

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Kontrola mezizávitové izolace rotoru za provozu  
stroje**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2013/2014

**ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**  
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jiří LÁBADI**  
Osobní číslo: **E10B0046K**  
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**  
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**  
Název tématu: **Kontrola mezizávitové izolace rotoru za provozu stroje**  
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Uveďte popis konstrukce rotoru synchronního stroje s ohledem na řešenou problematiku.
2. Diskutujte možnosti kontroly mezizávitové izolace (nejen za provozu stroje).
3. Popište metodu sondy Air-Gap Flux Probe.
4. Navrhněte provedení snímače pro měření na stroji s vyniklými póly.
5. Shrňte dosažené výsledky a poznání.



Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Bartoš, V., Skala, B.: Měření na elektrických strojích. Skripta ZČU Plzeň 2002
2. <http://www.generatortech.com/B-Page2-Theory-Papers.html>  
03.05.2013

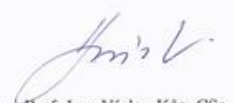
Vedoucí bakalářské práce: **Doc. Ing. Bohumil Skala, Ph.D.**  
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: **14. října 2013**

Termín odevzdání bakalářské práce: **9. června 2014**

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



  
Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce se zaměřuje na možnosti indikace rozvíjejících se a stávajících mezizávitových zkratů. Jsou zde popsány způsoby měření mezizávitových zkratů v budícím vinutí rotorů synchronních generátorů za klidu i za provozu stroje. Zvláštní pozornost je věnována sondě pro měření magnetického toku ve vzduchové mezeře (Air-Gap Flux Probe), jsou popsány její přínosy při zjišťování stavu mezizávitové izolace a konstrukce. Dále se práce zabývá vlastním návrhem sondy, která bude použita pro měření mezizávitových zkratů v rotorech s vyniklými póly. Navržená sonda byla instalována do statoru hydrogenerátoru TG 2 na vodní elektrárně Lipno I a bylo provedeno měření, jehož výsledky jsou diskutovány v závěru práce.

## **Klíčová slova**

Synchronní generátor, rotor s vyniklými póly, mezizávitová izolace, mezizávitový zkrat, zkouška strmou vlnou, rázový generátor, Air-Gap Flux Probe, měřící cívka,

## **Abstract**

The bachelor thesis is focused to possibilities of indication emerging and existing inter-turn short circuits. There are described methods of measuring short-turn in the field winding of rotor of synchronous generators at standstill and during operation of the machine. A special attention is given to probe for measuring magnetic flux in the air gap (Air-Gap Flux Probe), is described its added value in determining the state of inter-turn insulation and construction. Next, the thesis deals with the own design of the probe, which will be used to measure the inter-turn short circuit in rotor with salient poles. The probe was installed in stator of TG 2 at a hydroelectric plant Lipno I and measurements were performed, the results are discussed in the conclusion.

## **Key words**

Synchronous generator, rotor with salient poles, turn insulation, short-turn, RSO test, shock generator, Air-Gap Flux Probe, measuring coil,

## Prohlášení

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

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

.....  
Podpis

V Plzni dne 7.6.2014

Jiří Lábadi

## **Poděkování**

Tímto bych velice rád poděkoval firmě 1.SERVIS-ENERGO, s.r.o. za možnost zpracovat tuto bakalářskou práci, zvláště pak Ing. Z. Křelovcovi za připomínky a cenné rady. Dále děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Bohumilovi Skalovi, Ph.D. za profesionální rady a vedení práce.

## Obsah

ÚVOD .....	10
<b>1. KONSTRUKCE ROTORU SYNCHRONNÍHO STROJE.....</b>	<b>11</b>
1.1 HLADKÝ ROTOR.....	11
1.1.1 Konstrukce hladkého rotoru.....	11
1.1.2 Vinutí turboalternátoru.....	12
1.2 ROTOR S VYJÁDŘENÝMI PÓLY .....	13
1.2.1 Konstrukce rotoru s vyjádřenými póly.....	13
1.2.2 Vinutí rotoru s vyniklými póly.....	14
<b>2 METODY KONTROLY MEZIZÁVITOVÉ IZOLACE .....</b>	<b>16</b>
2.1 VZNIK MEZIZÁVITOVÉHO ZKRATU .....	16
2.1.1 Příčiny mezizávitového zkratu.....	16
2.1.2 Důsledky mezizávitového zkratu .....	18
2.2 MĚŘENÍ MEZIZÁVITOVÉHO ZKRATU POMOCÍ MĚŘÍCÍ CÍVKY.....	19
2.3 MĚŘENÍ MEZIZÁVITOVÉHO ZKRATU POMOCÍ RÁZOVÉHO GENERÁTORU.....	20
2.4 MĚŘENÍ MEZIZÁVITOVÉHO ZKRATU VYHODNOCENÍM IMPEDANCE CÍVKY .....	23
2.5 MĚŘENÍ MEZIZÁVITOVÉHO ZKRATU POMOCÍ TERMORIZE .....	23
2.6 MĚŘENÍ MEZIZÁVITOVÉHO ZKRATU VYHODNOCENÍM OHMICKÉHO ODPORU .....	24
<b>3 POPIS METODY AIR-GAP FLUX PROBE .....</b>	<b>25</b>
3.1 POPIS FUNKCE MĚŘÍCÍ SONDY .....	25
3.2 PROVEDENÍ MĚŘÍCÍ SONDY .....	27
3.3 PRŮBĚH MĚŘENÍ MEZIZÁVITOVÝCH ZKRATŮ ROTORU NA OTÁČKÁCH.....	28
3.4 VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT SONDOU VE VZDUCHOVÉ MEZEŘE.....	29
<b>4 NÁVRH SNÍMAČE PRO MĚŘENÍ NA STROJI S VYNIKLÝMI PÓLY .....</b>	<b>31</b>
4.1 NÁVRH A PROVEDENÍ MĚŘÍCÍ SONDY .....	31
4.1.1 Čidlo pro určení polohy rotoru .....	32
4.2 PRŮBĚH MĚŘENÍ A NAMĚŘENÉ HODNOTY .....	33
4.3 ANALÝZA NAMĚŘENÝCH DAT .....	35
4.3.1 Příprava průběhu pro vyhodnocení .....	36
4.3.2 Vyhodnocení průběhu na mezizávitové zkraty .....	36
<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>38</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ .....</b>	<b>39</b>
<b>PŘÍLOHY.....</b>	<b>1</b>



## Seznam symbolů a zkratek

Hz.....	hertz
min <sup>-1</sup> .....	otáčky za minutu
n <sub>s</sub> .....	synchronní otáčky
m .....	metr
mm .....	milimetr
U <sub>mz</sub> .....	mezizávitové napětí
U <sub>b</sub> .....	budící napětí
U <sub>j</sub> .....	indukované napětí
N <sub>s</sub> .....	počet závitů v sérii
V.....	volt
MW.....	megawatt
R .....	ohmický odpor
Ω .....	ohm
α.....	teplotní součinitel
T.....	naměřená teplota
I.....	proud
P <sub>J</sub> .....	Jouleovy ztráty
Φ .....	magnetický indukční tok
ms .....	milisekunda

## **Úvod**

Práce pojednává o problematice měření mezizávitových zkratů vznikajících ve vinutí rotorů generátorů.

Práce je členěna na čtyři části, kde první část popisuje konstrukci vinutí synchronního stroje a specifika hladkých rotorů a rotorů s vyniklými póly. Druhá část řeší příčiny a důsledky mezizávitových zkratů. Jsou zde popsány diagnostické metody kontroly mezizávitové izolace za klidu stroje. Ve třetí části je popsána metoda měření sondou Air-Gap Flux Probe (sonda pro měření magnetického toku ve vzduchové mezeře), princip funkce sondy a způsob vyhodnocení naměřených dat. V poslední části je popsán vlastní návrh a provedení sondy pro měření na rotorech s vyniklými póly a odzkoušení sondy v praxi.

# 1. Konstrukce rotoru synchronního stroje

Rotory synchronních strojů se dělí do dvou skupin na hladké rotory a rotory s vyjádřenými (vyniklými) póly. Hladké rotory jsou ve většině případů dvupólové, výjimečně čtyřpólové a používají se v turboalternátorech, které dosahují vysokých otáček (např. pro 50 Hz je to  $3000 \text{ min}^{-1}$ ). Rotory hydroalternátorů jsou vícepólové (desítky pólů) a póly jsou vyniklé, tudíž je jejich rychlost otáčení mnohem menší – stovky  $\text{min}^{-1}$ .

Základní částí rotoru je kovaná obrobená hřídel, do které je založeno budící vinutí, popř. pólové nástavce. Rotor se vyrábí buď z ražených plechů, nebo je obráběn celý výkovek. Protože je rotor mechanicky nejnamáhanější část alternátoru, používají se zde vysoce kvalitní oceli. V drážkách, popř. na pólových nástavcích, je navinuto budící vinutí. Vinutí se při provozu napájí stejnosměrným proudem přes sběrací kroužky. Sběrací kroužky jsou dva a nasazují se za tepla na hřídel. Na každé straně hřídele je nasazen ventilátor pro zajištění nucené cirkulace chladícího média.

## 1.1 Hladký rotor

Synchronní stroje s hladkým rotorem se konstruují jako rychloběžné. Jsou dvojpólové pro  $n_s = 3000 \text{ min}^{-1}$  a výjimečně čtyřpólové pro  $n_s = 1500 \text{ min}^{-1}$ . Ve funkci alternátoru jsou poháněny parními turbínami, a proto se nazývají turboalternátory. Rotor má válcovitý tvar a vzhledem k odstředivým silám se vyrábí o menších průměrech (max. 1200 mm), ale velkých délkách (více než 10 m). Generátory s hladkým rotorem se téměř výhradně montují v horizontální poloze.

### 1.1.1 Konstrukce hladkého rotoru

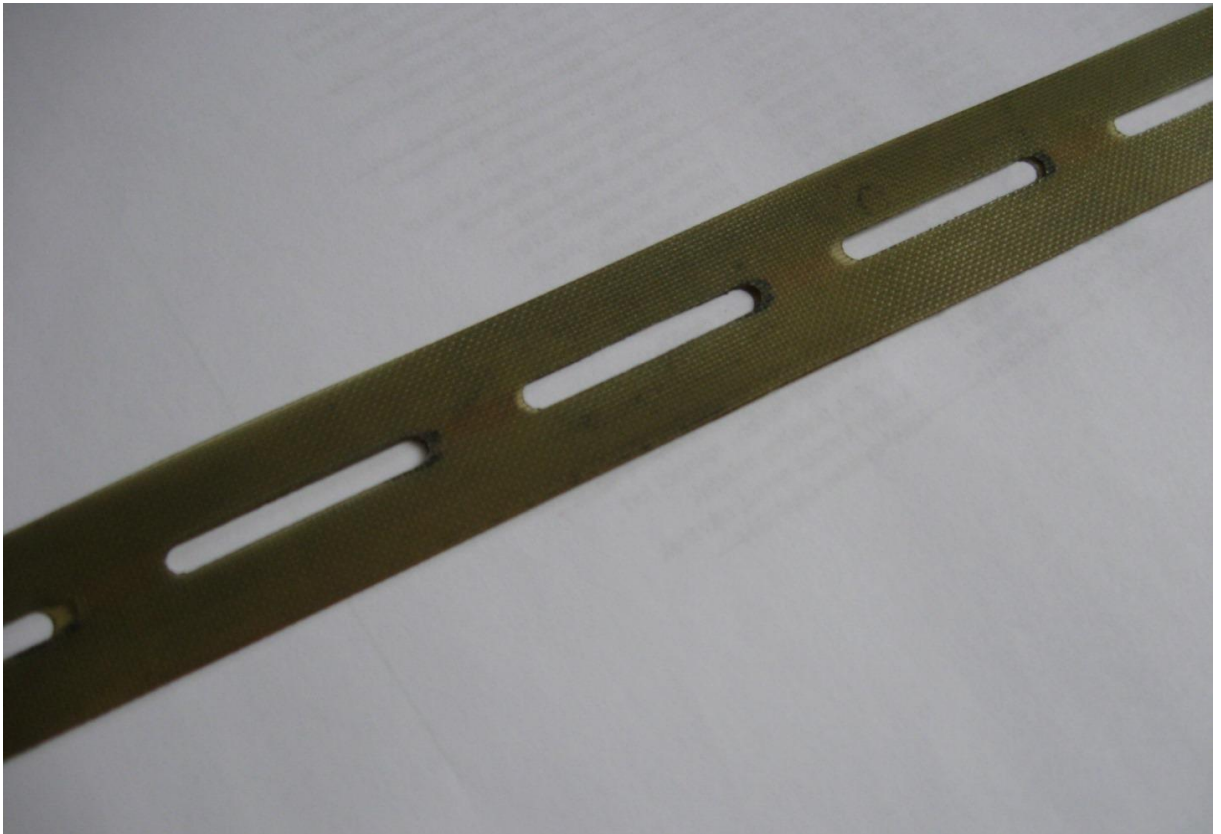
Po délce výkovku rotoru jsou drážky pro založení budícího vinutí. Pro přesné vytvoření drážek se používají speciální hoblovací nebo frézovací stroje. V průběhu opracování drážek je nutné dodržovat předepsané rozměry drážky a kvalitu opracovaného povrchu. Dalším způsobem výroby hladkého rotoru je skládání z plechů. Toho se využívá hlavně u malých generátorů a motorů.

### 1.1.2 Vinutí turboalternátoru

Do rotorových drážek se zakládá budící vinutí. Budící vinutí je provedeno ve formě tenkých plochých vodičů. Vodiče jsou vyhotoveny z velmi čisté elektrovedné mědi. Vzhledem k rozdílu potenciálů mezi budícím vinutím a kostrou rotoru musí být vinutí kvalitně odizolováno po celé délce, kde by mohlo dojít ke zkratu. Jako izolace se používají materiály ze skleněných vláken prosycených pryskyřicí (sklolamináty) nebo materiály na bázi Nomexu. Každý jednotlivý závit cívky se zakládá do drážky samostatně. U velkých rotorů se zakládá každý půlzávit zvlášť a poté se půlzávity svaří. Celá cívka je od stěn rotorové drážky oddělena izolačním korýtkem. Na dně drážky a pod klínem je izolační vložka. Protože chladicí médium nemůže protékat kolem vodiče, jsou ve vodiči vyraženy otvory a médium protéká ode dna drážky skrz otvory ve vodiči a z klínu ven. Velké rotory mají místo ventilátorů kompresorové kolo a chladicí médium protéká skrz dutý vodič. Mezi jednotlivé závity se při navíjení vkládá mezizávitová izolace. Tato izolace je po celé délce závitu ve dvou vrstvách. V izolaci musí být vysekané otvory pro chladicí médium stejné jako ve vodiči. Izolace v rovné části cívky je uprostřed fixována proti posunutí středovou vložkou. V neaktivní části vinutí se mezizávitová izolace lepí k vodičům izolačním lakem. Mechanicky je izolace v čelech vinutí fixována výztuhami. Výztuhy zároveň slouží jako izolační výplň mezi jednotlivými cívkami a jednotlivými póly. Tloušťka izolace se volí v závislosti na napětí mezi závity, které je dané budícím napětím během provozu. Pro mezizávitové napětí platí vztah:

$$U_{mz} = \frac{U_b}{N_s} \quad [V] \quad (1)$$

Například u strojů Československé výroby do 200MW výkonu je síla jedné vrstvy izolace 0,2mm. Izolační systém u generátorů staršího data výroby je teplotní třídy 130 (B). U nových nebo revidovaných strojů se používá teplotní třída 155 (F) nebo 180 (H). Každá cívka je proti odstředivým silám zajištěna kovovými klíny (nejčastěji bronzové nebo mosazné). Na koncích aktivní části rotoru, kde vystupuje vinutí z drážky, jsou nasazeny stahovací obruče. Klíny se stahovacími obručemi tvoří klec amortizéru.



Obr. č. 1. Pásky mezizávitové izolace do rovné části cívky

## 1.2 Rotor s vyjádřenými póly

Generátory s rotory s vyjádřenými póly se používají tam, kde není možné dosáhnout vysokých otáček, např. u vodních elektráren s Kaplanovou turbínou. Dle použitého typu turbíny se generátory umísťují do horizontální nebo vertikální polohy. Vertikální poloha umožňuje konstrukci rotoru s velkým průměrem a malou osovou délkou.

### 1.2.1 Konstrukce rotoru s vyjádřenými póly

Rotor hydrogenerátoru je tvořen tělesem rotoru a pólovými nástavci. Jako těleso rotoru může sloužit samotný hřídel. Dalším typem tělesa je rotorová hvězda, která se nasadí na opracovaný hřídel. Rotorová hvězda je buď uzpůsobena pro nasazení pólových nástavců anebo se na hvězdu musí nasadit skládaný věnec. Věnec je složen z plechu vyražených segmentů a je stažen svorníky.

Existuje řada typů pólových nástavců. Mohou být plné nebo listěné. Pólové nástavce se na těleso rotoru buď šroubují, nebo se nasazují, tzv. na rybinu. Pokud jsou nasazeny, zajistí se klíny podél celé rybiny. U menších strojů bývá část pólu součástí

hřídele a odnímatelná je jen hlava pólu. V případě plných pólů je hlava pro zlepšení chlazení rýhovaná. Vždy je hlava pólu řešena tak, aby se od osy pólu ke kraji vzduchová mezera rozšiřovala.[1] To je důležité pro dosažení sinusového tvaru magnetického pole, resp. indukovaného napětí ve statoru. Pokud jsou pólové nástavce skládány z plechů, jsou v hlavách otvory pro vložení tyčí amortizéru, z důvodu horší vodivosti pólu.

### 1.2.2 Vinutí rotoru s vyniklými póly

Pro vinutí vyniklých pólů se používá stejný druh mědi jako u hladkých rotorů. Závit může být tvořen z ploché tenké mědi o velké šířce, kdy se jednotlivé závity proloží mezizávitovou izolací nebo se použije izolací opředený vodič. U většiny strojů jsou závity navinuty na každém pólu stejně. Rozdělení na severní a jižní pól se provádí při propojování pólů na rotoru. Dle tvaru pólového nástavce se volí i tvar vinutí. U zaoblených čel pólů se vinutí navijí ohýbáním z dlouhého vodiče. U hranatých pólů se svaří několik plochých tyčí, aby se dosáhlo obdélníkového profilu závitu. Póly obdélníkového tvaru bývají užší (není brán v potaz minimální rádius ohybu závitu), a proto jsou cívky méně namáhané odstředivou silou než cívky zaoblené. Pro eliminaci odstředivých sil na vinutí podél pólu slouží pólové rozpěrky. Rozpěrky se po nasazení pólů přišroubují k tělesu rotoru a radiálně fixují vinutí. Počet a umístění rozpěrek se volí dle výpočtu sil působících na vinutí při provozu. Rozpěrky mají takový tvar, který nebrání vzduchu protékat mezi póly a chladit tak vinutí.

Nucené chlazení vinutí je řešeno pomocí ventilátorů, které nabíraný vzduch tlačí do středu pólu a dále, skrz ventilační kanály v magnetickém obvodu statoru ven. Na rozdíl od hladkých rotorů je vinutí chlazeno proudícím médiem z vnějšku, a proto nemají vodiče ventilační otvory. Pro zvýšení účinnosti chlazení se vinutí prokládá plechy nebo jsou některé závity vyrobeny z širšího pasu. Takto vytvořená žebra se rovnoměrně rozmístí po výšce cívky. Méně častý způsob zvětšení chladící plochy je ofrézování vnějšího obvodu vinutí. Vinutí se ofrézuje do určitého tvaru, např. hřebenovitý tvar vinutí u pólů VE Štěchovice. Vzhledem k tomu, že frézování probíhá až po navinutí pólu (včetně proložené izolace), může dojít ke vzniku mezizávitových zkratů. To se děje zvláště při tupém frézovacím nástroji, který měď maže přes izolační vrstvu. Takto vytvořené mezizávitové zkraty se musí nalézt a ručně odstranit.

Přesto je frézování hotové cívky (i přes náročné odstraňování vzniklých mezizávitových zkratů) výhodnější než výroba speciálně tvarovaného vodiče.



Obr. č. 2. Hřebenovité ofrézování cívky s výběrem pro pólovou rozpěrku

Navinuté cívky jsou po celé ploše izolovány od železa pólu. Materiály izolací se používají obdobné jako u hladkých rotorů. Ovšem jako mezizávitové izolace se používají prepregy. Prepregy jsou částečně vytvrzenou pryskyřicí prosycené vláknité materiály [2], které se pro dobré izolační vlastnosti musí teplem a tlakem vytvrdit. Před vytvrzením se dobře zpracovávají a lze z nich snadno vysekat potřebný tvar mezizávitové izolace (zvláště pro zaoblené vinutí). Po navinutí se mezery mezi cívkou a pólovým nástavcem zalejí izolačním tmelem. Vinutí se na pólu stlačí a celý pól se vytvrdí při určité teplotě dané výrobcem izolačních materiálů. Celý pólový nástavec s vytvrzenou cívkou se nakonec nastříká izolačním lakem.

## 2 Metody kontroly mezizávitové izolace

Kontrola mezizávitové izolace je velmi výhodná metoda diagnostiky různých typů rotorů. Kontrolu přítomnosti mezizávitových zkratů lze provádět u volně stojících rotorů, u rotorů na otáčkách (ve vyvažovacím tunelu) a při provozu generátoru. V této kapitole jsou popsány metody diagnostiky mezizávitových zkratů u stojících rotorů. Diagnostika rotorů na otáčkách (včetně on-line diagnostiky) je podrobně popsána v následující kapitole.

### 2.1 Vznik mezizávitového zkratu

Mezizávitové zkraty jsou výsledkem selhání izolace mezi jednotlivými závitů cívk. Při rozběhu a doběhu stroje je izolace silně namáhána vibracemi a rozdílnou změnou teploty vinutí a těla rotoru. Nicméně se může stát, že mezizávitový zkrat vznikne již při navíjení nového rotoru, ale projeví se až při zkouškách na otáčkách. Se stárnutím izolace se riziko vzniku zkratu zvyšuje.

#### 2.1.1 Příčiny mezizávitového zkratu

Při dlouhodobém provozu dochází vlivem vysokých teplot ke křehnutí izolace a tzv. vyprašování izolačního laku. S rostoucí dobou provozu se cívka značně deformuje (prodlužuje), ale izolace si zachovává stejné rozměry. Následující děje nejčastěji způsobují mezizávitový zkrat.

*Deformace cívk v rovné části:* Vzhledem k velké délce hladkých rotorů dochází při rozběhu v rovné části cívk k velkému prodloužení. Toto prodloužení dané oteplením mědi je větší než prodloužení těla rotoru. Vinutí je na koncích axiálně i radiálně aretováno stahovacími obručemi. Díky tomu vznikají uprostřed drážky značné síly, které působí na mezizávitovou izolaci. Když dojde k zastavení stroje tyto síly a prodloužení se rychle mění a mohou způsobit popraskání izolace a následně mezizávitový zkrat.[3]

*Deformace neaktivní části cívk:* Vinutí pod stahovací obruč musí být kluzně odděleno, aby při změnách teplot nedocházelo k deformaci horních závitů cívk. S rostoucí teplotou se zvětšuje průměr obruče a stává se tak volnější. Bude-li tření



mezi horními závití cívky a obručí moc velké, budou cívky pohybovat obručí. To zapříčiní vytahování horních závitů. Vytažené závit se budou odstředivou silou deformovat a poškozovat mezizávitovou izolaci. K tomuto jevu přispívají špatně nasazené pólové výztuhy, které se mohou posunout a závit uvolnit.[3]



Obr. č. 3. Vytažení horních závitů cívky u turboalternátoru 50MW

**Znečištění vinutí:** U vzduchem chlazených rotorů dochází během provozu k nasávání uhlíkového prachu s parami oleje. Vzduch nasycený touto směsí je vháněn do rotoru, kde jej ochladí a mastný uhlíkový prach se usadí na vodičích. Protože je tato směs poměrně dobře vodivá, dochází u silně znečištěných rotorů k rozvoji mezizávitových zkratů. Po vyčištění rotoru (s demontáží obručí) dojde k značnému zvýšení izolačního stavu a odstranění většiny nebo všech mezizávitových zkratů.

**Znečištění vinutí při navíjení:** Při převíjení nebo navíjení nového rotoru může dojít k zanesení nečistoty nebo kovového otřepu do vinutí. Nečistota se může dostat na mezizávitovou izolaci nebo nalepit na izolační lak a zkratovat závit. Také při pájení

a broušení spojek cívek může dojít ke znečištění izolace částicemi kovu. Dojde-li při ořezávání izolací v čele cívky k zařiznutí do měděného vodiče, uvolní se měděná špona, která je velkým rizikem pro izolační systém.

### 2.1.2 Důsledky mezizávitového zkratu

I přes několik zjištěných mezizávitových zkratů může být stroj bez problému dlouhodobě provozován při jmenovitém výkonu. Velké množství zkratů, může natolik ovlivnit provozní podmínky, že se stroj může provozovat jen na nižší výkon. S rostoucím počtem zkratů může dojít k výpadku stroje. Provoz stroje s mezizávitovými zkraty proto nese určitá omezení. Výkyvy od běžných provozních stavů tak mohou upozornit na rozvoj mezizávitových zkratů a obsluha stroje by jim měla věnovat zvýšenou pozornost.

*Nevývaha rotoru v závislosti na teplotě:* Cívka s mezizávitovým zkratem má nižší teplotu než okolní cívky. To proto, že proud prochází kratším vodičem s nižším činným odporem (o délku zkratovaného závitů), ale ochlazovaná plocha cívky je stejná. V závislosti na umístění mezizávitových zkratů může dojít vzhledem k rozdílným teplotám k prohnutí rotoru. Toto teplem způsobené prohnutí má negativní vliv na vývahu rotoru a s tím související rotorové vibrace. Čím je cívka blíže k pólu (1., 2. cívka), tím je nevývaha vyšší. Naopak, cívky umístěné nejdále od pólu mají na vývahu nepatrný vliv (6., 7. cívka).[4]

*Vibrace v závislosti na nesymetrii magnetického pole:* Vznik mezizávitového zkratu u rotoru s více než jedním pólpárem způsobí nesymetrický magnetický tah. Mezizávitový zkrat sníží magnetický tok nad postiženým pólem a v menší míře sníží tok nad ostatními póly. Magnetický tok nad opačným pólem zůstane stejný. Tento nesymetrický magnetický tah způsobí rotorové i statorové vibrace s otáčkovou frekvencí. Zvýšení vibrací nenastává u dvoupólových strojů, protože zkrat způsobí snížení magnetického toku u obou pólů stejně.[3]

*Vyšší budící proud:* Dojde-li ke zkratu je zapotřebí vyššího budícího proudu pro udržení stejného výkonu. Stejný budící výkon musí být generován nižším počtem závitů. Budící souprava rotoru je vždy předimenzována o několik procent, proto je možné udržet jmenovitý výkon stroje, ovšem za cenu menší efektivity.[3] Snížená

efektivita budícího systému odpovídá Jouleovým ztrátám (ztrátám na činném odporu) ve vinutí. Jouleovy ztráty jsou dány vztahem:

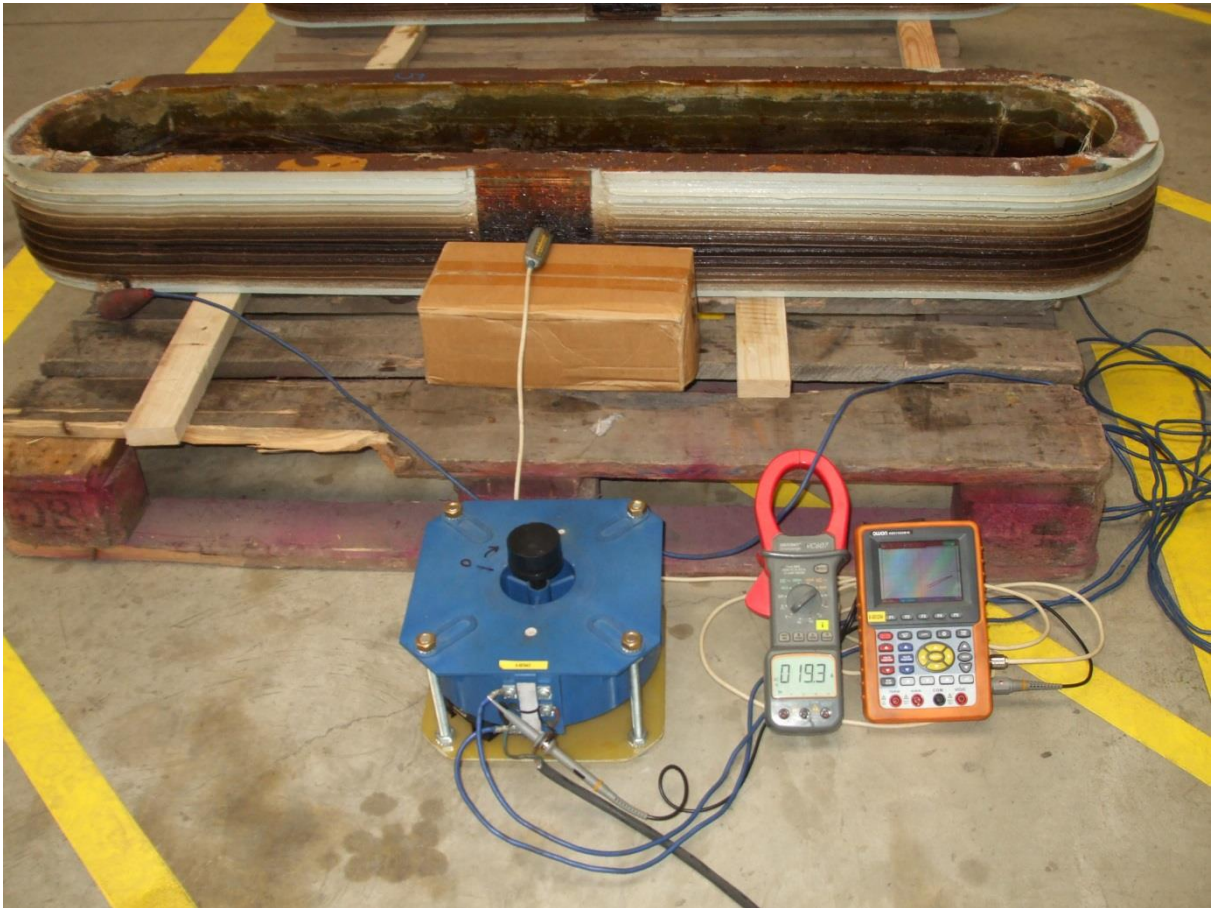
$$P_J = I^2 \cdot R \quad [W] \quad (2)$$

Přestože má rotorové vinutí menší činný odpor, kvadrát proudu značně zvyšuje ztráty ve vinutí a z toho plyne nižší efektivita buzení generátoru.

*Vyšší provozní teplota:* Výsledkem zvýšení činných ztrát bude větší celkové teplo generované procházejícím proudem. Proto je vhodné při provozu generátoru sledovat teploty stroje. Zvyšující se teplota uvnitř stroje může znamenat přítomnost nebo rozvoj mezizávitového zkratu. Analýza trendu teplot může pomoci při plánování pravidelných kontrol.

## 2.2 Měření mezizávitového zkratu pomocí měřicí cívky

Tuto metodu lze použít u obou typů rotorů. Pro použití u hladkého rotoru je ale zapotřebí demontovat stahovací obruče a výztuhy vinutí. Jednotlivé cívky nebo celé vinutí se napájí střídavým napětím o frekvenci 50Hz nebo vyšší. Velikost napájecího napětí je volena tak, aby se dosáhlo minimálně 1 – 2 V mezi závitů. Napájecí napětí se připojí na napěťový vstup osciloskopu a nastaví se rozsah tak, aby byl vidět sinusový průběh. Na časovou osu osciloskopu připojíme snímací cívku. Cívka se drží v blízkosti vodiče protékaného proudem a indukuje se do ní napětí. Velikost naindukovaného napětí odpovídá velikosti magnetického toku kolem daného závitu. Součet indukovaného napětí na měřicí cívce a napájecího napětí se na osciloskopu zobrazí jako Lissajousův obrazec. Pokud se cívka posouvá přes správně odizolované závitů, Lissajousův obrazec se nemění. V blízkosti zkratovaného závitu je mnohem větší magnetický tok, který způsobí změnu indukovaného napětí. Čím blíže je cívka zkratovanému závitu, tím rychleji se Lissajousův obrazec se otočí o 180°.

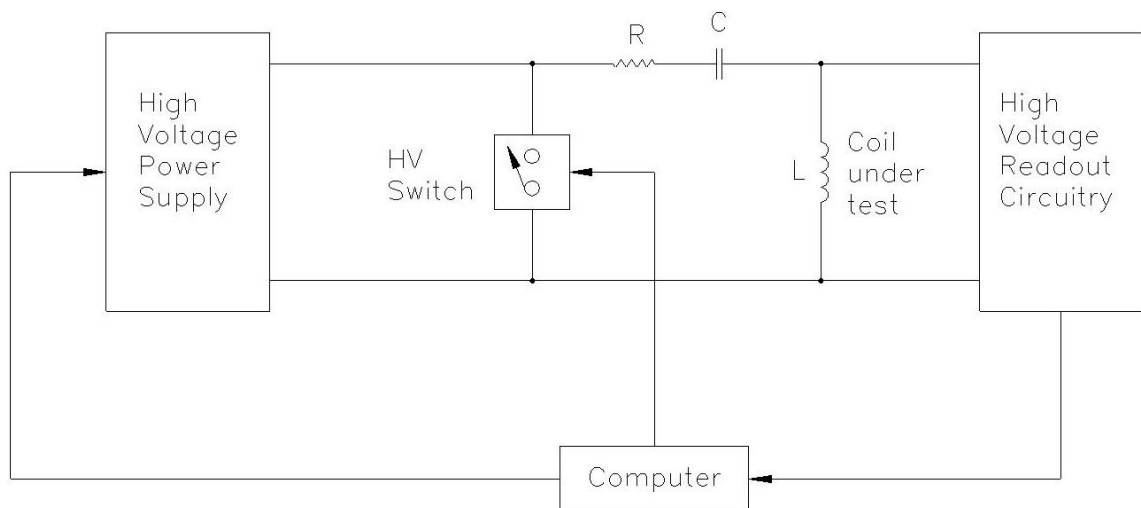


Obr. č. 4. Zkoušená cívka s měřicími přístroji a střídavým zdrojem 30 A

### 2.3 Měření mezizávitového zkratu pomocí rázového generátoru

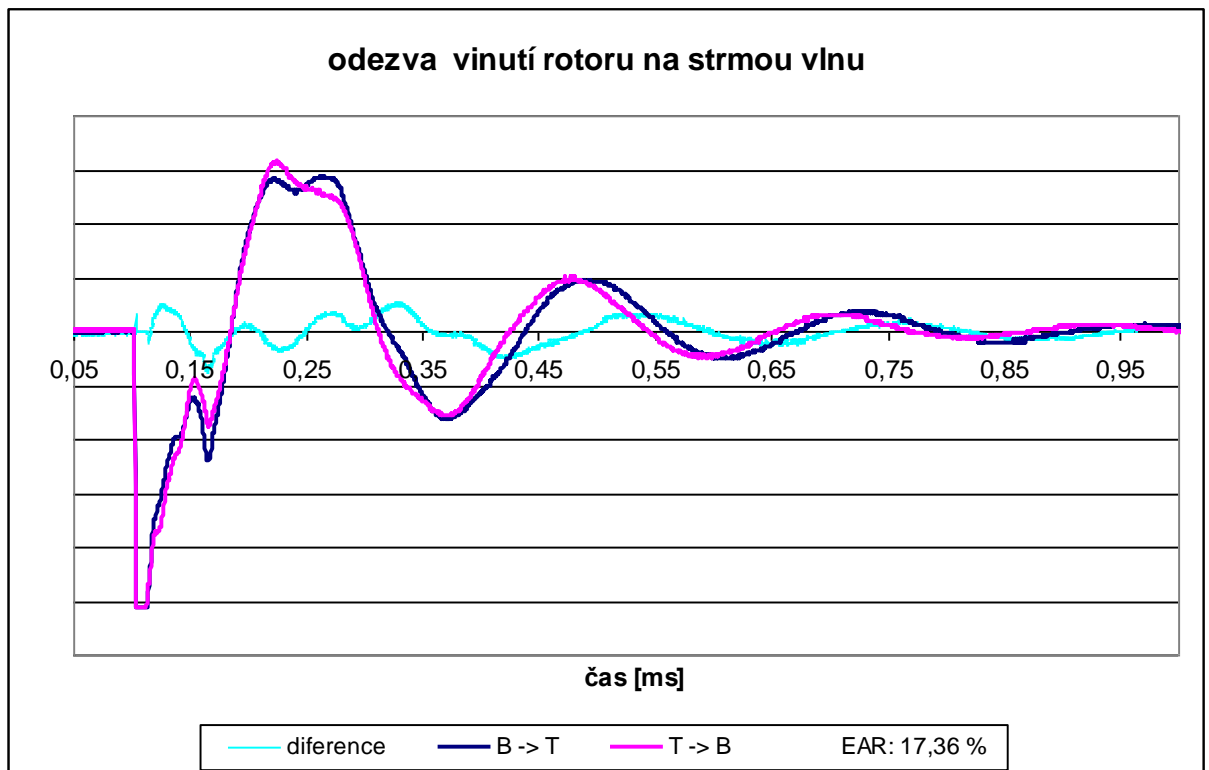
Zkouška rázovým generátorem (neboli zkouška strmou vlnou nebo také proudovým impulzem) se využívá při vyhledávání zeslabených i poškozených míst vinutí generátorů, motorů i transformátorů. Rázovým generátorem je možné detekovat mezizávitové zkraty, zkrat cívky proti kostře, nesprávné zapojení vinutí a rozdílné počty závitů. Touto metodou lze diagnostikovat rotory hydro i turboalternátorů různých velikostí a provedení. Rotor nemusí být vytažen ze statoru, stačí přístup k odpojeným sběracím kroužkům. Také je možné měřit v rychlém sledu trojfázově zapojené vinutí statorů. Průběh zkoušky je velice rychlý, měřící zařízení je snadné na ovládání a kompaktních rozměrů. Je možné stanovit jasná kritéria pro vyhovující výsledky. Kritérium je dáno činitelem rozdílu ploch (EAR), který vyjadřuje rozdíl mezi jednotlivými naměřenými průběhy v procentech. Standardně se vinutí považuje za vyhovující, pokud je EAR do 5%.

Rázový generátor má 4 vývody, dva napájecí, dva zemnicí a dva výstupy pro připojení osciloskopu (signál první a druhé vlny). Existují dva způsoby měření rotorových cívek. První způsob měření je napájet najednou dvě cívky (severní vs. jižní pól) a porovnávat jejich průběhy. V jednu chvíli se tak zobrazují oba průběhy, z nichž se určí přítomnost zkratů či rozsah poškození. K tomuto měření je potřeba 2 kanálového osciloskopu. Druhým způsobem se na začátek cívky (např. na sběrací kroužek) připojí oba napájecí vývody a konec cívky se uzemní. Tento test se musí provádět 2x. Nejprve se zaznamená průběh od začátku na konec cívky, poté se vývody prohodí a měření se zopakuje. Oba průběhy se poté porovnají. K tomuto měření postačí jednobaný osciloskop se záznamem.

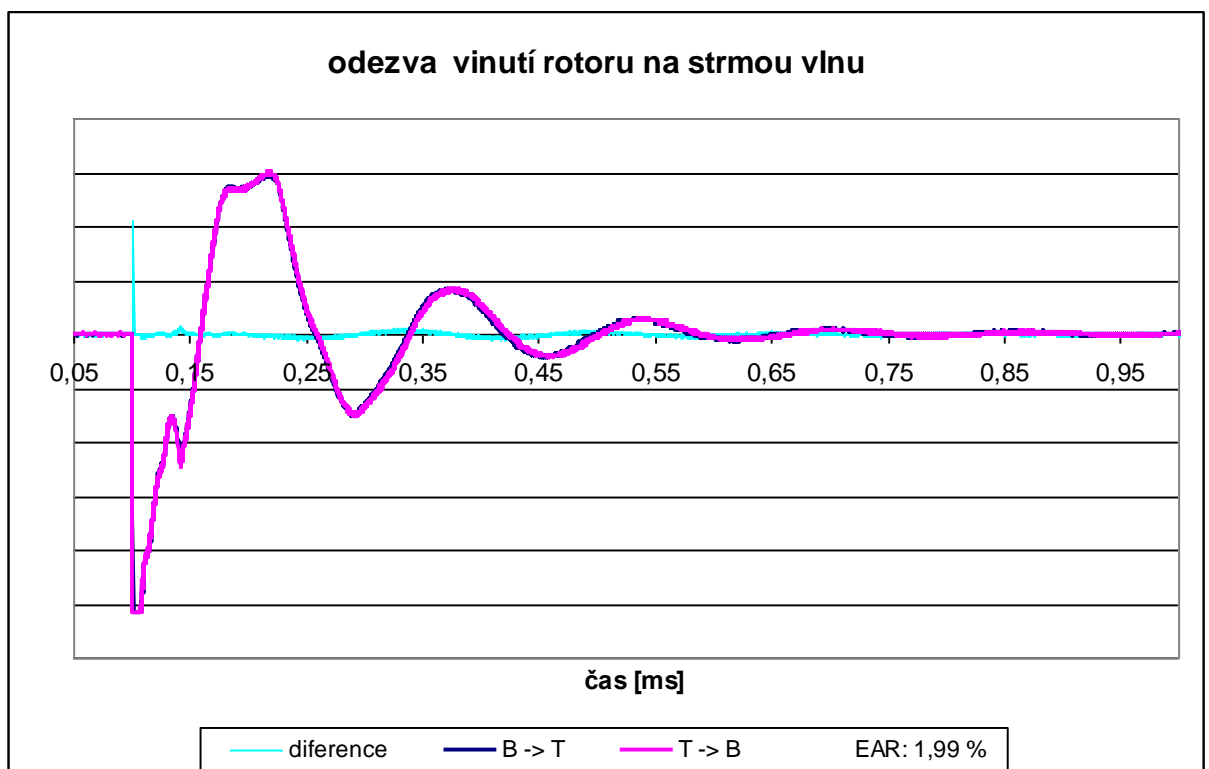


Obr. č. 5. Blokové schéma rázového generátoru [5]

U hladkého rotoru se napájecí vývody rázového generátoru připojí na začátek a konec vinutí. Na spojkou mezi cívkami se připojí třetí elektroda a kostra rotoru se uzemní. Nastaví se předepsané zkušební napětí, kterým se nabije kondenzátor a tyristorové řízení pak vytváří po celé délce vinutí přechodový jev, který svým gradientem namáhá izolaci v každém bodě. Vzhledem k indukčnosti daného vinutí (délce, počtu závitů, typu jádra, ...) má každý přechodový děj jiný průběh – délku a počet tlumených kmitů. Tento průběh je zaznamenán a zobrazován dvoukanálovým osciloskopem. Každý kanál snímá průběh od začátku vinutí do středu a tyto průběhy jsou pak porovnávány mezi sebou. Fáze posunutých průběhů indikují nesouměrnost cívek, kde může být příčinou mezizávitový zkrat.



Graf č. 1. Fázové posunutí průběhů indikujících několik mezizávitových zkratů



Graf č. 2. Průběh rázové vlny po opravě cívky



Z tohoto principu plyne značná nevýhoda této zkoušky. Nelze identifikovat zkrat, který je na porovnávaných cívkách ve stejném místě nebo přímo uprostřed vinutí. Pravděpodobnost takto vzniklých zkratů je ale velice nízká a výhody značně tuto nevýhodu převažují.

## **2.4 Měření mezizávitového zkratu vyhodnocením impedance cívky**

Při použití této metody se porovnávají naměřené hodnoty impedance jednotlivých měřených cívek. Při zkoušce je celé nebo část vinutí napájeno zdrojem napětí tak, aby se dosáhlo předepsaného zkušebního napětí mezi závitů. Pro měření je možné použít autotransformátor 50 Hz nebo se používají středofrekvenční generátory s frekvencí 2 – 16 kHz.

Kontrola cívek hladkého rotoru a rotoru s vyniklými póly probíhá totožně. Vinutí nebo samotná cívka je napájeno střídavým napětím, přičemž se měří napětí a proud. U každé cívky je konstantně udržované napětí a sleduje se velikost protékajícího proudu. Dle předpisů jednotlivých zkušeben nesmí rozdíl proudů na cívkách překročit určitou procentuální část (např. 20 %). Z naměřených hodnot lze určit cívku s mezizávitovým zkratem. U cívek rotorů s vyniklými póly je výhodné zkoušku provádět před a po slisování. Pokud po slisování došlo u některé z cívek ke změně velikosti proudu, je pravděpodobné, že měřená cívka má mezizávitový zkrat.

## **2.5 Měření mezizávitového zkratu pomocí termovize**

Tato metoda je aplikovatelná jen u provedení rotorů, kde můžeme sledovat teplotu jednotlivých závitů. Zpravidla se provádí u demontovaných pólů hydrogenerátorů. Vinutí (popř. cívky) je napájeno střídavým napětím s vysokou frekvencí (500 – 2000 Hz). Již po krátké době (cca 2 minuty) procházející proud vytvoří v místě zkratu tepelný gradient. Místo s nejvyšší teplotou lze indikovat termovizní kamerou nebo infrateploměrem. V případě použití zdroje s nízkou frekvencí (50 Hz) by k oteplení docházelo pomalu a teplota by se stačila rozložit do okolí a podél vodičů. Místo zkratu by bylo obtížné určit. Hlavním důvodem použití zdroje s vysokou frekvencí je dosažení vyššího napětí mezi závitů. Při použití 50 Hz zdroje se dosahuje napětí mezi závitů cca 0,1 až 0,5 V. Požadované zkušební napětí bývá cca 5 až 10 V. Toho nelze dosáhnout s 50 Hz zdrojem, proto se pro tuto metodu používá 2000 Hz zdroj.

## 2.6 Měření mezizávitového zkratu vyhodnocením ohmického odporu

V případě, že je známý vypočtený ohmický odpor vinutí, provádí se měření ohmického odporu. Na celé vinutí se připojí zdroj stejnosměrného proudu a měří se napětí a proud. Proud se nastaví co nejbližší k maximálnímu proudu za provozu. Z naměřených hodnot se vypočítá ohmický odpor dle vztahu:

$$R = \frac{U}{I} \quad [\Omega] \quad (3)$$

Vzhledem k závislosti ohmického odporu na teplotě se naměřený odpor při dané teplotě přepočítá na odpor při 20 °C dle vztahu:

$$R_{20} = R \cdot [1 + \alpha \cdot (T - 20)] \quad [\Omega] \quad (4)$$

Vypočtený odpor vinutí můžeme porovnat s vypočteným odporem při návrhu rotoru nebo s naměřenou hodnotou u jiného rotoru stejného typu. Pokud bude na vinutí mezizávitový zkrat, vinutí bude o zkratovaný závit kratší a odpor vinutí bude menší. Pro přesné stanovení ohmického odporu je důležité použití přesných měřících přístrojů, popř. je vhodné použít přístroj pro měření malých odporů.

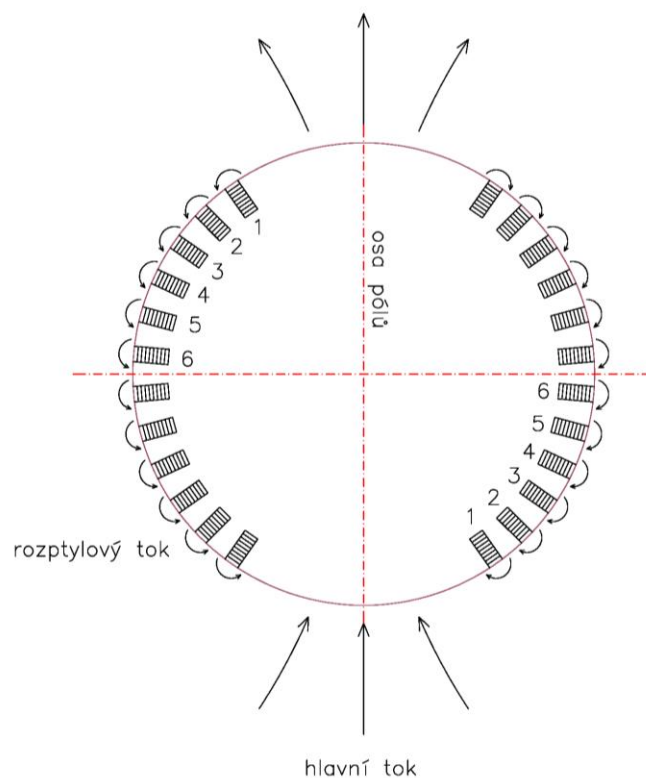


### 3 Popis metody Air-Gap Flux Probe

Diagnostika mezizávitových zkratů rotoru metodou Air-Gap Flux Probe (metoda měření magnetického toku ve vzduchové mezeře) dokáže během provozu rychle a efektivně monitorovat stav vinutí. Je tak možné předcházet poruchovým stavům, které by mohli mít za následek neplánovanou odstávku stroje. Jedná se o metodu speciálně vyvinutou pro online diagnostiku mezizávitových zkratů rotoru. Používá se také při konečných zkouškách rotoru ve vyvažovacím tunelu. Tato metoda dokáže odhalit stávající mezizávitové zkraty, jejich počet a určit postiženou cívku. Metoda využívá měřicí sondu (cívku), která se umístí do určité vzdálenosti od rotoru a snímá magnetický tok produkovaný nabuzeným rotorem na otáčkách. Sondu je možné instalovat do nových i starších generátorů různých výkonů a provedení.

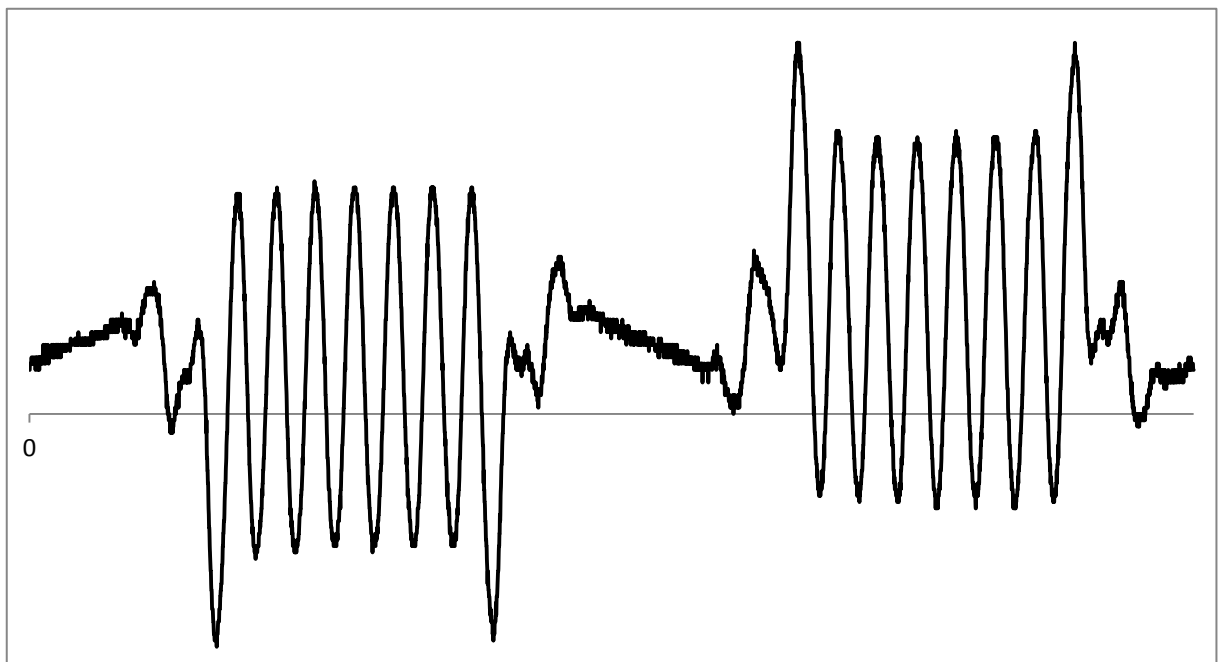
#### 3.1 Popis funkce měřicí sondy

Při nabuzeném rotoru na otáčkách vzniká ve vzduchové mezeře kromě hlavního magnetického toku také rozptylový magnetický tok. Rozptylový magnetický tok se uzavírá mezi jednotlivými drážkami rotoru, popř. nad hlavou vyniklého pólu.



Obr. č. 6. Rozptylový magnetický tok nad rotorovými drážkami

Sondu tvoří cívka s cca 200 závitů z lakovaného vodiče o průměru 0,2 mm, zalitá do nevodivého obalu. Pro správnou funkci musí být sonda do statoru umístěna tak, aby byla mimo nemagnetické obruče rotoru. Vzhledem k proměnnému indukčnímu toku nad drážkou se do cívky indukuje napětí úměrné tomuto toku. Toto indukované napětí je možné přímo (popř. přes napěťový dělič) snímat osciloskopem. Velikost rozptylového magnetického toku (indukovaného napětí na cívce) je dána počtem aktivních závitů v rotorové drážce. Pokud dojde k mezizávitovému zkratu, budící proud vytvoří, díky menšímu počtu aktivních závitů, menší rozptylový magnetický tok, a tím menší indukované napětí na měřící cívce.



Graf č. 3. Průběh napětí na měřící cívce u rotoru 4,5MW před vyhodnocením

Každá snímaná drážka se na osciloskopu zobrazí jako jeden peak. Porovnáním velikostí jednotlivých peaků z každého pólu je možné určit přítomnost či množství mezizávitových zkratů. Problém s vyhodnocením může nastat, pokud jsou některé drážky zaklínovány klíny z magnetického materiálu. Magneticky vodivé klíny svedou velkou část rozptylového toku a vyhodnocení počtu aktivních závitů je tak obtížné, viz první a poslední peak u obou pólů u grafu č. 3. Problém nastane i v případě, že je zkrat symetricky umístěný, obdobně jako u metody kontroly rázovým generátorem. Jedinou možností, jak vyloučit symetrický zkrat je srovnání naměřeného průběhu s průběhem bez mezizávitového zkratu.

### 3.2 Provedení měřící sondy

Sondy pro trvalé umístění do statoru generátoru se vyrábí v různých provedeních, dle typu generátoru. Sonda je nalepena, buď na statorový klín, nebo na zub plechů statoru. Cívka na zub plechů musí být co nejnižší, aby při manipulaci s rotorem nepřekážela. Cívka nalepená na statorový klín bývá sklopná. Cívka se montuje na první statorový klín, který má speciální vybrání pro základnu cívky a přívodní vodiče. Vzhledem k velkým vzduchovým mezerám u turboalternátorů se měřící cívky navíjí na sklápěcí stonek. Délka stonku se volí dle velikosti vzduchové mezery daného generátoru. Ideálně je cívka za chodu stroje vzdálená 30 mm od těla rotoru. Sklápěcí mechanismus je koncipován tak, aby bylo možné bezpečně manipulovat s rotorem během opravy generátoru. Před vyvlečením a při navlékání rotoru je měřící cívka sklopena, aby nedošlo k jejímu poškození. Jakmile je rotor ustaven v ložiskových stojanech, je cívka postavena do pracovní polohy. Vzhledem k omezenému prostoru, při navlečeném rotoru, má cívka na vrchu drážku, o kterou se lze zapřít a stonek s cívkou postavit. Jako aretace slouží kulička s pružinou. Při postavení cívky kulička zapadne do vyvrtaného otvoru a jistí osu cívky, aby byla kolmá na osu rotoru.



Obr. č. 7. Měřící klín s nalepenou sondou a drážkou s vývodními kabely

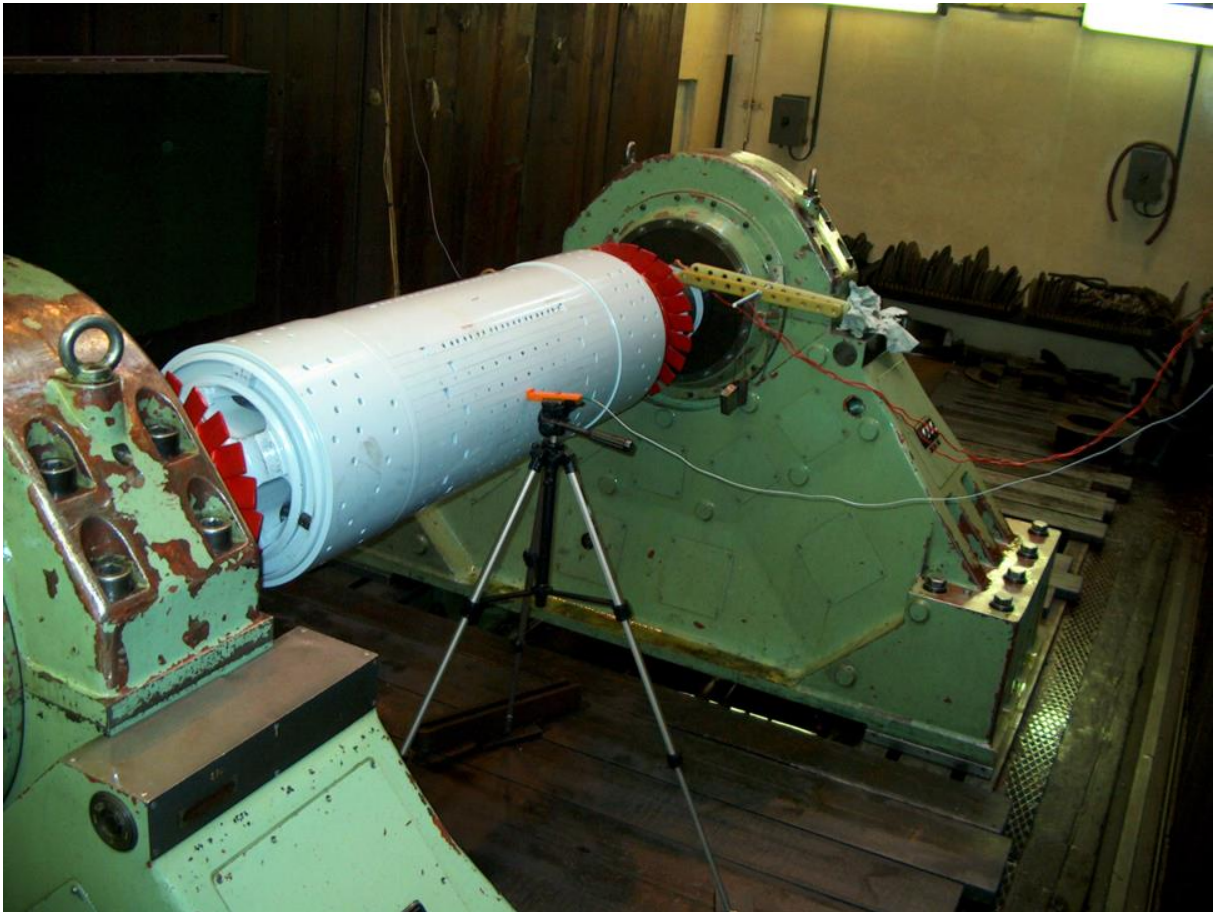
Při návrhu sondy je nutné znát průměr vývrtu statoru, rozměry drážky a hloubku klínu statoru a průměr rotoru. Z těchto hodnot se určuje výška stonku, aby během provozu nemohlo dojít k poškození cívk.

### 3.3 Průběh měření mezizávitových zkratů rotoru na otáčkách

Diagnostika mezizávitových zkratů za použití měřicí cívk je rychlá a na měřicí přístroje nenáročná metoda.

*Měření za chodu generátoru:* Nutnou podmínkou pro diagnostiku rotoru je dosažení jmenovitých otáček a nabuzení rotoru nejlépe na jmenovité hodnoty. Periodické měření by mělo vždy probíhat při stejných nebo podobných provozních hodnotách (budící proud, dodávaný činný výkon, teploty stroje, ...). Při montáži měřicího klínu se vyvedou vývody od měřicí cívk na kostru stroje. Např. na svorkovnici teploměrů u vzduchových strojů nebo ke chladiči u vodíkových strojů. Na svorky měřicího klínu se připojí osciloskop. U větších strojů je vhodné osciloskop připojit přes napěťový dělič. Dle provozních hodnot dosahuje indukované napětí na měřicí cívk desítek až stovek voltů. Snímaný průběh napětí na cívk se uloží pro pozdější vyhodnocení. Pokud je k dispozici měřicí ústředna a PC může být vyhodnocení mezizávitových zkratů provedeno on-line.

*Měření ve vyvažovacím tunelu:* Průběh měření ve vyvažovacím tunelu se nijak zásadně, oproti měření na generátoru za chodu, nemění. Jediným rozdílem je potřeba buzení (napájení) rotoru stejnosměrným zdrojem proudu. Napájení rotoru se přivede na sběrací kroužky uhlíkovými kartáči (popř. měděnými pásky). Kolmo k ose rotoru se postaví stojan s měřicí cívkou a nastaví se vzdálenost cívk cca 20 mm od těla rotoru. Měřicí cívka musí být opět mimo stahovací obruče, nejlépe na středu rotoru. Po roztočení rotoru na jmenovité otáčky se změří izolační stav. Pokud je izolační stav rotoru vyhovující, nabudí se rotor stejnosměrným proudem, zhruba 40 A. Již od velmi nízkých hodnot proudu je možné na osciloskopu pozorovat průběh indukovaného napětí. Po dosažení předepsaného budícího proudu se naměřený průběh uloží. Vyhodnocení dat probíhá stejným způsobem jako u dat naměřených na generátoru.

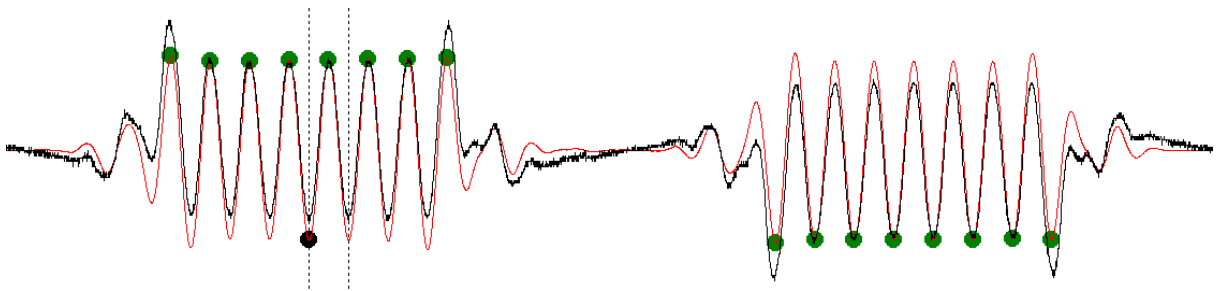


Obr. č. 8. Měření ve vyvažovacím tunelu

### 3.4 Vyhodnocení naměřených dat sondou ve vzduchové mezeře

Zaznamenaná křivka je velice složitá funkce, proto se vyhodnocuje po částech. K vyhodnocení se využívá speciálně navržený program, např. fy ZAT a.s. Vyhodnocovací software má ve svém algoritmu dané kroky, kterými určí a vyhodnotí jednotlivé drážky.

Při analýze křivky je v první řadě nutné nalézt novou nulovou osu, aby bylo možné porovnávat peaky (extrémy) jednotlivých drážek. Nepřesně určená nulová osa by při vyhodnocení způsobila velké zkreslení. V dalším kroku se určí lokální extrémy funkce. Integrováním naměřeného průběhu získáme křivku, kdy její průchod nulou značí první a poslední lokální extrém – lokální maximum a lokální minimum. Od nalezených extrémů se postupuje na obě strany po stejných intervalech (interval je dán šířkou naměřeného průběhu). Nalezené extrémy jsou přiřazeny číslům drážek a může se provést srovnání cívek.

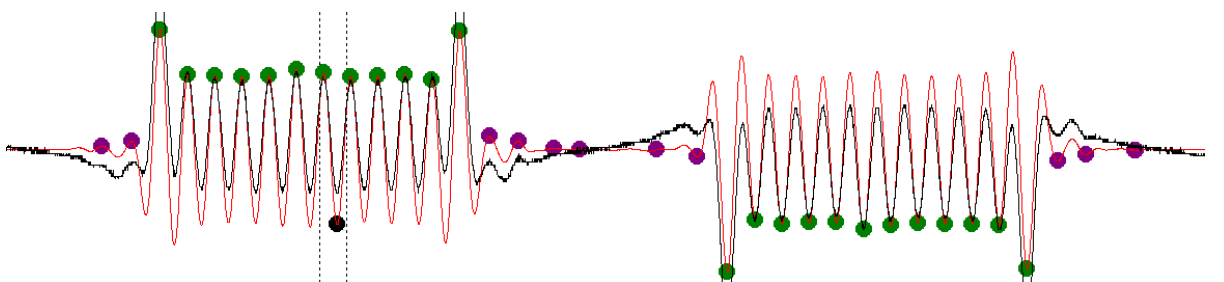


Obr. č. 9. Průběh indukovaného napětí na sondě s určením extrémů rotoru 4,5 MW

Peaky stejných cívek různých pólů se porovnají a určí se jejich procentuální rozdíly – porovnává se první cívka pólu č. 1 s první cívkou pólu č. 2, atd. Rozdíly se porovnají s kritériem, kterému odpovídá jeden vodič. Toto kritérium se určí jako:

$$k = \frac{100\%}{21 \text{ závitů}} = 4,8 \quad [\%] \quad (5)$$

Pokud je rozdíl peaků menší než procentuální část jednoho vodiče, tak je cívka bez mezizávitového zkratu. Např., je-li kritérium pro jeden vodič 4,8 %, tak rozdíl peaků porovnávaných cívek musí být menší. Pokud je vyšší, je pravděpodobné, že má cívka mezizávitový zkrat. Počet mezizávitových zkratů na dané cívce je dán počtem násobků rozdílu oproti procentuální části. Při srovnání velikosti extrémů průběhu dle obr. č. 9. vychází cívky bez mezizávitového zkratu



Obr. č. 10. Průběh indukovaného napětí na sondě u poškozeného rotoru 57MW

Při vyhodnocení extrémů u obr. č. 10. vyjde rozdíl na druhé cívce 8%, přičemž jeden vodič představuje 5%. Z toho lze usoudit, že na druhé cívce je jeden mezizávitový zkrat.



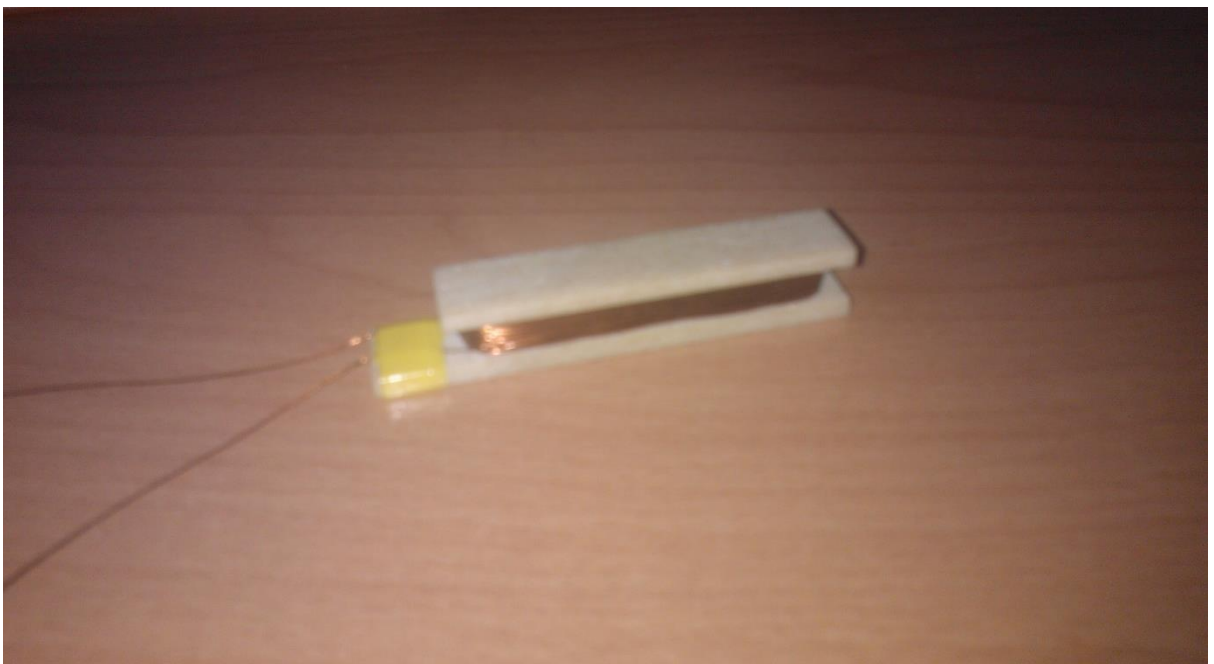
## 4 Návrh snímače pro měření na stroji s vyniklými póly

Měření mezizávitových zkratů na rotoru s vyniklými póly má svá specifika hlavně z hlediska konstrukce stroje. Vzhledem k malé vzduchové mezeře bylo nutné navrhnout jiný typ sondy, než lze použít u turboalternátorů. Pro určení polohy rotoru byl vyroben snímač, díky kterému lze určit číslo diagnostikovaného pólu.

Měřicí sonda byla navržena pro hydrogenerátor TG 2 na vodní elektrárnu Lipno I. Vzhledem k probíhající generální opravě generátoru bylo možné nainstalovat měřicí cívku a provést diagnostické měření při chodu naprázdno i na výkonu. Na ELI I. jsou instalovány dva shodné synchronní generátory o výkonu 69,5 MW. Rotor generátoru má 16 pólů (tj.  $375 \text{ min}^{-1}$ ) a jmenovitý budící proud 743 A.

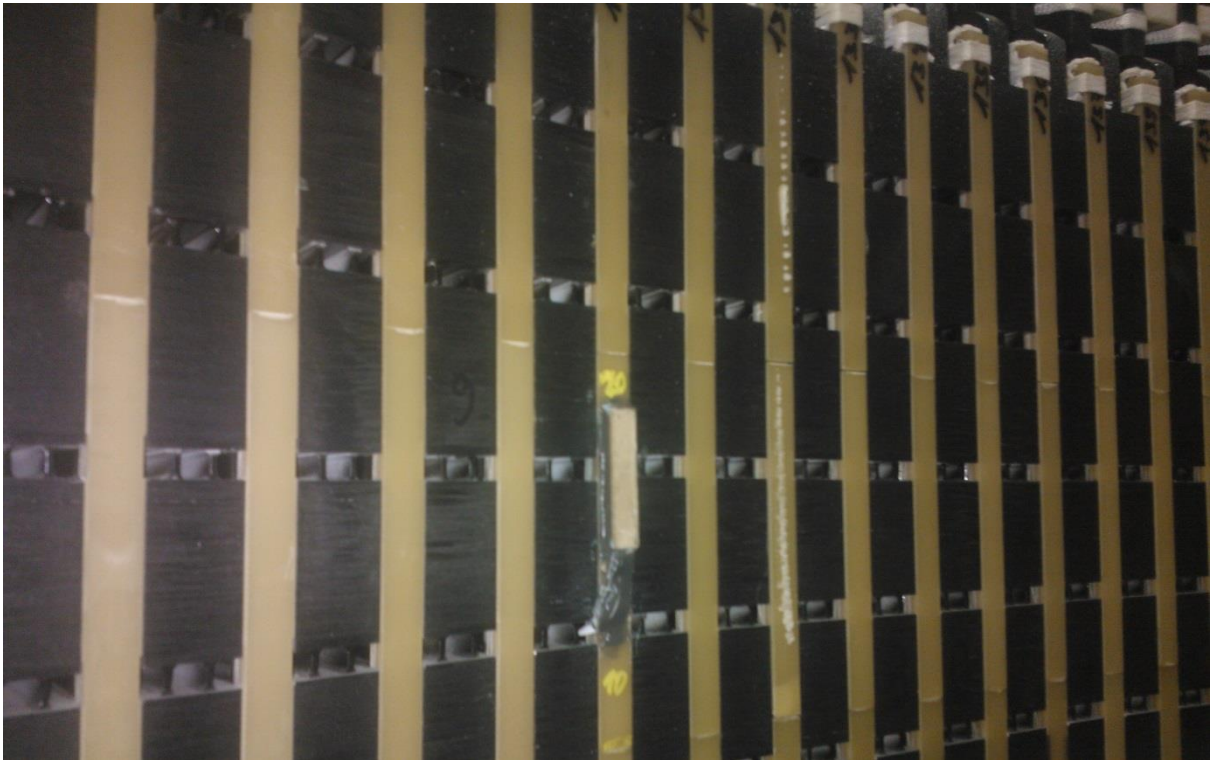
### 4.1 Návrh a provedení měřicí sondy

Princip snímání magnetického toku je stejný jako u turbogenerátoru. Proto byla navržena měřicí sonda dle zkušeností převzatých z turbogenerátorů obdobných výkonů. Vzhledem k malé vzduchové mezeře – 21 mm byla sonda navržena co nejnižší, ale pro co největší délku navinutého vodiče. Bylo vyfrézováno jádro cívky o rozměrech 60 x 12 mm z desky tloušťky 8 mm z materiálu EPGC 203.



Obr. č. 10. Navinutá cívka před zalitím lepidlem

Jako vodič byl použit lakovaný drát o průměru 0,2 mm. Na jádro bylo navinuto 40 závitů tak, aby mohla být celá cívka bezpečně zaplněna zalévací hmotou. Jako zalévací hmota bylo zvoleno lepidlo Araldit 2014. Araldit 2014 je dvousložkové lepidlo na bázi epoxidové pryskyřice.[6] Bylo zvoleno hlavně pro vysokou teplotní odolnost (140 °C) a výborné mechanické vlastnosti. K vývodům cívky byl připájen vodič TBVV 3x0,22. Sonda byla nalepena opět lepidlem Araldit 2014 na druhý statorový klín. Druhý klín byl zvolen proto, aby sonda snímala jen toky v rovné části pólu a nebyla ovlivněna toky z ohybu cívky nebo amortizéru. Kabel od sondy byl vyveden ventilačním kanálem na svorky v rozvaděči s tenzometrickými podložkami. Vyvedení vodiče ventilačním kanálem je velice výhodné, protože nikde nekříží statorové cívky a nedochází k namáhání izolačního systému vinutí statoru.



Obr. č. 11. Měřící sonda přilepená na druhý klín drážky č. 130

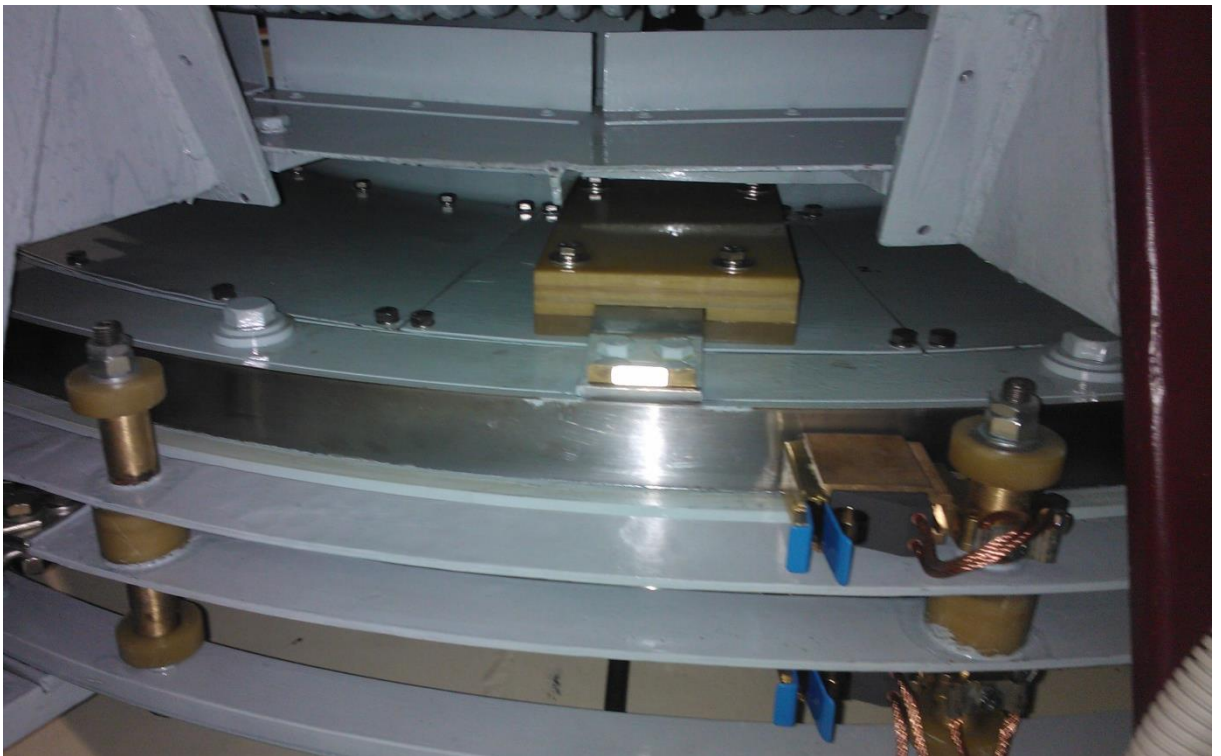
#### 4.1.1 Čidlo pro určení polohy rotoru

U dvojpólového stroje je možné přiřadit průběh k vyhodnocovanému pólu dle polarity buzení. To ale nelze provést u více pólového rotoru. K určení pólu bylo proto vyrobeno bezkontaktní čidlo, které označí první snímanou cívku. Pro minimalizaci nutných úprav na rotoru bylo zvoleno laserové čidlo s reflexní páskou. Laserové čidlo



bylo vyrobeno dle schématu v příloze A. Základem čidla je laserový paprsek, který při odražení dopadá na fototranzistor. Fototranzistor se při dopadu paprsku otevře a připojený osciloskop zaznamená napětovou špičku. Čidlo je externě napájeno dvěma tužkovými bateriemi přes měřicí ústřednu.

Z hlediska přístupu k rotujícím částím bylo nejvhodnější nalepit reflexní pásek ke sběracím kroužkům. Jako odrazová plocha slouží zajišťovací podložka šroubů konzole pro uchycení budícího přívodu. Na upravenou zajišťovací podložku byla nalepena reflexní páska v délce 30mm. Poloha značky určuje střed hlavy prvního pólu.

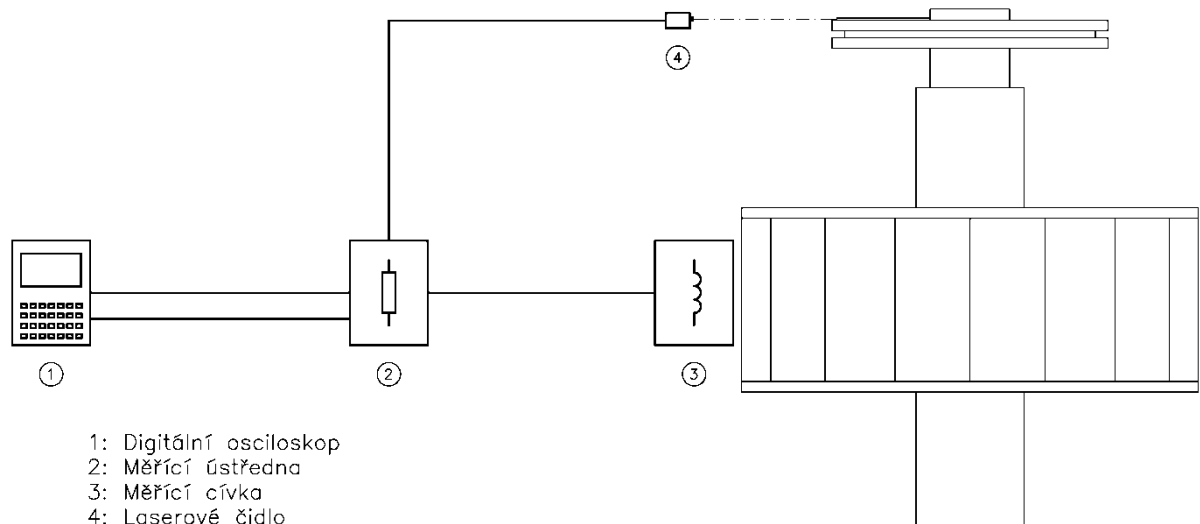


Obr. č. 12. Nalepená reflexní páska na sběracím ústrojí

## 4.2 Průběh měření a naměřené hodnoty

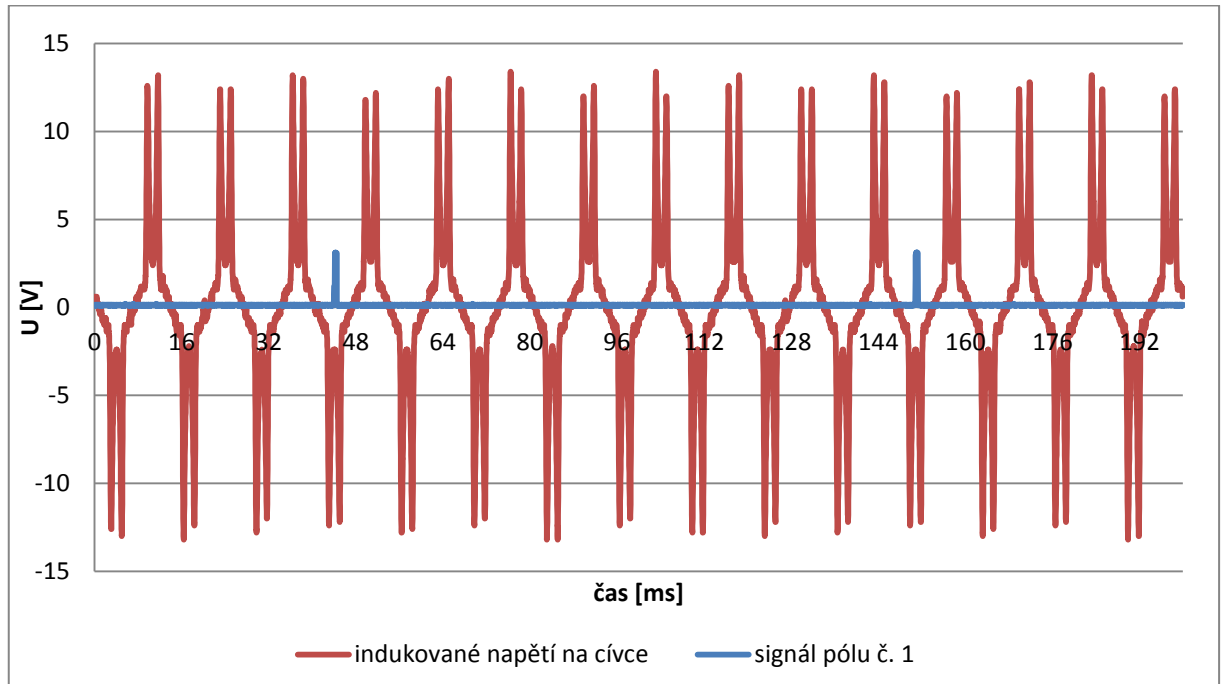
První měření proběhlo při závěrečných zkouškách generátoru po opravě dne 13. 05. 2014. Dle schématu na obr. č. 13. bylo zapojeno laserové čidlo a měřicí cívka. Měřicí ústředna obsahuje dělič napětí (1:1, 1:10 a 1:100) pro měřicí cívku. K ústředně se připojují baterie pro napájení laserového čidla. Do měřicí ústředny byla BNC – BNC kabelem připojena cívka a jack – jack kabelem čidla. Z měřicí ústředny pak byly dva BNC – BNC kabely připojeny do osciloskopu. Na první kanál osciloskopu byl připojen

signál z měřicí cívky a druhý kanál zobrazuje signál od čidla. Pro záznam byl použit osciloskop OWON HDS 1022 M-N, který má výstup pro ukládání dat na flash paměť. Laserové čidlo bylo namontováno na magnetický stojánek. Stojánek byl přichycen na podlahu u sběracích kroužků a paprsek byl nastaven tak, aby se správně odrážel zpět.



Obr. č. 13. Blokové schéma zapojení při měření mezizávitových zkratů

Měření probíhalo při několika hladinách budícího proudu, naprázdno i při zatíženém stroji. Prezentované naměřené hodnoty jsou při chodu naprázdno a budícím proudu 300 A, což je ideální stav pro budoucí porovnávání periodických měření. Indukované napětí na cívce peak – peak bylo cca 26 V. Rozsah osciloskopu byl nastaven tak, aby byly vidět všechny póly v řadě, tj. od značky ke značce.



Graf č. 4. Průběh indukovaného napětí na cívce se signálem z laserového čidla

### 4.3 Analýza naměřených dat

Použitý osciloskop má rozlišení 7500 bodů na kanál. To by mělo odpovídat zhruba 470 hodnotám pro jeden pól (cívku). Po provedeném vyhodnocení průběhu vychází cca 250 hodnot na jeden pól. To je ve srovnání s průběhem z turbogenerátoru o cca 100 hodnot více. Pro určení mezizávitových zkratů je počet hodnot na pól důležitý, protože se pro zjištění mezizávitových zkratů porovnávají výsledné rozdíly mezi indukčním tokem jednotlivých pólů.

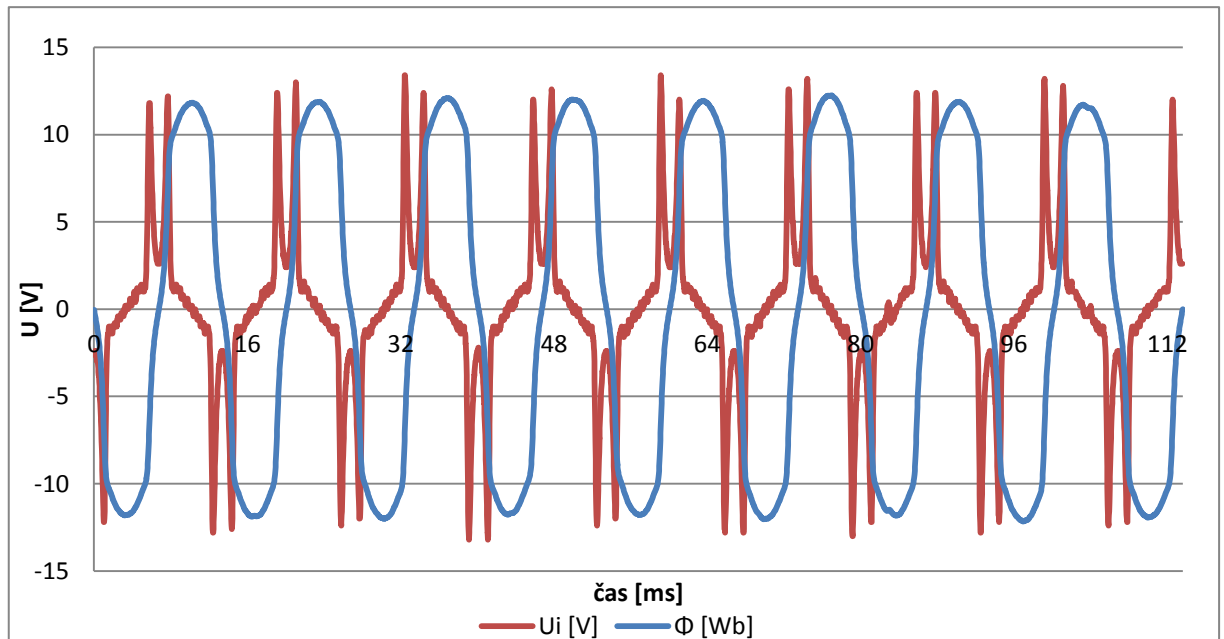
Na grafu č. 4 má červená křivka 30 kladných a 30 záporných peaků. Tyto peaky představují největší změnu magnetického indukčního toku dle rovnice:

$$U_i = -\frac{d\Phi}{dt} \quad [V] \quad (6)$$

Největší změna napětí nastává při přechodu mezi póly (změna polarity). Naopak nejmenší změna je při průchodu nulou (střed hlavy pólu). Zvlnění kolem průchodu nulou odpovídá počtu tyčí amortizéru – změna je dána jiným magnetickým odporem tyčí. Peaky modré křivky jsou odrazy od reflexní pásky. V ideálním případě by střed peaku od čidla polohy byl ve chvíli, kdy indukované napětí prochází nulou. Průchod  $U_i$  nulou odpovídá středu hlavy pólu, kde je také nalepena reflexní odrazka.

### 4.3.1 Příprava průběhu pro vyhodnocení

Mezi modrými peaky indukované napětí prochází 16x nulou, to značí 16 pólů. Ostatní průchody označují opakující se póly a pro vyhodnocení musí být oříznuty. Protože nebylo laserové čidlo přesně v ose drážky č. 130, je signál od čidla zpožděn. Dalším krokem je výpočet průběhu magnetického toku. To se provede integrováním průběhu indukovaného napětí. Pro srovnání extrémů je důležité co nejpřesněji zjistit integrační konstantu. Přičtením konstanty se průběh toku posune na střed a odpovídá tak skutečnému indukčnímu toku nad jednotlivými póly. V posledním kroku se průběh převede do absolutní hodnoty, viz příloha B. Čísla pólů uvedené nad špičkami jsou v obráceném pořadí, protože fyzické očíslování je pravotočivě, stejně jako směr otáčení rotoru.



Graf č. 5. Průběh indukovaného napětí se zpracovaným průběhem indukčního toku<sup>1</sup>

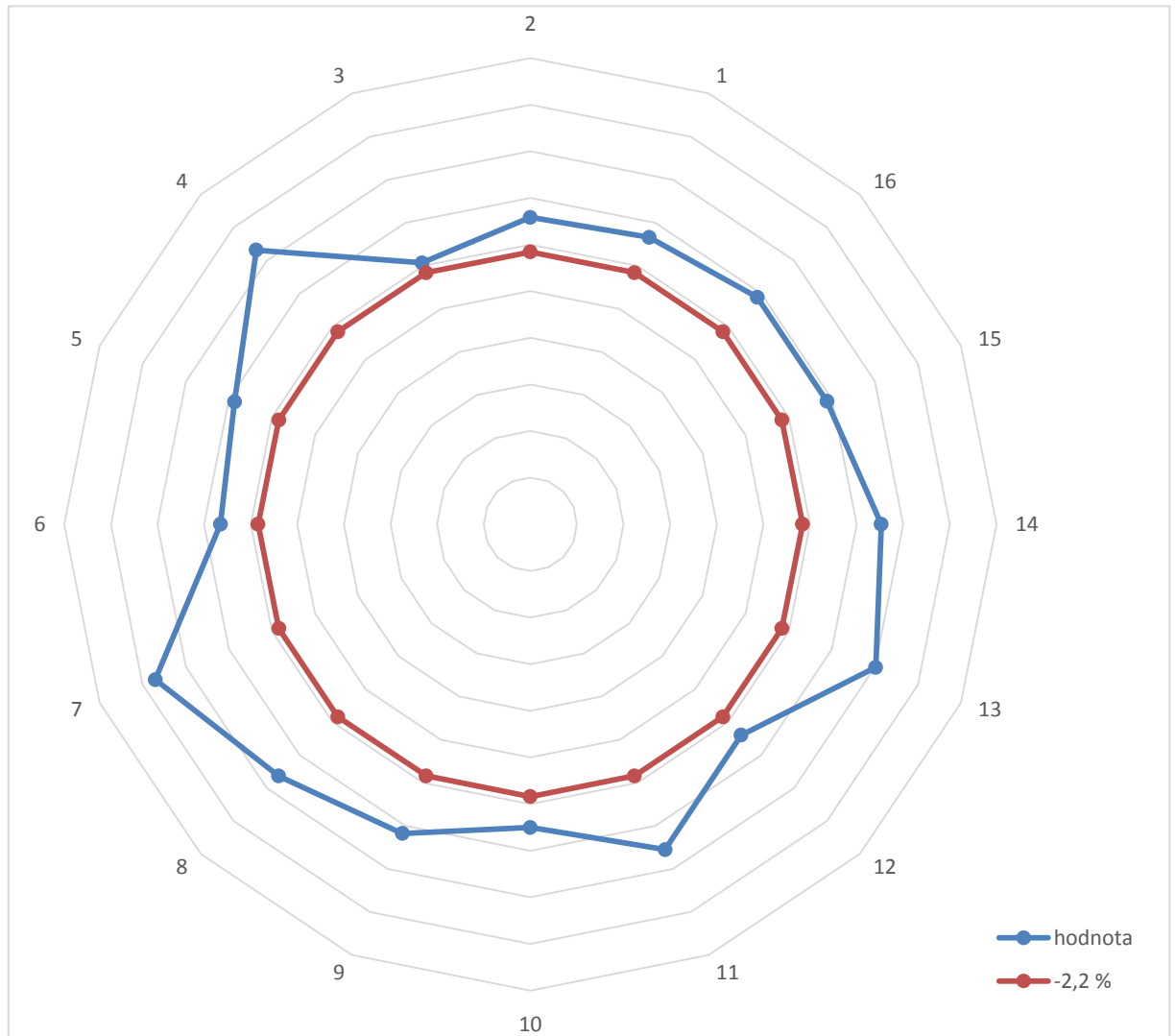
### 4.3.2 Vyhodnocení průběhu na mezizávitové zkraty

Průběh se rozdělí na 16 stejných intervalů. V každém intervalu se nalezne jedno maximum. Průměr maxim je střední hodnota indukčního toku, od které se stanoví mez pro konstatování mezizávitového zkratu. Kritérium přítomnosti mezizávitového zkratu se určí obdobně jako u turbogenerátorů, tj. pro generátor ELI I.:

<sup>1</sup> Pro ilustraci je průběh magnetického toku  $\Phi$  30x zmenšen

$$k = \frac{100\%}{45 \text{ závitů}} = 2,2 \quad [\%] \quad (7)$$

Pokud některý extrém indukčního toku bude o více než 2,2 % menší než střední hodnota toku, je pravděpodobné že na daném pólu vznikl mezizávitový zkrat.



Graf č. 6. Maxima indukčního toku s kritériem pro určení mezizávitového zkratu

Z kruhového grafu je patrné, že na žádném pólu není mezizávitový zkrat. Výraznější odchylky (např., póly č. 4 a 7) jsou způsobeny různě usazenými póly, protože vzduchová mezera není u každého stejná. Dle měření při usazení rotoru je rozptyl cca  $\pm 1\text{mm}$ . Velikost vzduchové mezery ovlivňuje magnetický odpor, na kterém je závislé výsledné indukované napětí na měřící cívce. Pro zpřesnění výsledků je důležité tento faktor zohlednit.

## Závěr

Měření mezizávitových zkratů je velmi efektivní způsob diagnostiky izolačního systému velkých točivých strojů. V první části práce jsou detailně popsány nejčastěji používané metody měření mezizávitových zkratů na vyjmutém rotoru. Většina z uvedených je požadována zákazníky (ČEZ a.s. apod.) při opravách a revizích rotorů. Výběr metody je závislý na konstrukci vinutí, která je popisována v první kapitole. Jsou zde rozebrány příčiny a důsledky mezizávitového zkratu, kdy například zdánlivě nepatrné natahování mědi může mít za následek značné poškození rotoru.

Sonda ve vzduchové mezeře generátoru umožňuje určit umístění a počet mezizávitových zkratů ve vinutí rotoru při provozu stroje. Provozovateli stroje tak může pomoci navrhnout a přizpůsobit intervaly údržby a oprav dle aktuálního stavu stroje. Nespornou výhodou této metody je nezávislost měření na provozu. V případě dostatku dat by bylo zajímavé srovnat výsledky měřící cívky s metodou vyhodnocení zkratů na základě vibrací rotoru při změnách budícího proudu.

Navržená konstrukce měřící sondy pro generátor ELI I. se dle naměřených dat osvědčila. Vybuzené napětí na cívce je dostatečné pro úspěšné vyhodnocení. Použití laserového čidla se také osvědčilo. V zaznamenaném průběhu je dobře znatelný začátek a konec využitelné části průběhu. Signál od čidla má poměrně velké množství hodnot, ze kterých se hůře určuje střed. Proto by bylo vhodné na další stroj nalepit kratší reflexní pásku. Délka záznamu použitého osciloskopu pro přesné vyhodnocení je více než dostačující. Ovšem při měření na rotoru s mnohem větším počtem pólů, by bylo vhodné srovnání s citlivějším přístrojem.

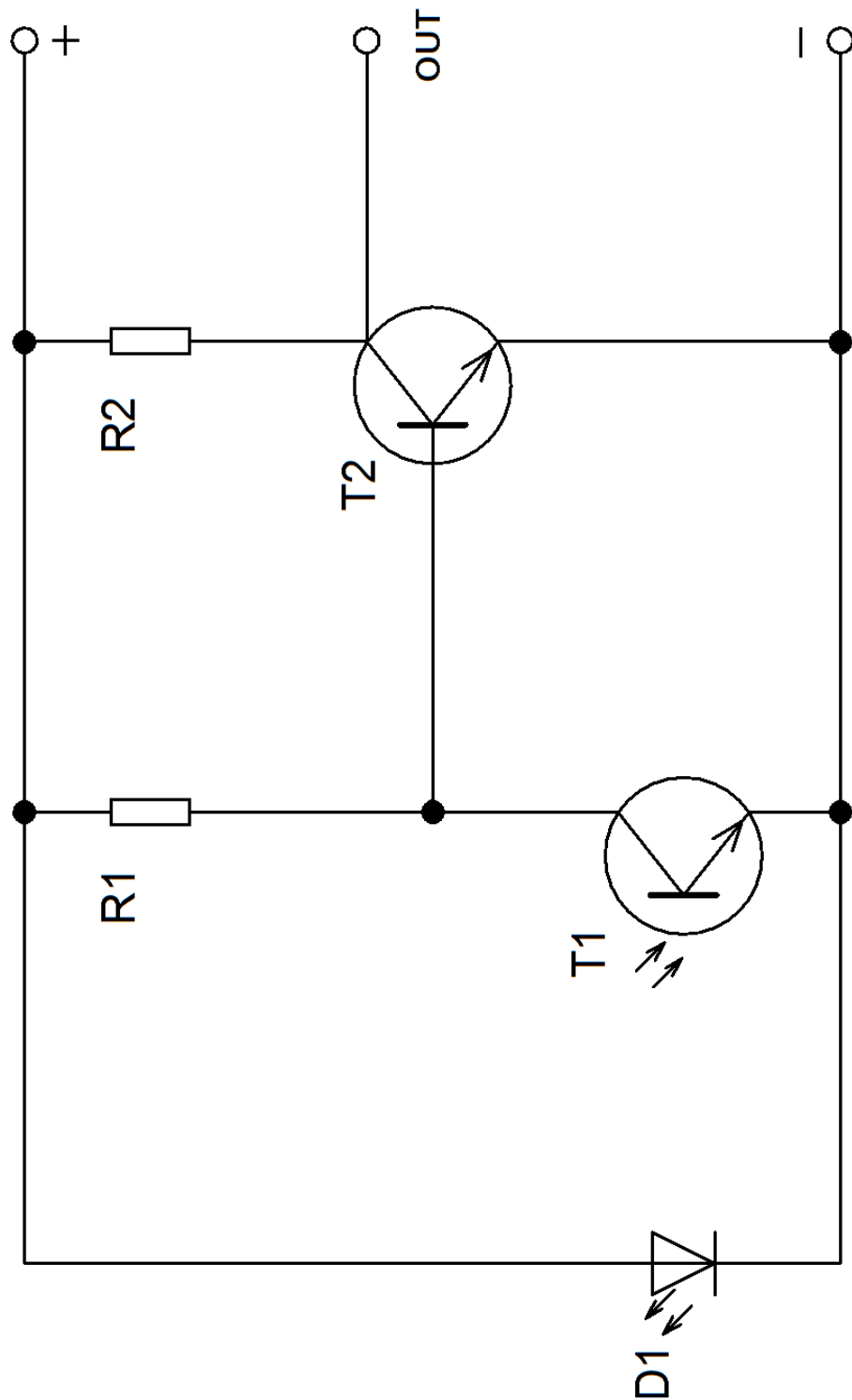
Dle výsledku z naměřených hodnot nevznikl na rotoru mezizávitový zkrat. Nyní je důležité pozorování trendu v čase. Pro diagnostiku stavu izolačního systému je nutné srovnání výsledků z několika měření provedených za stejných podmínek. Vzhledem k typu elektrárny není problém provozní podmínky opakovat a srovnání tak bude průkazné.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] WIEDEMANN, E. a KELLENBERG, W. Konstrukce elektrických strojů. Přel. B. Benda, K. Plácal, D. Zdeněk, E. Ondruška. 1. Vydání. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1973. 652 s.
- [2] KREMPEL GROUP: Prepregs. *KREMPEL GROUP: Prepregs* [online]. [cit. 2014-03-05]. Dostupné z: <http://www.krempele-group.com/englisch/home/products/composites-and-components/prepregs.html>
- [3] GENERATOR FIELD WINDING SHORTED TURN DETECTION TECHNOLOGY. In: GENERATOR FIELD WINDING SHORTED TURN DETECTION TECHNOLOGY [online]. [cit. 2014-03-08]. Dostupné z: [http://www.marubun.jp/product/measurement/electric/qgc18e000002i86k-att/generatortech\\_200702.pdf](http://www.marubun.jp/product/measurement/electric/qgc18e000002i86k-att/generatortech_200702.pdf)
- [4] Generator Rotor Thermal Sensitivity — Theory and Experience. In: Generator Rotor Thermal Sensitivity — Theory and Experience [online]. 04/01 [cit. 2014-03-19]. Dostupné z: [http://site.generator.com/prod\\_serv/products/tech\\_docs/en/downloads/ger3809.pdf](http://site.generator.com/prod_serv/products/tech_docs/en/downloads/ger3809.pdf)
- [5] BALLON INSTRUMENT s.r.o., 2003, Návod k obsluze Rázový generátor PGS 204 A
- [6] HUNTSMAN INTERNATIONAL LLC. *Araldite® 2014-1: Advanced Materials*. Basel, 2013. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/1819252.pdf>

## Přílohy

### Příloha A – Schéma zapojení laserového čidla





**Příloha B – Průběh magnetického indukčního toku pro vyhodnocení**

