

Zde patří úvodní strana.

Tato strana se ze šablony netiskne.

Úvodní strana je uvedena ve speciálních souborech přístupných na webových stránkách univerzity.

Zde patří oficiální zadání diplomové práce.

Tato strana se ze šablony netiskne. Je to výstup z IS STAG.

ABSTRAKT

V diplomové práci popisuji diagnostické metody kontroly izolace vinutí elektromotorů. V první části jsou naznačeny nové způsoby diagnostických metod v oblasti výzkumu izolačních materiálů pro elektromotory. V druhé části jsou diagnostické metody používané v současné elektrotechnické praxi. V poslední praktické části jsem měřil jednotlivé části synchronního motoru-alternátoru (stator, rotor a kotva) pomocí rázových vln. V poslední části měření měřím izolační odpor.

In der Diplomarbeit beschreibe ich die diagnostikem Methoden der Kontrolle der Isolierstoffe der Wickel der Elektromotoren. Im ersten Teil werden neue Arten diagnostikem Methoden im Bereich der Erfforschung Isoliermaterialien für die Elektromotoren beschrieben. Im zweiten Teil sind der diagnostikem Methoden, in die gegenwärtige elektrotechnische Praxis verwerden sind. Im letzten praktischen Teil messe ich einzelnen Teile des Synchrongenerators (der Stator, der Rotor, Die Anker) mit die Stroßwelle. Im letzten Teil des Messung, der Isolationswiderstand messe ich.

OBSAH

OBSAH	4
ÚVOD.....	5
I. TEORETICKÁ ČÁST	7
1 NOVÉ DIAGNOSTICKÉ METODY	8
1.1 METODA ODHADU KRITICKÉHO NAPĚTÍ TEPELNÉHO PRŮRAZU	8
1.2 METODA AKTIVAČNÍ ENERGIE VODIVOSTNÍCH DĚJŮ	9
1.3 METODA AKTIVAČNÍ ENERGIE DOMINANTNÍCH POLARIZAČNÍCH DĚJŮ	10
2 DIAGNOSTICKÉ METODY POUŽÍVANÉ V PRAXI	11
2.1 NEDESTRUKTIVNÍ ZKOUŠKY	11
2.1.1 Vizuální kontrola vinutí	11
2.1.2 Izolační odpor.....	12
2.1.3 Ultrazvuk.....	14
2.2 DESTRUKTIVNÍ ZKOUŠKY	15
2.2.1 Zkouška střídavým napětím	15
2.2.2 Zkouška rázovou vlnou	17
2.2.3 Motivace pro zkoušení rázovou vlnou	18
II. PRAKTICKÁ ČÁST	20
3 MĚŘENÍ RÁZOVOU VLNOU	21
3.1 KOTVA BUDIČE.....	21
3.2 ROTOR ALTERNÁTORU	24
3.3 STATOR ALTERNÁTORU	27
3.4 DIAGNOSTIKA VINUTÍ.....	30
4 MĚŘENÍ IZOLAČNÍHO ODPORU	34
4.1 KOTVA BUDIČE.....	35
4.2 STATOR ALTERNÁTORU	35
5 JAKOST VÝROBY.....	36
6 ZÁVĚR.....	39
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	41
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	42
SEZNAM OBRÁZKŮ	43
SEZNAM PŘÍLOH.....	45

ÚVOD

V současné době dochází k rozvoji různých oborů technické diagnostiky. Tento rychlý rozvoj je způsoben hlavně výrobou náročných zařízení, kde je kladen velký důraz na jakost výrobku. Kromě existence propracovaných diagnostických metod ve strojírenství má velký význam podporovat i rozvoj diagnostických metod určených ke zjišťování jakosti. K těmto metodám především patří metody zaměřené na provozní podmínky a spolehlivost elektrických zařízení. A to především elektrických strojů točivých. Jak vyplývá z praxe, polovina poruch elektrických strojů točivých tvoří právě poruchy na izolačních soustavách elektrických strojů. Jedná se především o průraz izolačního systému, kde se překročí elektrická pevnost daného materiálu izolované soustavy. Většinou se nehodnotí elektrická pevnost, ale průrazné napětí. Ztráta izolační schopnosti nastává ve velmi krátkém čase řádově 10^{-8} s. Proto je třeba věnovat značnou pozornost diagnostice těchto systémů. Aby se zvýšila provozní spolehlivost je třeba dokonalých diagnostických metod, které by umožnily delší životnost izolačních systémů.

V diagnostice elektrických zařízení jde zpravidla vždy o zjištění stavu ve vztahu ke spolehlivosti v provozu. Požadavkem je dosažení optimální spolehlivosti za určitých daných podmínek. Pro výrobce slouží zkoušky zařazené do výrobního procesu k získání obrazu o jakosti vyráběných předmětů a částí. Je veden snahou zajistit technologii výroby tak, aby odpovídala předpokládané životnosti výrobku. Do této skupiny zkoušek patří celý jejich soubor od vstupní kontroly surovin a materiálů, až po přezkoušení na zkušebně, po dokončení stroje či zařízení, popř. až po zkoušky převírací.

V současné průmyslové praxi se u izolačních systémů používají různé diagnostické metody. Běžným diagnostickým postupem je napěťová zkouška (zkouška vysokým střídavým napětím, zkouška vysokým stejnosměrným napětím, zkouška rázovým napětím).

Je to proto, že pro izolační soustavu je průraz spojen s koncem funkčnosti stroje nebo zařízení.

Obecně lze diagnostické metody materiálů izolačních systémů elektrických strojů rozdělit na nedestruktivní a destruktivní metody. Za nedestruktivní se považují takové, které je možné často opakovat, aniž by zkoušený objekt vykazoval trvalé změny.

Destruktivní metody jsou takové, u nichž lze výsledek vyhodnotit za cenu poškozeného objektu. Pro svou jednoduchost a určité tradice jsou v praxi nejvíce rozšířeny zkoušky

vysokým napětím. Tyto zkoušky mají sice destruktivní charakter, ale účinnost je velká. Zkoušky vysokým napětím stejnosměrným se začaly používat teprve v nedávné době a své uplatnění našly zejména v profylaktice. Rázové zkoušky pro poměrnou náročnost na zdroj, měřicí přístroje a v některých případech i na přizpůsobení laboratoře, zůstávají ve zkušebních laboratořích a jsou omezeny na poměrně úzký okruh elektrotechnických výrobců. Asi před 25 lety se značně začaly rozvíjet metody analytické-strukturální (látková spektrometrie, diferenční termická analýza, metoda pevných degradačních produktů, plynová chromatografie. Tyto metody se používají v laboratorních podmínkách k potvrzení hypotéz o stárnutí izolačních materiálů.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 NOVÉ DIAGNOSTICKÉ METODY

V této kapitole jsou naznačeny několikaleté dílčí výsledky výzkumu v oblasti diagnostických metod pro izolační systémy elektrických točivých strojů.

1.1 Metoda odhadu kritického napětí tepelného průrazu

Tato metoda je založena na analýze rovnice, která popisuje u izolačního materiálu rovnováhu mezi teplem generovaným v důsledku dielektrických ztrát a teplem odváděným do okolí. Rovnice má tvar:

$$E \cdot J = \frac{dG}{dt} + W_z \quad (1)$$

kde E je intenzita pole, J proudová hustota, G vnitřní energie objemového elementu, t čas, W_z je ztrátový výkon.

Přesně řešit tuto rovnici je obtížné, protože vnitřní energie a ztrátový výkon jsou dány značně složitými výrazy. Obsahují řadu členů, které úzce souvisejí s vnitřní strukturou materiálu. Vytvoření obecné teorie na základě výše uvedené rovnice je možné pouze za předpokladu, že zjednodušíme veličiny G a W_z . Řešením rovnice se zabýval prof. Hlávka [1], který odvodil vztah pro kritické napětí tepelného průrazu tenké rovinné desky ve tvaru:

$$(U)^2 = a \cdot R_k \cdot (T_k - T_o) \quad (2)$$

V rovnici (2) je a ochlazovací konstanta, R_k vnitřní odpor při kritické teplotě, T_k kritická teplota tepelného průrazu a T_o teplota okolí. Kritické napětí představuje asymptotickou hodnotu napěťově časové charakteristiky. Lze ho pokládat za veličinu vhodnou pro hodnocení stavu izolace a v diagnostice použít odhad této hodnoty zjištěný na základě měření teplotní závislosti izolačního odporu. Vzhledem k obtížnému určení hodnoty ochlazovací konstanty a (zahrnuje řadu faktorů, které je možné exaktně určit pouze pro určitá elementární uspořádání), stačí vyhodnotit jako míru relativního znehodnocení izolantu veličinu úměrnou kritickému napětí:

$$U_k = \frac{U}{\sqrt{a}} = [R_k \cdot (T_k - T_o)]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

Základy této metody byly položeny prof. Hlávkou [1].

1.2 Metoda aktivační energie vodivostních dějů

U složených izolačních materiálů používaných k izolaci vinutí elektrických točivých strojů lze při ztrátě funkční schopnosti zpravidla usuzovat na tepelný mechanismus průrazu. Tento mechanismus je charakterizován zvýšenou elektrickou vodivostí, kterou silně ovlivňuje teplota v místě průrazu. Vzhledem k tomu, že vodivost u běžně používaných izolačních materiálů je iontového charakteru, mohou jako ionty vystupovat produkty oxidace, zbytky katalyzátorů, disociované koncové skupiny atd. Na elektrické vodivosti se u složených izolačních materiálů většinou podílí současně více druhů iontů. Potom je vnitřní konduktivita dána obecným vztahem:

$$\gamma_v = \sum n_i \cdot q_i \cdot u_i \quad (4)$$

kde n_i je koncentrace iontů, q_i elektrický náboj, u_i driftová pohyblivost i -tého iontu.

Z modelu dvojité potenciálové jámy lze odvodit explicitní vyjádření koncentrace a pohyblivosti. S využitím tohoto vyjádření látky s i -tým druhem iontu teplotní závislost vnitřní konduktivity má tvar:

$$\gamma_{vi} = \frac{A_{li}}{T \cdot \exp\left(\frac{W_{vi}}{k \cdot T}\right)} \quad (5)$$

kde A_{li} je činitel, T je absolutní teplota, W_{vi} je aktivační energie vodivostního děje (zahrnuje energii nutnou pro vznik daného druhu iontu a energii potřebnou k realizaci pohybu iontu) a k je Boltzmannova konstanta.

V praxi je často vztah (5) nahrazován zjednodušeným výrazem:

$$\gamma_{vi} = A_i \cdot \exp\left(\frac{-B_{vi}}{T}\right) \quad (6)$$

Tato vztah v grafické závislosti $\ln \gamma_{vi} = F\left(\frac{1}{T}\right)$ představuje přímku se směrnici $-B_{vi}$. Obsah členu B_{vi} vyplývá z porovnání vztahu (5) a (6). Při aproximativním vztahu (6) mají, vzhledem k neznalosti druhu rozložení aktivačních bariér jednotlivých mechanismů vodivosti, činitelé B_v a W_v mají charakter efektivních hodnot. Pro diagnostické účely lze použít činitel B_v , který získáme z teplotní závislosti konduktivity, a to aplikací např. metody nejmenších čtverců [1].

1.3 Metoda aktivační energie dominantních polarizačních dějů

Tato metoda vychází z využití dielektrické absorpce probíhající v izolačním materiálu při různých teplotách po připojení elektrického pole. Pro náš účel lze použít vztah:

$$i = A \cdot \exp\left(\frac{-t}{\tau_o}\right) \quad (7)$$

kde i je absorpční proud, A konstanta, τ_o vyjadřuje střední relaxační dobu polarizace.

Střední relaxační dobu polarizace závisí na teplotě vztahem:

$$\tau_o = \tau_{o1} \cdot \exp\left(\frac{W_p}{k \cdot T}\right) \quad (8)$$

kde τ_{o1} je konstanta, W_p efektivní aktivační energie dominantních polarizačních dějů, k Boltzmannova konstanta, T absolutní teplota.

Rovnici (8) lze přepsat do tvaru:

$$\tau_o = \tau_{o1} \cdot \exp\left(\frac{B_a}{T}\right) \quad (9)$$

kde B_a je úměrná efektivní aktivační energie polarizačních dějů s konstantou úměrnosti $\frac{1}{k}$.

Pro diagnostické účely lze tedy použít činitel B_a , který určíme z dielektrické absorpce probíhající při různých teplotách.

Právě naznačený postup je pouze hrubým zjednodušením, neboť teorie předpokládá pouze jednu střední relaxační dobu. U většiny izolačních materiálů značně kolísají interakce jednotlivých částic a existují velké rozdíly v relaxačních dobách. Při nekonečném množství relaxačních dob jsou tyto spojitě rozloženy podle určité distribuční funkce okolo nejpravděpodobnější relaxační doby [1].

2 DIAGNOSTICKÉ METODY POUŽÍVANÉ V PRAXI

2.1 Nedestruktivní zkoušky

2.1.1 Vizuální kontrola vinutí

Vizuální prohlídka patří mezi nejjednodušší, ale patří zároveň k nejdůležitějším prostředkům kontroly vinutí. Vinutí je vystaveno v provozu teplotnímu, chemickému a mechanickému namáhání. Působením tohoto namáhání na vinutí, lze změny kontrolovat vizuálně. Vizuální prohlídkou lze indikovat první údaje o stavu izolační soustavy.

Teplotní namáhání

Teplota vinutí podstatně ovlivňuje život izolace. Např. Montsingerovo pravidlo říká, že zvýšení teploty o 8 až 10K zkrátí život izolační soustavy přibližně na polovinu. Izolace statorového vinutí je konstruována tak, aby při provozní teplotě (přibližně 80°C) její plánovaný život trval 120 000 provozních hodin. Provozní teplota způsobuje postupnou degradaci izolace, která se projeví i na jejím vzhledu:

- a) *Termoplastická izolace* Degradací účinky teploty se projevují změnou barvy izolace a jejím nafouknutím.
- b) *Termosetická izolace* Izolační soustavy, které jsou ošetřeny umělou pryskyřicí jsou proti vlivům provozní teploty odolnější. Svým vlastnostem vyhovují teplotní třídě F (termoplastická izolace patří do třídy B). Termosetické izolační soustavy mění svůj objem v závislosti na teplotě mnohem méně než soustavy termoplastické. Změny objemu izolace při změnách provozní teploty se mohou projevit uvolněním klínů, které fixují drážkovou část vinutí.
Do teplotního namáhání patří i výbojová činnost, při které dochází k místnímu ohřevu dielektrika. Vizuálně lze zjistit poškození izolace povrchovými výboji.

Chemické namáhání

Erozivní účinky látek, vznikající při vnitřních výbojích, se na povrchu izolační soustavy neprojevují. Dochází-li však k povrchovým výbojům, vznikají u strojů chlazeným vzduchem kyslíkaté látky, které podporují narušování izolační soustavy. Tento děj je

nebezpečný u strojů s termosetickou izolací. V určitých případech lze objevit následky působením agresivních látek, které se dostaly do vnějšího prostředí do chladicího media.

Mechanické namáhání

Vinutí je za provozu vždy namáháno vibracemi a dynamickými silami. Chvění stroje je způsobeno nevyvážeností rotujících částí a působí na vinutí trvale. Dynamické síly vznikají při obvyklých provozních dějích, jako je najíždění, odstavení nebo při mimořádných jevech jako jsou zkratky a přepětí.

Chvění převážně způsobuje uvolňování klínků fixující drážkovou izolaci vinutí. Dynamické síly poškozují úvazy čel vinutí. Zvláště jsou nebezpečné účinky blízkosti zkratů.

Při nedodržení technologického postupu se mohou dostat do stroje volné kovové předměty (kovové piliny, špony), které mohou poškodit při provozu značně izolační soustavu. Z tohoto důvodu je nutná pečlivá vizuální kontrola nejen na počátku výroby stroje, ale i při revizních kontrolách [4].

2.1.2 Izolační odpor

Zjišťování stavu izolace elektrického zařízení patří mezi významná měření. Měření izolačního odporu je důležité především z bezpečnostních důvodů, protože ochrana živých částí před dotykem je ve většině případů zajištěna jejich izolací.

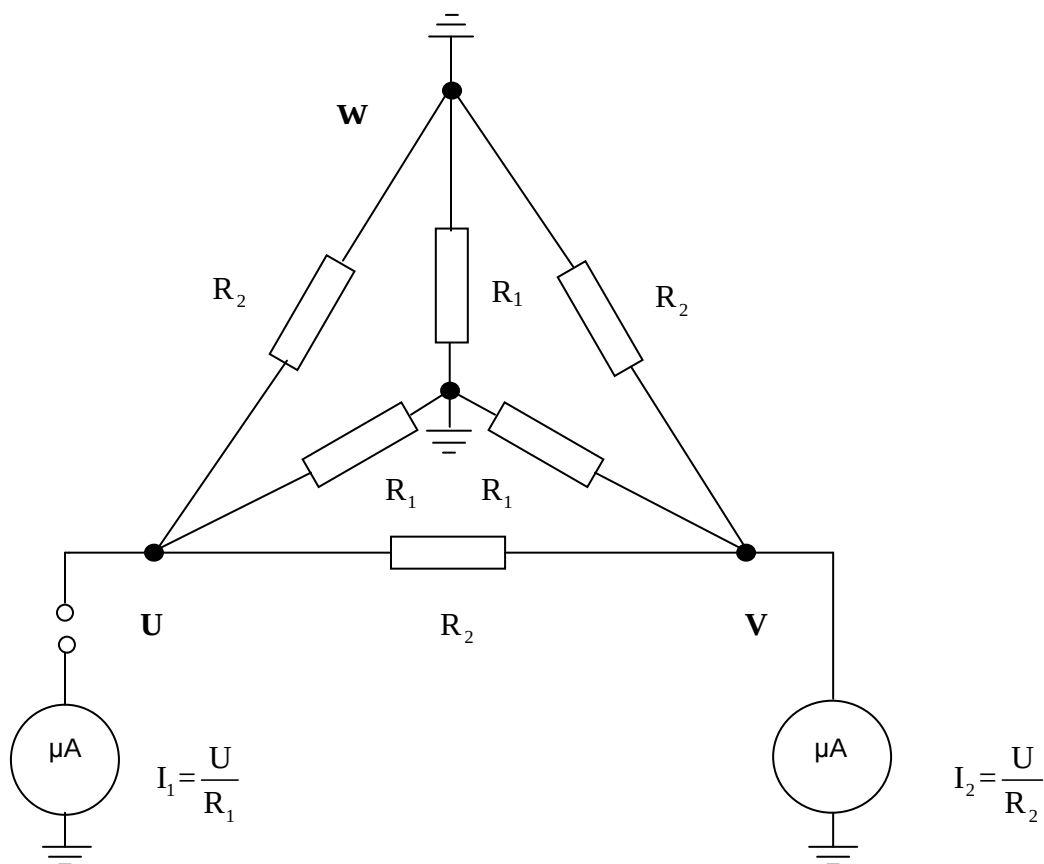
V současné době existují materiály s velmi vysokým izolačním odporem, ale to neznamená, že se nevyskytnou izolační poruchy.

Izolační odpor měříme nejen u vodičů, rozvodných soustav, elektrických spotřebičů a různých měřicích přístrojů, ale i izolační odpor podlah a stěn.

K měření se používají speciální analogové nebo číslicové ohmmetry (měřiče izolací), kterými lze měřit odpory v hodnotách řádu $M\Omega$. Tyto měřicí přístroje měří proud protékající izolantem při napětí např. 500V a vyhodnocují podle Ohmova zákona izolační odpor, tj. poměr přiloženého napětí a vyvolaného proudu. Přístroje na měření izolačního odporu jsou konstruovány tak, že nemohou dosáhnout nebezpečných hodnot napětí a nejvyšší proud je omezen na hodnotu 10mA [5].

Měření izolačního odporu statorového vinutí

Izolace statorového vinutí lze pro měření stejnosměrným napětím nahradit schématem podle obr. 1.



Obr. 1. Náhradní schéma vinutí.

V tomto schématu vyjadřují tři odpory R_1 odpory mezi vodiči všech fází, statorové plechy a odpor izolace. Odpory R_2 jsou odpory jednotlivých fází proti sobě, bandáží a výstuh.

Mikroampérmetrem se v bodě V naměří proud I_2 , z něhož lze vypočítat odpor R_2 . Druhým mikroampérmetrem se v bodě U naměří proud I_1 , z něhož lze vypočítat celkový odpor jedné fáze:

$$R = \frac{R_1 R_2}{2R_1 + R_2} \quad (10)$$

Tato metoda, při níž se měří jednotlivé fáze, má oproti metodám, při nichž se napětí přikládá na všechny tři fáze současně velkou výhodu, že se dá kontrolovat opotřebení izolace jednotlivých fází u pravidelných revizí [4].

2.1.3 Ultrazvuk

V izolaci elektrických zařízení se mohou vyskytovat trhliny, které nejsou vidět, ale mohou značně znehodnocovat kvalitu izolační soustavy elektrického stroje. Ke zjištění kvality izolační soustavy se dá použít ultrazvuk.

Hlavní podmínkou je, aby zdroj ultrazvuku byl přiložen bezprostředně ke zkoušenému objektu. Jako ultrazvukový generátor se používají piezoelektrické krystaly, na které se přivádí napětí pro vybuzení mechanických kmitů. V pevných tělesech se obecně šíří postupné vlny. Podle geometrického tvaru krystalu a podle rozměrů zkoušeného tělesa mohou vznikat i vlny příčné. Rychlost zvukových vln je:

$$v = \frac{E_t}{\rho} \quad (11)$$

kde ρ je hustota prostředí, E_t modul pružnosti v tahu.

Rychlost zvuku v pevném tělese je řádově 5000m/s, ve vzduchu mnohem menší, přibližně 300m/s.

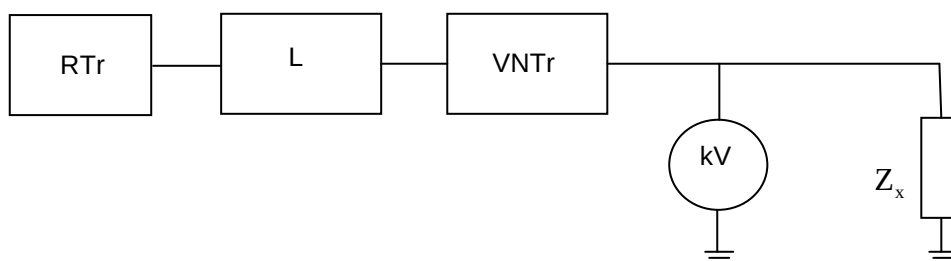
Přiložíme-li zdroj ultrazvuku k tělesu, postupují zvukové vlny tělesem, aniž by se vyzařovaly ven z tělesa, protože odpor vzduchu je pro vlny velmi velký. Rýhy, dutiny nebo pórovitá místa mohou být rozeznána podle odrazu, popř. podle oslabení zvukových vln. Pórovitým místem se kromě toho šíří menší rychlost, což je způsobeno obsahem vzduchu v pórech.

Ultrazvukové generátory používají jako zdroje většinou repetiční impulsní generátory, které vyrábějí periodický vysokofrekvenční nebo aperiodický impuls. Kmitočet ultrazvuku je zhruba 0,5 až 5MHz [4].

2.2 Destruktivní zkoušky

2.2.1 Zkouška střídavým napětím

Měření vinutí proti zemi (nebo kostře) patří mezi základní a nejjednodušší měření. Toto měření určuje stav drážkové izolace a izolaci samotného vinutí. Pro toto zkoušení se používá měřicí přístroj, kde je autotransformátor a dovoluje měřit napětí až do několika kV viz. obr. 2.



Obr. 2. Schéma zapojení pro zkoušku střídavým napětím.

kde RTr je říditelný autotransformátor, L laděná tlumivka, VNTr vysokonapěťový transformátor, Z_x impedance zkoušeného objektu.

Na obr. 3. je měřicí přístroj Bouchet Diplex, který měří vysokým střídavým a stejnosměrným napětím do hodnoty 5kV. Tento přístroj je kombinovaný s měřením izolačního odporu.



*Obr. 3. Měřicí přístroj pro zkoušení střídavým
a stejnosměrným napětím.*

Zkušební napětí je dáno v příslušných normách (IEEE, IEC) pro jednotlivý typ motoru nebo postupech v dané společnosti.

Zkoušky mezi izolovanými částmi, které se používaly v minulosti byly základem pro nové přesnější zkušební metody, především pro rázovou zkoušku. Zkouška stejnosměrným napětím nebo měřením megmetem bylo vhodné ke kontrole izolace vinutí proti zemi. Porucha mezi vinutím, která platí pro mezizávitové a mezifázové průrazy se nezjistila. Proto se musela najít nová řešení pro zkoušení vinutí. Měření rázovou vlnou nám dává úplnou odpověď.

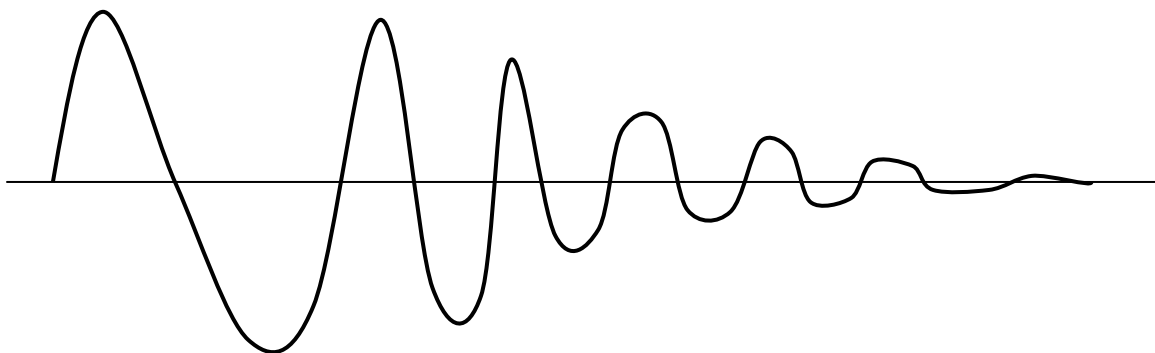
2.2.2 Zkouška rázovou vlnou

Měření rázovou vlnou se provádí ke zjištění poškození izolace mezi závity uvnitř motorového vinutí. Tento problém nemůže být nalezen jiným způsobem, než testem rázovou vlnou. Tento test se stává z aplikace krátkého, rychlého a vysokého proudového impulsu do vinutí. Tento impuls indukuje podle Lenzova zákona napěťový rozdíl mezi sousedními závity uvnitř vinutí. Jestliže je izolace mezi těmito závity nějak zeslabená a pokud je napětí mezi závity dostatečně vysoké, dojde k elektrickému oblouku mezi vodiči. Elektrický oblouk je detekován pozorováním změny ve tvaru odezvy rázové vlny.

Teorie rázovou vlnou

Krátký proudový impuls se vpustí do cívky během testu tak, aby vyvolal spád napětí (nebo potenciálu) na celé délce vodiče vinutí. Tento spád vyvolá chvilkové napěťové namáhání mezi závity.

Cívka odpovídá na rázový impuls odezvou – tlumenou sinusovou křivkou tvaru vlnové křivky viz. obr. 4.



Obr. 4. Příklad odezvy na rázovou vlnu.

Vlnová křivka, která je pozorována během testu rázovou vlnou je přímo závislá na indukčnosti cívky.

Cívka se skládá ze dvou základů –**obvod LC**.

Obvod je tvořen indukčností cívky L a její vnitřní kapacitou C . Indukčnost L cívky závisí na počtu závitů ve vinutí a typu železa uloženého v ní.

Frekvence vlnové křivky je dána vztahem :

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (12)$$

Tato rovnice znázorňuje to, že když se indukce zmenšuje, frekvence se zvětšuje.

Test rázovou vlnou může detekovat chyby mezi závity zapříčiněnou slabou izolací. Jestliže je napěťový potenciál vyšší než dielektrická pevnost závitové izolace na jednom nebo více závitech může být obvod zkratován. Tímto je redukován počet závitů cívky. Méně pracovních závitů snižuje indukčnost cívky a zvyšuje frekvenci odezvy křivky na rázovou vlnu.

Napětí nebo amplituda křivky rázové vlny je tedy snížena z důvodu snížení indukčnosti cívky chybami mezi závity. To je určeno rovnicí :

$$U = L \frac{di}{dt} \quad (13)$$

kde proud i se mění v závislosti na čase impulsu t .

Když je izolace mezi závity slabá dojde k nízkoenergetickému impulsu oblouku mezi závity a změně indukčnosti. Když se to stane, vlnová křivka se stává nestabilní.

Snížení indukčnosti se vyskytuje z důvodu mezizávitových chyb, špatného zapojení, rozpojení atd..Dílčí zkoušení izolace se provádí rázovou vlnou, když je zem na kostře stroje.

Výpočet zkušebního napětí pro měření rázovou vlnou

Doporučené napětí pro zkoušku rázovou vlnou pro motory, generátory a transformátory je:

$$U_r = 2U_p + 1000V \quad (14)$$

kde U_p je provozní napětí motoru.

U nových vinutí nebo převinutých motorů se napětí zvyšuje příslušným koeficientem, který je 1,2 až 1,7.

2.2.3 Motivace pro zkoušení rázovou vlnou

Motory jsou ve svém pracovním prostředí vystaveny vysokým energetickým pulsům a chvilkovým přepětím. Tyto náhodné pulsy mohou poškodit izolaci motoru a mají-li

dostatek času způsobí katastrofické selhání motoru. Příčiny vysokých energetických pulsů a přechodových přepětí jsou:

- Vysoký nárazový proud při odsakování kontaktů připojených k motoru na síť.
- Údery blesku do vedení.
- Střídače a měniče.
- Napěťové špičky způsobené ostatními motory a transformátory v síti.

Kontaktní náraz

Jedním z hlavních zdrojů vysoko energetických přechodových jevů je spouštěč, který má motor chránit. Když kontakty vypínače spínají během spouštění, velmi často dochází k jejich „odrazu“ při nárazu na sebe nebo chvění, což způsobuje velký nárazový proud, který několikrát zapne a vypne. Výsledkem přerušení proudu je induktivní zpětný náraz – napěťová špička. Velký nárazový proud s velkou indukčností motoru je to, co dává napěťovým špičkám jejich vysokou energii.

Údery blesků

V současné době je velká snaha chránit síť před poruchami způsobené blesky, často se však vyskytují údery blesků v síti. Toto přechodné vysoké napětí se dostává až k motorům a to způsobuje zničení motoru, protože blesk disponuje velkým napětím a proudem.

Střídače a měniče

Pohony proměnných rychlostí nebo šířkově-pulsně modulované pohony jsou založeny na velmi rychlém spínání proudů a takovým způsobem motory běží přednastavenou rychlostí. Vypínání proudu se opět kombinuje s vysokou indukčností a to způsobuje vysokorychlostní přechodové jevy. Tyto jevy působí na motor, kde mohou pomalu poškozovat izolaci motorového vinutí.

Rázová vlna síť

Když jsou pracující motory nebo transformátory vypnuty, dochází k tomu, že energie z těchto zařízení musí někam odejít. Energie je buď absorbována ostatními motory nebo transformátory připojené k síti. Tato energie tvoří často velké přechodové napěťové špičky, které jsou opět zdrojem poškození motorů zejména těch, které mají zeslabenou izolaci [6].

II. PRAKTICKÁ ČÁST

3 MĚŘENÍ RÁZOVOU VLNOU

V této části se budu zabývat měřením pomocí rázového napětí, nebo-li rázové vlny na částech synchronního motoru-alternátoru. Měření budu provádět na statoru, rotoru a kotvě. Toto měření je velice důležité nejen z hlediska provozu schopnosti celého alternátoru, ale i z hlediska jakosti výroby.

Pro měření rázovou vlnou jsem použil měřicí přístroj Baker D12R viz. obr. 5.

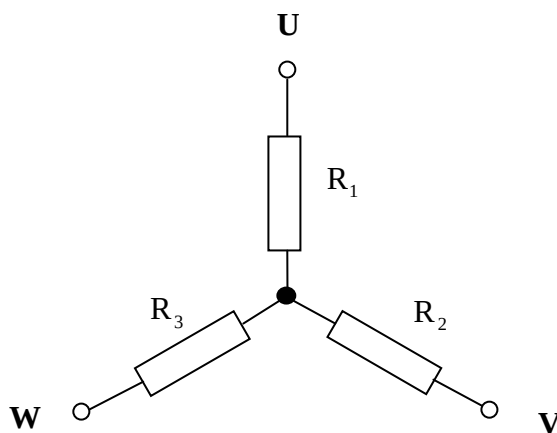
Popis přístroje je uveden v příloze P I.



Obr. 5. Měřicí přístroj pro měření rázovou vlnou.

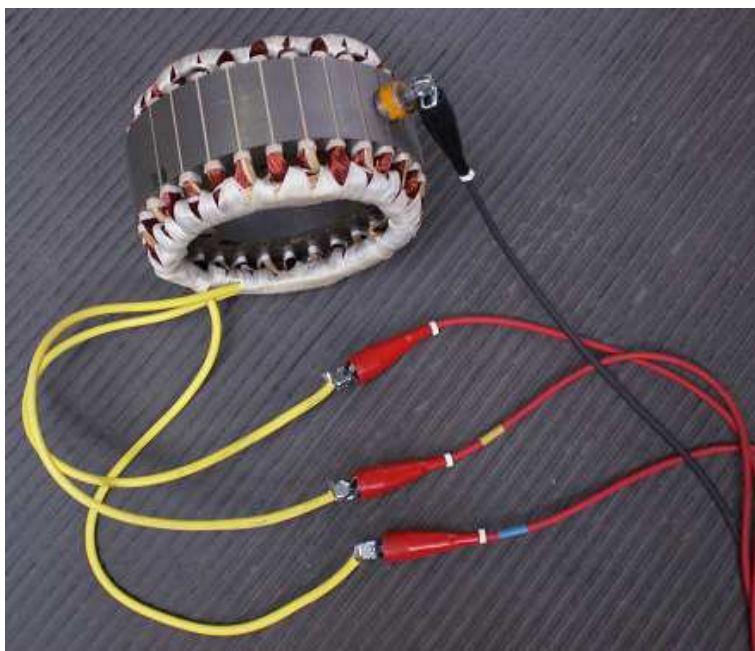
3.1 Kotva budiče

Vnitřní zapojení kotvy budiče je do hvězdy viz. obr. 6.



Obr. 6. Vnitřní zapojení kotvy.

Zkušební červené vývody „živé“ 1, 2, 3 se připojí na vývody U, V, W a zemní černý vývod se připojí na kostru viz. obr. 7.



Obr. 7. Zapojení zkušebních vývodů na kotvě.

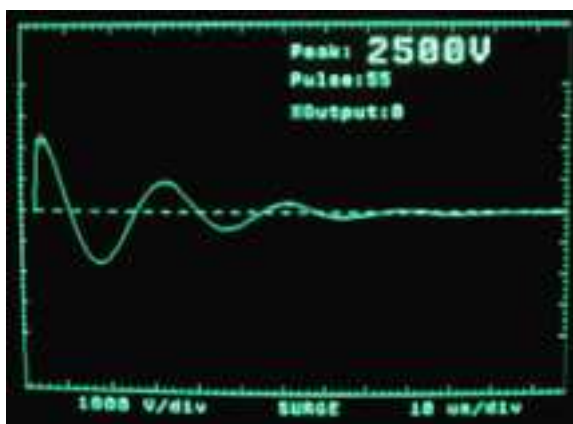
Zkušební napětí se vypočítá podle vzorce (14).

Zkušební napětí pro rázovou vlnu je dáno podnikovou normou. Toto napětí je 2500V.

Postup měření :

- 1) Na přepínači funkcí jsem nastavil hodnotu SURGE .
- 2) Na přepínači vývodů jsem nastavil hodnotu 1.
- 3) Pro spuštění testu jsem zmáčknul tlačítko TEST, které se musí při testu držet a tlačítkem $\wedge$ jsem zvyšoval napětí na hodnotu 2500V.

Na obrazovce vznikla křivka odezvy na rázovou vlnu viz. obr. 8.

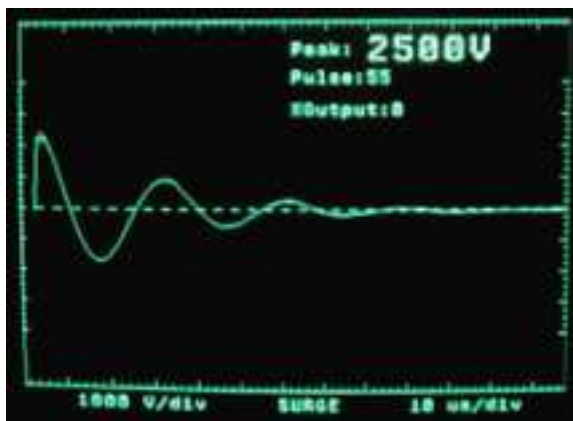


Obr. 8. Odezva na rázovou vlnu fáze U.

Po uložení křivky zůstane tato cívka uložena na pozadí jako standardní, podle které se budou ostatní křivky porovnávat vzhledem ke standardu.

Potom jsem přepínač přepnul do polohy 2 a postupoval podle bodu 3). Na obrazovce vznikly dvě křivky, které se překrývají obr. 9.

Pokud se obě křivky překrývají a nebo nejsou-li nestabilní, tak je vinutí v pořádku.



Obr. 9. Odezva na rázovou vlnu fáze V.

Potom jsem přepínač přepnul do polohy 3 a postupoval podle bodu 3).

Na obrazovce vznikly dvě křivky, které se překrývají viz. obr. 10.

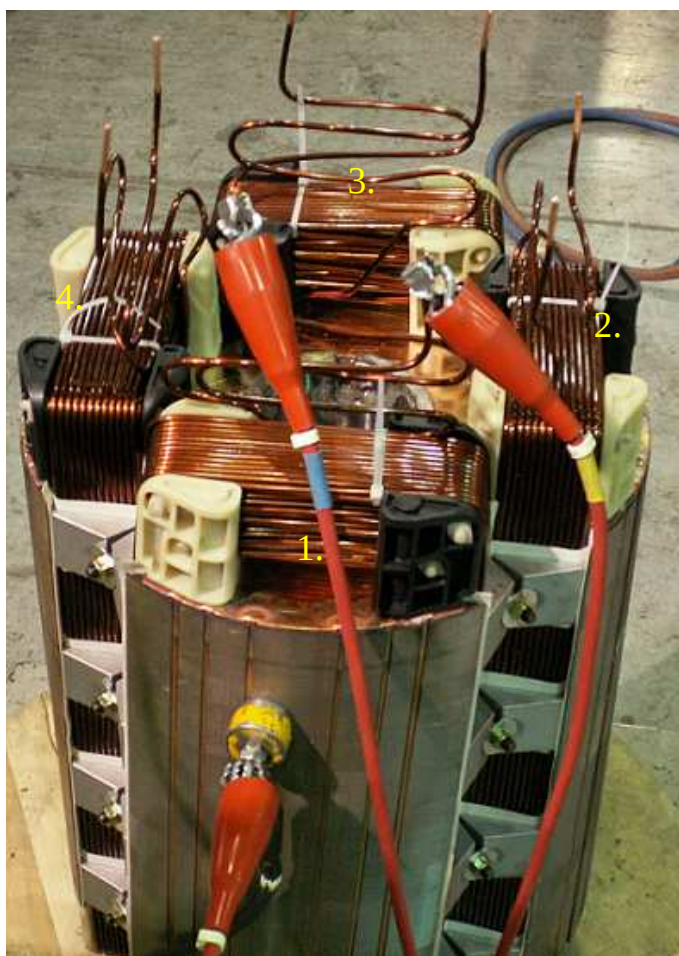


Obr. 10. Odezva na rázovou vlnu fáze W.

Pokud se obě křivky překrývají a nebo nejsou-li nestabilní, tak je vinutí v pořádku.

3.2 Rotor alternátoru

Při měření rázovou vlnou rotoru se změří jednotlivé cívky, které se porovnají podle standartu, tj. jedna se uloží do paměti a ostatní tři se porovnají podle standartu. Zapojení vývodů měřicího přístroje na cívce č.1 je na obr. 11.

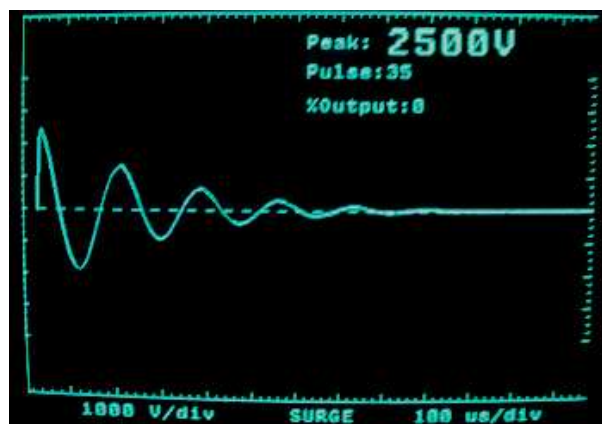


Obr. 11. Zapojení zkušebních vývodů na cívce rotoru.

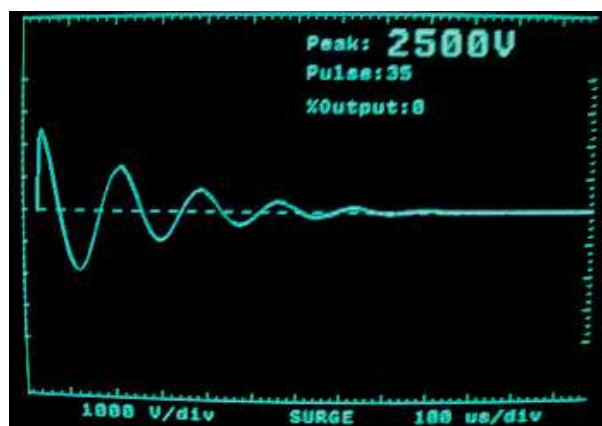
Odezvy na rázovou vlnu na jednotlivých cívkách č. 1-4 jsou na obr. 12, 13, 14, 15.



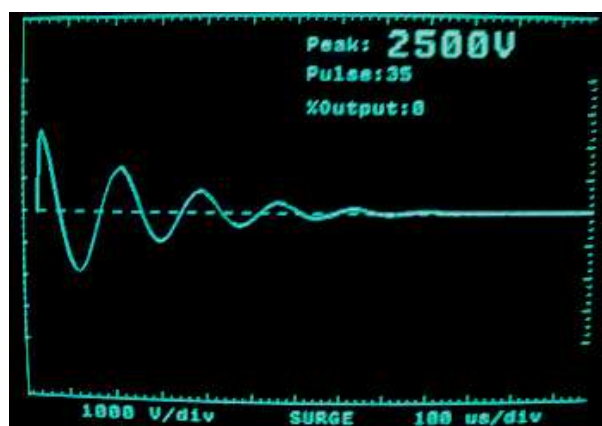
Obr. 12. Cívka č.1.



Obr. 13. Cívka č.2.



Obr. 14. Cívka č.3.



Obr. 15. Cívka č.4.

3.3 Stator alternátoru

Pro měření vinutí tří fázového statoru alternátoru můžeme měřit dvěma způsoby:

1. Cívky se změří jednotlivě tzn. , že se změří jednotlivé cívky tří fází, které se uloží do paměti a porovnají se.
Toto měření je zbytečně dlouhé a zabere až několik desítek minut, ale má velikou výhodu při odhalování mezizávitového zkratu jednotlivých cívek fází vinutí.
2. Druhý způsob je, že všechny tři fáze se zapojí do hvězdy a na každý vývod fáze se připojí vývod měřicího přístroje a jednotlivé fáze se porovnají.
Toto měření trvá asi pět minut.

Pro měření jsem tedy použil stejné zapojení do hvězdy jako je u kotvy viz. obr. 6. , protože při sériové výrobě je toto měření rychlejší a nemusí se zbytečně rozpojovat zapojení vývodů jednotlivých fází.



Obr. 16. Zapojení statoru do hvězdy a zkušebních vývodů.

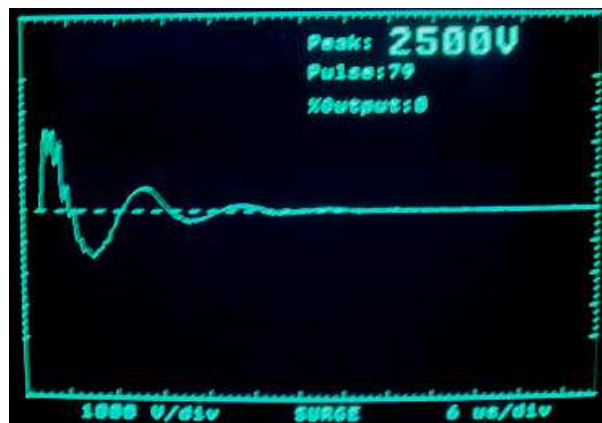
Postup měření statoru je stejný jako u měření kotvy, která je zapojena do hvězdy.

Jak je vidět na obr. 17. , tak je první vlna zkreslená.To je dáno pláštěm kostry statoru, protože při spuštění testu se vytváří elektromagnetická indukce cívek, na kterou má vliv i kostra statoru a kterou vyhodnocuje měřicí přístroj jako zkreslení první vlny.

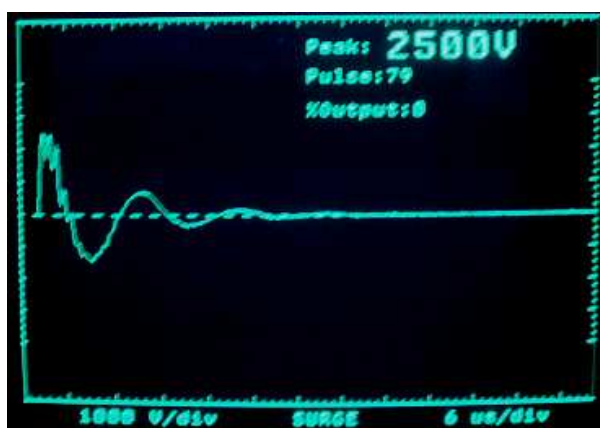


Obr. 17. Zkreslená vlna.

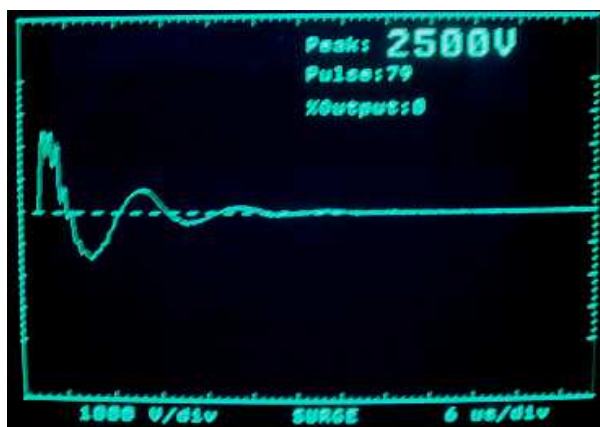
Po změření jednotlivých fází U ,V, W jsou křivky na obr. 18, 19, 20.



Obr. 18. Vlna fáze U.



Obr. 19. Vlna fáze V.



Obr. 20. Vlna fáze W.

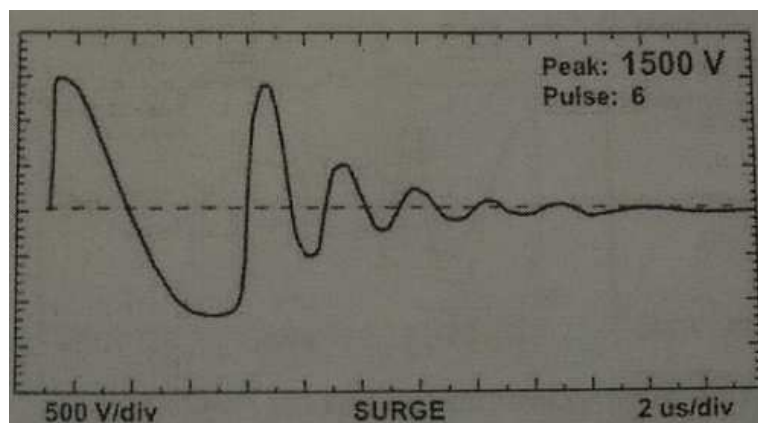
Na tomto třífázovém motoru lze ukázat, že většina motorů je tvořena stejnými cívkami nebo fázemi, což umožňuje spolehlivé srovnání a tím i zkoušku průkaznou.

Po srovnání všech tří fází U, V, W je vlnová křivka vinutí stejná a je tedy vinutí v pořádku. Jak bylo vidět při měření jednotlivých částí alternátoru, tak křivky nejsou nikdy stejné. Každé vinutí má svou identickou křivku. To je dáno počtem závitů jednotlivých cívek vinutí. To znamená, když se indukce zmenšuje, tak se frekvence zvětšuje.

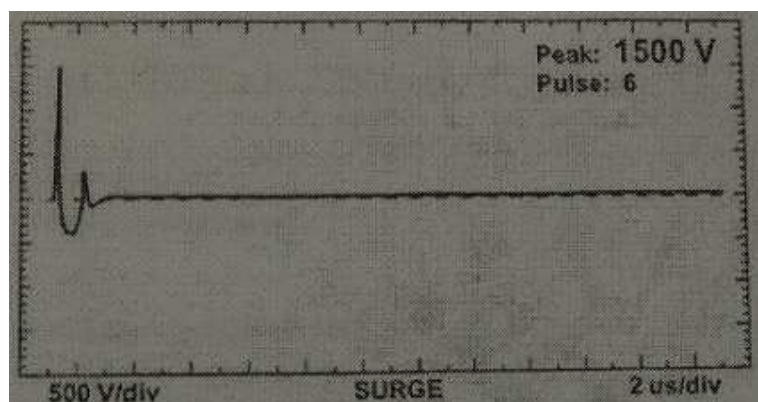
Při měření rázovou vlnou nesmí být v blízkosti žádný kovový předmět, protože při měření vzniká elektromagnetická indukce a tím dochází ke zkreslení křivky-křivka je nestabilní.

3.4 Diagnostika vinutí

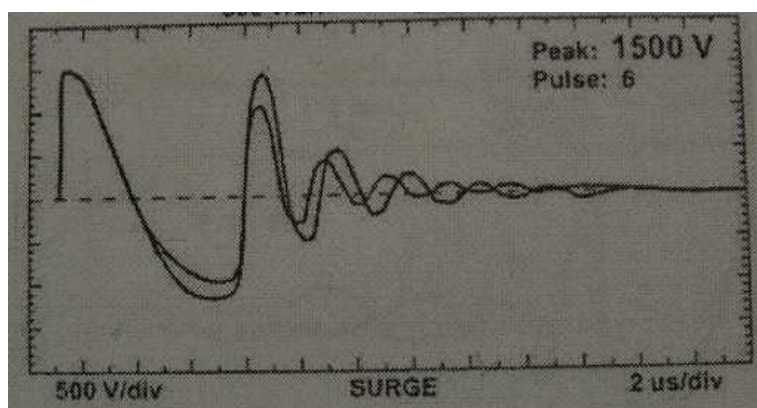
Jako vzor pro vyhodnocení křivek uvádím třífázový indukční stator. Zde jsou vidět možné deformace křivky rázovou vlnou podle zkratu vinutí. Tyto možné zkraty poslouží jako vzor pro lepší diagnostiku zkratů vinutí.



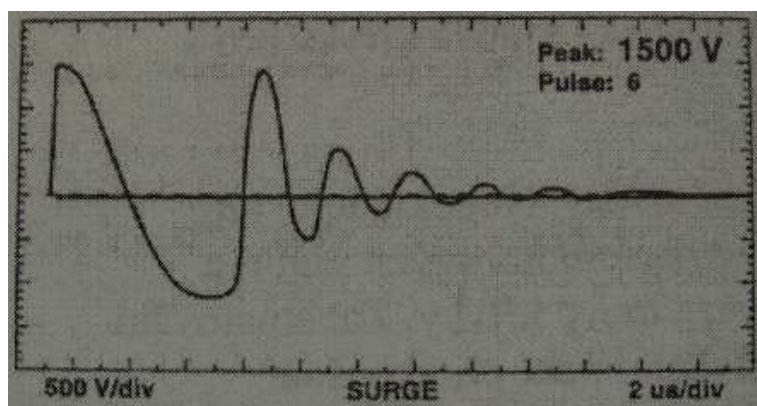
Obr. 21. Cívky bez závady.



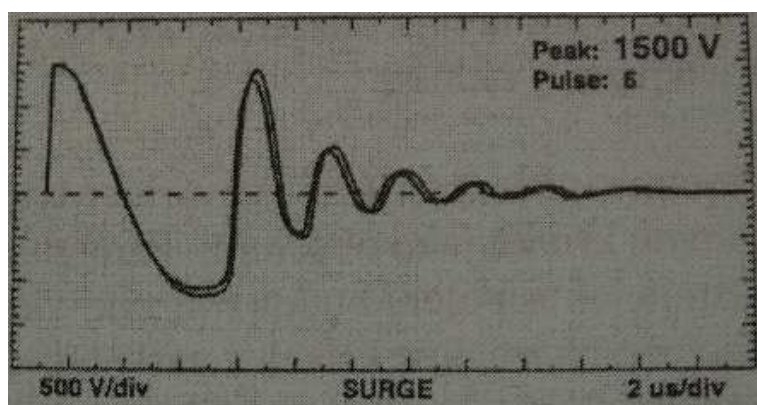
Obr. 22. Zkratované samostatné vinutí.



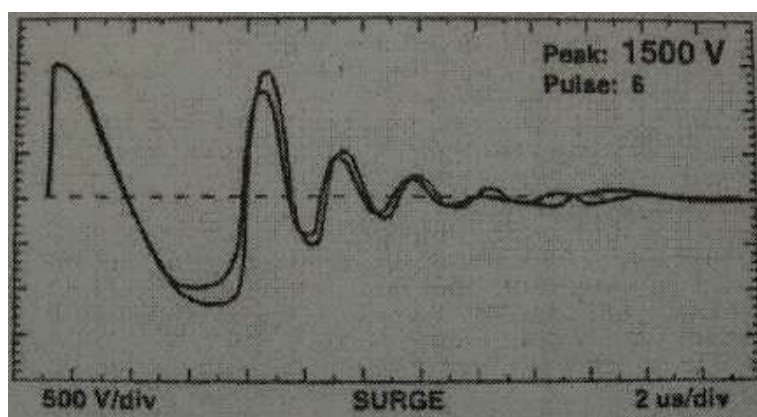
Obr. 23. Částečný zkrat na kostru.



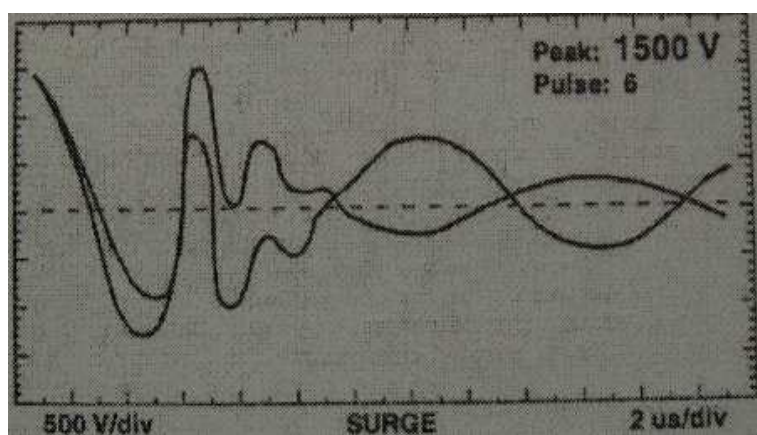
Obr. 24. Zkrat na zem.



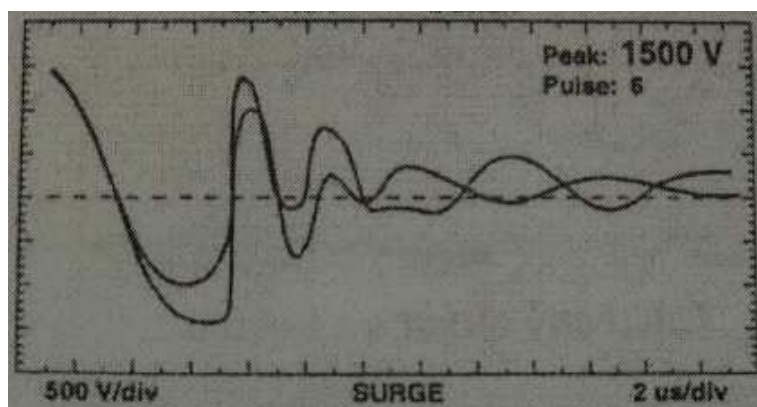
Obr. 25. Mezizávitový zkrat.



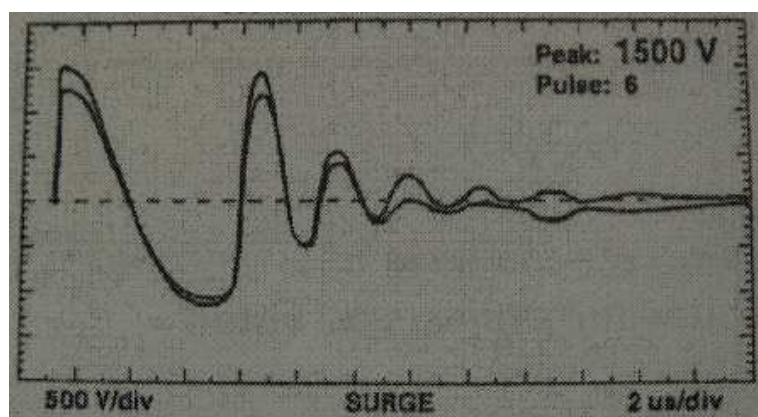
Obr. 26. Zkrat cívky na cívku..



Obr. 27. Zkrat fáze na fázi.



Obr. 28. Zkrat sekce na sekci.



Obr. 29. Obrácené cívky.

4 MĚŘENÍ IZOLAČNÍHO ODPORU

Pro měření izolačního odporu jsem použil měřicí přístroj Bouchet Diplex.

Jeto kombinovaný měřicí přístroj střídavého, stejnosměrného napětí a měřičem izolačního odporu viz. obr. 30.



Obr. 30. Měřicí přístroj Bouchet Diplex.

1. Ukazatel střídavého napětí
2. Ukazatel stejnosměrného napětí
3. Ukazatel izolačního odporu
4. Ukazatel proudu
5. Přepínač napětí 500V/1000V pro měření izolačního odporu

4.1 Kotva budiče

Měření izolačního odporu kotvy jsem změřil celkové vinutí proti kostře. To znamená, že cívky jsou zapojeny v jeden vývod. Zapojení vinutí kotvy je do hvězdy viz. obr. 6.

Měřicí vývody jsem zapojil tak, že „zem“ vývodu jsem dal na kostru a „živý“ vývod jsem zapojil na jeden ze tří vývodů kotvy. Podniková norma je, že celkový izolační odpor kotvy musí být minimálně $5000\text{ M}\Omega$ při napětí 500V.

Na měřícím přístroji izolačního odporu jsem naměřil $10000\text{ M}\Omega$, to znamená, že celkový izolační odpor je vyhovující.

4.2 Stator alternátoru

Měření izolačního odporu statoru alternátoru jsem změřil celkové vinutí proti kostře. Abych mohl změřit celkový izolační odpor statoru musím propojit vinutí do hvězdy obr. 16. Měřicí vývody jsem zapojil tak, že „zem“ vývodu jsem dal na kostru a „živý“ vývod jsem zapojil na jeden ze tří vývodů fáze. Podniková norma je, že celkový izolační odpor statoru musí být minimálně $1000\text{ M}\Omega$ při napětí 500V.

Na měřícím přístroji izolačního odporu jsem naměřil $3500\text{ M}\Omega$, to znamená, že celkový izolační odpor je vyhovující.

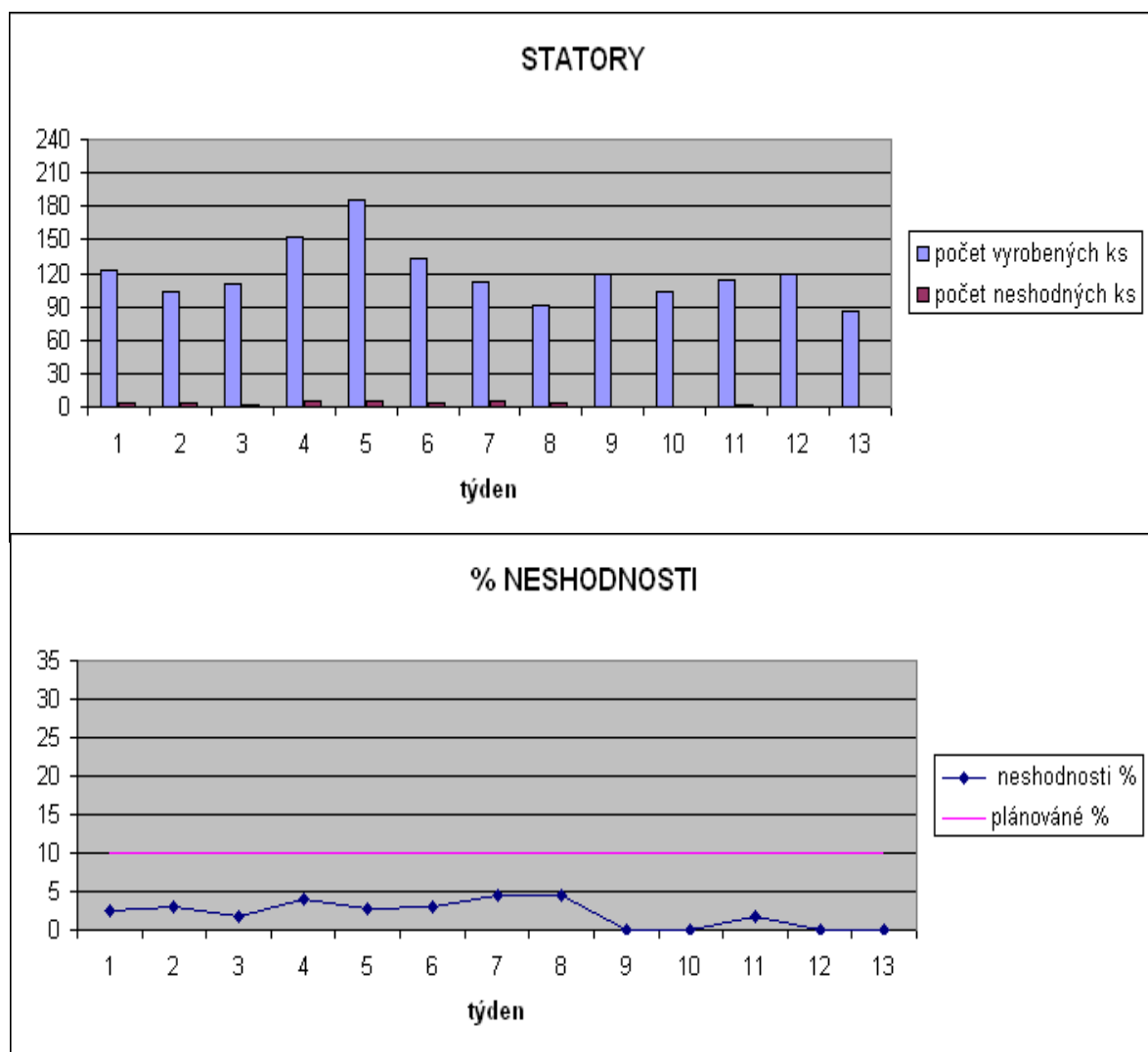
5 JAKOST VÝROBY

Základní způsob zabezpečení jakosti při výrobní etapě alternátoru je kontrola a měření výrobku při jednotlivých částí etapy výroby. Většina závad a neshod vzniká při navíjení cívek, při které dochází k porušení izolačního systému stroje a tím i k ohrožení délky provozuschopnosti samotného výrobku.

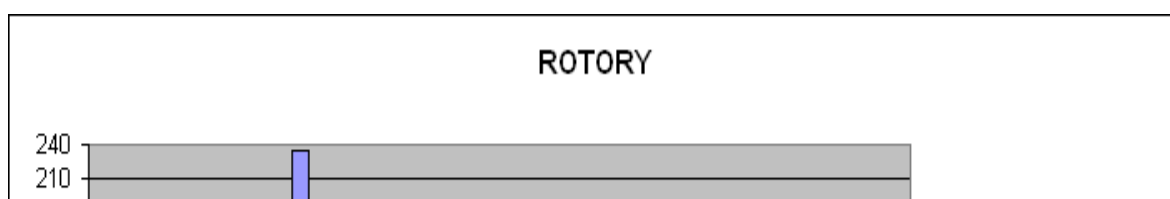
Díky měření při jednotlivých výrobních etapách, lze nejen neshody vyhledávat, ale i odstraňovat. Tím vzniká menší počet neshod hotového alternátoru.

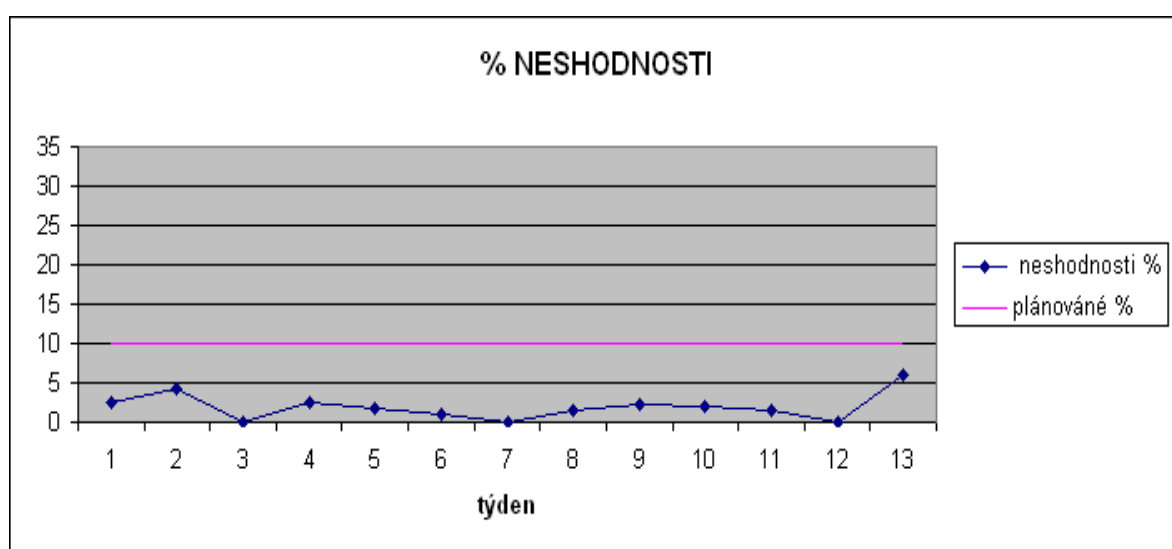
Pro řízení jakosti a zpracování neshod jsem použil histogram statorů viz. obr. 31. a histogram rotorů viz. obr. 32., které uvádějí počet vyrobených kusů za týden a počet špatných kusů. Převažující závada je mezizávitový zkrat. Celková neshodnost je vyjádřena v procentech.

Jak je vidět na histogramech, tak neshodnosti nepřevyšují většinou hodnotu 5%. Celková kvalita výroby je velice dobrá, protože podniková norma je 10% plánovaných neshodností.



Obr. 31. Histogram statorů.





Obr. 32. Histogram rotorů.

6 ZÁVĚR

Tuto diplomovou práci lze použít jako praktickou studii nad diagnostikou izolačních materiálů točivých elektrických strojů. Tato práce ukazuje jak efektivně se dá měřit a kontrolovat stav izolačního systému točivých elektrických strojů, na který je kladen při výrobě veliký důraz. Tyto zkoušky mají vliv na řízení jakosti výroby.

V teoretické části jsem se zabýval možnostmi a novými metodami v oblasti výzkumu nad diagnostikou izolačních systémů elektrických točivých strojů. Tyto nové metody dávají nový směr při tvorbě nových izolačních materiálů. Hlavně nová metoda „Metoda odhadu kritického napětí tepelného průrazu“, protože tepelný průraz má velký vliv na kvalitu izolační soustavy elektrických točivých strojů, kdy je stroj značně namáhán. Hlavně statorová izolace alternátoru, kdy protéká statorem velký proud až tisíce ampér. Tím dochází k ohřevu stroje a tím i celého izolačního systému. Tak dochází v závislosti na čase ke zhoršení vlastností izolačního materiálu a zkracuje se doba životnosti izolačního materiálu. Po určité provozní době dochází i k tepelnému průrazu izolační soustavy.

V další části jsem se zabýval současnými metodami používané v současné elektrotechnické praxi. Mezi hlavní zkoušky izolačních systémů patří destruktivní zkoušky, které mají zásadní vliv při aplikování v provozu na jakost výroby, kdy dochází k průrazu, a tím k rychlé diagnostice poškození izolace. Mezi tyto hlavní metody patří zkoušení střídavým vysokým napětím, zkouška rázovou vlnou.

Zkouška rázovou vlnou nahrazuje energetické pulsy, které vznikají v pracovním prostředí motorů a chvilkovým přepětím. Tyto náhodné pulsy mohou poškodit izolaci motoru a mají-li dostatek času, způsobí katastrofické selhání motoru.

Podstatný vliv má i kontrola izolačního odporu, protože dochází během provozu k znehodnocování izolačního materiálu, díky vlhnutí, oteplení a stárnutí izolace. Díky těmto faktorům klesá izolační odpor a tím i celý jeho izolační systém. Proto je třeba měřit izolační odpor elektrického zařízení.

V poslední praktické části jsem si mohl vyzkoušet a ověřit samotné měření pomocí rázových vln a kontrolu izolačního odporu. Velkým přínosem v oblasti diagnostiky izolačních materiálů točivých strojů je zkouška rázovou vlnou, protože umožňuje měřit

mezizávitové zkraty vinutí, které nejsou vidět, protože jsou uvnitř vinutí elektrického stroje.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] HAMMER, Miloš. *Možnosti využití shlukové analýzy v diagnostice izolačních materiálů*. 1. vyd. Brno : VUT, 2002. 12-15 s. ISBN 80-214-2148-7
- [2] MACHÁČEK, Cyril. *Měření izolace*. 2. vyd. Technicko vědecké nakladatelství, 1951. 11-16 s. DT 621.317.333
- [3] HRUBEŠ, Jan. *Měření izolačního odporu*. Praha : SNTL, 1965. 32 s. ISBN 04-548-65
- [4] BARTÁK, Alexandr. *Diagnostika poruch izolací elektrických strojů*. 1. vyd. Praha : SNTL, 1984. 30-104 s. ISBN 04-523-84
- [5] KOLEKTIV. *Elektrotechnická měření*. 1.vyd. Praha : Ben, 2002. 124 s. ISBN 80-7300-022-9
- [6] *Testing theories* : [online] 2004
<http://www.bakerinst.com/BakerWeb/Services/Testing%20Theories.pdf>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

IEEE The Institute of electrical and electronics engineers

IEC Internacional electrotechnical commission

Např. Například

Tzn. To znamená

Viz. Vidět

Atd. A tak dále

Popř. Po případě

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Náhradní schéma vinutí	15
Obr. 2. Schéma zapojení pro zkoušku střídavým napětím	17
Obr. 3. Měřicí přístroj pro zkoušení střídavým a stejnosměrným napětím	18
Obr. 4. Příklad odezvy na rázovou vlnu	19
Obr. 5. Měřicí přístroj pro měření rázovou vlnou	23
Obr. 6. Vnitřní zapojení kotvy	23
Obr. 7. Zapojení zkušebních vývodů na kotvě	24
Obr. 8. Odezva na rázovou vlnu fáze U.....	25
Obr. 9. Odezva na rázovou vlnu fáze V.....	25
Obr. 10. Odezva na rázovou vlnu fáze W.....	26
Obr. 11. Zapojení zkušebních vývodů na cívce rotoru.....	27
Obr. 12. Cívka č.1.....	27
Obr. 13. Cívka č.2.....	28
Obr. 14. Cívka č.3.....	28
Obr. 15. Cívka č.4.....	28
Obr. 16. Zapojení statoru do hvězdy a zkušebních vývodů.....	29
Obr. 17. Zkreslená vlna.....	30
Obr. 18. Vlna fáze U.....	30
Obr. 19. Vlna fáze V.....	31
Obr. 20. Vlna fáze W.....	31
Obr. 21. Cívky bez závady.....	32
Obr. 22. Zkratované samostatné vinutí.....	32
Obr. 23. Částečný zkrat na kostru.....	32
Obr. 24. Zkrat na zem	33
Obr. 25. Mezizávitový zkrat	33
Obr. 26. Zkrat cívka na cívku	33
Obr. 27. Zkrat fáze na fázi	34
Obr. 28. Zkrat sekce na sekci.....	34
Obr. 29. Obrácené cívky	34
Obr. 30. Měřicí přístroj Bouchet Diplex.....	35
Obr. 31. Histogram statorů	38

Obr. 32. Histogram rotorů.....	39
--------------------------------	----

SEZNAM PŘÍLOH

P I Popis měřicího přístroje.

