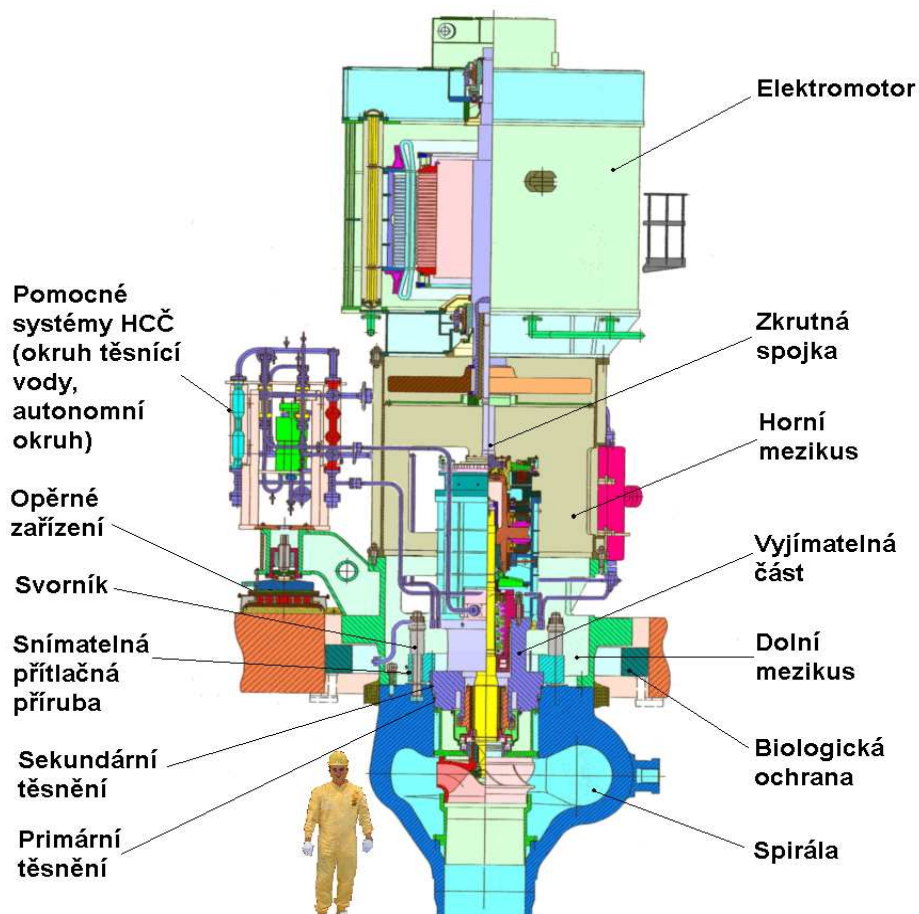
Obr. 1: Prostorové uspořádání primárního okruhu [1].

Kde:

1. jaderný reaktor; 2. parogenerátor; 3. hlavní cirkulační čerpadlo s elektromotorem; 4. kompenzátor objemu; 5. potrubí primárního okruhu.

Konstrukčně je HCČ zobrazeno na obr. 2. Je uspořádáno jako vertikální odstředivé jednostupňové čerpadlo s jednotkou mechanické ucpávky hřídele, s letmo uloženým oběžným kolem a axiálním přívodem čerpané kapaliny [1].

Hlavní nosnou konstrukcí čerpadla je dolní těleso se třemi oporami. Na horní přírubě tělesa je uložena ocelová lucerna, na kterou se připevňuje hnací elektromotor se setrvačníkem. Dolní část je s tělem ulity spojena šrouby skrze měděné těsnění.



Obr. 2: Hlavní cirkulační čerpadlo s elektromotorem [1].

Konzoly dolního tělesa se opírají o opěrné zařízení ustavené na podlaze, což dovoluje posuv čerpadla v důsledku tepelných dilatací přívodního a odvodního potrubí. Jako primární těsnění v hlavní dělicí rovině je použito modifikované hřebenové těsnění s větší těsnící plochou. Tento systém nahrazuje původní nerezové těsnění. Spojení hlavního cirkulačního čerpadla s primárním potrubím je provedeno svařováním, kdežto spojení s pomocnými systémy je provedeno pomocí přírubových spojů [1].

Na hřídeli čerpadla je mechanická ucpávka, do které se ze systému doplňování primárního okruhu dodává těsnící voda zabraňující úniku teplotně nosného média primárního okruhu. Za provozu čerpadla vzniká axiální síla, která působící na hřídel čerpadla hřídele směrem vzhůru. Velikost síly je proměnná a mění se v závislosti na tlaku média v primárním okruhu. Na hřídel čerpadla rovněž působí síla směřující dolů. K odlehčení axiálních ložisek se působení sil částečně eliminuje elektromagnetickým odlehčovacím zařízením vestavěným do axiálního ložiska. Zbylé namáhání je pak zachyceno hřebenem axiálního ložiska [1].

2.1 Technické parametry hlavního cirkulačního čerpadla

Nejdůležitější parametry čerpadla jsou uvedeny v tab. 1. Jsou prezentována pouze zásadní a stěžejní technická data, která mají souvislost a přímou vazbu k elektropohonu čerpadla.

dopravní množství média	21 200	[m ³ /hod]
teplota teplotnosného média	290 ÷ 320	[°C]
tlak na sání	15	[MPa]
počet otáček (synchronních)	1 000	[ot/min]
příkon při provozu s horkou vodou	5 100	[kW]
příkon při provozu se studenou vodou	6 800	[kW]
směr otáčení při pohledu shora	vlevo	
hmotnost HCČ s motorem	140 000	[kg]

Tab. 1: Šítkové hodnoty hlavního cirkulačního čerpadla [1].

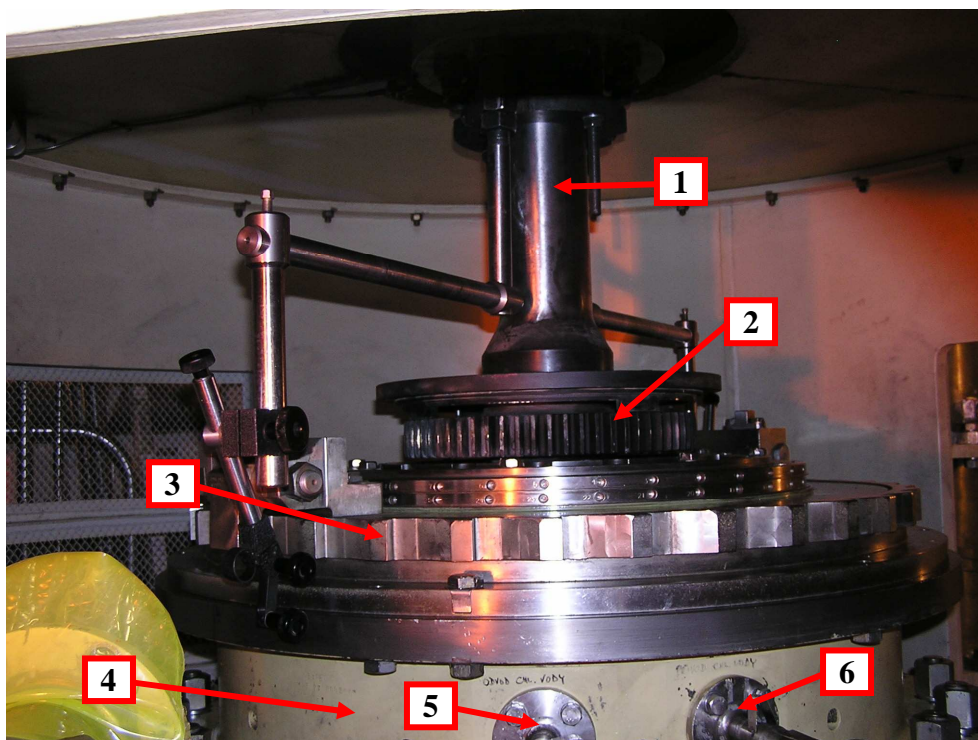
2.2 Komponenty hlavního cirkulačního čerpadla

Představují nezbytné prvky pro zabezpečení spolehlivé funkce vlastního čerpadla, pomocných systémů i elektromotoru. Nejdůležitější z nich jsou zobrazené na obr. 3. Ten zachycuje stav, kdy probíhá vyrovnání soustrojí ve spojení.

2.2.1 Elektromagnetické odlehčovací zařízení

Elektromagnetické odlehčovací zařízení se skládá z odlehčovacího kotouče a tělesa s cívkou. Používá se pro zabezpečení spuštění čerpadla při plném tlaku v primárním okruhu a také pro částečné odlehčení axiálního ložiska čerpadla při jmenovitém tlaku chladiva primárního okruhu [1].

Těleso elektromagnetu je celokované, zhotovené z uhlíkové oceli a tvoří nástavbu základny axiálního ložiska, přičemž současně slouží i jako jeho víko. V obvodovém plášti jsou příruby pro připojení přívodu a odvodu chladicí kapaliny. Vnitřní prostor je uzpůsoben pro vložení dvou kusů cívek s tím, že středová část a boční stěny jsou duté a cirkuluje jimi chladicí kapalina, která ochlazuje vinutí cívek. Cívky jsou od kovové kostry izolovány pomocí izolace teplotní odolnosti třídy „H“ [1].



Obr. 3: Komponenty hlavního cirkulačního čerpadla.

Kde:

1. torzní tyč spojky; 2. ozubení torzní tyče; 3. antireverzní zařízení; 4. těleso elektromagnetu; 5. výstup chladící vody elektromagnetu; 6. vstup chladící vody elektromagnetu.

Elektromagnet je napájen stejnosměrným napětím 220 V, které je přivedeno do svorkovnice umístěné ve střední části tělesa. K vinutí je paralelně připojena dioda sloužící jako ochrana před přepětím v okamžiku vypnutí elektromagnetu. Odstavení elektromagnetu z provozu se provede během minuty po úplném zastavení hlavního cirkulačního čerpadla [1].

2.2.2 Antireverzní zařízení a zkrutná spojka

Antireverzní zařízení slouží k zabránění zpětného otáčení hřídele hlavního cirkulačního čerpadla při zpětném proudění chladiva. Skládá se z rohatkového kotouče pevně spojeného s tělesem axiálního ložiska, dvou konzol, ustavených na objímce ložiska a západek nasazených na čepech konzol [1].

Po spuštění hlavního cirkulačního čerpadla se západky odstředivou silou pootočí na čepech a vysunou se ze záběru s rohatkovým kotoučem. Naopak při zastavení čerpadla přestane působit na západky odstředivá síla a ty zapadnou vlastní hmotností do ozubeného

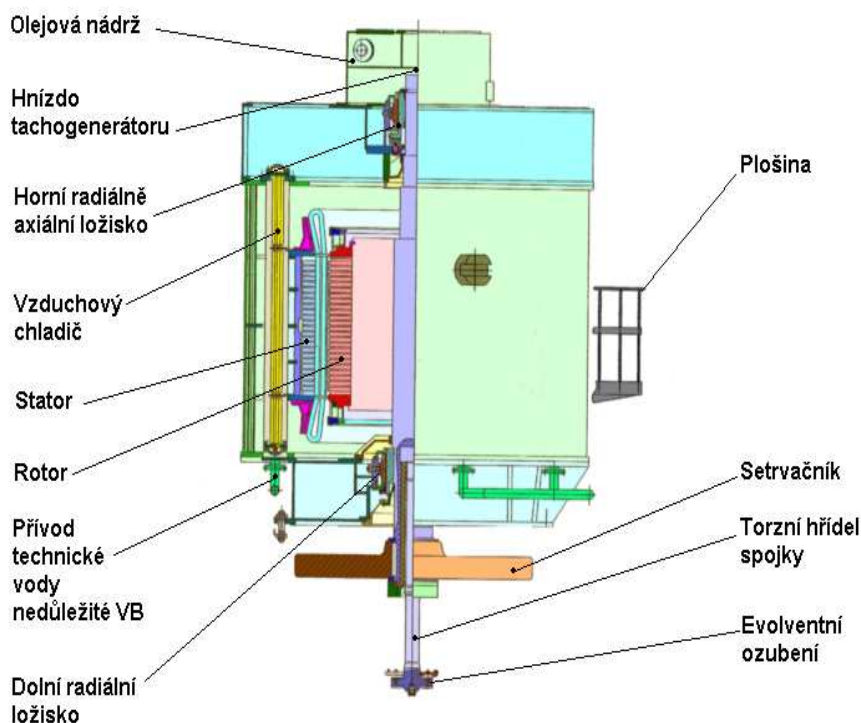
rohatkového kroužku a spolehlivě zajistí hlavního cirkulačního čerpadlo proti zpětnému otáčení v důsledku zpětného průtoku (tlaku) chladiva [1].

Kroutící moment od elektromotoru je přenášán pomocí ozubení zkrutné tyče spojky. Horní konec zapadá do ozubení v pouzdře rotoru elektromotoru a spodní konec do ozubení ve věnci čerpadla. Zkrutná tyč nepřenáší vzájemné osové namáhání a zároveň kompenzuje případnou nesouosost elektromotoru a čerpadla [1].

3. ELEKTROMOTOR HLAVNÍHO CIRKULAČNÍHO ČERPADLA

Je vysokonapěťový asynchronní elektromotor se satorovým vinutím zapojeným do hvězdy a rotorem v provedení s kotvou nakrátko. Pochází z produkce ruského závodu Energomash Jekaterinburg a nese typové označení VAZ215/109-6AM05. Byl vyroben v roce 1993 a je určen pro režim zatížení S1, tzn. trvalého provozu.

Informativní technický popis a konstrukční uspořádání elektromotoru je zobrazeno na obr. 4 a reálný pohled přináší obr. 5.

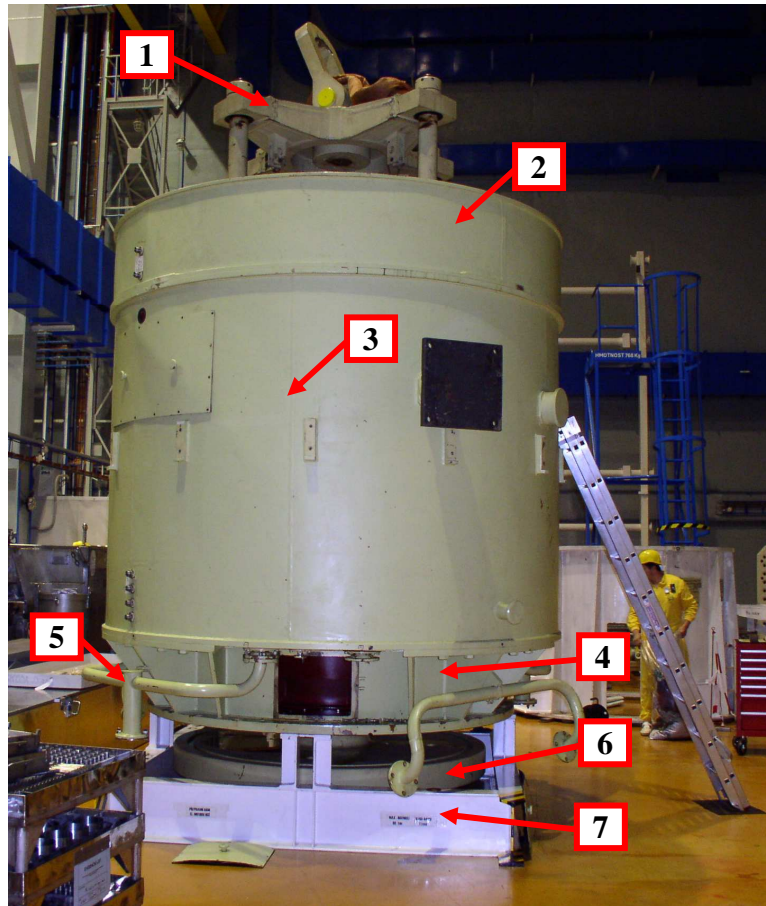


Obr. 4: Elektromotor hlavního cirkulačního čerpadla [1].

3.1 Konstrukční popis a technické parametry elektromotoru

Konstrukčně se jedná o vertikální stroj, jehož tvar podle ruské technické normy ГOCT 2479 odpovídá kategorii IM8721. Stupeň ochrany proti vniku cizích předmětů a vody splňuje kritéria IP-55 což znamená, že je částečně prachotěsný a odolný vůči vodě tryskající ze všech směrů.

Motor je proveden jako vertikální válec s dvěma radiálními vodícími a jedním patním (závěsným axiálním) ložiskem. Chlazení je zajištěno čtyřmi vestavěnými vzduchovými chladiči [2].



Obr. 5: Elektromotor čerpadla HCČ v dílně údržby před zahájením periodických revizních prací.

Kde:

1. transportní a zdvihací přípravek; 2. horní křížová konstrukce; 3. tělo (plášť) statoru; 4. dolní křížová konstrukce; 5. potrubí chladící vody; 6. setrvačnick; 7. transportní rám.

Štítkové hodnoty elektromotoru:

Výrobce	UEM Jekaterinburg Rusko	
Typ elektromotoru	VAZ215/109-6AM05	
Druh elektromotoru	Asynchronní s kotvou nakrátko	
Výkon	8000	[kW]
Jmenovité napětí	6	[kV]
Jmenovitý proud	880	[A]
Třída izolace statoru	B	
Účinitk	0,91	
Otáčky:	995	[ot/min]
IP (ochrana proti vniku cizích předmětů a vody)	55	
Režim zatížení	S1	
Proud statoru při „studené“ vodě	773	[A]
Proud statoru při „horké“ vodě	605	[A]
Max.rozběhový proud	$8 \times I_{jm}$	[A]
Kmitočet napájecí sítě	50	[Hz]
Hmotnost	49800	[kg]
Chlazení:	vzduchové	

Tab. 2: Štítkové hodnoty elektromotoru [3].

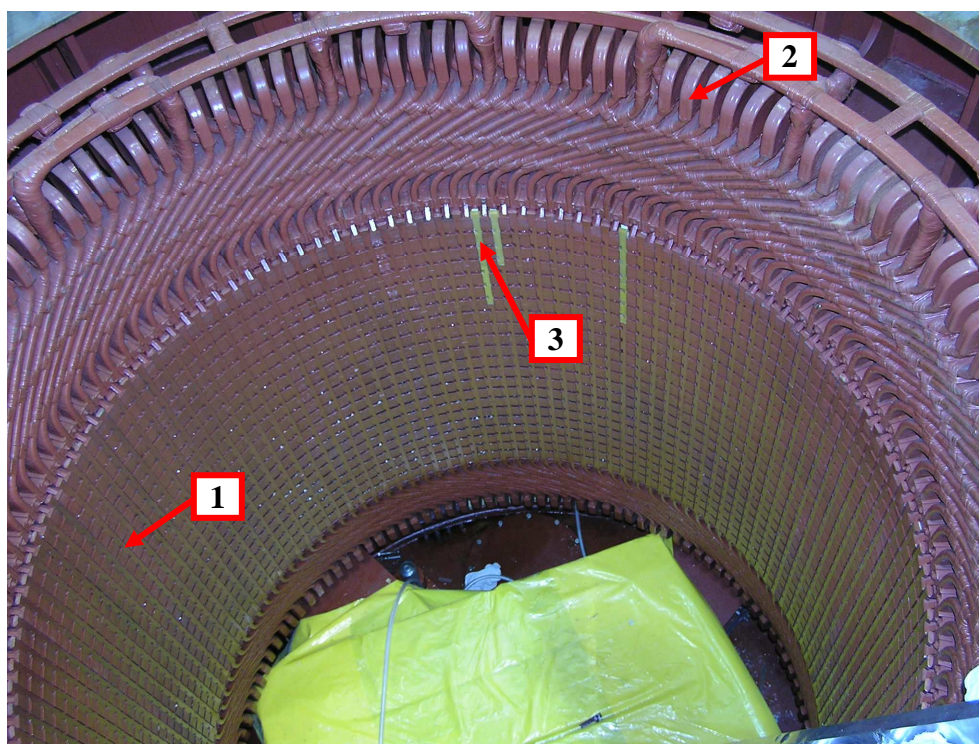
3.2 Stator

Stator elektromotoru je válcového tvaru a není rozebíratelný. Skládá se ze svařené ocelové kostry, magnetického obvodu, izolovaného měděného vinutí, prostorových elektroohříváků a přístrojů systému kontroly řízení.

Tělo kostry statoru je svařeno z ocelových plechů. Pro upevnění magnetického obvodu jsou do vnitřní části osazeny obruče spojené žebry a výztužemi. Dále je vnitřní část těla statoru rozdělena na čtyři sektory, které vytvářejí zóny horkého, respektive chladného vzduchu. Těmito sektory proudí ohřátý vzduch z vinutí statoru do chladičů vzduchu, kde se ochladí a pokračuje opět do vinutí. V nejnižší části statoru je přivařen nátrubek pro odtok zkondenzované vlhkosti ven z vnitřních prostor motoru [2].

Na horní část kostry statoru se připevňuje horní křížová konstrukce, která tvoří nosný konstrukční prvek pro patní ložisko a upevnění rotoru. Na spodní část kostry statoru se osazuje dolní křížová konstrukce, která poskytuje prostor pro umístění dolního vodícího ložiska [2].

Magnetický obvod na obr. 6 je vytvořen ze segmentových navzájem izolovaných plechů z elektrotechnické oceli silných 0,5 mm. Plechy jsou na sebe ve vrstvách naskládány, slisovány a účinek slisování zajištěn ocelovými svorníky. Po délce je magnetický obvod rozdělen radiálními ventilačními kanály, které umožňují průchod chladícího vzduchu k vinutí.



Obr. 6: Magnetický obvod a vinutí statoru.

Kde:

1. magnetický obvod a vinutí statoru; 2. čela cívek vinutí; 3. nové klíny statoru (drážkové uzávěry) po revizi.

Vinutí statoru (obr. 6) je tyčové, smyčkové s nepřetržitou termoreaktivní izolací třídy B. Začátky jednotlivých fází vinutí statoru U, V a W jsou pomocí izolovaných kabelů vyvedeny do vysokonapěťové přípojovací svorkovnice, která se nachází v horní části statoru. Konce fází vinutí jsou vyvedeny do svorkovnice nulového uzlu, která se nachází na protilehlém

konci pláště statoru. Každá fáze je zakončena měřícím transformátorem proudu a následně jsou vzájemně propojeny do společného bodu, který tvoří uzel hvězdy [2].

Pro zamezení navlhnutí izolace stojícího elektromotoru nebo pro vysoušení izolace vinutí před spuštěním jsou ve statoru zabudovány elektrické ohříváky. Ty jsou zapojeny do dvou paralelních větví, z nichž každá má výkon 5 kW. Přívody jsou vyvedené na kolíkové spoje konektoru umístěného na tělese dolní křížové konstrukce [2].

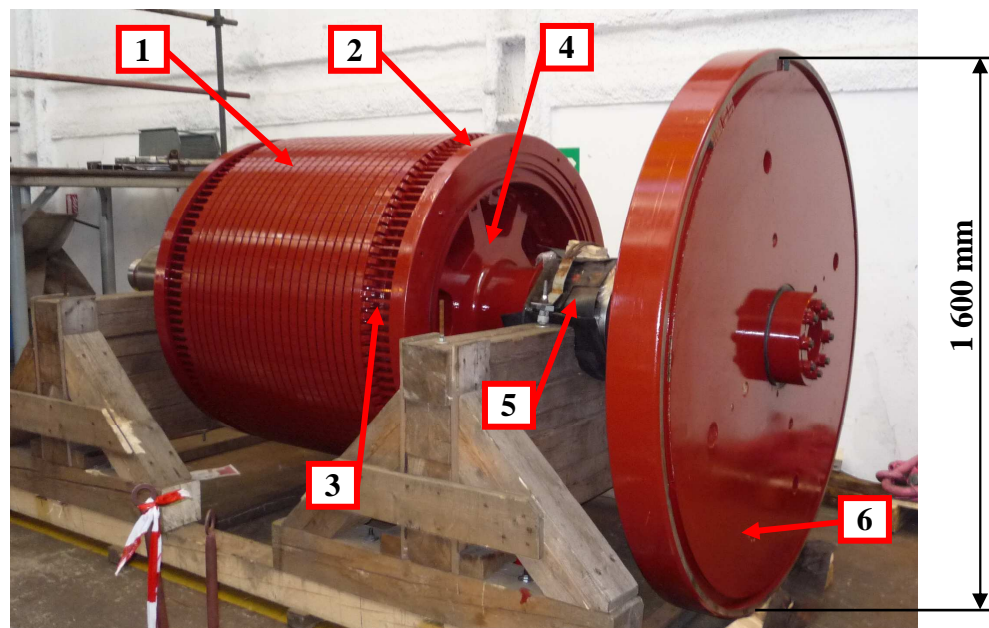
Kontrola teploty ložisek se provádí odporovými teploměry typu TCM-0979 instalovaných v ložiskových segmentech. Ohřev vinutí a magnetického obvodu statoru se kontroluje pomocí odporových teploměrů uložených do dna drážek magnetického obvodu. Teplota horkého a ochlazeného vzduchu se provádí odporovými teploměry TCM-6114 T, které jsou instalovány v komorách před a za vzduchovými chladiči. Všechny teploměry jsou vyvedeny na kolíkové spoje konektoru na plášti motoru [2].

3.3 Rotor

Rotor elektromotoru je v provedení nakrátko a je představen na obr. 7, který zachycuje stav po revizi v transportní poloze. Základní prvek představuje kovaná žebrovaná hřídel, jež je vyrobena z materiálu nejvyšší jakosti. Na ni je nalisován magnetický obvod. Ten se svým provedením a konstrukcí nijak neliší od magnetického obvodu statoru, opět je použito segmentových lisovaných a vzájemně izolovaných plechů z elektrotechnické oceli zajištěných svorníky [2].

Vinutí rotoru je provedeno z měděných tyčí ve tvaru lichoběžníku. Tyče jsou na své spodní straně, tzn. na dně drážky magnetického obvodu, po celé délce vyklínovány speciálními tangenciálními klíny. Na obou koncích tyčí jsou umístěny měděné zkratovací kruhy a provedeno zapájení, čímž vzniká tzv. klec rotoru. Na opracované plochy pájených spojů jsou nasazeny bandážní kruhy - nosná kola z nemagnetické oceli.

V dolní části hřídele rotoru je připevněn setrvačnický, který prodlužuje dobu doběhu hlavního cirkulačního čerpadla při výpadku elektrického napájení, čímž zajišťuje bezpečné dochlazování aktivní zóny reaktoru ve stanoveném čase. V centrálním otvoru dolní části hřídele rotoru je umístěno pouzdro s vnitřním ozubením, do kterého se zasouvá ozubení torzní tyče spojky [2]. Na hřídeli rotoru jsou osazena pouzdra, která tvoří funkční plochu kluzných ložisek. Na spodním konci je to pouzdro dolního vodícího ložiska, na horním konci hřídele pro patní a horní vodící ložisko [2].



Obr. 7: Rotor elektromotoru HCČ (po revizi, s nasazeným setrvačnickem).

Kde:

1. magnetický obvod; 2. dolní bandážní kruh; 3. tyče vinutí; 4. hřídel; 5. plocha dolního ložiska (v ochranném obalu); 6. setrvačnick.

3.4 Ložiska a mazací systém

Ložiska jsou kluzná, mazaná olejem sestavená z jednotlivých segmentů viz. obr. 8 a obr. 9. Systém mazání ložisek je cirkulační a je napájen z olejového systému čerpadla. Tlakový olej je přiváděn potrubím k elektromotoru do centrální části horní křížové konstrukce, kde je umístěna olejová nádrž o objemu 350 litrů. Tlak oleje na vstupu do motoru může být maximálně 0,6 MPa a teplota se musí pohybovat v rozsahu 20 – 41 °C. Pro zvýšení spolehlivosti dodávky oleje je mazací systému motoru vybaven zpětnou klapkou na přívodním potrubí mazacího oleje [2].

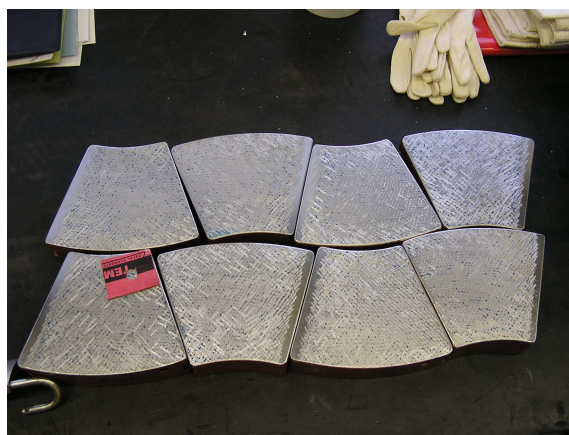
Z centrální nádrže je olej potrubím přiváděn do horního ložiskového uzlu, který je tvořen patním ložiskem a horním vodícím ložiskem, a dále do dolního ložiskového uzlu, tvořeného dolním vodícím ložiskem. Horní a dolní vodící ložiska jsou radiální. Třecí plocha segmentů je vyložena ložiskovou kompozicí a každý segment má izolaci pro ochranu od ložiskových proudů [2].

Patní (závěsné) ložisko se skládá z osmi samostavitelných segmentů, jejichž třecí plocha je rovněž vyložena ložiskovou kompozicí. Každý segment je umístěn na sférické hlavě

opěrného šroubu. Mezi segmenty a hlavou opěrného šroubu je umístěna měděná podložka napomáhající vyrovnávání axiální zátěže mezi segmenty. Po třecí ploše vyložené ložiskovou kompozicí se otáčí broušený ocelový disk, který je pomocí šroubů upevněn na hlavě patního ložiska a zajištěn kolíky. Otáčející se disk je izolován od hlavy patního ložiska sklotextitovou vložkou, čímž je chráněn proti ložiskovým proudům [2].



Obr. 8: Detail přípravy segmentů patního ložiska (zaškrabávání kompozice).



Obr. 9: Sada segmentů patního ložiska po revizi.

Konstrukce mazacího systému a ložisek, díky umístění olejové nádrže v horní části elektromotoru, zajišťuje i v případě náhlého výpadku napájení elektromotoru tlakovým olejem jeho bezpečný doběh až do úplného zastavení [2].

3.5 Chladicí systém

Provedení motoru je uzavřeného typu se čtyřmi zabudovanými chladiči vzduchu, které pracují na principu samočinné ventilace s uzavřeným oběhem. Chladiče vzduchu jsou rozmístěny v těle statoru mezi vinutím a vnějším pláštěm. Každý chladič je po délce rozdělen do tří sekcí. Vzduch ohřátý ve vinutí proudí do středních sekcí chladičů vzduchu, kde se rozděluje do dvou proudů, které postupují dál přes dolní a horní sekcí chladičů k čelním částím statorového vinutí a vrací se k rotoru. Cirkulace vzduchu probíhá díky tlaku vyvíjeného rotorem. Vodovodní část chladičů vzduchu je zapojena do dvou paralelních větví po dvou chladičích [2].

4. VÝZNAM A POŽADAVKY NA ÚDRŽBU V JADERNÉ ELEKTRÁRNĚ TEMELÍN

Pod pojmem údržba myslíme veškeré činnosti vedoucí k zajištění požadovaného technického stavu zařízení, k jeho znovuobnovení a udržení provozuschopnosti technologie v souladu s platnou projektovou dokumentací. V jaderné elektrárně jsou na rozdíl od ostatních subjektů přítomny ještě další specifické rysy údržby a oprav spojené zejména s [4]:

- přítomností ionizujícího záření
- vysokými nároky na organizaci práce
- přísnými požadavky na zajištění jakosti, jaderné bezpečnosti a spolehlivého provozu

Z těchto faktorů pak vyplývají zvláštní podmínky a požadavky na provádění údržby a oprav. Výkon správy a údržby zařízení je založen na správě technologických systémů. Technologický systém je základní jednotka pro plánování, rozpočtování, řízení prací, koordinaci a dokumentaci [4].

Rozdělení strojního vybavení na technologické systémy se řídí jejich funkcí ve výrobním procesu.

Z hlediska důležitosti dělíme technologické zařízení do čtyř kategorií [4]:

- kategorie 1 - zařízení významná pro bezpečnost
- kategorie 2 - zařízení významná pro výkonovou pohotovost
- kategorie 3 - zařízení nákladově významná
- kategorie 4 - zařízení ostatní

4.1 Systém a metody údržby

Program údržby každého technologického systému je popsán v Předpisu pro správu a údržbu příslušného technologického systému. Obsahuje úplný soupis všech činností údržbového a opravářského charakteru se stanovenou periodou nebo uvedeným předpokládaným výskytem a odkazy na technologické postupy, případně další dokumenty nutné k provedení stanovených činností. Metody údržby systémů jsou v Programu údržby určeny pracovními postupy s uvedením [4]:

- stanovených postupů a sledem jednotlivých operací
- potřeby realizačních kapacit a jejich kvalifikace
- potřeby přípravků, mechanismu, náradí a nástrojů
- potřeby náhradních dílů, spotřebních materiálů a hmot
- předpokládaných nákladů a dobou trvání

Pro údržbu zařízení v Jaderné elektrárně Temelín jsou aplikovány metody preventivní a korektivní údržby.

Periodická údržba se používá pro zařízení kategorie 1, 2 a 3. Periodu údržby stanovuje správce technologického systému na základě údajů z projektu, doporučení výrobce, technických norem, rozhodnutí dozorných orgánů nebo technického posouzení provozních a statistických údajů [4].

Prediktivní údržba se rovněž aplikuje pro zařízení kategorie 1, 2 a 3. A to pokud existuje diagnostický systém, je schválena metodika jeho použití pro vyhodnocení stupně degradace a existuje-li souhlas dozorných orgánů. Rozhodnutí o provedení údržby nebo o jejím odložení o další časové období vydává správce technologického systému. Rozhodnutí o neprovedení musí být doloženo průkazem o nesnížení jakosti požadované projektové funkce zařízení, vyhotoveného na základě vyhodnocení dosavadní historie zařízení - trendy provozních parametrů, výsledky funkčních zkoušek a provozních kontrol, atd. [4].

Korektivní údržba se používá pro zařízení kategorie 4 a pro odstranění neplánované neprovoznosti zařízení kat. 1, 2 a 3. Pro korektivní údržbu zařízení kategorie 1, 2 a 3 musí být stanovena spěšnost jeho opravy, která je definovaná číselným kódem v rozsahu 1 až 8 [4].

Realizace Programu údržby je zadávána pracovními příkazy. Po ukončení údržby a oprav musí být zařízení vyzkoušeno, aby bylo ověřeno dosažení cílů údržby a potvrzena provozuschopnost technologie před uvedením do provozu. Součástí Programu údržby jsou revize, provozní kontroly a zkoušky podle platné legislativy. Program údržby je prostřednictvím modulu řízení prací uložen v informačním systému elektrárny (ISE) Passport. Provedení a vyhodnocení údržby je dokumentováno a archivováno po dobu stanovenou řídicími postupy [4].

Pro bezproblémovou realizaci údržby dodavatelským způsobem je důležité také její plánování, které se realizuje dále do kategorií plánů [4]:

- roční plán
- měsíční plán
- osmidenní plán
- denní plán

4.2 Výkon údržby, Příkazy: P, R a B

P - příkaz (pracovní příkaz) je souhrn úkolů řazených tak, aby práce byla prováděna bezpečně, efektivně a hospodárně. Veškeré činnosti spojené s realizací údržbových a opravárenských prací musí být prováděny na základě platného P-příkazu a jeho příloh. P-příkaz je vystaven podle platných metodik výhradně v informačním systému elektrárny a je předán v tištěné podobě realizátorovi prací. Slouží jako zadání požadavku pro jeho činnost [4].

Součástí každého P-příkazu pro práci jsou:

- pracovní postup (PPO)
- zajišťovací příkaz
- R-příkaz
- formuláře protokolů
- seznam náhradních dílů a materiálu - žádanka na materiál

Plánované práce je každý realizátor povinen provádět zásadně na základě platného a schváleného pracovního postupu. Pracovní postup je základním dokumentem pro stanovení rozsahu, kvality a zajištění bezpečnosti práce v rámci plánované údržby a revizí. Musí v něm být uvedena upozornění a opatření nutná k zajištění bezpečnosti osob i zařízení, která přímo souvisí s postupem prováděných prací [4].

R - příkaz (radiační příkaz) je bezpečnostní dokument pro vykonání pracovních činností v kontrolovaném pásmu za stanovených podmínek. Definiuje místo, čas a podmínky k provedení práce, bezpečnostní opatření a prostředky radiační ochrany. Obsahuje údaje o složení pracovní skupiny a určuje osoby zodpovědné za dodržování pravidel radiační

ochrany při plnění pracovního úkolu. Činnost na pracovišti řídí vedoucí práce, který řídí členy pracovní skupiny a zodpovídá za výkon údržby a dodržování pravidel radiační ochrany. Obsah každého R-příkazu je individuální a vychází z nutného rozsahu práce, doby jejího trvání, z radiační situace a dosavadního čerpání osobních dávek radiace jednotlivých pracovníků v předchozím období [4].

B - příkaz (bezpečnostní příkaz) je technicko organizační opatření, které slouží k zajištění bezpečnosti osob při práci na elektrickém zařízení vysokého napětí (VN), velmi vysokého napětí (VVN) a zvláště vysokého napětí (ZVN), nebo v jeho blízkosti.

Vydává ho směnový mistr elektro, který je písemně pověřen hlavním technologem elektroprovozu. Platí vždy pouze pro jedno pracoviště, jednu pracovní skupinu a to maximálně 24 hodin. Jeho platnost začíná od okamžiku, kdy vedoucí práce převzal pracoviště do údržby. Před započítím práce musí vedoucí práce zapsat všechny členy pracovní skupiny do originálu formuláře B-příkazu a poučit je o bezpečnosti práce. Ti toto stvrzují svým podpisem.

U dlouhotrvajících prací (pokud je zařízení trvale odpojeno a zajištěno a vedoucí práce se po celou dobu nemění) může být B-příkaz vydán na delší dobu nejdéle však na jeden týden [4].

4.3 Předávání a přebírání zařízení do a z opravy

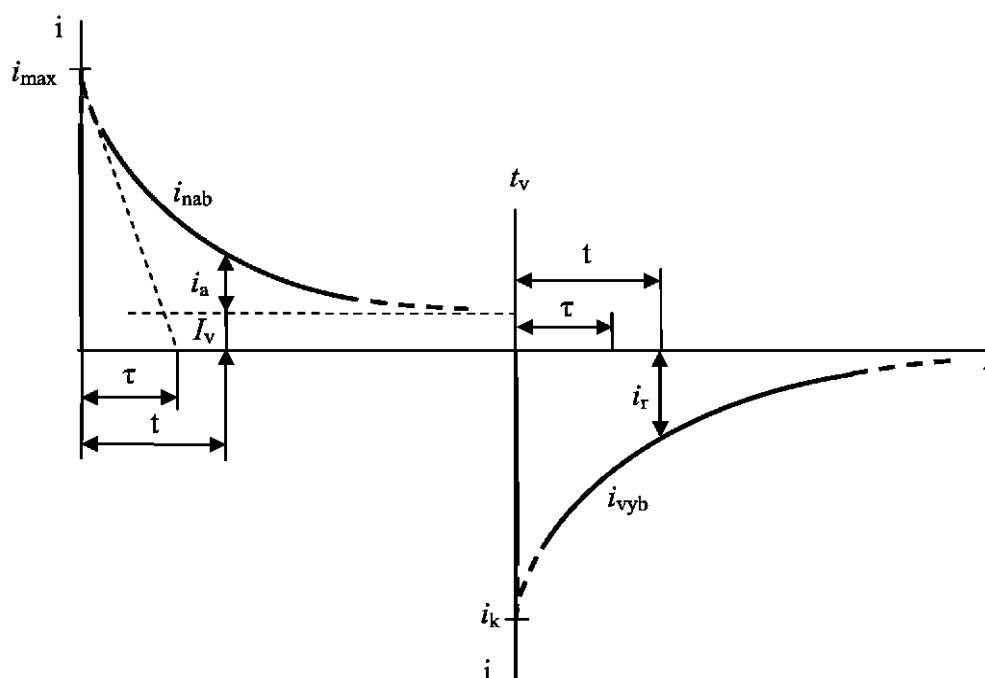
Předávání a přebírání zatížení probíhá v Jaderné elektrárně Temelín podle platné dokumentace zajištění jakosti. Na základě úkolu P-příkazu zařazeného do denního programu elektrárny provedou pracovníci provozu zajištění zařízení podle zajišťovacího příkazu. Předání pracoviště do údržby probíhá mezi odborem řízení provozu a vedoucím pracovní skupiny dodavatele a je dokladováno podpisy obou účastníků na titulním listu úkolu P-příkazu a podpisem příslušné obsluhy technologie na kontrolním seznamu na zajištění. Po řádném předání pracoviště provede pracovní skupina pod vedením svého vedoucího činnosti přesně podle zadání P-příkazu a pracovního postupu [4].

Převzetí pracoviště z údržby do provozu probíhá mezi vedoucím pracovní skupiny a odborem řízení provozu na pracovním místě a je opět dokladováno podpisy obou zúčastněných stran na P-příkazu a podpisem příslušné obsluhy technologie na kontrolním seznamu zajištění [4].

5. MĚŘENÍ IZOLAČNÍHO ODPORU A POLARIZAČNÍHO INDEXU

Izolační systém elektrického stroje je nehomogenní dielektrická soustava umístěná mezi dvěma elektrodami. První elektroda je tvořena vodičem vinutí dané fáze a druhá elektroda je stator se všemi uzemněnými částmi. Po přiložení zkušebního stejnosměrného napětí se v obvodu odehrávají přechodové jevy spojené s nabíjením kapacity, zobrazené na obr. 10 [6].

Izolační odpor je poměr konstantního stejnosměrného napětí připojeného na vybitou izolaci a proudu protékajícího izolačním systémem v předem definovaném čase.



Obr. 10: Časový průběh proudu při nabíjení a vybíjení kondenzátoru [7].

Proud protékající izolačním systémem má tři hlavní složky [8]:

- **kapacitní proud** (i_{\max}) neboli nabíjecí proud. Je dán vnitřním odporem zdroje, zaniká velice rychle v okamžiku, kdy je na zkoušeném předmětu plné napětí.
- **absorpční proud** (i_a) je způsoben polarizací dielektrika. Reprezentuje pohyb vázaných nosičů elektrického náboje v dielektriku.
- **vodivostní proud** (I_v) označovaný jako svodový. Je to proud protékající izolací a způsobuje činné ztráty v izolaci. Je vytvořen volnými nosiči elektrického náboje v dielektriku.

Obecně, pro výpočet izolačního odporu R_x vycházíme ze vztahu [6]:

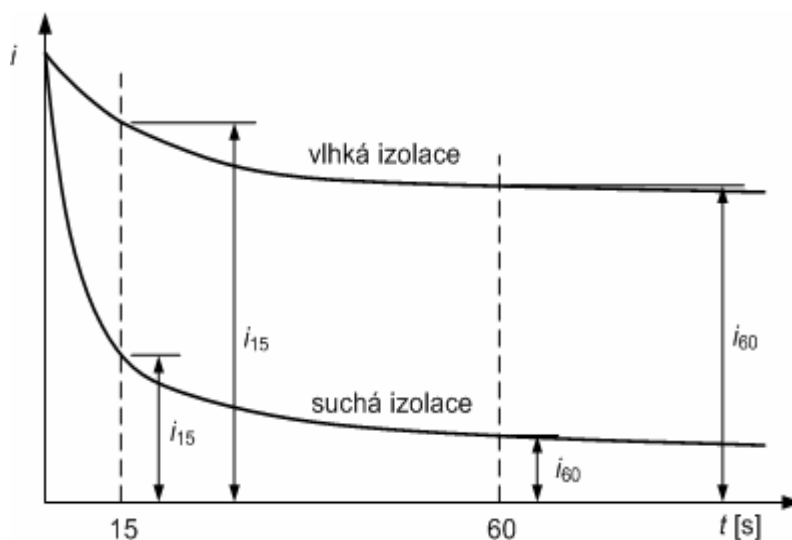
$$R_x = \frac{U}{I} \quad (1)$$

Kde:

U je velikost stejnosměrného měřicího napětí [V].

I je velikost proudu protékajícím izolačním systémem v průběhu měření [A].

Jeho měření je jednou z nejstarších technik ověřování technického stavu a kvality izolační soustavy elektrických strojů. Zjišťuje se velikost odporu izolace mezi jednotlivými vinutími fází a mezi vinutími a uzemněnými částmi, popř. se zjišťuje závislost izolačního odporu na době měření, na velikosti měřicího napětí apod. [5] , [8]. Zdánlivě nízký izolační odpor se po připojení stejnosměrného měřicího napětí postupně zvyšuje a s poklesem absorpčního proudu se ustálí na hodnotě odpovídající velikosti vodivosti dielektrika neboli množství volných elektrických nábojů v něm obsažených. Hodnota naměřeného izolačního odporu závisí na velikosti měřicího napětí. Při vyšším napětí se obvykle naměří nižší hodnoty izolačního odporu.



Obr. 11: Časová závislost proudu v suché a vlhké izolaci [7].

Je-li stroj suchý a čistý, velikost izolačního odporu se v prvních deseti minutách měření zvětšuje, jak můžeme vidět na obr. 15 viz. charakteristika 1. Tomu odpovídá průběh proudu dielektrickým systémem znázorněným na obr. 11 v charakteristice nazvané „suchá izolace“. Pokud je však přítomná vlhkost, nebo prvky, které umožňují vedení elektrického proudu, velikost izolačního odporu vzrůstá velice krátce, případně setrvává na stejné úrovni,

viz. obr. 15 charakteristika 2 a průběh proudu obr. 11, charakteristika označená jako „vlhká izolace“ [6].

Minimální velikost izolačního odporu je obvykle doporučena výrobcem stroje. Pokud tomu tak není, můžeme dle doporučení [9] vycházet ze vztahu:

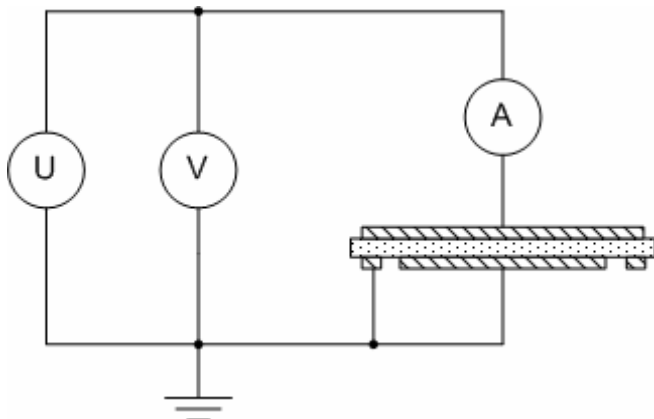
$$R_{iz} = \frac{U_N}{\frac{P_N}{100} + 1000} \quad (2)$$

Kde:

R_{iz} je izolační odpor v [MΩ]; U_N je jmenovité napájecí napětí [V]; P_N je jmenovitý výkon stroje [kW].

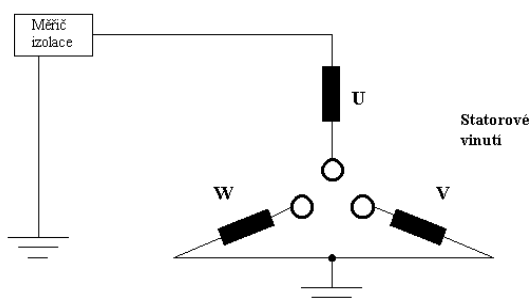
5.1 Postup měření

Pro měření izolačního odporu se používají přístroje, které mají vlastní zdroj stejnosměrného vysokého napětí. Pracují na principu měření volt-ampérové charakteristiky.

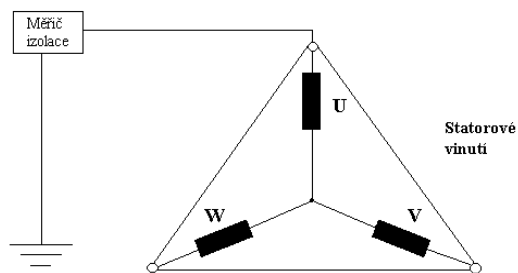


Obr. 12: Voltampérová metoda pro měření odporu [6] .

Měřicí napětí o velikosti 5000 V se přiloží na vstup měřené fáze. Ostatní fáze, které nejsou měřeny se na vstupu uzemní. Druhý konec každé fáze zůstane nezapojen. Měření se provede ve všech třech fázích samostatně. Několikafázové vinutí, u kterého nejsou začátky a konce jednotlivých fází vyvedeny na zvláštní svorky, se zkouší jako celek, jehož vývody jsou navzájem vodivě spojeny. Měřené vinutí je připojeno na záporný pól zdroje napětí. Na kladný pól zkušebního zdroje se připojí kostra stroje vodivě spojená se zemí a s ostatními vinutími. V průběhu měření se na displeji měřícího přístroje zobrazuje velikost izolačního odporu [6].



Obr. 13: Schéma zapojení pro měření izolačního odporu statorového vinutí s rozpojeným uzlem [6].



Obr. 14: Schéma zapojení pro měření izolačního odporu statorového vinutí s nerozpojeným uzlem [6].

Důležitým parametrem, který získáme v průběhu měření izolačního odporu je tzv. polarizační index, respektive polarizační indexy. V literatuře se označuje jako činitel absorpce nebo činitel polarizace. Přináší informaci o stavu materiálu na základě změny časového průběhu absorpčního proudu v průběhu měření. Používá se polarizační index minutový označovaný jako p_{i60} a desetiminutový p_{i600} [6].

Měřená veličina izolačního odporu se obvykle odečítá v časech 15 vteřin, 60 vteřin a poté každých dalších 60 až do 600 vteřin po připojení stejnosměrného měřicího napětí.

Z těchto hodnot se vypočítá jednodinutový a desetiminutový polarizační index podle vztahu [6]:

$$p_{i60} = \frac{R_{iz60}}{R_{iz15}} = \frac{i_{15}}{i_{60}} = \frac{i_{a15} + i_{\infty}}{i_{a60} + i_{\infty}} \quad (3)$$

$$p_{i600} = \frac{R_{iz600}}{R_{iz60}} = \frac{i_{60}}{i_{600}} = \frac{i_{a60} + i_{\infty}}{i_{a600} + i_{\infty}} \quad (4)$$

Kde:

R_{iz15} je hodnota izolačního odporu v odečtená v čase 15 s po zapojení měřicího napětí.

R_{iz60} je hodnota izolačního odporu v odečtená v čase 60 s po zapojení měřicího napětí.

R_{iz600} je hodnota izolačního odporu v odečtená v čase 600 s po zapojení měřicího napětí.

i_{15} , i_{60} a i_{600} jsou odpovídající absorpční proudy.

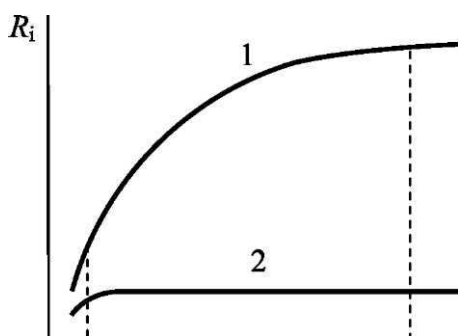
i_{∞} jsou ustálené vodivostní proudy.

Jde o poměr izolačních odporů získaných v různých časech, přičemž izolační odpor změřený v pozdějším čase je vždy v čitateli zlomku. Polarizační index je veličinou

charakterizující skutečný technický stav izolace. Platí, že se zmenšuje se stoupajícím obsahem vlhkosti v izolaci a stoupající teplotou.

Obecně platí, že při suché a čisté izolaci stoupá velikost izolačního odporu pozvolna a ustálená hodnota se dosáhne až po relativně dlouhé době, jak vidíme na obr. 15, charakteristika 1. Naopak, při navlhle izolaci stoupá velikost odporu relativně rychle, ovšem velice krátce, jak představuje na stejném obrázku charakteristika 2.

Je-li hodnota polarizačního indexu větší než 2, znamená to, že absorpční proudy ve statorové izolaci trvaly poměrně dlouho dobu a indikuje to dobrou, nenavlhlou a nedegradovanou izolaci. Blíží-li se polarizační index jedné, je to pravděpodobně způsobeno navlhlostí, znečištěnou nebo degradovanou izolací [6], [7], [10].

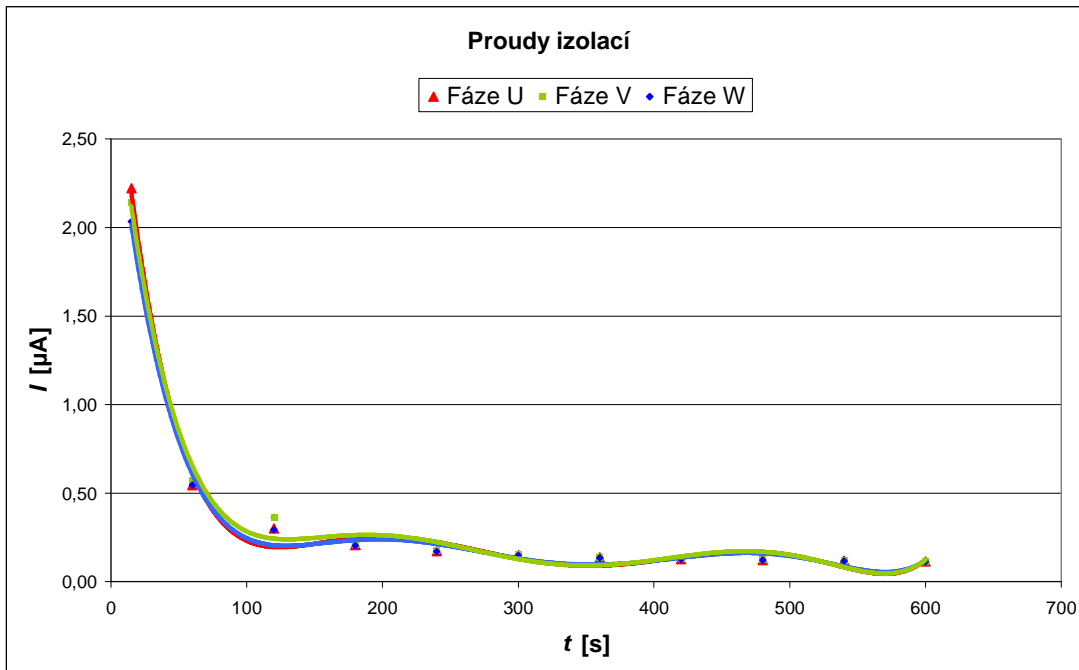


Obr. 15: Časová závislost izolačního odporu suché (1) a vlhké (2) izolace [10].

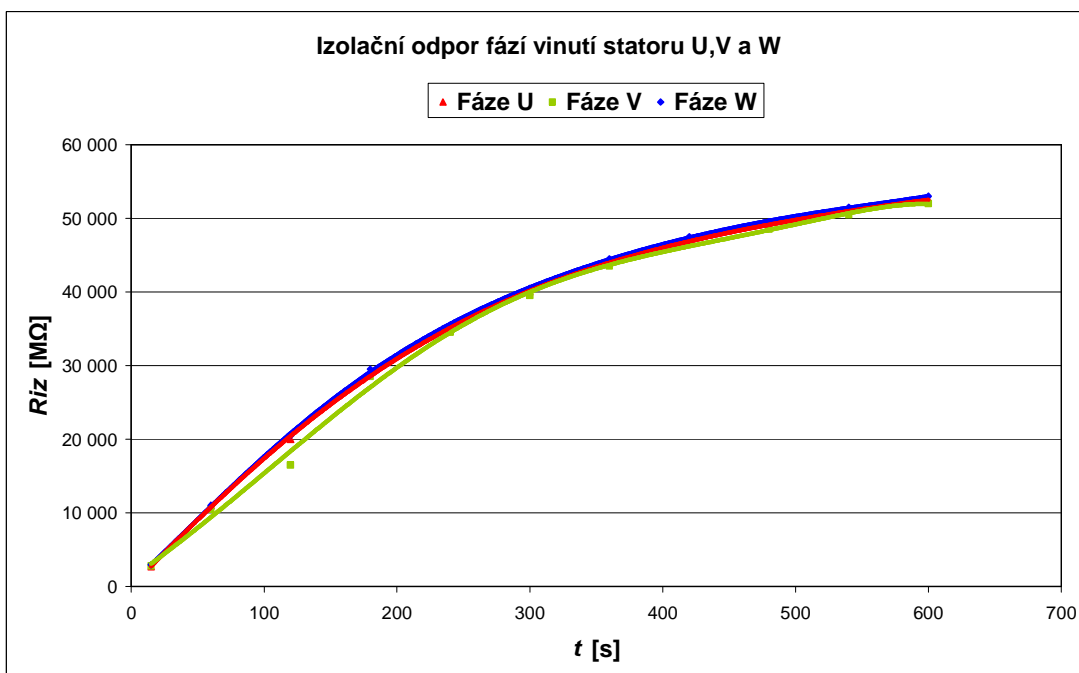
Velikost a průběh závislosti izolačního odporu v čase je jedním ze základních údajů, charakterizujících technický stav izolace. Nelze jej však chápat jako jediné možné uplatňované kritérium, pro stanovení spolehlivosti a provozuschopnosti stroje. Měření izolačního odporu, respektive velikost naměřených hodnot je považována za informativní veličinu, která slouží jako výchozí údaj k určení dalšího postupu měření.

5.2 Analýza výsledků a naměřených hodnot

Naměřené výsledky jsou prezentovány v grafické podobě. Tabulky naměřených hodnot jsou přiloženy do přílohy číslo 2. V prvním grafickém průběhu na obr. 16 můžeme sledovat průběh proudů protékajících izolačním systémem, zobrazený pro všechny tři fáze vinutí statoru. Je vidět, že v každé fázi vinutí statoru absorpční složka velice intenzivně klesá a poté velikost proudu setrvává na hodnotě danou množstvím volných nábojů.



Obr. 16: Průběh proudu v izolaci ve fázi vinutí statoru U, V a W.



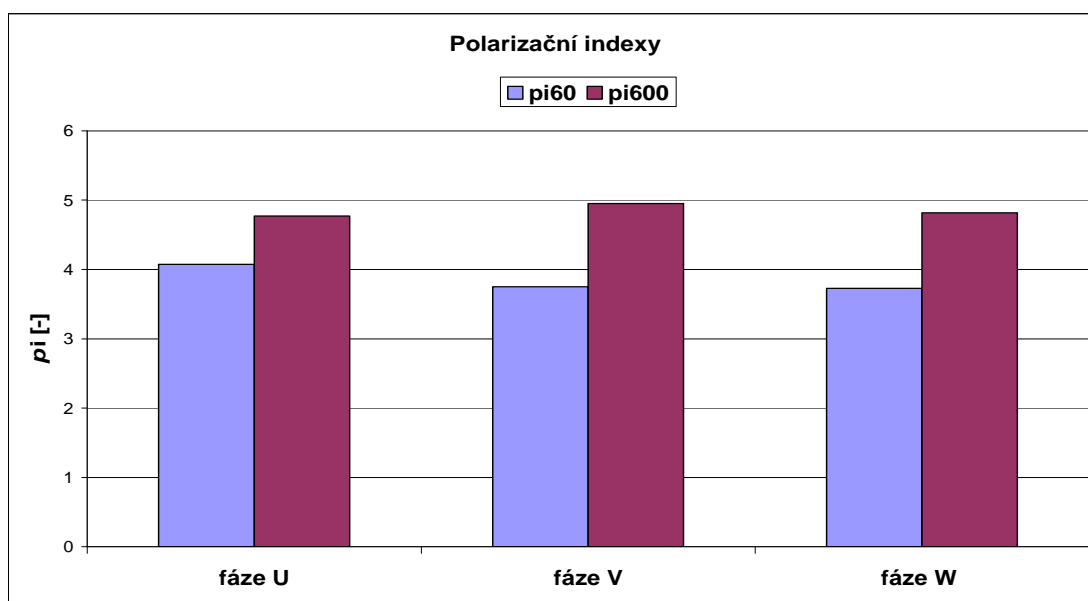
Obr. 17: Průběh izolačního odporu v čase pro fáze vinutí statoru U, V a W.

Průběhy jsou téměř zcela identické ve všech třech měřených fázích vinutí statoru. Drobnou odchylku můžeme pozorovat ve fázi vinutí statoru V, čase $t = 120$ s, kdy na rozdíl od ostatních fází U a W zde nedošlo k tak velkému poklesu proudu. Z naměřených hodnot proudů protékajících izolačním systémem byla podle vzorce (1) vypočtena velikost

izolačních odporů každé fáze vinutí statoru. Výsledky jsou ukázány druhém grafu na obr. 17. I zde je patrná drobná odchylka velikosti izolačního odporu fáze V v čase $t = 120$ s.

Z výsledků naměřených hodnot jednoznačně plyne, že absolutní hodnota velikosti izolačního odporu splňuje předepsané požadavky. Zásadně pozitivní je i celkový průběh závislosti izolačního odporu, bez ohledu na jeho velikost, kdy vykazuje ve všech třech měřených fázích vinutí statoru téměř identický průběh. Porovnáním s obr. 15 můžeme deklarovat, že průběh izolačního odporu ve všech třech měřených fázích vinutí statoru odpovídá suché izolaci.

Ve třetím grafu na obr. 18 jsou prezentovány vypočtené hodnoty velikosti polarizačních indexů p_{i60} a p_{i600} . Je vidět, že mají vynikající hodnotu i vyrovnaný průběh, p_{i600} dosahuje ve všech fázích vinutí statoru téměř identických hodnot, p_{i60} má nejlepší výsledky ve fázi vinutí statoru U. Zbývající fáze V a W mají nižší, avšak stále prokazatelně vysokou hodnotu.



Obr. 18: Znárodnění velikosti p_{i60} a p_{i600} pro fáze vinutí statoru U, V a W.

Naměřené výsledky svědčí o stejné kvalitě, stejném opotřebení izolace ve všech třech fázích vinutí statoru. Můžeme konstatovat, že stárnutí a provozní opotřebení stroje je symetrické a na nízké úrovni. Naměřené hodnoty s velkou rezervou splňují kritéria uvedená v předpisu výrobce [11], stejně tak i doporučení podnikových [12] a českých (evropských) technických norem [9].

6. MĚŘENÍ ZÁVISLOSTI IZOLAČNÍHO ODPORU NA STEJNOSMĚRNÉM NAPĚTÍ

Metoda měření závislosti velikosti izolačního odporu na stejnosměrném napětí je založena na principu poměrné odchylky průběhu proudu izolačním systémem, od průběhu proudu, který odpovídá Ohmovu zákonu.

Tato odchylka nebo přesněji řečeno její velikost, nese informaci o blížících se nevratných změnách v izolačním systému [6]. Určujeme ji z průběhu charakteristiky $I_{\text{izol}} = f(U)$. Podstatou metody je stanovení velikosti η definované jako odchylka zobrazená na obr. 19 a vypočítaná ze vztahu [6]:

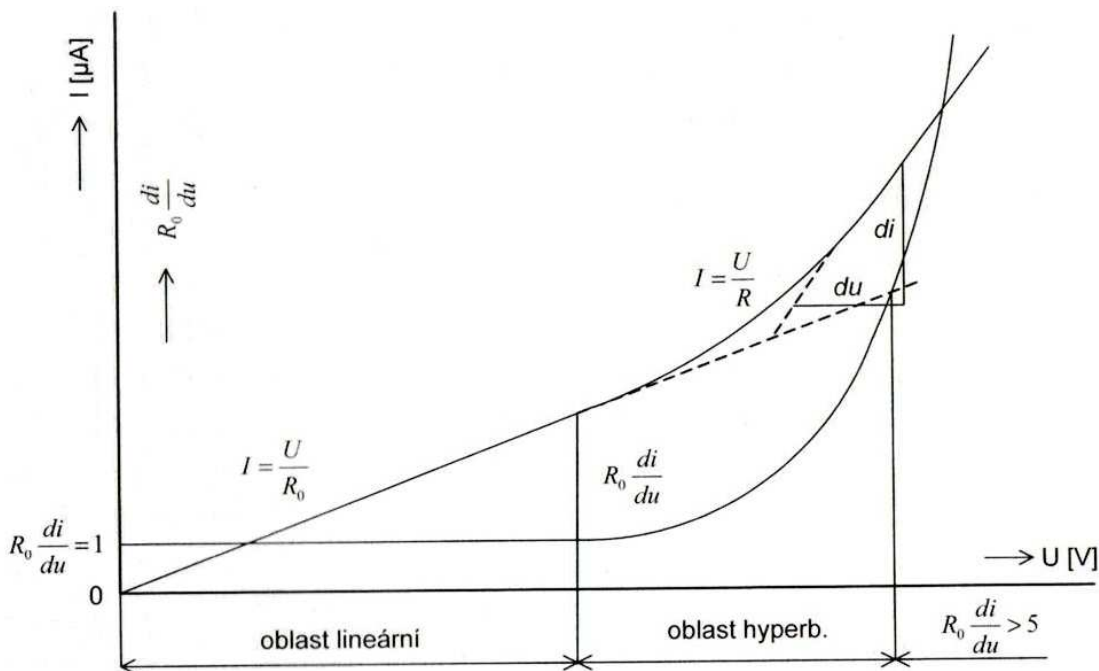
$$\eta = \frac{R_0 \cdot di}{du} \quad (5)$$

Kde:

R_0 je izolační odpor měřeného objektu naměřený při nižším měřicím napětí.

Poměr di/du představuje strmou křivky která vyjadřuje závislost izolačního odporu v určitém bodě závislosti.

Pokud by proud měřené veličiny odpovídal Ohmovu zákonu, byl by výsledek roven jedné. Jestliže se však velikost proudu v izolaci začne výrazně zvyšovat, dojde ke ztrátě linearitu a adekvátně začne růst i veličina η [6].



Obr. 19: Znárodnění poměrné odchylky od Ohmova zákona [6].

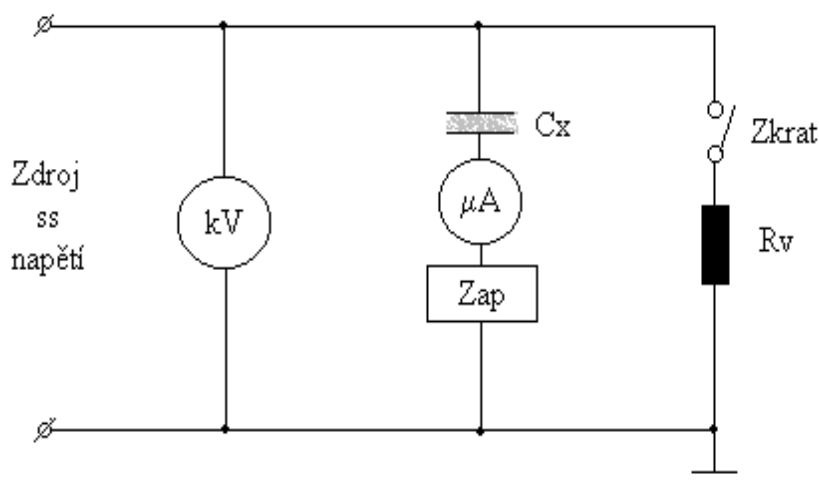
Empiricky bylo zjištěno, že velikost η počínaje 5 až 7, je signálem dosažení kritického napětí, při kterém může docházet k nevratným defektům v izolaci. Následek těchto defektů může být zakončen elektrickým průrazem.

Velikost proudu protékajícího izolačním systémem je přímo úměrná kvalitě izolace. Z toho důvodu může být uvedena veličina chápána jako teoretická informace o blížící se destrukci izolačního systému [6].

6.1 Postup měření

Stejnoseměrné měřící napětí se přiloží na vstup měřené fáze. Měření se provede ve všech třech fázích samostatně. Několikafázové vinutí, u kterého nejsou začátky a konce jednotlivých fází vyvedeny na zvláštní svorky se zkouší jako celek, jehož vývody jsou navzájem vodivě spojeny [13].

Na měřené vinutí se přiloží stejnosměrné napětí a plynule se nastaví výchozí hodnota 3,0 kV. Nabíjecí proud I_b protékající izolačním systémem se odečítá v čase $t = 60$ a $t = 180$ sekund. Přiložené napětí se na měřené fázi ponechá po dobu 10 minut. Postup se opakuje na napěťových hladinách 6, 9 a 12 kV [5]. Maximální měřící stejnosměrné napětí nemá být menší než 50 % sdružené hodnoty zkušebního napětí [13].



Obr. 20: Schéma zapojení pro měření napěťové závislosti izolačního odporu na stejnosměrném napětí [13].

Kde:

kV je elektrostatický milivoltmetr; C_x je měřená izolace fáze vinutí statoru; μA je mikroampérmetr; Zap je grafický zapisovač; Zkrat je zkratovací zařízení; R_v je vybíjecí odpor.

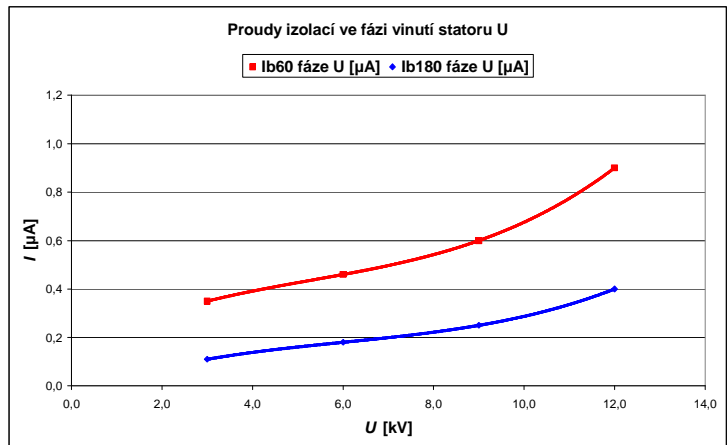
6.2 Analýza výsledků a naměřených hodnot

Tabulka naměřených hodnot se nachází v příloze číslo 3. Naměřené výsledky jsou prezentovány na obr. 21 - 23. Je zobrazen grafický průběh velikosti proudu izolačním systémem na přiloženém stejnosměrném napětí pro každou fázi vinutí statoru zvlášť. Ve stejném rozsahu je na obr. 24 - 26 předložena i grafická závislost velikosti izolačního odporu na přiloženém stejnosměrném napětí, pro každou fázi vinutí statoru zvlášť. Každá z měřených charakteristik je zobrazovaná ve dvou časových rovinách. První po jedné minutě od doby přiložení zkušebního stejnosměrného napětí, tj. hodnoty označené R_{iz60} a I_{b60} . Druhá po třech minutách tj. hodnoty označené R_{iz180} a I_{b180} .

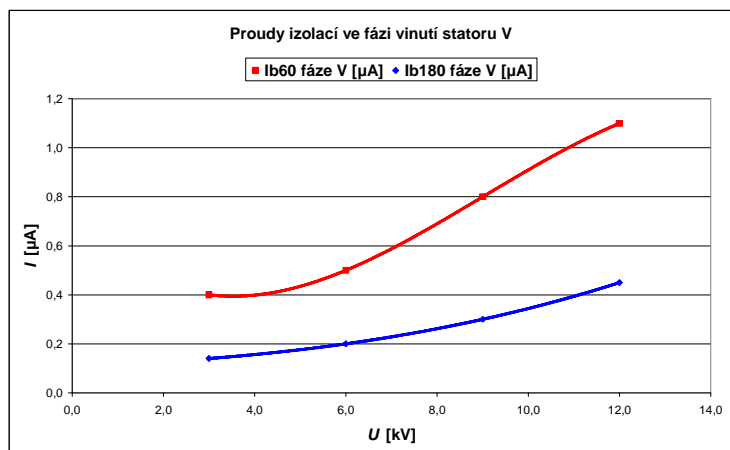
Z grafických průběhů je patrný velice podobný trend průběhu proudů izolačním systémem a to ve všech třech fázích vinutí statoru. Tato skutečnost navazuje na předchozí metodu měření velikosti izolačního odporu, kde výsledek v podobě stejného průběhu izolačního odporu ve všech třech fázích vinutí statoru deklaruje velice podobný technický stav vinutí každé fáze. Co do velikosti hodnot se jako horší jeví fáze V. Sledovaná veličina η v žádném případě nevykazuje hodnotu vyšší než 1,5 což je pozitivní výsledek. Indikuje tak, že v izolaci nejsou defekty vážného charakteru.

Grafické průběhy závislosti velikosti izolačního odporu na obr. 24 - 26 odpovídají průběhům proudů izolačním systémem viz. obr. 21 - 23. Z obr. 25 vyplývá nižší izolační odpor fáze vinutí statoru V o cca 4 M Ω . Ostatní fáze vinutí statoru U a W jsou identické. Dle [12] splňují naměřené hodnoty předepsané kritérium, které je definováno jako povinný přírůstek velikosti izolačního odporu naměřeného po třech minutách oproti velikosti izolačního odporu naměřeného po jedné minutě, od přiložení stejnosměrného měřicího napětí.

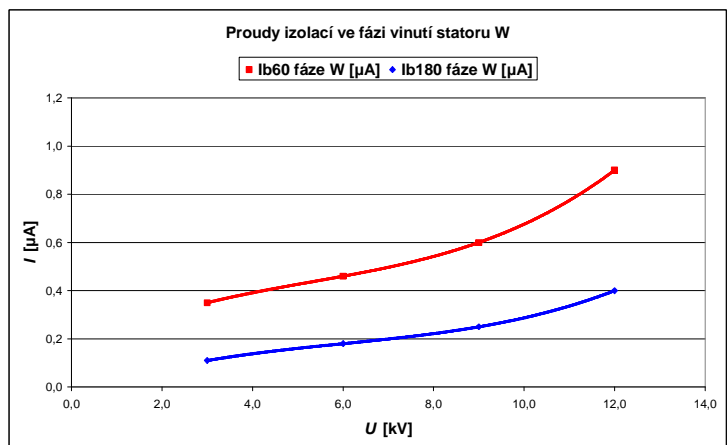
Hodnoty izolačního odporu na obr. 24 - 26 jsou proloženy aproximovanou křivkou, která poskytuje informaci o teoretické velikosti napětí, při kterém by izolační systém nebyl schopen plnit svou funkci, kdy by jeho velikost byla nulová. Z grafických průběhů je patrné, že měřené fáze U a W mají tuto velikost okolo 18,5 kV a fáze V na hranici 18,0 kV. To vzhledem k jmenovitému napájecímu napětí elektromotoru vyjadřuje dostatečnou rezervu a potvrzuje dobrý technický stav izolace vinutí ve všech třech měřených fázích.



Obr. 21: Průběh proudu izolacním systémem v závislosti na napětí ve fázi vinutí U



Obr. 22: Průběh proudu izolacním systémem v závislosti na napětí ve fázi vinutí V

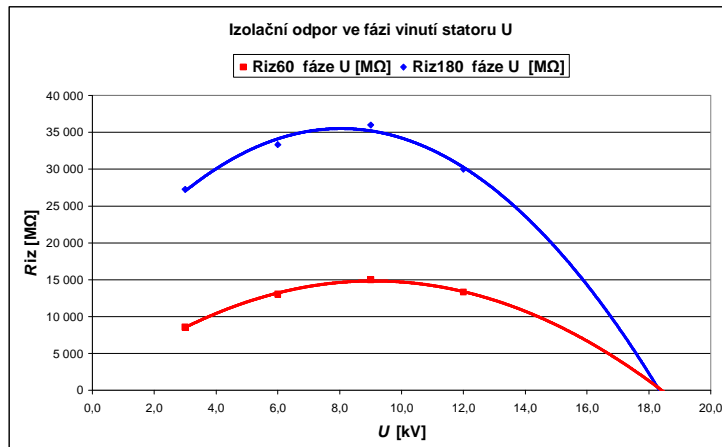


Obr. 23: Průběh proudu izolacním systémem v závislosti na napětí ve fázi vinutí W

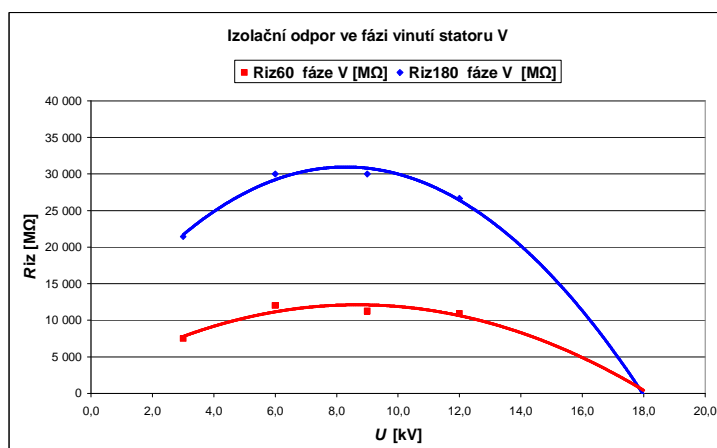
Pro výše uvedené obr. 21 - 23 platí:

I_{b60} je velikost proudu protékajícího izolacním systémem po jedné minutě od připojení stejnosměrného napětí v μA .

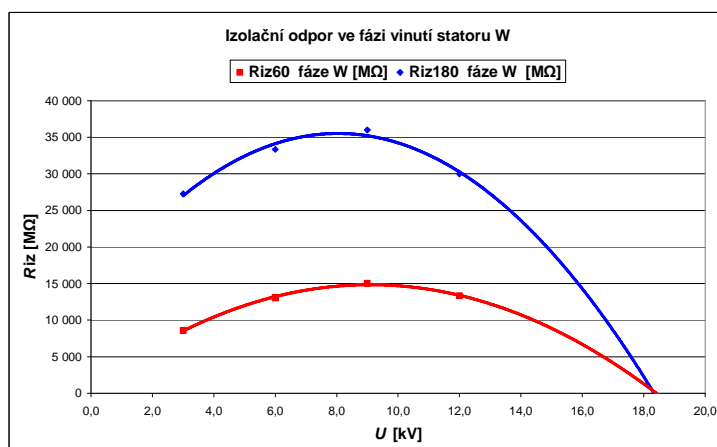
I_{b180} je velikost proudu protékajícího izolacním systémem po třech minutách od připojení stejnosměrného napětí v μA .



Obr. 24: Průběh závislosti izolačního odporu na stejnosměrném napětí ve fázi vinutí U



Obr. 25: Průběh závislosti izolačního odporu na stejnosměrném napětí ve fázi vinutí V



Obr. 26: Průběh závislosti izolačního odporu na stejnosměrném napětí ve fázi vinutí W

Pro výše uvedené obr. 24 -26 platí:

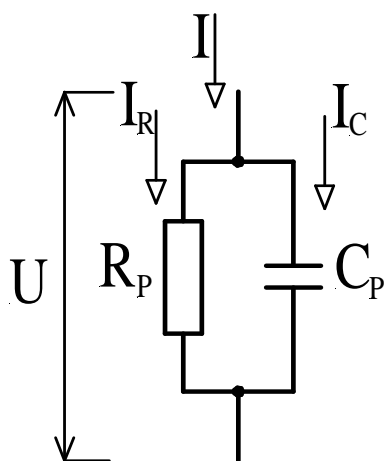
R_{iz60} je velikost izolačního odporu po jedné minutě od připojení stejnosměrného napětí v MΩ.

R_{iz180} je velikost izolačního odporu po třech minutách od připojení stejnosměrného napětí v MΩ.

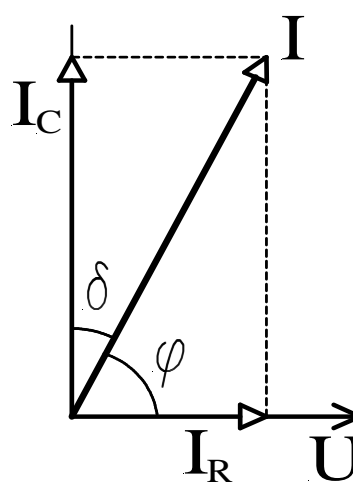
7. MĚŘENÍ KAPACITY A ZTRÁTOVÉHO ČINITELE

Měření spadá do kategorie zkoušek prováděných na principu střídavého napětí. To je zásadní rozdíl oproti předcházejícím výše uvedeným metodám, které spočívaly na principu stejnosměrného napětí. Vycházíme z podstaty náhradního schématu ideálního dielektrika, které má nulový ztrátový úhel, tedy i nulový ztrátový činitel a jeho fázový posuv napětí a proudu činí 90 stupňů [7].

V reálném prostředí však nikdy nedosáhneme ideálního stavu a musíme zohlednit ztráty, které v dielektriku vznikají při působení stejnosměrného i střídavého napětí. Příčinou vzniku těchto ztrát je pohyb nosičů elektrického náboje v dielektriku. Při působení stejnosměrného proudu na dielektrikum je rozhodující pro velikost dielektrických ztrát procházející vodivostní proud, který je příčinou vzniku následných tepelných ztrát. Ve střídavém elektrickém poli se uplatňují navíc i ztráty ionizační a platí, že ztráty ve stejnosměrném poli jsou mnohem menší než ztráty ve střídavém poli. Pro posouzení kvality dielektrika se používá pojem ztrátový činitel $\text{tg}\delta$ [7].



Obr. 27: Náhradní schéma s paralelním ztrátovým odporem [7].



Obr. 28: Fázový diagram [7].

Ztrátový činitel $\text{tg}\delta$ je definován jako tangens úhlu, o který se liší fázový posuv proudu zkoušeného izolantu od fázového posuvu proudu ideálního bezztrátového dielektrika [14].

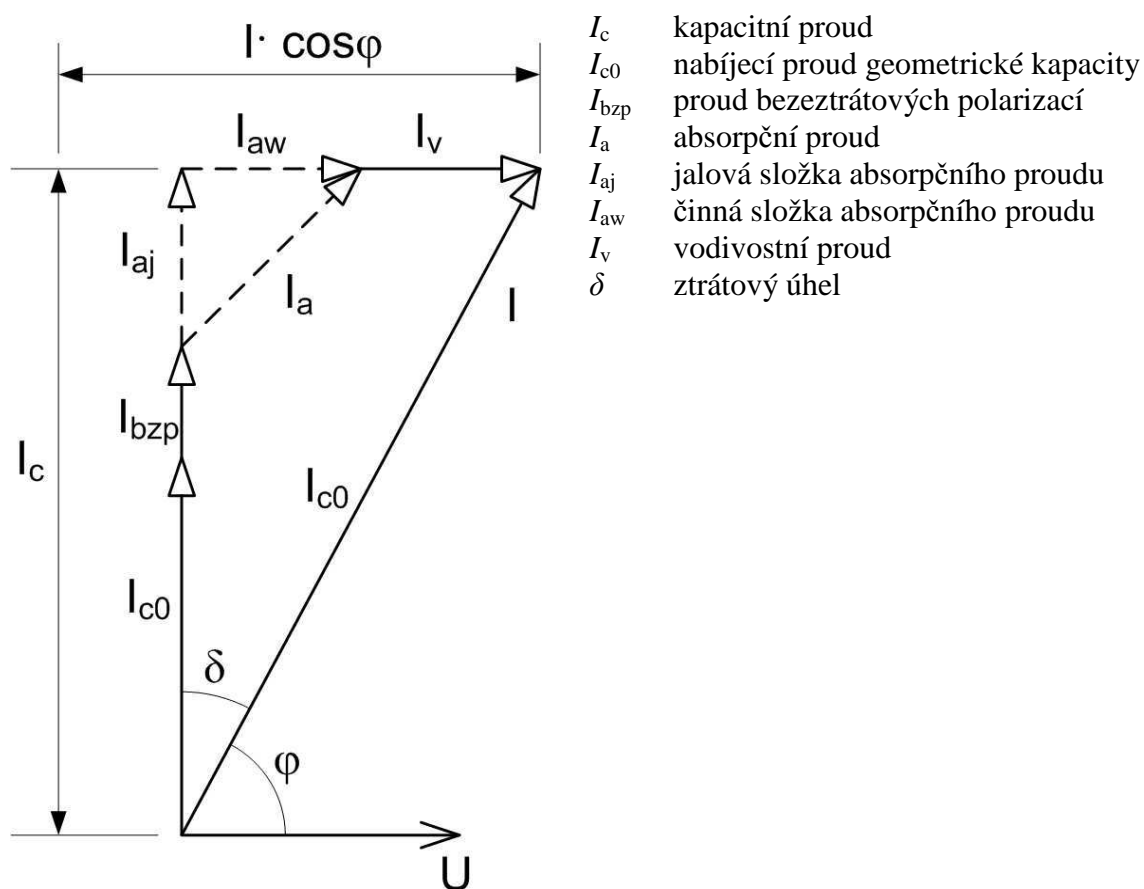
Z fázového diagramu na obr. 28 a obr. 29 plyne vztah [7]:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{1}{\omega C_P R_P} \quad (6)$$

Přičemž:

$$I_R = I_{aw} + I_V \quad (7)$$

Následující obr. 29 znázorňuje reálné dielektrikum po vložení do elektrického pole [7].

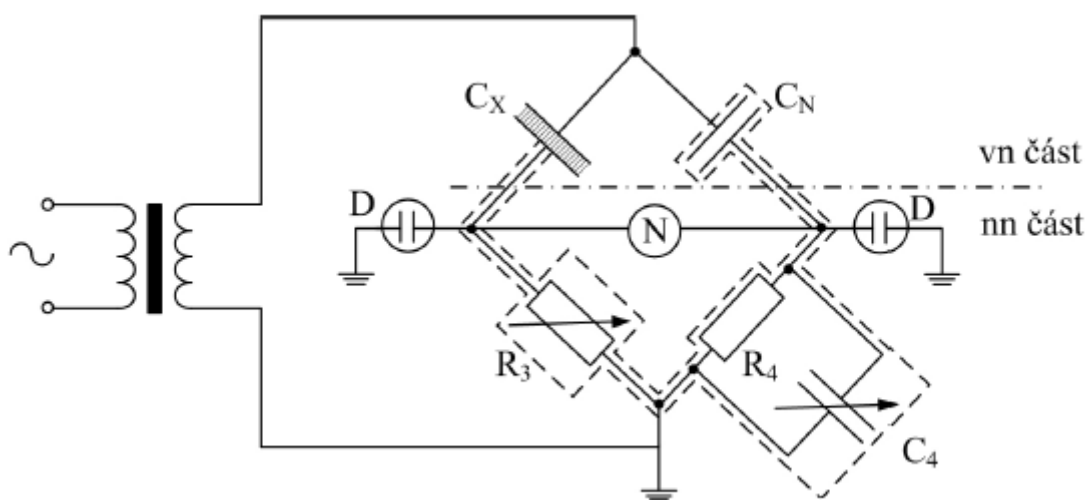


Obr. 29: Fázový diagram reálného dielektrika [7].

Z uvedeného fázového diagramu na obr. 29 je patrné, že u reálného dielektrika je fázový posun $\varphi = 90^\circ$ zmenšen o ztrátový úhel δ [7]. Tento můžeme považovat jako množství

energie, která se přemění v teplo. Velikost ztrátového činitele je parametr pro posouzení stavu (stárnutí) izolačního systému. Teplota stroje ovlivňuje absolutní velikost $\text{tg}\delta$ a nemá podstatný vliv na velikost kapacity. Kapacita C se udává v μF , $\text{tg}\delta$ je bezrozměrné číslo. Ze změn průběhů $\text{tg}\delta = f(U)$ lze usuzovat na stav izolačního systému [14].

Nejpoužívanější měřicí metoda je založena na principu Scheringova můstku a je znázorněná na obr. 30.



Obr. 30: Scheringův vysokonapěťový můstek [6].

Kde:

N je nulový indikátor.

D je svodič přepětí - ochrana obsluhy při případném průrazu vzorku.

C_N je kapacitní normál – vysokonapěťový kondenzátor se zanedbatelnými ztrátami.

R_3 je vyrovnání kapacitní složky sériového náhradního obvodu.

$R_4 \parallel C_4$ jsou nízkonapěťové prvky vyrovnání odporové složky náhradního obvodu.

Pro vyrovnaný můstek platí vztah:

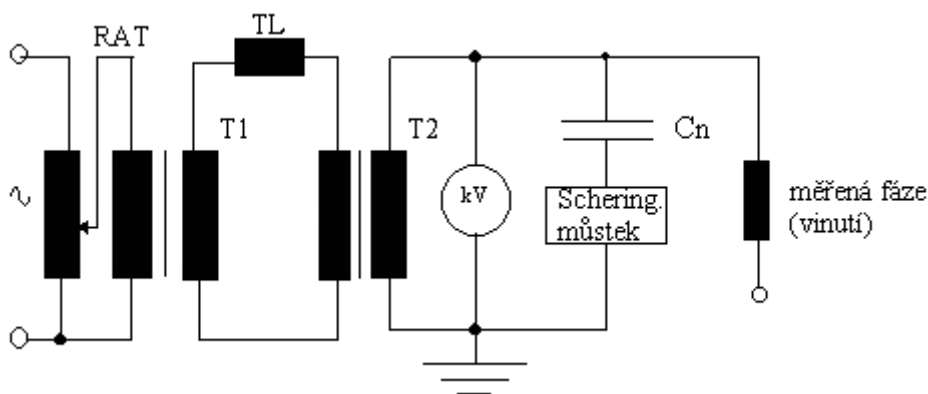
$$C_s = C_x = C_N \cdot \frac{R_4}{R_3} \quad (8)$$

Kde ztrátový činitel vyjádříme:

$$\text{tg}\delta = \omega C_s R_s = \omega R_4 C_4 \quad (9)$$

7.1 Postup měření

Výchozí podmínky a počáteční úkony jsou shodné jako v předchozích diagnostických metodách 5.1 a 6.1. Měření se provede ve všech třech fázích samostatně. Několikafázové vinutí, u kterého nejsou začátky a konce jednotlivých fází vyvedeny na zvláštní svorky, se zkouší jako celek, jehož vývody jsou navzájem vodivě spojeny. Zjišťuje se napěťová závislost ztrátového činitele a kapacity v intervalu od 0,2 do 1,0 jmenovitého napětí, přičemž přiložené napětí je zvyšováno postupně po krocích 0,1 sdružené hodnoty jmenovitého střídavého napětí v zapojení dle [14] zobrazeném na obr. 31.



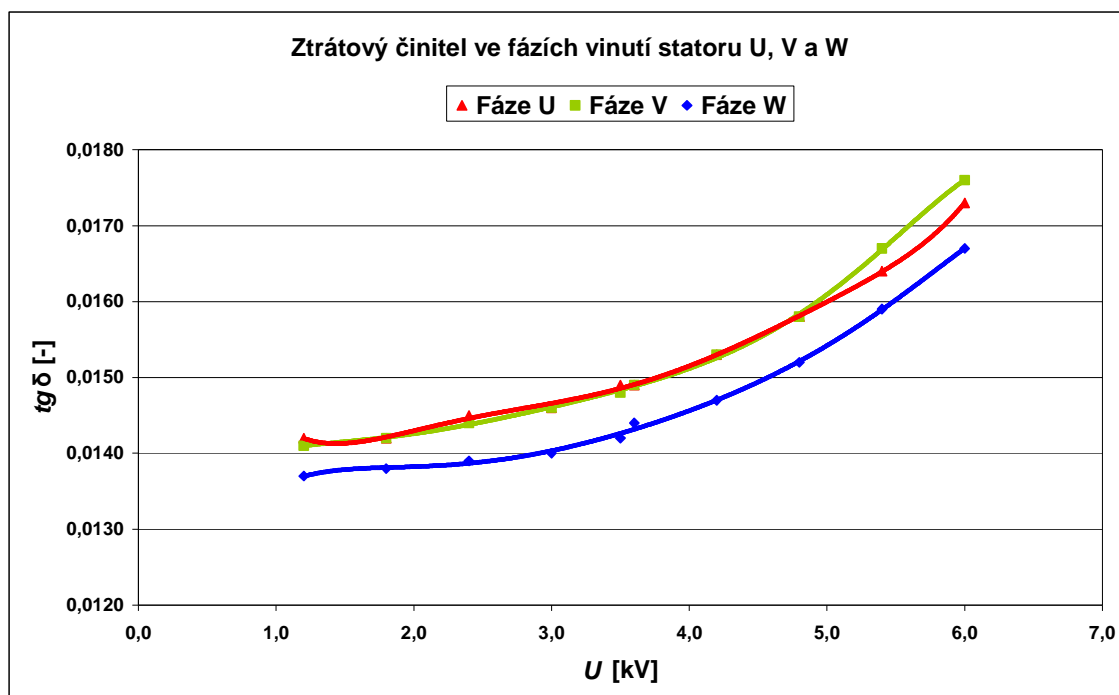
Obr. 31: Schéma zapojení pro měření ztrátového činitele $\text{tg}\delta$ a kapacity statorového vinutí [14].

Kde:

RAT je regulační autotransformátor; T1 je oddělovací transformátor; TL je tlumivka; T2 je vn transformátor; kV je elektrostatický milivoltmetr; C_n je kapacitní normál.

7.2 Analýza výsledků a naměřených hodnot

Posuzování izolačních systémů pomocí ztrátového činitele a jeho závislosti na přiloženém střídavém napětí patří mezi nejstarší diagnostické metody. V grafickém průběhu na obr. 32 je vyobrazena závislost ztrátového činitele $\text{tg}\delta$ na přiloženém střídavém napětí společně, pro všechny tři měřené fáze vinutí statoru. Podle očekávání se velikost ztrátového činitele s rostoucím napětím zvyšuje. Příčina je v nárůstu složky absorpčního proudu. Ta je pak ovlivněna kvalitou izolace.



Obr. 32: Průběh závislosti ztrátového činitele $\text{tg } \delta$ na stejnosměrném napětí ve fázích vinutí statoru U, V a W.

Ztráta kvality izolace se projevuje v průběhu změny napětí a polarizace dielektrika – zvýšeným pohybem vázaných nosičů elektrického náboje a ve výsledku představuje nárůst absorpčního proudu. Oproti tomu, složka vodivostního proudu, která má rovněž vliv na celkovou velikost ztrátového činitele nemá v tomto případě zásadní přínos, protože je po celou dobu měření konstantní, daná počtem volných nábojů v izolaci.

Opět se jeví trend pro všechny fáze stejně. Potvrzují se tedy naměřené výsledky z předešlých metod, že opotřebení a kvalita izolačního systému je u všech tří fází vinutí statoru na srovnatelné úrovni.

Absolutní velikost ztrátového činitele je na velice nízké hodnotě a srovnáním všech tří fází se jako nejlepší jeví fáze vinutí statoru W. Zbývající fáze U a V jsou v převládající části průběhu téměř stejné, pouze v závěru se více zhoršuje ztrátový činitel ve fázi V.

Dalším důležitým faktorem pro stanovení kvality dielektrického systému je velikost změn (přírůstku) ztrátového činitele na napěťových hladinách, jak uvádí [12]. Tabulka naměřených hodnot je v příloze číslo 4. Je patrné, že kritéria přípustnosti stanovená v [12] jsou ve všech ohledech s velkou rezervou splněna.

8. MĚŘENÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ

Velmi důležitou diagnostickou měřicí metodou je zjišťování elektrických výbojů v izolačním systému elektrických strojů. Metoda je založena na principu střídavého zkušebního napětí. Zkoumá druh výbojové činnosti, který označujeme jako tzv. částečné výboje. Jsou to takové elektrické výboje, které přemostují izolaci mezi elektrodami na různých potenciálech jen částečně. To znamená, že výbojem není zasažena celá izolace, ale pouze její lokální část. Částečné výboje lze charakterizovat jsou parazitní jevy vznikající v izolačních systémech [6], [15].

Příčinu vzniku částečných výbojů můžeme spatřovat již při výrobě technických izolantů. Prakticky žádný nelze vyrobit jako zcela homogenní a ideální. Vždy obsahuje určité množství vad (dutinek, trhlinek, pórů), které jsou vyplněny vzduchem nebo plynem [6].

Částečné výboje v elektroizolačním systému mohou vznikat [16]:

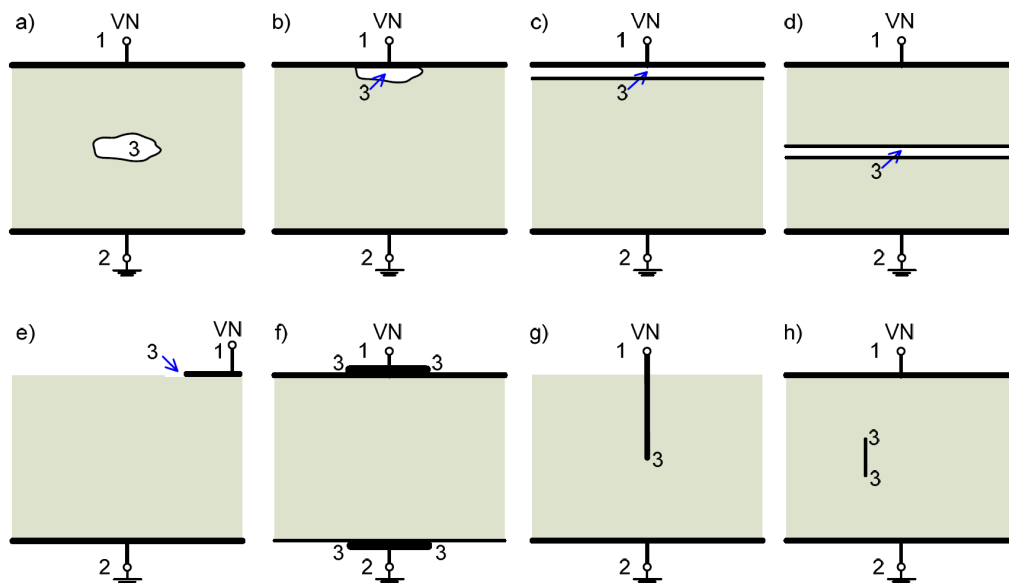
- přímo v izolaci vodičů (částečné výboje v izolaci)
- mezi izolací a vodičem (prostor mezi vodičem a izolací, tzv. „delaminace“)
- mezi izolací a dnem drážky statoru (drážkové výboje)
- nebo na povrchu izolace mimo drážku statoru (klouzavé výboje po povrchu izolace při výstupu vinutí z drážky statoru, povrchové výboje na čelech vinutí, koróna apod.).

V průběhu provozu stroje se tyto vady dále rozvíjejí vlivem elektrického namáhání, neboť relativní permitivita těchto vad je zdatelně odlišná od okolní kvalitní a homogenní izolace. Částečné výboje se objevují v podobě pulzů kratších než 1 μ s a zásadně se tak podílí na degradaci izolačního materiálu snížením jeho životnosti a spolehlivosti [6].

Částečné výboje můžeme rozdělit podle [6]:

- Vnější (externí) částečné výboje. Jsou to částečné výboje v plynech v okolí elektrod malých poloměrů nebo zakřivení, jako např. doutnavé výboje, korónové výboje, Trichelovy impulzy a podobně.
- Vnitřní (interní) částečné výboje. Jsou to částečné výboje v plynech, obklopené pevným či kapalným dielektrikem, jako např. výboje v plynných dutinkách v pevném dielektriku.
- Povrchové částečné výboje. Jsou to částečné výboje v okolí elektrod na rozhraní pevného a plynného dielektrika, např. klouzavé výboje .

Typické elektrodové uspořádání na kterých lze vnitřní a povrchové částečné výboje znázornit [15].



Obr. 33: Možnosti vzniku částečných výbojů [18].

Kde:

1, 2 značí elektrody a 3 je místo výskytu částečného výboje.

- | | |
|--|---|
| a) vzduchová bublina v izolaci | e), f) povrchové resp. klouzavé výboje |
| b) vzduchová bublina pod elektrodou | g) jehlové rozraní elektroda - izolant |
| c), d) vzduch mezi dvěma vodivými plochami oddělenými dielektrikem | h) jehlové rozraní elektroda - pevný či kapalný izolant |

Výbojovou činnost charakterizují kromě zdánlivého náboje tyto veličiny [17]:

- U_i – počáteční napětí částečných výbojů – nejnižší hodnota napětí, při kterém trvale vznikají částečné výboje.
- U_e – zhášecí napětí částečných výbojů – napětí, při kterém trvale ustávají částečné výboje.
- n – četnost částečných výbojů – střední počet částečných výbojů za sekundu.
- q – zdánlivý náboj impulsu částečného výboje – náboj měnící napětí na svorkách vzorku o stejnou hodnotu jako skutečný částečný výboj, který nelze měřit přímo. Jeho velikost je základním diagnostickým parametrem pro měření a vyhodnocování částečných výbojů.

- I – střední proud částečných výbojů – součet absolutních hodnot zdánlivých nábojů q procházejících svorkami zkoušeného předmětu při částečných výbojích za časový interval. Jednotkou je [C/s].

Na obr. 35 je náhradní model pevného izolantu s vnitřní plynovou dutinkou, tzv. trojkapacitní model [15].

Kapacita samotného izolantu C_3 je dána paralelní kombinací C_3' a C_3'' , vyjádřeno vztahem:

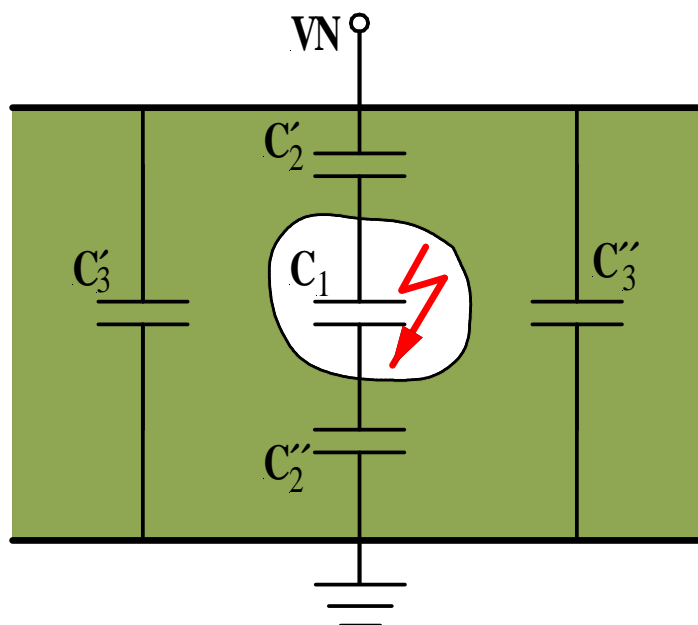
$$C_3 = C_3' + C_3'' \quad (10)$$

Kapacita části izolantu s plynovou dutinkou C_D je dána sériovým spojením kapacity zbylého (původního) izolantu C_2 a kapacity samotné dutinky C_1 , kde:

$$\frac{1}{C_D} = \frac{1}{C_2'} + \frac{1}{C_2''} + \frac{1}{C_1} \quad (11)$$

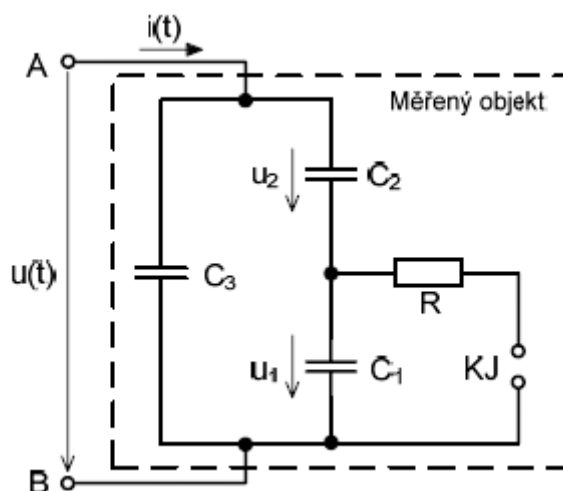
Výsledná kapacita tohoto modelu je dána součtem kapacity (okolního) izolantu C_3 a kapacity části izolantu s dutinkou:

$$C = C_D + C_3 \quad (12)$$



Obr. 34: Schematický obrázek pevného izolantu s vnitřní plynovou dutinou [18].

Pro popis výskytu částečných výbojů se nejvíce používá Gemant-Philippowův a Böningův model. Náhradní schéma Gemant-Philippowův modelu pro vnitřní částečné výboje (trojkapacitní model) je znázorněno na obr. 35 [15].



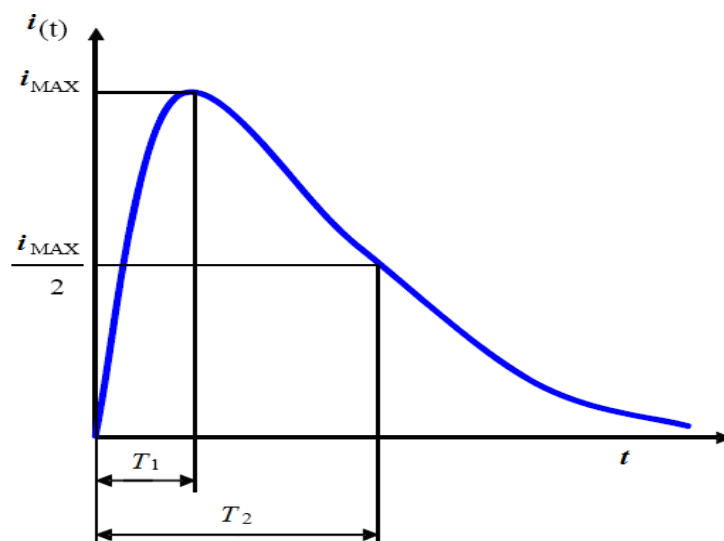
Obr. 35: Zjednodušené náhradní schéma pro vnitřní částečné výboje (trojkapacitní model) [18].

Po přiložení střídavého napětí $u(t)$ protéká přes měřený objekt proud $i(t)$. Pokud nedojede k přeskočení v dutince (tzn. na kulovém jiskřišti KJ), je průběh napětí $u_{1(t)}$ na kondenzátoru C_1 definován níže uvedeným vztahem [15] :

$$u_{1(t)} = \frac{C_2}{C_1 + C_2} u(t) \quad (13)$$

Odpor R uvedený v zjednodušeném náhradním schématu představuje odpor výbojové cesty (výbojového kanálku překlenujícího vzduchovou dutinku) po přeskočení na kulovém jiskřišti KJ. Přesněji je možné říci, že se jedná o odpor cesty proudu výboje v oblasti vybíjených plošek povrchu dutinky a odpor dráhy výboje. Vzhledem k velmi malým rozměrům, které jsou v reálných dutinkách v izolačních materiálech, proběhne tento děj v řádu jednotek ns [18].

Částečné výboje vyvolají proudové impulzy, které se v obvodu projeví jako přerozdělení náboje na příslušných kapacitách. Proudové impulzy mají různou délku závislou právě na kvalitě izolantu. Časové hodnoty pro pevné izolanty činí několik ns pro čelo impulsu na obr. 36 označená jako T_1 a několik desítek ns pro dobu označenu jako T_2 [18].

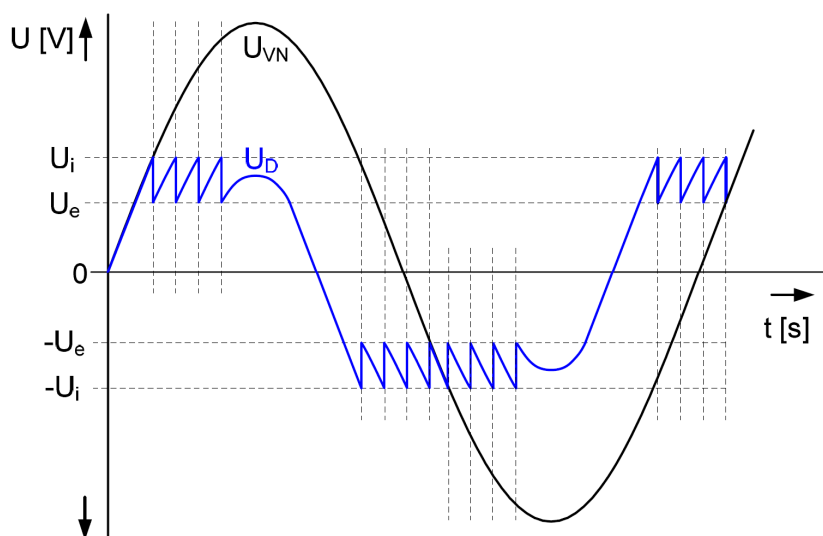


Obr. 36: Tvar proudového impulsu částečného výboje [17].

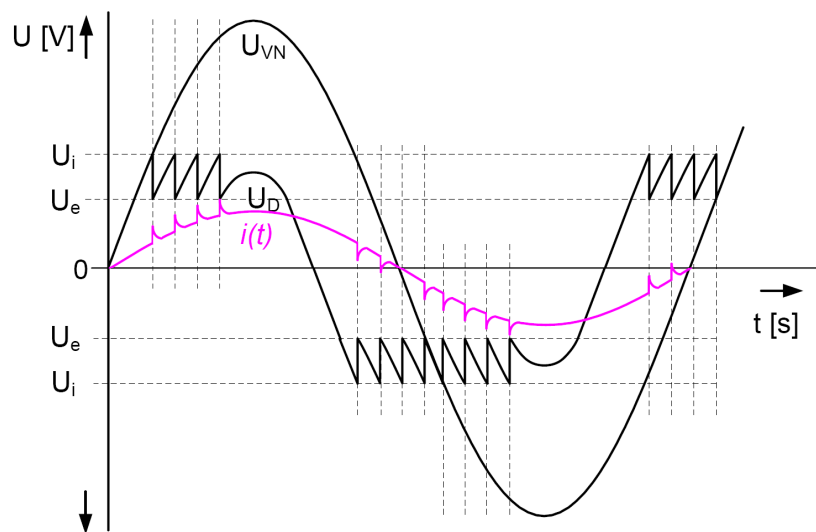
Proudový impuls je znázorněn na obr. 36 a velikost náboje jím přenášená je rovna velikosti plochy pod křivkou vypočtenou podle vztahu [18]:

$$q(t) = \int_0^{\infty} i(t) dt \quad (14)$$

Do obvodu pak musí zdroj dodat náboj, který kompenzuje úbytek napětí vyvolaný výbojem. Tento proces umožňuje měřit výboje v izolaci a kvantitativně je vyhodnocovat pomocí veličiny – zdánlivého náboje q [pC] [17].



Obr. 37: Napěťové průběhy na Gemant-Philippowu modelu [18].



Obr. 38: Napětíové a proudové průběhy na Gemant-Philippowu modelu [18].

Kde: U_D je napětí na dutince; U_{VN} je napětí zdroje.

Pro malou dutinku platí podmínka, že $C_3 \gg C_1 \gg C_2$, přičemž kulové jiskřiště KJ paralelně ke kapacitě dutinky C_1 slouží k modelování průrazu vzduchem naplněné dutiny. Elektrický průraz nastává v okamžiku, kdy napětí zdroje dosáhne hodnoty zápalného napětí částečných výbojů U_i na kapacitě C_1 . Při přeskočení dojde vlivem malého odporu vodivého kanálu výboje k poklesu napětí na dutince na hodnotu zhasacího napětí U_e [18].

Na obr. 38 je pro Gemant-Philippowův model zachycen průběh napětí a průběh proudu včetně proudových špiček vznikající jako odezva na vzniklé výboje v dutince [18].

Pro všechny druhy částečných výbojů jsou charakteristické destruktivní účinky na izolační systém [17]. Charakter destruktivních účinků můžeme specifikovat jako:

- **Elektrické účinky:** vyvine-li se v dutince oblouk, je jeho pravděpodobným následkem vytvoření vodivé dráhy. Při vysokých hodnotách intenzity elektrického pole může koncentrace elektrického pole způsobit v tomto místě čistě elektrický průraz a vodivá dráha se může postupně šířit dielektrikem.
- **Erozivní účinky:** výboje v dielektriku, zvláště bombardování stěn dutinky ionty a elektrony, způsobují erozi stěn dutinky. Dutinka se postupně zvětšuje a při pokračující erozi může dojít k průrazu celého dielektrika.
- **Chemické účinky:** obsahují-li dutinky kyslík, vytvářejí výboje v dutince ozón, který má intenzivní oxidační účinky. Chemickou destrukci dielektrika způsobují i produkty rozkladu některých izolantů při výbojích. Z hlediska možnosti vzniku tepelného průrazu

dielektrika je velmi důležitý fakt, že produkty rozkladu mohou difundovat do pevného dielektrika a vytvářet tak vodivější oblasti.

- **Tepelné účinky:** přímým důsledkem částečných výbojů může být tepelná nestabilita, neboť opakovaným působením částečných výbojů se dielektrikum otepluje a tím klesá hladina napětí tepelného průrazu [17].

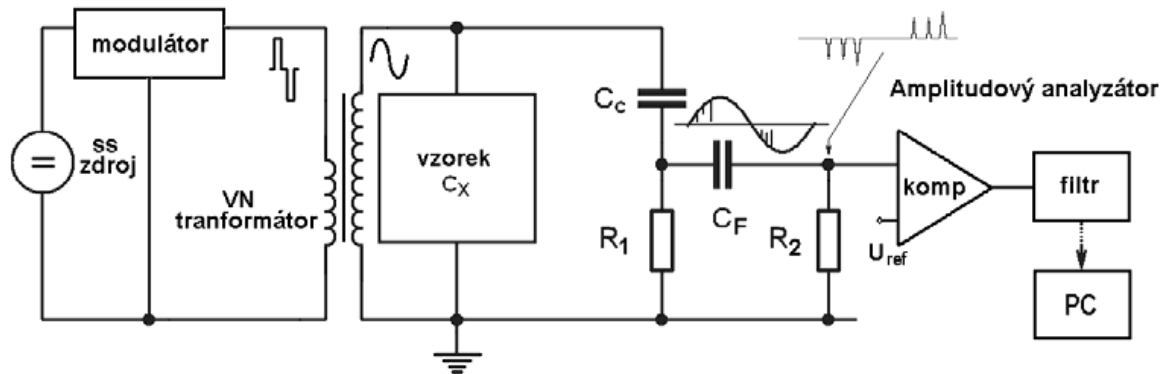
8.1 Detekce částečných výbojů

Částečný výboj je jiskřivý výboj s velmi malou energií, který se tvoří uvnitř dielektrické izolace nebo na povrchu v zařízení za středního nebo vysokého tlaku. Částečný výboj se objevuje v oslabeném místě izolace a vede k postupnému rozvoji defektů a následné destrukci izolace [15].

Překročí-li hodnota napětí na vzduchové mezeře (dutince) elektrickou pevnost plynu v dutince, dojde k zapálení výboje. Opakuje-li se zapalování výboje často, dojde k opalování stěn dutinky a tím k jejímu zvětšování, což vede až k úplnému elektrickému průrazu [15].

Principiální zapojení systému pro detekci částečných výbojů využívající amplitudové analýzy částečných výbojů je schematicky znázorněn na obr. 39. Jak je zde patrné, zkoumaný objekt C_x je připojen na zdroj sinusového regulovatelného vysokého napětí.

Výboje vzniklé na zkoumaném objektu se snímají děličem C_C a R_1 , za kterým následuje horní propust. Tím se odfiltruje nosná složka elektrického signálu. Takto získaný signál je veden na vstup velmi rychlého komparátoru, kde je porovnáván s úrovní referenčního napětí, pomocí kterého je možné regulovat úroveň detekce. Získaná data jsou následně odeslána do PC [18].



Obr. 39: Schematické zapojení pro měření částečných výbojů [18].

8.2 Metody pro detekci částečných výbojů

Měření výbojové činnosti lze provádět různými metodami, a to jak metodami neelektrickými, tak i metodami elektrickými. Každá z uvedených metod má svoje výhody i nevýhody. Do popředí se v současné době dostávají metody, které umožňují měřit bez odstávky nebo odpojení elektrického zařízení, tzn. přímo v provozu - on-line měření. Metody, kdy je nutné měřený objekt odpojit, jsou označovány jako off-line měření [18].

Příkladem neelektrických metod mohou být metody dělené podle zkoumaných projevů:

- akustické
- optické
- chemické
- termoelektrické

Dalším typem metod měření částečných výbojů jsou metody elektrické [18]. Zde vlivem zapalování impulsů částečných výbojů vznikají na napájecím napětí proudové impulsy úměrné daným částečným výbojům. Jejich vyhodnocování je základem všech elektrických metod. Snímání proudových signálů částečných výbojů je realizováno klasickými impedancemi RLC, které jsou připojené na VN svorky zkoumaného objektu přes oddělovací kondenzátor. Pro snímání napěťových pulsů se používají kapacitní děliče nebo se měření provádí pomocí Rogowského cívky. Pro svoji lepší kvantifikovatelnost a citlivost jsou elektrické metody více rozšířeny v praxi nežli metody neelektrické.

Jako příklad lze uvést [18]:

- Galvanické metody měření částečných výbojů
- Elektromagnetické sondy - kapacitní a induktivní sondy

Tyto metody se dělí na dva základní typy:

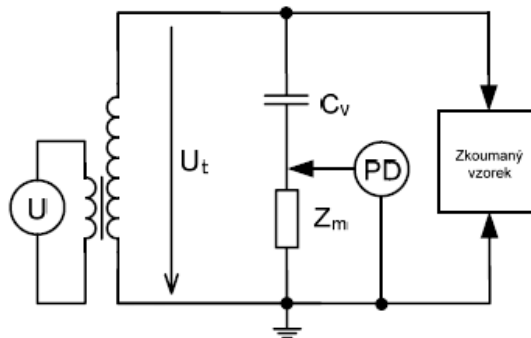
- a) globální
- b) lokalizační

V případě globálního měření se zjišťují částečné výboje v celém zkoumaném objektu. Ověřuje se tak celkový stav izolace. Lokalizační měření má za úkol najít místo výskytu částečných výbojů ve zkoumaném objektu [18].

8.3 Postup měření galvanickou metodou

Galvanická metoda patří ke globálním metodám měření částečných výbojů. Je založena na přímém snímání proudových impulzů částečných výbojů na snímací indukčnosti. Většinou se jedná o člen RCL s ochrannými prvky jako jsou bleskojistky atp. Měřicí impedance Z_m se obvykle skládá z rezistoru o hodnotě 102Ω a tlumivky [15].

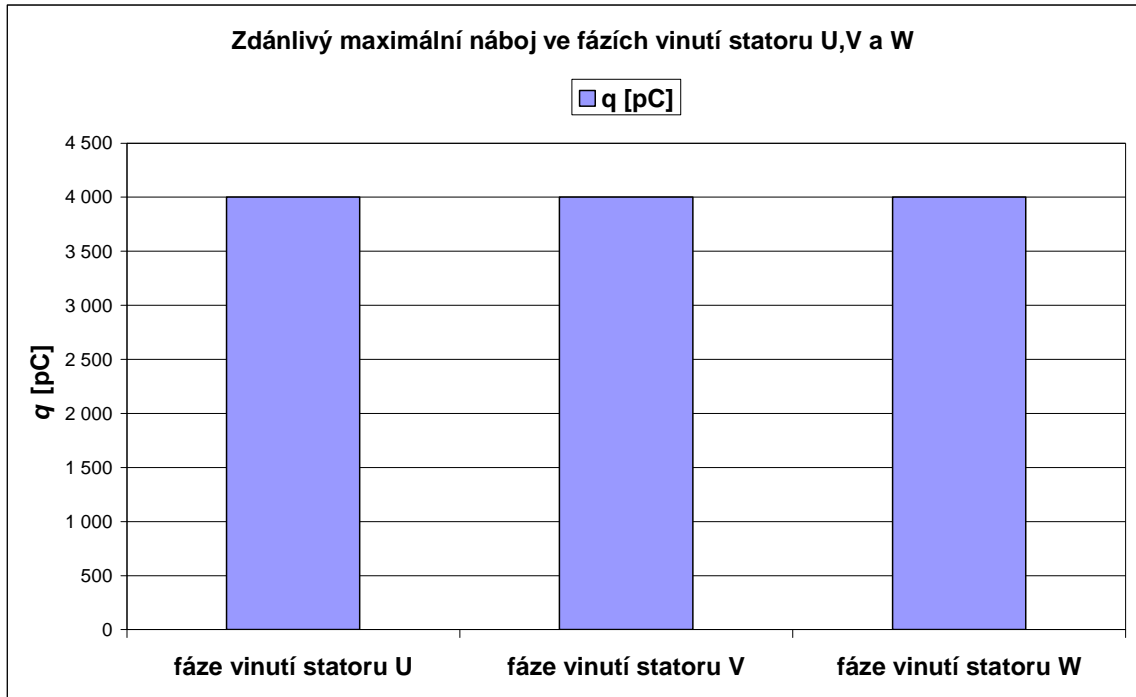
Měření se provádí postupně po jednotlivých fázích vinutí statoru. V průběhu měření musí být každá měřená fáze odpojená od ostatních a neuzemněná. Zkušební napětí se postupně zvyšuje až do jmenovitého napětí U_n . Při výskytu výbojové činnosti nad dohodnutou mez, která obvykle činí $q = 1\,000 \text{ pC}$, se odečte hodnota počátečního napětí částečných výbojů U_i . Po dosažení jmenovité hodnoty napětí U_n se toto napětí nechá působit po dobu $t = 30$ minut. Poté se zkušební napětí plynule snižuje po $0,2 U_n$ a na těchto hladinách napětí se měří velikost zdánlivého náboje q , případně další diagnostické parametry [16].



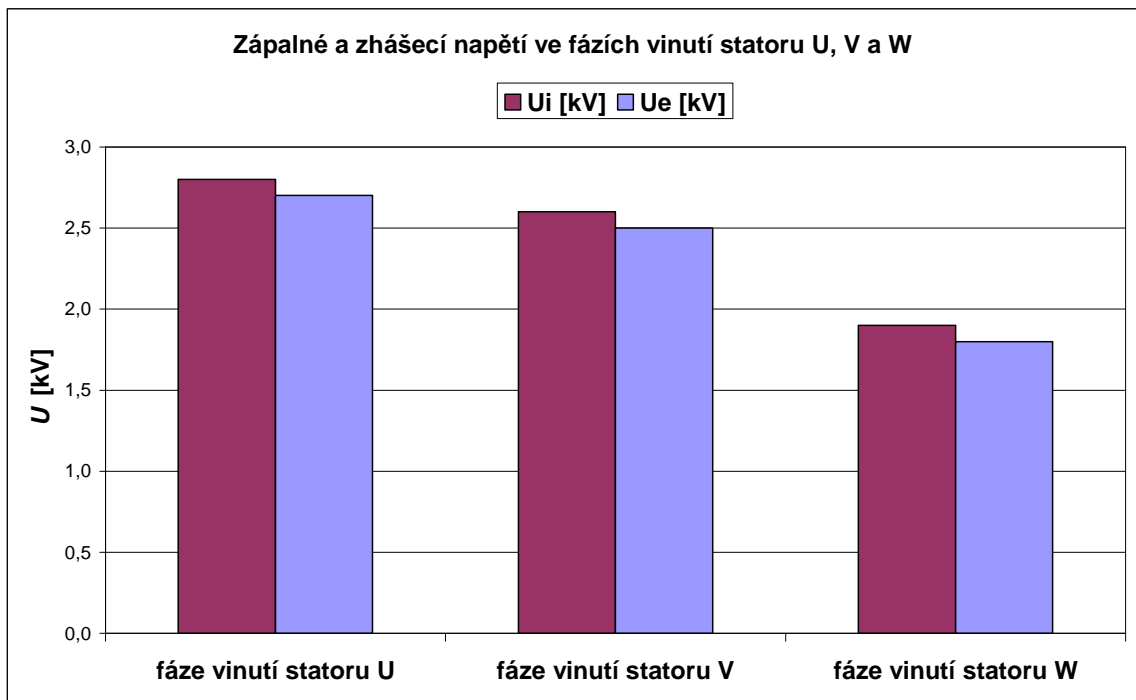
Obr. 40: Schéma pro měření částečných výbojů statorového vinutí galvanickou metodou [16]. Kde: C_v je vazební kondenzátor; Z_m je snímací impedance; PD je měřič částečných výbojů.

8.4 Analýza výsledků a naměřených hodnot

Tabulka naměřených hodnot je uvedena v příloze 5. V grafickém přehledu na obr. 41 je vyobrazena velikost zdánlivého náboje q ve všech třech měřených fázích vinutí statoru současně. Pozorujeme, že jeho velikost je ve všech třech fázích naprosto shodná. Toto zjištění je v souladu s výsledky předchozích diagnostických metod, ze kterých plynulo stejně velké a symetrické opotřebení izolačního systému stroje. Vzhledem k absolutní velikosti zdánlivého náboje q , která činí $4\,000 \text{ pC}$, lze konstatovat velice nízkou výbojovou činnost v izolaci. Jako kritérium v [12] je stanovená hodnota $10\,000 \text{ pC}$.



Obr. 41: Velikost zdánlivého náboje částečných výbojů statoru.



Obr. 42: Velikosti U_i a U_e částečných výbojů statoru.

Parametrem, který na první pohled nevypadá příliš optimisticky, je velikost iniciačního napětí částečných výbojů U_i . Jeho velikost a zároveň velikost zhášecího napětí částečných

výbojů U_e je na . Vidíme, že nejlépe si stojí fáze vinutí statoru U, mírně horší je fáze V a jako poslední a zřetelně nejhorší je fáze vinutí statoru W, kde iniciační napětí částečných výbojů U_i začíná pod hranicí 2 kV. Z těchto naměřených hodnot můžeme učinit závěr, že k výbojové činnosti za provozu stroje dochází, a to nejvíce ve zmíněné fázi vinutí statoru W, kde se dá do budoucna předpokládat nejrychlejší degradační proces a ztráta kvality izolace.

V příští plánované revizi motoru je potřeba věnovat pečlivou pozornost kontrole tuhosti upevnění statorových tyčí v drážkách magnetického obvodu a čistotě vinutí jako celku. Protože obě tyto oblasti mohou přispívat tvorbě výbojové činnosti, jak bylo uvedeno v textu kapitoly teoretického úvodu, tj. rozvoji drážkových a klouzavých výbojů.

Měření částečných výbojů přináší informaci o velikosti výbojové činnosti v izolaci elektrického stroje. Pokud to konstrukce dovoluje a oba konce fázového vinutí jsou vyvedeny a lze je rozpojit, dostáváme i konkrétní informaci o jednotlivých fázích, jejich opotřebení a stupni degradace. Ovšem zásadní informací této metody je trendová vypovídající hodnota, tj. srovnávací měření v určitých intervalech v průběhu životnosti stroje. Teprve takto prezentované výsledky přispívají k relevantní predikci o kvalitě zbývajících technické životnosti a provozuschopnosti stroje.

9. ZKOUŠKA ELEKTRICKÉ PEVNOSTI IZOLACE VINUTÍ STATORU PŘILOŽENÝM STŘÍDAVÝM NAPĚTÍM

V elektrickém poli jsou zachovány izolační vlastnosti látek jen do určité hodnoty intenzity přiloženého pole. Ztráta izolačních vlastností se nazývá elektrickým průrazem a napětí, při kterém k průrazu dochází, průrazným napětím. Stěžejní vlastností a hlavním sledovaným parametrem každého izolačního systému je elektrická pevnost, kterou můžeme popsat jako schopnost materiálu odolávat namáhání elektrickým napětím. Označujeme ji E_p a je definovaná jako průrazné napětí U_p vztažené na tloušťku izolantu d [6]:

$$E_p = \frac{U_p}{d} \quad (15)$$

Kde:

E_p je elektrická pevnost v [kV/mm]; d je tloušťka dielektrika v místě průrazu nebo nejmenší vzdálenost elektrod v [mm]; U_p je průrazné napětí v [kV] [7].

Elektrický průraz lze v zásadě rozdělit do tří hlavních kategorií [7]:

1. Čistě elektrický průraz - který nezávisí na teplotě.
2. Tepelný (elektrochemický) průraz - je způsoben tepelnými a dielektrickými ztrátami. Při tomto typu průrazu je elektrická pevnost závislá na teplotě, frekvenci přiloženého napětí a době působení elektrického pole.
3. Elektrochemický průraz - souvisí s tepelným průrazem. Vlivem stárnutí materiálu, který je vystaven dlouhodobému vlivu elektrického pole, dochází k poklesu hodnoty elektrické pevnosti a často k následnému tepelnému průrazu.

Tato diagnostická metoda spadá svou podstatou do zkoušek založených na principu střídavého napětí. V sérii diagnostických měření se realizuje jako úplně poslední. V zásadě pokud izolace vyhoví a po předepsanou dobu nedojde k průrazu, lze hodnotit stroj jako spolehlivý a provozuschopný.

Zkoušku ze své podstaty můžeme hodnotit jako destruktivní neboť případná druhá alternativa výsledku tj., že dojde k průrazu, znamená neprovozuschopnost stroje. Samotné místo průrazu lze poté pomocí speciálních technik i přímo lokalizovat, ale jeho oprava je prakticky vyloučena. Odstranění nepřijatelného stavu je možné pouze kompletní výměnou – převinutím statoru. Proto musí být pečlivě připravena a postupováno opatrně, musí se realizovat na vyčištěném a vysušeném stroji a zároveň naměřené výsledky z předchozích zkoušek musejí predikovat úspěšnost této zkoušky. Velikost zkušebního napětí pro stroj v provozu definuje [19] a je dána vztahem:

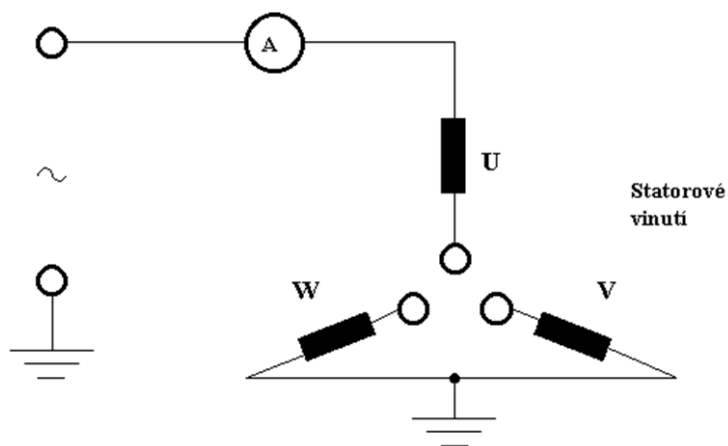
$$U_{zk} = 1,5 \cdot U_n \quad (16)$$

Kde: U_n je jmenovité napájecí napětí stroje.

9.1 Postup měření

Při zkoušce se jeden pól zkušebního napětí připojí na vývody zkoušeného vinutí a druhý pól se připojí na kostru stroje vodivě spojenou se zemí a s ostatními vinutími. Veškeré konstrukční části stroje, které nejsou připojeny na zkušební potenciál, se spojí s kostrou stroje (např. teploměry, termočlánky, vibrační čidla, apod.) Zkouší se každé elektricky nezávislé vinutí. Vinutí, která jsou v provozu spojena, avšak mají vyvedeny oba konce

vinutí, se považují za elektricky nezávislá. Několikafázové vinutí, u kterého nejsou začátky a konce jednotlivých fází vyvedeny na zvláštní svorky, se zkouší jako celek, jehož vývody jsou navzájem vodivě spojeny [19].



Obr. 43: Zapojení při zkoušce statorového vinutí napětím 50 Hz [19].

9.2 Analýza výsledků a naměřených hodnot

Výsledek zkoušky přiloženým napětím je velice důležitý pro predikci dalšího provozu. Není mnoho prostoru pro rozbor problematiky, analýzy a komentáře. Výsledkem každé této zkoušky je odpověď buď ano – systém vyhověl nebo ne – systém nevyhověl. V našem případě izolační systém splnil očekávání, potvrdily se výsledky předcházejících diagnostických metod a zkoušek a splnily se očekávané předpoklady. Degradace izolace statorového vinutí je na přijatelné úrovni, izolační (napěťová) rezerva je dostatečná, pravděpodobnost průrazu statorového vinutí za provozu je nízká.

10. ZÁVĚR

Jaderná elektrárna Temelín je jako podnik evropského významu v podstatě nepřetržitě monitorována státními i mezinárodními dozornými orgány. Jejich zjištění a doporučení ke zlepšení spolehlivosti a bezpečnosti provozu elektrárny je vždy neprodleně zapracováno do základních standardů firemní praxe.

Důležitou součástí k zajištění bezpečného a spolehlivého provozu je vysoká profesionální úroveň a technické vybavení vlastního personálu elektrárny, tak i dodavatelských firem. Aplikací moderních diagnostických a měřících metod v kombinaci s efektivním využitím periodické preventivní a prediktivní údržby technologického zařízení dochází k maximálnímu zajištění bezpečnosti a spolehlivosti provozu elektrárny na straně jedné a zároveň k efektivnímu hospodaření a vynakládání finančních prostředků na straně druhé.

Výsledky diagnostických měření elektroizolačních parametrů elektrických strojů, aplikovaných do trendů v čase, vedou ke správnému odhadu technické životnosti. Díky tomu je možné správné načasování nutných oprav, revizí nebo generálních oprav, v přímé vazbě na finanční plány a časový harmonogram odstávek výrobních bloků.

Uvedený soubor diagnostických měření na konkrétním typu elektromotoru můžeme chápat jako část z mozaiky péče, která je technologii jaderné elektrárny věnována. Slouží jako ukázkový a modelový příklad, protože stejný rozsah je věnován i ostatním vysokonapěťovým strojům. Veškeré zkušenosti z údržby, ať už negativní nebo pozitivní jsou průběžně zapracovávány do pracovních postupů, podle nichž se realizuje výkon údržby. Tímto způsobem se zkvalitňuje a zpřesňuje jakost v péči o technologické zařízení, čímž se zvyšuje bezpečnost a spolehlivost provozu.

Jedna z hlavních myšlenek mé práce je nyní vyjádřena ve formě nového pracovního postupu pravidelné údržby, který je umístěn do přílohy číslo 6. Obsahuje doporučení co změnit, zlepšit nebo doplnit v procesu údržby elektromotoru hlavního cirkulačního čerpadla, aby jeho technická životnost a spolehlivost byla maximálně využita. Jedním z nových a důležitých úkonů je oblast sušení vinutí statoru. Potřeba realizace vysušení může být aktuální okamžitě po první diagnostické metodě, kterou je měření izolačního odporu vinutí

statoru. Vlhkost, která je případně v izolaci přítomna nepředstavuje zásadní technický problém, jednoduchými způsoby ji lze z izolačního systému odstranit. Pokračování diagnostického měření s potenciálně vlhkou izolací by výsledky dalších diagnostických metod velice zkreslilo, a dokonce by v případě zkoušky přiloženým napětím mohlo dojít k průrazu a trvalé destrukci izolace.

Další etapa, kterou obsahuje nový pracovní postup je kontrola tuhosti drážkových uzávěrů, nebo jinak řečeno klínů vinutí statoru. Je zdůrazněno, že tuto operaci musí vykonávat pouze jeden zkušený pracovník, protože výsledek této kontroly je subjektivní. Škála odezvy tuhosti každého klínu se hodnotí na stupnici od jedné do deseti a je nezbytné, aby vyhodnocení prováděla jediná osoba. Potenciálně volné klíny mají negativní dopad do výsledků měření částečných výbojů, které se ve zvýšené míře mohou projevit jako tzv. drážkové výboje.

Důležitý je i nově definovaný zádržný bod, který podléhá nezávislé kontrole pracovníka oddělení technické kontroly. Týká se čištění vinutí statoru a profukování suchým vzduchem. Zdůrazněno je, že první profukování musí být z prostoru vnějšího průměru směrem k vnitřnímu průměru. Tím se v podstatě zamezí vniku prachu a ostatních nečistot hlouběji do prostor vinutí statoru, odkud se obtížně odstraňují. Také musí být věnována maximální pozornost čistotě tyčí vinutí statoru na výstupu z drážek magnetického obvodu a čel vinutí. Prach, mastnota a další nečistoty mají negativní vliv na velikost částečných výbojů, v textu označených jako klouzavé výboje.

Nový pracovní postup obsahuje oproti původní verzi velký kvalitativní krok vpřed a další posun v kvalitě údržby. Výše uvedené činnosti jsou jen nepatrným výčtem modifikací, které mají přímou vazbu k tématu práce. Mimo ně existuje ještě mnoho změn v dalších oblastech údržby strojního charakteru, které v práci nejsou uvedeny.

Závěrem lze říci, že rozsah péče vycházející z preventivní periodické údržby je správně nastaven. Parametry opotřebení elektroizolačního systému elektromotoru jsou po uplynulé době provozu na velice uspokojivé úrovni. V příští plánované revizi je potřeba věnovat zvýšenou pozornost příčinám a s větším důrazem sledovat trend výbojové činnosti, zejména ve fázi vinutí statoru W. Ovšem i tak se do budoucna dá předpokládat bezpečný a spolehlivý provoz elektromotoru.

11. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Skripta, Primární část JE VVER 1000, I.díl, ZÁKLADNÍ ZAŘÍZENÍ PRIMÁRNÍHO OKRUHU, Ing. František Cencinger, útvar Příprava JE, Brno 2008.
- [2] Asynchronní motor VAZ 215/109-6 AM05 Technický popis a provozní pokyny 1BP.046.021 TO, Uralmash Jekatěrinburg, Rusko.
- [3] Asynchronní motor VAZ 215/109-6 AM05 Technické podmínky, TU16-510.673-81, Uralmash Jekatěrinburg, Rusko.
- [4] Skripta, Základní příprava výkonných zaměstnanců dodavatelů JE Temelín, ŠKOLÍČÍ ODBOR ČEZ-ETE – 2002, Jaderná elektrárna Temelín.
- [5] ČSN 35 00 10 Točivé elektrické stroje Zkoušky.
- [6] MENTLÍK, Václav, et al.. Diagnostika elektrických zařízení. 1. vydání. Praha: BEN, 2008. 439 s. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [7] MENTLÍK, Václav. Dielektrické prvky a systémy. Praha : BEN, 2006. 240 s. ISBN 80-7300-189-6.
- [8] TSE_RIZ_02r03, Monitorování izolačního odporu a výpočet polarizačního indexu statorového vinutí, Pracovní postup inspekčního orgánu č. 4026, ČEZ, a. s.
- [9] ČSN 35 0000-1-1 (350000) Točivé elektrické stroje - Část 1-1: Doplnující požadavky.
- [10] PETR, J.: Struktura a vlastnosti materiálů II Izolanty. Skriptum. České vysoké učení technické, Praha, 1989. 2. vydání. 6724.
- [11] Asynchronní motor VAZ 215/109-6 AM05, Návod pro montáž 1BP.046.021.IM, Uralmash Jekatěrinburg, Rusko.
- [12] PN00/06 rev01, Profylaktika izolačního systému strojů točivých strojů, turbogenerátory, hydrogenerátory a vn motory, Podniková norma, ČEZ, a. s.
- [13] TSE_NAB_04r03, Monitorování napěťové závislosti izolačního odporu na DC, Pracovní postup inspekčního orgánu č. 4026, ČEZ, a. s.
- [14] TSE_TGC_05r03, Monitorování ztrátového činitele $\tan \delta$, kapacity a výpočet časové konstanty, Pracovní postup inspekčního orgánu č. 4026, ČEZ, a. s.

- [15] ČSN EN 60270. Technika zkoušek vysokým napětím: Měření částečných výbojů. Praha: Český normalizační institut, 2001.
- [16] TSE_VYB_06r03, Monitorování částečných výbojů statorového vinutí galvanicky vázanou metodou, Pracovní postup inspekčního orgánu č. 4026, ČEZ, a. s.
- [17] ZÁLIŠ, Karel. Částečné výboje v izolačních systémech elektrických strojů. 1. vyd. Praha: Academia, 2005. 139 s. ISBN 80-200-1358-X.
- [18] Ing. Tomáš Havlíček, Dizertační práce, Ing. Tomáš Havlíček, Částečné výboje v elektronických zařízeních pracujících na vyšších kmitočtech, VUT Brno, 2009.
- [19] TSE_UZ_09r03, Monitorování statorového vinutí střídavým napětím, Pracovní postup inspekčního orgánu č. 4026, ČEZ, a. s.

12. SEZNAM PŘÍLOH

1. Použité měřicí přístroje - technické parametry.
2. Tabulka naměřených hodnot, Měření izolačního odporu a výpočet polarizačního indexu.
3. Tabulka naměřených hodnot, Měření závislosti izolačního odporu na stejnosměrném napětí.
4. Tabulka naměřených hodnot, Měření kapacity a ztrátového činitele.
5. Tabulka naměřených hodnot, Měření částečných výbojů.
6. Pracovní postup „PPO M57DP2CM001 rev.006“