

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

*Edice PhD Thesis, sv. 636*

*ISSN 1213-4198*

*thesis* IS

*Ing. Josef Pavlík*

**Vybrané problémy  
z diagnostiky izolačních systémů  
točivých elektrických strojů**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

**Ing. JOSEF PAVLÍK**

**VYBRANÉ PROBLÉMY Z DIAGNOSTIKY IZOLAČNÍCH  
SYSTÉMŮ TOČIVÝCH ELEKTRICKÝCH STROJŮ**

**SELECTED PROBLEMS OF DIAGNOSIS OF INSULATION  
SYSTEMS FOR ROTATING ELECTRICAL MACHINES**

Zkrácená verze Ph.D. Thesis

OBOR	KONSTRUKČNÍ A PROCESNÍ INŽENÝRSTVÍ
ŠKOLITEL	doc. Ing. MILOŠ HAMMER, CSc.
OPONENTI	doc. Ing. VLADISLAV SINGULE, CSc., Ing. RADEK SZABÓ, Ph.D.
DATUM OBHAJOBY	4.11.2011

**Klíčová slova:** točivý elektrický stroj, diagnostika, izolační odpor, polarizační index, metodika

**Key words:** rotating electric machine, diagnostic, insulation resistance, polarization index, methodology

NÁZEV PRACOVIŠTĚ KDE JE ULOŽEN RUKOPIS

Disertační práce je uložena na Oddělení vědy a výzkumu Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně, Technická 2, 616 69 Brno

*Tato práce vznikla jako školní dílo na Vysokém učení technickém v Brně, Fakultě strojního inženýrství. Práce je chráněna autorským zákonem a její užití bez udělení oprávnění autorem je nezákonné, s výjimkou zákonem definovaných případů..*

© Josef Pavlík, 2011

ISBN 978-80-214-4387-7

ISSN 1213-4198

## OBSAH

1	ÚVOD .....	5
2	CÍLE PRÁCE .....	6
3	TEORIE K DANÉ PROBLEMATICE .....	7
4	MĚŘENÍ V LABORATORNÍCH PODMÍNKÁCH .....	7
5	MĚŘENÍ NA STROJÍCH .....	7
5.1	ZÁVISLOST IZOLAČNÍCH ODPORŮ NA NAPĚTÍ .....	7
5.1.1	<i>Přímá závislost izolačního odporu na měřícím napětí</i> .....	7
5.1.2	<i>Závislost naměřených izolačních odporů na rychlosti nabíjení – vliv napětí</i> .....	7
5.1.3	<i>Chyba vzniklá nepřesným nastavení měřícího napětí</i> .....	9
5.2	ZÁVISLOST NAMĚŘENÝCH IZOLAČNÍCH ODPORŮ NA ZKRATOVÉM PROUDU MĚŘÍCÍHO PŘÍSTROJE .....	9
5.2.1	<i>Vliv rychlosti nabíjení na zkratovém proudu přístroje – problematika neprotnutí počátku souřadnic</i> .....	9
5.3	VLIV TEPLoty MĚŘENÉ IZOLACE NA IZOLAČNÍ ODPORY .....	11
5.4	VLIV VLHKOSTI MĚŘENÉ IZOLACE NA IZOLAČNÍ ODPORY .....	13
5.5	ZÁVISLOST POLARIZAČNÍCH INDEXŮ NA NAPĚTÍ .....	13
5.5.1	<i>Přímá závislost polarizačních indexů na napětí</i> .....	13
5.5.2	<i>Závislost polarizačních indexů na rychlosti nabíjení – vliv napětí</i> .....	13
5.5.3	<i>Chyba způsobená nepřesným nastavení měřícího napětí</i> .....	13
5.6	ZÁVISLOST POLARIZAČNÍCH INDEXŮ NA TEPLOTĚ MĚŘENÉ IZOLACE .....	14
5.7	ZÁVISLOST POLARIZAČNÍCH INDEXŮ NA VLHKOSTI MĚŘENÉ IZOLACE .....	15
6	DALŠÍ PROBLÉMY OVLIVŇUJÍCÍ HODNOTY IZOLAČNÍCH ODPORŮ A POLARIZAČNÍCH INDEXŮ .....	15
6.1	NARUŠENÍ POLÍ MĚŘENÉHO STROJE .....	15
6.2	VLIV MAGNETICKÉHO OBVODU .....	15
6.3	PROBLEMATIKA POČTU BODŮ NA NAMĚŘENÉ ABSORPČNÍ CHARAKTERISTICE .....	16
7	PŘÍNOSY PRÁCE .....	16
8	ZÁVĚR .....	17
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURA .....	18
	ŽIVOTOPIS .....	19
	VLASTNÍ PUBLIKACE .....	20
	PRODUKTY .....	21
	ABSTRACT .....	21



# 1 ÚVOD

S rostoucími nároky na bezproblémový provoz elektrizační soustavy, ale i na ní napojených průmyslových celků, se do popředí již před dlouhou dobou dostala i otázka diagnostiky velkých točivých elektrických strojů. To se týká především generátorů (tvoří páteř elektrizační soustavy a vyrábí se v nich absolutní většina elektrické energie) a velkých motorů (pohánějí důležité technologické procesy), popřípadě i rotačních kompenzátorů (jsou důležitou součástí elektrizační soustavy). Jedná se o stroje synchronní a asynchronní. Oblast velkých stejnosměrných strojů není v dnešní době již tak významná, neboť tyto stroje se vyskytují již jen zřídka (výjimkou jsou motory užívané ve drážní dopravě).

Nedílnou součástí každého elektrického točivého stroje je jeho izolační systém, bez něhož nemůže pracovat. Jelikož je izolační systém jednou z nejnamáhanějších částí elektrického točivého stroje, je jeho bezporuchovou funkčnost třeba zajistit. Za tímto účelem se provádí různá diagnostická měření a zkoušky, s jejichž pomocí lze posoudit stav izolačního systému, popřípadě dějů v něm a následně předpovědět jeho vývoj.

Zásadní roli pro kvalitní diagnostiku hraje především vypovídací schopnost provedených měření na stroji (na jeho izolačním systému) a nezbytné teoretické vědomosti, které tvoří základ pro identifikaci dějů probíhajících v izolačním systému stroje a samozřejmě také zkušenosti s diagnostikou v této oblasti, a to ať již vyjádřené formou empirických vztahů nebo posouzením daného stroje odborníkem.

Pro kvalitní určení stavu izolačního systému stroje je však třeba provádět měření jeho parametrů v souladu se všemi poznatky o izolacích a izolačních systémech, aby nedocházelo ke vzniku odchylek, nepřesností a chyb. Ty by totiž mohly celý diagnostický proces znehodnotit, vést k nesprávným výsledkům diagnostiky a v důsledku způsobit zvýšené náklady nebo dokonce havárii stroje se všemi jejími následky (technickými, ekonomickými, právními).

Předkládaná práce se zabývá pouze úzkou částí celé problematiky. Konkrétně se jedná o měření izolačních odporů, jejich závislostí na čase měření (absorpčních charakteristik) a polarizačních indexů z nich vypočtených. Parametry jsou určovány z off-line zkoušek prováděných pomocí stejnosměrného měřicího napětí.

Problematika on-line měření není v práci řešena, neboť v ČR jsou využívány stále ještě zřídka, byť v poslední době on-line měřících systémů začíná značně přibývat. Data z těchto měření jsou však obvykle nedostupná (firemní tajemství).

Práce si neklade za úkol vyhodnocovat získané parametry izolačních systémů. K jejich vyhodnocování je obvykle za potřebí buď značná zkušenost s diagnostikou daného typu strojů, nebo rozsáhlý diagnostický systém, dnes již obvykle s využitím umělé inteligence (více např. v [12]). Práce se zaměřuje na určení parametrů izolačních systémů, které mají být následně hodnoceny na základě jiných metod.

## 2 CÍLE PRÁCE

Po posouzení stavu řešené problematiky měření izolačních odporů na točivých elektrických strojích a výpočtech polarizačních indexů z nich v ČR i ve světě byl stanoven hlavní cíl disertační práce takto:

### **Příspěvek k zlepšení diagnostiky točivých elektrických strojů**

Za účelem dosažení hlavního cíle byly stanoveny další – dílčí cíle, jejichž splnění umožní splnění cíle hlavního.

Provést měření:

- **Provést laboratorní měření na náhradním modelu izolace**
- **Provést laboratorní měření na reálné izolaci vzorku (cívky)**
- **Provést měření na reálných strojích v průmyslových podmínkách**

Provést zpracování dat:

- **Zjistit vlivy měřícího napětí na naměřené hodnoty izolačních odporů**
- **Zjistit vlivy proudu dodávaného měřícím přístrojem na naměřené hodnoty izolačních odporů**
- **Zjistit vlivy teploty měřené izolace na naměřené hodnoty izolačních odporů**
- **Zjistit vlivy vlhkosti měřené izolace na naměřené hodnoty izolačních odporů**
- **Zjistit vlivy měřícího napětí na vypočtené hodnoty polarizačních indexů**
- **Zjistit vlivy proudu dodávaného měřícím přístrojem na vypočtené hodnoty polarizačních indexů**
- **Zjistit vlivy teploty měřené izolace na vypočtené hodnoty polarizačních indexů**
- **Zjistit vlivy vlhkosti měřené izolace na vypočtené hodnoty polarizačních indexů**
- **Určit další problémy ovlivňující měření izolačních odporů na reálných strojích**

- **Zjistit, zda by bylo možné vytvořit nové postupy pro diagnostiku stavu izolace z naměřených dat**
- **Vytvořit novou metodiku pro stanovení izolačních odporů v průmyslové praxi.**

### **3 TEORIE K DANÉ PROBLEMATICE**

V disertační práci byla rozebrána teorie k řešené problematice, stejně jako fyzikální podstata některých dějů, které se u izolačních systémů točivých elektrických strojů vyskytují.

### **4 MĚŘENÍ V LABORATORNÍCH PODMÍNKÁCH**

Disertační práce obsahuje výsledky měření prováděných v laboratorních podmínkách. Měření byla prováděna na vzorcích i na modelu.

### **5 MĚŘENÍ NA STROJÍCH**

#### **5.1 ZÁVISLOST IZOLAČNÍCH ODPORŮ NA NAPĚTÍ**

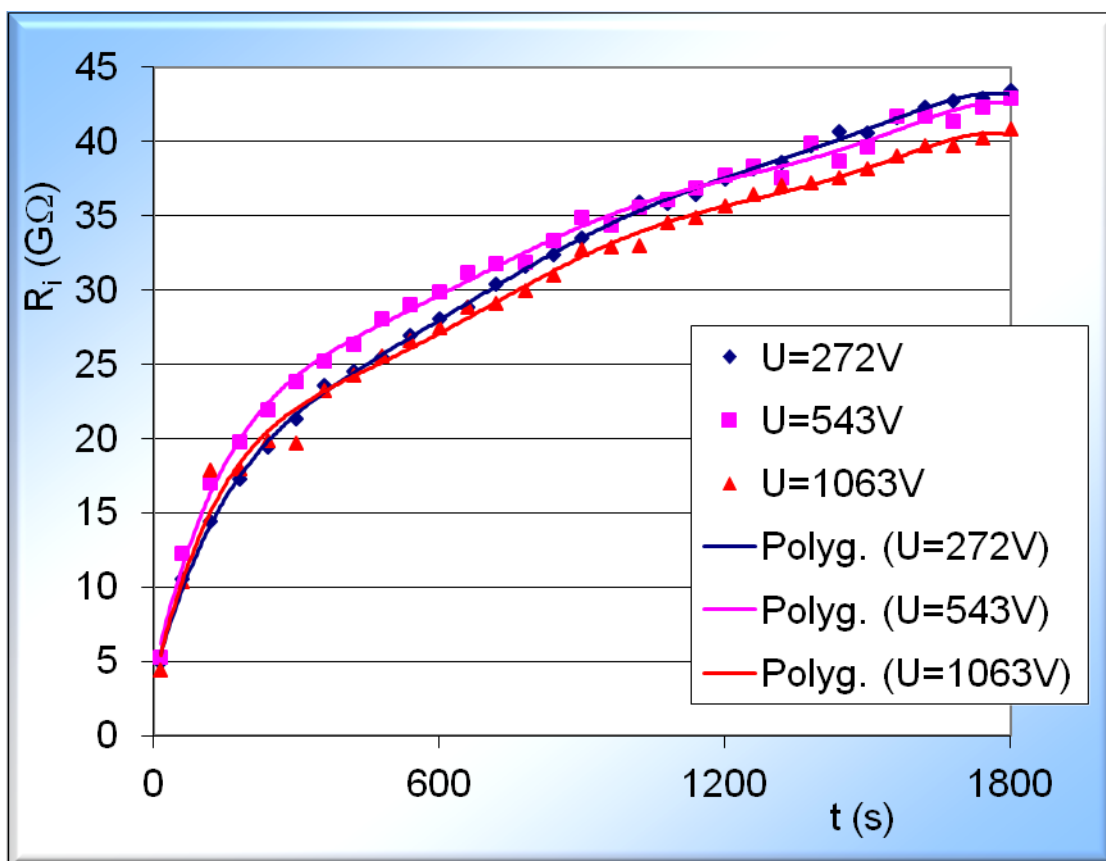
##### **5.1.1 Přímá závislost izolačního odporu na měřícím napětí**

Při měřeních na strojích (stejně jako při předchozích měřeních v laboratorních podmínkách) bylo potvrzeno, že s rostoucím měřícím napětím klesá naměřený ustálený izolační odpor. Tento fakt je již dlouhodobě znám a je popsán i ve starší odborné literatuře, například v [1], [6] nebo v [7]. Příklad možno vidět na Obr. 5-1.

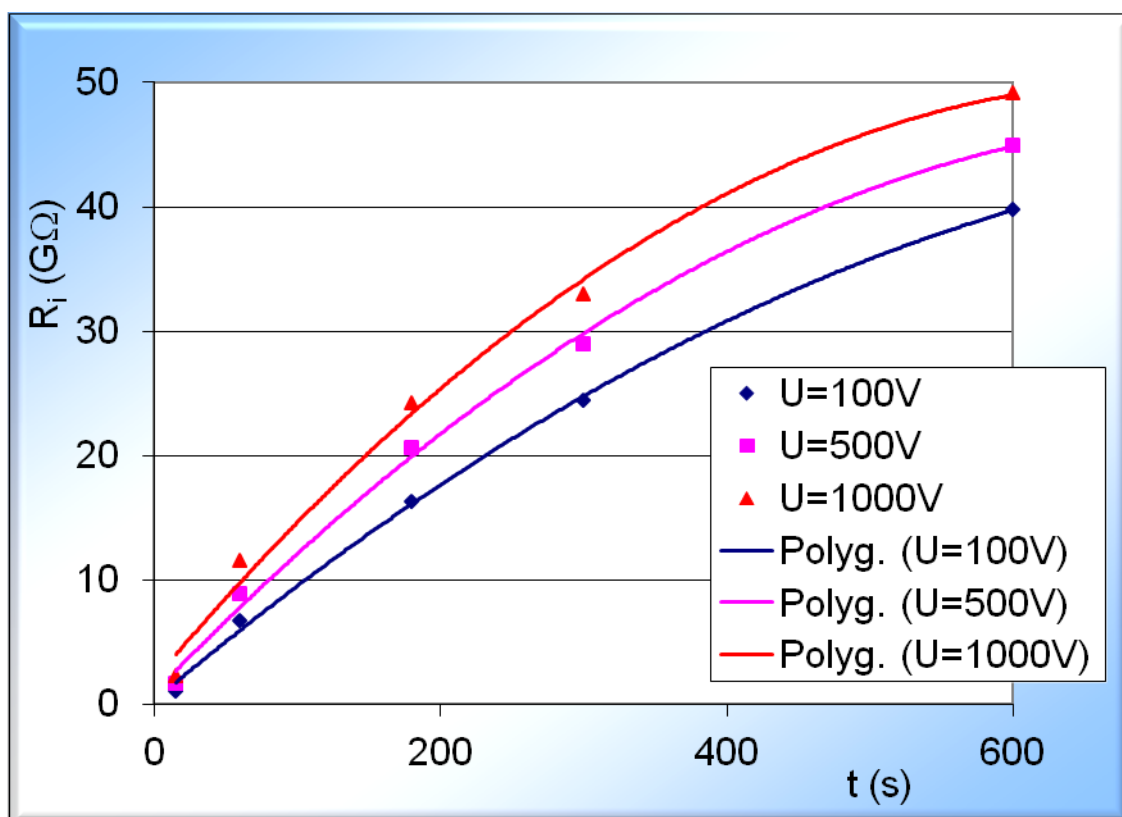
##### **5.1.2 Závislost naměřených izolačních odporů na rychlosti nabíjení – vliv napětí**

Na Obr. 5-2 je zcela zřetelně vidět, že při měřeních na velkých strojích má měřící napětí zásadní vliv na rychlost nabíjení izolace a tedy i na naměřené hodnoty izolačního odporu. V této fázi měření s rostoucím měřícím napětím naměřený izolační odpor roste.





Obr. 5-1 Příklad přímé závislosti izolačního odporu na napětí



Obr. 5-2 Příklad závislosti závislosti izolačního odporu na rychlosti nabíjení izolace – vliv napětí

### 5.1.3 Chyba vzniklá nepřesným nastavením měřicího napětí

Jak bylo během měření na strojích zjištěno, měřicí přístroje nenastavují napětí přesně. Obecně nelze konstatovat, že by ve velikosti odchylky mezi napětím, které nastavíme, jako měřicí a napětím, kterým přístroj skutečně provádí měření, byla nějaká pravidelnost. Jedná se o záležitost vnitřní konstrukce a nastavení každého měřicího přístroj.

Z vypočtených hodnot je patrné, že v počáteční fázi nabíjení se chyba měření způsobená nepřesným nastavením měřicího napětí snižuje, roste-li měřicí napětí. Je však také vidět, že tuto chybu rozhodně nelze zanedbat.

V případě ustáleného izolačního odporu můžeme chybu nastavení měřicího proudu zanedbat, neboť s rostoucím měřicím napětím se hodnota ustáleného izolačního odporu snižuje pouze mírně, například na Obr. 5-1 je vidět změna do 10% při změně napětí o 400%.

Tab. 5-1 Závislost chyby měření na napětí a odchylce nastavení měřicího napětí pro  $R_{i60}$

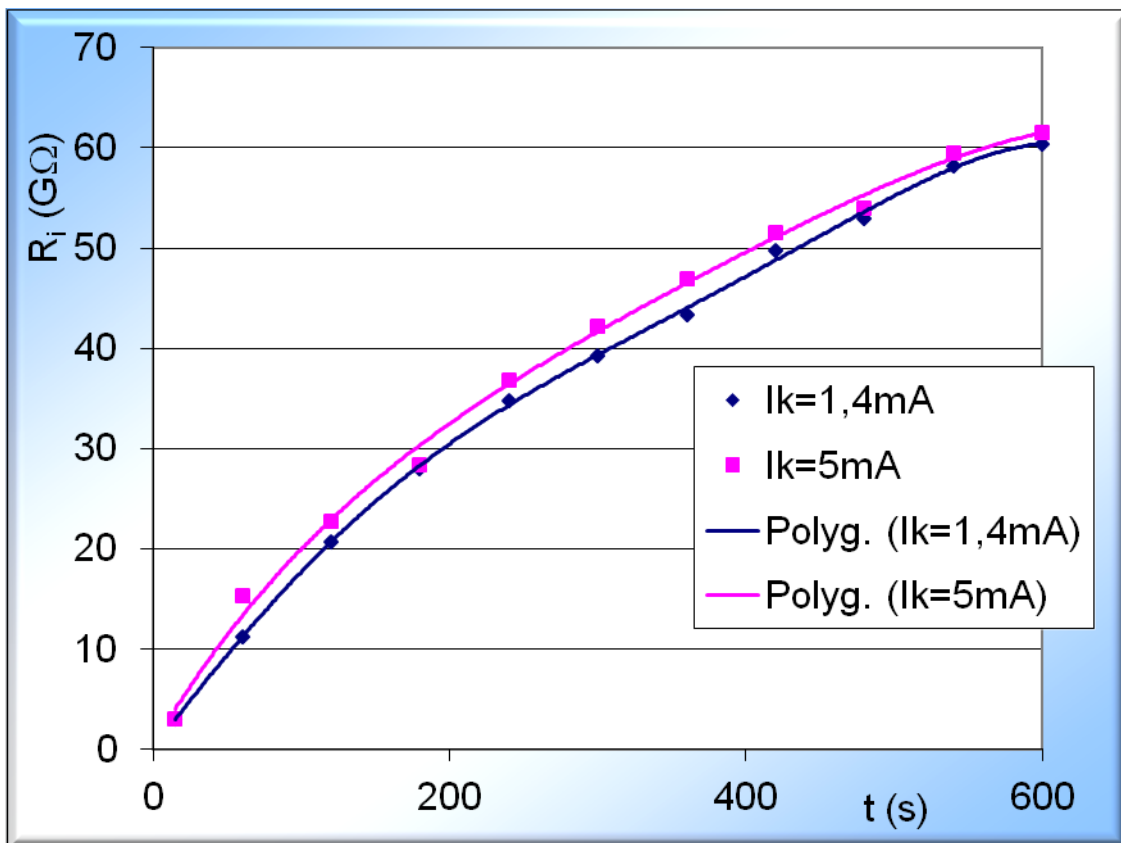
U	Odchylka nastavení	3%	5%	9%
[V]	Chyba	[%]	[%]	[%]
5000	-	2,67	4,45	7,98
10 000	-	2,48	4,13	7,38
20 000	-	1,9	3,13	5,51

## 5.2 ZÁVISLOST NAMĚŘENÝCH IZOLAČNÍCH ODPORŮ NA ZKRATOVÉM PROUDU MĚŘICÍHO PŘÍSTROJE

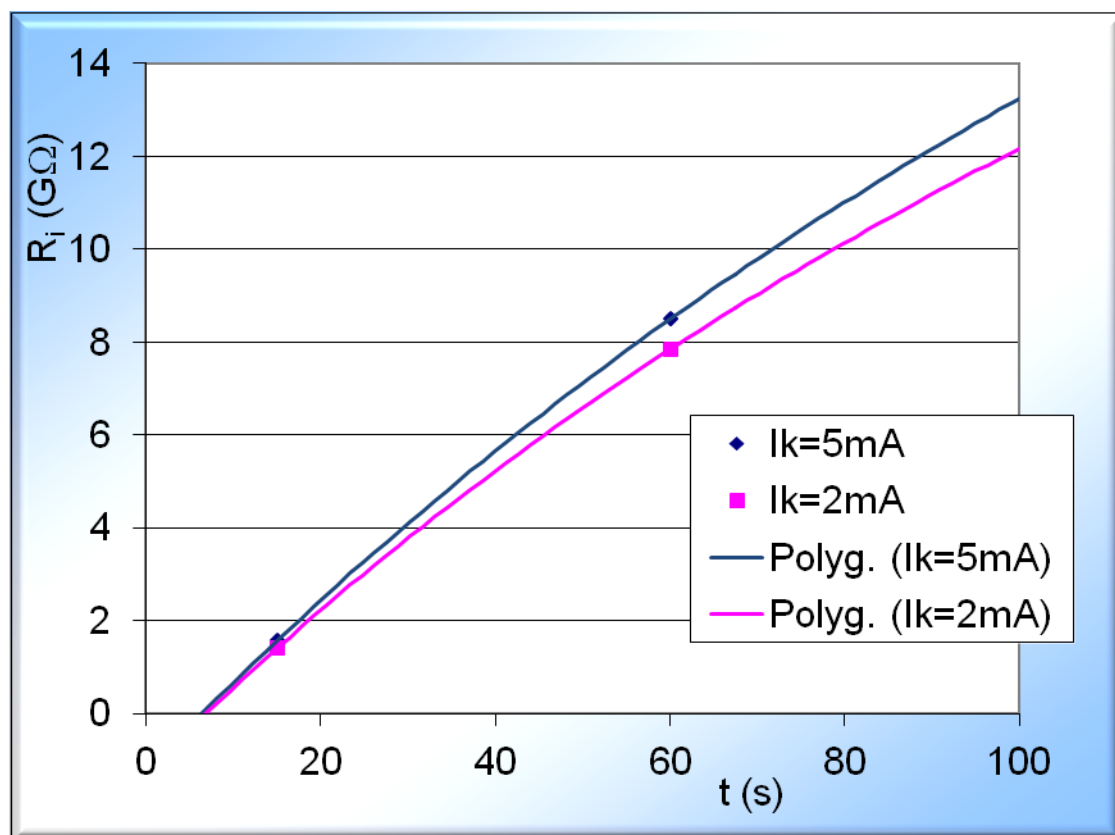
Z měření vyplynulo, že na hodnotu naměřeného izolačního odporu má vliv i velikost zkratového (maximálního) proudu, který je měřicí přístroj schopen do měřené izolace dodat. Platí, že čím je tento proud vyšší, tím budou vyšší i naměřené hodnoty.

### 5.2.1 Vliv rychlosti nabíjení na zkratovém proudu přístroje – problematika neprotnutí počátku souřadnic

Při měření na reálných strojích bylo zjištěno, že prakticky při žádném měření nevyjde rovnice popisující trend změřených dat tak, aby protнула počátek souřadnic, jak se uvažuje v teorii. To je způsobeno tím, že měřicí přístroje izolačního odporu mají omezený maximální zkratový proud. Vzhledem k tomu, že platí Ohmův zákon (přístroje z něj izolační odpor také počítají) lze dosáhnout omezení nabíjecího proudu pouze omezením napětí, které měřicí přístroj přivede na izolaci. Bylo zjištěno, že přístroje tímto omezením ovlivňují i výsledné naměřené hodnoty izolačních odporů. Příklad je na Obr. 5-3.



Obr. 5-3 Příklad rozdílu naměřených hodnot izolačních odporů pro různě velké zkratové proudy



Obr. 5-4 Příklad neprotnutí počátku souřadnic absorpční charakteristikou

Jev, kdy křivka odpovídající rovnici popisující trend změřených dat, neprochází počátkem souřadnic, je dobře patrný na Obr. 5-4. Jak již bylo zmíněno, je tento jev způsoben omezováním proudu pomocí omezování napětí přivedeného na měřenou izolaci. Příklady odchylek jsou uvedeny v Tab. 5-2.

*Tab. 5-2 Příklad odchylek naměřených hodnot izolačních odporů při různě velkých zkratových proudech*

t	R <sub>i</sub> pro 5mA	R <sub>i</sub> pro 2mA	odchylka
[s]	[GΩ]	[GΩ]	[%]
15	1,57	1,41	10,191
60	8,5	7,85	7,647
600	47,2	46,6	1,271

Z výše uvedeného a z reálných měření vyplývá, že pokud nebudou měření ovlivněna jinými faktory, budou se reálně naměřené průběhy, pro různě velké maximální proudy, jevit jako křivky přibližně stejného tvaru, jen posunuté v ose x.

Vyjdeme-li tedy z toho, že se jedná o přibližně stejné průběhy pouze posunutě v ose x, dojdeme k závěru, že pro lepší porovnatelnost dat naměřených na stejném stroji pomocí různých měřících přístrojů bude nejlepší, když provedeme převod charakteristik na teoretický, neomezený nabíjecí proud. K tomu stačí, když naměřené charakteristiky posuneme po ose x tak, aby procházely počátkem souřadnic. Přepočteme-li hodnoty z Tab. 5-2 na neomezený proud (teoretická hodnota), obdržíme Tab. 5-3.

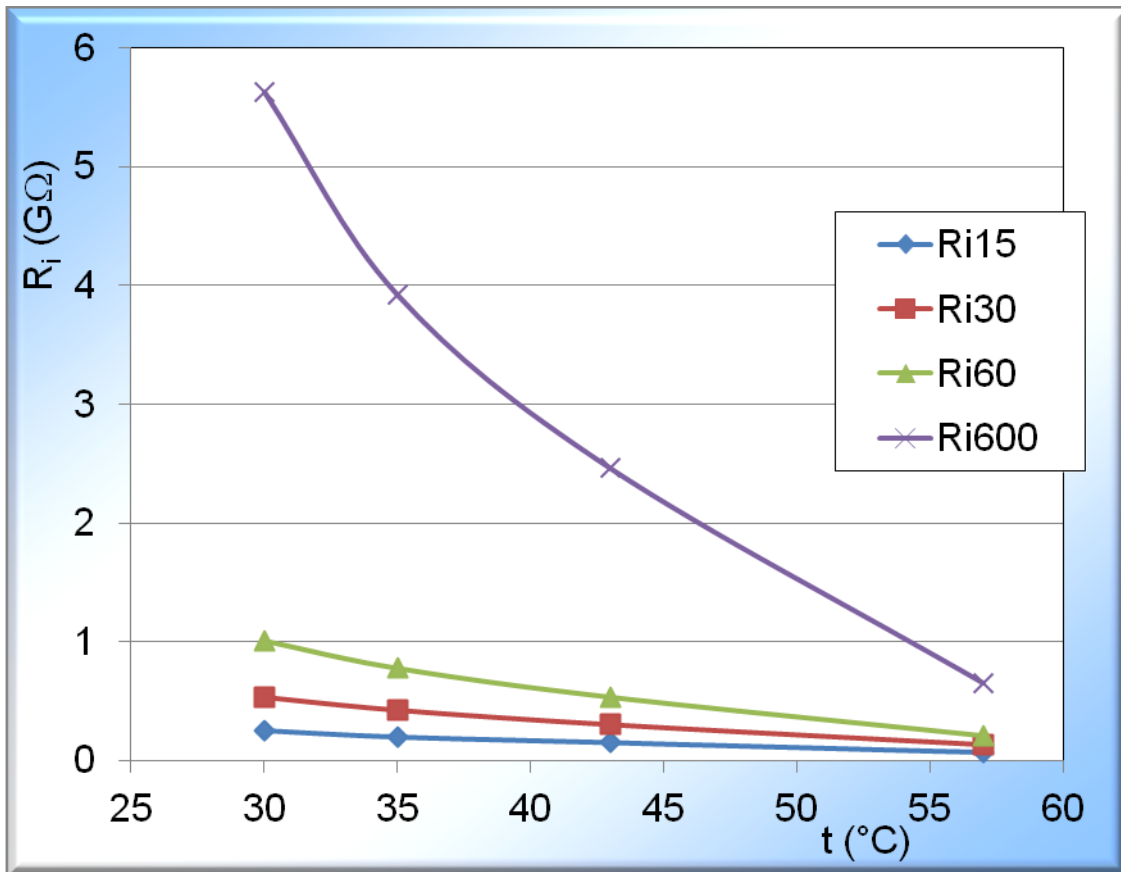
*Tab. 5-3 Příklad odchylek izolačních odporů při přepočtených na neomezený proud*

t	R <sub>i</sub> pro 5mA	R <sub>i</sub> pro 2mA	odchylka
[s]	[GΩ]	[GΩ]	[%]
15	2,676	2,523	5,687
60	9,327	8,667	7,075
600	47,049	46,241	1,718

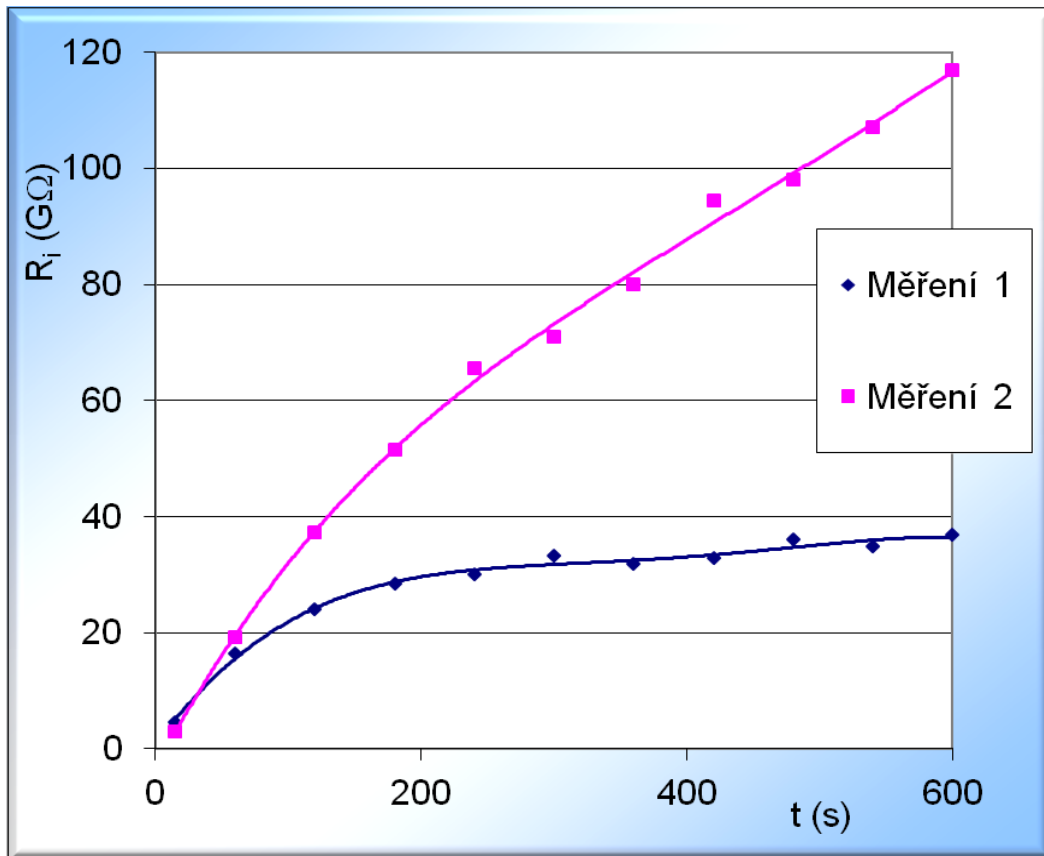
### 5.3 VLIV TEPLoty MĚŘENÉ IZOLACE NA IZOLAČNÍ ODPORY

Při měřeních na strojích se potvrdilo, že izolační odpor roste, klesá-li teplota měřené izolace. Příklad je možné vidět na Obr. 5-5.

Obecně platí, že čím je izolační odpor závislejší na teplotě, tím je izolace v horším stavu.



Obr. 5-5 Příklad závislosti jednotlivých izolačních odporů na teplotě měřené izolace



Obr. 5-6 Příklad závislosti izolační odpory, druhé měření dva dny po prvním

## 5.4 VLIV VLHKOSTI MĚŘENÉ IZOLACE NA IZOLAČNÍ ODPORY

Jak je již delší dobu známo (například z [7], [6] nebo [10]), zvýšení množství vlhkosti v izolaci, stejně jako přítomnost rozpouštědel v ní (například po opravách, převinutích, ...) vede ke snížení izolačních odporů, které izolace vykazuje. To je způsobeno tím, že voda i rozpouštědla jsou zdrojem volných nosičů náboje. Příklad je možné vidět na Obr. 5-6, kde první měření je na vlhké a druhé měření na částečně vysušené izolaci.

## 5.5 ZÁVISLOST POLARIZAČNÍCH INDEXŮ NA NAPĚTÍ

### 5.5.1 Přímá závislost polarizačních indexů na napětí

Přímý vliv velikosti měřicího napětí (pokles izolačního odporu s růstem měřicího napětí) se na zjištěných polarizačních indexech projevil velmi málo (je minoritní, obvykle pod hranicí měřitelnosti). To je dáno tím, že hodnoty izolačních odporů pro výpočty polarizačních indexů  $p_{i60}$  a  $p_{i600}$  jsou odečítány v časech 15s, 60s a 600s a za tak krátkou dobu se tento vliv nestačí projevit na naměřených hodnotách izolačního odporu.

### 5.5.2 Závislost polarizačních indexů na rychlosti nabíjení – vliv napětí

Bylo odvozeno, že během intenzivního nabíjení izolace (do doby než se izolační odpor začne blížit své ustálené hodnotě) jsou naměřené hodnoty izolačního odporu značně závislé na velikosti měřicího napětí. U běžně používaných strojů se tento jev týká izolačních odporů pro hodnoty izolačního odporu měřené nejen v čase  $t=60s$ , ale i pro hodnoty měřené v časech 15s, 30s a 600s. Jelikož se hodnoty izolačních odporů naměřené v těchto časech používají pro výpočet polarizačních indexů a dielektrického absorpčního poměru (15s a 60s pro  $p_{i60}$ , 60s a 600s pro  $p_{i600}$ , 30s a 60s pro DAR - Dielectric Absorption Ratio), je zřejmé, že se změnami naměřených izolačních odporů dojde i ke změně polarizačních indexů, které jsou z nich vypočteny. Příklad je v Tab. 5-4.

Tab. 5-4 Příklad závislosti polarizačních indexů na měřícím napětí

U	$R_{i15}$	$R_{i30}$	$R_{i60}$	$R_{i600}$	$p_{i60}$	$p_{i600}$	DAR
[V]	[GΩ]	[GΩ]	[GΩ]	[GΩ]	[-]	[-]	[-]
100	1,09	3,16	6,7	39,8	6,147	5,940	2,122
500	1,66	4,31	8,85	45	5,331	5,085	2,054
1000	2,32	5,85	11,6	49,2	5	4,241	1,982

### 5.5.3 Chyba způsobená nepřesným nastavením měřicího napětí

Z výpočtů vyplynulo, že stejně jako u izolačních odporů bude mít i u polarizačních indexů vliv nepřesnost, s jakou měřicí přístroje nastavují měřicí

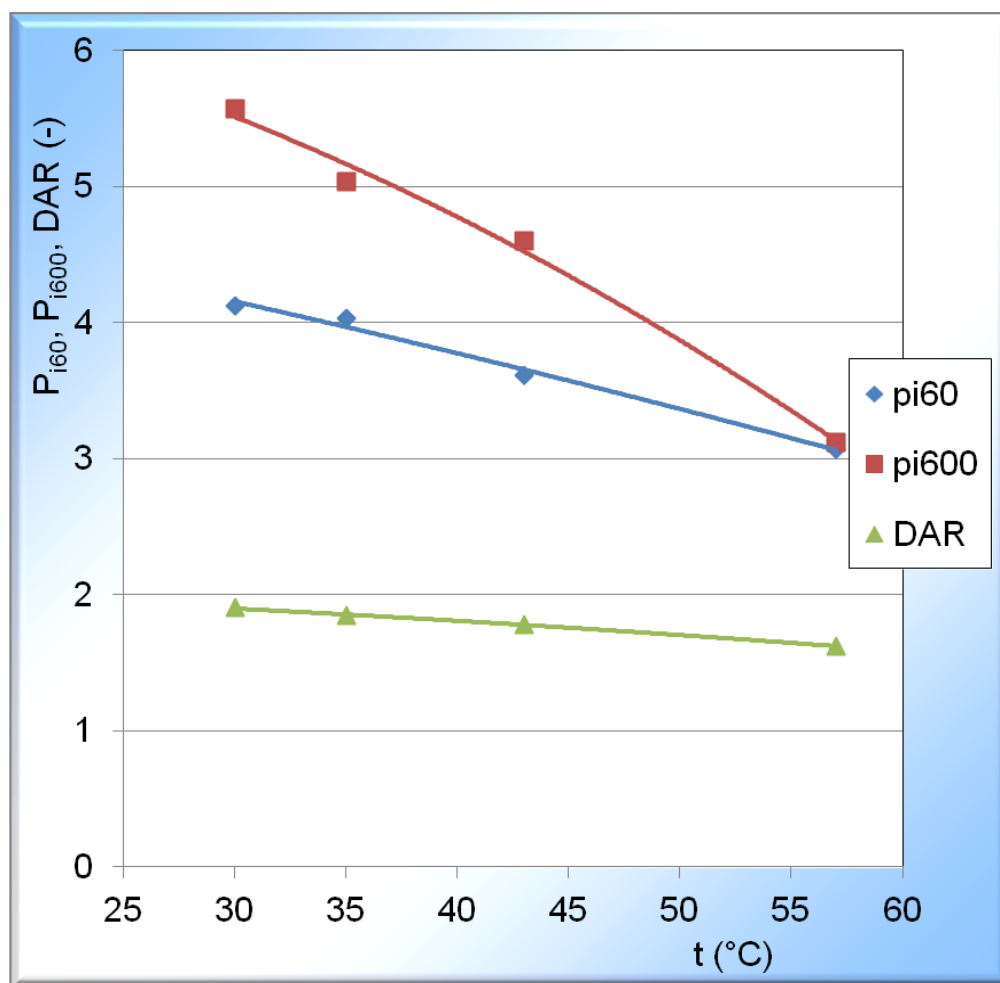
napětí. Tento vliv bude menší, než u měření izolačních odporů, ani v tomto případě však nepůjde o vliv zanedbatelný.

Tab. 5-5 Příklad závislosti chyby polarizačního indexu  $p_{i600}$  na odchylce nastavení měřícího napětí

U	Odchylka nastavení	3%	5%	9%
[V]	Chyba	[%]	[%]	[%]
100	-	0,122	0,203	0,365
500	-	0,513	0,852	1,525
1000	-	0,968	1,608	2,876

## 5.6 ZÁVISLOST POLARIZAČNÍCH INDEXŮ NA TEPLOTĚ MĚŘENÉ IZOLACE

Jak již bylo popsáno v předchozím průběhu práce, jsou izolační odpory značně závislé na teplotě měřené izolace. Lze tedy předpokládat, že budou na této teplotě závislé i polarizační indexy. Tento předpoklad se, při měřeních na reálných strojích, potvrdil. Příklad je na Obr. 5-7.



Obr. 5-7 Příklad závislosti polarizačních indexů na teplotě měřené izolace

## 5.7 ZÁVISLOST POLARIZAČNÍCH INDEXŮ NA VLHKOSTI MĚŘENÉ IZOLACE

Jak již bylo uvedeno v předchozí části práce, jsou izolační odpory naměřené na izolačním systému závislé na množství vlhkosti, a nebo rozpouštědel obsažených v izolaci. Lze logicky odvodit, že jsou-li takto závislé izolační odpory, budou závislé i polarizační indexy, které se z nich vypočtou. To měření na strojích potvrdila. Příklad je v Tab. 5-6.

Tab. 5-6 Příklad poměrů vypočtených pro polarizační indexy při různých stupních navlhnutí měřené izolace

Vlhkost	$p_{i60}$	$p_{i600}$	DAR	Poměr $p_{i60}$	Poměr $p_{i600}$	Poměr DAR
[-]	[-]	[-]	[-]	[%]	[%]	[%]
Vlhká izolace	3,076	2,345	1,726	100	100	100
Částečně vyschlá izolace	6,782	5,972	2,225	220,447	254,707	128,868

## 6 DALŠÍ PROBLÉMY OVLIVŇUJÍCÍ HODNOTY IZOLAČNÍCH ODPORŮ A POLARIZAČNÍCH INDEXŮ

### 6.1 NARUŠENÍ POLÍ MĚŘENÉHO STROJE

Dojde-li k částečnému vybití polí stroje, začnou se tyto pole znovu dobíjet a odebírat tak ze zdroje měřicího přístroje větší proud. Protože měřicí přístroje počítají izolační odpor z Ohmova zákona pomocí měřicího napětí a odebíraného proudu, způsobí nárůst odebíraného proudu pokles měřených hodnot izolačních odporů. Tento stav nebývá dlouhodobý, po ukončení narušení polí obvykle odeznívá v řádu sekund. Dojde-li výkyvu hodnot v čase, ve kterém se odečítají hodnoty pro výpočet polarizačních indexů, budou narušeny i ty.

### 6.2 VLIV MAGNETICKÉHO OBVODU

Na hodnoty izolačních odporů má jistý vliv i magnetický obvod měřeného stroje a to nezávisle na stavu izolace. Je to dáno tím, že ve chvíli, kdy přivedeme napětí na měřenou izolaci, a tato izolace se začne nabíjet, dojde i k nabíjení (magnetizaci) magnetického obvodu stroje. Tímto nabíjením magnetického obvodu je ze zdroje odebírán parazitní proud. V počáteční fázi měření, kdy je měřicím přístrojem omezován proud, který přístroj dodává (zkratový proud přístroje) dochází díky parazitnímu odběru proudu k zpomalení nabíjení izolace a ovlivní naměřené hodnoty izolačních odporů a tedy i polarizačních indexů. Projeví se nejen mohutnost magnetického obvodu, ale i kvalita plechů, případně i poruchy v magnetickém obvodu stroje.



### **6.3 PROBLEMATIKA POČTU BODŮ NA NAMĚŘENÉ ABSORPČNÍ CHARAKTERISTICE**

Velkým problémem, s kterým se v současné době můžeme setkat je to, že při měřeních na strojích se provádí příliš malé množství měření. V současnosti platná norma ČSN 35 0010 [7] předpokládá měření izolačních odporů v časech 15s, 30s, 45s, 60s a 600s. V praxi se však často měří jen hodnoty pro časy 15s, 60s a 600s potřebné pro výpočty polarizačních indexů  $p_{i60}$  a  $p_{i600}$ . Takto naměřené hodnoty však prakticky neumožňují žádné další zpracování.

Čím více hodnot se během měření absorpční charakteristiky naměří, tím lépe jsou naměřená data dále zpracovatelná a je možné v naměřených datech odhalit (a částečně i odstranit) okamžitou odchylku od trendu naměřených dat (typicky chyba měření).

## **7 PŘÍNOSY PRÁCE**

Na základě vytvořených výstupů je možné označit za přínosy práce:

- **Rozebrání příčin napět'ové závislosti izolačního odporu u izolantů**
- **Stanovení vlivu měřícího napětí na naměřené hodnoty izolačních odporů**
- **Stanovení vlivu teploty měřené izolace na naměřené hodnoty izolačních odporů**
- **Stanovení vlivu vlhkosti měřené izolace na naměřené hodnoty izolačních odporů**
- **Stanovení vlivu měřícího napětí na vypočtené hodnoty polarizačních indexů**
- **Stanovení vlivu teploty měřené izolace na vypočtené hodnoty polarizačních indexů**
- **Stanovení vlivu vlhkosti měřené izolace na vypočtené hodnoty polarizačních indexů**

Za přínosy práce, které jsou vlastní a původní, můžeme označit :

- **Rozebrání příčin vlivu velikosti proudu dodávaného měřícím přístrojem na naměřený izolační odpor**
- **Stanovení vlivu proudu dodávaného měřícím přístrojem na naměřené hodnoty izolačních odporů**
- **Stanovení vlivu proudu dodávaného měřícím přístrojem na vypočtené hodnoty polarizačních indexů**
- **Stanovení vlivu odchylky nastavení měřícího napětí měřičem na naměřené hodnoty izolační odpory**

- Stanovení vlivu odchylky nastavení měřicího napětí měřičem na vypočtené hodnoty polarizačních indexů
- Určení vlivu narušení polí měřeného objektu na naměřené hodnoty izolačních odporů
- Návrh užívání charakteristik polarizačních indexů
- Návrh užívání charakteristik směrnic tečen
- Vytvoření nové ucelené metodiky pro stanovení izolačních odporů a polarizačních indexů

## 8 ZÁVĚR

Disertační práce pojednává o poměrně úzkém, ale o to důležitějším tématu stanovení izolačních odporů a polarizačních indexů elektrických strojů točivých. Tato oblast je v odborné literatuře i normalizaci dlouhodobě zanedbávána a obvykle se pouze přebírají informace staré několik desítek let.

Pro potřeby práce bylo provedeno značné množství měření a výpočtů, což je v práci prezentováno. Z těchto měření se v práci podařilo odvodit mnoho důležitých souvislostí a z nich plynoucích pravidel pro stanovení izolačních odporů a polarizačních indexů.

Při porovnání výsledků prováděných měření v laboratořích a měření prováděných v technické praxi bylo zjištěno, že se navzájem podporují a nebo doplňují.

Práce je primárně zacílena tak, aby její výsledky byly využitelné v technické praxi, což podtrhuje i hlavní výsledek práce, tj. nová metodika stanovení izolačních odporů a polarizačních indexů. Tato metodika je v technické praxi přímo aplikovatelná.

Práce tím, že umožní přesnější stanovení izolačních odporů a polarizačních indexů, umožní přesnější a kvalitnější diagnostiku a prognostiku životnosti izolačních systémů elektrických strojů točivých a z toho plynou i předpokládané ekonomické efekty pro průmysl a energetiku.

Během řešení práce byl splněn jak hlavní cíl práce, tak i všechny cíle dílčí.

Dá se předpokládat, že vše, co bylo v práci řešeno pro elektrické stroje točivé, bude plně aplikovatelné i na elektrické stroje netočivé (transformátory, ...), jelikož však tyto nebyly předmětem práce, neproběhlo na nich ověření zjištěných faktů a nebyly zahrnuty do metodiky, která je součástí práce.

Práce se ve své podstatě snaží přispět ke zkvalitnění diagnostiky elektrických strojů točivých, což je současně i předmětem zájmu školícího pracoviště.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURA

- [1] BARTÁK, Alexandr; MRAVINÁČ, Luděk; NEUMANN, Jacek. *Diagnostika poruch izolací elektrických strojů*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1984. 254 s. 04-523-84.
- [2] HAMMER, Miloš; PAVLÍK, Josef: *Stejnoseměrné diagnostické zkoušky - výsledky měření a jejich rozbor: dílčí rozpracovaná výzkumná zpráva*, VUT Fakulta strojního inženýrství, 2009. 174 s
- [3] JIRÁK, Josef, AUTRATA, Rudolf, LIEDERMANN, Karel; ROZSÍVALOVÁ, Zdeňka; SEDLAŘÍKOVÁ, Marie. *Materiály a technická dokumentace část Materiály v elektrotechnice*, Skriptum - Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně, 127 s
- [4] *Protokol o měření 2/2010-M*, Orgrez, 2011
- [5] *Blesk*, ČEZ, zdroj není veřejně přístupný, databázový program,
- [6] MENTLÍK, Václav; PIHERA, Josef; POLANSKÝ, Radek; PROSR, Pavel; TRNKA, Pavel. *Diagnostika elektrických zařízení*. 1. vyd. Praha: BEN, 2008. 439 s. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [7] ČSN 35 0010 Točivé elektrické stroje. Zkoušky (účinnost od 1.8.1992)
- [8] ČSN 35 0013 Elektrické stroje točivé. Měření izolačního odporu a sušení elektrických strojů točivých (účinnost od 1.7.1972, zrušena 1.8.1992)
- [9] *Protokol o měření 0065-09M*, Orgrez
- [10] MENTLÍK, Václav., *Dielektrické prvky a systémy*. Praha: BEN - technická literatura, 2006. 240 s, ISBN 80-7300-189-6
- [11] ARTBAUER, Ján, ŠEDOVIČ, Juraj, ADAMEC, Vladimír., *Izolanty a izolácie*, Nakladateľstvo ALFA, Bratislava, 1969
- [12] HAMMER, Miloš, *Metody umělé inteligence v diagnostice elektrických strojů*, Praha: BEN - technická literatura, 2009. 400 s, ISBN 978-80-7300-231-2
- [13] IEEE Std. 43-2000 Recommended Practice for Testing insulation Resistance of Rotating Machinery
- [14] POLIAK, Ján: *Prognostická diagnostika neuronovou sítí*, Diagnostika 07, pp.74-77, ISBN 978-80-7043-557-1, (2007), Západočeská univerzita v Plzni, článek ve sborníku, akce: Diagnostika '07, Nečtiny - Plzeň, 11.09.2007-13.09.2007
- [15] KOCMAN, Vladimír., *Fyzika a technologie elektrotechnických materiálů Izolanty A*, Praha: SNTL, 1971. 526 s

# ŽIVOTOPIS

## Osobní data:

**Jméno, Příjmení:** Ing. Josef Pavlík

**Bydliště:** Návrší 194, 595 01 Velká Bíteš

**Telefon:** +420 732 931 370

**E-Mail:** pavlik.jo@fme.vutbr.cz

**Datum narození:** 17.3.1982

## Vzdělání:

09/1997 – 06/2001	Střední průmyslová škola elektrotechnická, Brno, Kounicova 16
09/2001 – 06/2006	VUT v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Obor: Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika Studium zakončeno s titulem inženýr (Ing.) Téma diplomové práce: Měření elektrické energie v sítích s obecně deformovaným napájecím napětím
07/2006 – dosud	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně Doktorské studium Téma: Vybrané problémy z diagnostiky izolačních systémů točivých elektrických strojů

## Praxe:

2008	technicko hospodářský pracovník, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky, Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně
2008– dosud	asistent, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky, Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně

**Jazykové znalosti:** německý jazyk

## Další znalosti:

Word, Exel, Power Point, Autocad, atd.

## VLASTNÍ PUBLIKACE

- [1] PAVLÍK, J.: Effect of measuring instruments on measurements of insulation resistance and polarization index rated for high-voltage rotating machines, MM Science Journal, ISSN 1803-1269, MM publishing, s.r.o. (V tisku)
- [2] PAVLÍK, J.: Závislost izolačního odporu a polarizačních indexů na teplotě u velkých točivých elektrických strojů, Mezinárodní konference učitelů elektrotechniky SEKEL 2011, ISBN 978-80-248-2451-2, Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2011, článek ve sborníku
- [3] PAVLÍK, J.: Závislost polarizačních indexů na vnějších vlivech měření, konference VYBRANÉ PROBLEMY ELEKTRICKÝCH STROJŮ A POHONU 2011, ISBN 978-80-214-4326-6, VUT v Brně, 2011, článek ve sborníku
- [4] PAVLÍK, J.: Diagnostika točivých elektrických strojů - závislost izolačních odporů na proudě dodávaném měřícím přístrojem, 33. mezinárodní konference TD 2010 - DIAGON 2010, pp.21-26, ISBN 978-80-7318-940-2, (2010), Academia centrum UTB, článek ve sborníku
- [5] HAMMER, M.; PAVLÍK, J.: Harmonická analýza výstupních napětí vybraných generátorů, VUT Fakulta strojního inženýrství
- [6] PAVLÍK, J.: Vybrané problémy z měření izolačního odporu točivých elektrických strojů, Mezinárodní konference učitelů elektrotechniky SEKEL 2010, pp.134-137, ISBN 978-80-7372-640-9, (2010), Technická univerzita v Liberci, článek ve sborníku
- [7] PAVLÍK, J.: Výroba toroidních vzorků - technická zpráva, VUT Fakulta strojního inženýrství
- [8] LATINA, P.; HAMMER, M.; PAVLÍK, J.: Diagnostika stavu vysokonapěťových točivých strojů s využitím neuronových sítí, Mezinárodní konference učitelů elektrotechniky SEKEL 2009, pp.132-134, ISBN 978-80-214-3934-4, (2009), Vysoké učení technické v Brně, článek ve sborníku
- [9] LATINA, P.; PAVLÍK, J.; HAMMER, M.: Neural networks: Off-Line Diagnostic Tools of High-Voltage Electric Machines, Recent Advances in mechatronics 2008-2009, pp.133-137, ISBN 978-3-642-05021-3, (2009), Springer Berlin Heidelberg
- [10] HAMMER, M.; PAVLÍK, J.: Stejnoseměrné diagnostické zkoušky - výsledky měření a jejich rozbor: dílčí rozpracovaná výzkumná zpráva, VUT Fakulta strojního inženýrství
- [11] HAMMER, M.; PAVLÍK, J.: Vliv způsobu napájení na výsledky zkoušek. Výzkumná zpráva, VUT Fakulta strojního inženýrství
- [12] PAVLÍK, J.: Kamerové systémy v diagnostice točivých elektrických strojů, Technická diagnostika, Vol.XVII, (2008), No.z1/2008, pp.35-35, ISSN 1210-311X, VSB-TU

## PRODUKTY

- [1] HAMMER, M.; KOLČABA, J.; LATINA, P.; ŠIMKOVÁ, M.; TOMAN, J.; PAVLÍK, J., *Modul výpočtu izolačního odporu*. 2006.
- [2] HAMMER, M.; PAVLÍK, J.; *Stanoviště pro stejnosměrné diagnostické zkoušky*, projekt MPO ČR FI-IM5/173, funkční vzorek, 2009
- [3] HAMMER, M.; PAVLÍK, J.; *Stanoviště pro vybrané střídavé diagnostické zkoušky*, projekt MPO ČR FI-IM5/173, funkční vzorek, 2010
- [4] SYNEK, M.; PAVLÍK, J.; SINGULE, V.; *Přípravek pro dynamometrická měření zařízení velmi malých průměrů*, projekt MSM0021630518, funkční vzorek, 2010

## ABSTRACT

This dissertation thesis deals with the measurement of insulation resistance for rotating electrical machines and polarization indices calculated from them.

The first part contains a short theoretical introduction, methods of measurement and basic formulas for calculations.

The second part discusses the results obtained in laboratory measurements in both the model and the real coil of high voltage machine. There are also elucidated some of the principles and causes of some phenomena with which the measurement of insulation resistance is encountered.

The third part deals with the results of measurements on real machines. There are mainly discussed the dependences of insulation resistance and polarization index on the influences that occur in measurements such as temperature measured insulation, moisture in the insulation, but also the influence of measuring instruments on the measured values. It is also expressed how much these factors affect the measurement results. In addition, this part deals with some other influences that have a negative affect on the measurement of insulation resistance.

There is processed a new methodology for measuring insulation resistance in the fourth part of this thesis. The need to develop a methodology of measuring is based on the needs of engineering practice, where is considerable inconsistency of measurement in the present time. Measurement, and often performed on the same machine, are not nowadays often comparable, because measurements are not met even the basic rules resulting from the findings of research and development, which were discovered in the last few decades. Measurement of insulation resistance in our nowadays methodology stagnated on the level of the seventies of 20th century. For this reason, we have developed a new methodology of measurement that takes into account all significant influences affecting the measurement. The purpose of the methodology is to ensure full repeatability and comparability of measurements not only on the same machine but on machines of the same type, in optimal cases, the machines of different types.

There are the chapters "The objectives of the work" and "Conclusion" the part of the work. A very important chapter is "The contribution of thesis", which summarizes the original results of this work and results, the use of which is expected in engineering practice.