



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A
ROBOTIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND
ROBOTICS

VYBRANÉ PROBLÉMY Z DIAGNOSTIKY IZOLAČNÍCH SYSTÉMŮ TOČIVÝCH ELEKTRICKÝCH STROJŮ

SELECTED PROBLEMS OF DIAGNOSIS OF INSULATION SYSTEMS FOR
ROTATING ELECTRICAL MACHINES

DOKTORSKÁ PRÁCE
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ing. JOSEF PAVLÍK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. MILOŠ HAMMER, CSc.

BRNO 2011

Abstrakt:

Disertační práce se zabývá měřením izolačních odporů na točivých elektrických strojích a polarizačními indexy z nich vypočtenými.

První část obsahuje krátký teoretický úvod do problematiky, metody měření a základní vzorce pro výpočty.

Druhá část rozebírá výsledky dosažené při měření v laboratoři, a to jak na modelu, tak na reálné cívce z vysokonapěťového stroje. Jsou zde také objasněny některé principy a příčiny některých jevů, se kterými se při měřeních izolačních odporů setkáváme.

Třetí část se zabývá výsledky měření na reálných strojích. Jsou zde především rozebírány závislosti izolačních odporů a polarizačních indexů na vlivech, které se vyskytují při měřeních, jako jsou teplota měřené izolace, vlhkost v izolaci, ale i vlivem měřících přístrojů na naměřené hodnoty. Je zde také vyjádřeno, jak výrazně tyto vlivy ovlivňují výsledky měření. Dále tato část pojednává o některých dalších vlivech, které nepříznivě ovlivňují měření izolačních odporů.

Ve čtvrté části je zpracována nová metodika měření izolačních odporů. Potřeba vypracovat takovou metodiku vychází z potřeb technické praxe, kde se v současné době setkáváme se značnou nekonzistentností měření. Měření, a to často i prováděná na témže stroji, nejsou v dnešní době často porovnatelná, protože při měřeních nejsou dodržována ani základní pravidla vyplývající ze zjištění výzkumu a vývoje, která byla objevena v posledních několika desetiletích. Měření izolačních odporů u nás metodicky ustrnulo v sedmdesátých letech 20. století. Z toho důvodu byla vypracována nová metodika měření, která zohledňuje všechny významné vlivy působící během měření. Účelem metodiky je zajistit plnou reprodukovatelnost měření a umožnit porovnatelnost měření nejen na témže stroji, ale i na strojích stejného typu, v optimálních případech i na strojích odlišných typů.

Součástí práce jsou i kapitoly „Cíle práce“, „Závěr“. Velmi důležitou kapitolou je také „Přínos práce“, v níž jsou shrnuty původní výsledky práce a dále výsledky, jejichž využití se předpokládá v technické praxi.

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.

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

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

Bibliografická citace VŠKP:

PAVLÍK, J., *Vybrané problémy z diagnostiky izolačních systémů točivých elektrických strojů*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2011. 148 s. Vedoucí disertační práce doc. Ing. Miloš Hammer, CSc.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem tuto disertační práci vypracoval sám, po konzultacích s vedoucím disertační práce a za pomoci literatury, dokumentů a zdrojů, které jsou uvedeny v závěru práce.

V Brně dne:

Podpis:

Poděkování:

Tímto bych chtěl poděkovat svému školiteli a vedoucímu disertační práce doc. Ing. Miloši Hammerovi, CSc. za veškerou podporu, pomoc a cenné rady, které mi při mé práci poskytl. Dále bych chtěl poděkovat Ministerstvu průmyslu a obchodu a Grantové agentuře České republiky, v rámci jehož projektů FI—IM5/173 „Metodika stanovení životnosti vysokonapěťových izolačních systémů točivých strojů“ a GA102/08/1118 – „Inteligentní diagnostika elektrických strojů“ jsem svou disertační práci zpracoval, stejně jako všem organizacím a osobám, které se na těchto projektech podíleli.

Obsah:

1 ÚVOD.....	15
CÍLE PRÁCE	16
2 ÚVOD DO PROBLEMATIKY.....	17
2.1 STAV ŘEŠENÍ PROBLEMATIKY V ČR.....	17
2.2 STAV ŘEŠENÍ PROBLEMATIKY VE SVĚTĚ.....	18
2.3 FYZIKÁLNÍ PODSTATA IZOLAČNÍHO ODPORU.....	18
3 METODY MĚŘENÍ IZOLAČNÍHO ODPORU, SOUVISEJÍCÍCH CHARAKTERISTIK A VÝPOČTY POUŽÍVANÉ V ČR	21
3.1 MĚŘENÍ IZOLAČNÍHO ODPORU A VÝPOČET POLARIZAČNÍCH INDEXŮ.....	21
3.1.1 MĚŘENÍ IZOLAČNÍHO ODPORU NA VINUTÍ STATORU	22
3.1.2 MĚŘENÍ IZOLAČNÍHO ODPORU NA VINUTÍ ROTORU	23
3.2 MĚŘENÍ ZÁVISLOSTI IZOLAČNÍHO ODPORU NA STEJNOSMĚRNÉM NAPĚTÍ	24
4 MĚŘENÍ V LABORATORNÍCH PODMÍNKÁCH.....	26
4.1 MĚŘENÍ NA VZORKU (CÍVCE).....	26
4.2 MĚŘENÍ NA MODELU (RC ČLENU)	30
4.2.1 MĚŘENÍ NA MODELU (RC ČLENU) – ZÁVISLOST NA PARALELNÍM ODPORU	31
4.2.2 MĚŘENÍ NA MODELU (RC ČLENU) – ZÁVISLOST NA NAPĚTÍ.....	34
4.2.3 K JEDNOTLIVÝM ZÁVĚRŮM: NAPĚŤOVÁ ZÁVISLOST IZOLAČNÍHO ODPORU	37
4.2.4 K JEDNOTLIVÝM ZÁVĚRŮM: ZÁVISLOST ODPORU I NA PROUDU DODÁVANÉHO MĚŘÍCÍM PŘÍSTROJEM	39
4.2.5 K JEDNOTLIVÝM ZÁVĚRŮM: NAPĚŤOVÁ ZÁVISLOST POLARIZAČNÍHO INDEXU	42
4.3 VLIV VLHKOSTI NA IZOLAČNÍ ODPOR	45
4.3.1 VLIV DIELEKTRICKÉHO OHŘEVU PŘI MĚŘENÍ IZOLAČNÍHO ODPORU NA IZOLACI ..	45
4.3.2 URČENÍ VLHKOSTI IZOLACE	46
5 MĚŘENÍ NA STROJÍCH	47
5.1 MĚŘENÍ NA STROJÍCH – ZÁVISLOST NA NAPĚTÍ.....	47
5.1.1 PŘÍMÁ ZÁVISLOST IZOLAČNÍHO ODPORU NA MĚŘÍCÍM NAPĚTÍ	48
5.1.2 MĚŘENÍ NA STROJÍCH – CHYBA VZNIKLÁ NEPŘESNÝM NASTAVENÍ MĚŘÍCÍHO NAPĚTÍ	50
5.2 MĚŘENÍ NA STROJÍCH – ZÁVISLOST NAMĚŘENÉHO IZOLAČNÍHO ODPORU NA RYCHLOSTI NABÍJENÍ IZOLACE.....	51
5.2.1 ZÁVISLOST NAMĚŘENÝCH IZOLAČNÍCH ODPORŮ NA RYCHLOSTI NABÍJENÍ – VLIV NAPĚTÍ	52
5.2.2 ZÁVISLOST NAMĚŘENÝCH IZOLAČNÍCH ODPORŮ NA ZKRATOVÉM PROUDU MĚŘÍCÍHO PŘÍSTROJE	53
5.2.3 VLIV RYCHLOSTI NABÍJENÍ NA ZKRATOVÉM PROUDU PŘÍSTROJE – PROBLEMATIKA NEPROTNUTÍ POČÁTKU SOUŘADNIC	54
5.3 MĚŘENÍ NA STROJÍCH – VLIV TEPLOTY MĚŘENÉ IZOLACE	62
5.3.1 URČENÍ TEPLOTNÍCH PARAMETRŮ MĚŘENÍ IZOLACE	63
5.3.2 ZÁVISLOST NAMĚŘENÝCH IZOLAČNÍCH ODPORŮ NA TEPLOTĚ IZOLACE	64

5.4 MĚŘENÍ NA STROJÍCH – VLIV PŘÍTOMNOSTI VLHKOSTI A ROZPOUŠTĚDEL V IZOLACI	67
5.4.1 URČENÍ MNOŽSTVÍ VLHKOSTI V IZOLACI	67
5.4.2 URČENÍ MNOŽSTVÍ ROZPOUŠTĚDEL V IZOLACI	68
5.4.3 VLIV VLHKOSTI A ROZPOUŠTĚDEL V MĚŘENÉ IZOLACI NA NAMĚŘENÉ HODNOTY IZOLAČNÍCH ODPORŮ	68
5.5 MĚŘENÍ NA STROJÍCH – ZÁVISLOSTI POLARIZAČNÍHO INDEXU	70
5.5.1 PŘÍMÁ ZÁVISLOST NA NAPĚTÍ	71
5.5.2 ZÁVISLOST NA RYCHLOSTI NABÍJENÍ IZOLACE	71
5.5.3 CHYBA ZPŮSOBENÁ NEPŘESNÝM NASTAVENÍ MĚŘÍČÍHO NAPĚTÍ	78
5.5.4 CELKOVÁ ZÁVISLOST POLARIZAČNÍCH INDEXŮ NA NAPĚTÍ	80
5.5.5 ZÁVISLOST POLARIZAČNÍCH INDEXŮ NA TEPLOTĚ MĚŘENÉ IZOLACE	81
5.5.6 ZÁVISLOST POLARIZAČNÍCH INDEXŮ NA MNOŽSTVÍ VLHKOSTI A ROZPOUŠTĚDEL OBSAŽENÝCH V MĚŘENÉ IZOLACI.....	82
5.5.7 ZHODNOCENÍ ZÁVISLOSTÍ POLARIZAČNÍCH INDEXŮ	84
5.5.8 NÁVRH NOVÉHO ZPŮSOBU PRÁCE S POLARIZAČNÍMI INDEXY	85
5.6 MOŽNOST HODNOCENÍ NAMĚŘENÉ ABSORPČNÍ CHARAKTERISTIKY POMOCÍ SMĚRNIC TEČEN	90
5.7 MĚŘENÍ NA STROJÍCH – VLIV PŘESNOSTI PŘÍSTROJŮ	91
5.8 MĚŘENÍ NA STROJÍCH – DALŠÍ PROBLÉMY, KTERÉ BYLY PŘI MĚŘENÍCH ZJIŠTĚNY ..	93
5.8.1 NARUŠENÍ POLÍ MĚŘENÉHO STROJE	93
5.8.2 MĚŘENÍ NA ZCELA NOVÝCH, NEBO ČERSTVĚ PŘEVINUTÝCH STROJÍCH.....	95
5.8.3 VLIV MAGNETICKÉHO OBVODU	96
5.9 ZMĚNA IZOLAČNÍHO ODPORU V ZÁVISLOSTI NA STÁŘÍ STROJE	99
5.9.1 HODNOTY IZOLAČNÍCH ODPORŮ NAMĚŘENÉ NA REÁLNÝCH STROJÍCH.....	99
5.9.2 HODNOTY POLARIZAČNÍCH INDEXŮ VYPOČTENÉ PRO REÁLNÉ STROJE.....	102
5.9.3 VZRŮST IZOLAČNÍHO ODPORU U NOVÉHO STROJE.....	104
5.9.4 VZRŮST IZOLAČNÍHO ODPORU U STROJE ÚPLNĚ, NEBO ČÁSTEČNĚ PŘEVINUTÉHO A U OPRAV ČÁSTÍ IZOLACÍ.....	105
5.9.5 VZRŮST IZOLAČNÍHO ODPORU BEZ ZÁSAHU DO VLASTNÍHO IZOLAČNÍHO SYSTÉMU STROJE	105
5.10 PROBLEMATIKA Vlivu DIELEKTRICKÉHO OHŘEVU PŘI MĚŘENÍ IZOLAČNÍHO ODPORU.....	108
5.11 PROBLEMATIKA POČTU BODŮ NA NAMĚŘENÉ ABSORPČNÍ CHARAKTERISTICE	109
6 NOVÁ METODIKA PRO STANOVENÍ IZOLAČNÍCH ODPORŮ A POLARIZAČNÍCH INDEXŮ U ELEKTRICKÝCH STROJŮ TOČIVÝCH	113
6.1 PŘEDMLUVA K METODICE	113
6.2 ZÁKLADNÍ PRAVIDLA	113
6.3 VYBRANÉ TERMÍNY A DEFINICE	114
6.4 MĚŘÍCÍ PLÁN	115
6.5 PODMÍNKY MĚŘENÍ	116
6.5.1 BEZPEČNOSTNÍ PRAVIDLA PŘED, BĚHEM A PO MĚŘENÍ	116
6.5.2 ZAPOJENÍ APARATURY	116
6.5.3 NAPĚŤOVÁ HLADINA PŘI MĚŘENÍ STROJE	117
6.5.4 TEPLOTA MĚŘENÍ STROJE.....	118
6.5.5 POŽADAVKY NA MĚŘIČE IZOLAČNÍCH ODPORŮ	119
6.5.6 ODSTÍNĚNÍ A ODRUŠENÍ BĚHEM MĚŘENÍ	121

6.5.7 STAV STROJE BĚHEM MĚŘENÍ	122
6.5.8 KOMPLETNÍ POSTUP MĚŘENÍ	122
6.5.9 POUŽITÉ NORMY A PŘEDPISY	123
6.5.10 REVIZE MĚŘÍČÍHO PLÁNU	123
6.5.11 ODPOVĚDNÉ OSOBY	123
6.5.12 DALŠÍ POKYNY PRO MĚŘENÍ	124
6.6 PLÁN ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT	124
6.6.1 PRAVIDLA PRO VYŘAZENÍ CHYBNÝCH DAT	125
6.6.2 PRAVIDLA PRO POSLOUPNOST PŘEPOČTŮ	125
6.6.3 POSTUP PRO PŘEPOČET IZOLAČNÍCH ODPORŮ PODLE TEPLoty	126
6.6.4 POSTUP PRO PŘEPOČET IZOLAČNÍCH ODPORŮ PODLE NAPĚTÍ	127
6.6.5 POSTUP PRO PŘEPOČET IZOLAČNÍCH ODPORŮ PODLE PROUDU DODÁVANÉHO MĚŘÍČÍM PŘÍSTROJEM	129
6.6.6 POSTUP PRO VÝPOČTY POLARIZAČNÍCH INDEXŮ	131
6.6.7 POSTUP PRO VÝPOČET CHARAKTERISTIK POLARIZAČNÍCH INDEXŮ	132
6.6.8 PRAVIDLA PRO VÝPOČET CHARAKTERISTIK SMĚRNIC TEČEN	134
6.6.9 PRAVIDLA PRO PROVÁDĚNÍ MATEMATICKÝCH VÝPOČTŮ	135
6.6.10 PRAVIDLA PRO NAKLÁDÁNÍ S DATY	135
6.6.11 REVIZE PLÁNU ZPRACOVÁNÍ DAT	135
6.6.12 PODKLADY Z MĚŘENÍ	136
6.6.13 PROTOKOL O MĚŘENÍ	136
6.6.14 ODPOVĚDNÉ OSOBY	136
6.6.15 DALŠÍ POKYNY K ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT	137
7 PŘÍNOS PRÁCE	138
7.1 PŘÍNOS PRO ROZVOJ OBORU	139
7.2 PŘÍNOS PRO ROZVOJ VĚDY	140
8 ZÁVĚR	141
POUŽITÁ LITERATURA	142
VLASTNÍ PUBLIKAČNÍ ČINNOST	145
VLASTNÍ TECHNICKÉ REALIZACE	147
OSTATNÍ ČINNOSTI	148
PŘÍLOHA A DLOUHÉ STRÁNĚ - STATOR PONYMOTORU	149
PŘÍLOHA B DLOUHÉ STRÁNĚ - STATOR BUDIČE	150
PŘÍLOHA C MOTOR V.Č. 154 317	151
PŘÍLOHA D MOTOR V.Č. 173 098	152
PŘÍLOHA E MOTOR V.Č. 2130 467	153
PŘÍLOHA F MOTOR V.Č. FQ 174 232	154
PŘÍLOHA G HYDROGENERÁTOR V.Č. 33784	155
PŘÍLOHA H MĚŘÍČÍ PŘÍSTROJ MEGGER S1-5005	156

PŘÍLOHA I	MĚŘÍCÍ PŘÍSTROJ PU 311	157
PŘÍLOHA J	MĚŘÍCÍ PŘÍSTROJ MEGGER BM11D	158
PŘÍLOHA K	MĚŘÍCÍ PŘÍSTROJ METREL TERAOHM 5KV	159
PŘÍLOHA L	ABSORPČNÍ CHARAKTERISTIKA MOTORU V.Č. 173 098	160
PŘÍLOHA M	ABSORPČNÍ CHARAKTERISTIKA MOTORU V.Č. 173 098	161
PŘÍLOHA N	NAPĚŤOVÁ ZÁVISLOST IZOL. ODPORU GENERÁTORU V.Č. 33784162	
PŘÍLOHA O	ZÁVISLOST ABSORPČNÍ CHARAKTERISTIKY PONYMOTORU V.Č. 04356 163	
PŘÍLOHA P	PŘEPOČET ABSORPČNÍ CHARAKTERISTIKY PONYMOTORU V.Č. 04356 164	
PŘÍLOHA Q	ABSORPČNÍ CHARAKTERISTIKY MOTORU V.Č. 2130 467.....	166
PŘÍLOHA R	TEPLOTNÍ ZÁVISLOSTI GENERÁTORU V.Č. 33784	168
PŘÍLOHA S	VLIV VLHKOSTI NA IZOLAČNÍ ODPOR U MOTORU V.Č. 154 317 169	
PŘÍLOHA T	NAPĚŤOVÁ ZÁVISLOST POLARIZAČNÍCH INDEXŮ PONYMOTORU V.Č. 04356	170
PŘÍLOHA U	CHARAKTERISTIKY POLARIZAČNÍCH INDEXŮ MOTORU V.Č. 154 317	171
PŘÍLOHA V	CHARAKTERISTIKY SMĚRNIC TEČEN MOTORU V.Č. 154 317	173
PŘÍLOHA W	ABSORPČNÍ CHARAKTERISTIKY MOTORU V.Č. FQ 174 232	175
PŘÍLOHA X	CHARAKTERISTIKY STROJE EDA TG3.....	177
PŘÍLOHA Y	CHARAKTERISTIKY STROJE EL1 TG2	178
PŘÍLOHA Z	ABSORPČNÍ CHARAKTERISTIKA GENERÁTORU V.Č. 33784	179
PŘÍLOHA AA	ABSORPČNÍ CHARAKTERISTIKY MOTORU V.Č. 154 317	180

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2-1 Složky proudu odebíraného ze zdroje	19
Obr. 2-2 Absorpční charakteristika	20
Obr. 3-1 Schéma zapojení při měření izolačního odporu statoru a) s uzlem nerozebíratelným b) s uzlem rozebíratelným	23
Obr. 3-2 Schéma zapojení při měření izolačního odporu rotoru	24
Obr. 3-3 Schéma zapojení při měření závislosti izolačního odporu na stejnosměrném napětí	25
Obr. 4-1 Reálná cívka [2].....	26
Obr. 4-2 Provedení elektrod na reálné cívce.....	27
Obr. 4-3 Funkční vzorek se zavěšenou cívkou	27
Obr. 4-4 Dílčí sestava rezistorů.....	31
Obr. 4-5 Sestava kondenzátorů.....	31
Obr. 4-6 Naměřené a vypočtené hodnoty izolačního odporu RC členu	34
Obr. 4-7 Graf závislosti polarizačního indexu na napětí (z Tab. 4-7).....	44
Obr. 4-8 Graf závislosti polarizačního indexu na napětí pouze pro p_{i600} (z Tab. 4-7)...	44
Obr. 5-1 Hodnoty naměřené přístrojem Metrel Teraohm 5kV na motoru v.č. 173 098.	48
Obr. 5-2 Hodnoty naměřené přístrojem Megger BM11D na statoru budiče v.č. 034237 při měřicím napětí 500V	49
Obr. 5-3 Hodnoty napěťové závislosti izolačního odporu přepočtené z proudu, měřeno přístrojem PTS-75F5/FB, HIGH VOLTAGE Inc. na synchronním hydrogenerátoru v.č. 33784.....	50
Obr. 5-4 Hodnoty naměřené přístrojem Megger S1-5005 na ponymotoru v.č. 04356 – fáze U	52
Obr. 5-5 Hodnoty naměřené na ponymotoru v.č. 04356 – fáze U - přístroji Megger S1-5005 ($I_k=5mA$) a Megger BM11D ($I_k=2mA$) při napětí 500V.....	53
Obr. 5-6 Hodnoty naměřené a dopočtené pro ponymotor v.č. 04356 – fáze U - přístroji Megger S1-5005 ($I_k=5mA$) a Megger BM11D ($I_k=2mA$) při napětí 500V.....	54
Obr. 5-7 Simulace průběhů napětí na izolaci v případě kdy měřicí přístroj provádí, nebo neprovádí omezování	55
Obr. 5-8 Simulace průběhů proudu vtékajícího do izolace v případě, kdy měřicí přístroj provádí nebo neprovádí omezování	56
Obr. 5-9 Simulace izolačního odporu změřeného na izolaci v případě, kdy měřicí přístroj provádí nebo neprovádí omezování	56

Obr. 5-10 Hodnoty přepočtené na teoretický, neomezený nabíjecí proud u ponymotoru v.č. 04356 při napětí 500V	58
Obr. 5-11 Hodnoty naměřené na motoru v.č. 2130 467 při napětí 1000V přístroji Megger S1-5005 ($I_k=5\text{mA}$) a Metrel Teraohm 5kV ($I_k=1,4\text{mA}$)	60
Obr. 5-12 Hodnoty přepočtené na teoretický, neomezený nabíjecí proud u motoru v.č. 2130 467 při napětí 1000V.....	61
Obr. 5-13 Závislost jednotlivých izolačních odporů na teplotě měřené izolace u synchronního generátoru v.č. 33784 při napětí 5kV – fáze U.....	64
Obr. 5-14 Závislost izolačního odpor R_{i15} na teplotě měřené izolace u synchronního hydrogenerátoru v.č. 33784 při napětí 5kV – fáze U	65
Obr. 5-15 Změna absorpčních charakteristik vzhledem k teplotě měřené izolace u synchronního hydrogenerátoru v.č. 33784 při napětí 5kV – fáze U	66
Obr. 5-16 Izolační odpory naměřené na izolaci motoru v.č. 154 317 při napětí 500V, druhé měření dva dny po prvním.....	69
Obr. 5-17 Hodnoty naměřené na motoru v.č. 2130 467 přístroji Megger S1-5005 ($I_k=5\text{mA}$) a Metrel Teraohm 5kV ($I_k=1,4\text{mA}$) při napětí 1000V.....	72
Obr. 5-18 Závislost polarizačních indexů na napětí u ponymotoru v.č. 04356 – fáze W (Megger S1-5005) – charakteristiky přímo z měřených hodnot.....	77
Obr. 5-19 Závislost polarizačních indexů na napětí u ponymotoru v.č. 04356 – fáze W (Megger S1-5005) – charakteristiky ze závislostí izolačních odporů na napětí	78
Obr. 5-20 Závislost polarizačních indexů na teplotě měřené izolace u synchronního hydrogenerátoru v.č. 33784 při napětí 5kV – fáze U – charakteristiky přímo z měřených hodnot.....	81
Obr. 5-21 Izolační odpory po proložení polynomem 4. řádu pro motor v.č. 154 317 při napětí 500V, druhé měření dva dny po prvním	83
Obr. 5-22 Charakteristika polarizačních indexů $p_{i(60/x)}$ pro motor v.č. 154 317 při napětí 500V, vlhká a částečně vysušená izolace	87
Obr. 5-23 Charakteristika polarizačních indexů $p_{i(600/x)}$ pro motor v.č. 154 317 při napětí 500V, vlhká a částečně vysušená izolace	88
Obr. 5-24 Charakteristika polarizačních indexů $p_{i(t_2/t_2-15s)}$ pro motor v.č. 154 317 při napětí 500V, vlhká a částečně vysušená izolace	89
Obr. 5-25 Charakteristika směrnic tečen pro motor v.č. 154 317 při napětí 500V, vlhká a částečně vysušená izolace	91
Obr. 5-26 Hodnoty naměřené na pony motoru v.č. 04356 - přístroje Megger S1-5005 a Megger BM11D při napětí 500V (fáze V) včetně maximálních přípustných chyb..	92
Obr. 5-27 Hodnoty naměřené na motoru v.č. FQ 174 232 přístrojem Metrel Teraohm 5kV při napětí 542V.....	94

Obr. 5-28 Hodnoty naměřené na motoru v.č. 154 317 při napětí 500V, druhé měření dva dny po prvním.....	95
Obr. 5-29 Změna izolačního odporu R15 v čase –EDA TG1 – Fáze B	100
Obr. 5-30 Změna izolačního odporu R60 v čase –EDA TG1 – Fáze B	100
Obr. 5-31 Změna izolačního odporu R15 v čase –EL1 TG2 – Fáze A	101
Obr. 5-32 Změna izolačního odporu R60 v čase –EL1 TG2 – Fáze A	102
Obr. 5-33 Změna polarizačního indexu p_{i60} v čase –EDA TG1 – Fáze B	103
Obr. 5-34 Změna polarizačního indexu p_{i60} v čase –EL1 TG2 – Fáze A.....	104
Obr. 5-35 Změna absorpčních charakteristik v závislosti na množství proložených dat u synchronního hydrogenerátoru v.č. 33784 při napětí 5kV – fáze U.....	110
Obr. 5-36 Změna absorpčních charakteristik v závislosti na množství proložených dat pro prvních 60s u synchronního hydrogenerátoru v.č. 33784 při napětí 5kV – fáze U.....	111
Obr. 5-37 Izolační odpory naměřené na izolaci motoru v.č. 154 317 při napětí 253V, porovnání proložení s naměřenými hodnotami.	112
Obr. 6-1 Typický tvar závislosti izolačního odporu na teplotě.....	127
Obr. 6-2 Typický tvar závislosti izolačního odporu na měřícím napětí.....	128
Obr. 6-3 Typický tvar absorpční charakteristiky ovlivněné omezováním proudu.....	129
Obr. 6-4 První krok úpravy absorpční charakteristiky ovlivněné omezováním proudu	130
Obr. 6-5 Porovnání přepočtené a nepřepočtené absorpční charakteristiky	131
Obr. 6-6 Příklad charakteristiky polarizačních indexů $p_{i(60/x)}$	133
Obr. 6-7 Příklad charakteristiky polarizačních indexů $p_{i(600/x)}$	133
Obr. 6-8 Příklad charakteristiky směrnice tečen.....	134

SEZNAM NEJDŮLEŽITĚJŠÍCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

E	intenzita (vnějšího) elektrického pole	(V·m ⁻¹)
J _V	vnitřní proudová hustota	(A·m ⁻²)
γ _V	vnitřní konduktivita	(S·m ⁻¹)
R	elektrický odpor	(Ω)
R _i	izolační odpor	(Ω)
U	napětí	(V)
I	elektrický proud	(A)
S	plocha protékaná proudem	(m ²)
γ _{V(0)}	vnitřní konduktivita v oblasti nezávislé na E	(S·m ⁻¹)
β, β ₁	materiálové konstanty	(m·V ⁻¹)
R _{i15}	Izolační odpor měřený po 15s od připojení napětí	(Ω)
R _{i30}	Izolační odpor měřený po 30s od připojení napětí	(Ω)
R _{i60}	Izolační odpor měřený po 60s od připojení napětí	(Ω)
R _{i600}	Izolační odpor měřený po 600s od připojení napětí	(Ω)
P _{i60}	polarizační index jednominutový	(-)
P _{i600}	polarizační index desetiminutový	(-)
DAR	dielektrický absorpční poměr	(-)

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 a to 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 pak 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 s jistou mírou pravděpodobnosti pak předpovědět jeho vývoj.

Zásadní roli pro kvalitní diagnostiku pak 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 izolačních systémech a izolacích, aby nedocházelo ke vzniku odchylek, nepřesností a chyb. Ty by totiž mohli 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).

Práce samotná 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 takto získané parametry, neboť k tomu je 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]).

CÍLE PRÁCE

Po posouzení stavu řešení problematiky měření izolačních odporů na točivých elektrických strojích a výpočtech polarizačních indexů z nich v ČR i ve světě (viz další část práce) byly stanoven hlavní cíl disertační práce takto:

Příspěvek k zlepšení diagnostiky točivých elektrických strojů

Pro potřeby toho, aby bylo hlavního cíle dosaženo, 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 měřicího 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 měřicího 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 nějaké nové postupy pro diagnostiku stavu izolace z naměřených dat**
- **Vytvořit novou metodiku pro stanovení izolačních odporů v průmyslové praxi.**

2 ÚVOD DO PROBLEMATIKY

2.1 Stav řešení problematiky v ČR

V České republice se otázce izolačních systémů točivých elektrických strojů věnuje již dlouhá léta značná pozornost. Diagnostika izolačních systémů strojů se provádí tím intenzivněji, čím výkonnější nebo důležitější daný stroj je. Byla vypracována, nebo ze zahraničí přejata celá řada měření a zkoušek pro objektivní posouzení stavu izolačních systémů točivých elektrických strojů. Pomocí těchto metod, se provádí zjištění stavu izolačních systémů točivých elektrických strojů především u elektrických generátorů velkých výkonů, ale i u velmi velkých elektrických motorů.

Samotné měření izolačních odporů však prošlo vývojem pouze, co se týká měřících přístrojů, v ostatních ohledech se celá problematika zastavila na úrovni roku 1972, kdy vstoupila v platnost norma ČSN 35 0013 [8]. Novější norma ČSN 35 0010 [7] z roku 1992 (čili již téměř 20 let stará) žádné změny nepřináší, neboť části o měření izolačních odporů a o polarizačních indexech jsou prakticky beze změn převzaty z normy ČSN 35 0013. Můžeme tedy říci, že normalizace v této oblasti ustrnula přibližně před čtyřiceti lety.

Je nutné podotknout, že zmíněná norma již delší dobu nevyhovuje potřebám moderní diagnostiky. Dalším problémem je, že norma obsahuje některé pasáže, které jsou minimálně diskutabilní (například měření izolačního odporu na studeném stroji). Velice nepříjemné je také to, že i ty části normy, o nichž víme, že jsou správné, nejsou často při měření dodržovány, což souvisí s tím, že u nás nejsou normy obecně závazné.

Co se týká odborné literatury v oblasti izolačních systémů a izolací, ta sice vychází (např. [6], [10] nebo [12]), měření izolačního odporu se však příliš nezabývá a zaměřuje se spíše na jiné dnes moderní metody. V oblasti izolačních odporů převážně přebírá již dlouhou dobu známá fakta a nesnaží se obor posunout dále.

Co se týká výzkumu v oblasti izolačních odporů, ten probíhá, nicméně je z větší části prováděn pro potřeby soukromých firem a dá se říci, že výzkum není koordinován a mnoho z výsledků zůstává předmětem různých obchodních a firemních tajemství. S tím souvisí i snaha o rozvoj dané oblasti alespoň v rámci těchto firem. Výsledkem jsou různé podnikové normy, nebo metodiky. Ty však obvykle také nejsou veřejně dostupné. Takové dokumenty používají např. ČEZ, ORGREZ, ale i jiní. Tyto dokumenty často čerpají nejen z výzkumu prováděného v ČR, ale i ze zahraničních poznatků a norem.

Obecně ale lze říci, že stav řešení problematiky měření izolačních odporů (a polarizačních indexů z nich vypočtených) není v ČR na uspokojivé úrovni. To se projevuje i tím, že výsledky měření prováděných v delším časovém horizontu, různými diagnostickými organizacemi a podobně nejsou navzájem porovnatelné. To se týká nejen různých typů strojů, ale i stejných typů strojů a mnohdy i měření na témže stroji. Výsledkem je mnohdy obecná nespokojenost s metodou jako takovou. Na základě toho

dokonce již padly návrhy vyřadit měření izolačního odporu z hlavních zkoušek na stroji (dosud byla považována za zkoušku základní) a izolační odpor považovat pouze za veličinu pomocnou (orientační).

Z tohoto hlediska je třeba konstatovat, že tato oblast diagnostiky nesměruje správným směrem. Místo vyjasnění problémů a hledání řešení dochází k bagatelizaci problému a jejich odsouvání do pozadí.

2.2 Stav řešení problematiky ve světě

Svět z hlediska diagnostiky pomocí izolačních odporů (a polarizačních indexů) můžeme rozdělit na několik oblastí.

Do první oblasti spadá především rozvojový svět. V těchto zemích obvykle normalizace prakticky neexistuje, nebo jsou používány normy cizích zemí. Izolační odpor se měří bez jakýchkoliv pravidel často na principu „Co ukáže měřicí přístroj, to platí, ať měření probíhalo jakkoliv“. Měření často nebývá příliš vypovídající o stavu stroje.

Do druhé oblasti spadají země, které nejsou zapojeny do některé z normalizačních organizací a normy si tvoří sami pouze pro vlastní potřebu. Kvalita těchto norem je však značně rozdílná, od těch značně kvalitních až po ty velmi nekvalitní. Často je však problém vtom, že měření provedená na základě těchto norem nejsou porovnatelná s měřeními provedenými v jiných zemích.

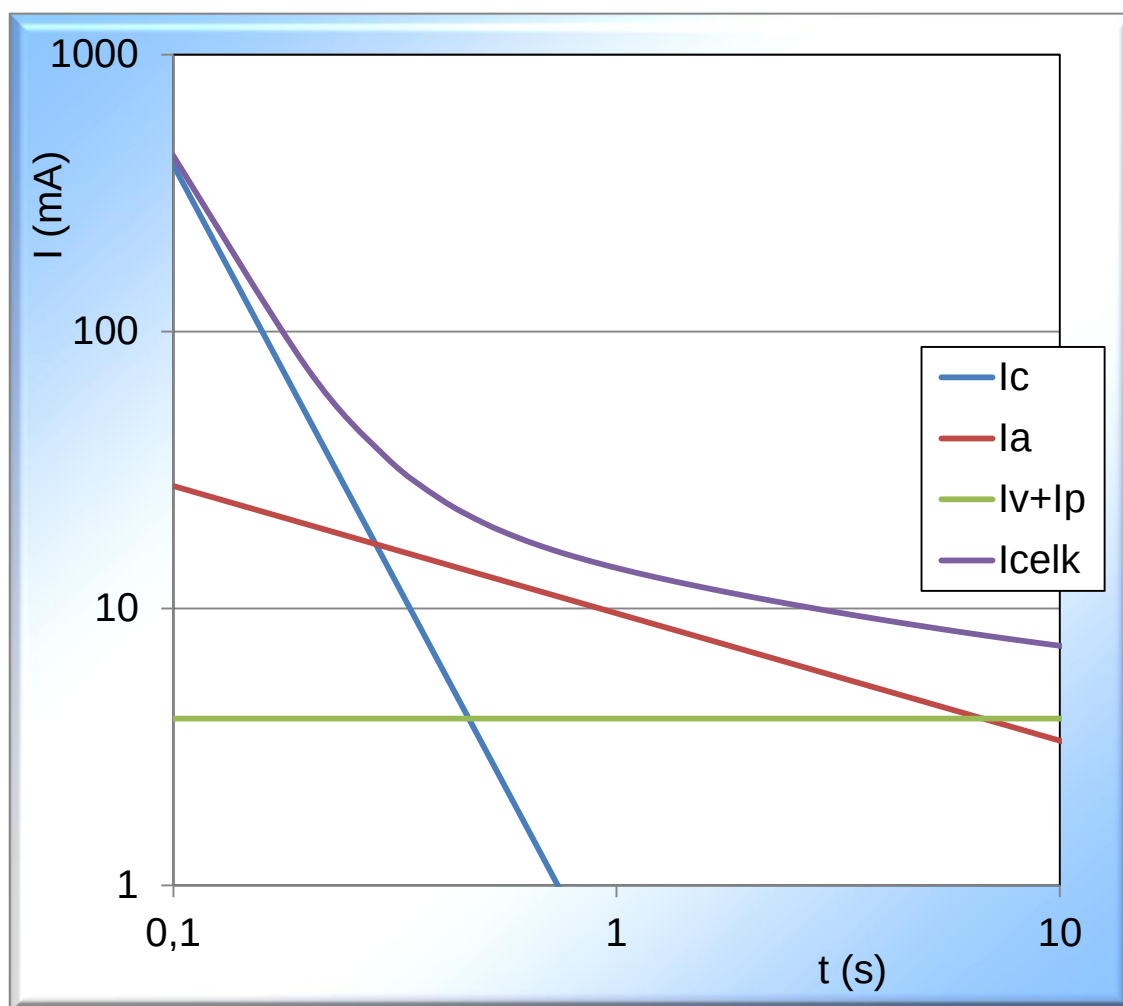
Do třetí oblasti spadá značná část Evropy, ale i jiné státy. V této oblasti se vychází ze stejných (harmonizovaných), nebo velmi podobných norem. V těchto státech probíhá měření izolačních odporů podle podobných pravidel jako v ČR. Jednotlivé země však mohou mít svá národní specifika.

Do poslední skupiny spadají země, které jsou navázány na Systém norem IEEE, především tedy USA. Zde se měření provádí podle normy IEEE Std 43-2000 [13], což je norma poměrně moderní (z roku 2000). Oproti v ČR používaným normám řeší některé problémy s měřením izolačních odporů spojených, stanoví některá pravidla pro měření a celkově tvoří lepší předpoklad pro měření porovnatelných výsledků. Ani tato norma však nevyužívá všech poznatků moderní vědy v daném oboru. Celkově se však jedná zřejmě o nejvhodnější veřejně přístupnou normu. Výsledkem je lepší úroveň měření izolačních odporů.

2.3 Fyzikální podstata izolačního odporu

Měření izolačních odporů se provádí nepřímou metodou a to pomocí měření přiloženého stejnosměrného napětí a proudu odebíraného ze zdroje tohoto napětí. Zdroj bývá obvykle součástí speciálního měřiče izolačních odporů. Z těchto hodnot (napětí a proud) je dopočítáván (měřičem) izolační odpor pomocí Ohmova zákona. Proud

odebíraný ze zdroje však nemá pouze jednu složku. To je možné vidět na následujícím grafu.



Obr. 2-1 Složky proudu odebíraného ze zdroje

Proud odebíraný ze zdroje se skládá z následujících složek:

i_c – Kapacitní proud – Jedná se o proud, kterým se nabíjí kapacita měřené izolace. Tento proud je závislý na vnitřním odporu napájecího zdroje a na geometrické kapacitě měřené izolace. Z počátku mívá poměrně značnou velikost, ale obvykle velmi rychle zaniká.

i_a – Absorpční proud – Někdy také nazývaný proud polarizační. Je proud způsobený polarizačními pochody v dielektriku izolace. Proud pozvolna klesá od počáteční hodnoty k nule. Uvádí se, že tento proud může postupně klesat až několik hodin, nebo dokonce i desítek hodin po připojení napájecího napětí. Největší vliv na jeho hodnotu má obvykle stav, kvalita a typ použitého pojiva izolace (viz. [10] a [13]).

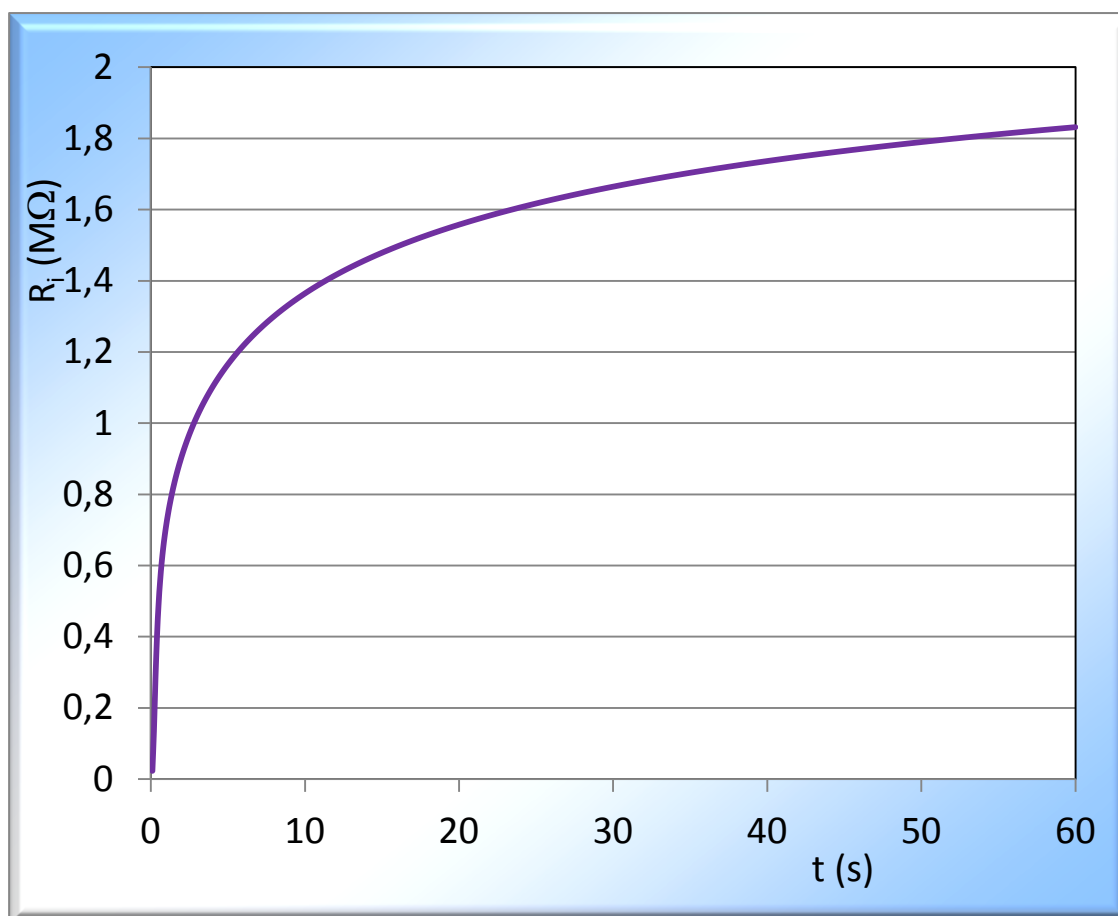
i_v – Vodivostní proud – Jedná se o proud protékající izolací (jejím průřezem). U suché a nepoškozené izolace je jeho hodnota na čase nezávislá a obvykle velmi malá. U vlhké izolace (nebo izolace obsahující rozpouštědla) je vodivostní proud závislý na čase

(obvykle poměrně rychle roste od nuly na ustálenou hodnotu) a může v závislosti na množství vlhkosti (popř. rozpouštědel) dosahovat poměrně velkých hodnot. Vodivostní proud způsobuje činné ztráty v izolaci (viz [20]).

i_p – Povrchový proud – Jedná se o proud protékající po povrchu izolace. Obvykle se jedná o proud mezi holými konci měřeného vinutí a uzemněným železem stroje nebo mezi holými konci dvou měřených vinutí. Proud je závislý na znečištění povrchu izolace, nebo na jejím povrchovém poškození (např. poškození plazivými proudy). Povrchový proud má obvykle obdobný charakter jako proud vodivostní, tj. u suché izolace je na čase nezávislý, u vlhké izolace je na čase závislý (obvykle poměrně rychle roste od nuly na ustálenou hodnotu). Tento proud roste s množstvím nečistot a vlhkosti na povrchu izolace a může dosáhnout i poměrně velkých hodnot u značně znečištěného stroje.

i_{celk} – Celkový proud – Jedná se o celkový proud odebíraný ze zdroje napájení. Za normálních okolností je roven součtu všech čtyř předcházejících proudů.

Vezmeme-li v úvahu předchozí charakteristiku pro celkový proud a dopočítáme pro ni izolační odpor při napětí 10 000V obdržíme následující absorpční charakteristiku.



Obr. 2-2 Absorpční charakteristika

3 METODY MĚŘENÍ IZOLAČNÍHO ODPORU, SOUVISEJÍCÍCH CHARAKTERISTIK A VÝPOČTY POUŽÍVANÉ V ČR

3.1 Měření izolačního odporu a výpočet polarizačních indexů

Obvykle se provádí konstantním stejnosměrným napětím a provádí se zvlášť pro statorové a zvlášť pro rotorové vinutí. Izolační odpor se však s přibývajícím časem od přiložení měřícího napětí mění – roste, což je dáno tím, že celkový proud je složen z více složek (podrobněji v předchozí kapitole). Z toho důvodu se obvykle měří hodnoty izolačního odporu pro čas 15, 60 a 600 sekund (již 40 let stará norma [7] doporučuje měřit i pro časy 30 a 45 sekund), nebo zřídka i celá časová charakteristika (velké množství bodů např. po 30 sekundách). Pro měření izolačního odporu se používají speciální měřicí přístroje s integrovaným zdrojem stejnosměrného napětí (napětí přiložené na izolace nemá překročit 50% stejnosměrného zkušebního napětí). Při měření na izolacích, u nichž je předpoklad, že jsou silně navlhle je potřeba měřící napětí výrazně snížit, neboť u nich hrozí velké riziko elektrického průrazu. Princip spočívá v tom, že napětí zdroje je přesně definováno a měří se proud, který vstupuje do izolace. Odpor se vypočte z Ohmova zákona. Izolační odpor je však závislý také na teplotě, proto by se měření mělo provádět při předem definované teplotě stroje, jinak se musí provést přepočet. Velmi významný vliv na izolační odpor má také vlhkost izolace. Existuje ale i celá řada dalších faktorů, které mohou měření izolačního odporu nepříznivě ovlivnit. Z naměřených hodnot se poté sestaví závislost izolačního odporu na čase měření (na době připojení měřícího napětí). Ta se také někdy označuje jako absorpční charakteristika (například v [7]).

Z naměřených hodnot se poté vypočte polarizační index, obvykle jednodeminutový a desetiminutový a výpočtem se podle následujících vzorců [1]:

$$p_{i60} = \frac{R_{i60}}{R_{i15}} [-; \Omega, \Omega], \quad (3.1)$$

$$p_{i600} = \frac{R_{i600}}{R_{i60}} [-; \Omega, \Omega], \quad (3.2)$$

přičemž index odporů odpovídá počtu sekund, které uplynuly od přiložení měřícího napětí na izolaci do doby jeho měření. Občas se také můžeme setkat se značením

polarizačních indexů p_{i1} a p_{i10} místo p_{i60} a p_{i600} . V prvním případě se jedná o značení minutové, v druhém případě se jedná o značení sekundové.

Pod pojem polarizační index můžeme zahrnout i dielektrický absorpční poměr, který se značí DAR (Dielectric Absorption Ratio). Jde taktéž o poměr naměřených izolačních odporů měřených v jiných časech. Dielektrický absorpční poměr se vypočítá ze vzorce

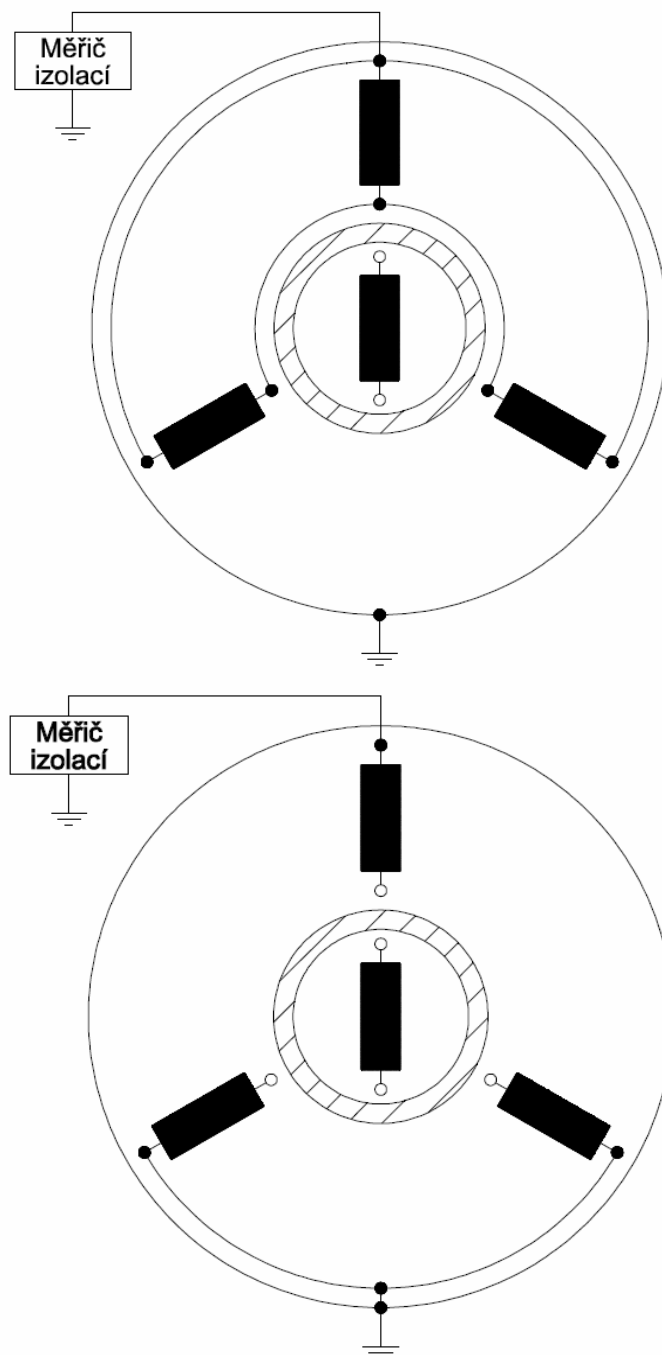
$$DAR = \frac{R_{i60}}{R_{i30}} [-; \Omega, \Omega], \quad (3.3)$$

Ze vzorce je vidět, že způsob výpočtu je totožný jako pro polarizační indexy.

Pro potřeby diagnostiky je možné navrhnout i jiné, nenormované polarizační indexy (pro odlišné časy měření izolačních odporů), avšak obvykle se k tomu nepřistupuje z důvodů porovnatelnosti naměřených hodnot s již dříve naměřenými hodnotami (to však může být někdy spíše na škodu).

3.1.1 Měření izolačního odporu na vinutí statoru

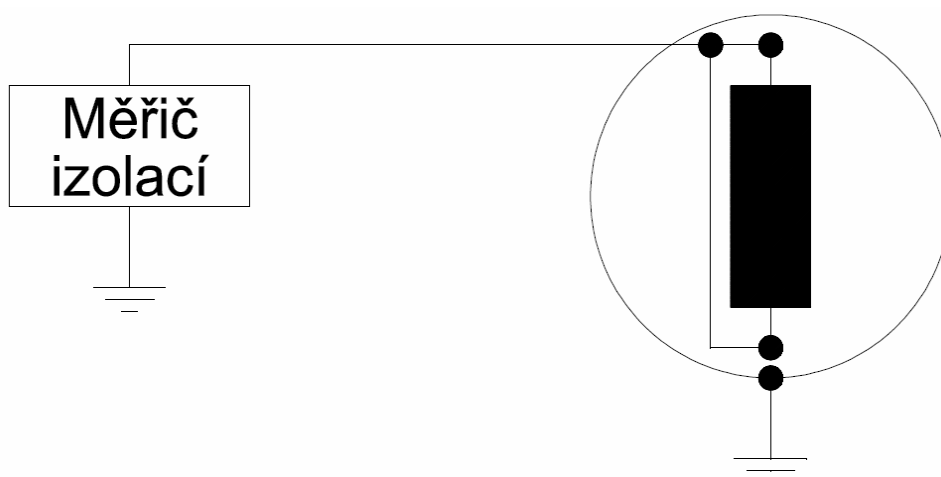
Je-li možné rozpojit uzel statorového vinutí, provádí se měření izolačního odporu na každé z fází samostatně, není-li možné uzel statorového vinutí rozpojit, je nutné měřit izolační odpor statoru jako celku. Při měření se obvykle, na vinutí příslušné k měřené izolaci, připojuje záporný pól měřiče izolací (jeho zkušebního zdroje) a kladný pól se připojuje na uzemněnou kostru statoru stroje, popřípadě spojené i s vývody ostatních vinutí u strojů s rozebíratelným uzlem statorových vinutí. Zjišťováním změny (poklesu) izolačního odporu v závislosti na stáří stroje (porovnáváním s předchozími naměřenými hodnotami) se dá usuzovat na stav izolace a na případné degradační procesy v ní. Porovnávání izolačního odporu se obvykle provádí se všemi hodnotami od začátku provozu stroje, popřípadě od jeho převinutí.



Obr. 3-1 Schéma zapojení při měření izolačního odporu statoru a) s uzlem nerozebíratelným b) s uzlem rozebíratelným

3.1.2 Měření izolačního odporu na vinutí rotoru

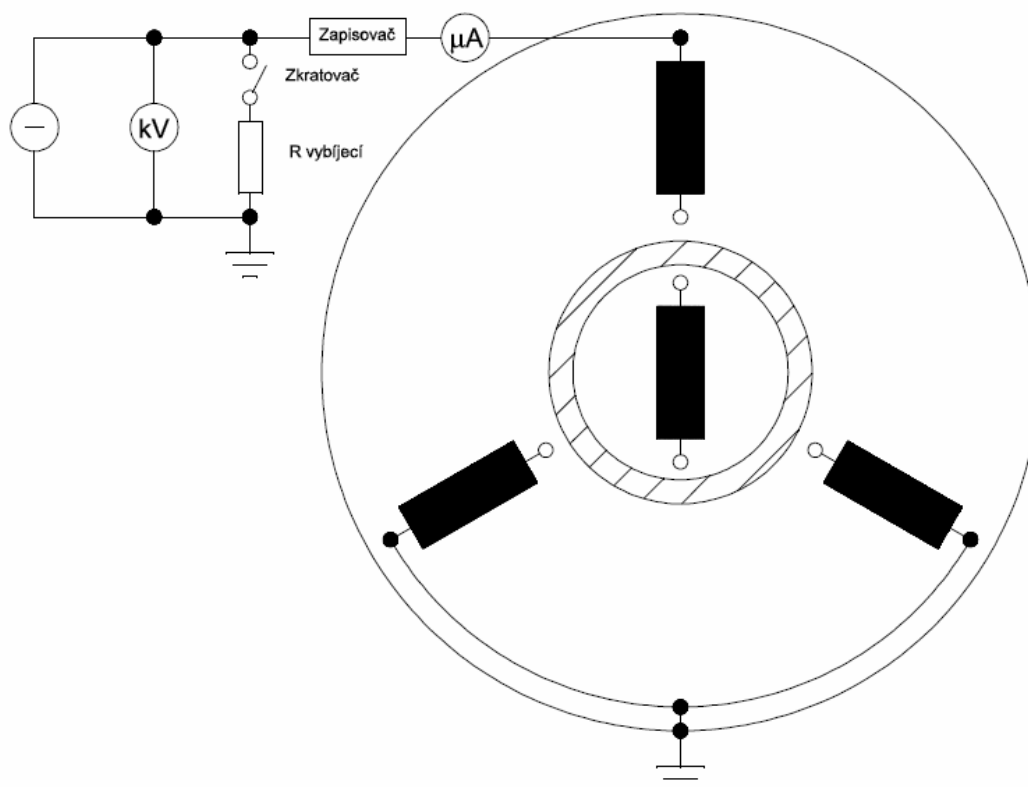
Měří se izolace mezi vinutím a uzemněnou kostrou (magnetickým kolem). Nemá-li rotor vyjmut ze stroje, musejí být při měření odpojeny veškeré zemní ochrany a odpojen musí být i budicí obvod (vyjmutí kartáčů ze sběracích kroužků). Měří se odpor izolace celého systému s výjimkou izolací sběracího ústrojí (ta se měří zvlášť). I zde se provádí porovnávání izolačních odporů v čase.



Obr. 3-2 Schéma zapojení při měření izolačního odporu rotoru

3.2 Měření závislosti izolačního odporu na stejnosměrném napětí

Jelikož je izolační odpor závislý na čase, užívá se při měření závislosti izolačního odporu na stejnosměrném napětí jeho ustálená hodnota (tj. hodnota izolačního odporu po odeznění absorpčních i kapacitních proudů, toto odeznívání může trvat desítky minut, ale i mnoho hodin, proto se volí určitý maximální povolený pokles). Izolační odpory strojů s rostoucím přiloženým napětím klesají, zpočátku jen velmi pomalu, ale s rostoucím napětím čím dál tím rychleji (při hodnotě izolačního odporu blízké nule by došlo k průrazu, a proto má-li být zkouška nedestruktivní, je nutné ji včas ukončit, obvykle v momentě kdy je prokazatelný úbytek izolačního odporu, v žádném případě by nemělo napětí překročit zkušební napětí zkoušené izolace). Obecně pak platí, že čím rychleji izolační odpor klesá a čím větší je strmost poklesu, tím v horším stavu se izolace nachází. U izolace v dobrém stavu se pokles izolačního odporu projeví až při napětích vyšších než je jmenovitá hodnota napětí stroje. Jelikož je nutné ustálení izolačního odporu, nelze provádět kontinuální změření celé charakteristiky, ale je nutné měřit po určitých napěťových krocích. Po změření se musí ještě měření vyhodnotit, výsledkem je obvykle grafické vyjádření (křivka) závislosti ustáleného izolačního odporu na napětí, přičemž je křivka obvykle matematicky nebo graficky extrapolována až do bodu, kdy je izolační odpor roven nule.

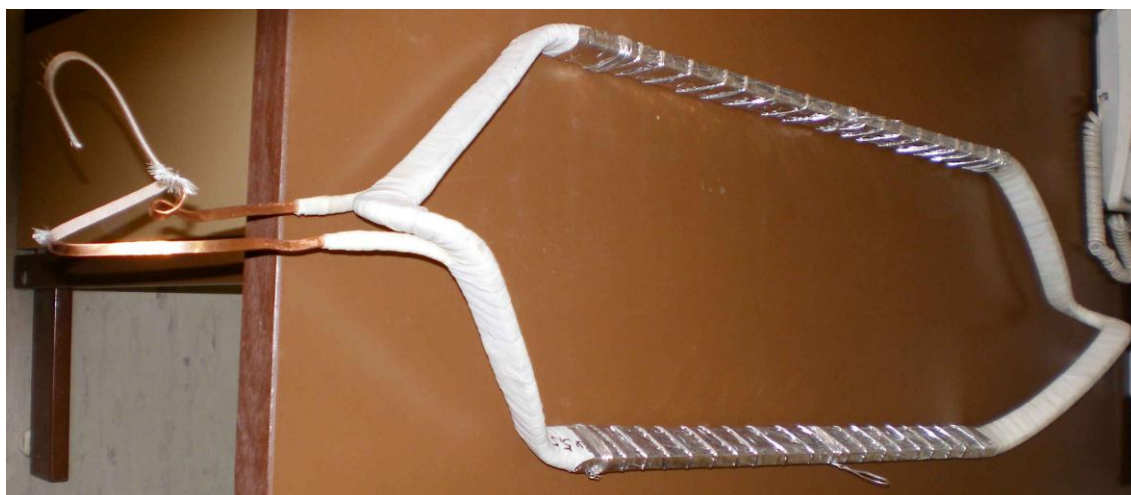


Obr. 3-3 Schéma zapojení při měření závislosti izolačního odporu na stejnosměrném napětí

4 MĚŘENÍ V LABORATORNÍCH PODMÍNKÁCH

4.1 Měření na vzorku (cívce)

Pro měření jsme používali šablonovou cívku určenou do vinutí statoru asynchronního motoru s jmenovitým napětím 6kV. Tuto cívku bylo nutné, pro účely měření izolačního odporu, opatřit elektrodami, které pokrývaly celou oblast tyčí, které se vkládají do drážek statoru s malým přesahem do oblasti čel cívky (elektrody nahrazovaly železo statoru). Elektrody byly tvořeny kombinací hliníkové fólie a měděného pocínovaného drátu. Hliníková fólie byla ovinuta okolo tyčových částí cívky a následně zpevněna přitažením měděným cínovaným drátem k cívce. Drát sloužil zároveň jako hlavní proudovodná dráha a byly jím tvořeny i vývody elektrod. Díky tomuto uspořádání elektrod na cívce byla zároveň zkratována protikoronová ochrana která byla přítomna na cívce. Cívka byla integrována (zavěšena) do „Stanoviště pro stejnosměrné diagnostické zkoušky“ [A].



Obr. 4-1 Reálná cívka [2]



Obr. 4-2 Provedení elektrod na reálné cívce



Obr. 4-3 Funkční vzorek se zavěšenou cívkou

Při měření na cívce bylo postupováno obdobně jako při měření na reálném stroji. Oba vývody cívky byly zkratovány a při měření byl uzemněn vždy kladný pól. Uzemňování kladného pólu bylo prováděno po konzultaci s odborníkem s praxe (pan František Antfeist), přičemž tímto byla brána v potaz skutečnost, že při obou polaritách (půlvlnách) napětí není stejná pravděpodobnost, že dojde k poruše izolačního systému.

Aby bylo zaručené dostatečné odizolování měřené cívky, bylo provedeno její zavěšení na bavlněných popruzích (jak je vidět na předchozím obrázku).

Měření probíhalo vždy v některém z následujících zapojení:

- 1) elektroda 1 byla připojena na kladný pól, vývody a elektroda 2 byly připojeny na záporný pól
- 2) elektroda 2 byla připojena na kladný pól, vývody cívky a elektroda 1 byly připojeny na záporný pól
- 3) obě elektrody byly připojeny na kladný pól, vývody cívky byly připojeny na záporný pól

Elektrody byly rozlišeny tak, že na straně elektrody 2 je na cívce polis (fixem přímo na izolaci), jak je vidět na předchozím obrázku.

Na cívce bylo prováděno měření absorpční charakteristiky, a to při různých napětích. Pro měření byly použity dva různé měřicí přístroje, a to Megger S1-5005 a Merta PU 311. Podrobnosti o obou přístrojích viz. *Příloha H* a *Příloha I*.

Byť se v ČR běžně měří izolační odpor pouze pro časy 15, 60 a 600s (jsou třeba pro určení polarizačních indexů) bylo rozhodnuto, že budou měřeny hodnoty i pro časy 180 a 300s a to z důvodu, aby měly grafy větší vypovídací hodnotu. Měření tedy byla prováděna v časech 15, 60, 180, 300 a 600 sekund. Důvody proč nebyly naměřené hodnoty vyneseny do grafů, jsou objasněny níže.

Z naměřených hodnot, které jsou uvedeny v předchozí tabulce Tab. 4-1 je jasné patrné, že při použití přístroje Megger S1-5005 nebyly korektně změřeny hodnoty izolačního odporu reálné cívky pro všechny požadované časy. Podařilo se korektně změřit hodnoty pro čas 15s u všech měření a pro měření při napětí 1000V se podařilo změřit i hodnotu pro čas 60s. Ve všech ostatních případech došlo k překročení maximálního měřicího rozsahu přístroje. Pro měřicí rozsah přístroje platí, že minimální měřitelná hodnota izolačního odporu je $1\text{k}\Omega$ a pro maximální hodnotu platí, že pro každý 1V měřicího napětí je schopen přístroj změřit o $1\text{G}\Omega$ větší hodnotu izolačního odporu (100V – $100\text{G}\Omega$; 1000V – $1000\text{G}\Omega$). Pro změření skutečného izolačního odporu cívky by bylo nutné měřit při ještě vyšším napětí, aby byla maximální měřitelná hodnota izolačního odporu ještě vyšší, protože izolační odpor cívky jednoznačně převyšuje $1\text{T}\Omega$. Měření při vyšším napětí nebylo možné z bezpečnostních důvodů provést.

U reálného stroje se, za normálních okolností, s takto velkými hodnotami izolačního odporu nesetkáváme, protože takovýchto cívek je v měřeném stroji obvykle několik desítek, a izolační odpory jednotlivých cívek se zde projevují jako paralelní, neboť všechny směřují od měděných vodičů k železu (plechům), ve kterém jsou uloženy. Výsledný izolační odpor reálného stroje pak tedy bude menší úměrně počtu cívek, které obsahuje.

Tab. 4-1 Hodnoty naměřené přístrojem Megger SI-5005 na reálné cívce

U=50V zapojení 1	t(s)	15	60	180	300	600
	R(GΩ)	7,45	>51,5	>52	>52	>52
U=50V zapojení 2	t(s)	15	60	180	300	600
	R(GΩ)	8,15	>51,5	>52	>52	>52
U=50V zapojení 3	t(s)	15	60	180	300	600
	R(GΩ)	15,3	>51,5	>52	>52	>52
U=100V zapojení 1	t(s)	15	60	180	300	600
	R(GΩ)	24,6	>105	>105	>105	>105
U=100V zapojení 2	t(s)	15	60	180	300	600
	R(GΩ)	27,8	>105	>105	>105	>105
U=100V zapojení 3	t(s)	15	60	180	300	600
	R(GΩ)	17,7	>105	>105	>105	>105
U=300V zapojení 1	t(s)	15	60	180	300	600
	R(GΩ)	37,8	>308	>308	>308	>308
U=300V zapojení 2	t(s)	15	60	180	300	600
	R(GΩ)	65,5	>306	>306	>308	>308
U=300V zapojení 3	t(s)	15	60	180	300	600
	R(GΩ)	27,4	>306	>306	>308	>308
U=500V zapojení 1	t(s)	15	60	180	300	600
	R(GΩ)	75,5	>505	>510	>510	>510
U=500V zapojení 2	t(s)	15	60	180	300	600
	R(GΩ)	130	>510	>510	>510	>510
U=500V zapojení 3	t(s)	15	60	180	300	600
	R(GΩ)	41,2	>510	>510	>510	>510
U=1000V zapojení 1	t(s)	15	60	180	300	600
	R(GΩ)	156	855	>1010	>1010	>1010
U=1000V zapojení 2	t(s)	15	60	180	300	600
	R(GΩ)	181	790	>1010	>1010	>955
U=1000V zapojení 3	t(s)	15	60	180	300	600
	R(GΩ)	124	615	>1010	>1010	>1010

Při použití přístroje Metra PU 311 se ukázalo, že nebylo možné naměřit žádné relevantní hodnoty, protože tento přístroj i při maximálním měřicím napětí rovném 1000V může měřit izolační odpor pouze do hodnoty 10 000M Ω , což nestačilo k naměření žádné hodnoty ani pro čas $t=15s$, což je vidět i z hodnot, které byly naměřeny pomocí přístroje Megger S1-5005. \můžeme říci, že pro toto měření se přístroj Metra PU 311 ukázal jako zcela nevhodný.

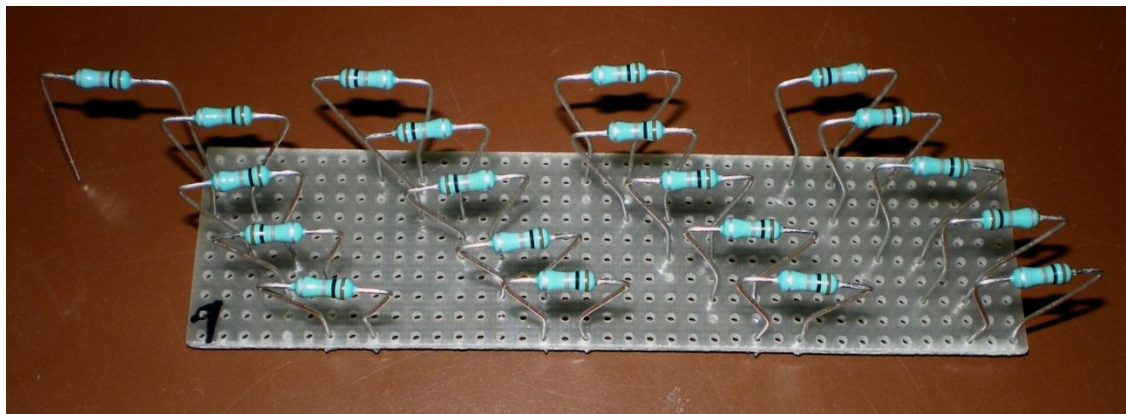
Jelikož se nepodařilo naměřit žádné relevantní charakteristiky, a to ani jedním z použitých přístrojů, nebylo možné ani žádné charakteristiky vynést do grafů.

Z měření, která byla provedena, vyplývá, že pro měření na jednotlivých cívkách je nutné buď použít vyšší měřicí napětí, nebo použít speciální měřicí přístroj, který bude mít dostatečný měřicí rozsah, popřípadě je ještě možné neprovádět měření izolačního odporu jako takového, ale provádět pouze měření typu vyhověl-nevyhověl, přičemž měřicí přístroj, který pro takové měření chceme použít musí být schopen změřit alespoň takovou hodnotu izolačního odporu, která bude používána pro posuzování stavu cívky jako rozhodná hranice.

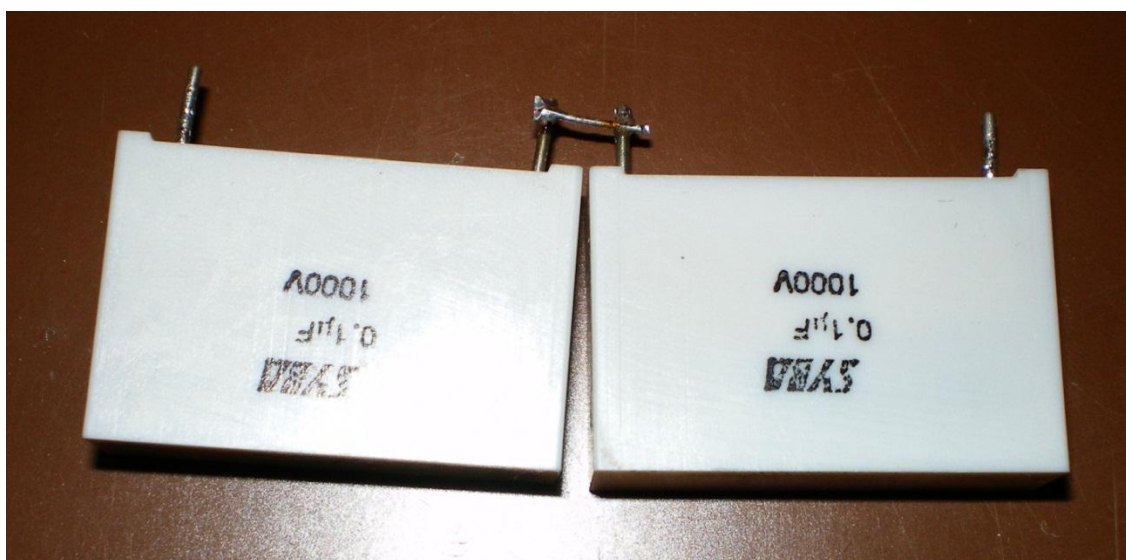
4.2 Měření na modelu (RC členu)

Aby bylo možné měřit v laboratorních podmínkách a přitom bylo dosaženo co nejpodobnějších parametrů jako u reálného stroje, byl vytvořen model, který se skládal s paralelního RC členu. Odporovou větev tohoto členu tvoří sériově zapojené bezindukční rezistory vyrobené technologií tenké metalické vrstvy (viz. Obr. 4-4). Kapacitní větev je tvořena do série zapojenou dvojicí svitkových kondenzátorů, jejichž dielektrikum je tvořeno polypropylenovou fólií (viz. Obr. 4-5). Toto sériové zapojení kondenzátorů sice způsobuje, že výsledná kapacita je zmenšená na polovinu hodnoty každého z kondenzátorů, ale také snižuje na polovinu namáhání dielektrika napětím, což bylo primárním důvodem, proč bylo k tomuto zapojení přistoupeno.

Celý model tvořený RC členem byl integrován do stejného měřicího stanoviště [A], jako reálná cívka, přičemž kapacita byla pevná a odpor bylo možné přepínáním stupňovitě regulovat, nebo i zcela vyřadit (teoreticky se odpor blíží nekonečnu).



Obr. 4-4 Dílčí sestava rezistorů



Obr. 4-5 Sestava kondenzátorů

4.2.1 Měření na modelu (RC členu) – závislost na paralelním odporu

Pro měření byly opět použity přístroje Megger S1-5005 a Merta PU 311. Měření probíhala při stálé hodnotě kapacity (stejná dvojice kondenzátorů), ale pro různé velikosti odporu (dáno možnostmi funkčního vzorku). Měření proběhla při napětích 100V, 500V a 1000V (dáno možnostmi přístroje Merta PU 311), uvedeme zde však pouze hodnoty pro 1000V.

V tabulce je vždy uvedena výsledná hodnota odporu rezistorů, které byly zapojeny v odporové větvi RC členu.

Tab. 4-2 Hodnoty naměřené přístrojem Metra PU 311 na RC členu – závislost na paralelním odporu při $U=1000V$

50MΩ	t(s)	15	60	180	300	600
	R(MΩ)	36	38	38	38	38
144MΩ	t(s)	15	60	180	300	600
	R(MΩ)	120	140	140	140	140
285MΩ	t(s)	15	60	180	300	600
	R(MΩ)	240	280	280	280	280
300MΩ	t(s)	15	60	180	300	600
	R(MΩ)	300	310	310	310	310
700MΩ	t(s)	15	60	180	300	600
	R(MΩ)	710	710	710	710	710
1 000MΩ	t(s)	15	60	180	300	600
	R(MΩ)	1200	1200	1200	1200	1200
3 000MΩ	t(s)	15	60	180	300	600
	R(MΩ)	3400	3400	3400	3400	3400
7 000MΩ	t(s)	15	60	180	300	600
	R(MΩ)	10000	10000	10000	10000	10000
10 000MΩ	t(s)	15	60	180	300	600
	R(MΩ)	>1000 0	>1000 0	>1000 0	>1000 0	>1000 0
30 000MΩ	t(s)	15	60	180	300	600
	R(MΩ)	>1000 0	>1000 0	>1000 0	>1000 0	>1000 0
70 000MΩ	t(s)	15	60	180	300	600
	R(MΩ)	>1000 0	>1000 0	>1000 0	>1000 0	>1000 0
100000MΩ	t(s)	15	60	180	300	600
	R(MΩ)	>1000 0	>1000 0	>1000 0	>1000 0	>1000 0
∞ MΩ	t(s)	15	60	180	300	600
	R(MΩ)	>1000 0	>1000 0	>1000 0	>1000 0	>1000 0

Ze změřených hodnot vyplývá, že přístroj Metra PU 311 není schopen pokrýt kompletní soubor měření, protože jeho maximální rozsah pro některá měření již nedostačuje (přístroj je schopen měřit maximálně do 10 000MΩ).

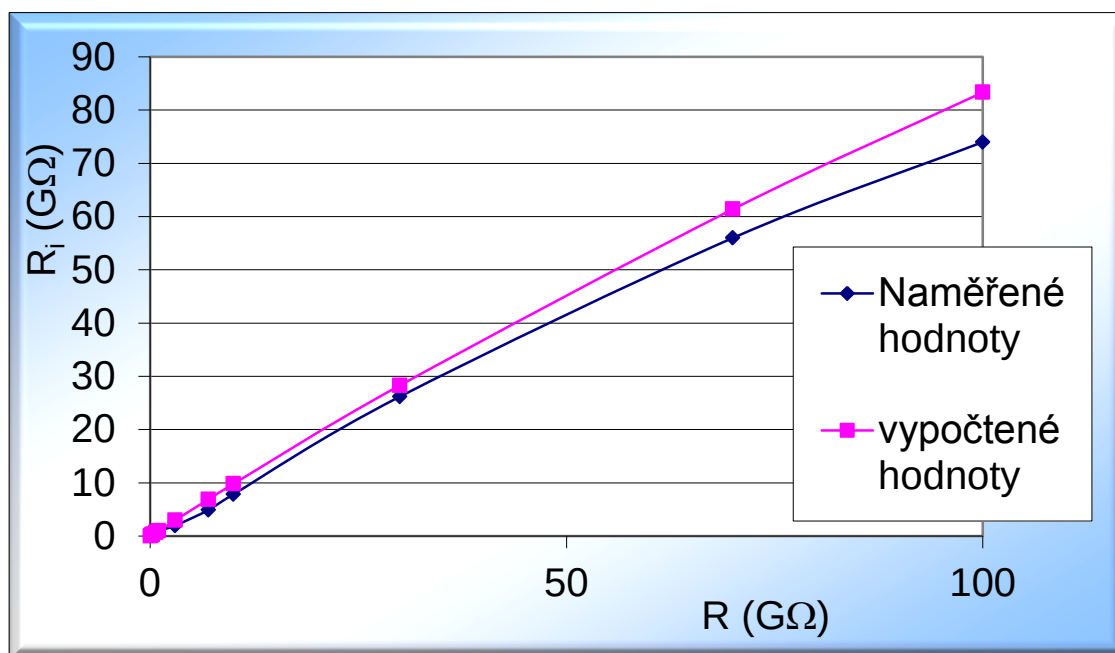
Na naměřených hodnotách se také projevilo to, že při měřeních, kdy naměřené hodnoty přesáhly $200\text{M}\Omega$, byla stupnice díky své nelinearitě již příliš hrubá pro přesné odečítání a docházelo tedy k velkým chybám měření (výsledné odpory větší, než odpor v RC členu).

Tab. 4-3 Hodnoty naměřené přístrojem Megger SI-5005 na RC členu – závislost na paralelním odporu při $U=1000\text{V}$

50MΩ	t(s)	15	60	180	300	600
	R(M Ω)	39,6	39,6	39,6	39,6	39,6
144MΩ	t(s)	15	60	180	300	600
	R(M Ω)	130	130	130	130	130
285MΩ	t(s)	15	60	180	300	600
	R(M Ω)	268	268	268	268	268
300MΩ	t(s)	15	60	180	300	600
	R(M Ω)	296	296	296	296	296
700MΩ	t(s)	15	60	180	300	600
	R(M Ω)	685	690	690	690	690
1 000MΩ	t(s)	15	60	180	300	600
	R(M Ω)	980	985	985	985	985
3 000MΩ	t(s)	15	60	180	300	600
	R(G Ω)	1,94	1,98	1,98	1,98	1,98
7 000MΩ	t(s)	15	60	180	300	600
	R(G Ω)	4,68	4,9	4,9	4,9	4,9
10 000MΩ	t(s)	15	60	180	300	600
	R(G Ω)	7,3	7,8	7,8	7,85	7,85
30 000MΩ	t(s)	15	60	180	300	600
	R(G Ω)	20	25,8	26	26	26,2
70 000MΩ	t(s)	15	60	180	300	600
	R(G Ω)	30,8	56	56	55,5	56
100000MΩ	t(s)	15	60	180	300	600
	R(G Ω)	29,4	70	73	73	74
∞ MΩ	t(s)	15	60	180	300	600
	R(G Ω)	53	422	420	420	530

V případě měření pomocí přístroje Megger S1-5005 již nedošlo k tomu, že by nebylo možné přístrojem některou z hodnot změřit, poněvadž tento přístroj je dostatečně rozsahově dimenzován.

Porovnáme-li hodnoty naměřené přístrojem Megger S1-5005 s hodnotami, které vypočteme z hodnoty izolačních odporů uvedených v předchozí tabulce a jmenovitých hodnot odporů, dojdeme k zjištění, že jejich poměr je v podstatě stále stejný. Chyba je tedy dána pouze přístrojem (s největší pravděpodobností nastavením jednoho z převodníků uvnitř přístroje). Vzhledem k povoleným nepřesnostem (tolerancím) odporů je však možné říci, že přístroj měří s výrobcem udávanou přesností.



Obr. 4-6 Naměřené a vypočtené hodnoty izolačního odporu RC členu

Z hodnot, které byly naměřeny a vypočteny vyplývá, že izolační odpor, který naměříme na Modelu tvořeném RC členem, je závislý na odporu, který připojíme paralelně ke kondenzátoru. Paralelně zapojený odpor simuluje svod.

4.2.2 Měření na modelu (RC členu) – závislost na napětí

Měření probíhalo tak, že na RC člen, o stejně nastavených parametrech (kapacita i odpor), byla přivedena měřící napětí o několika předem definovaných hladinách. Přístroj Merta PU 311 je schopen dodávat pouze tři různá měřící napětí (100V, 500V a 1000V), kdežto přístroj Megger S1-5005 je schopen dodávat měřící napětí v rozsahu od 25V do 5000V a to stupňovitě nastavitelná s krokem 25V.

Tab. 4-4 Hodnoty naměřené přístrojem PU 311 na RC členu– závislost na napětí

U=100V 50MΩ	t(s)	15	60	180	300	600
	R(MΩ)	34	43	39	39	39
U=500V 50MΩ	t(s)	15	60	180	300	600
	R(MΩ)	40,5	40,5	41,4	41,4	41,4
U=1000V 50MΩ	t(s)	15	60	180	300	600
	R(MΩ)	36	36,5	36,5	37	37

Tab. 4-5 Hodnoty naměřené přístrojem Megger SI-5005 na RC členu– závislost na napětí

U=100V 50MΩ	t(s)	15	60	180	300	600
	R(MΩ)	40,4	40,4	40,4	40,4	40,4
U=500V 50MΩ	t(s)	15	60	180	300	600
	R(MΩ)	40,2	40,2	40,2	40,2	40,2
U=1000V 50MΩ	t(s)	15	60	180	300	600
	R(MΩ)	40,2	40,2	40,2	40,2	40,2

Tab. 4-6 Hodnoty naměřené přístrojem Megger SI-5005 na RC členu– závislost na napětí, jemnější krok měřícího napětí, jiný paralelní odpor

U=50V 50 000MΩ	t(s)	15	60	180	300	600
	R(GΩ)	3,12	43,2	46,9	45,2	44,4
U=100V 50 000MΩ	t(s)	15	60	180	300	600
	R(GΩ)	4,12	42,2	44,4	44,8	45,4
U=150V 50 000MΩ	t(s)	15	60	180	300	600
	R(GΩ)	4,3	43,4	44,6	44,8	45,2
U=200V 50 000MΩ	t(s)	15	60	180	300	600
	R(GΩ)	8,75	43,8	44,2	45	44,4
U=250V 50 000MΩ	t(s)	15	60	180	300	600
	R(GΩ)	7,76	44,6	44,6	44,6	44,4
U=300V 50 000MΩ	t(s)	15	60	180	300	600
	R(GΩ)	8,96	43,6	44,6	44	44,2

U=350V 50 000MΩ	t(s)	15	60	180	300	600
	R(GΩ)	9,55	44,4	44,2	44,4	44,4
U=400V 50 000MΩ	t(s)	15	60	180	300	600
	R(GΩ)	9,8	43,8	43,8	44,4	44,2
U=450V 50 000MΩ	t(s)	15	60	180	300	600
	R(GΩ)	16,7	43,4	44	44,4	44
U=500V 50 000MΩ	t(s)	15	60	180	300	600
	R(GΩ)	16,8	43,2	43,8	43,8	44
U=550V 50 000MΩ	t(s)	15	60	180	300	600
	R(GΩ)	15,5	42,8	43,4	43,6	43,6
U=600V 50 000MΩ	t(s)	15	60	180	300	600
	R(GΩ)	17,7	43,4	43,6	43,6	43,6
U=650V 50 000MΩ	t(s)	15	60	180	300	600
	R(GΩ)	23,2	43,4	46,3	43,2	43,4
U=700V 50 000MΩ	t(s)	15	60	180	300	600
	R(GΩ)	25	43	44,6	43,2	43,2
U=750V 50 000MΩ	t(s)	15	60	180	300	600
	R(GΩ)	43	43	43,2	43,2	
U=800V 50 000MΩ	t(s)	15	60	180	300	600
	R(GΩ)	27,8	42,6	43,6	43,6	43,4
U=850V 50 000MΩ	t(s)	15	60	180	300	600
	R(GΩ)	26,4	42,6	43,2	43,2	43,2
U=900V 50 000MΩ	t(s)	15	60	180	300	600
	R(GΩ)	28,2	42,6	43	43	43
U=950V 50 000MΩ	t(s)	15	60	180	300	600
	R(GΩ)	29,6	42,6	42,8	42,6	42,8
U=1000V 50 000MΩ	t(s)	15	60	180	300	600
	R(GΩ)	28,4	42,6	43	42,4	42,8

Z hodnot, které jsme naměřili můžeme učinit několik závěrů:

- 1) Naměřený izolační odpor je závislý na velikosti měřicího napětí
- 2) Naměřený izolační odpor je závislý nejen na měřícím napětí, ale i na proudu, který je měřicí přístroj schopen do měřené izolace dodat (různé rychlosti nabíjení)
- 3) Protože je napětově závislý izolační odpor, budou napětově závislé i polarizační indexy (počítají se z izolačních odporů).

4.2.3 K jednotlivým závěrům: Napět'ová závislost izolačního odporu

Při měřeních, která byla prováděna na modelu (RC člen), se potvrdilo, že velikost izolačního odporu je závislá na velikosti měřicího napětí, kterým se izolační odpor měří. Z měření vyplynulo, že čím větší je napětí, kterým se měření provádí, tím menší izolační odpor bude naměřen. Toto zjištění z prováděného měření odpovídá již dlouhou dobu známým empirickým znalostem vzešlým z jiných měření, ale i teoretickým popisům chování izolačního odporu, které jsou dnes známy.

Model, který byl pro měření použit, je tvořen paralelním RC členem. Kapacita C je sestavena ze dvou do série zapojených kondenzátorů, každý o velikosti $0,1\mu\text{F}$. Odpor R je sestaven z většího množství bezindukčních rezistorů různých velikostí, přičemž rezistory jsou vyrobené technologií tenké metalické vrstvy. Rezistory, které jsme používali, se díky svému velmi vysokému odporu (zvláště u rezistorů s největším odporem $1\text{G}\Omega$) mohou za jistých okolností chovat jako izolace (dielektrikum). Tento jev však není na závalu, jelikož nemaří snahu o co největší přiblížení modelu k reálné izolaci, ale naopak k žádoucímu výsledku přispívá.

Z hodnot, které obsahuje tabulka Tab. 4-6 je patrné, že při rostoucím měřícím napětím klesá hodnota naměřeného izolačního odporu.

Odvození napět'ové závislosti izolačního odporu je možné následujícím způsobem:

Na začátku vyjdeme ze vztahu pro vnitřní proudovou hustotu v dielektriku:

$$J_v = \frac{I}{S} \quad (4.1)$$

Ze vztahu pro vnitřní proudovou hustotu v dielektriku vyjádříme proud:

$$I = J_v * S \quad (4.2)$$

Poté z Ohmova zákona vyjádříme odpor:

$$R = \frac{U}{I} \quad (4.3)$$

Pro všechny běžné izolace můžeme prohlásit, že intenzita vnitřního elektrického pole v dielektriku je rovna napětí přiloženému na izolaci (dielektrikum).

$$U = E \quad (4.4)$$

Dosadíme-li do vztahu (4.3) místo proud vztah z (4.2) a místo napětí intenzitu elektrického pole podle vztahu (4.4), obdržíme vztah:

$$R = \frac{E}{J_v * S} \quad (4.5)$$

Vnitřní proudovou hustotu lze vyjádřit nejen ze vztahu (4.1), ale i z vnitřní konduktivity dielektrika. Vztah je platný pro jeden druh náboje:

$$J_v = \gamma_v * E \quad [3] \quad (4.6)$$

Dosadíme-li do vztahu (4.6) ze vztahu (4.5) obdržíme:

$$R = \frac{E}{\gamma_v * E * S} = \frac{1}{\gamma_v * S} \quad (4.7)$$

Pro změnu vnitřní konduktivity dielektrika v závislosti na intenzitě elektrického pole existují empirické vztahy (platné v silných elektrických polích):

-vztah pro konduktivitu podle Pooleho (vhodnější pro nekystalické látky):

$$\gamma_v = \gamma_{v(0)} * \exp \beta * E \quad [3] \quad (4.8)$$

-vztah pro konduktivitu podle Frenkela (vhodnější pro krystalické látky):

$$\gamma_V = \gamma_{V(0)} * \exp \beta_1 * \sqrt{E} \quad [3] \quad (4.9)$$

Provedeme-li dosazení ze vztahů (4.8) a (4.9) do vztahu (4.7) obdržíme:

$$R_{Poole} = \frac{1}{S * \gamma_{V(0)} * \exp \beta * E} \quad (4.10)$$

$$R_{Frenkel} = \frac{1}{S * \gamma_{V(0)} * \exp \beta_1 * \sqrt{E}} \quad (4.11)$$

Zde je vidět, že jak u krystalických, tak i u nekrystalických materiálů (dielektrik) je izolační odpor závislý na přiloženém napětí (rovnému intenzitě vnitřního elektrického pole).

Skládá-li se izolace z více vrstev různých materiálů (což bývá obvyklé), bude se celá izolace chovat ve výsledku jako superpozice jednotlivých vrstev (sériově řazené odpory), přičemž napětí na jednotlivých vrstvách se rozloží v závislosti na jejich odporech.

4.2.4 K jednotlivým závěrům: Závislost odporu i na proudu dodávaného měřicím přístrojem

Z měření na modelu i z měření na reálných strojích (bude uvedeno dále v této práci) vyplynulo, že naměřený izolační odpor je, po celou dobu než se ustálí (nabíjení izolace jako kondenzátoru, růst izolačního odporu), závislý na rychlosti, kterou se izolace nabíjí. Rychlost nabíjení izolace je, kromě samotné izolace (materiál, kapacita,), silně ovlivňována i dvěma faktory:

- 1) Přístrojem (jeho maximálním nabíjecím proudem)
- 2) Napětíovou hladinou, na které je měření prováděno

4.2.4.1 Vliv přístroje na rychlost nabíjení

Každý typ přístroje pro měření izolačního odporu má jiný proud nakrátko (je zároveň maximálním proudem), který je schopen do měřené izolace dodávat. Tento proud významným způsobem ovlivňuje rychlost nabíjení izolace a tedy i velikost měřených izolačních odporů. Pro matematické odvození tohoto vlivu vyjdeme ze vztahu pro hodnotu izolačního odporu tak, jak ho používají i měřicí přístroje izolačního odporu:

$$R_i = \frac{u}{i} \quad (4.12)$$

kde u je okamžitá hodnota napětí, i je okamžitá hodnota proudu a R_i je izolační odpor naměřený přístrojem.

S rostoucím proudem nakrátko měřicího přístroje roste i příkon dodávaný do měřené izolace:

$$p = u * i \quad (4.13)$$

s rostoucím příkonem se rychleji nabíjí izolace (chová se jako kondenzátor), a tedy na ní i rychleji roste napětí (rychleji se blíží k napětí přiloženému):

$$E = \frac{1}{2} C * U_i^2 \quad (4.14)$$

kde C je kapacita izolace, U_i je napětí nabité na izolaci a E je energie obsažená v izolaci (kondenzátoru), přičemž platí, že:

$$E = \int_0^x p(t) dt \quad (4.15)$$

Při nabíjení izolace je okamžitý proud i závislý na napětí přiloženém na izolaci u (napětí dodávaném měřicím přístrojem), na napětí, které je již nabité na izolaci U_i a samozřejmě na izolačním odporu:

$$i = \frac{u - U_i}{R_i} \quad (4.16)$$

Protože, u běžně používaných měřících přístrojů dosahuje u velmi rychle (v řádu vteřin) hodnoty plného měřicího napětí U , můžeme po úpravě předchozího vztahu psát:

$$R_i = \frac{U - U_i}{i} \quad (4.17)$$

Velikost proudu, který vstupuje do izolace postupně klesá k hodnotě, která je dána izolačním odporem měřené izolace. Blíží se tedy k proudu, který je způsoben samovybíjením izolace.

Z výše uvedeného je patrné, že bude-li do izolace vtékat větší proud, bude se rychleji nabíjet, poroste na ní rychleji napětí a rozdíl $U - U_i$ dosáhne rychleji nižších hodnot a s rychlejším poklesem rozdílu $U - U_i$ bude tedy i rychleji růst naměřený izolační odpor.

4.2.4.2 Vliv napěťové hladiny, na které je měření prováděno

U moderních přístrojů pro měření izolačního odporu platí, že jejich proud nakrátko je při všech napětích stejný. Na základě vztahu (4.13) tedy můžeme říci, že s rostoucím měřicím napětím poroste i příkon (energie za čas), který měřicí přístroj bude dodávat do měřené izolace. Bude tedy docházet k rychlejšímu nabíjení izolace. Podle výše odvozených rovnic platí, že při rychlejším nabíjení izolace (kondenzátoru) bude rychleji růst i izolační odpor. Toto zjištění vychází z faktu, že izolace je nabíjena na vyšší napěťovou hladinu a je ji do izolace potřeba dodat větší množství energie pro její nabití (vyplývá ze vztahu (4.14)). Díky tomu roste napětí nabité na izolaci U_i pomaleji a ze vztahu (4.17) můžeme tedy odvodit, že hodnota izolačního odporu R_i bude během nabíjení izolace, při větším U a stejném i , větší. To však platí pouze pro proces nabíjení, protože pro nabitou izolaci (ustálený izolační odpor) platí, že izolační odpor klesá s napětím přiloženým na izolaci což je patrné ze vztahů (4.10) a (4.11).

4.2.5 K jednotlivým závěrům: Napět'ová závislost polarizačního indexu

Shrneme-li zjištění, která byla dosud učiněna, můžeme říci, že se zvyšujícím se měřicím napětím (stejně tak i s rostoucím proudem na krátko měřicího přístroje) bude docházet k rychlejšímu nabíjení izolace a tedy i k rychlejšímu růstu izolačního odporu. Zároveň však platí, že s rostoucí hodnotou měřicího napětí hodnota izolačního odporu klesá, a proto se bude izolační odpor ustalovat na nižší hodnotě. Tato zjištění nám dovolují odvodit, že velikost měřicího napětí bude mít vliv na polarizační indexy. Jak pro p_{i60} i p_{i600} bude pro běžné případy platit, že s rostoucím měřicím napětím budou polarizační indexy klesat. To vychází z definic obou polarizačních indexů:

$$p_{i60} = \frac{R_{60}}{R_{15}} \quad (4.18)$$

$$p_{i600} = \frac{R_{600}}{R_{60}} \quad (4.19)$$

Z těchto definic vyplývá, že při rychlejším nabíjení izolace, které způsobuje rychlejší růst izolačního odporu k ustálené hodnotě, se budou i poměry izolačních odporů (polarizační indexy) stále více blížit jedné. Polarizační index p_{i60} bude k tomuto více citlivý, než polarizační index p_{i600} .

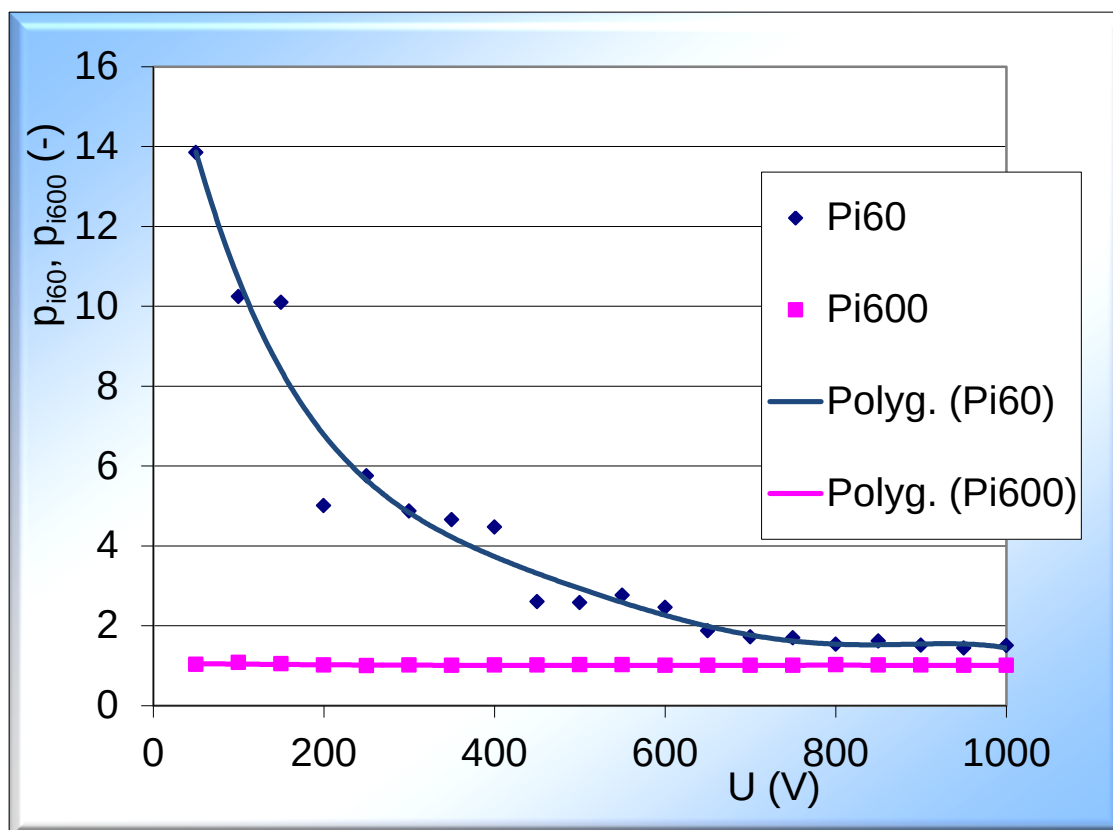
V tabulce (Tab. 4-7), která následuje, jsou spočítány polarizační indexy p_{i60} i p_{i600} a to pro hodnoty izolačních odporů naměřených na modelu (RC člen). Při napětích od 50V do 1000V (krok 50V). Měření byla provedena pomocí měřicího přístroje izolačního odporu Megger S1-5005. Naměřené hodnoty izolačních odporů jsou uvedeny v tabulce Tab. 4-6.

Tab. 4-7 Polarizační indexy spočítané z naměřených hodnot z Tab.4- 6

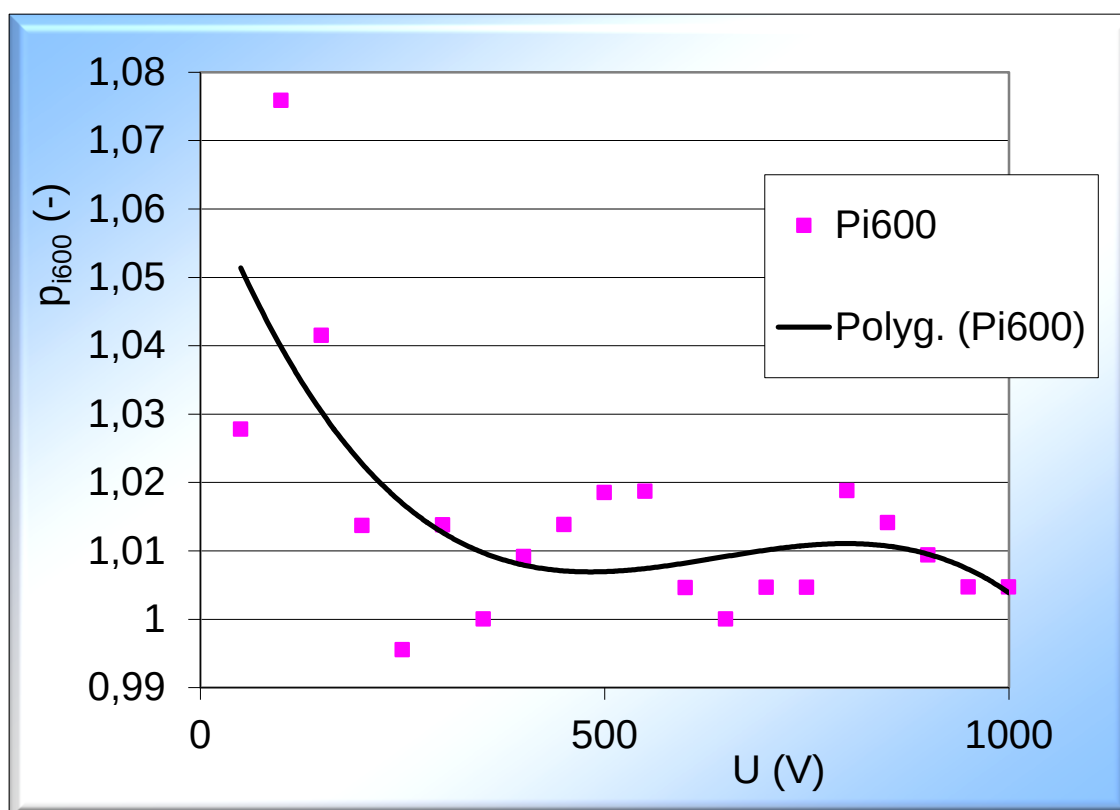
U	P_{i60}	P_{i600}
V	-	-
50	13,84615	1,027778
100	10,24272	1,075829
150	10,09302	1,041475
200	5,005714	1,013699
250	5,747423	0,995516
300	4,866071	1,013761
350	4,649215	1
400	4,469388	1,009132
450	2,598802	1,013825
500	2,571429	1,018519
550	2,76129	1,018692
600	2,451977	1,004608
650	1,87069	1
700	1,72	1,004651
750	1,692913	1,004651
800	1,532374	1,018779
850	1,613636	1,014085
900	1,510638	1,00939
950	1,439189	1,004695
1000	1,5	1,004695

Z vypočtených hodnot je patrné, že napětí, kterým je izolační odpor měřen, má vliv na velikost výsledných polarizačních indexů. Z tabulky je také patrné, že polarizační index p_{i60} je měřicím napětí podstatně více ovlivněn než polarizační index p_{i600} . To je dáno tím, že v počátcích měření dochází k rychlejšímu nabíjení izolace a tedy i k větší změně izolačního odporu.

Pro lepší představu jsou polarizační indexy vyneseny do grafů. Nejprve oba polarizační indexy do jednoho grafu (Obr. 4-7) a poté polarizační index p_{i600} samostatně.



Obr. 4-7 Graf závislosti polarizačního indexu na napětí (z Tab. 4-7)

Obr. 4-8 Graf závislosti polarizačního indexu na napětí pouze pro p_{i600} (z Tab. 4-7)

Na obrázcích Obr. 4-7 a Obr. 4-8 je vidět, že naměřená data nemají s rostoucím napětím stále klesající hodnotu, ale nepravidelně oscilují, ale jejich trend je klesající. To je dáno tím, že při těchto měřeních, už jsme se dostali na hranici přesnosti měřícího přístroj a jednotlivá data jsou z části zatížena jeho chybou. Proto je třeba brát v úvahu především trend těchto měření.

V grafu Obr. 4-7 je patrná obrovská změna hodnoty polarizačního indexu p_{i60} se změnou měřícího napětí. Budeme-li považovat za základní hodnotu tu pro $U=50V$, pak rozdíl oproti hodnotě pro $U=1000V$ je 89,17%, budeme-li považovat za základní hodnotu tu pro $U=1000V$, pak rozdíl oproti hodnotě pro $U=50V$ je 923,08%. Taková míra nepřesnosti je v průmyslových měřeních zcela nepřijatelná.

4.3 Vliv vlhkosti na izolační odpor

Je obecně známým faktem, že s rostoucím množstvím vlhkosti obsaženým v izolaci klesá její izolační odpor. Tento fakt platí prakticky pro všechny izolanty používané v elektrických strojích. Sám tento fakt nezodpovídá všechny otázky, a proto je třeba je rozebrat a zodpovědět.

4.3.1 Vliv dielektrického ohřevu při měření izolačního odporu na izolaci

Přiložíme-li na izolaci střídavé napětí, bude jí protékat jistý proud, jež bude záviset na impedanci izolace. Tento proud bude působit (dielektrické) ztráty. Izolační odpor se však měří pomocí stejnosměrného napětí a to by takovéto ztráty působit nemělo. Jak ale ukázala měření na běžně používaných přístrojích pro měření izolačního odporu, napětí s kterými pracují není čistě stejnosměrné, ale má i vysokofrekvenční zvlnění. Toto zvlnění je způsobeno tím, že tyto přístroje používají jako zdroj energie napětí akumulátory, nebo primární články („baterie“) o poměrně malém napětí a pro přeměnu tohoto napětí na požadované napětí (obvykle vysoké napětí) používají integrovaného spínaného zdroje. Tento nepříznivý jev se v jisté míře projevuje u všech měřících přístrojů, které byly zkoumány. Při měření bylo prokázáno, že toto zvlnění nemá velkou efektivní hodnotu, bývá v jednotkách procent jmenovitého (nastaveného) napětí, obvykle mívá ještě menší velikost (desetiny procenta).

Uvědomím-li si, že do měřené izolace tečou velmi malé proudy, které mohou měřící přístroje do měřené izolace dodat (proudy nakrátko např. Megget S1-5005 5mA, Megger BM11D 2mA,...), zjistíme, že výkon dodávaný do izolace je malý (pro napětíovou hladinu 5kV a přístroj Megget S1-5005 je výkon dodávaný do izolace 25W). Navíc tak velký proud je do izolace dodáván pouze v prvních okamžicích měření, poté rychle klesá (běžně při měření odebírá i o několik řádů méně). Zohledníme-li i to, že

dielektrický ohřev může způsobovat pouze střídavá složka napájecího napětí (zvlnění), která je, jak už bylo řečeno, velmi malá a nese díky tomu pouze minimum energie (řádově jednotky procent), nepřesáhne výkon, který je schopen vytvářet dielektrický ohřev o výkonu jednotek Wattů (obvykle spíše desetiny wattů). Při hmotnosti, jakou má izolace v strojích, které se běžně používají, což mohou být i desítky, nebo stovky kilogramů, je možné zanedbat vliv dielektrického ohřevu na izolaci a tedy i na měření izolačního odporu, které na ní provádíme.

Při měření na izolaci reálné cívky ani na modelu nebylo zaznamenáno, že by se teplota jednoho či druhého vůbec měnila.

4.3.2 Určení vlhkosti izolace

Měří-li se izolační odpor stroje, je obvykle prováděno i měření teploty a vlhkost prostoru, ve kterém je stroj umístěn a teplota izolace ve stroji. Je-li to možné tak měříme přímo teplotu izolace, není-li to možné, obvykle se za tuto teplotu dosazuje ustálená hodnota teploty stroje (ve stroji bývají často přímo integrovány senzory teploty). Měření by se mělo provádět na chladnoucí stroji, přičemž se předpokládá, že je-li stroj právě odstaven z provozu, je zcela vysušen a vlhne rychlostí, která je úměrná rychlosti chladnutí a vlhkosti v měřicím prostoru. Tato zjednodušení však můžeme aplikovat pouze v případě, že stroj by provozován nepřetržitě alespoň po dobu potřebnou pro jeho vyschnutí (nejlépe v dlouhodobém nepřetržitém provozu - u nás například generátory v jaderných elektrárnách). Toto zjednodušení selhává tam, kde stroj nepracuje nepřetržitě dostatečně dlouho na to, aby byl vysušen (například stroje pracující pouze špičkově). Přejde-li stroj do odstávky, začíná okamžitě vlhnout a to i když je stále teplý (vlhne úměrně teplotě a vlhkosti okolí). Při opětovném přechodu do provozu se začne opět vysoušet. Tímto způsobem dochází k cyklickému navlhání a vysoušení stroje, přičemž nejsme schopni určit, jaká je okamžitá reálná vlhkost ve stroji. Skutečná vlhkost stroje je určitelná pouze po částečném rozebrání stroje a to měřením přímo na izolaci. Zjišťování vlhkosti je obvykle destruktivní zkouška, neboť je třeba alespoň malou část izolace odebrat. Je tedy vhodnější vysušit izolaci ve stroji provozem.

Při měření v laboratorních podmínkách jsme mohli teplotu izolace prohlásit za stejnou jako teplotu okolí (vzduch v laboratoři), jelikož izolace nebyla uložena v žádném stroji, který by její teplotu mohl měnit.

Co se týká vlhkosti izolace, ta nemohla být přímo měřena, jelikož by bylo nutné provést odběr izolace (destruktivní zkoušku) a de facto tak zničit měřené vzorky. U modelu, kde byla kapacita reprezentována kondenzátorem, nebylo možné množství vlhkosti v izolaci ani odhadnout, jelikož se jednalo o kondenzátor zalitý hmotou. U reálné cívky lze předpokládat, že izolace cívky měla stejnou vlhkost, jako vzduch v laboratoři.

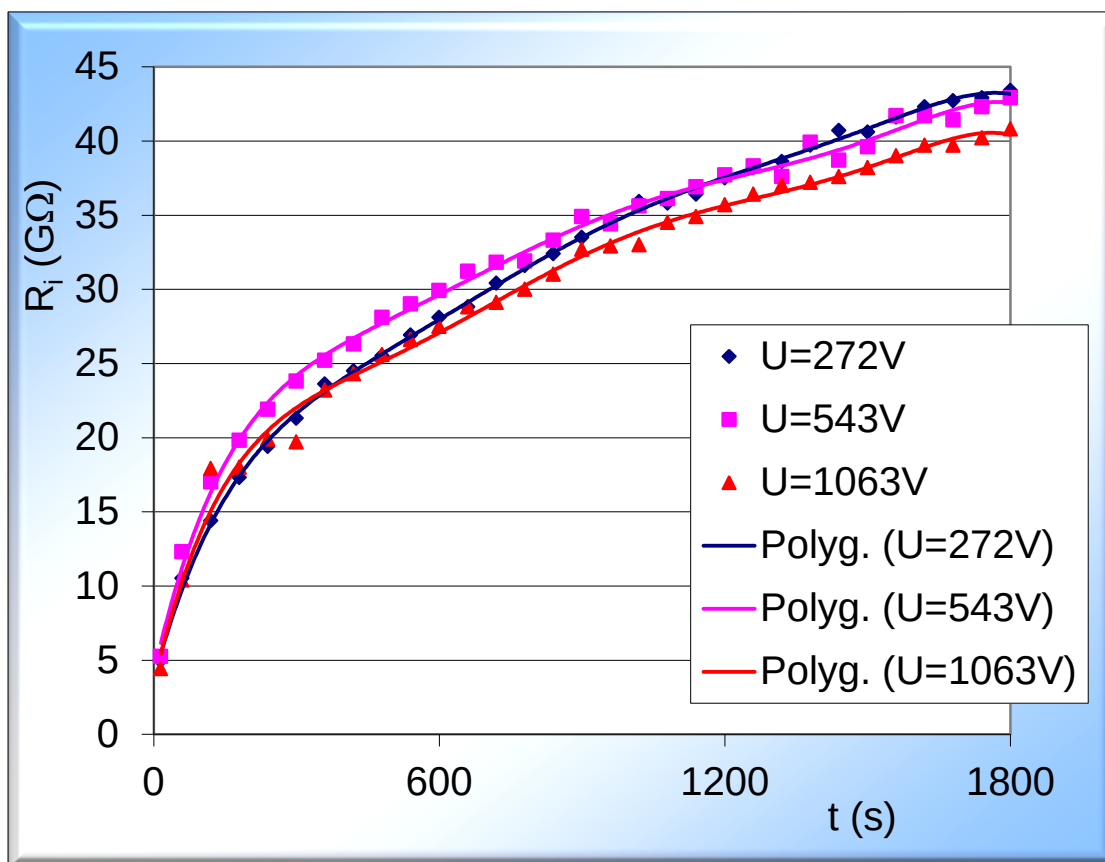
5 MĚŘENÍ NA STROJÍCH

Pro měření na reálných strojích bylo použito několik velkých asynchronních motorů a jeden synchronní stroj menšího výkonu (ten pracoval jako budič velkého synchronního stroje). Měřené stroje měly většinou jmenovité napájecí napětí 6 000V, byl však mezi nimi i stroj o napájecím napětí 10 000V a jeden o napětí nižším (500V). U všech strojů byl měřen pouze stator, výjimkou byl pouze budič, kde byl měřen i rotor. Všechna zjištění, která z měření vyplynou, je možné aplikovat i na synchronní stroje (jejich statory), neboť mezi statorem synchronního a asynchronního stroje (při stejných otáčkách a výkonu) není prakticky žádný rozdíl. Pro tuto práci je nejdůležitější izolační systém a ten byl u měřených strojů proveden stejným způsobem jako u velkých synchronních strojů, tj. na bázi slídkové izolační pásy.

5.1 Měření na strojích – závislost na napětí

Při měřeních na reálných strojích (stejně jako při předchozích měřeních v laboratorních podmínkách) bylo potvrzeno, že s rostoucím měřicím 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]. Příčiny byly popsány v příslušné kapitole o měření v laboratorních podmínkách, kde jsme se s tímto jevem také setkali.

5.1.1 Přímá závislost izolačního odporu na měřícím napětí

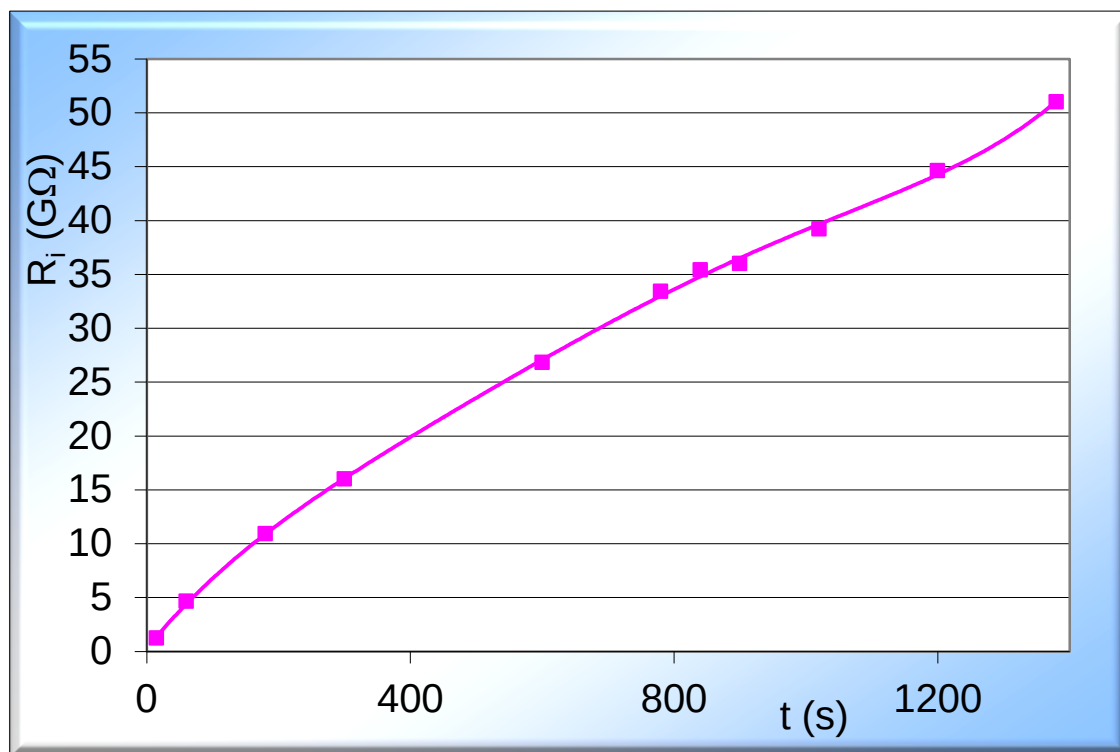


Obr. 5-1 Hodnoty naměřené přístrojem Metrel Teraohm 5kV na motoru v.č. 173 098

Na Obr. 5-1 je vyobrazen průběh, který je velmi častý u měření na reálných strojích. Příslušná tabulka hodnot ke grafu je v *Příloze L*. U většiny strojů nedojde k tomu, že by se naplno projevil pokles izolačního odporu v závislosti na napětí do doby 600s, kdy se běžně s měřením izolačního odporu končí. Na Obr. 5-1 je vidět, že k plnému projevení tohoto jevu dojde až poté, co izolační odpor při napětí 543V poklesne pod hodnotu izolačního odporu při napětí 272V. K tomu dojde až při čase zhruba 1200s. Je také nutno konstatovat, že ani po uplynutí doby 1800s (30minut) nedojde k ustálení izolačního odporu, ten i nadále stoupá. Toto měření navíc proběhlo na relativně malém motoru (560kW) a při měření na výkonnějším stroji (stroj s rozsáhlejším izolačním systémem) by se tento jev projevil ještě více.

To, že se napěťová závislost izolačního odporu na počátku měření (individuální doba podle konkrétního stroje) projevuje buď málo, nebo téměř vůbec je dáno tím, že na počátku měření dochází k intenzivnějšímu nabíjení izolace. V takovém případě je vliv napěťové závislosti izolačního odporu minoritní a projevuje se zde především schopnost zdroje měřícího přístroje dodávat do izolace energii. Tato schopnost roste s rostoucím maximálním (zkratovým) proudem přístroje a s rostoucím měřícím napětím (bude rozebráno dále v práci).

Můžeme říci, že nejvyšší vypovídací hodnotu má ustálená hodnota izolačního odporu, ke které měřený izolační odpor konverguje, ta se však v praxi neměří, neboť k jejímu dosažení by bylo, zvláště u větších strojů, třeba velmi dlouhých měření v řádech mnoha hodin. Z Obr. 5-1 je patrné, že ani u relativně malého stroje, není možné hodnotu ustáleného izolačního odporu určit ani po 30 minutách měření.



Obr. 5-2 Hodnoty naměřené přístrojem Megger BM11D na statoru budiče v.č. 034237 při měřicím napětí 500V

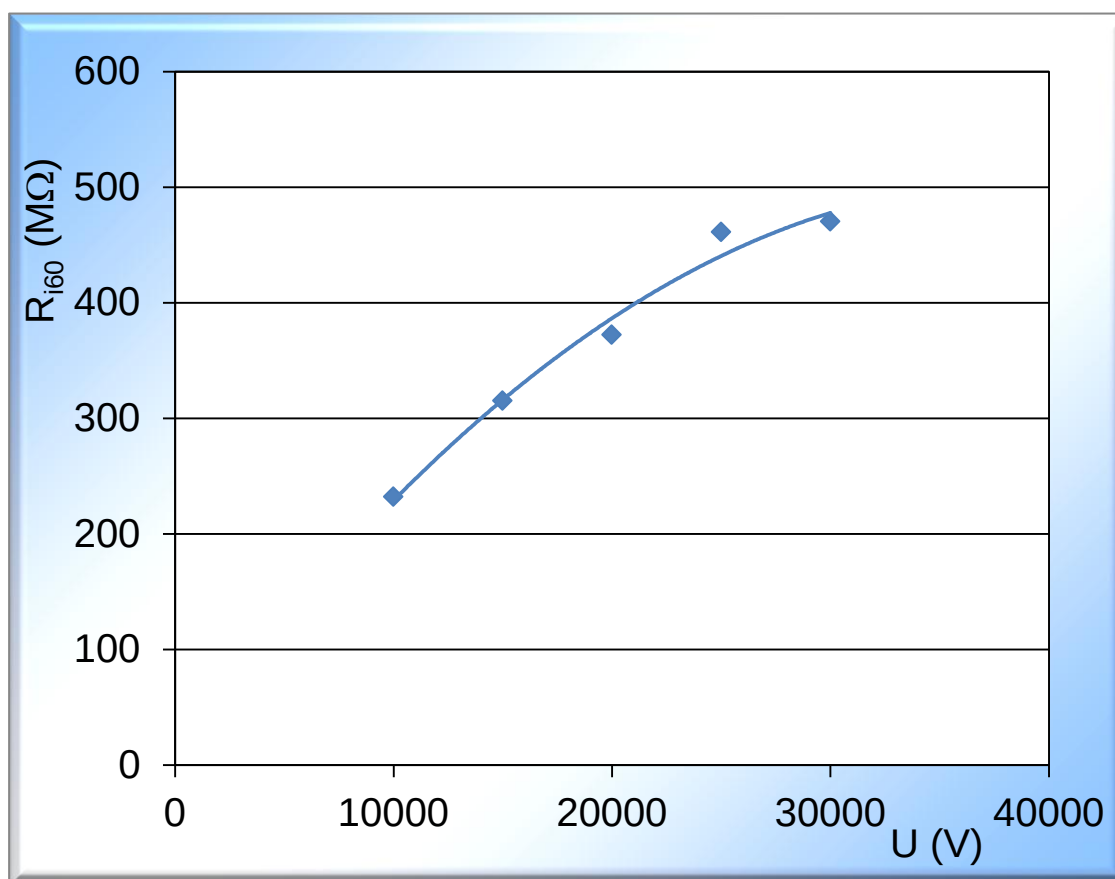
Na Obr. 5-2 je další příklad Měření izolačního odporu, přičemž je vidět, že dokonce i po uplynutí 1400s (23 minut) roste u měřeného budiče (synchronní stroj) měřený izolační odpor téměř lineárně a není tedy ani teoreticky možné určit hodnotu ustáleného izolačního odporu. Příslušná tabulka hodnot ke grafu je v *Příloze M*. Zde se také potvrzuje, že s rostoucí velikostí izolačního systému značně poroste i doba nabíjení izolace. Budič má výkon 1 500kW, tj. asi trojnásobný výkon než motor z Obr. 5-1 (a tedy i rozsáhlejší izolační systém) a na Obr. 5-2 není vůbec patrné, že by se na grafu objevilo tzv. „koleno“, které naznačuje ukončení fáze rychlého nabíjení izolace a začátek fáze pomalejšího nabíjení, při kterém se izolační odpor postupně začne blížit své ustálené hodnotě.

5.1.2 Měření na strojích – chyba vzniklá nepřesným nastavením měřícího napětí

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

Každý přístroj samozřejmě napětí nastavuje s jinou přesností. Z námi používaných přístrojů se jako dobrý ukázal přístroj Megger S1-5005, který napětí nastavovat vždy poměrně přesně, vždy s chybou do 2%, často dokonce 1% a méně. Jako poměrně nepřesný se v této oblasti ukázal přístroj Metrel Teraohm 5kV, u něž nepřesnost napětí neklesla pod 5% a někdy se dokonce dostal až téměř na 9%. Nutno podotknout, že všechny přístroje nastavovaly napětí vždy vyšší, než jim bylo nastaveno.

Tyto rozdíly napětí vyvolávají (vzhledem k napěťové závislosti izolačního odporu) otázku, jak velká chyba měření vznikne tím, že měřící přístroj nastaví jinou hodnotu napětí.



Obr. 5-3 Hodnoty napěťové závislosti izolačního odporu přepočtené z proudu, měřeno přístrojem PTS-75F5/FB, HIGH VOLTAGE Inc. na synchronním hydrogenerátoru v.č.

V předchozím grafu jsou uvedena data pro čas měření $t=60s$, je z nich patrné, že se zde projevuje vliv růstu rychlosti nabíjení s nárůstem měřicího napětí. Hodnoty pro graf na Obr. 5-3 pocházejí z [4]. Příslušná tabulka hodnot ke grafu je v *Příloze N*.

Vydeme-li z předchozí charakteristiky a budeme-li předpokládat, že velikost odchylky z jakou přístroj nastavuje naměřené napětí se nemění s napětím, obdržíme následující tabulku:

Tab. 5-1 Závislost chyby měření na napětí a odchylce nastavení měřicího napětí

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

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%.

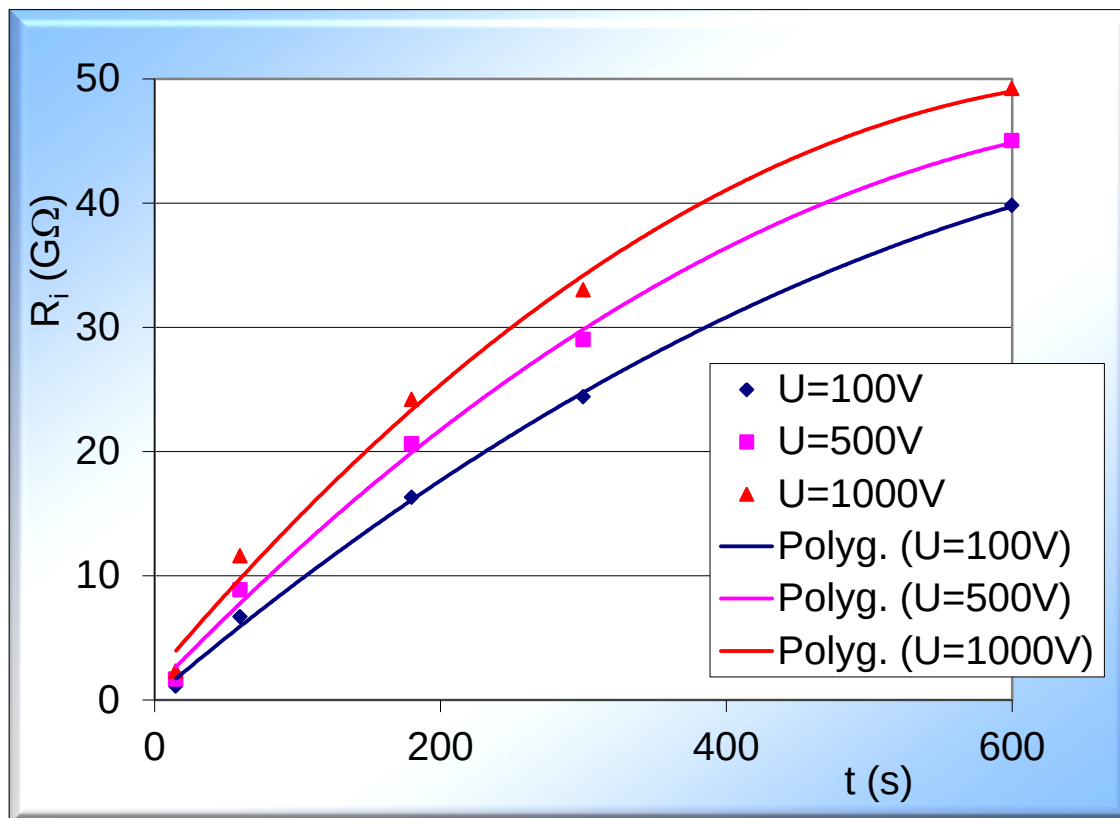
5.2 Měření na strojích – závislost naměřeného izolačního odporu na rychlosti nabíjení izolace

Z měření, která byla provedena při měřeních na reálných strojích vyplynulo, že předpoklady (ohledně závislosti měřeného izolačního odporu na rychlosti nabíjení izolace) učiněné na základě měření v laboratorních podmínkách jsou správné. Konkrétně se jedná o následující zjištěná fakta:

- rychlost nabíjení izolace se zvyšuje s rostoucím měřicím napětím
- rychlost nabíjení izolace se zvyšuje s rostoucím proudem nakrátko měřicího přístroje

Teoretické příčiny, proč se tak děje, již byly popsány v kapitole o měřeních v laboratorních podmínkách a není tedy potřeba je zde rozebírat znovu.

5.2.1 Závislost naměřených izolačních odporů na rychlosti nabíjení – vliv napětí

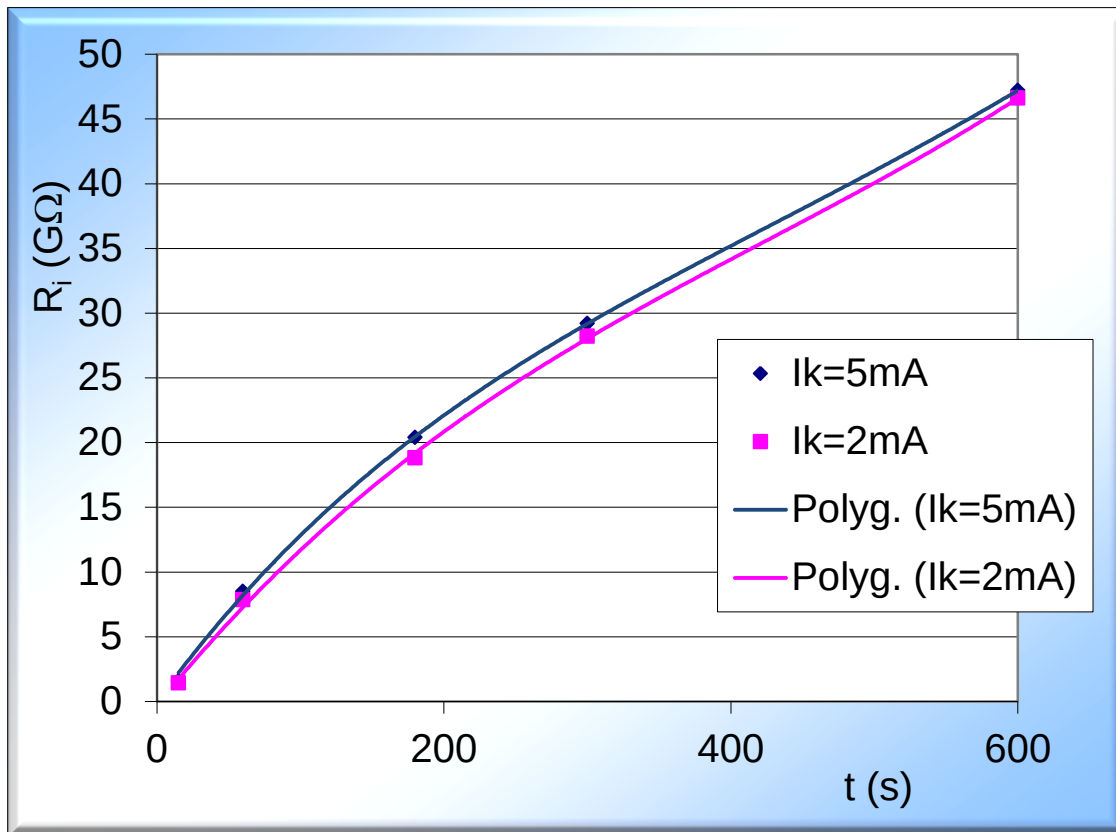


Obr. 5-4 Hodnoty naměřené přístrojem Megger S1-5005 na ponymotoru v.č. 04356 – fáze U

Na předcházejícím grafu 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.

Měření bylo prováděno na asynchronním ponymotoru o výkonu 25 000kW a nominálním napětí 10 000V. Tento stroj má velmi rozsáhlý izolační systém, a proto se u něj značně projevují všechny záležitosti související s nabíjením izolace. Příslušná tabulka hodnot ke grafu je v Příloze O. Ponymotor je pomocný rozběhový motor používaný k rozběhu hydrogenerátoru v přečerpávací elektrárně do čerpadlového režimu.

5.2.2 Závislost naměřených izolačních odporů na zkratovém proudu měřicího přístroje



Obr. 5-5 Hodnoty naměřené na ponymotoru v.č. 04356 – fáze U - přístroji Megger S1-5005 ($I_k=5\text{mA}$) a Megger BM11D ($I_k=2\text{mA}$) při napětí 500V

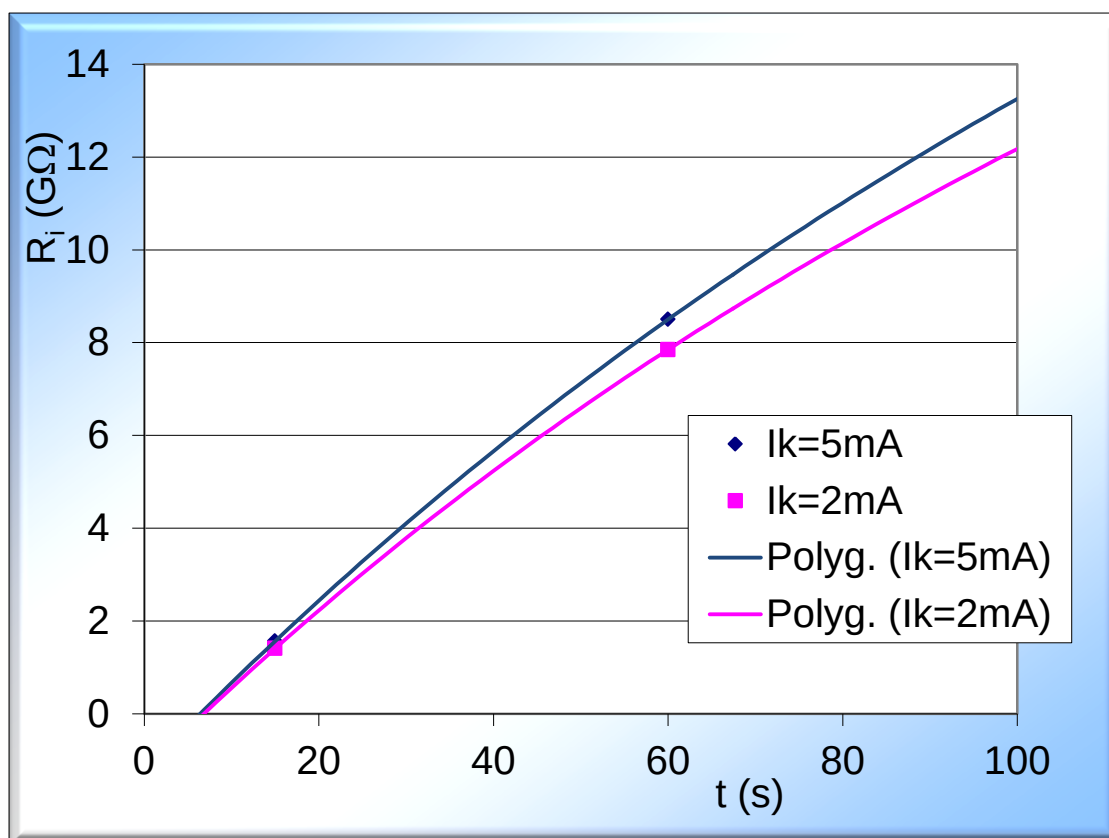
Z předcházejícího grafu je patrné, že na hodnotu naměřeného izolačního odporu má vliv i velikost zkratového (maximálního) proudu, který je měřicí přístroj schopen do měřené izolace dodat. Platí, že čím je tento proud vyšší, tím budou vyšší i naměřené hodnoty. Příslušná tabulka hodnot ke grafu je v Příloze O.

I v tomto případě se projevuje vliv velikostí stroje (rozsahu jeho izolačního systému) stejným způsobem jako u vlivu napětí na rychlost nabíjení, tj. s rostoucím rozsahem izolačního systému stoupá vliv maximálního proudu dodávaného měřicím přístrojem do izolace. Roste tedy rozdíl mezi hodnotami naměřenými na stejném stroji pomocí přístrojů s různým zkratovým (maximálním) proudem. Důvody byly již rozebrány v příslušné části kapitoly o měření v laboratorních podmínkách.

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

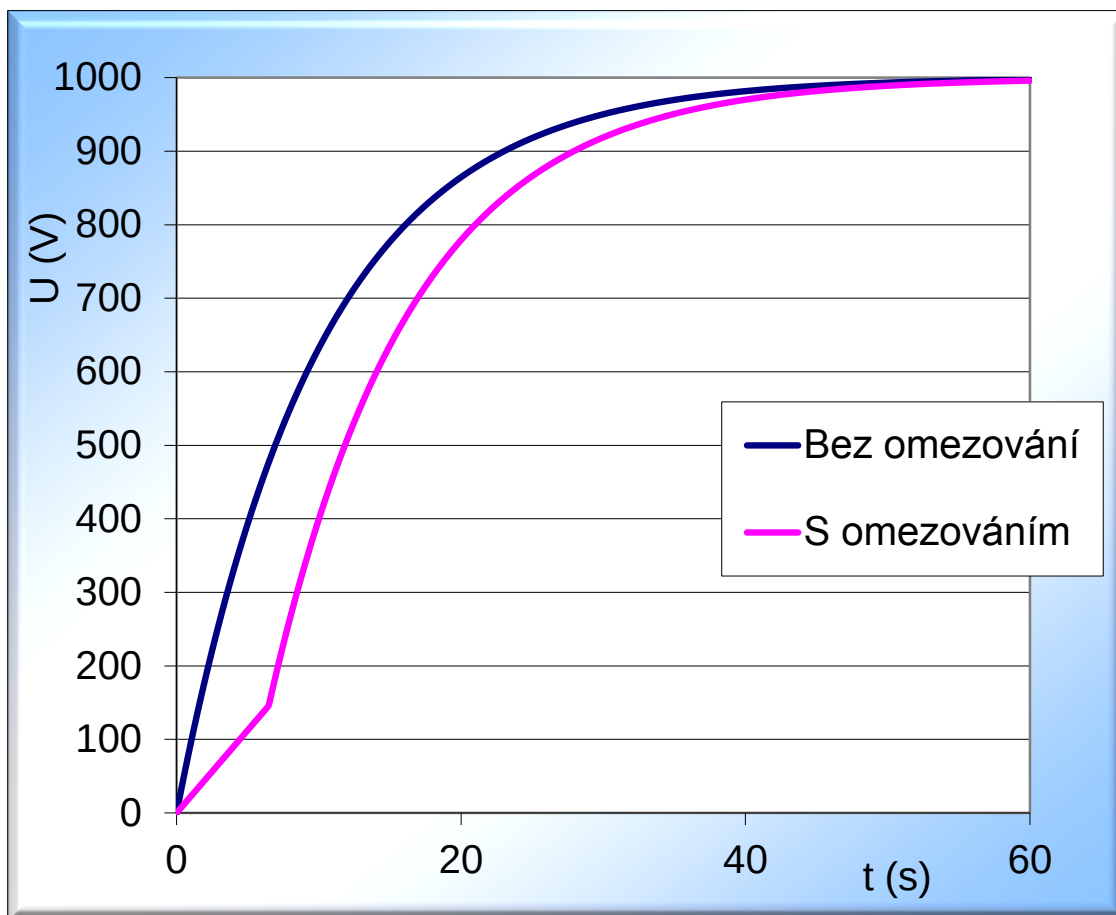
Při měření na reálných strojích bylo zjištěno, že prakticky při žádném měření nevychází rovnice popisující trend změřených dat tak, aby protínala počátek souřadnic, jak se uvažuje v teorii. To je způsobeno tím, že měřicí přístroje izolačního odporu mají omezený maximální zkratový proud. Vzhledem k tomu, 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. Vyjdeme-li ze vztahů odvozených v kapitole o vlivu měřicího přístroje na rychlost nabíjení izolace, tj. vztahy (4.12) až (4.17), zjistíme, že přístroje tímto omezením ovlivňují i výsledné naměřené hodnoty izolačních odporů.

Jev, kdy křivka odpovídající rovnici popisující trend změřených dat, neprochází počátkem souřadnic je dobře patrný na následujícím grafu. Ten je výřezem z grafu na Obr 5-5 doplněným o dopočet křivky i pro časy před změřená data (před čas $t=15$ s) až do bodu, kdy protnou osu x (hodnotu nulového izolačního odporu).

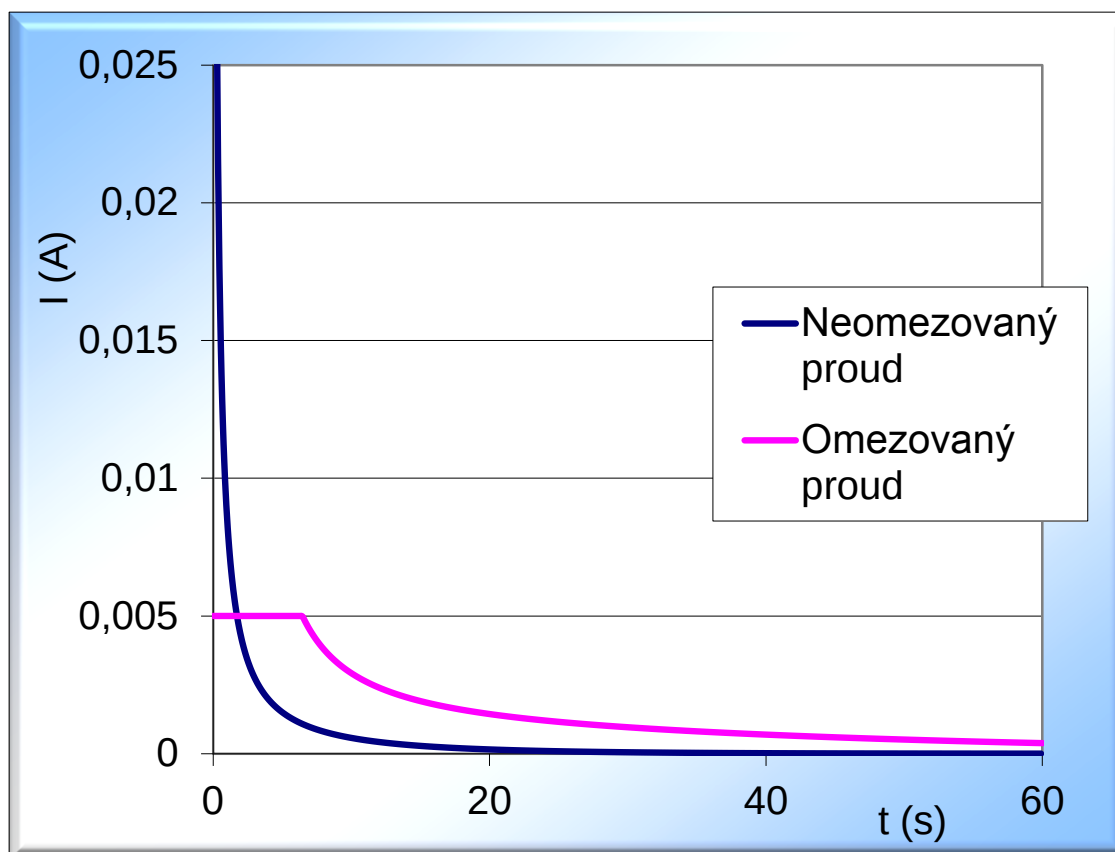


Obr. 5-6 Hodnoty naměřené a dopočtené pro ponymotor v.č. 04356 – fáze U - přístroji Megger S1-5005 ($I_k=5mA$) a Megger BM11D ($I_k=2mA$) při napětí 500V

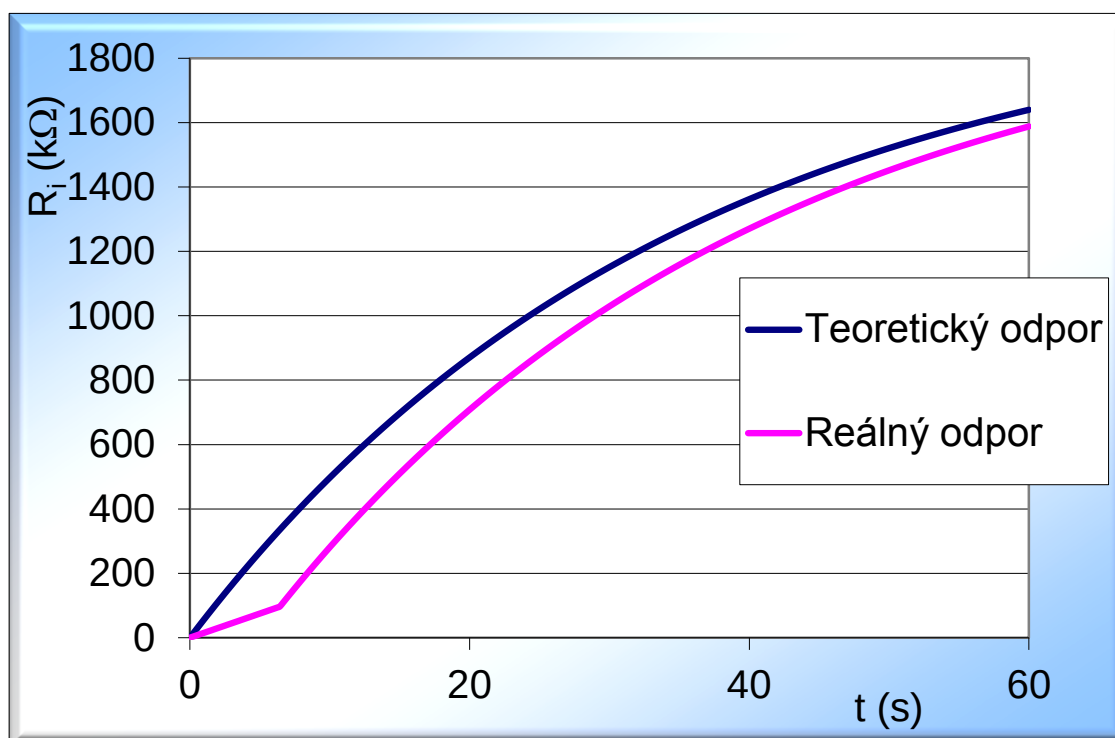
Jak již bylo zmíněno, je výše vyobrazený jev způsoben omezováním proudu pomocí omezování napětí přivedeného na měřenou izolaci. Na následujících grafech simulací je vidět průběhy proudu, napětí a izolačního odporu v případech, kdy k omezování přístrojem dochází a v případě, že nikoliv.



Obr. 5-7 Simulace průběhů napětí na izolaci v případě kdy měřicí přístroj provádí, nebo neprovádí omezování



Obr. 5-8 Simulace průběhů proudu vtékajícího do izolace v případě, kdy měřicí přístroj provádí nebo neprovádí omezování



Obr. 5-9 Simulace izolačního odporu změřeného na izolaci v případě, kdy měřicí přístroj provádí nebo neprovádí omezování

Je třeba upozornit, že v grafech Obr. 5-7 až Obr. 5-9 bylo předpokládáno, že přístroj omezuje napětí lineárním nárůstem. To však nemusí být (a ve většině případů také nebude) pravda a konkrétní průběh nárůstu napětí během omezování se může typ od typu přístroje lišit.

Na simulovaném modelu je vidět, že teoretický a reálný průběh nemají (vlivem omezování proudu na počátku měření) stejné průběhy. Totéž můžeme říci i pro reálná měření prováděná se dvěma různými typy měřících přístrojů (různě velké maximální proudy, nebo způsoby omezování). I výsledné charakteristiky dvou reálných měření pak budou rozdílné. Musíme však vzít v potaz, že:

- 1) Omezování probíhá po relativně krátkou dobu. I na reálných strojích s mohutným izolačním systémem tato doba je v řádech sekund (pod 15s).
- 2) Reálný stroj se nabíjí na ustálenou hodnotu izolačního odporu v řádech desítek, u strojů s mohutnějším izolačním systémem v řádu stovek minut.
- 3) Velikost, na kterou měřící přístroje pro měření izolačního odporu, proud omezují je v poměrně úzkém pásmu. V reálu se vyskytují přístroje s maximálním proudem od 1mA do 5mA.
- 4) Čím menší bude maximální proud dodávaný přístrojem, tím delší dobu bude přístroj provádět omezování (souvisí s množstvím energie potřebným pro nabití izolačního systému).

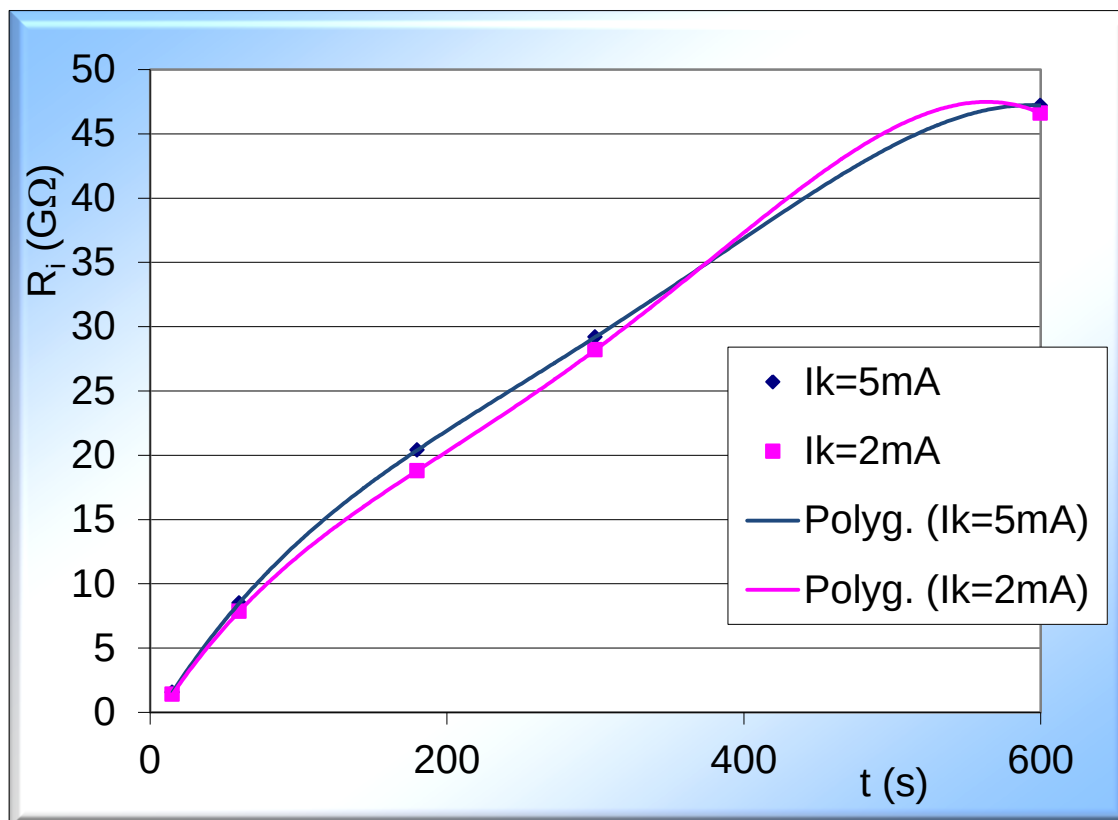
Z výše uvedeného a z reálných měření vyplývá, že pokud nebudou měření ovlivněna jinými faktory (například často nestejné hodnoty měřícího napětí), budou se reálně naměřené průběhy, pro různě velké maximální proudy, jevit jako křivky stejného tvaru, jen posunuté v ose x. Jak již bylo uvedeno v případě předchozích simulací, není toto prohlášení zcela pravdivé, z reálných měření však můžeme říci, že se mu naměřené průběhy velmi blíží.

Vydeme-li tedy z toho, že se jedná o přibližně stejné průběhy pouze posunuté 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. Při měření téže izolace v totožném stavu bychom měli obdržet dvě totožné křivky. V reálu ovšem nesmíme zapomenout, že přístroje mají svou třídu přesnosti, což se zde projeví odchylkami v průbězích křivek i po převodu hodnot na neomezený nabíjecí proud.

Je třeba si uvědomit, že k největší změně při převodu hodnot na neomezený nabíjecí proud dojde v okolí počátku souřadnic (počátek měření), jelikož tam pracujeme s poměrně malými hodnotami a proto i malá absolutní změna způsobí velkou změnu v poměrech jednotlivých izolačních odporů. Naproti tomu změny v závěru grafu (v pokročilejší fázi měření), typicky pro čas $t=600s$ budou velmi malé.

Pro to, abychom mohli provést převod hodnot na neomezený nabíjecí proud, potřebujeme znát bod, ve kterém původní charakteristika protne osu x (čas). V případě že charakteristika obsahuje i body naměřené ve fázi omezování nabíjecího proudu, je

potřeba je z charakteristik odstranit (zkreslují měření). V tabulce naměřených hodnot odečteme od každé hodnoty času hodnotu, ve které příslušná charakteristika protřela osu x , hodnoty izolačních odporů (osa y) zůstanou zachovány. Tím získáme novou tabulku hodnot a z ní novou charakteristiku, která už bude převedena na hodnotu neomezeného nabíjecího proudu, tj. bude procházet počátkem souřadnic. Příslušná tabulka hodnot ke grafu je v *Příloze O*.



Obr. 5-10 Hodnoty přepočtené na teoretický, neomezený nabíjecí proud u ponymotoru v.č. 04356 při napětí 500V

Z předchozího grafu je patrné, že hodnoty přepočtené na teoretický, neomezený nabíjecí proud spolu korespondují více než na grafu původních, nepřepočtených hodnot (Obr. 5-5).

Pro porovnání změny vyjdeme z toho, že blíže teoretickému, neomezenému nabíjecímu proudu je při praktickém měření vždy měřicí přístroj s maximálním proudem vyšším. V našem případě tedy 5mA.

Tab. 5-2 Odchylyky vypočtené pro původní hodnoty nepřepočtené na teoretický, neomezený proud u ponymotoru v.č. 04356 – fáze U

t	R _i pro 5mA	R _i pro 2mA	odchylka
[s]	[GΩ]	[GΩ]	[%]
15	1,57	1,41	10,191083
60	8,5	7,85	7,6470588
600	47,2	46,6	1,2711864

Tab. 5-3 Odchylyky vypočtené pro proložení původních hodnot polynomem 4. řádu u ponymotoru v.č. 04356 – fáze U

t	R _i pro 5mA	R _i pro 2mA	odchylka
[s]	[GΩ]	[GΩ]	[%]
15	1,57002501	1,40998883	10,19323
60	8,5000313	7,84997821	7,647655
600	47,20588	46,59686	1,290136

Pro zpracování dat je nanejvýš vhodné pracovat s celou charakteristikou, nikoliv pouze s naměřenými body. Proto je třeba tyto body proložit, abychom získali trend. Jako dostatečný, pro prokládání absorpčních charakteristik, se ukázal být polynom 4. řádu (vyžaduje-li to tvar charakteristiky, je třeba použít i polynom vyššího řádu). V předchozí tabulce jsou vyneseny odchylky pro proložení původních hodnot. Kompletní tabulka hodnot je v *Příloze P*.

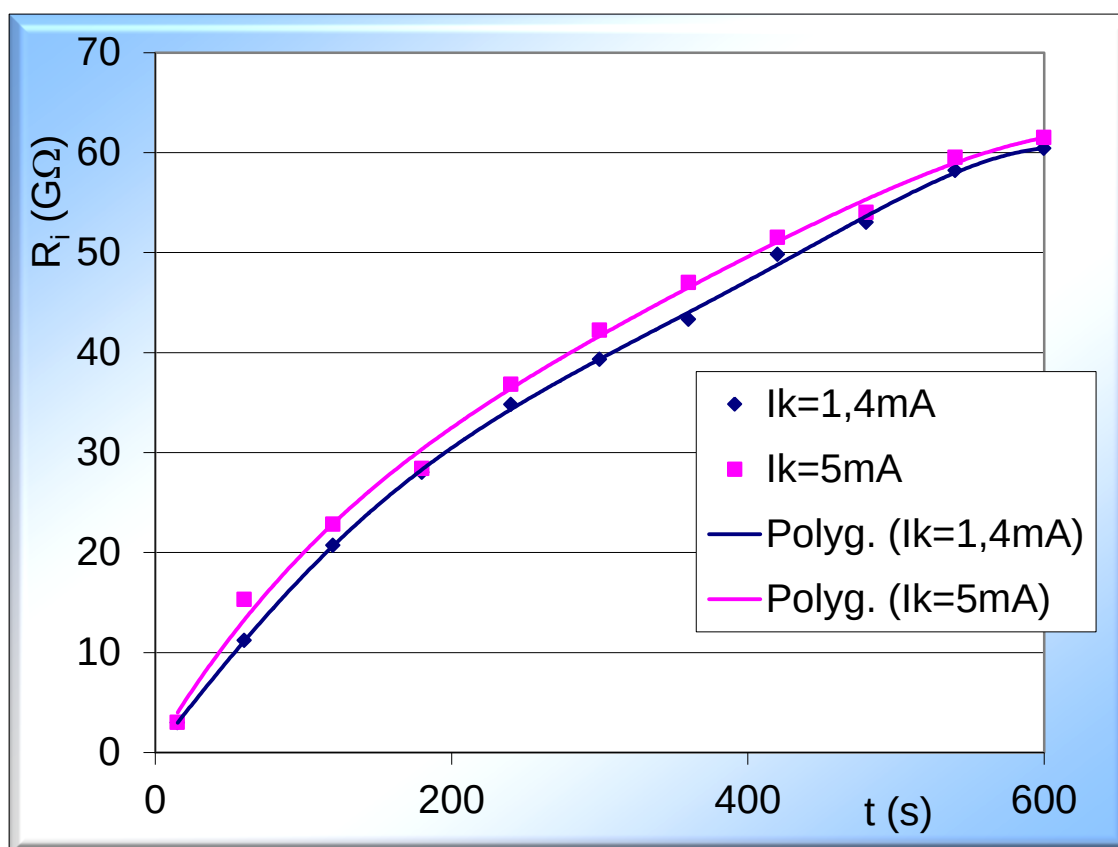
Tab. 5-4 Odchylyky vypočtené pro hodnoty přepočtené na teoretický, neomezený proud u ponymotoru v.č. 04356 – fáze U

t	R _i pro 5mA	R _i pro 2mA	odchylka
[s]	[GΩ]	[GΩ]	[%]
15	2,6756118	2,523446985	5,6871036
60	9,326635296	8,666736912	7,0754175
600	47,04936	46,24128	1,7175154

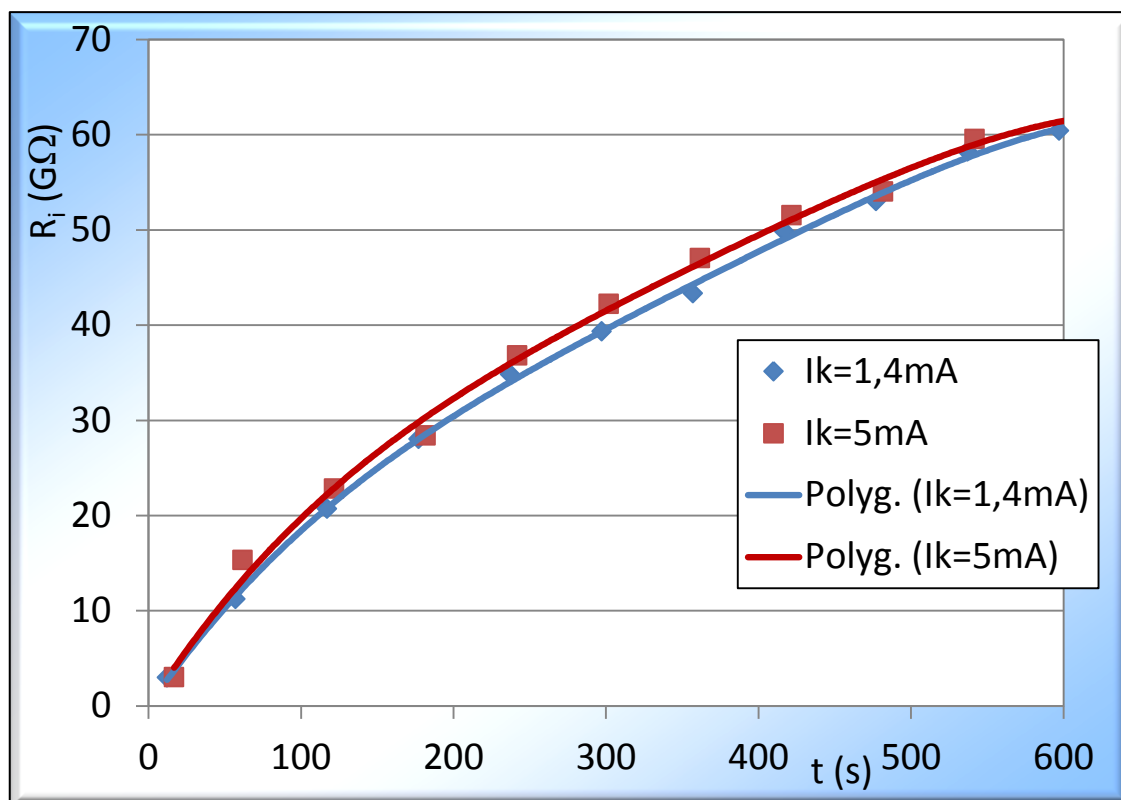
Z předcházejících tabulek je patrné, že odchylky naměřených hodnot pro různé velké maximální proudy měřících přístrojů poklesly v souladu s očekáváním po přepočtu (na teoretický, neomezený proud) především pro počátek měření, tedy pro t=15s. Kompletní tabulka hodnot je v *Příloze P*. Pro nepřepočtené hodnoty byla situace

dokonce tak špatná, že odchylka měřených hodnot přesáhla 10%, což je součet maximálních chyb měřících přístrojů (každý 5%). Po přepočtu klesla odchylka pod 5,7%, což je významné zlepšení. Mírný nárůst odchylky pro $t=600\text{s}$ byl způsoben nedostatečným počtem měřených bodů v charakteristice, což je rozebráno v samostatné části práce.

Pro lepší představu bude uveden ještě jeden příklad, který však má větší počet měřených bodů. V následujícím grafu jsou opět zobrazeny naměřené hodnoty izolačních odporů. Příslušná tabulka hodnot ke grafu je v Příloze Q.



Obr. 5-11 Hodnoty naměřené na motoru v.č. 2130 467 při napětí 1000V přístroji Megger S1-5005 ($I_k=5\text{mA}$) a Metrel Teraohm 5kV ($I_k=1,4\text{mA}$)



Obr. 5-12 Hodnoty přepočtené na teoretický, neomezený nabíjecí proud u motoru v.č. 2130 467 při napětí 1000V

I v tomto případě proběhl přepočet na hodnotu neomezeného nabíjecího proudu, tj. tak, aby charakteristiky procházely počátkem souřadnic, jak je vidět v předchozím grafu. Příslušná tabulka hodnot ke grafu je v Příloze Q.

I zde následuje výpočet odchylek pro nepřepočtené a přepočtené charakteristiky.

Tab. 5-5 Odchylky vypočtené pro původní hodnoty nepřepočtené na teoretický, neomezený proud u motoru v.č. 2130 467

t	R _i pro 5mA	R _i pro 1,4mA	odchylka
[s]	[GΩ]	[GΩ]	[%]
15	3	2,98	0,666667
60	15,3	11,2	26,79739
600	61,5	60,4	1,788618

V tomto případě se odchylka v čase $t=15s$ jeví jako velmi malá, ale je zde značná odchylka v čase $t=60s$. To je dáno jistou nekonzistencí naměřených dat (různá rychlost růstu izolačního odporu během měření). Právě z tohoto důvodu je nutné pracovat s proloženým průběhem (opět 4. řádu).

Tab. 5-6 Odchylky vypočtené pro proložení původních hodnot polynomem 4. řádu u motoru v.č. 2130 467

t	R_i pro 5mA	R_i pro 1,4mA	odchylka
[s]	[GΩ]	[GΩ]	[%]
15	4,01948215	2,73719844	31,90171
60	13,2736124	11,5662331	12,86296
600	61,484415	60,618487	1,40837

Proložený průběh již má výraznou odchylku pro $t=15s$, ale naopak značně klesla odchylka pro $t=60s$. Kompletní tabulka hodnot je v Příloze Q.

Tab. 5-7 Odchylky vypočtené pro hodnoty přepočtené na teoretický, neomezený proud u motoru v.č. 2130 467

t	R_i pro 5mA	R_i pro 1,4mA	odchylka
[s]	[GΩ]	[GΩ]	[%]
15	3,60188564	3,350037627	6,992116
60	12,9386592	12,06041076	6,787785
600	61,437768	60,73056	1,151097

Po přepočtu na teoretický, neomezený nabíjecí proud dojde ke zmenšení všech odchylek na přijatelné hodnoty. Kompletní tabulka hodnot je v Příloze Q.

Z výše uvedených dvou příkladů kromě jiného vyplývá, že pro kvalitní zpracovatelnost dat, a tedy i přepočet na teoretický, neomezený nabíjecí proud, je třeba co možná nejpřesněji určit tvar absorpční charakteristik. Toho je možné dosáhnout pouze dostatečným množstvím bodů naměřených pro jednu charakteristiku. Více v samostatné části práce.

5.3 Měření na strojích – vliv teploty měřené izolace

Již dlouhou dobu je známo, že i při zachování všech ostatních parametrů dojde, při měření téže izolace se změnou teploty, ke změně naměřeného izolačního odporu (uvedeno např. v [1]). Hodnota izolačního odporu typicky klesá s rostoucí teplotou. To nemusí platit při extrémních stavech (v praxi se prakticky nevyskytují), jako je třeba pokles teploty pod bod, při kterém některé látky přítomné v izolaci mění skupenství (voda, produkty výbojové degradace v poruchách izolace,...). Jak je uvedeno v [7], u

stroje v dobrém technickém stavu platí, že za studena má izolační odpor několikrát větší, než v teplém stavu.

Obvyklé příčiny poklesu izolačního odporu při růstu teploty:

- 1) Počet volných nosičů náboje s rostoucí teplotou roste
- 2) Se změnou teploty se mění polarizační vlastnosti materiálů
- 3) Se změnou teploty se mění rozměry na úrovni struktury látky (např. velikost krystalové mříže,...), s tím souvisí i změna hustoty izolace
- 4) Se změnou teploty se mění rozměry izolace
- 5) Se změnou teploty se mění rozměry a vlastnosti poruch v izolaci
- 6) Se změnou teploty se mění vlastnost nečistot na povrchu izolace

Každá z výše uvedených příčin poklesu izolačního odporu má vliv na tvar teplotní závislosti izolačního odporu, přičemž každý druh změn v izolaci reaguje s těmito příčinami individuálně. Důsledkem toho se pro každý druh změn v izolaci bude individuálně měnit i tvar teplotní závislosti izolačního odporu.

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

Můžeme se ale setkat i s opačným jevem, kdy některé druhy poruch mohou vyvolat stav, kdy izolační odpor zkoumaného izolačního systému bude velmi málo závislý na teplotě. To se týká především některých poruch bodového charakteru s dominantním vlivem na výsledný izolační odpor.

Určitým problémem je také to, že při nízkých teplotách (obvykle pod 30°C) již stroj velmi rychle navlhá, což způsobuje pokles jeho izolačního odporu. I z tohoto důvodu by měření mělo probíhat na stroji chlazeném z provozní teploty, přičemž izolace by měla být suchá (vysušená provozem, nebo uměle). Jak je uvedeno v [7], měření nikdy nesmí probíhat, je-li teplota stroje nižší, než je rosný bod v daném prostoru.

Je také důležité vědět, že teplotní závislost izolačního odporu se bude měnit i s časem ve kterém byla měřena. To platí nejen pro obvykle měřené časy měření izolačního odporu (15s, 60s, 600s) ale zcela obecně. Obvykle platí, že závislost izolačního odporu na teplotě je větší pro delší časy měření izolačního odporu.

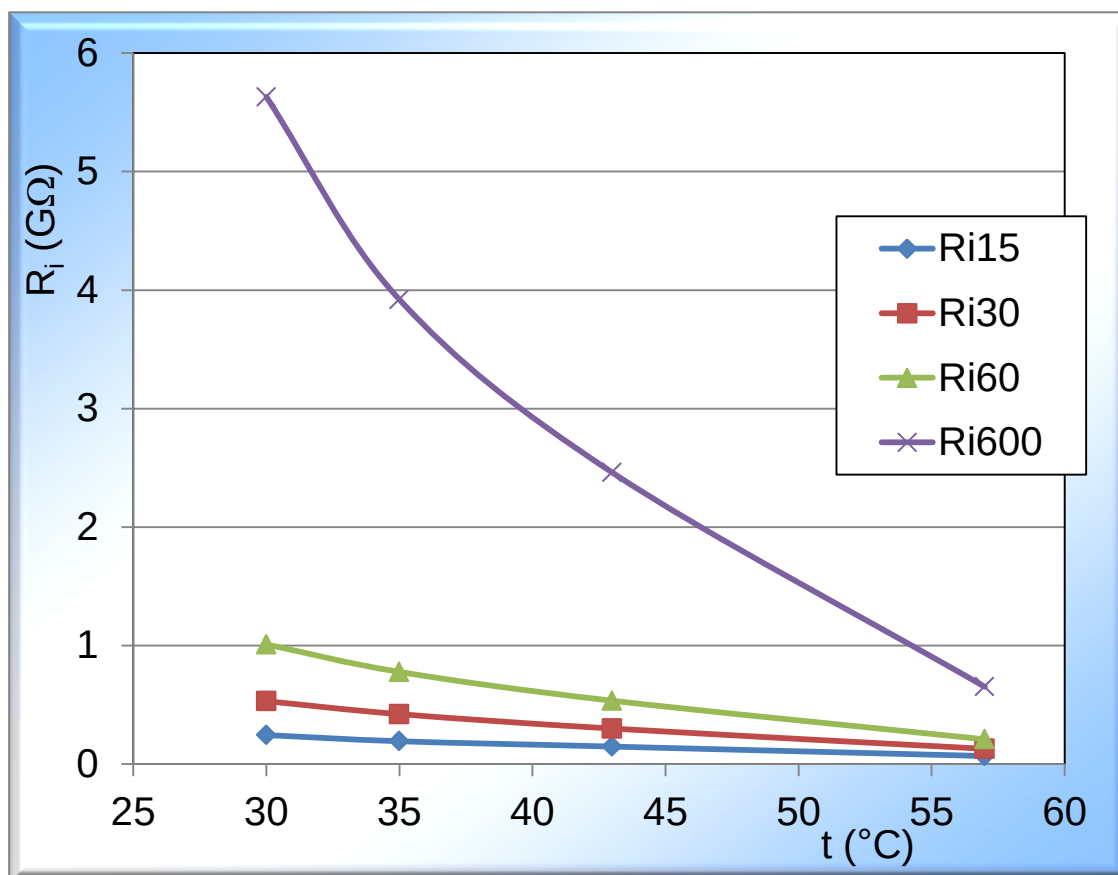
5.3.1 Určení teplotních parametrů měření izolace

Se změnou teploty měřené izolace se budou měnit i naměřené hodnoty izolačních odporů. Z toho důvodu by se měření na daném stroji měla provádět vždy při stejné (předem definované) teplotě. Optimální je, pokud takovou teplotu určí výrobce stroje. Může ale být určena i vnitřním předpisem konkrétního provozovatele měřeného stroje. Není-li měření při dané teplotě možné, měl by proběhnout přepočítání naměřených izolačních odporů na definovanou teplotu.

Dalším problémem je, že při měření, často nemívají všechny části izolace stejnou teplotu. To se typicky projevuje u strojů velkých výkonů (velké rozměry, tepelné setrvačnosti, ...). Jinou teplotu může mít izolace na dně drážky, jinou u jejího ústí (u vzduchové mezery) a zcela jinou teplotu může mít izolace na čelech vinutí. Z toho důvodu je třeba určit bod, ve kterém bude měření teploty izolace prováděno, dále metodu měření a další technické parametry. Všechny tyto parametry je poté nutno dodržovat při všech ostatních měřeních a to z důvodu porovnatelnosti měření. I zde by optimálně měl vše určit výrobce stroje (vzhledem k nejlepší znalosti konstrukce stroje), ale i zde může být stanovení postupů a parametrů provedeno provozovatelem stroje. Často se můžeme setkat například s měřením ve středu drážky pomocí měřícího prvku (čidla) integrovaného přímo ve stroji.

5.3.2 Závislost naměřených izolačních odporů na teplotě izolace

Při měřeních na reálných strojích se potvrdilo, že izolační odpor roste, klesá-li teplota měřené izolace. To je možné vidět na následujícím grafu. Příslušná tabulka hodnot ke grafu je v *Příloze R*. Hodnoty byly naměřeny na synchronním generátoru velkého výkonu. Hodnoty byly čerpány z [9].

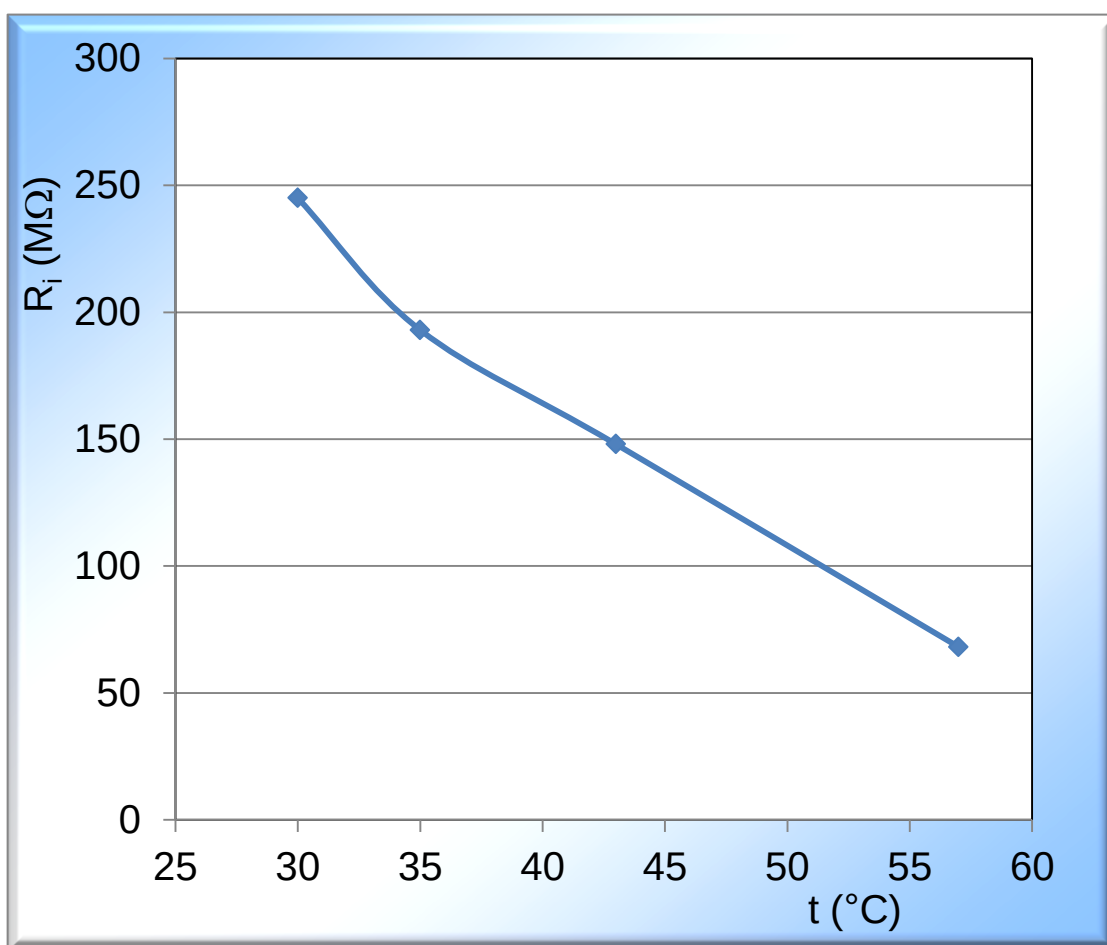


Obr. 5-13 Závislost jednotlivých izolačních odporů na teplotě měřené izolace u synchronního generátoru v.č. 33784 při napětí 5kV – fáze U

Z grafu je patrné, že závislé na teplotě jsou všechny izolační odpory, s rostoucí dobou měření však závislost výsledných odporů na teplotě značně roste. Je zcela zřejmé, že nejvíce je závislý izolační odpor měřený v čase $t=600\text{s}$ (R_{i600}).

Z grafu je také patrné, že závislost izolačního odporu na teplotě není lineární. Je možné proložit ji polynomem vyššího řádu, nebo použít proložení exponenciálou. V obou případech obdržíme výsledek velmi věrně odpovídající naměřeným datům.

Aby bylo zřejmé, že jsou značně teplotně závislé všechny izolační odpory a nejen R_{i600} , je v následujícím grafu vynesena pouze závislost na teplotě pro R_{i15} . I z tohoto grafu je zjevná značná závislost izolačního odporu na teplotě.



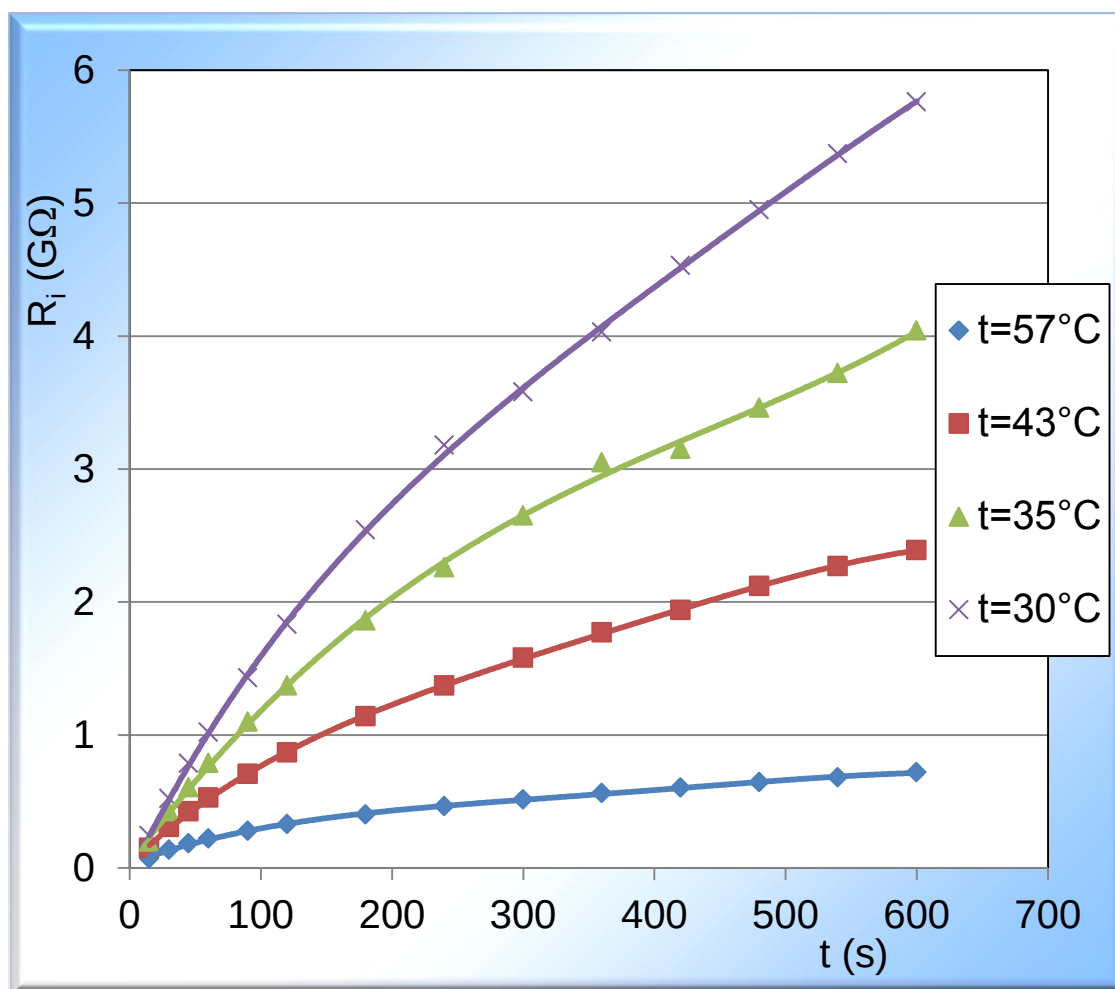
Obr. 5-14 Závislost izolačního odpor R_{i15} na teplotě měřené izolace u synchronního hydrogenerátoru v.č. 33784 při napětí 5kV – fáze U

Pro lepší představu vyneseme naměřené rozdíly naměřených hodnot při různých teplotách měřené izolace do tabulky. Jako 100% vezmeme hodnoty izolačních odporů naměřené při teplotě $t=57^{\circ}C$ a to z důvodu, že se nejvíce blíží reálným provozním podmínkám.

Tab. 5-8 Poměry vypočtené pro izolační odpory pro různé teploty měřené izolace u synchronního hydrogenerátoru v.č. 33784 při napětí 5kV – fáze U

t	Poměr R_{i15}	Poměr R_{i30}	Poměr R_{i60}	Poměr R_{i600}
[°C]	[%]	[%]	[%]	[%]
57	100	100	100	100
43	217,33	232,56	255,98	377,30
35	283,41	327,13	372,25	601,23
30	359,77	411,63	483,25	863,50

Vyjdeme-li z týchž naměřených hodnot (pro všechny odpory) a vyneseme je do grafu jako absorpční charakteristiky, obdržíme soustavu charakteristik, na kterých je vidět, že jsou značně teplotně závislé. Charakteristiky obsahují i body měřené mimo standardní doby měření.



Obr. 5-15 Změna absorpčních charakteristik vzhledem k teplotě měřené izolace u synchronního hydrogenerátoru v.č. 33784 při napětí 5kV – fáze U

Z grafu je patrné, že s klesající teplotou měřené izolace značně roste strmost růst naměřených izolačních odporů. Je však možné všimnout si částečné změny tvaru jednotlivých charakteristik, což je dáno nelineárností závislosti jednotlivých izolačních odporů na teplotě, která byla popsána v předchozí části této kapitoly.

5.4 Měření na strojích – vliv přítomnosti vlhkosti a rozpouštědel v izolaci

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.

5.4.1 Určení množství vlhkosti v izolaci

Při měřeních izolačního odporu se obvykle měří vlhkost a teplota v měřicím prostoru a teplota měřené izolace (často se za ni dosazuje ustálená teplota stroje). Měření se obvykle provádí na chladnoucím stroji, přičemž se předpokládá, že stroj, který byl právě odstaven z provozu, je zcela vysušen a vlhne rychlostí, která je úměrná rychlosti chladnutí a vlhkosti v měřicím prostoru.

Tento zjednodušující předpoklad lze však ve skutečnosti aplikovat pouze v případě, že se jedná o stroj, který byl v dlouhodobém nepřetržitém provozu (u nás například generátory v jaderných elektrárnách). Při pokusu o aplikaci na stroje, které nepracují v dlouhodobém nepřetržitém provozu, například na ty, které pracují v špičkovém provozu, toto zjednodušení selhává, protože stroj při přechodu z provozu do rezervy začíná okamžitě vlhnout, byť je stále ještě teplý (vlhne úměrně teplotě a vlhkosti okolí). Při opětovném přechodu do provozu se začne opět vysoušet. Takto pak dochází k cyklickému navlhání a vysoušení stroje, přičemž nejsme schopni určit, jaká je okamžitá reálná vlhkost ve stroji.

Skutečný stav vlhkosti v izolaci je možné určit až po odstavení a rozebrání stroje přímým měřením na izolaci. Jedná se však o destruktivní zkoušku, neboť pro její provedení je třeba alespoň malý kousek izolace ze stroje odebrat pro provedení expertízy. Z toho důvodu se obvykle přesné určování množství vlhkosti v izolaci neprovádí.

5.4.2 Určení množství rozpouštědel v izolaci

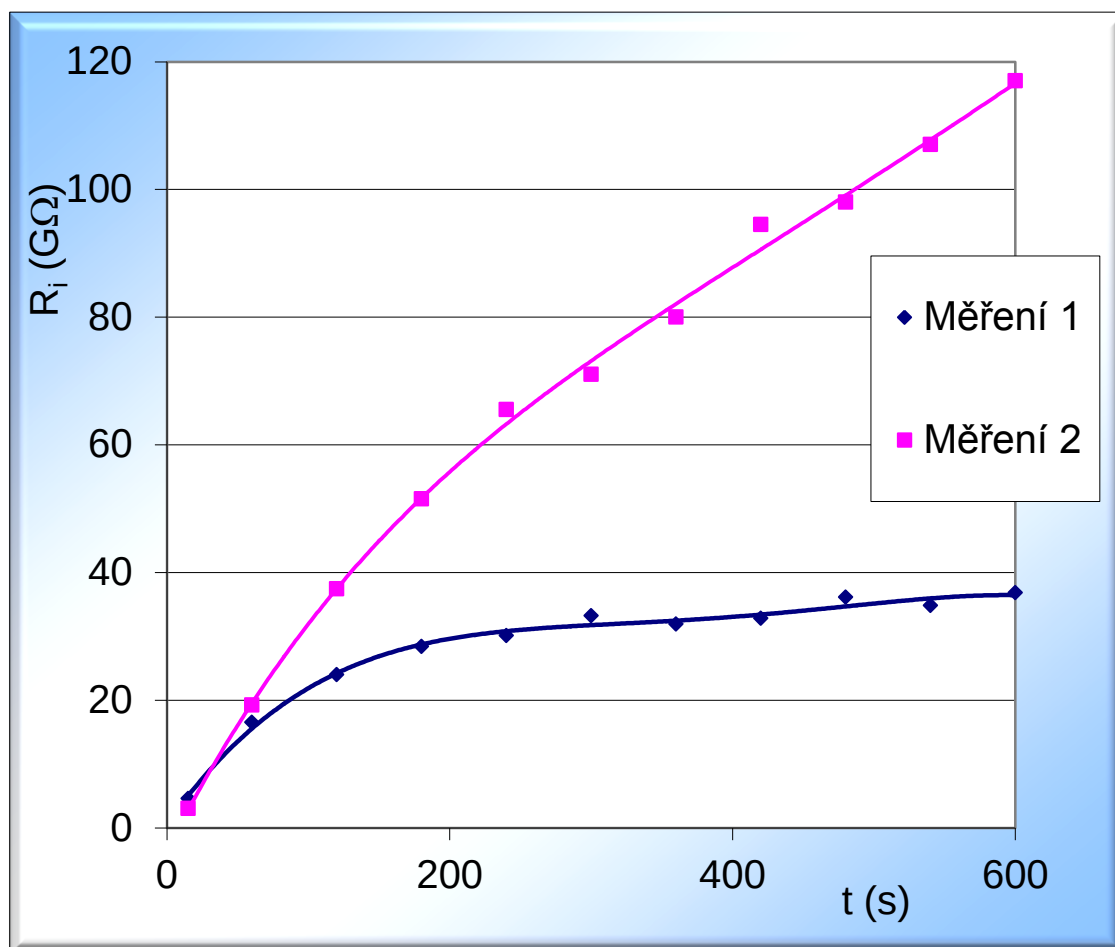
Určení množství rozpouštědel v izolaci je možné pouze na základě odběru části izolace (destruktivní zkouška) a provedení její expertízy.

Nedojde-li k zásahu do stroje, který by do něj rozpouštědla zanesl (oprava,), množství rozpouštědel v izolaci typicky pouze klesá. To je způsobeno jejich odpařováním a nepřítomností většího množství rozpouštědel ve vzduchu běžných provozů. Výjimku mohou tvořit některé provozy, kde se s rozpouštědly pracuje ve velkém (chemičky, lakovny,).

5.4.3 Vliv vlhkosti a rozpouštědel v měřené izolaci na naměřené hodnoty izolačních odporů

Během měření na reálných strojích bylo zjištěno, že obecně uváděné principy (např. [7], [11] nebo [15]) odpovídají naměřeným průběhům. To znamená, že s rostoucím množstvím vlhkosti (vody) a nebo rozpouštědel obsažených v izolaci, klesají naměřené hodnoty izolačních odporů.

Na následujícím grafu je znázorněno měření na témže stroji provedené krátce po jeho kompletním převinutí. Stroj obsahoval při prvním měření v izolaci poměrně velké množství vlhkosti (nebyl vysušen) a také rozpouštědla, která se ještě nestihla odpařit. Při druhém měření o dva dny později probíhalo na stroji již částečně vyschlém (samovolné vysychání) a s odpařenou značnou částí rozpouštědel. Příslušná tabulka hodnot ke grafu je v *Příloze S*.



Obr. 5-16 Izolační odpory naměřené na izolaci motoru v.č. 154 317 při napětí 500V, druhé měření dva dny po prvním

Jak je z předchozího grafu patrné, má množství vlhkosti a rozpouštědel přítomných v izolaci zcela zásadní vliv na naměřené hodnoty izolačních odporů (větší vliv budou mít obvykle rozpouštědla, neboť jsou větším zdrojem volných nosičů náboje). Bohužel na měřeném stroji nabylo možné určit ani obsaženou vlhkost, ani obsažené množství rozpouštědel, jelikož by musela být provedena destruktivní zkouška. Můžeme tedy mluvit pouze obecně o měření ve vlhkém stavu a o měření v částečně vysušeném stavu.

Pro lepší přehled si poměry měřených hodnot vyneseme pro vybrané časy měření do tabulky. Jako základ byly použity hodnoty naměřené na vlhké izolaci.

Tab. 5-9 Poměry vypočtené pro izolační odpory pro různé vlhkosti měřené izolace u motoru v.č. 154 317 při napětí 500V

Vlhkost	Poměr R_{i15}	Poměr R_{i60}	Poměr R_{i300}	Poměr R_{i600}
[-]	[%]	[%]	[%]	[%]
Vlhká izolace	100	100	100	100
Částečně vyschlá izolace	66,45	116,36	213,86	317,93

Z tabulky je vidět, že s rostoucím časem měření se odchylky naměřených hodnot zvyšují. Pro čas $t=600s$ dokonce dosáhne odchylka téměř 318%, to znamená, že naměřený izolační odpor na částečně vyschlé izolaci je více než třikrát vyšší než na izolaci vlhké.

Hodnoty pro $t=15s$ vykazují nižší izolační odpor pro izolaci vlhkou, než pro izolaci částečně navlhlou. To je pravděpodobně dáno nedostatečnou kvalitou měření v tomto čase (v tomto čase došlo pravděpodobně k narušení polí měřeného stroje).

Byla-li by izolace dále vysoušena uměle, rostl by izolační odpor ještě více. Vysoušení provozem u značně navlhleho stroje nelze doporučit, protože vlivem sníženého izolačního odporu by mohlo dojít k poškození, nebo dokonce ke zničení stroje. Za dodržení jistých pravidel lze provést vysoušení chodem naprázdno při sníženém napětí.

Podle [7] je možné určit, zda je izolace navlhla tím, že se provede měření izolačního odporu při obou polaritách měřícího napětí. Vlhkost se projeví tak, že při každém z měření (každé z polarit) obdržíme jiné výsledky naměřených izolačních odporů.

Jak je uvedeno např. v [14] u některých izolantů může dojít při přílišném vysoušení k objemovým změnám izolace, které jsou doprovázeny deformacemi tvaru a změnami mechanických vlastností izolace. Při takovýchto změnách můžeme logicky očekávat i změny (narušení) vnitřní struktury izolace a tudíž i pokles jejích izolačních odporů.

5.5 Měření na strojích – závislosti polarizačního indexu

Během měření na reálných strojích bylo zjištěno, že vlivem změny rychlosti nabíjení, velikosti měřícího napětí, teploty měřené izolace a obsahu vlhkosti obsažené v izolaci dochází i ke změnám polarizačních indexů.

5.5.1 Přímá závislost na napětí

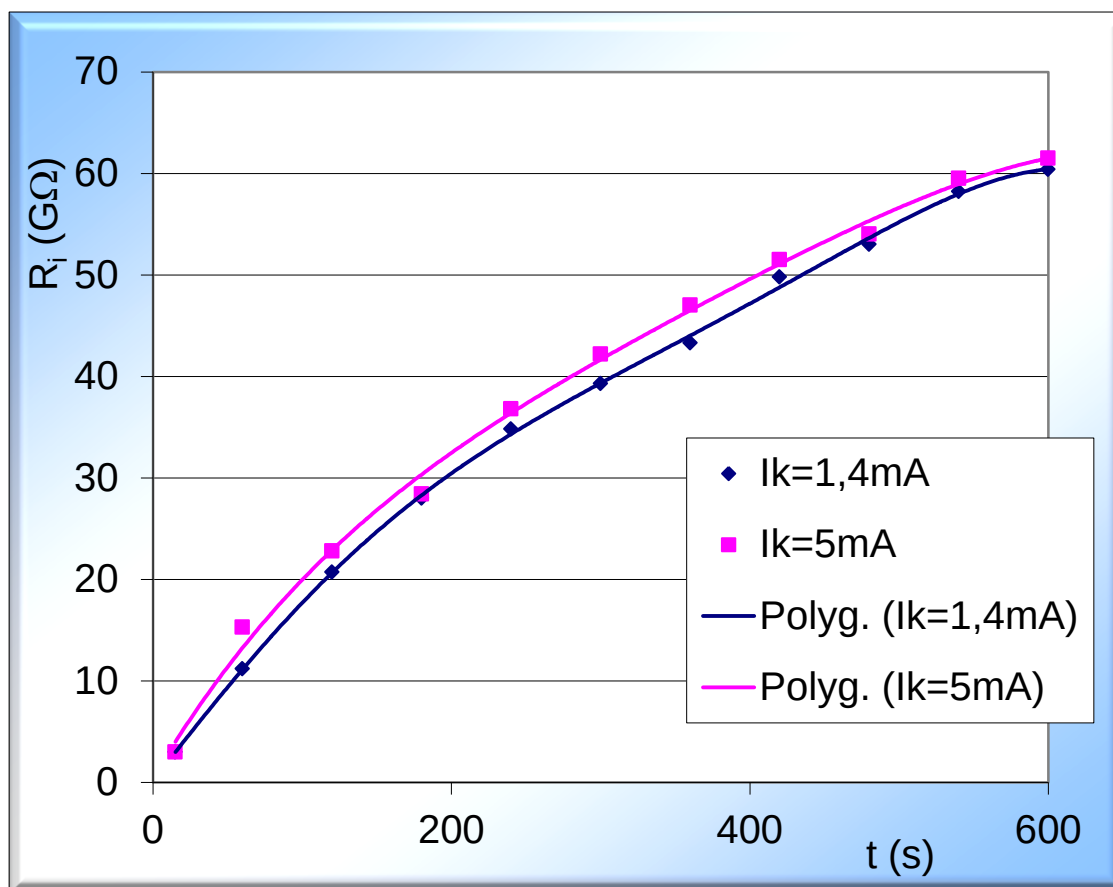
Oproti měřením v laboratorních podmínkách se při měřeních na reálných strojích projevil přímý vliv velikosti měřicího napětí (pokles izolačního odporu s růstem měřicího napětí) na zjištěných polarizačních indexech velmi málo (je minoritní obvykle pod hranicí měřitelnosti). To je dáno tím, že hodnoty 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. Aby k uplatnění tohoto vlivu došlo, muselo by dojít v daném čase (600s) k tomu, že by se izolace alespoň z větší části nabíla, ale to je u reálných strojů velmi nepravděpodobné, za normálních okolností k tomu nedochází. Existuje sice nepatrná šance, že by mohlo dojít k projevům této závislosti při měření izolačního odporu v čase 600s a tedy i k ovlivnění hodnoty polarizačního indexu p_{i600} (počítá se z izolačních odporů pro 60s a 600s), u polarizačního indexu p_{i60} však můžeme tento vliv prakticky vyloučit (počítá se z izolačních odporů pro 15s a 60s).

Co se týká dielektrického absorpčního poměru DAR, ten se bude chovat podobně jako polarizační index p_{i60} . Jeho přímá závislost na napětí může být, vzhledem k zanedbatelnému ovlivnění izolačních odporů měřených v časech $t=30s$ a $t=60s$, taktéž vyloučena

5.5.2 Závislost na rychlosti nabíjení izolace

Jako dominantní na polarizační index se při měření na reálných strojích ukázal být vliv rychlosti nabíjení izolace. Příčiny tohoto jevu již byly v předchozím průběhu práce popsány. Tato odlišnost od měření v laboratorních podmínkách, kde jsme vliv tohoto faktoru téměř nezaznamenali, je dána tím, že námi používaný model (RC člen) se vždy nabíla velmi rychle. K tomu však při měření na reálných strojích nedochází, izolace reálných strojů se naopak nabíjí velmi dlouho. Z toho plyne, že dojde-li ke změně parametrů měření (měřicí napětí, zkratový proud přístroje) tak, že dojde ke změně rychlosti nabíjení izolace, dojde i ke změně polarizačních indexů. Toho si můžeme všimnout prakticky při všech měřeních na reálných strojích.

5.5.2.1 Závislost na rychlosti nabíjení izolace – vliv zkratového proudu



Obr. 5-17 Hodnoty naměřené na motoru v.č. 2130 467 přístroji Megger S1-5005 ($I_k=5\text{mA}$) a Metrel Teraohm 5kV ($I_k=1,4\text{mA}$) při napětí 1000V

Z naměřených hodnot, které jsou zobrazeny v předchozím grafu je patrné, že použijeme-li pro měření téhož izolačního systému dva měřicí přístroje s odlišným proudem nakrátko, naměříme pomocí každého z nich poněkud odlišné hodnoty. Příslušná tabulka hodnot ke grafu je v Příloze Q. Platí, že přístrojem s větším proudem nakrátko naměříme větší izolační odpory. Logickou úvahou pak dojdeme k tomu, že změní-li se hodnoty izolačních odporů, dojde prakticky jistě i ke změně z nich vypočtených polarizačních indexů. Pro hodnoty z Obr. 5-16 jsou polarizační indexy vypočteny v následující tabulce.

Tab. 5-10 Polarizační indexy vypočtené z hodnot naměřených na motoru v.č. 2130 467 při napětí 1000V

Přístroj	-	Megger S1-5005	Metrel Teraohm 5kV	odchylka
I_k	mA	5	1,4	[%]
P_{i60}	-	5,1	4,019608	26,30609
P_{i600}	-	3,758389	5,392857	34,1638

Z tabulky je patrné, že při měření téhož izolačního systému měřicími přístroji s odlišným zkratovým proudem dojde k poměrně značné změně zjištěných polarizačních indexů. Rozdíly mezi polarizačními indexy jsou v tomto případě v desítkách procent. Dielektrický absorpční poměr nemohl být vypočten, neboť na stroji nebyly měřeny izolační odpory pro $t=30s$.

5.5.2.2 Závislost na rychlosti nabíjení izolace – vliv přepočtu zkratového proudu na teoretický, neomezený nabíjecí proud

Jak již bylo uvedeno v části práce, která se zabývala vlivem velikosti maximálního nabíjecího proudu na naměřené hodnoty izolačního odporu, je možné provést přepočet na teoretický, neomezený nabíjecí proud. Jelikož dojde k zlepšení shody hodnot naměřených izolačních odporů, mělo by dojít i ke zlepšení shody polarizačních indexů.

Dielektrický absorpční poměr již vypočítat můžeme, neboť z křivky lze odečíst i izolační odpory pro $t=30s$.

Tab. 5-11 Polarizační indexy vypočtené z proložení původních hodnot polynomem 4. řádu na motoru v.č. 2130 467 při napětí 1000V

Přístroj	-	Megger S1-5005	Metrel Teraohm 5kV	odchylka
I_k	mA	5	1,4	[%]
P_{i60}	-	3,30231904	4,225573	27,9578
P_{i600}	-	4,63207852	5,240988	13,1455
DAR	-	1,80996038	1,96216634	8,40935

Z předchozí tabulky je zřejmé, že již tím že nebudeme pracovat s přímo naměřenými hodnotami, ale použijeme jejich proložení trendem (polynom 4. řádu), se situace s polarizačními indexy o něco zlepší. Zde je vidět výrazný pokles odchylky u polarizačních indexů P_{i600} naměřených různými přístroji. Dielektrický absorpční poměr

DAR nemáme s čím porovnávat, protože jsme neměli přímo měřené hodnoty pro jeho výpočet.

Tab. 5-12 Polarizační indexy vypočtené pro hodnoty přepočtené na teoretický, neomezený proud na motoru v.č. 2130 467 při napětí 1000V

Přístroj	-	Megger S1-5005	Metrel Teraohm 5kV	odchylka
I_k	mA	5	1,4	[%]
p_{i60}	-	3,59219044	3,600082179	0,21969
p_{i600}	-	4,74838754	5,035529984	6,04716
DAR	-	1,86277492	1,865633968	0,15348

Z předcházející tabulky je zřejmé, že po přepočtu izolačních odporů na teoretický, neomezený nabíjecí proud, dojde k razantnímu snížení odchylek mezi polarizačními indexy (p_{i60} i p_{i600}) vypočtenými z hodnot vycházejících z měření prováděných jednotlivými přístroji. Totéž platí i pro dielektrický absorpční poměr DAR. Zvláště u p_{i60} je rozdíl extrémní (přibližně 0,22% místo 26,31%, tj. přibližně 120 krát menší odchylka), ale i u p_{i600} je rozdíl velký (p_{i600} je 6,05% místo 34,16%, tj. přibližně 5,6 krát menší odchylka).

Pro dielektrický absorpční poměr DAR můžeme porovnávat pouze s hodnotou vypočtenou po proložení a v tom případě je, že Dar je 0,15% místo 8,41%, tj. přibližně 54,79 krát menší odchylka. Je vidět, že i v tomto případě (podobně jako pro jako u p_{i60}) je rozdíl obrovský.

Provedeme-li totožný postup i pro druhé měření, které bylo rozebíráno v kapitole o vlivu velikosti maximálního nabíjecího proudu na naměřené hodnoty izolačního odporu, tj. měření na ponymotoru v.č. 04356 (Tab. 5-2 až Tab. 5-4), obdržíme následující.

Tab. 5-13 Polarizační indexy vypočtené z hodnot naměřených na ponymotoru v.č. 04356 – fáze U při napětí 500V

Přístroj	-	Megger S1-5005	Megger BM11D	odchylka
I_k	mA	5	2	[%]
p_{i60}	-	5,414012739	5,567375887	2,8327076
p_{i600}	-	5,552941176	5,936305732	6,9038109

V tomto případě je vidět, že již počáteční odchylky polarizačních indexů nejsou tak velké, jako v předchozím případě. To může být dáno mnoha faktory, od menšího rozdílu maximálních nabíjecích proudů, přes mohutnost izolačního systému měřeného

stroje, až po podmínky konkrétního měření. To, že jsou rozdíly v tomto konkrétním případě menší, nijak nevylučuje použít i zde přepočet izolačních odporů na teoretický, neomezený nabíjecí proud a pokusit se i tyto rozdíly ještě snížit. Základním požadavkem totiž je, aby byla měření vždy co nejpřesnější.

Ani v tomto případě nebyly k dispozici hodnoty izolačních odporů přímo naměřených na stoji pro čas $t=30s$.

Tab. 5-14 Polarizační indexy vypočtené z proložení původních hodnot polynomem 4. řádu na ponyptoru v.č. 04356 – fáze U při napětí 500V

Přístroj	-	Megger S1-5005	Megger BM11D	odchylka
I_k	mA	5	2	[%]
p_{i60}	-	5,41394642	5,56740455	2,8345
p_{i600}	-	5,55361249	5,93592221	6,88398
DAR	-	2,07167877	2,07260658	0,04479

I v tomto případě proběhlo proložení naměřených bodů trendem, který byl realizován pomocí polynomu 4. řádu. I v tomto případě došlo již tímto proložení k zmenšení odchylky p_{i600} , byť v tomto případě je zlepšení již velmi malé. Dielektrický absorpční poměr DAR nemáme s čím porovnávat, protože jsme neměli přímo měřené hodnoty pro jeho výpočet. Tak malá odchylka je ale spíše náhodná.

Tab. 5-15 Polarizační indexy vypočtené pro hodnoty přepočtené na teoretický, neomezený proud na ponymotoru v.č. 04356 – fáze U při napětí 500V

Přístroj	-	Megger S1-5005	Megger BM11D	odchylka
I_k	mA	5	2	[%]
p_{i60}	-	3,485795396	3,434483452	1,4720297
p_{i600}	-	5,044623115	5,335489062	5,7658608
DAR	-	1,826984892	1,810081911	0,9251845

Z předcházející tabulky je zřejmé, že po přepočtu izolačních odporů na teoretický, neomezený nabíjecí proud, dojde k snížení odchylek mezi polarizačními indexy (p_{i60} i p_{i600}) vypočtenými z hodnot vycházejících z měření prováděných jednotlivými přístroji. Snížení odchylek sice není tak razantní jako v předchozím případě, ale rozhodně není zanedbatelné. U p_{i60} je rozdíl větší (přibližně 1,47% místo 2,83%, tj. přibližně 1,93 krát menší odchylka), ale i u p_{i600} je rozdíl patrný (5,77% místo 6,9%, tj. přibližně 1,2 krát menší odchylka). Co se týká DAR, u toho došlo k nárůstu odchylky. To je však dáno velmi malou hodnotou již při použití hodnot odečtených z prokladu měřených bodů.

Problém je zřejmě způsoben malým počtem měřených bodů v charakteristice, a tedy charakteristikou ne zcela odpovídající technicko-fyzikální realitě izolačního systému.

I v druhém případě tedy můžeme říci, že použití přepočtu izolačních odporů na teoretický, neomezený nabíjecí proud zmenšilo odchylky mezi polarizačními indexy vypočtenými z hodnot měřených různými přístroji a tedy zlepšilo jejich porovnatelnost. To je důležité především v technické praxi, neboť stroje nejsou vždy měřeny týmiž měřicími přístroji po celou svou životnost (už proto, že životnost strojů je delší než životnost měřících přístrojů) a je tedy nutné používat metody, které vliv měřících přístrojů na výsledné hodnoty když ne eliminují, tak alespoň minimalizují.

5.5.2.3 Závislost na rychlosti nabíjení izolace – vliv měřicího napětí

Jak již bylo odvozeno v kapitole o chybě měření izolačního odporu vzniklé nepřesným nastavením měřicího napětí, 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_{i60} , 30s a 60s pro DAR), je zřejmé, že se změnami naměřených izolačních odporů dojde i ke změně polarizačních indexů, které jsou z nich vypočteny.

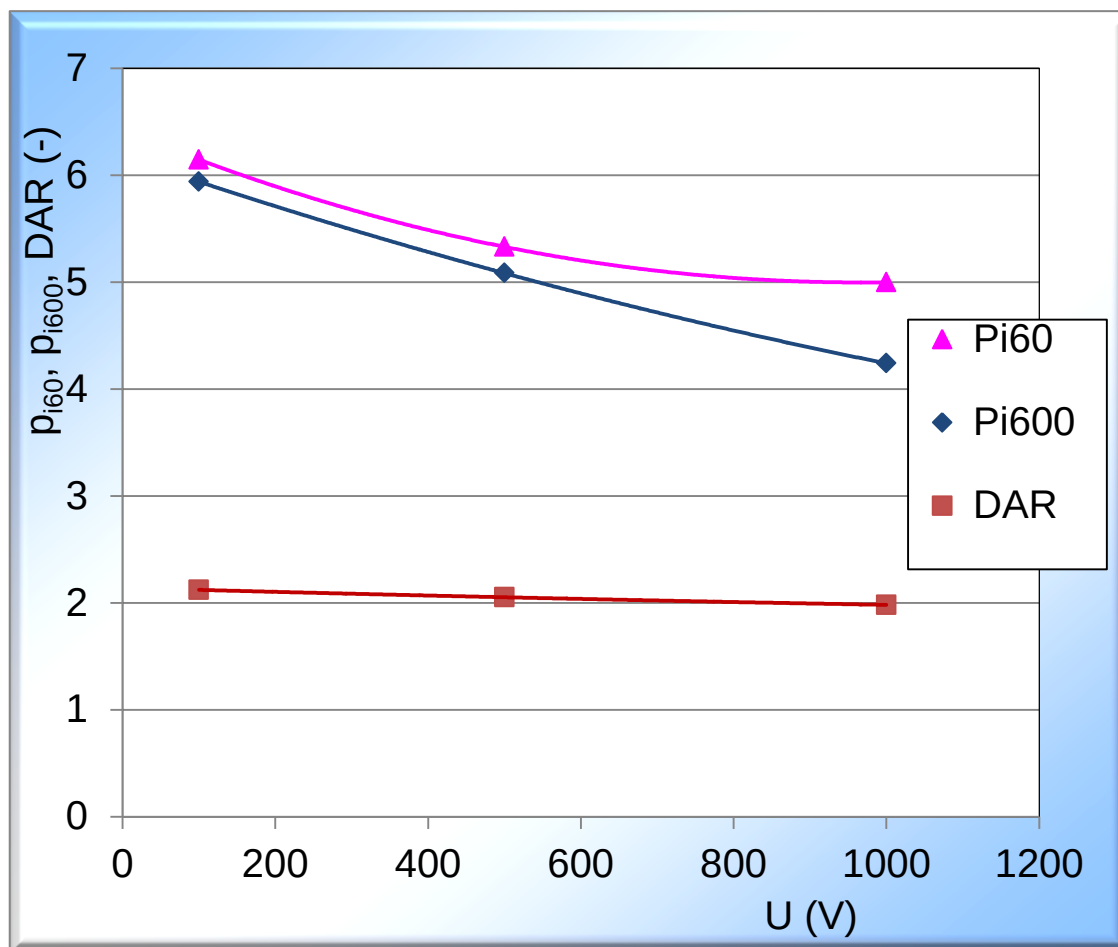
Tab. 5-16 Závislost polarizačních indexů na měřícím napětí u ponymotoru v.č. 04356 – fáze W (přístroj Megger S1-5005)

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	6,146789	5,940299	2,122438082
500	1,66	4,31	8,85	45	5,331325	5,084746	2,053536034
1000	2,32	5,85	11,6	49,2	5	4,241379	1,98239687

Z předcházející tabulky je zřejmé, že vypočtené polarizační indexy i dielektrický absorpční poměr jsou, obdobně jako naměřené izolační odpory, závislé na hodnotě měřicího napětí.

Hodnoty izolačních odporů pro čas $t=30s$ nebyly na stroji reálně měřeny. Jedná se o hodnoty dopočtené z proložení absorpčních charakteristik pro jednotlivá napětí. Pro proložení bylo použito polynomů 4. řádu.

Mnohem zřetelněji však vše bude vidět v následujícím grafu.



Obr. 5-18 Závislost polarizačních indexů na napětí u ponymotoru v.č. 04356 – fáze W (Megger S1-5005) – charakteristiky přímo z měřených hodnot

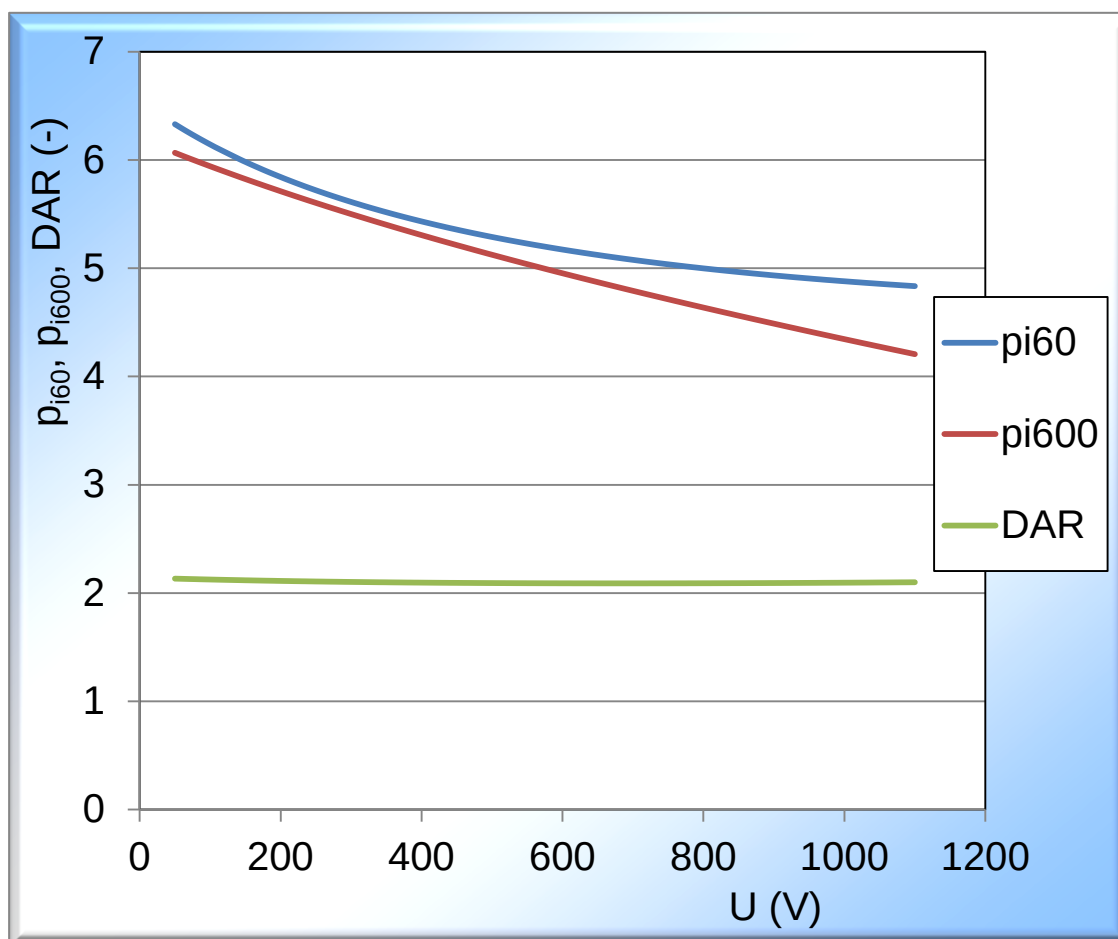
Z předchozího grafu můžeme odvodit že:

- 1) Polarizační indexy p_{i60} , p_{i600} i dielektrický absorpční poměr s rostoucím měřicím napětím klesají.
- 2) Polarizační index p_{i600} klesá s rostoucím napětím rychleji (vykazuje větší změnu), než polarizační index p_{i60} . Dielektrický absorpční poměr klesá pouze velmi mírně.
- 3) U obou polarizačních indexů je změna jejich hodnot se změnou měřicího napětí natolik velká, že ji není možné zanedbat.
- 4) U dielektrického absorpčního poměru je změna natolik malá, že ji je možné zanedbat např. u orientačních měření. Je však zároveň natolik velká, že ji není možné zanedbat při měřeních přesných.

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.

Pro potřeby určení závislosti chyby polarizačních indexů na nepřesnosti nastavení měřicího napětí byly určeny závislosti izolačních odporů na napětí (příslušná tabulka hodnot ke grafu je v *Příloze T*) a následně byly z těchto závislostí vypočteny polarizační indexy p_{i60} a p_{i600} . Vyšli jsme ze stejných hodnot jako v předchozím grafu. Takto získané charakteristiky (proklad polynomem 4. řádu) byly následně vyneseny do grafu, který následuje.



Obr. 5-19 Závislost polarizačních indexů na napětí u ponymotoru v.č. 04356 – fáze W (Megger S1-5005) – charakteristiky ze závislostí izolačních odporů na napětí

Pro následující výpočet chyb byly, stejně jako v případě chyb způsobených nepřesným nastavením měřicího napětí při měření izolačního odporu, použity

předpokládané odchylky, které vycházejí z maximálních a běžných odchylek, které byly zaznamenány během měření na reálných strojích s pomocí Metrel Teraohm 5kV. Maximální odchylka byla téměř 9%, běžná odchylka byla 5%. Na přístroji Megger S1-5005 byly zaznamenány odchylka 2% a menší, proto byla do výpočtů zahrnuta i odchylka měřicího napětí o hodnotě 3%.

Tab. 5-17 Závislost chyby polarizačního indexu p_{i60} na odchylce nastavení měřicího napětí

U	Odchylka nastavení	3%	5%	9%
[V]	Chyba	[%]	[%]	[%]
100	-	0,168491	0,27998	0,500971
500	-	0,359522	0,593011	1,045705
1000	-	0,294733	0,482356	0,837408

Tab. 5-18 Závislost chyby polarizačního indexu p_{i600} na odchylce nastavení měřicího napětí

U	Odchylka nastavení	3%	5%	9%
[V]	Chyba	[%]	[%]	[%]
100	-	0,122203	0,203459	0,365469
500	-	0,512761	0,852073	1,524799
1000	-	0,967539	1,607587	2,876272

Tab. 5-19 Závislost chyby dielektrického absorpčního poměru DAR na odchylce nastavení měřicího napětí

U	Odchylka nastavení	3%	5%	9%
[V]	Chyba	[%]	[%]	[%]
100	-	0,02136	0,035489	0,063484
500	-	0,02064	0,033272	0,055905
1000	-	0,053482	0,091254	0,171715

Z předchozích tabulek je zřejmé, že:

- 1) S rostoucí nepřesností nastavení měřicího napětí roste i chyba polarizačních indexů a dielektrického absorpčního poměru (byť ne tak rychle, jako při měření izolačních odporů)
- 2) Nelze říct, že by s rostoucí hladinou měřicího napětí chyba polarizačních indexů nebo dielektrického absorpčního poměru vždy rostla (je patrné u p_{i60} a DAR).
- 3) Obvykle bude k chybě způsobené nepřesností nastavení měřicího napětí náchylnější polarizační index p_{i600} . Toto však nemusí platit vždy, neboť bude záviset na mohutnosti izolačního systému měřeného stroje a rychlosti jeho nabíjení.
- 4) Vzhledem k velikostem chyb můžeme říct že, především při vyšších měřicích napětích, není možné zanedbat chyby polarizačních indexů způsobené nepřesností nastavení měřicího napětí.
- 5) Vzhledem k poměrně malé odchylce dielektrického absorpčního poměru v závislosti na nepřesnosti nastavení měřicího napětí můžeme o zanedbání tohoto vlivu uvažovat. Je však třeba vždy výpočtem charakteristiky závislost DAR na napětí prokázat, že DAR je dostatečně málo závislý (je individuální pro každý izolační systém).
- 6) Dielektrický absorpční poměr je napětěově o dosti méně závislý než polarizační indexy. To je dáno tím, že je vypočten z izolačních odporů, které jsou měřeny v kratším časovém intervalu od sebe. Tyto hodnoty budou mít podobnější napětěovou závislost než hodnoty měřené s větším časovým odstupem od sebe (např. u p_{i600}). Vzhledem k tomu, že se hodnoty izolačních odporů R_{i30} a R_{i60} budou měnit se změnou napětí podobně, jejich poměr (tedy DAR) se bude měnit velmi málo.

5.5.4 Celková závislost polarizačních indexů na napětí

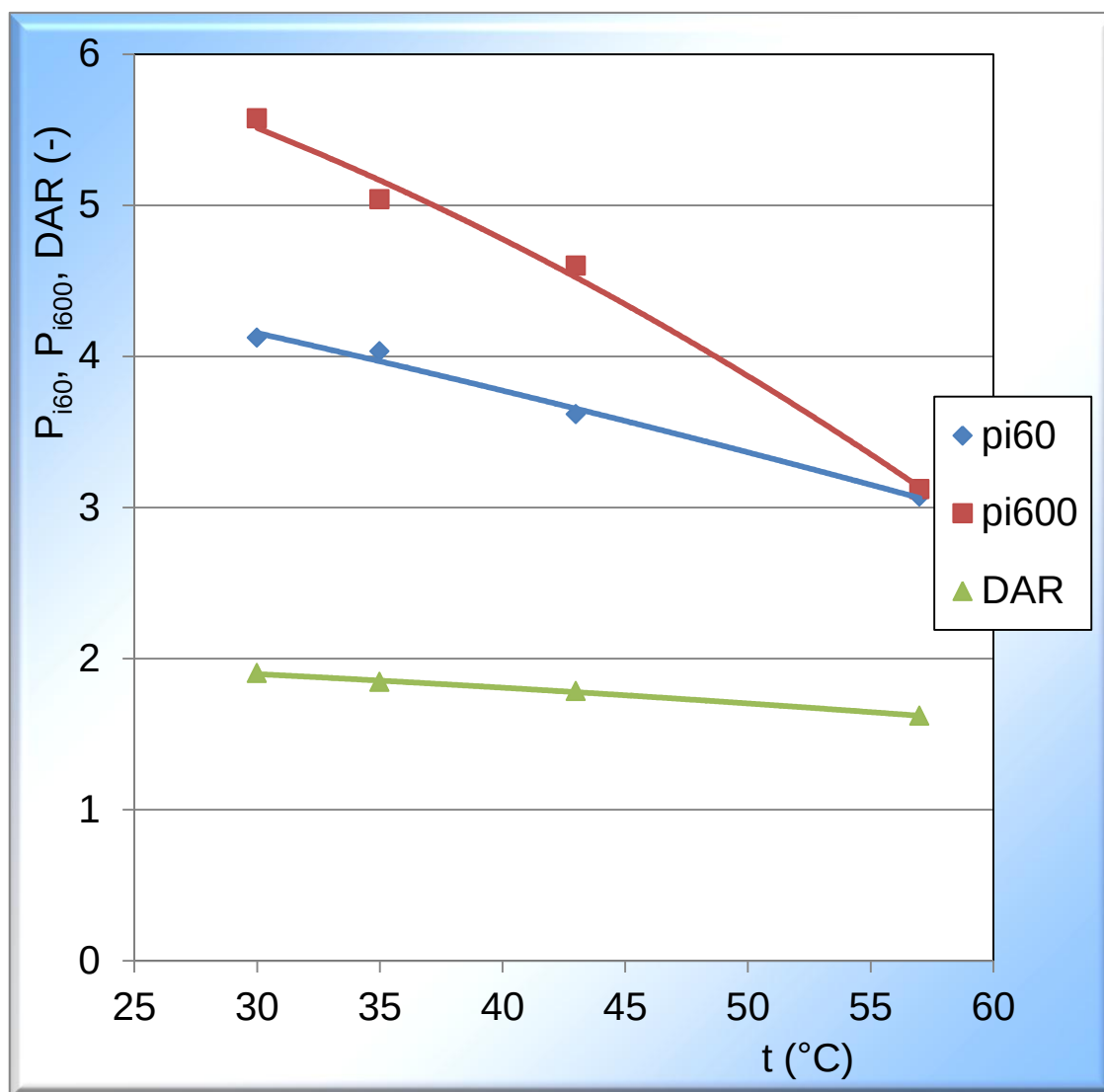
Z toho, co již bylo v práci uvedeno, můžeme odvodit, že bude platit:

- 1) S rostoucím rozsahem izolačního systému stroje bude na napětí více závislý polarizační index p_{i600} .
- 2) S klesajícím rozsahem izolačního systému stroje bude na napětí více závislý polarizační index p_{i60} .
- 3) Se změnou rozsahu izolačního systému stroje se bude měnit i závislost dielektrického absorpčního poměru DAR. Změna však bude menší než u polarizačních indexů.
- 4) Totéž platí pro závislost chyb polarizačních indexů a dielektrického absorpčního poměru v závislosti na odchylce napětí.

5.5.5 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. Závislost polarizačních indexů p_{i60} , p_{i600} i dielektrického absorpčního poměru DAR je patrná z následujícího grafu. Příslušná tabulka hodnot izolačních odporů ke grafu je v Příloze R.



Obr. 5-20 Závislost polarizačních indexů na teplotě měřené izolace u synchronního hydrogenerátoru v.č. 33784 při napětí 5kV – fáze U – charakteristiky přímo z měřených hodnot

Jak je z předchozího grafu patrné, nejvíce je na teplotě měřené izolace závislý polarizační index p_{i600} . Polarizační index p_{i60} je závislý o něco méně, ale rozhodně je třeba jeho závislost brát vždy v potaz. Dielektrický absorpční poměr DAR je teplotně závislý nejméně, tentokrát však rozhodně nelze prohlásit (na rozdíl třeba od závislosti na napětí), že jeho závislost můžeme zanedbat.

Obecně lze říci, že polarizační indexy klesají s rostoucí teplotou měřené izolace. Toto zjištění odpovídá tvrzení uvedeném v [7].

Abychom získali lepší představu, jak velký vliv má změna teploty měřené izolace na vypočtené polarizační indexy, vyneseme si odchylky do přehledné tabulky. Jako 100% vezmeme hodnoty izolačních odporů naměřené při teplotě $t=57^{\circ}\text{C}$ a to z důvodu, že se nejvíce blíží reálným provozním podmínkám.

Tab. 5-20 Poměry vypočtené pro polarizační indexy pro různé teploty měřené izolace u synchronního hydrogenerátoru v.č. 33784 při napětí 5kV – fáze U

t	Poměr p_{i60}	Poměr p_{i600}	Poměr DAR
[$^{\circ}\text{C}$]	[%]	[%]	[%]
57	100	100	100
43	117,7858	147,3941	110,0718
35	131,3479	161,5121	113,7917
30	134,3248	178,684	117,4006

Z tabulky je vidět, že při snížení teploty měřené izolace o 27°C vzroste polarizační index p_{i600} téměř o 79%, naopak dielektrický absorpční poměr DAR vzroste pouze o něco málo více než 17%. Je tedy zcela zřejmé, že odchylky jsou natolik velké, že je není možné zanedbat.

5.5.6 Závislost polarizačních indexů na množství vlhkosti a rozpouštědel obsažených v měřené izolaci

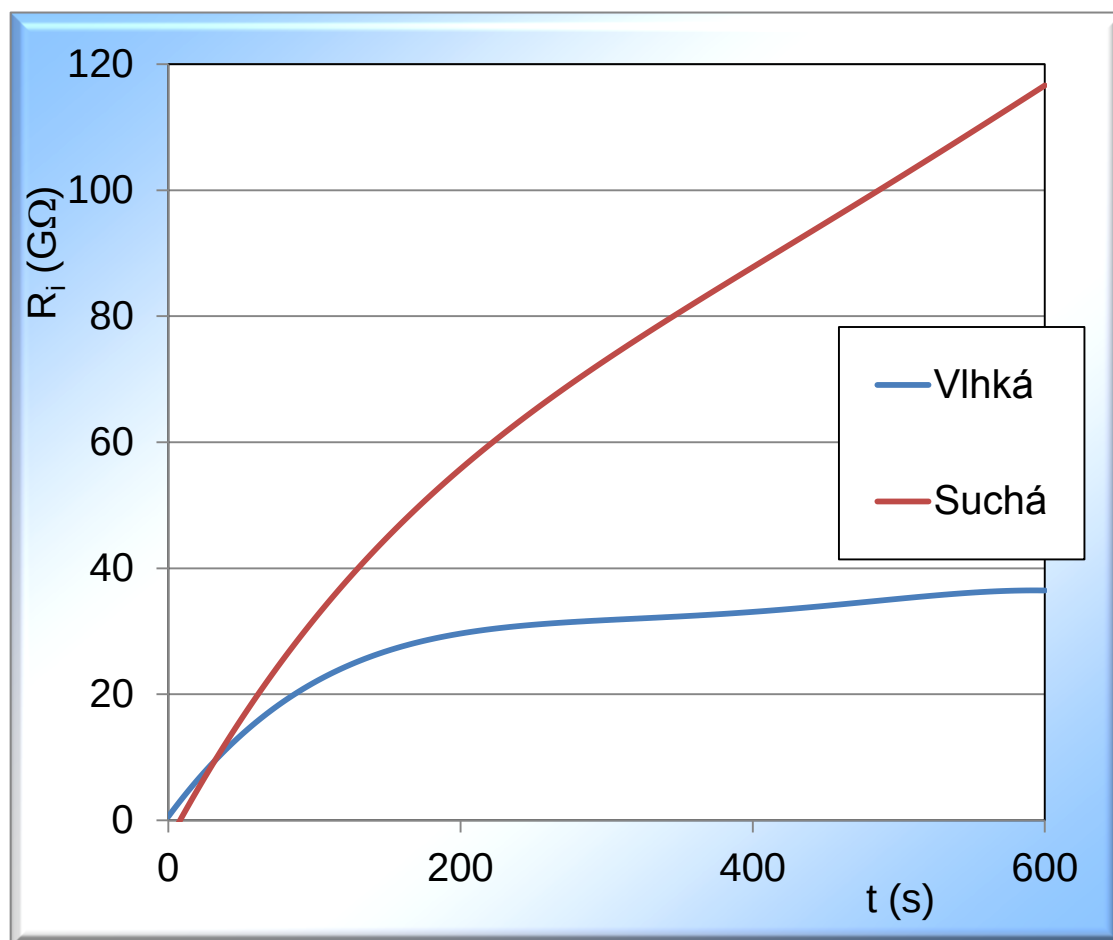
Jak již bylo uvedeno v předchozí části práce, jsou izolační odpory naměřené na izolačním systému závislé na množství vlhkosti a nebo rozpouštědel obsažených v izolaci. Lze logicky odvodit, že jsou-li takto závislé izolační odpory, budou závislé i polarizační indexy, které se z nich vypočtou.

Podle [7] i [11] se polarizační index zmenšuje, dochází-li ke zvětšování obsahu vlhkosti v izolaci. Logicky můžeme dovodit, že stejně se bude dít i v případě rozpouštědel obsažených v izolaci, jelikož na izolační odpory působí stejným způsobem.

Co se týká dielektrického absorpčního poměru DAR, můžeme předpokládat, že se bude chovat stejným způsobem jako polarizační indexy p_{i60} a p_{i600} , jelikož se jedná o poměr vypočtený totožným způsobem, pouze z hodnot izolačních odporů vypočtených pro odlišné časy měření. DAR tedy bude taktéž klesat se zvyšováním obsahu vlhkosti a nebo rozpouštědel obsažených v izolaci.

Tyto teoretické předpoklady se při praktických měřeních potvrdily. Můžeme si to předvést na stejném příkladu, který jsme použili v předchozím průběhu práce pro ukázkou závislosti izolačních odporů na množství vlhkosti a rozpouštědel obsažených v izolaci.

V následujícím grafu jsou uvedeny hodnoty pro měření na téže stroji provedené krátce po jeho kompletním převinutí. Stroj obsahoval při prvním měření v izolaci poměrně velké množství vlhkost (nebyl vysušen) a také rozpouštědla, která se ještě nestihla odpařit. Při druhém měření o dva dny později probíhalo na stroji již částečně vyschlém (samovolné vysychání) a s odpařenou značnou částí rozpouštědel. Pro potřeby tohoto grafu bylo nutné vyjít z hodnot charakteristik (proložení polynomem 4. řádu), neboť při měřeních nebyly měřeny hodnoty izolačních odporů pro čas $t=30s$, bez kterých by nebylo možné vypočíst dielektrický absorpční poměr DAR a určit jeho závislost. Příslušná tabulka hodnot ke grafu je v *Příloze S*.



Obr. 5-21 Izolační odpory po proložení polynomem 4. řádu pro motor v.č. 154 317 při napětí 500V, druhé měření dva dny po prvním

Pro potřeby dalších výpočtů byly do následující tabulky odečteny hodnoty izolačních odporů v časech 15s, 30s, 60s a 600s.

Tab. 5-21 Izolační odpory určené z proložení polynomem 4. řádu při různých stupních navlhnutí měřené izolace u motoru v.č. 154 317 při napětí 500V

Vlhkost	R_{i15}	R_{i30}	R_{i60}	R_{i600}
[-]	[GΩ]	[GΩ]	[GΩ]	[GΩ]
Vlhká izolace	5,06	9,01	15,55	36,47
Částečně vyschlá izolace	2,88	8,78	19,53	116,64

Z hodnot izolačních odporů odečtených do předchozí tabulky byly vypočteny polarizační indexy p_{i60} , p_{i600} a dielektrický absorpční poměr DAR. Vypočtené hodnoty byly vyneseny do následující tabulky.

Tab. 5-22 Poměry vypočtené pro polarizační indexy při různých stupních navlhnutí měřené izolace u motoru v.č. 154 317 při napětí 500V

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

Z vypočtených hodnot, které jsou uvedeny v předchozí tabulce je patrné, že polarizační indexy p_{i60} , p_{i600} i dielektrický absorpční poměr DAR rostou s klesajícím obsahem vlhkosti a nebo rozpouštědel obsažených v izolaci. To odpovídá teoretickým předpokladům i odborné literatuře.

5.5.7 Zhodnocení závislostí polarizačních indexů

Z měření na reálných strojích vyplynulo, že z trojice p_{i60} , p_{i600} a DAR, je jednoznačně nejméně závislý na vnějších podmínkách měření (teplota, měřící napětí, ...)

dielektrický absorpční poměr DAR. Rozdíl v závislosti (oproti polarizačním indexům p_{i60} , p_{i600}) je obvykle poměrně velký.

Co se týká polarizačních indexů p_{i60} , p_{i600} více závislý na vnějších podmínkách měření je p_{i600} . Mezi závislostí p_{i60} a p_{i600} na vnějších podmínkách měření však již obvykle nebývá tak razantní rozdíl jako mezi p_{i60} a DAR.

Vysvětlení tohoto jevu je relativně jednoduché uvědomíme-li si, co ve své podstatě p_{i60} , p_{i600} a DAR reprezentují. Jedná se vždy o poměr dvou izolačních odporů měřených během stejného měření, pouze pro jiný čas od připojení měřicího napětí. Vyjdeme-li z tvaru absorpční charakteristiky, můžeme odvodit, že čím bude kratší časový rozdíl mezi měřeními izolačních odporů, z kterých poměr vypočítáváme, tím bude závislost těchto izolačních odporů (na dané vnější podmínce) podobnější a tedy poměr se bude měnit méně.

Výše zmíněné je možné pozorovat i v případě p_{i60} , p_{i600} a DAR.

- 1) V případě DAR je $\Delta t=30s$ a závislosti jsou nejmenší.
- 2) V případě p_{i60} je $\Delta t=45s$ a závislosti jsou větší.
- 3) V případě p_{i6010} $\Delta t=540s$ a závislosti jsou největší.

Problém nastane v případě, že současně působí několik vnějších podmínek měření, protože mohou nastat případy, kdy na každý z naměřených izolačních odporů budou působit jinou intenzitou, přičemž výsledné působení může mít neočekávaný charakter.

Je také nutné podotknout, že především polarizační index p_{i60} a dielektrický absorpční poměr DAR mohou být značně závislé na tom, jakým měřicím přístrojem bylo měření prováděno, přesněji jak dlouho přístroj omezoval nabíjecí proud. Proto je třeba provést přepočty do počátku souřadnic, jak již bylo uvedeno v předchozím průběhu práce.

Výše zmíněné však neříká zhora nic o tom, jaké budou mít p_{i60} , p_{i600} a DAR vypovídací schopnosti o stavu izolačního systému stroje. To je obvykle schopen určit pouze odborník s dlouhou praxí v měření na izolačních systémech daného typu stroje.

5.5.8 Návrh nového způsobu práce s polarizačními indexy

V dnešní době se pracuje pouze s jednotlivými hodnotami polarizačních indexů, konkrétně s polarizačními indexy p_{i60} , p_{i600} a dielektrickým absorpčním poměrem DAR. Norma IEEE Std. 43-2000 [13] však umožňuje možnost definovat si libovolný polarizační index. Přičemž platí, že:

$$P.I._{t2/t1} = \frac{IR_{t2}}{IR_{t1}} [-;\Omega,\Omega], \quad (5.1)$$

Převědeme-li tento vzorec do v ČR používaného tvaru, obdržíme vzorec:

$$p_{i(t2/t1)} = \frac{R_{it2}}{R_{it1}} [-;\Omega,\Omega], \quad (5.2)$$

Na rozdíl od již zmíněné normy je vhodnější přebrat pouze indexaci času v sekundách. IEEE Std. 43-2000 uvádí pro hodnoty čísel menších než 15, že se jedná o údaje v minutách, což může být matoucí.

Díky takto obecně definovanému polarizačnímu indexu je možné začít s polarizačními indexy pracovat nejen jako s jednotlivými hodnotami, ale i jako s charakteristikami. Je potřeba pouze si zvolit způsob vytváření této charakteristiky. Lze obecně použít dvě metody:

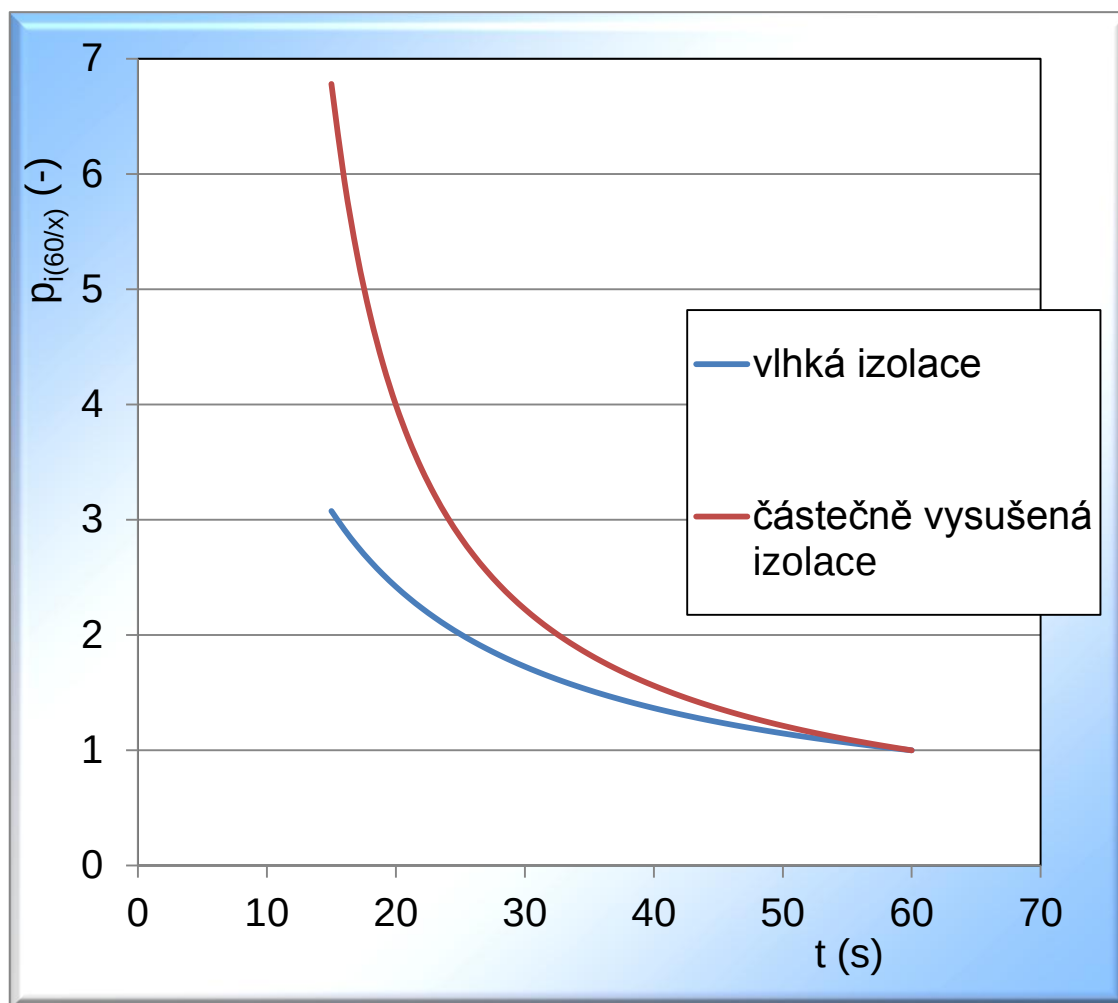
- 1) Charakteristika s pevným vztažným bodem
- 2) Charakteristika s pevným časem

5.5.8.1 Charakteristika polarizačního indexu s pevným vztažným bodem

Charakteristika se vytvoří tak, že si vybereme jeden vztažný bod (čas) a k němu všechny vypočítávané polarizační indexy. Z dnes běžně vypočítávaných polarizačních indexů se nabízí dvě možnosti. Vztáhnout výpočet k času $t=60s$ (k němu se vztahují stejným způsobem p_{i60} a DAR) a nebo vztáhnout výpočet k $t=600s$ (k tomu se vztahuje p_{i600}).

Pro charakteristiku vztaženou k času $t=60s$ se ukázalo jako nejvhodnější uvažovat druhý čas v rozsahu od 15s do 60s. Pro časy pod 15s je už nárůst polarizačního indexu extrémní a značně ovlivněný nežádoucími vlivy (rychlost nabíjení izolace,...).

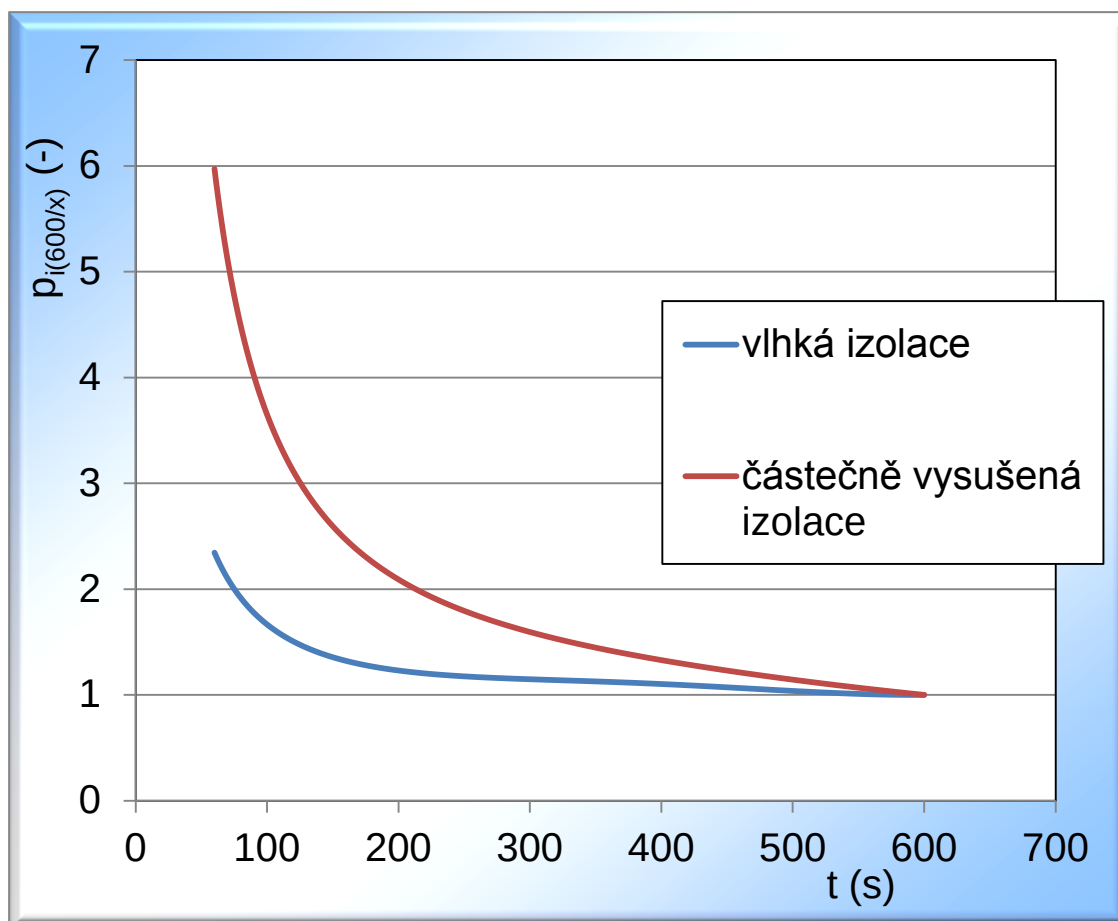
Příklad pro $p_{i(60/x)}$ je uveden v následujícím grafu. Příslušná tabulka hodnot ke grafu je v *Příloze U*. Jedná se o motor s vlhkou a posléze částečně vysušenou izolací.



Obr. 5-22 Charakteristika polarizačních indexů $p_{i(60/x)}$ pro motor v.č. 154 317 při napětí 500V, vlhká a částečně vysušená izolace

Pro charakteristiku vztaženou k času $t=600s$ se ukázalo, že charakteristiku je nejvhodnější omezit na časy od $t=60s$ do $t=600s$. Pro časy menší než $t=60s$ je už růst polarizačních indexů příliš razantní. Bez ohledu na stav izolace.

Příklad pro $p_{i(600/x)}$ je uveden v následujícím grafu. Příslušná tabulka hodnot ke grafu je v Příloze U. Jedná se o motor s vlhkou a posléze částečně vysušenou izolací.



Obr. 5-23 Charakteristika polarizačních indexů $p_{i(600/x)}$ pro motor v.č. 154 317 při napětí 500V, vlhká a částečně vysušená izolace

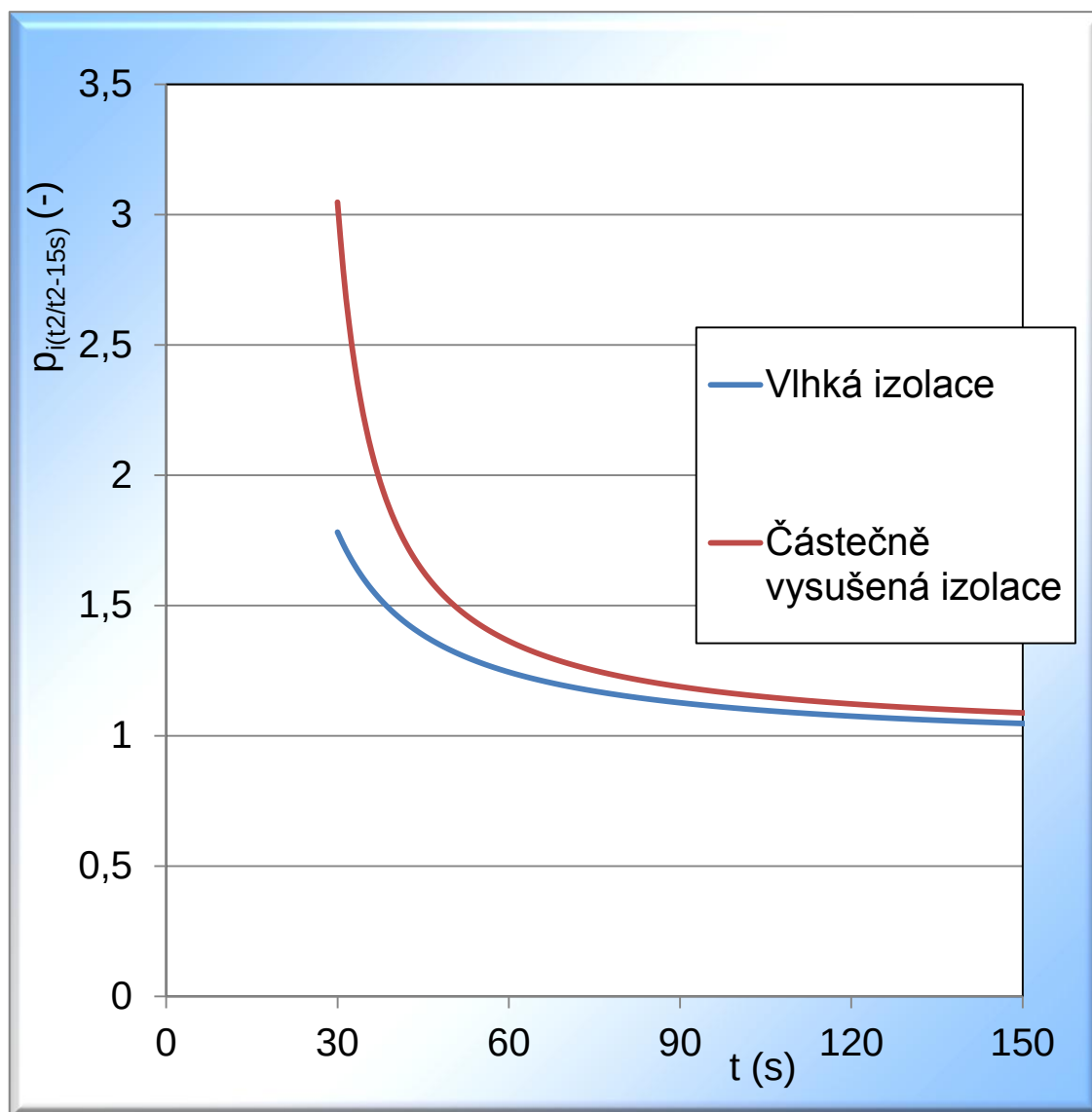
Z vynesných grafů je patrné, že se změnou stavu izolace se mění nejen velikost polarizačních indexů, ale i tvar charakteristik polarizačních indexů vztažených k pevnému bodu. Charakteristiky v izolaci v horším stavu jsou méně prohnuté (více se podobají přímce).

5.5.8.2 Charakteristika polarizačního indexu s pevným časem

Charakteristika se vytvoří tak, že si vybereme délku časového úseku a tu vztáhneme ke všem časům, pro které budeme polarizační indexy vypočítávat.

Pro charakteristiku vztaženou k času $\Delta t = 15s$ se ukázalo jako nejvhodnější uvažovat druhý čas v rozsahu od 30s do 150s. Pro časy pod 30s je už nárůst polarizačního indexu extrémní a značně ovlivněný nežádoucími vlivy (rychlost nabíjení izolace,...) působícími v časech měření pod $t = 15s$.

Příklad pro $p_{i(t/2-t-15s)}$ je uveden v následujícím grafu. Příslušná tabulka hodnot ke grafu je v Příloze U. Jedná se o motor s vlhkou a posléze částečně vysušenou izolací.



Obr. 5-24 Charakteristika polarizačních indexů $p_{i(t2/t2-15s)}$ pro motor v.č. 154 317 při napětí 500V, vlhká a částečně vysušená izolace

Jak se při měřeních ukázalo, časový úsek $\Delta t=15s$ je optimální, poněvadž při tomto časovém úseku docílíme kompromisu mezi zřetelnou změnou tvaru charakteristiky a změnou poměru hodnot.

I zde je z vynesných grafů patrné, že se změnou stavu izolace se mění nejen velikost polarizačních indexů, ale i tvar charakteristik polarizačních indexů vztažených k pevnému bodu. Stejně jako u charakteristik vztažených k pevnému bodu platí, že u izolací v horším stavu jsou charakteristiky méně prohnuté (více se podobají přímce).

5.6 Možnost hodnocení naměřené absorpční charakteristiky pomocí směrnice tečen

Během měření na reálných strojích se ukázalo, že platí poměrně jednoduchá zásada ohledně absorpční charakteristiky a stavu izolace. Můžeme říci, že čím prudčeji absorpční charakteristika stoupá po uplynutí času 600s, tím v lepším stavu je měřená izolace. Lze předpokládat, že čím rychleji stoupá absorpční charakteristika v čase $t=600s$, tím větší hodnoty ustáleného odporu bychom obdrželi, kdybychom pokračovali v měření izolačního odporu až do jeho ustálení. Nutno ovšem podotknout, že porovnávat lze pouze charakteristiky naměřené na stroji téhož typu (totožné provedení), neboť na strmost charakteristiky mají vliv i parametry vinutí (indukčnost kapacita) a podobně, které ovlivňují rychlost nabíjení měřené izolace. Z téhož důvodu je třeba posuzovat až hodnoty přepočtené na teoreticky neomezený nabíjecí proud (do počátku souřadnic), neboť velikost maximálního nabíjecího proudu také významně ovlivňuje rychlost nabíjení izolace.

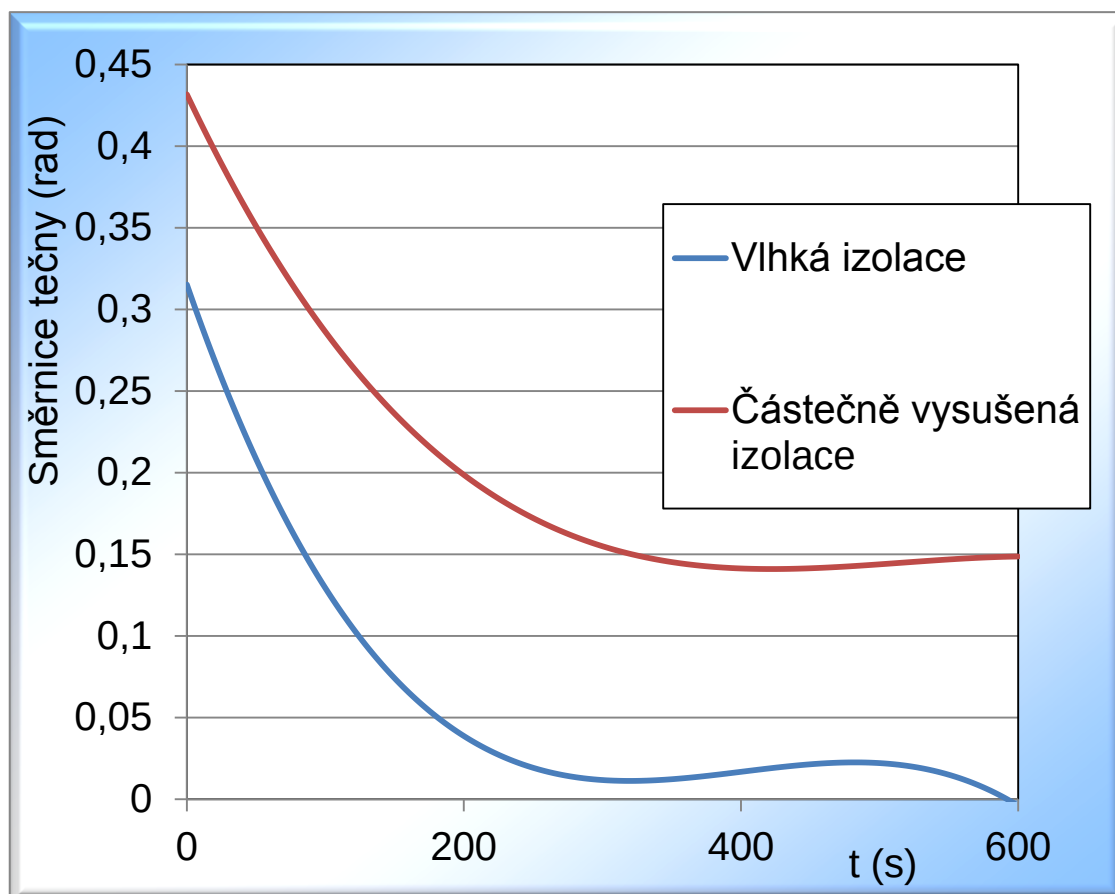
Pro lepší představu je však lepší nevycházet pouze z jedné hodnoty pro čas $t=600s$, ale vytvořit kompletní charakteristiku pro časy od 0s do 600s. Z této charakteristiky je pak možné posoudit i rychlost změny směrnice tečny.

Co se týká určení směrnice tečny, k jejímu určení je třeba znát rovnici křivky, kterou jsme proložili naměřená data (tu již máme k dispozici jako výsledek přepočtu na teoreticky neomezený nabíjecí proud). Směrnice pro jednotlivé časy získáme jednoduše tak, že rovnici zderivujeme podle proměnné, kterou je v našem případě čas (je na ose x) a do rovnice kterou obdržíme, budeme dosazovat časy (hodnoty z osy x) pro které chceme směrnici tečny zjistit. Lze pouze doporučit provést výpočet pro hodnotu času rovnu každé celé sekundě (601 hodnot).

Pozor!!! U směrnice tečny záleží na tom, v jakých jednotkách (Ω , $k\Omega$, $M\Omega$, $G\Omega$,) je, absorpční charakteristika ze které vycházíme, vynesena.

Platí, že u charakteristiky izolací v dobrém stavu by směrnice tečen měla klesat co nejpomaleji a končit by mělo na co nejvyšší hodnotě.

Pro lepší představu si můžeme předvést příklad na téže izolaci v případě vlhké a částečně vysušené izolace. Příslušná tabulka hodnot ke grafu je v *Příloze V*.



Obr. 5-25 Charakteristika směrnic tečen pro motor v.č. 154 317 při napětí 500V, vlhká a částečně vysušená izolace

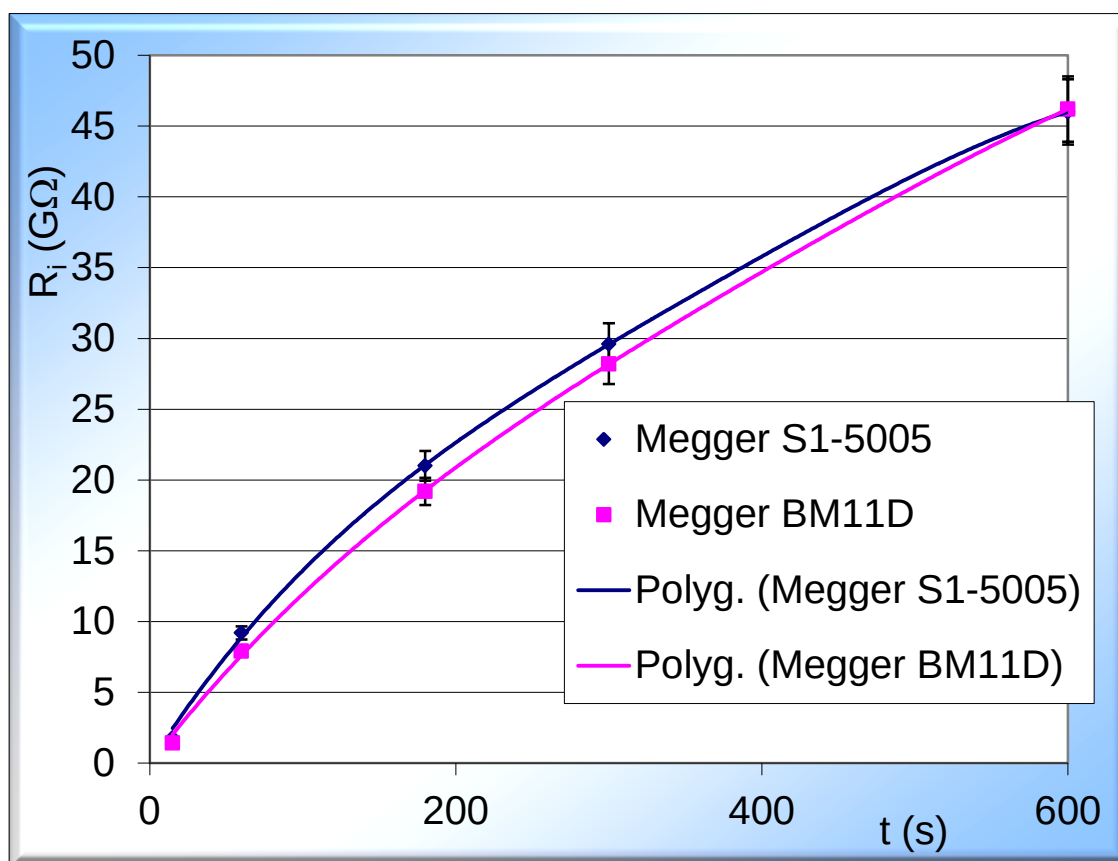
Z grafu je jasně patrný rozdíl mezi izolací vlhkou a izolací částečně vysušenou. Charakteristiky by měly být čistě klesající a kladné. Z grafu je patrné, že v tomto případě tomu tak není. Je to dáno nepřesností měření a proložení. To, že charakteristika roste, znamená, že absorpční charakteristika začala růst rychleji, což je fyzikálně nemožné (musí se tedy jednat o chybu měření např. narušení polí měřeného objektu, nebo špatný proklad). To, že charakteristika klesá pod nulu, znamená, že charakteristika začíná dokonce klesat (taktéž se musí jednat o chybu měření nebo prokladu).

5.7 Měření na strojích – vliv přesnosti přístrojů

V technické praxi se běžně setkáváme s tím, že měříme-li tutéž veličinu dvěma různými měřicími přístroji, obdržíme pokaždé poněkud odlišné hodnoty. Tento jev je způsoben tím, že každý přístroj má udánu jistou chybu měření, tedy jistou maximální odchylku od měřené hodnoty. U měřičů izolačního odporu se obvykle udává v procentech z naměřené hodnoty, u jiných přístrojů tomu ale může být i jinak. Určíme-li maximální a minimální hodnotu, kterou naměřená hodnota, se započtením chyby přístroje, mohla mít, obdržíme pole (toleranční pole), ve kterém se může nacházet

skutečná hodnota veličiny, kterou jsme měřili. Měříme-li tutéž veličinu různými přístroji, platí že pokud se tato pole od obou hodnot měřených různými přístroji alespoň částečně protnou, je pravděpodobné, že měření proběhlo v pořádku a skutečná hodnota se nachází v oblasti, kde se obě pole překrývají. Nepřekrývají-li se obě pole, může se buď jednat o chybu měřicího přístroje, nebo o chybu měření. Typickou chybou měření v případě izolačního odporu je měření za nestejných podmínek (napětí, zkratový proud přístroje, teplota, ...).

Pro nás bude v tuto chvíli důležitý vliv zkratového proudu měřicího přístroje, protože u běžných přístrojů se nedá ovlivnit a má významný vliv na naměřené hodnoty izolačních odporů.



Obr. 5-26 Hodnoty naměřené na pony motoru v.č. 04356 - přístroje Megger S1-5005 a Megger BM11D při napětí 500V (fáze V) včetně maximálních přípustných chyb

Na předchozím grafu jsou vyneseny naměřené hodnoty izolačních odporů včetně chybových úseček, které byly měřeny na stejném stroji dvěma různými přístroji téhož výrobce, každý z přístrojů však má jiný zkratový proud. Příslušná tabulka hodnot ke grafu je v *Příloze O*. Z grafu lze zjistit, že pro hodnoty měřené v časech 15s a 60s se toleranční pole měřených hodnot nepřekrývají a je tedy zřejmé, že různé hodnoty zkratového proudu měřicích přístrojů způsobují takový rozdíl naměřených hodnot, že jej již není možné zahrnout do chyb přístrojů, natož abychom jej zanedbali. Je nutné si

uvědomit, že z hodnot izolačních odporů v časech 15s a 60s se počítají polarizační indexy a je tedy zřejmé, že polarizační indexy tímto budou značně ovlivněny.

Důsledkem výše zmíněného je, a to i když vezmeme v úvahu chybu měřících přístrojů, že nejsou-li shodné všechny parametry měření, nejsou porovnatelné naměřené hodnoty. Vliv některých odlišností parametrů měření lze odstranit přepočty měřených hodnot na určené hodnoty parametrů, je to však velmi problematické, protože se často ani odborníci neshodnou, jak přesně se přepočet má provádět.

5.8 Měření na strojích – další problémy, které byly při měřeních zjištěny

5.8.1 Narušení polí měřeného stroje

Během měření, která byla prováděna, vyšlo najevo, že měření izolačního odporu je velmi citlivé na narušení elektromagnetických a elektrostatických polí v okolí měřených objektů (strojů). Nastane-li stav, při němž je pole narušeno, dojde k tomu, že pole jsou částečně vybíjena. Tyto pro měření nežádoucí jevy mohou nastat například, projde-li v okolí několika metrů od stroje člověk, nebo přejede-li v hale nad měřeným strojem jeřáb.

Jak bylo zjištěno, největší vliv na měření mají ty případy, kdy dojde k protnutí osy stroje.

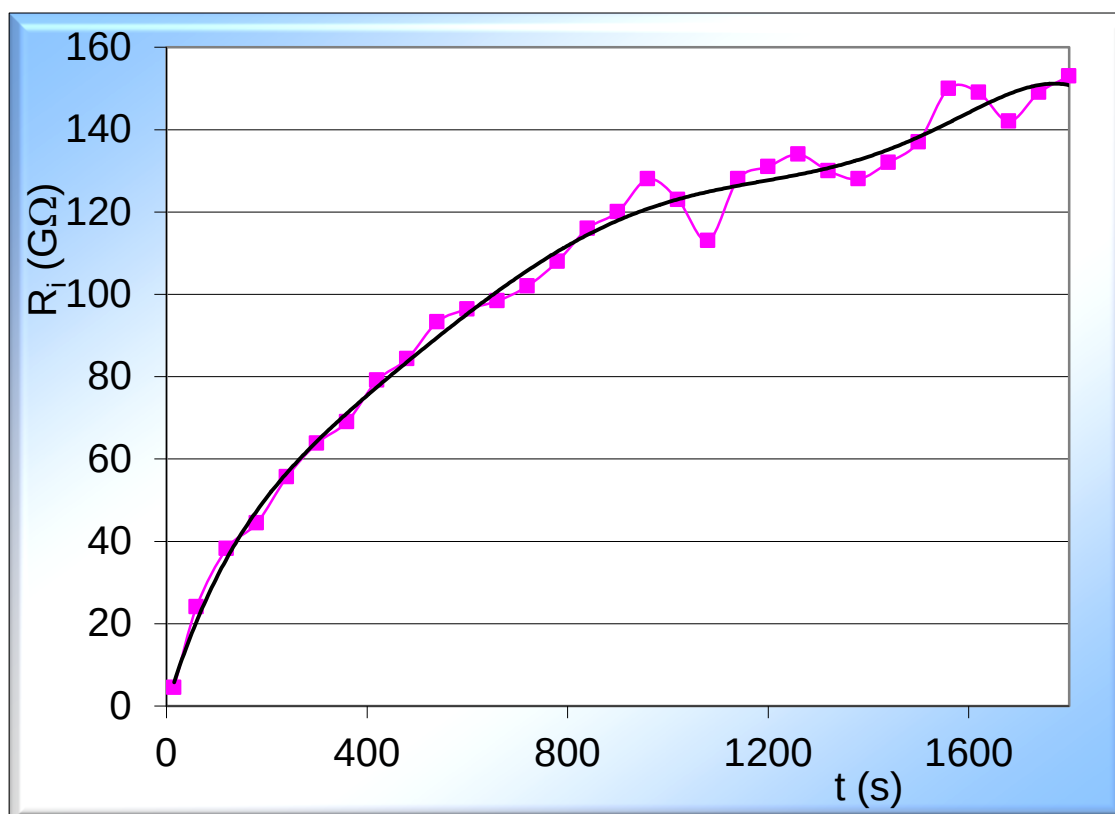
Dojde-li k částečnému vybití polí stroje, začnou se tyto pole znovu dobíjet a odebírat tak ze zdroje měřícího přístroje větší proud. Protože měřící přístroje počítají izolační odpor z Ohmova zákona pomocí měřícího napětí a odebíraného proudu, způsobí nárůst odebíraného proudu pokles měřených hodnot izolačních odporů. Tento stav nebývá dlouhodobý, po ukončení narušení polí obvykle odeznívá v řádu sekund. Nebezpečí tohoto jevu je ovšem v tom, že může nastat právě v okamžiku, kdy máme odečítat hodnoty izolačních odporů. Například nastane-li tento jev v některém z časů 15s, 60s a nebo 600s, může to mít velmi nepříjemné následky, neboť z hodnot izolačních odporů v těchto časech se počítají polarizační indexy. Zvláště při měření v halách, kde je větší provoz je takovéto riziko poměrně značné. Částečně se tyto vlivy dají snížit tím, že měřený stroj se postaví tak, aby jeho osy směřovala do země umožňuje-li to jeho konstrukce a podmínky v místě měření. Ani tento krok ovšem nedokáže tyto vlivy eliminovat zcela, zvláště přejezd jeřábu nad měřeným objektem se tímto způsobem prakticky eliminovat nedá.

Obdobně může docházet i k opačnému jevu, kdy při narušení polí stroje dojde ke zpomalení jejich přirozeného vybíjení. Tento stav může nastat například v případě, že do elektrostatického pole stroje vnikne objekt, který bude nabyt souhlasným nábojem jako neuzemněná strana izolace, nebo v případě, kdy se bude ke stroji blížit objekt, jehož magnetické pole bude předávat energii do plechů stroje. V takovém případě budou pole odebírat menší proud a měřící přístroj tím pádem naměří větší izolační

odpor. Je třeba si uvědomit, že obdobná situace může nastat i při jednorázové změně v okolí stroje, například při odstranění feromagnetického materiálu (ocelové tyče) z okolí stroje a podobně.

Co se napěťové hladiny měření týká, tak platí, že čím větší je měřicí napětí, tím rozsáhlejší pole o větší intenzitě bude měřený stroj mít. Z toho vyplývá, že taková pole bude možné snáze narušit a při narušení pole ve stejném bodě (průchod osoby po stejné trase) bude narušena část pole s větší intenzitou a tedy i následky pro měření budou větší.

Je tedy zřejmé, že pro opravdu kvalitní a přesné měření je třeba, aby byl měřený objekt umístěn do speciální zkušebny, ve které bude zajištěno elektrostatické i elektromagnetické oddělení měřeného objektu od všech nepříznivých vlivů. Zajištění takových podmínek však není často v praxi možné, zvláště u strojů, které nelze přemísťovat. V takovém případě je vhodné, aby byla kolem měřeného stroje postavena dočasná zábrana ze vzájemně se překrývajících ocelových plechů, která bude sahat od země (bez mezery) asi do výšky, která bude odpovídat asi 1,5 násobku velikosti stroje, minimálně však musí mít 2m výšky (u menších strojů). Je také nutné zajistit, aby nad takovou dočasnou zkušebnou nebyla narušována pole průjezdy jeřábů, průchody osob po vysutých lávkách a podobně. Těmito opatřeními je možné vlivy na pole měřených objektů alespoň minimalizovat.

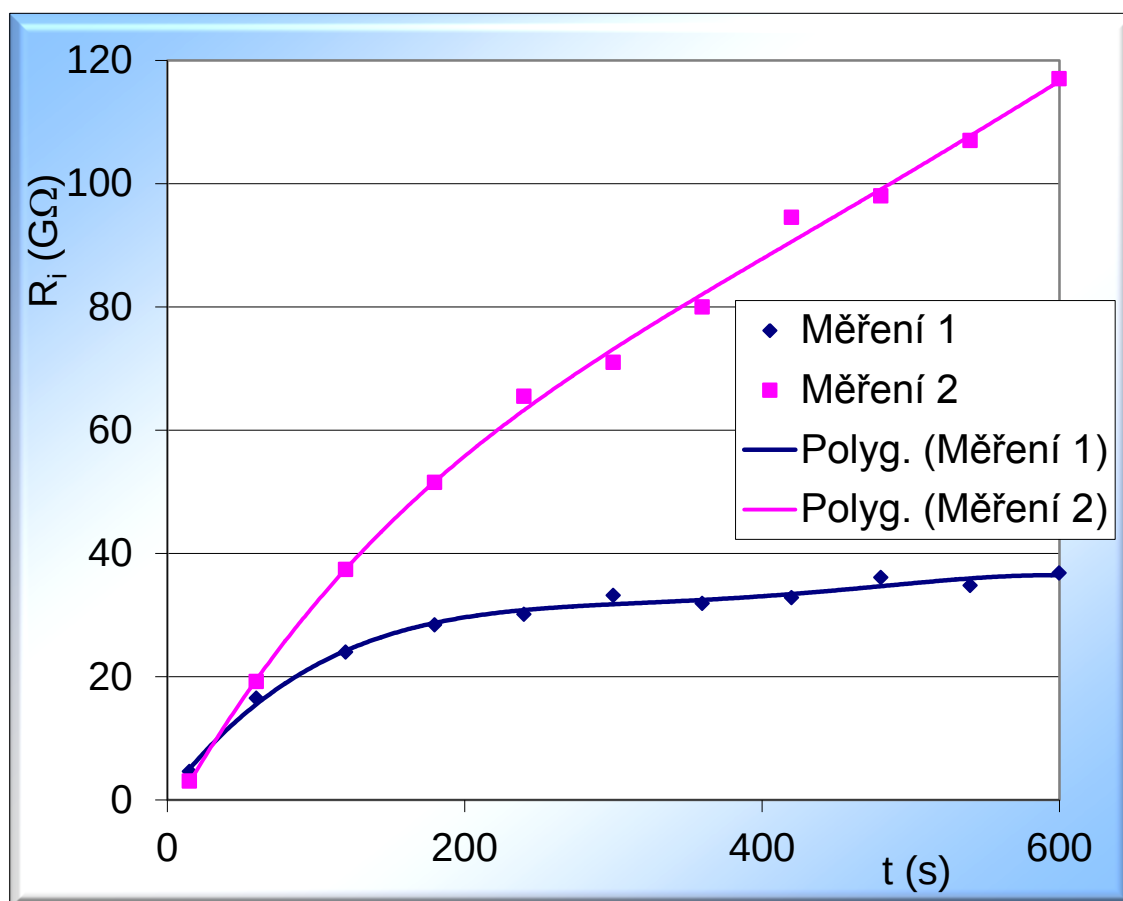


Obr. 5-27 Hodnoty naměřené na motoru v.č. FQ 174 232 přístrojem Metrel Teraohm 5kV při napětí 542V

Na předchozím grafu je zjevně patrné, v druhé polovině měření (přibližně od času 900s) došlo k nepříznivým vlivům na měření, které způsobily změny naměřených hodnot izolačních odporů. Příslušná tabulka hodnot ke grafu je v *Příloze W*. Těmito nepříznivými vlivy bylo právě narušení polí měřeného motoru a to průchodem osob s náradím a také jedním přejezdem jeřábu nad měřeným strojem.

5.8.2 Měření na zcela nových, nebo čerstvě převinutých strojích

Během opakovaných měření na reálných strojích, které byly zcela nové, nebo čerstvě převinuté bylo zjištěno, že naměřené izolační odpory se v poměrně krátkém časovém úseku (řádově dny) výrazně mění. V průběhu času dochází k růstu naměřených izolačních odporů.



Obr. 5-28 Hodnoty naměřené na motoru v.č. 154 317 při napětí 500V, druhé měření dva dny po prvním

Z předchozího grafu je jasně vidět, že při druhém měření, které následovalo dva dny po prvním, měřené izolační odpory značně vzrostly. Příslušná tabulka hodnot ke grafu je v *Příloze S*. Příčinou tohoto jevu je stále ještě probíhající dovytvrzování

některých hmot použitých při výrobě (především izolačního systému), popřípadě odpařování rozpouštědel z barev (voda, alkohol, ...), kterými bývají stroje natřeny (u menších strojů se někdy provádí nátěr čel vinutí).

Chceme-li měřit takovýto stroj (nový, nebo čerstvě převinutý), je nutné vyčkat, až dojde k odeznění výše zmíněných procesů, aby naměřené hodnoty izolačních odporů více odpovídaly realitě. K úplnému odeznění těchto jevů ovšem dochází až po poměrně dlouhé době, u některých velkých strojů s rozsáhlými izolačními systémy je možné zaznamenat růst izolačních odporů následkem zmíněných procesů i po více než půl roce.

5.8.3 Vliv magnetického obvodu

Na hodnoty izolačních odporů naměřených na reálných strojích má s největší pravděpodobností 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. V další fázi měření, kdy již přístroj proud neomezuje, dochází k jistému ovlivnění naměřených hodnot izolačních odporů díky tomu, že přístroj jej počítá z Ohmova zákona, tedy z měřicího napětí a proudu odebíraného z přístroje. Jelikož bude celkový proud odebíraný z měřicího přístroje navýšen o hodnotu proudu parazitního, bude měřicí přístroj měřit o něco málo nižší hodnoty izolačního odporu, než kdyby vliv magnetického obvodu nebyl přítomen (vznikne jistá chyba). Za normálních okolností bude vliv magnetického obvodu minoritní (ale ne zanedbatelný), jiná situace však může nastat, budou-li se v magnetickém obvodu vyskytovat významnější poruchy, které budou způsobovat vybíjení magnetického obvodu. V tokovém případě může být vliv magnetického obvodu na měření izolačního odporu významný.

Na velikost chyby, kterou způsobí při měření izolačního odporu vliv magnetického obvodu, budou mít vliv následující parametry stroje:

- 1) velikost (mohutnost) magnetického obvodu
- 2) materiály, z nichž je magnetický obvod sestaven (především kvalita plechů)
- 3) míra samovybíjení magnetického obvodu
- 4) výskyt poruch v magnetickém obvodu
- 5) velikost měřicího napětí

Platí, že vliv prvního parametru se projeví především v počátečních fázích měření, kdy se musí celý obvod namagnetovat. Druhý parametr bude velmi významný během nabíjení, ale bude mít významný (i když o něco menší) vliv i po zbytek měření. Poslední dva parametry stroje pak budou mít vliv po celou dobu měření přibližně stejný.

Vliv magnetického obvodu na měření izolačních odporů nebylo možné ověřit experimentálně, jelikož by bylo nutné vytvořit izolační systém (např. izolaci na cívkách) a kolem něj postupně sestavit několik magnetických obvodů o různých parametrech (velikosti, materiály, geometrická uspořádáním, ...) a na nich poté provádět měření. Takovéto měření je mimo časové, ale především ekonomické možnosti pracoviště.

5.8.3.1 Vliv velikosti magnetického obvodu

Pro magnetické obvody měřených strojů platí, že čím větší (mohutnější) magnetický obvod bude stroj mít, tím větší množství energie bude třeba k jeho nabití (namagnetování), a tedy tím větší proud po delší dobu bude magnetický obvod ze zdroje měřicího přístroje odebírat. Vzhledem k tomu, že zkratový (maximální) proud, který je zdroj měřicího přístroje schopen dodat, je omezen, dojde vlivem parazitního proudu způsobeného magnetickým obvodem k prodloužení doby nabíjení stroje a tedy i k prodloužení nabíjení izolace. Jelikož dojde k zvýšení proudu odebíraného z měřicího přístroje a protože měřicí přístroj počítá izolační odpor z Ohmova zákona, dojde v důsledku výše popsaných jevů k zmenšení naměřených hodnot izolačních odporů.

5.8.3.2 Vliv kvality plechů magnetického obvodu

Jelikož jsou magnetické obvody elektrických strojů sestaveny z magneticky měkkých materiálů (plechy z křemíkaté oceli), vydrží namagnetované pouze po dobu, po kterou na ně bude působit vnější energie (pole vytvořené proudem). V nabitém stavu bude magnetický obvod odebírat méně energie, než při nabíjení (magnetizaci). To je dáno tím, že jsme v stejnosměrné oblasti (nedochází tedy k cyklickému přemagnetování materiálu) a energie potřebná pro udržení namagnetovaného stavu je dána pouze ztrátami (průchod proudu reálným vodičem, ...).

Jak při nabíjení, tak v nabitém stavu bude mít vliv na množství energie, kterou bude potřeba dodávat do magnetického obvodu materiálu plechů, ze kterých je magnetický obvod složen. Čím kvalitnější plechy budou pro magnetický obvod použity, tím méně energie budeme muset do magnetického obvodu dodat. To vychází z menší plochy hysterezní křivky a z křivky prvotní magnetizace. Při nabíjení (magnetizaci) plechů se budeme pohybovat po křivce prvotní magnetizace (remanentní magnetizmus můžeme u kvalitních plechů zanedbat). Při nabitém stavu může docházet k částečnému vybití magnetického obvodu (například při narušení magnetického pole stroje - popsáno v jedné z předchozích kapitol) a v takovém případě se pohybujeme po hysterezní křivce, byť jen po její malé části neboť nedochází k změně směru magnetizace.

Z výše uvedeného je zřejmé, že čím kvalitnější plechy budou pro magnetický obvod stroje použity, tím menší vliv bude mít magnetický obvod na naměřené hodnoty izolačních odporů.

5.8.3.3 Vliv míry samovybíjení (demagnetizace) magnetického obvodu

S kvalitou plechů použitých pro magnetický obvod měřeného stroje souvisí částečně i samovybíjení magnetického obvodu stroje. Platí, že čím budou plechy kvalitnější, tím méně se bude magnetický obvod vybíjet (demagnetizovat). Na samovybíjení magnetického obvodu však budou mít vliv i jiné parametry stroje, jako například konstrukční uspořádání magnetického obvodu, teplota stroje, ale také materiál a konstrukční uspořádání koše, v němž bude magnetický obvod upevněn. Koš statoru bývá obvykle z oceli, nebo z litiny a uzavírají se tedy přes něj siločáry magnetického toku. Koš statoru se pak chová do jisté míry jako magnetický zkrat a způsobuje zvýšené samovybíjení magnetického obvodu. Pouze u menších strojů bývá koš statoru z hliníku, avšak na tak malých strojích se obvykle měření izolačních odporů neměří a proto tento případ nemusíme řešit.

Vliv samovybíjení magnetického obvodu se bude projevovat po celou dobu měření.

5.8.3.4 Vliv výskytu poruch v magnetickém obvodu

Dalším významným parametrem, který ovlivňuje chybu měření v souvislosti s magnetickým obvodem stroje, je výskyt poruch v magnetickém obvodu stroje. Dojde-li k výskytu magnetické poruchy v magnetickém obvodu stroje, obvykle se chová jako zkrat a zvyšuje samovybíjení magnetického obvodu (bylo popsáno výše). Takovou poruchou může být zapomenutý kus magneticky měkkého materiálu ve stroji.

Může ale dojít i k opačnému jevu, kdy se obvod bude chovat jinak, například bude-li do magnetického obvodu injektovat magnetické pole souhlasné s polem stroje. Takovou poruchou může být třeba ve stroji zapomenutý šroubovák se zmagnetovanou špicí, nebo permanentně zmagnetovaný kus koše statoru.

5.8.3.5 Vliv měřicího napětí na magnetický obvod

Co se týká velikosti měřicího napětí, tak je nutné si uvědomit, že s rostoucím měřicím napětím poroste i proud, který obvodem poteče. Tento zvýšený proud vyvolá intenzivnější magnetické pole a magnetický obvod se více zmagnetuje. To bude mít za následek nutnost dodávat do magnetického obvodu větší množství energie jak na počátku měření, tak i později během měření až bude magnetický obvod namagnetován.

Důsledkem většího množství energie dodávaného do magnetického obvodu je větší odběr proudu ze zdroje měřicího přístroje. Jak již bylo popsáno výše, dojde-li k zvýšení proudového odběru ze zdroje měřicího přístroje, dojde ke snížení naměřených hodnot izolačních odporů.

Můžeme tedy říci, že s rostoucím měřícím napětím bude stoupat nepříznivý efekt všech výše popsaných jevů, které nastávají v magnetickém obvodu, na měření izolačního odporu.

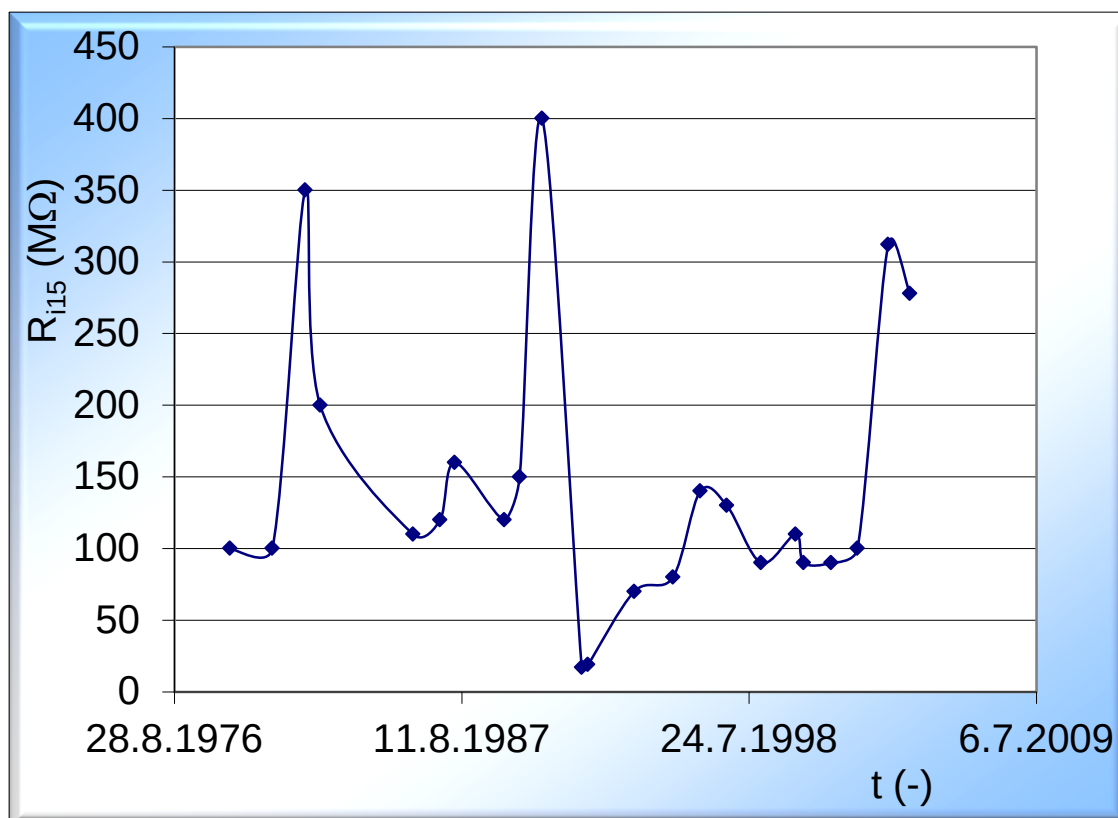
5.9 Změna izolačního odporu v závislosti na stáří stroje

Z dat, která byla na reálných strojích naměřena za dlouhou dobu, je patrné, že izolační odpory se v průběhu delších časových údobí (měsíce, roky) mění. Teoreticky by mělo docházet pouze k postupnému poklesu naměřených hodnot izolačních odporů. Jak ale bude předvedeno na reálných datech, nemusí tomu vždy tak být. V případech, kdy tomu tak není, je nutné vysvětlit, jak může docházet k růstu izolačních odporů v průběhu života stroje.

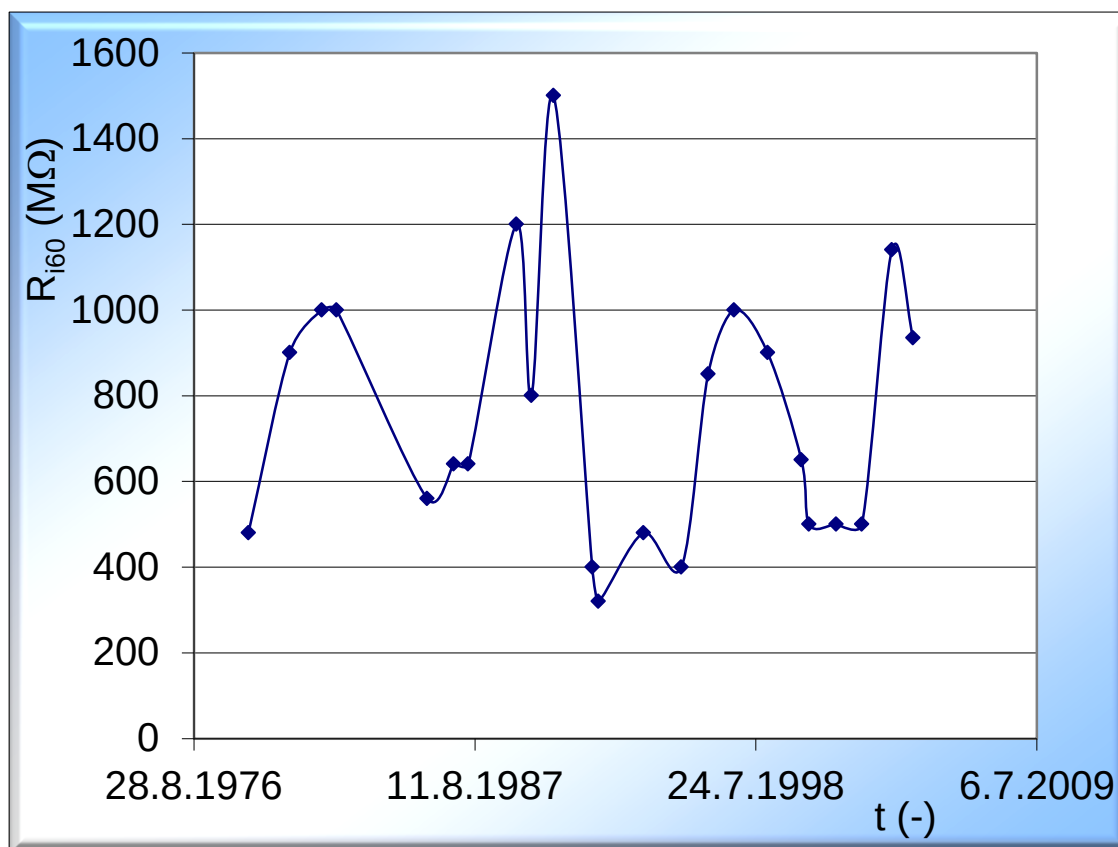
5.9.1 Hodnoty izolačních odporů naměřené na reálných strojích

Pro účely posouzení dlouhodobých změn izolačních odporů v závislosti na stáří stroje (jeho izolačního systému) byla vybrána data, která vznikla dlouhodobým měřením na různých strojích. Tato data byla převzata z databáze programu Blesk [5] a to z důvodu dlouhodobosti měření (některá data jsou starší, než autor této práce).

Pro reálnější představu, jak vypadají data z dlouhodobých měření na reálných strojích, budou uvedeny příklady izolačních odporů naměřených na dvou strojích a to pro R_{i15} a R_{i60} . Oba stroje jsou synchronní hydrogenerátory velkých výkonů. V prvním případě se jedná o stroj EDA TG3 s výkonem 112,5MVA a v druhém případě o stroj EL1 TG2 s výkonem 71,4MVA. Příslušné tabulky hodnot ke grafům jsou v *Příloze X* pro stroj EDA TG3 a v *Příloze Y* pro stroj EL1 TG2.



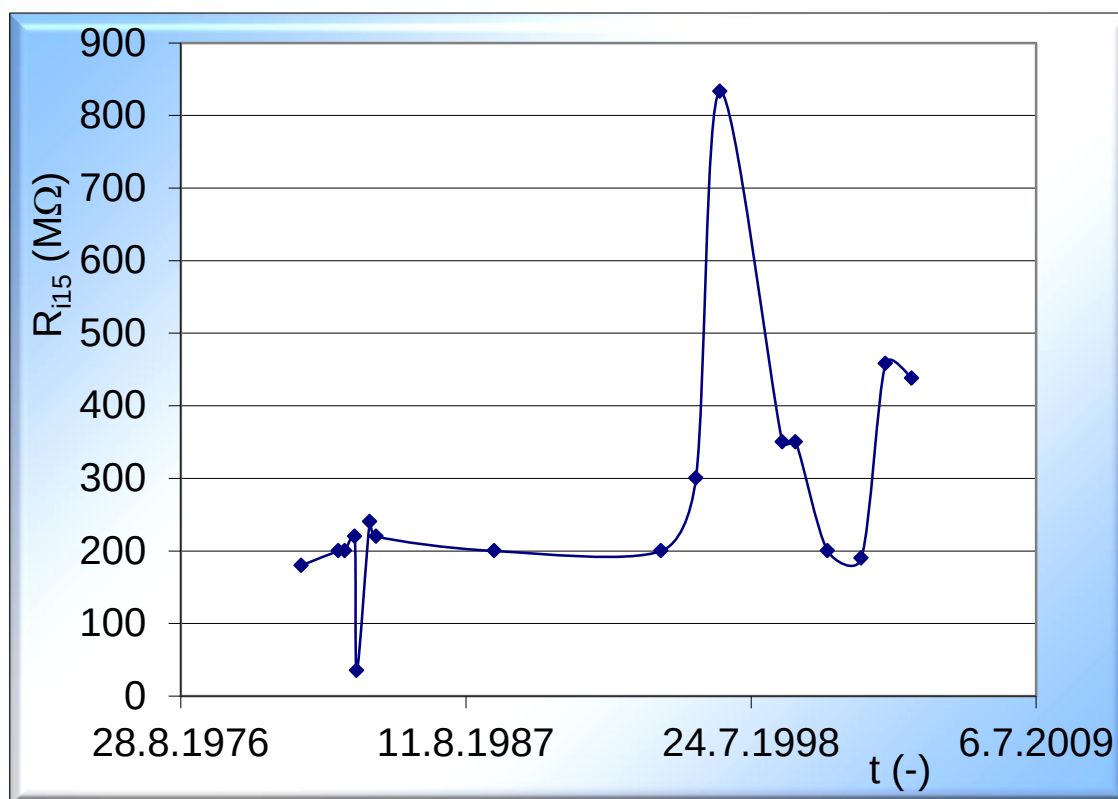
Obr. 5-29 Změna izolačního odporu R_{15} v čase –EDA TG1 – Fáze B



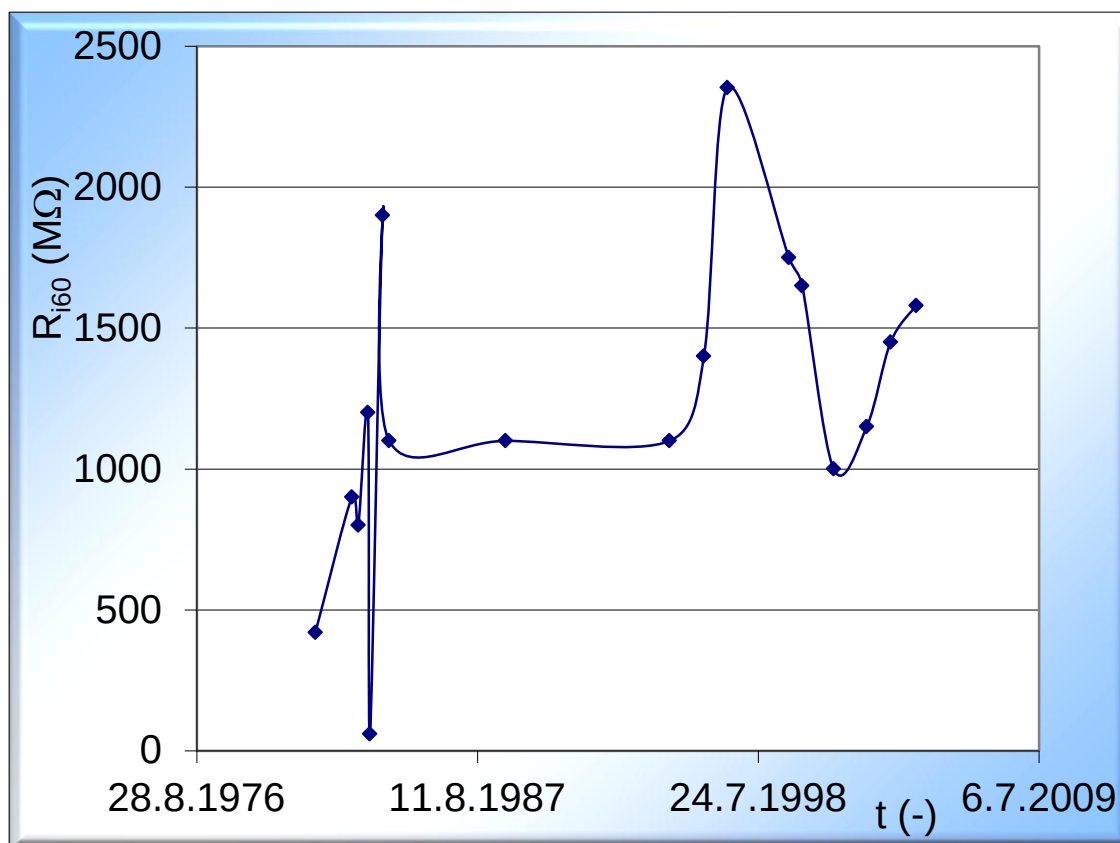
Obr. 5-30 Změna izolačního odporu R_{60} v čase –EDA TG1 – Fáze B

Z grafů Obr. 5-29 a Obr. 5-30 je zřejmé, že hodnoty příliš kolísají na to, aby se jednalo skutečně o vliv změn izolačních odporů při nezměněném izolačním systému reálného stroje. V grafech vidíme nenadálé špičky, propady i jejich střídání, ale také úseky relativně neměnných úseků. Všechna tato zjištění nás vedou k tomu, že můžeme konstatovat, že:

- 1) Mezi některými měřeními došlo k opravám izolačního systému stroje a tedy i ke skokové změně izolačního odporu směrem vzhůru. Je totiž nepravděpodobné, že by izolační systém takového stroje vydržel bez oprav 23 let, po které graf hodnoty izolačních odporů zachycuje.
- 2) Měření jsou zatížena chybami vzniklými nedodržením srovnatelných podmínek měření. Zde se může jednat hlavně o teplotu měřené izolace a o měřící napětí. Například teplota vinutí se při těchto měřeních pohybovala od 14°C do 45°C, což má na naměřené hodnoty izolačních odporů zásadní vliv.
- 3) Měření probíhalo na stroji při různých stupních navlhnutí izolace stroje. I zde je vliv na izolační odpor stroje značný. Vlhkost izolace dokonce nebyla vůbec měřena.
- 4) Došlo k ovlivnění jinými faktory, které již byly v práci rozebrány.
- 5) Mohlo také dojít ke kombinaci předchozích.



Obr. 5-31 Změna izolačního odporu R_{15} v čase –EL1 TG2 – Fáze A



Obr. 5-32 Změna izolačního odporu R_{60} v čase –EL1 TG2 – Fáze A

I v případě druhého stroje, jehož dlouhodobé závislosti izolačních odporů jsou uvedeny v grafech Obr. 5-31 a Obr. 5-32, se projevují stejné problémy jako u měření na předchozím stroji (Obr. 5-29 a Obr. 5-30). Můžeme tedy předpokládat, že i příčiny těchto dějů budou u obou strojů totožné. Některé z těchto příčin již byly v práci popsány, jiné ještě popsány budou.

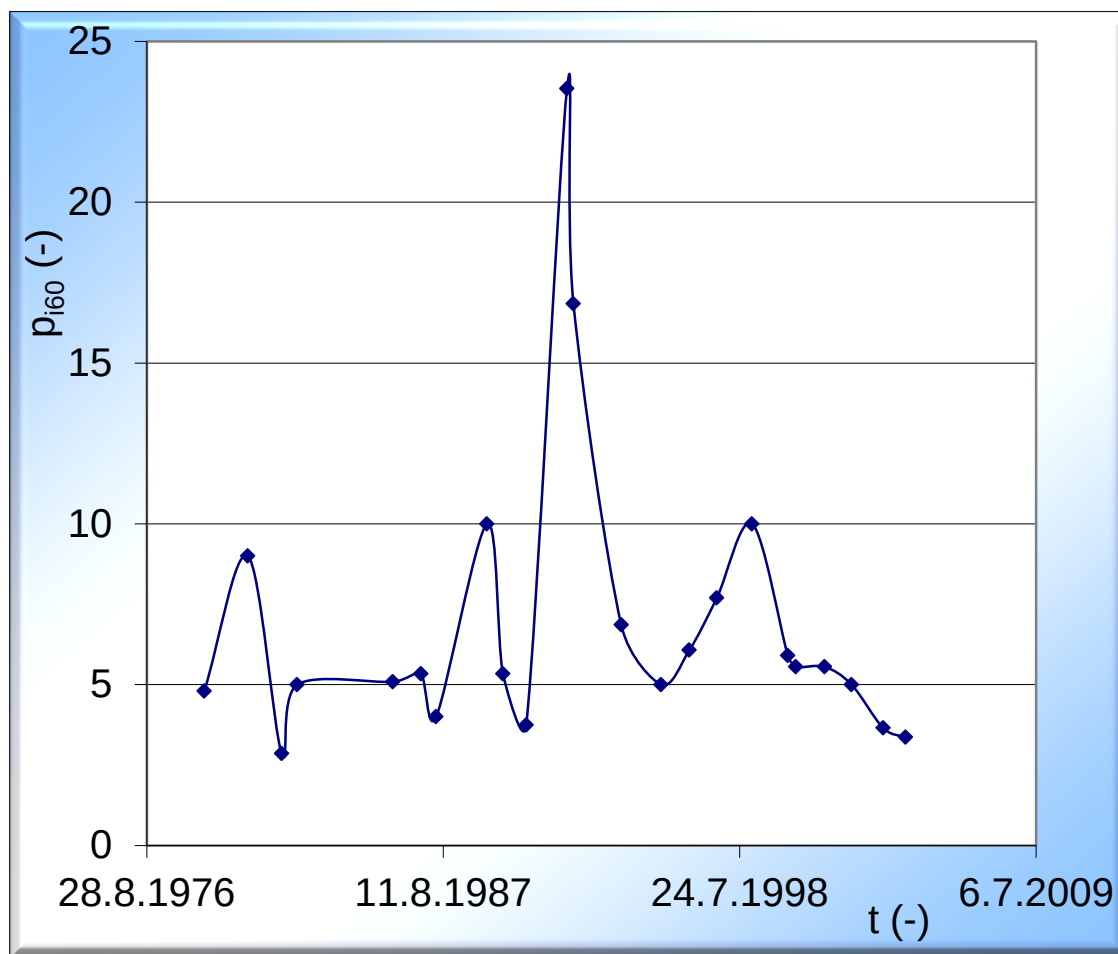
5.9.2 Hodnoty polarizačních indexů vypočtené pro reálné stroje

Vyjdeme-li z toho, co jsme zjistili výše, tj. že se v dlouhodobém čase mění hodnoty naměřených izolačních odporů, vyplne z toho, že se s největší pravděpodobností budou měnit i polarizační indexy.

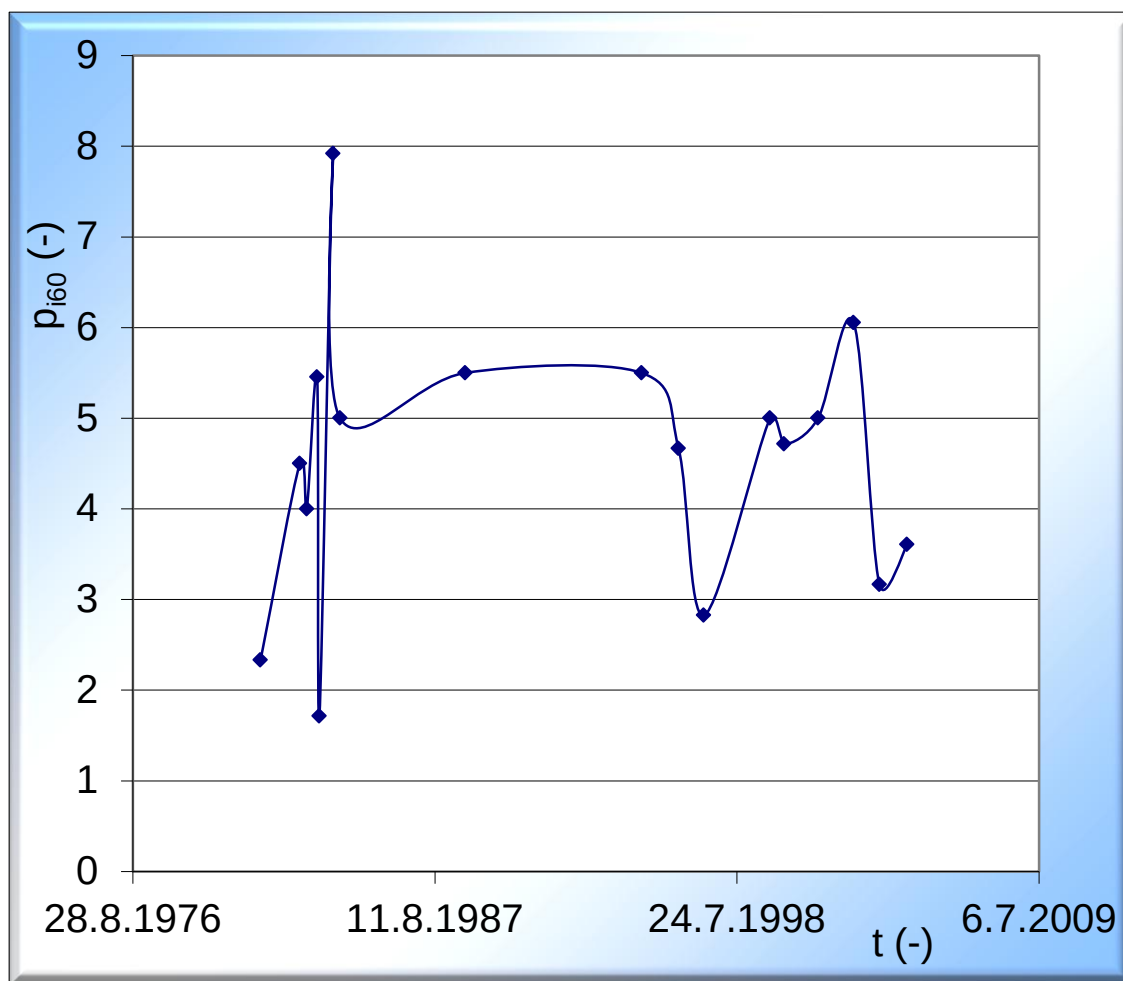
Pro příklady byly využity hodnoty izolačních odporů, které byly uvedeny pro stroje EDA TG1 a EL1 TG2. U nich jsme uvedli průběhy pro hodnoty izolačních odporů R_{i15} a R_{i60} , ze kterých můžeme vypočítat hodnoty polarizačních indexů p_{i60} v závislost na čase. Příslušné tabulky hodnot ke grafu jsou v Příloze X pro stroj EDA TG3 a v Příloze Y pro stroj EL1 TG2.

Dielektrický absorpční poměr DAR nebylo u těchto strojů možné vypočítat, neboť na nich nebyly měřeny hodnoty izolačních odporů pro čas $t=30s$, které jsou nezbytně nutné pro výpočet dielektrického absorpčního poměru. Hodnoty nebylo možné ani

dopočítat, neboť na strojích byly měřeny pouze hodnoty izolačních odporů pro časy $t=15s$, $t=60s$ a $t=600s$. Tyto tři hodnoty jsou příliš málo pro seriózní výpočet charakteristiky závislosti izolačního odporu na čase měření. Z toho důvodu nebylo možné hodnoty pro $t=30s$ dopočítat a provést výpočet dielektrického absorpčního poměru DAR. Hodnoty pro $t=30s$ nebyly měřeny proto, že dielektrický absorpční poměr DAR se v ČR pro diagnostiky používá velmi zřídka. V ČR se obvykle pracuje s polarizačními indexy p_{i60} a p_{i600} . Dielektrický absorpční poměr DAR se obvykle používá v USA a některých dalších zemích.



Obr. 5-33 Změna polarizačního indexu p_{i60} v čase –EDA TG1 – Fáze B



Obr. 5-34 Změna polarizačního indexu p_{i60} v čase –EL1 TG2 – Fáze A

I na časových průbězích polarizačních indexů je vidět, že se na nich projevují nežádoucí efekty způsobené problémy s měřením izolačních odporů, které byly uvedeny v předchozím průběhu práce.

Míra působení nežádoucích vlivů na polarizační index, bude úměrná míře působení těchto nežádoucích vlivů na izolační odpory z nichž se polarizační indexy počítají, přesněji řečeno vlivu na rychlost nabíjení izolace měřeného stroje (popsáno v předchozím průběhu práce).

5.9.3 Vzdělávání izolačního odporu u nového stroje

U nových strojů obvykle dochází k tomu, že izolační odpor má po nějakou dobu tendenci růst. Tato doba je pro každý stroj individuální a to podle jeho konstrukce a použitých materiálů. Tento jev je způsoben tím, že na ve stroji dochází k vytvrzování pojiv (epoxidy, ...), vysychání barev (bylo již popsáno v samostatné kapitole), ale i k řadě dalších procesů, které k danému efektu přispívají.

Tyto děje jsou nejvýraznější v prvních dnech po dohotovení izolačního systému stroje, ale jedná se o procesy dlouhodobé, které zvláště u velkých strojů mohou probíhat i po dobu delší než jeden rok (obvykle už za provozu stroje).

5.9.4 Vzdělání izolačního odporu u stroje úplně, nebo částečně převinutého a u oprav částí izolací

Proběhne-li u stroje jeho úplné, nebo alespoň částečné převinutí, dochází v takové nové izolaci k dějům zcela ekvivalentním k dějům v izolacích nového stroje (izolace je v obou případech nová). I v tomto případě je možné setkat se s vzděláním izolačního odporu v čase.

Co se týká oprav izolačních systémů, jejich vliv na izolační odpor stroje bude velký, protože se obvykle opravují izolačně nejslabší místa ve stroji (izolační odpor izolace může být dobrý, ale místo s poruchou může výsledný izolační odpor snížit i o několik řádů), na růst izolačního odporu v čase však budou mít vliv podstatně menší, úměrný velikosti opravovaného úseku ku velikosti celého izolačního systému stroje.

5.9.5 Vzdělání izolačního odporu bez zásahu do vlastního izolačního systému stroje

Převinutí stroje popřípadě opravy izolačního systému nemusejí být jedinými způsoby, jak může dojít k vzdělání izolačních odporů stroje. K vzestupu izolačních odporů může dojít i bez přímého zásahu do izolačního systému stroje. Růst izolačních odporů může mít mnoho příčin, přičemž zde budou uvedeny pouze ty nejzásadnější a ve své podstatě i nejčastější.

5.9.5.1 Vysušení izolačního systému stroje

Je-li u stroje provedeno vysušení izolace, dojde obvykle k vzdělání izolačních odporů. Tento následek je dán tím, že s rostoucím stupněm navlhnutí izolačního systému klesají jeho izolační odpory.

Vysušení izolačních systémů se v některých případech používá u strojů čerstvě převinutých, opravených, nebo u strojů, které se uvádějí do provozu po delší odstávce.

5.9.5.2 Zintenzivnění provozování stroje

Dojde-li u stroje v období, kdy provádíme měření izolačních odporů, k tomu, že intenzita jeho provozu se zvýší, tj. stroj bude provozován v daném časovém úseku delší dobu (za jistých okolností i při vyšším výkonu), zvýší se izolační odpory stroje. Tento jev souvisí s navlháním a vysoušením stroje.

Pracuje-li stroj, je nahřátý a vysouší se. Teplé chladivo (obvykle vzduch, ale i vodík,) má při vyšší teplotě nižší relativní vlhkost a je tedy schopné ze stroje odvádět větší množství vody. Dále je třeba si uvědomit, že elektrické stroje pracují při poměrně vysoké teplotě vzhledem k teplotě varu vody. Platí, že čím blíže teplotě varu vody, tím intenzivnější odpar vody z izolace. U strojů s řízenou teplotou chladiva se bude projevovat pouze druhý efekt.

V momentě, kdy stroj nepracuje, chladne postupně až na teplotu okolí a navlhá. To je dáno tím, že při stejném množství obsažené vody má studené chladivo vyšší relativní vlhkost a tedy i schopnost předávat vodu do stroje. Navíc, jelikož izolace není vyhřívána ztrátovým teplem motoru, odpar vody z ní je pouze minimální. Důsledkem těchto faktů je, že více vody se do izolace vstřebává, než se z ní odpařuje a to až do chvíle, než se vlhkost izolace vyrovná s vlhkostí okolního vzduchu. To platí i u strojů chlazených např. vodíkem, protože při odstávce není obvykle udržován přetlak ve stroji, ani oběh chladiva, takže vlhkost může pronikat do stroje.

Z výše uvedeného vyplývá, že změníme-li poměr mezi dobou, kdy stroj pracuje a dobou, kdy je v odstávce tak, aby delší dobu pracoval, bude se stroj delší dobu vysoušet a kratší dobu navlhát, důsledkem čehož bude vlhkost jeho izolace nižší a tedy výsledné izolační odpory vyšší.

Obdobně se stroj bude chovat v případě, že bude pracovat při větším výkonu. Stroj bude produkovat větší ztrátové teplo. V případě strojů, které nemají řízenou teplotu chladiva, dojde k nárůstu teploty stroje, u strojů, které řízenou teplotu chladiva mají, dojde k zvýšení objemu chladiva o stejných parametrech. V obou případech je výsledkem zintenzivnění vysoušení izolace ve stroji.

Z předchozího lze odvodit, že u značného množství strojů budou izolační odpory závislé na tom, kdy během roku budeme na stroji měření provádět, protože během roku se u většiny strojů mění intenzita jejich provozu. U některých strojů se může obdobná závislost projevit například i na dni v týdnu (změny denního diagramu zatížení), nebo na počasí (pronikání venkovní vlhkosti do strojovny při déletrvajících deštích) a podobně.

Zvlášť výrazně se tyto jevy budou projevovat v případě hydrogenerátorů. Vlhkost v jejich okolí je obvykle poměrně vysoká a v případě odstávky zpravidla klesá i teplota v prostoru strojovny, jelikož ta již není vyhřívána ztrátovým teplem stroje. V případě hydrogenerátorů pracujících na vodních dílech s průtočným, nebo akumulacním režimem dojde k zintenzivnění provozu v době jarního tání.

Změny v intenzitě provozu však mohou nastat i v intenzitě provozu turbogenerátorů, které napracují v nepřetržitém provozu (některé uhelné elektrárny) v období zimní (v dnešní době i letní) špičky. Na izolační odpory turbogenerátorů nemusí mít vliv jen samotný provoz, ale také setrvávání ve stavu horké rezervy.

5.9.5.3 Kompletní vyčištění stroje

Proběhne-li kompletní vyčištění stroje, dochází obvykle k zvýšení jeho izolačních odporů. Tento jev je způsoben tím, že nečistoty, které se nacházejí ve stroji, jsou často elektricky vodivé (nebo alespoň výrazně vodivější než izolace ve stroji). Z toho vyplývá, že nečistoty ve stroji budou vytvářet částečně vodivou vrstvu. Tato vrstva má za následek zvýšení svodových proudů a tedy i pokles izolačních odporů stroje. Dojde-li k tomu, že se bude ve stroji vyskytovat i větší množství prachu, který je vysloveně dobře elektricky vodivý (prach kovový, grafitový a podobně), může povrchová vrstva nečistot působit dokonce jako povrchové zkraty izolačního systému stroje.

Zvláště u čel vinutí může být znečištění izolace problém, neboť nejsou, na rozdíl od tyčí uložených v pleších, prakticky nijak chráněny. Vytvoří-li se na čelech vinutí vrstva nečistot o dostatečné elektrické vodivosti (obvykle tedy o větší tloušťce), bude docházet k tomu, že touto vrstvou bude do plechů stroje proudit svodový proud, který se na čistém stroji musel uzavírat přes izolaci cívek (teoreticky i přes plynné chladivo). Jelikož odpor vrstvy nečistot bude výrazně nižší než odpor izolace, dojde k tomu, že vzrostou svodové proudy a tedy klesnou i izolační odpory.

V případě, že dojde k vyčištění stroje, budou nežádoucí vrstvy odstraněny a svodové proudy se budou opět muset uzavírat přes izolaci. Důsledkem toho bude nárůst izolačních odporů.

5.9.5.4 Změna pomocných technologií

Na izolační odpory stroje mohou mít vliv i změny v pomocných technologiích stroje a to ať již výměna za jiný typ, opravy na nich, nebo změny jejich provozních parametrů.

Největší vliv budou mít změny v chladicích systémech strojů. Tyto systémy totiž ovlivňují jak teplotu stroje (jejich primární účel), tak i jeho vlhkost (například zařízení pro vysoušení vodíku), ale i řadu dalších parametrů jako například množství nečistot v chladivu (filtrace vzduchu nebo vodíku).

Například dojde-li u stroje s chladicím systémem voda-vodík k výměně zařízení pro vysoušení vodíku za nový výkonnější, který je schopen vodík vysušit na nižší relativní vlhkost, dojde k tomu, že stroj bude více vysušen. S výkonem zařízení bude stoupat rychlost vysoušení, což je důležité při měření izolačních odporů u strojů, které pracují ve špičkovém režimu. S výkonem zařízení bude stoupat rychlost vysoušení, což je

důležité při měření izolačních odporů u strojů, které pracují ve špičkovém režimu (stroj pracuje – vysouší se, stroj nepracuje – navlhá), protože výsledná vlhkost izolace bude nižší. Se schopností vysušit vodič na nižší relativní vlhkost bude klesat maximální míra vysušení stroje, protože stroj (jeho izolace) je schopen vysušet se pouze na úroveň relativní vlhkosti, ve které pracuje, což je relativní vlhkost chladiva – vodíku. Toto bude důležité především u strojů pracujících dlouhodobě na výkonu (např. generátory v jaderných elektrárnách), jelikož v takovém případě je možné dosáhnout úplného vysušení na tutéž hodnotu, jako je relativní vlhkost chladiva.

Výsledkem zlepšení pomocných technologií stroje může tedy být i zvýšení naměřených izolačních odporů stroje.

5.10 Problematika vlivu dielektrického ohřevu při měření izolačního odporu

Při přiložení střídavého napětí na izolaci prochází touto jistý proud (v závislosti na její impedanci), který vytváří ztráty. Měření izolačního odporu by se však mělo provádět stejnosměrným napětím, které by takovéto ztráty vyvolávat v dielektriku nemělo.

Při měřeních na přístrojích, které se pro měření izolačního odporu používají, však bylo zjištěno, že tyto nepracují s čistě stejnosměrným napětím (napětí je vysokofrekvenčně zvlněno). Je to dáno tím, že tyto přístroje pracují z baterií a jejich součástí jsou tedy měniče stejnosměrného napětí, typicky v provedení jako spínané zdroje napájené z baterií. Tento jev se v různé míře projevuje u všech zkoumaných přístrojů, je však třeba také říci, že toto zvlnění nemá velkou efektivní hodnotu (bývá v jednotkách procent jmenovité hodnoty stejnosměrného napětí, obvykle ještě méně). Vezmeme-li v úvahu velmi malé proudy (proudy nakrátko), které jsou přístroje pro měření izolačního odporu schopny do izolace dodat (např. Megget S1-5005 5mA, Megger BM11D 2mA,...), výkon dodávaný do izolace je minimální. I pro napětíovou hladinu 5kV je výkon dodávaný do izolace 25W. Vezmeme-li navíc v úvahu, že tak velký proud izolace odebírá jen krátkodobě na počátku nabíjení (běžně při měření odebírá i o několik řádů méně) a dále zohledníme-li, že dielektrický ohřev způsobuje pouze střídavá složka, která díky svému napětí nese jen minimum energie (řádově jednotky procent), nepřesahuje výkon dielektrického ohřevu izolace při měření izolačního odporu jednotky wattů (spíše desetiny wattů). Při hmotnosti izolace ve stroji, která bude u generátorů dosahovat desítek, možná i stovek kilogramů, můžeme dielektrický ohřev a jeho vliv na vlhkost stroje při měření izolačního odporu zanedbat.

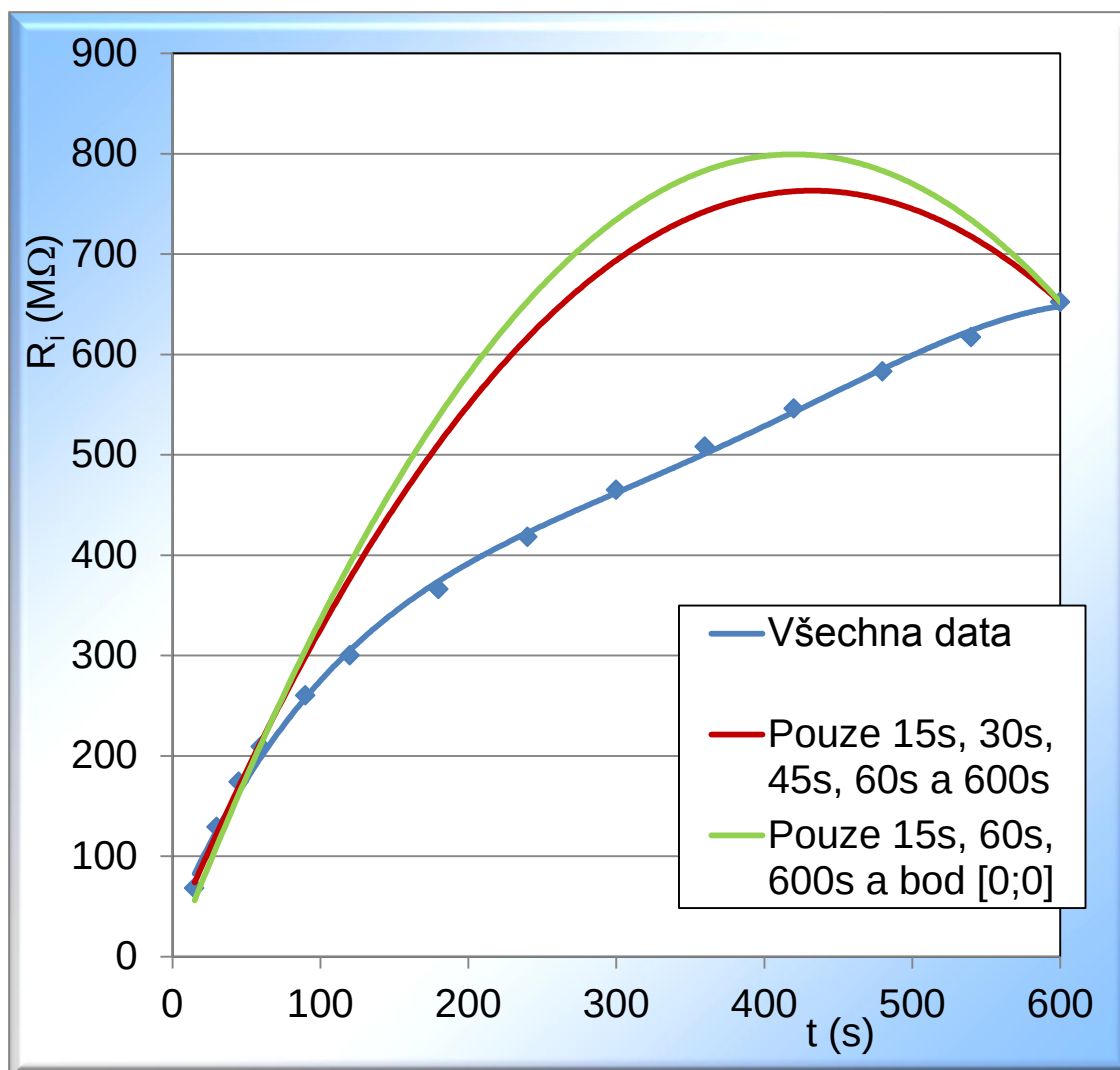
5.11 Problematika počtu bodů na naměřené absorpční charakteristice

Velkým problémem, s kterým se v současné době můžeme setkat je to, že při měřeních na reálných 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. Ani tyto hodnoty nebývají v praxi dodržovány a často se setkáváme s tím, že jsou měřeny jen hodnoty pro časy 15s, 60s a 600s a to z důvodu, že jsou potřebné pro výpočty polarizačních indexů p_{i60} a p_{i600} . Takto naměřené hodnoty však prakticky neumožňují žádné další zpracování.

Z měření na reálných strojích vyplynulo, že čím více hodnot se během měření absorpční charakteristiky naměří, tím lépe jsou naměřená data dále zpracovatelná. Z dat, kde jsou naměřeny pouze tři hodnoty, také není vidět, že během měření došlo k výkyvům měřených hodnot (např. viz kapitola o narušení polí měřeného stroje). Moderní měřiče izolačních odporů jsou schopné zaznamenávat naměřené hodnoty izolačních odporů (často současně s napětím a proudem) v poměrně krátkých intervalech. Dnes jsou na trhu běžně přístroje schopné zaznamenávat (nebo po kabelu odesílat) hodnoty po pěti sekundách, některé dokonce po jedné sekundě (např. MEGGER MIT1020/2).

Další velkou chybou je také, že jako další naměřená hodnota pro tvorbu grafu absorpční charakteristiky z přímo naměřených (nezpracovaných) hodnot, se používá počátek souřadnic (nulová hodnota izolačního odporu v čase 0s). Tím vzniká další chyba (viz kapitola o neprotnutí počátku souřadnic).

To, jak velký vliv má počet naměřených bodů na výslednou absorpční charakteristiku si můžeme předvést na příkladu. Příslušná tabulka hodnot ke grafu je v Příloze Z.

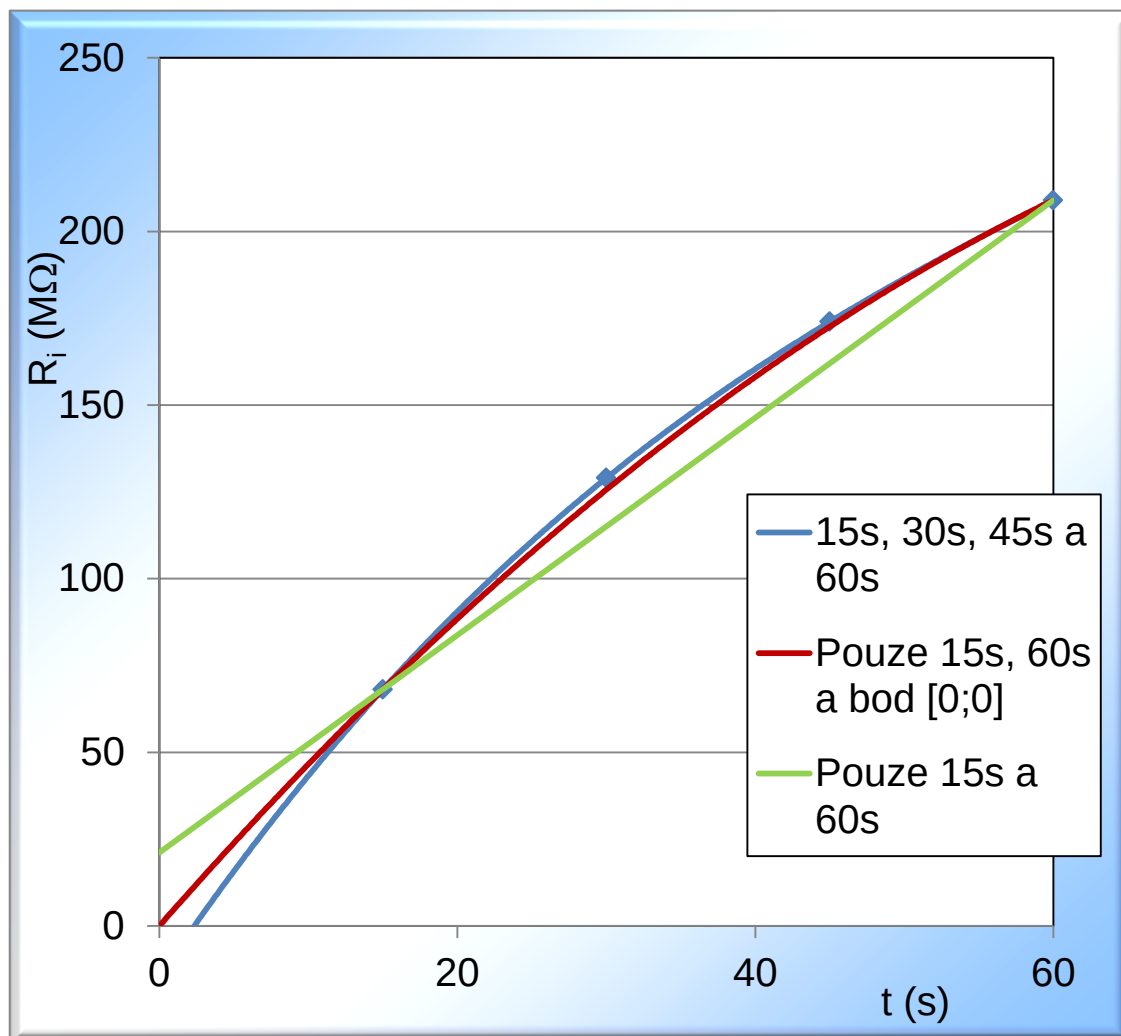


Obr. 5-35 Změna absorpčních charakteristik v závislosti na množství proložených dat u synchronního hydrogenerátoru v.č. 33784 při napětí 5kV – fáze U

Z předchozího grafu je patrné, že pokoušet se o prokládání absorpční charakteristiky na základě menšího počtu naměřených bodů v celém rozsahu od 0s do 600s vede k tomu, že takto získaná charakteristika je nesmyslná (ani teoreticky nemůže odpovídat).

Vzhledem k tomu, že pouze z kvalitně změřené absorpční charakteristiky lze určit některé parametry měřené izolace, můžeme říci, že bez dat naměřených pro danou charakteristiku v relativně velkém počtu po celém časovém rozsahu nebude mít měření dostatečnou vypovídací schopnost pro kvalitní diagnostiku. Na některé diagnostické parametry sice nebude mít nesprávný tvar charakteristiky vliv (např. polarizační indexy, neboť ty vycházejí z konkrétních hodnot odporů, nikoliv z tvaru charakteristiky), na jiné parametry však vliv mít bude. Příkladem může být například sklon (stoupavost) absorpční charakteristiky v bodě 600s, ze kterého lze odhadnout, zda izolační odpor ještě výrazně poroste, popřípadě i jaká bude přibližně jeho ustálená hodnota.

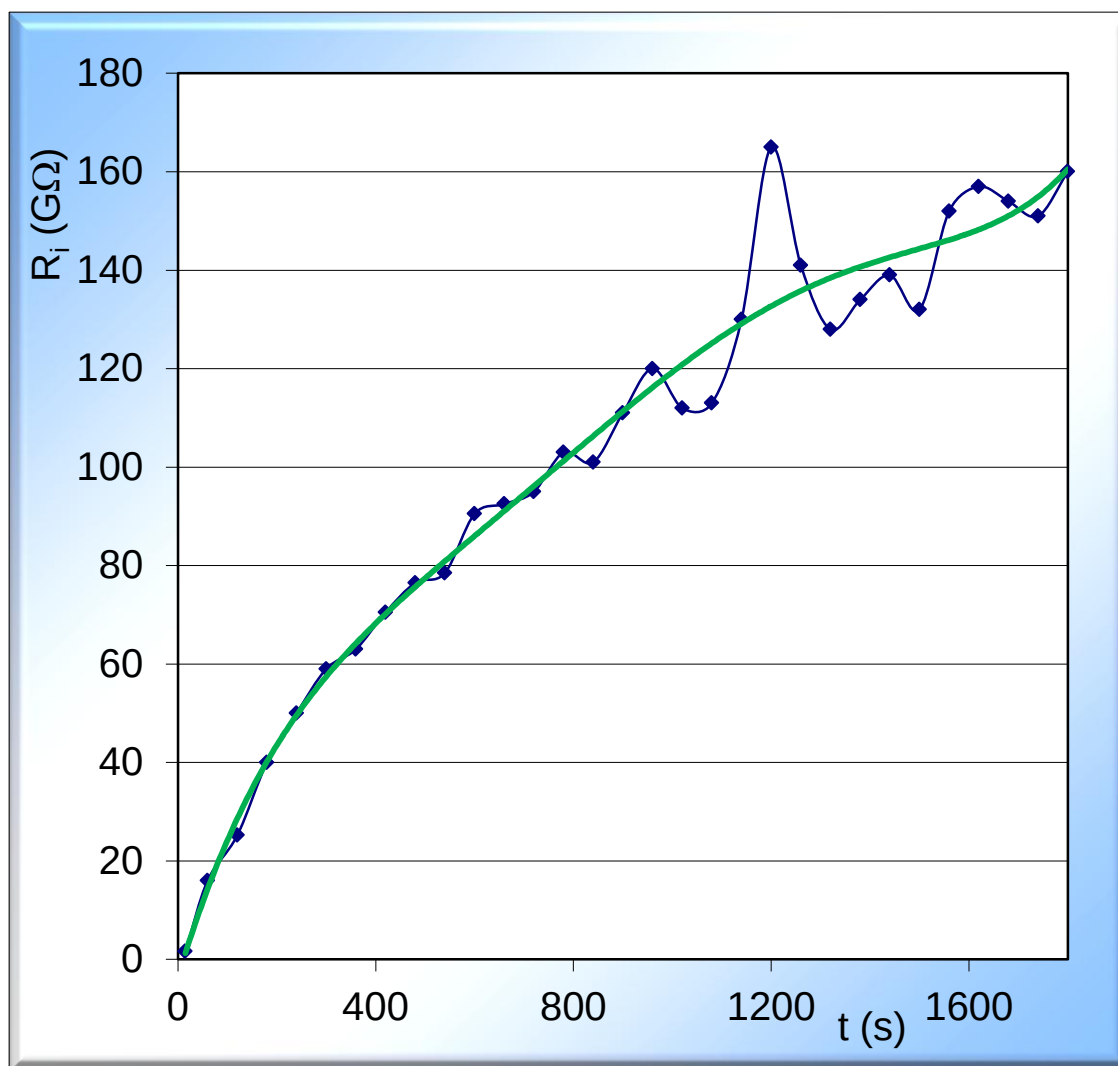
Omezíme-li se pouze na prvních 60s měření situace se o něco zlepší. To můžeme vidět na následujícím grafu. Příslušná tabulka hodnot ke grafu je v *Příloze Z*.



Obr. 5-36 Změna absorpčních charakteristik v závislosti na množství proložených dat pro prvních 60s u synchronního hydrogenerátoru v.č. 33784 při napětí 5kV – fáze U

Z předcházejícího grafu je zřejmé, že charakteristika vytvořená proložením naměřených bodů 15s a 60s je lineární a tudíž neodpovídající. Charakteristika vytvořená proložením naměřených bodů 15s, 60s a bodu [0;0] sice svým tvarem již charakteristiku vytvořenou ze všech čtyř naměřených bodů značně připomíná, ale díky použití bodu [0;0] prochází právě tímto počátkem souřadnic a není tak možné odečíst na ose x čas o který charakteristika neprotne počátek souřadnic. Tento čas je důležitý pro přepočítání naměřených charakteristik na teoretický neomezený proud dodávaný měřicím přístrojem (viz kapitola o neprotnutí počátku souřadnic).

Z hlediska měření je také velmi důležité, že v případě, kdy měříme velké množství hodnot, je na absorpční charakteristice vidět, že její měření bylo ovlivněno (například narušením polí měřeného objektu (viz příslušná kapitola)). Příslušná tabulka hodnot ke grafu je v *Příloze AA*.



Obr. 5-37 Izolační odpory naměřené na izolaci motoru v.č. 154 317 při napětí 253V, porovnání proložení s naměřenými hodnotami.

Z předchozího grafu je zřejmé, že díky značnému množství naměřených bodů je na něm zřetelně vidět, jak jsou naměřené hodnoty narušeny. Jednalo se o chyby vzniklé průchodem osob a přejezdem jeřábu v oblasti měření (narušení polí měřeného objektu). Je zde vidět, že narušena je i hodnota pro $t=600\text{s}$. To je velmi závažné, neboť se jedná o hodnotu, z níž je prováděn výpočet polarizačního indexu p_{i600} .

Ze všech měření vyplynulo, že čím více bodů během měření absorpční charakteristiky naměříme, tím snazší je dosáhnout kvalitního prokladu charakteristiky a je větší šance odhalit případné chyby měření.

6 NOVÁ METODIKA PRO STANOVENÍ IZOLAČNÍCH ODPORŮ A POLARIZAČNÍCH INDEXŮ U ELEKTRICKÝCH STROJŮ TOČIVÝCH

Způsob, kterým je dnes přistupováno k měření izolačních odporů a výpočtům z nich prováděných (polarizační indexy), je značně neuspokojivý. Je to dáno mnoha faktory, z nichž je třeba zmínit především nedostatečné nastavení pravidel (normalizace) pro měření a zpracování naměřených dat, koncepční zastaralost přístupů a nedostatečné povědomí o teoretickém vývoji v dané problematice jako takové.

Z toho důvodu se ukázalo jako nutné vypracovat novou metodiku pro určování izolačních odporů a od nich odvozených výpočtů.

Tato metodika je určena k užití na strojích středních a velkých výkonů. Na strojích malých výkonů by byla pro svoji složitost neefektivní.

6.1 Předmluva k metodice

Tato metodika si bere za cíl zlepšit úroveň měření izolačních odporů, zpracování naměřených dat a provádění výpočtů, které se z takto získaných dat provádějí. Metodika se nezabývá hodnocením stavu měřených izolačních systému jako takových, ale pouze přípravou dat, na jejichž základě má být toto hodnocení prováděno. Pokud je někde v metodice zmíněno vyhodnocování zjištěných parametrů, je to z důvodu, že je to důležité z hlediska měření, nebo výpočtů.

Metodika si nebere za cíl pojmut všechny aspekty známé v moderní vědě k dané problematice (například mechanismy fungování jevů), ale zaměřuje se pouze na ty aspekty, které jsou významné z hlediska technické praxe.

Metodika by neměla být chápána jako dogma, ale jako živý materiál určený k dalšímu vývoji, který by měl probíhat v souladu s postupem vědeckého poznání v daném oboru a zjištění učiněných v technické praxi.

6.2 Základní pravidla

Při měření izolačních odporů a výpočtům z nich prováděných je třeba vždy dodržovat některá elementární pravidla, mezi která patří:

- 1) Při měřeních je nutné dodržovat všechna potřebná bezpečnostní opatření, aby se zabránilo škodám na životech, zdraví i majetku.
- 2) Měřením i výpočtům by měla být vždy věnována maximální pečlivost.
- 3) Vždy je výrazně lepší přesně měřit, než se vzniklé chyby snažit eliminovat výpočtem.
- 4) Vždy je lepší dodržovat parametry měření, než se jejich vlivy snažit eliminovat výpočtem.
- 5) Měření i výpočty by měly být (je-li to technicky možné) prováděny vždy s přesností alespoň o řád větší, než je nutné z hlediska dalšího užití získaných hodnot.
- 6) O měření se vypracovává podrobný protokol.
- 7) Zkoušky se provádějí pomocí stejnosměrného, vyhlazeného napětí.

6.3 Vybrané termíny a definice

Absorpční charakteristika – Závislost velikosti izolačního odporu na čase, který uplynul od připojení stejnosměrného měřicího napětí na měřený objekt (stroj, nebo část stroje).

Měřič izolačních odporů - Měřicí přístroj (obvykle přenosný) s integrovaným zdrojem měřicího napětí, jež udává (popřípadě i zaznamenává) naměřené hodnoty izolačních odporů (v násobcích Ω). Další funkce přístroje (výpočty polarizačních indexů, měření napětí a proudů, ...) nejsou vyloučeny.

Měřicí plán – Soubor pravidel měření vypracovaný pro každý konkrétní měřený objekt.

Plán zpracování naměřených dat – Soubor pravidel, která určují, jakým způsobem mají být zpracována naměřená data, aby výsledná data odpovídala technické realitě izolace.

Teplota měřené izolace – Touto teplotou se rozumí teplota materiálu izolace v bodě, který je určen jako referenční v měřicím plánu.

Vlhkost měřené izolace - Touto vlhkostí se rozumí skutečná vlhkost materiálu izolace, kterou lze obvykle určit pouze na základě odběru a analýzy části materiálu izolace.

Teplota okolí – Touto teplotou se rozumí teplota vzduchu (popřípadě jiného plynu) obklopující stroj během měření.

Vlhkost okolí - Touto vlhkostí se rozumí relativní vlhkost vzduchu (popřípadě jiného plynu) obklopující stroj během měření.

Napět'ová hladina měření – předpokládané napětí, kterým by měla být izolace měřena. Tato hodnota se nastavuje na měřiči izolačního odporu.

Měřicí napětí – Jedná se o skutečnou velikost stejnosměrného napětí, kterou měřič izolačního odporu přivede během měření na měřenou izolaci. Jedná se o ustálenou hodnotu napětí přivedeného na izolaci po odeznění přechodných dějů probíhajících na počátku měření (obvykle napětí při ukončení měření).

Maximální proud měřiče izolačního odporu – jedná se o maximální proud, který je měřič izolačního odporu schopen dodávat do měřené izolace. Jedná se o výrobcem udávanou minimální hodnotu, kterou musí být přístroj schopen dodat do izolace.

6.4 Měřicí plán

Pro měření každého stroje je nutné vypracovat měřicí plán, který stanoví pravidla, která je během měření nutné dodržovat. Součástí měřicího plánu jsou například:

- 1) bezpečnostní pravidla před, během a po měření
- 2) způsob zapojení měřicí aparatury
- 3) napět'ová hladina měření
- 4) teploty, za kterých má být stroj měřen
- 5) požadované parametry měřiče izolačního odporu
- 6) způsoby odstínění (popřípadě odrušení) měření od vnějších vlivů
- 7) stav stroje během měření
- 8) kompletní postup měření včetně např. časů měření, časů zkratování svorek po měření přestávek mezi měřeními a podobně.
- 9) použité normy a předpisy
- 10) revize měřicího plánu
- 11) odpovědné osoby

a mnohé další

Účelem měřicího plánu je zajistit plnou reprodukovatelnost měření a umožnit porovnatelnost měření mezi sebou na témže stroji. Jsou-li měřicí plány různých strojů téhož typu stejné (nebo alespoň stejné v důležitých bodech a podobné v bodech ostatních) dá se předpokládat, že budou porovnatelná i měření mezi takovými stroji.

Při měření na různých typech strojů se i při stejných měřicích plánech nedá zaručit porovnatelnost měření mezi stroji. Takovouto porovnatelnost je třeba ověřit experimentálně.

Celý plán, včetně všech jeho částí musí být napsán zcela srozumitelně, s jasnými formulacemi tak, aby nedocházelo k omylům, dezinterpretacím a nesrovnalostem.

6.5 Podmínky měření

Podmínky měření značně souvisejí s měřicím plánem, neboť měřicí plán by z nich měl vycházet. Jejich dodržování by mělo napomoci tomu, aby bylo měření vždy co možná nejkvalitnější.

6.5.1 Bezpečnostní pravidla před, během a po měření

Prvořadým úkolem při zajišťování jakékoliv pracovní činnosti musí být vždy zajištění ochrany života a zdraví osob, a to osob zúčastněných i nezúčastněných. Hned na druhém místě je pak ochrana majetku. Z toho důvodu jsou součástí měřicího plánu předpisy, směrnice a pokyny sloužící k zajištění bezpečnosti práce na pracovišti.

Podle těchto pravidel se stanoví, jaké práce bude kdo provádět, jaká kvalifikace je pro kterou práci třeba (například podle vyhl. 50/1978 Sb. [18]).

Pravidla stanoví, které práce smějí být kdy prováděny, které práce prováděny být nesmějí, nebo podmínky, za jakých smějí být práce prováděny.

Pravidla dále stanoví, jaké ochranné pomůcky jsou pracovníci povinni používat, popřípadě na jaké další mají nárok.

Pravidla by měla obsahovat veškeré potřebné předpisy, směrnice a pokyny tak, aby byla bezpečnost práce vždy zajištěna.

6.5.2 Zapojení aparatury

Pro měření izolačního odporu na statoru se používají zapojení:

- 1) Kostra stroje (železo) – vodič vinutí
- 2) Vodič jednoho vinutí – vodič jiného vinutí
- 3) Kostra stroje (železo) – jiná měřená část stroje (ochranné vrstvy, ...)

Kostra stroje je vždy uzemněná.

Pro měření izolačního odporu na rotoru se používají zapojení:

- 1) Kostra rotoru (železo) – vodič vinutí
- 2) Kostra rotoru (železo) – sběrací element (kroužky, komutátor)
- 3) Vodič vinutí – vodivé bandáže vinutí

Kostra rotoru je vždy uzemněná.

Při měření na stroji, kde je možné rozpojit uzel (nebo uzly) mezi vinutími se provádí jeho rozpojení. Není-li možné provést rozpojení uzlu, nebo bylo-li by to příliš obtížné, například bylo-li by nutné značné rozebrání stroje, měří se všechna propojená vinutí jako celek. Začátek a konec měřeného vinutí se zkratuje, jedná-li se o více vinutí s nerozpojitelným uzlem, zkratují se začátky všech vinutí. Je-li nerozpojitelný uzel přístupný propojíme jej se zkratovanými začátky vinutí. Je-li za provozu uzel (nebo jiná část) vinutí propojen se zemí, je nutné jej před měřením od země odpojit. Vinutí, která nejsou měřena, se během měření zkratují (začátek a konec vinutí) a uzemní (propojí s kostrou stroje).

Všechna zapojení je možné provádět v obou polaritách (+,-). Doporučuje se však, tam kde je jedna ze svorek připojena na uzemněnou kostru, aby se na kostru připojovala kladná svorka měřicího přístroje.

Pro připojení měřicího přístroje se používá buď hrotů, nebo svorek s ostrými zuby (hroty), které jsou svírány pružinou. Pružiny takových svorek musejí být dostatečně silné, aby zajišťovaly kvalitní kontakt. Místo, kde jsou svorky připojovány (zabodávány hroty) musí být zbaveno všech vrstev zamezujících kvalitnímu kontaktu (barva, vrstvy oxidace či koroze, přítomnost olejů, ...). Optimální je zcela čistý kov. Jsou-li přítomny, je vhodné použít vývody, ochranné svorky a podobně.

6.5.3 Napět'ová hladina při měření stroje

Napět'ová hladina, na které bude prováděno měření izolačních odporů stroje, musí být stanovena s ohledem nejen na konstrukci izolačního systému stroje (materiál izolace, její tloušťka, konstrukční uspořádání, ...), ale i na její předpokládaný stav (poškození navlhnutí, ...). Není-li stav izolace znám (nelze jej ani odhadnout), je nutné předpokládat že stav je špatný a podle toho postupovat.

O napět'ové hladině měřicího napětí hovoříme proto, že měřiče izolačního odporu typicky nastavují měřící napětí o něco vyšší, než je napět'ová hladina měření, kterou jim

před měřením nastavíme. U kvalitních přístrojů je rozdíl velmi malý, u méně kvalitních přístrojů však může být rozdíl poměrně velký (10% i více).

Z výše uvedeného je zřejmé, že je třeba uvádět nejen napět'ovou hladinu měření, ale i přesné měřicí napětí.

Napět'ová hladina pro měření stroje se odvozuje od stejnosměrného zkušební napětí stroje. Napět'ová hladina měření ani měřicí napětí nesmí překročit zkušební napětí stroje. Jako nejvhodnější se jeví, pro stroje s izolací v dobrém stavu, stanovit napět'ovou hladinu měření na 30 až 50% zkušební napětí stroje. Optimálně stanoví napět'ovou hladinu pro měření výrobce stroje, nestane-li se tak, stanoví ji provozovatel stroje. V zájmu porovnatelnosti naměřených dat by všechna měření na témže stroji měla být prováděna na stejné napět'ové hladině měření (nebrání-li tomu zvláště významné okolnosti). Je-li izolace ve špatném stavu, nebo je-li navlhla a podobně, je nutné napět'ovou hladinu měření odpovídajícím způsobem snížit a to i několikanásobně.

Jak již bylo napsáno, měřiče izolačního odporu nenastavují měřicí napětí přesně a proto je u naměřených hodnot třeba provést přepočet z měřicího napětí na napět'ovou hladinu měření. Z toho důvodu je třeba provést měření absorpční charakteristik alespoň pro tři napět'ové hladiny měření. Kromě základní napět'ové hladiny měření tedy volíme ještě dvě další, jejichž hodnota se obvykle pohybuje okolo 1/3 a 2/3 základní napět'ové hladiny měření. Velikost napět'ových hladin měření se obvykle zaokrouhluje nahoru na celé stovky voltů, nebo po pěti stech voltech. Z naměřených absorpčních charakteristik je poté možné získat napět'ové závislosti izolačních odporů a provést potřebné přepočty. Je však nutné brát v úvahu i vnější vlivy na tato měření (především teplotu měření) a nejprve provést přepočet naměřených charakteristik podle nich.

Po měření se obvykle obě strany měřené izolace zkratují. Tuto funkci již v sobě má mnoho moderních měřičů izolačního odporu integrovanou. Je vždy nutné určit čas, po který má být izolace zkratována a vždy jej dodržovat. Není-li funkce integrována v měřiči izolačního odporu, je nutné provést zkratování ručně přes malý odpor (řádově Ω), aby nedocházelo k rázům v izolaci).

6.5.4 Teplota měření stroje

Měření izolačních odporů stroje by mělo být prováděno za tepla, tedy na nahřátém stroji. Optimální je měření na stroji, který byl právě odstaven z dlouhodobého provozu a je tedy nejen plně prohřátý na pracovní teplotu, ale i vysušený provozem. Teplota stroje, na kterém je prováděno měření nesmí klesnout pod teplotu rosného bodu okolního vzduchu.

Vzhledem k tomu, že teplota stroje klesá po odstavení přibližně po hyperbole, je nutné, aby měření probíhalo až ve fázi, kdy stroj nechladne příliš rychle, neboť by to negativně ovlivňovalo měření. Pro běžné teploty okolního vzduchu (mezi 20 a 25°C) by teplota, při které je stroj měřen neměla klesnout pod 35°C, jelikož by stroj mohl začít navlhat.

Vzhledem k tomu, že na stroji je před měřením třeba pracovat (rozpojit uzly, připojit svorky, ...), je nutné, aby teplota stroje nebyla příliš vysoká. Vznik ireverzibilní změny povrchu kůže (popáleniny) nastává při teplotě 53°C již po 60s působení a při 60°C přibližně po 10s působení (údaje převzaty z [16]). Z toho důvodu by měl mít stroj na počátku měření teplotu nižší než 55°C (relativně malá pravděpodobnost vzniku popálenin). Vždy při teplotách stroje (nikoliv izolace), nebo jeho části vyšších než 45°C, kdy vznik popálenin hrozí až při dlouhodobém vystavení (řádově desítky minut), musejí být pracovníci vybaveni ochrannými pomůckami (rukavice, ...).

Teploty, při které budou izolační odpory měřeny, by měla být stanovena výrobcem, a to s ohledem na konstrukci izolačního systému i celého stroje. Neurčí-li teploty měření výrobce, určí ji provozovatel. Obvykle se u větších strojů provádí měření integrovaným čidlem přímo v drážce, které měří teplotu izolace v definovaném bodě. Teplotou měření se rozumí teplota, kdy bylo měření zahájeno (pro každou napěťovou hladinu a každé vinutí zvlášť). Předpokládá se, že stroj bude chladnout vždy přibližně stejně rychle, protože teplotní podmínky (dochlazování, teplota okolního vzduchu, ...) budou stejné. Není-li tom tak, je nutné tyto nestejnosti odstranit, nebo alespoň minimalizovat (vytápění, nebo chlazení místnosti, změna dochlazování stroje a podobně).

Pokud je to alespoň trochu možné, měla by být při všech měřeních stejná i teplota okolí měřeného stroje (okolní vzduch). Tato teplota totiž výrazně ovlivňuje teplotu na částech izolace, které nejsou uloženy v drážkách (nezakrytovaná čela vinutí). Rozdílná teplota těchto částí izolace by mohla nepříznivě ovlivnit výsledky měření celé izolace měřeného vinutí.

Co se týká měření za studena, provádí se pouze jako orientační měření spíše pro zjištění, zda není izolace proražená, zda mají všechny fáze přibližně stejný izolační odpor a podobně. K diagnostice stavu izolace stroje je takové měření zcela nevhodné. Může se provádět také v případě, že se provádí kontrola izolace po výrobě, opravě nebo převinutí ještě předtím, než bude taková izolace vysušena.

6.5.5 Požadavky na měřiče izolačních odporů

Jelikož je měření izolačních odporů v dnešní době prováděno prakticky pouze k tomu určenými speciálními přístroji (měřiči izolačních odporů), je takový měřicí přístroj jedním z nejdůležitějších článků měření a je tedy nutné na něj klást určité nároky, které zaručí dostatečnou kvalitu měření.

Měřič izolačního odporu musí být schopen měřit dostatečně velký rozsah izolačních odporů. Pro měření na strojích s porušenou izolací je nutné měřit řádově desítky kΩ. Pro měření na strojích s kvalitní moderní izolací, velkým nominálním napětím a relativně malým rozsahem izolačního systému stovky GΩ, někdy i jednotky TΩ.

Měřič izolačního odporu by neměl mít chybu měření izolačního odporu horší $\pm 10\%$, je však vhodnější používat měřiče s chybou $\pm 5\%$, které jsou dnes již zcela běžné. Při hodnotách izolačního odporu nad $1\text{ T}\Omega$ postačí přesnost $\pm 25\%$.

Důrazně se doporučuje používat stíněné vodiče pro propojení měřiče izolačních odporů a měřeného objektu.

Měřič izolačních odporů musí být schopen dodávat do izolace během měření dostatečný proud. Pro účely měření izolačních systémů elektrických strojů normalizace neexistuje. Je ale možné se přidržet normy ČSN EN 61557-2 ed. 2 [17] (harmonizováno s EN 61557-2), byť tato norma původně slouží pro účel měření izolačních odporů na rozvodech nízkého napětí. Tato norma v podstatě požaduje, aby byl měřicí přístroj schopen dodávat do izolace alespoň proud 1 mA . Měřicí přístroje se schopností dodávat do izolace vyšší proud jsou však vhodnější. Jako vhodné se jeví přístroje schopné dodávat proud 3 až 5 mA . Maximální proud, který je měřič schopen dodávat do izolace je často shodný s jeho zkratovým proudem.

Co se týká maximálního proud, který je schopen měřič izolačních odporů dodat do izolace, ten není omezen. Mnoho moderních přístrojů má však ochranu proti příliš velkým proudům a to z důvodu ochrany proti poškození izolace.

Měřiče izolačních odporů jsou dnes prakticky obvykle nabíjeny z integrovaného akumulátoru, výjimečně z primárních baterií nebo galvanicky oddělného síťového zdroje. Z toho důvodu je třeba, aby měl měřicí přístroj akumulátor o dostatečně velké kapacitě, aby vydržela po celou předpokládanou dobu měření (u běžného stroje 3 fáze, tři napěťové hladiny, každé měření 10 minut, tedy $3 \times 3 \times 10 = 90$ minut měření při předpokládaném napětí měření).

Jelikož měřiče izolačních odporů pracují obvykle z akumulátoru, je izolace napájena z integrovaného spínaného zdroje, což sebou přináší jisté problémy. Napětí, které je přivedeno na izolaci je sice stejnosměrné, nikoliv však zcela vyhlazené. Zvlnění by však mělo být pouze vysokofrekvenční (nízkofrekvenční zvlnění pod 10 kHz je nepřijatelné) a efektivní hodnota vysokofrekvenčního zvlnění by neměla překročit 2% nastavené napěťové měřicí hladiny.

Měřič izolačních odporů by měl být schopen dodávat potřebné stejnosměrné napětí o velikosti určené podle předchozí části metodiky. Kromě dostatečně velkého napětí by mělo být možné napěťovou hladinu měření dostatečně přesně nastavit (přístroje obvykle umožňují nastavení po 25 V).

Vzhledem k dalšímu předpokládanému zpracování dat by měl mít měřič izolačních odporů možnost propojení s PC a export naměřených dat do něj. Je vhodné, aby byla data zaznamenávána v intervalu 5s, nebo ještě lépe každou sekundu. Výhodou je, pokud měřič zaznamenává nejen izolační odpor, ale i napětí a proud.

6.5.6 Odstínění a odrušení během měření

Jelikož narušení elektromagnetického i elektrostatického pole měřeného stroje způsobuje výrazné narušení měření izolačních odporů, je nutné měřený stroj odstínit a odrušit.

V ideálním případě, je-li to možné, je vhodné přesunout měřený stroj na speciální zkušebnu, kde je možné jej umístit do zcela elektromagneticky i elektrostaticky odstíněné zkušebny. To však nebývá v technické praxi obvykle možné (kvůli nepřítomnosti takových zkušeben v místě, kvůli velkým rozměrům a hmotnostem strojů, kvůli obtížné nebo nemožné demontovatelnosti strojů a podobně). Z toho důvodu je nutné určit opatření k odstínění a odrušení měřeného stroje v průmyslových podmínkách.

Stroj je nutné od okolí oddělit přepážkami (panely), které jsou vyrobeny z plného ocelového plechu (pletivo ani podobné materiály zdaleka nepostačují). Tyto panely musejí být umístěny tak, aby se navzájem překrývaly (aby v hrazení nevznikaly mezery). Dále je nutné, aby se spodní hranou dotýkaly podlahy (pokud možno bez mezer). Hrazení by mělo být 1,5 krát vyšší, než je měřený stroj a mělo by stroj obklopovat ze všech stran. Hrazení musí být uzemněno. Vstup za hrazení (branka, dveře,...) musí být proveden tak, aby nenarušoval celistvost hrazení (elektromagnetickou ani elektrostatickou). Součástí měřicího plánu musí být i pláněk přesně definující umístění hrazení (včetně jednotlivých panelů) v prostoru měřeného stroje. Pro běžnou potřebu postačí půdorys.

Mají-li být v prostoru mezi hrazením a měřeným strojem přítomny další předměty, je nutné je do plánu zanést a jejich polohu dodržovat i při dalších měřeních. Takovými předměty mohou být například vyjmutý rotor měřeného stroje, různé přípravky s částmi stroje (čela) a podobně. Zaznamenat a dodržovat je také třeba polohu měřiče izolačních odporů.

V prostoru okolo měřicího stanoviště, nejlépe v celé místnosti, nejméně však v okolí 15m od hrazení je nutné eliminovat všechny zdroje elektromagnetických a elektrostatických emisí. U silnějších zdrojů je třeba okruh ještě zvětšit. Takovými zdroji jsou mobilní telefony, vysílačky, oblouková činnost (svářečky, komutátory stejnosměrných strojů, ...) a podobně. Zdrojem elektrostatického náboje může být také nabitý předmět, nebo osoba.

Co se týká prostoru uvnitř hrazení, během měření by zde neměl probíhat pokud možno žádný pohyb a počet osob by měl být omezen na minimum. Umožňuje-li to měřič izolačních odporů, mělo by měření probíhat bezobslužně. To lze uskutečnit například pomocí zpožděného startu, nebo pomocí startu prostřednictvím řízení po kabelu z PC umístěného mimo hrazení (pokud to měřič umožňuje).

Velmi zásadní nepříznivý vliv na měření mají také přejezdy jeřábů nad měřicím stanovištěm během měření. Z toho důvodu je jim třeba zabránit. Jeřáby se často vyskytují ve výrobních halách, větších elektrárnách a podobně.

Na měření má vliv i orientace osy měřeného stroje v prostoru. Význam má například i orientace zeměpisná (sever-jih, východ-západ). To se dá odstranit orientací osy měřeného stroje vertikálně (je-li to možné). Měření je pak i méně citlivé na rušení a vlivy přicházející v horizontální rovině. Je však poté značně citlivý na protnutí osy průjezdem jeřábu a podobně (průchod osob po lávkách nad strojem, ...).

I takové zdánlivě bezvýznamné změny jako je otevření vrat na druhé straně haly, nebo zapnutí ventilace může (kromě změn teploty) způsobit i narušení polí měřeného stroje s významnými projevy na měřených hodnotách.

6.5.7 Stav stroje během měření

Je třeba určit, v jakém stavu má být stroj během měření.

Měření se provádí na odstaveném stroji. Měření na rotujícím stroji (krátkodobá odstávka pouze generátoru, ne jeho poháněcí turbíny) jak je uvedeno v IEEE Std. 43-2000 [13], nelze v žádném případě doporučit kvůli přílišné rizikovosti takového měření (možnost indukce proudu na statorovém vinutí i při zkratovaném vinutí rotoru vlivem remanentního magnetizmu a podobně) a neporovnatelnosti naměřených hodnot s měřeními při odstávkách (za provozu má izolace podstatně vyšší teplotu).

Základní otázkou je, zda bude stroj rozebrán, rotor vyjmut a podobně. Nebude-li rotor vyjmut, je nutné určit, v jaké poloze bude aretován. Rotor nelze nechat v libovolné poloze, jelikož by to mohlo mít vliv na výsledky měření.

U strojů chlazených vodou je třeba určit, zda má být stroj před měřením vysušen a jak toho má být dosaženo.

Dále je třeba určit, v jakém stavu mají být pomocné systémy stroje, například chlazení, nebo olejové hospodářství ložisek.

Měřicí plán musí stanovit stav stroje včetně příslušenství do té míry, aby případné změny nežádoucím způsobem neovlivňovaly měření.

6.5.8 Kompletní postup měření

Měření by mělo být popsáno od chvíle odstavení stroje z provozu až po jeho úplné ukončení. Optimální je, pokud je popsán kompletní časový harmonogram se všemi úkony (včetně rozebírání stroje). Dále kompletní postup měření včetně technologických přestávek nutných pro přípravu dalšího měření a podobně. Nedojde-li ke změně vnějších podmínek (úpravy na stroji, na pomocných systémech stroje, teplota prostoru měření,...), mělo by být výsledkem dodržování stejného harmonogramu to, že i teploty stroje budou klesat stejně. Stejně tak by se měly stejně měnit i ostatní parametry měřeného stroje, například by měla stejně probíhat i depolarizace měřené izolace. To vše zlepšuje reprodukovatelnost měření.

6.5.9 Použité normy a předpisy

Měřicí plán stanoví, jaké předpisy a normy budou během měření používány (podle kterých bude postupováno), jejich hierarchii a osoby odpovědné za řešení případných nejasností, nebo konfliktů mezi předpisy.

6.5.10 Revize měřicího plánu

Během času může docházet k změnám měřicího plánu, a to obvykle z důvodu nových poznatků z vědy a technické praxe, nebo vzhledem ke změnám na měřeném stroji samotném (např. změna pomocných technologií stroje). Z toho důvodu musí být každá taková změna označena jako samostatná revize měřicího plánu.

Revize se obvykle značí pořadovým číslem, nebo datem vydání (jsou však možné i jiné způsoby). U naměřených dat musí být vždy uvedeno, podle které revize měřicího plánu byla data naměřena. Při každé změně měřicího plánu také musí proběhnout analýza, zda je možné naměřená data z jednotlivých měření považovat za navzájem srovnatelná, nebo zda změnou měřicího plánu došlo k natolik zásadním změnám v měření, že naměřená data již navzájem porovnatelná nejsou. Porovnatelnost dat může být také možná až po provedení přepočtu. V takovém případě je nutné zahrnout tento přepočet do plánu zpracování dat.

6.5.11 Odpovědné osoby

Měřicí plán stanovuje seznam pozic a funkcí v týmu, který provádí měření.

U každého úkolu, termínu a podobně v měřicím plánu je jmenovitě uvedena pozice nebo funkce v týmu, která je odpovědná za jeho plnění. Také je uvedeno, jakým způsobem je toto plnění prokazováno (záznam z měřicího přístroje, záznam o provedení práce, ...).

I v případě pozic a funkcí v týmu stanoví měřicí plán jejich hierarchii a osoby odpovědné za řešení případných nejasností, nebo konfliktů.

Je-li to nutné, stanoví měřicí plán i právní (hmotnou, trestní, ...) zodpovědnost členů týmu. Tato ustanovení nesmí být v rozporu s obecnou právní úpravou.

6.5.12 Další pokyny pro měření

Měřicí plán může obsahovat i další pokyny pro měření, které nespadají do výše zmíněných kapitol pakliže jsou třeba pro zdárné a kvalitní provádění měření.

6.6 Plán zpracování naměřených dat

Pro měření každého stroje je nutné vypracovat plán zpracování naměřených dat, který stanoví pravidla, která je během zpracování dat nutné dodržovat. Součástí plánu zpracování naměřených dat jsou například:

- 1) Pravidla pro vyřazení chybných dat, nebo jejich opravu
- 2) Pravidla pro posloupnost přepočtů
- 3) Postup pro přepočet izolačních odporů podle teploty
- 4) Postup pro přepočet izolačních odporů podle napětí
- 5) Postup pro přepočet izolačních odporů podle proudu dodávaného měřicím přístrojem
- 6) Postup pro výpočty polarizačních indexů
- 7) Postup pro výpočet charakteristik polarizačních indexů
- 8) Postup pro výpočet charakteristiky směrnice tečen
- 9) Pravidla pro provádění matematických výpočtů
- 10) Pravidla pro nakládání s daty
- 11) Revize plánu zpracování dat
- 12) Podklady z měření
- 13) Protokol o měření
- 14) Odpovědné osoby

a mnohé další

Účelem plánu zpracování naměřených dat je zajistit plnou porovnatelnost zpracovaných dat z různých měření mezi sebou na témže stroji. Jsou-li měřicí plány a plány zpracování naměřených dat různých strojů téhož typu stejné (nebo alespoň stejné v důležitých bodech a podobné v bodech ostatních) dá se předpokládat, že budou porovnatelná i výsledná data mezi takovými stroji.

Při měření na různých typech strojů se, i při stejných měřicích plánech a plánech zpracování naměřených dat, nedá zaručit porovnatelnost měření mezi stroji. Takovouto porovnatelnost je třeba ověřit experimentálně.

Celý plán, včetně všech jeho částí musí být napsán zcela srozumitelně, s jasnými formulacemi tak, aby nedocházelo k omylům, dezinterpretacím a nesrovnalostem.

6.6.1 Pravidla pro vyřazení chybných dat

Před zahájením dalšího zpracování dat (přepočtů, ...) je nutné vyřadit naměřená data, která vznikla evidentně chybami měření a mohla by nepříznivě ovlivnit výsledky měření, kdyby s nimi bylo i nadále pracováno. Může dojít k vyřazení celých měřených charakteristik, nebo jen jednotlivých naměřených bodů.

Jelikož je vyřazení či nevyřazení některých dat velmi zásadním zásahem, je nutné, aby při této činnosti nedošlo k omylu a aby nebyla vyřazena data, která se jako nesprávná zdají pouze na první pohled a ve skutečnosti se jedná o data relevantní. Z toho důvodu je nutné stanovit metody a postupy, kterými se stanoví, že hodnota je skutečně nesprávně naměřená. Takové postupy mohou být matematické, statistické, na základě logického úsudku a podobně. V některých případech musí na řadu přijít i vyjádření zkušeného odborníka.

K opravě naměřených dat je možné se uchýlit pouze v případě nejvyšší nouze (za normálních okolností se buď data nepoužijí, nebo se naměří znovu), kdy na základě matematických nebo statistických metod nahradíme určitá nesprávná data jinými daty, u nichž jsme schopni dokázat jejich alespoň částečnou relevanci. Taková data musejí být řádně označena a používána pouze v nezbytně nutných případech. Výjimku tvoří opravy zjevných chyb, kde jsme schopni dovodit, jaká chyba se stala a i zpětně ji napravit (např. byl-li zaznamenán špatný rozsah měřicího přístroje a jsme si jisti, že byl použit jiný, můžeme provést opravu, i zde je však nutné hodnoty řádně označit jako opravené).

6.6.2 Pravidla pro posloupnost přepočtů

Plán zpracování naměřených dat stanoví, v jakém pořadí se budou provádět jednotlivé přepočty izolačních odporů.

Neexistují-li závažné důvody k tomu, aby bylo prováděno jinak, provádějí se přepočty v následujícím pořadí:

- 1) Proveďte se přepočet izolačních odporů na nominální teplotu uvedenou v měřícím plánu
- 2) Proveďte se přepočet izolačních odporů na napětíovou hladinu měření uvedenou v měřícím plánu
- 3) Proveďte se přepočet izolačních odporů podle proudu dodávaného do izolace měřícím přístrojem
- 4) Charakteristiky polarizačních indexů a charakteristiky směrnic tečen vypočítáváme až nakonec a to z hodnot po kompletních přepočtech (tedy po přepočtech podle proudu dodávaného měřícím přístrojem).

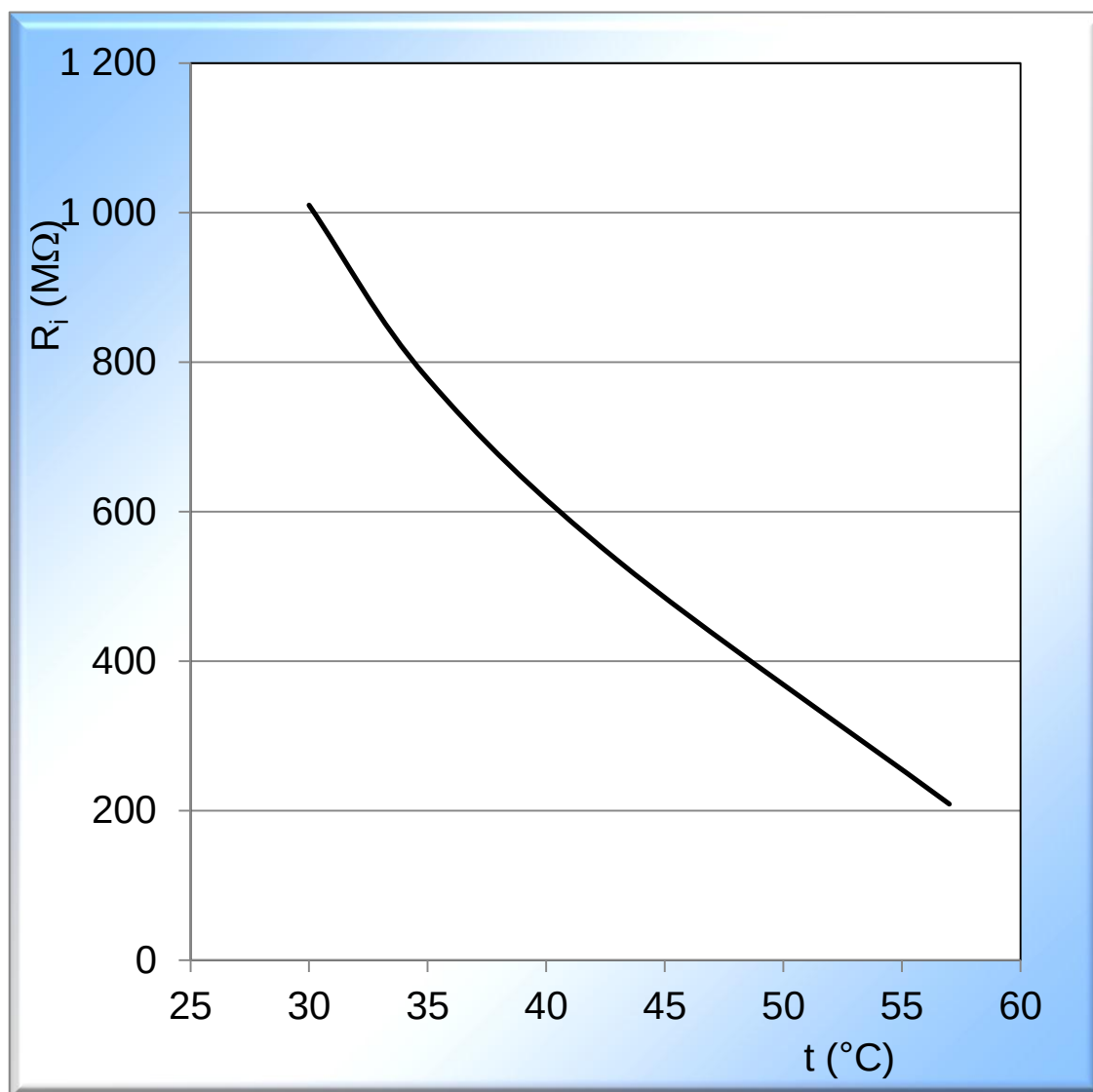
Po provedení těchto přepočtů obdržíme izolační odpory, které by již měly být zbaveny vlivů měření a tudíž by měly popisovat pouze skutečný stav izolace. Takováto data jsou již vhodná pro další zpracování (diagnostiku, prognostiku, ...).

6.6.3 Postup pro přepočet izolačních odporů podle teploty

Postup pro přepočet izolačních odporů vychází z reálných závislostí izolačních odporů na teplotě měřené izolace. Pro přepočet celé absorpční charakteristiky je třeba takových charakteristik sestavit hned několik. Čím více jich je sestaveno, tím je výsledná charakteristika přepočtena přesněji. Zcela zásadní je provést přepočet v krajních bodech, to jest pro R_{i15} a R_{i600} . Dále je důležité provést přepočty v dalších důležitých bodech, tedy R_{i30} a R_{i60} . Pro potřeby alespoň základního přepočtu je potřeba provést přepočet absorpční charakteristiky alespoň v sedmi bodech. Optimální je provést přepočet ve všech měřených bodech, ze kterých je charakteristika sestavována. V dnešní době je to pouze otázka správně sestaveného programu.

Získání teplotních charakteristik by mělo proběhnout na stroji jako další měření po měření izolačních odporů. V podstatě se jedná o měření izolačních odporů při různých teplotách izolace. Z těchto měření je pak pro izolační odpor v daném čase (např. R_{i15}) sestavena závislost izolačního odporu na teplotě. Závislost by měla být sestavena minimálně ze tří naměřených bodů.

Není-li z nějakých důvodů měření závislostí izolačních odporů na teplotě možné, lze je nahradit závislostmi předpokládanými, které se vypočítají na základě trendu z předchozích měření. Takové zjednodušení však může do měření zanést značnou chybu, proto je lepší se mu vyhnout.



Obr. 6-1 Typický tvar závislosti izolačního odporu na teplotě

Z předchozího grafu je patrné, že izolační odpory jsou na teplotě měřené izolace závislé velmi výrazně. Je to nejvíce významná závislost izolačních odporů. Z toho důvodu je třeba ji věnovat náležitou pozornost.

6.6.4 Postup pro přepočet izolačních odporů podle napětí

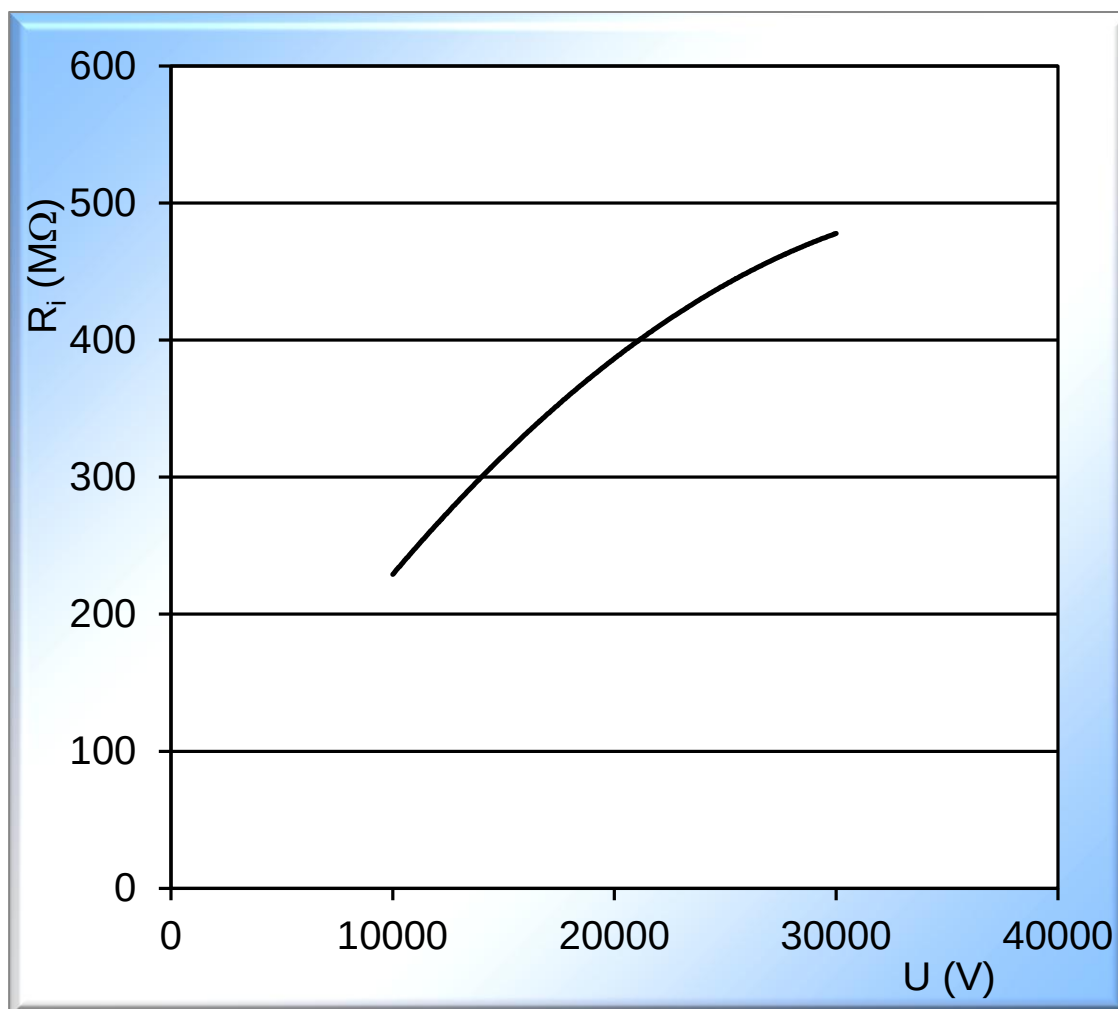
Izolační odpor je závislý na napětí. Závislost je ovšem o něco složitější, než v případě závislosti na teplotě.

- 1) Ustálený izolační odpor s rostoucím měřicím napětím klesá - vlastnost krystalických i amorfních izolantů
- 2) Izolační odpory na počátku měření (především R_{i15}) však s rostoucím měřicím napětím rostou - souvisí s rychlostí nabíjení izolace

První pravidlo se projeví pouze v případě, že se během měření (10 minut) izolace stihne dostatečně nabít. To se stává především u strojů s menšího výkonu s malým rozsahem izolačního systému.

Druhé pravidlo se projeví vždy. Výrazněji se obvykle projevuje u strojů velkého výkonu s rozsáhlým izolačním systémem.

Podle předchozí části této metodiky by měl být izolační odpor téže izolace měřen vždy pro tři různá napětí. To už je dostatečný počet pro sestavení závislosti izolačního odporu na měřicím napětí. I zde je nutné provést přepočet pokud možno v co nejvíce bodech. Obdobně jako u přepočtu podle teploty je třeba provést přepočet R_{i15} , R_{i30} , R_{i60} a R_{i600} , celkem však minimálně v sedmi bodech. I zde je však optimální provést přepočet ve všech měřených bodech, ze kterých je charakteristika sestavována.



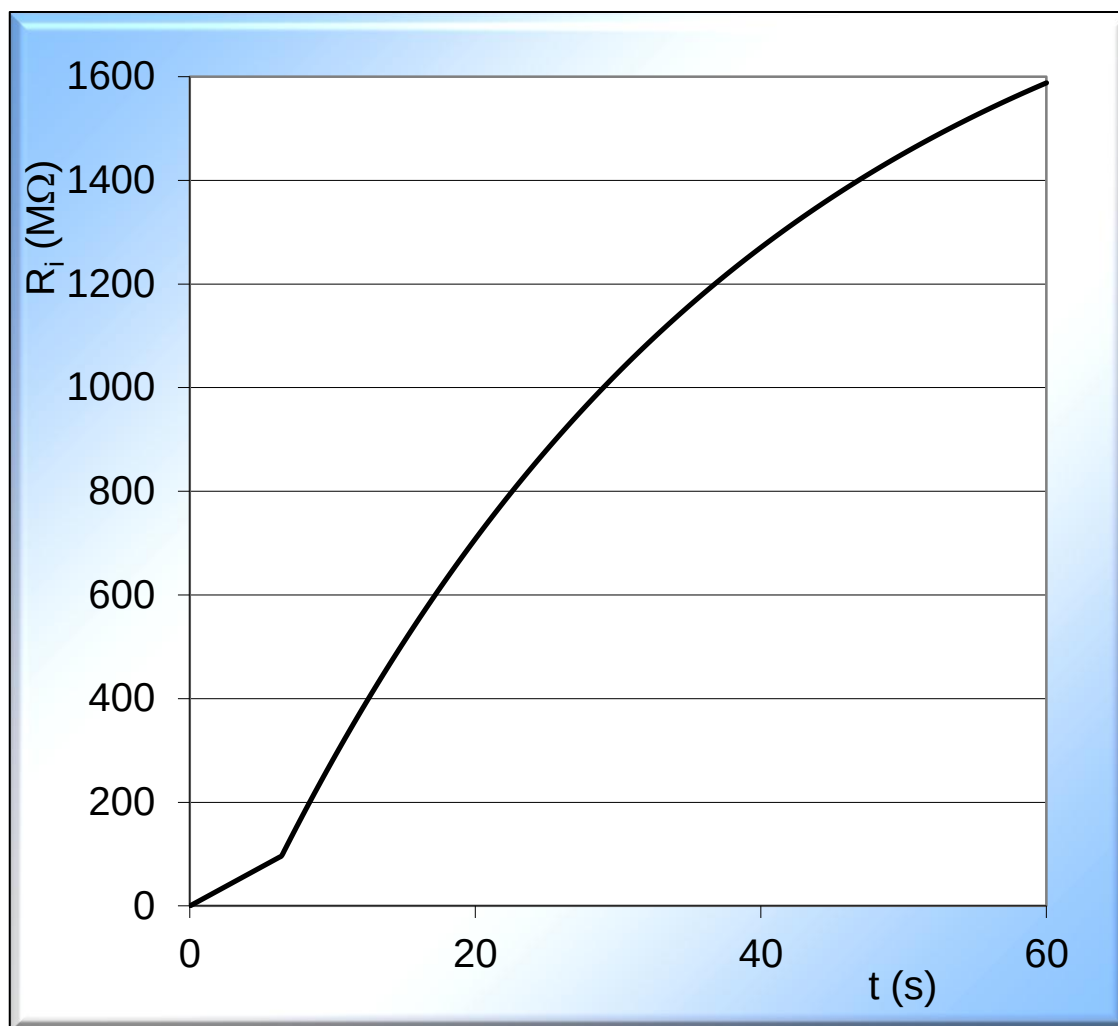
Obr. 6-2 Typický tvar závislosti izolačního odporu na měřicím napětí

S pomocí takto získaných charakteristik je možné provést přepočet izolačních odporů z měřicího napětí na napěťové hladiny měření.

Vzhledem k tomu, že měřiče izolačních odporů obvykle nenastavují měřící napětí s odchylkou větší než 10%, nebude rozdíl po přepočtu na napěťové hladiny měření tak velký jako po přepočtu na nominální teplotu. Rozhodně však není možné napěťovou závislost izolačních odporů zanedbat.

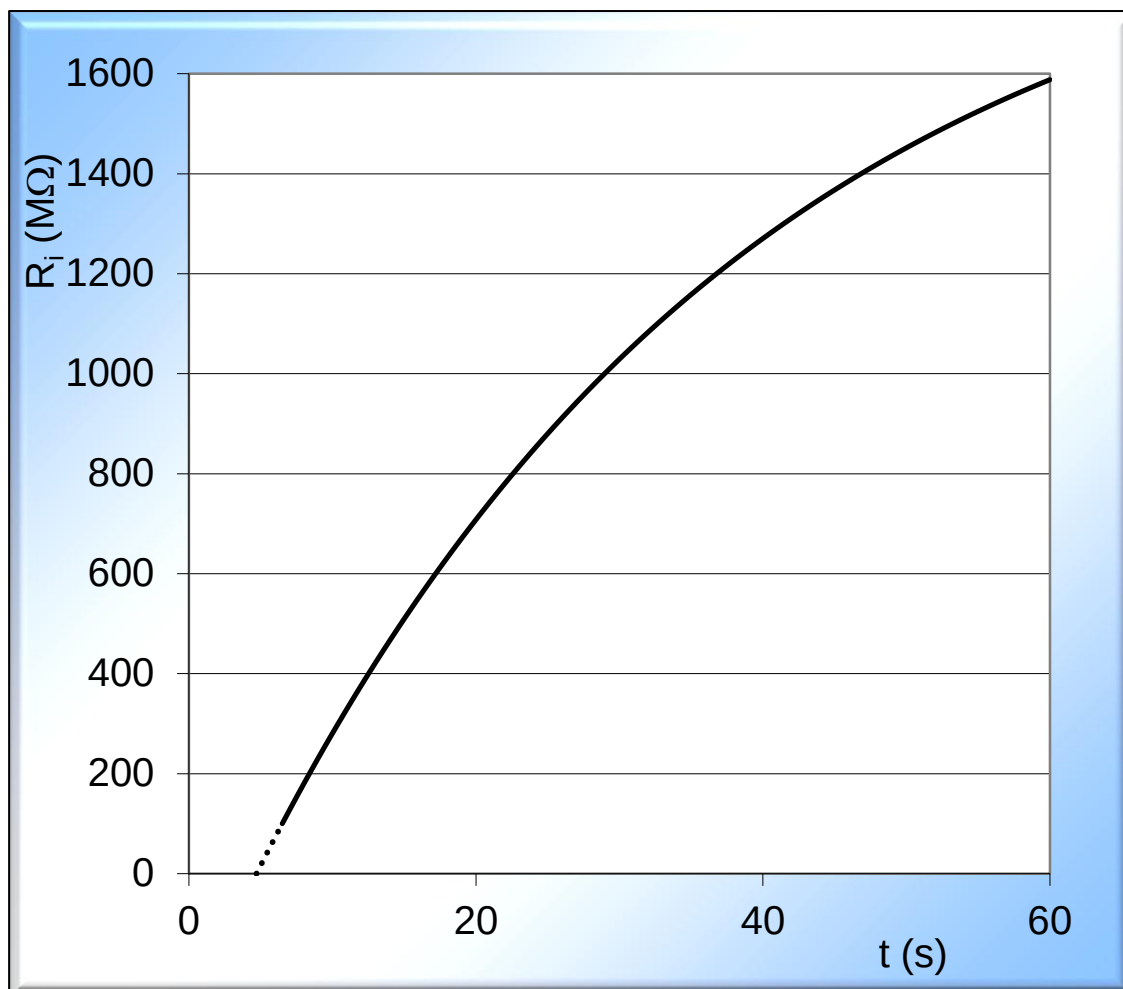
6.6.5 Postup pro přepočet izolačních odporů podle proudu dodávaného měřícím přístrojem

Jelikož měřiče izolačních odporů mají omezený maximální proud, který jsou schopny dodávat do měřené izolace, vzniká na počátku měření nepříznivý jev. Jedná se v podstatě o stav, kdy po určitou dobu zdroj integrovaný v měřiči omezuje měřící napětí, aby nebyl překročen maximální proud. To má za následek to, že charakteristika naměřených izolačních odporů není plynulá, ale je lomená.



Obr. 6-3 Typický tvar absorpční charakteristiky ovlivněné omezováním proudu

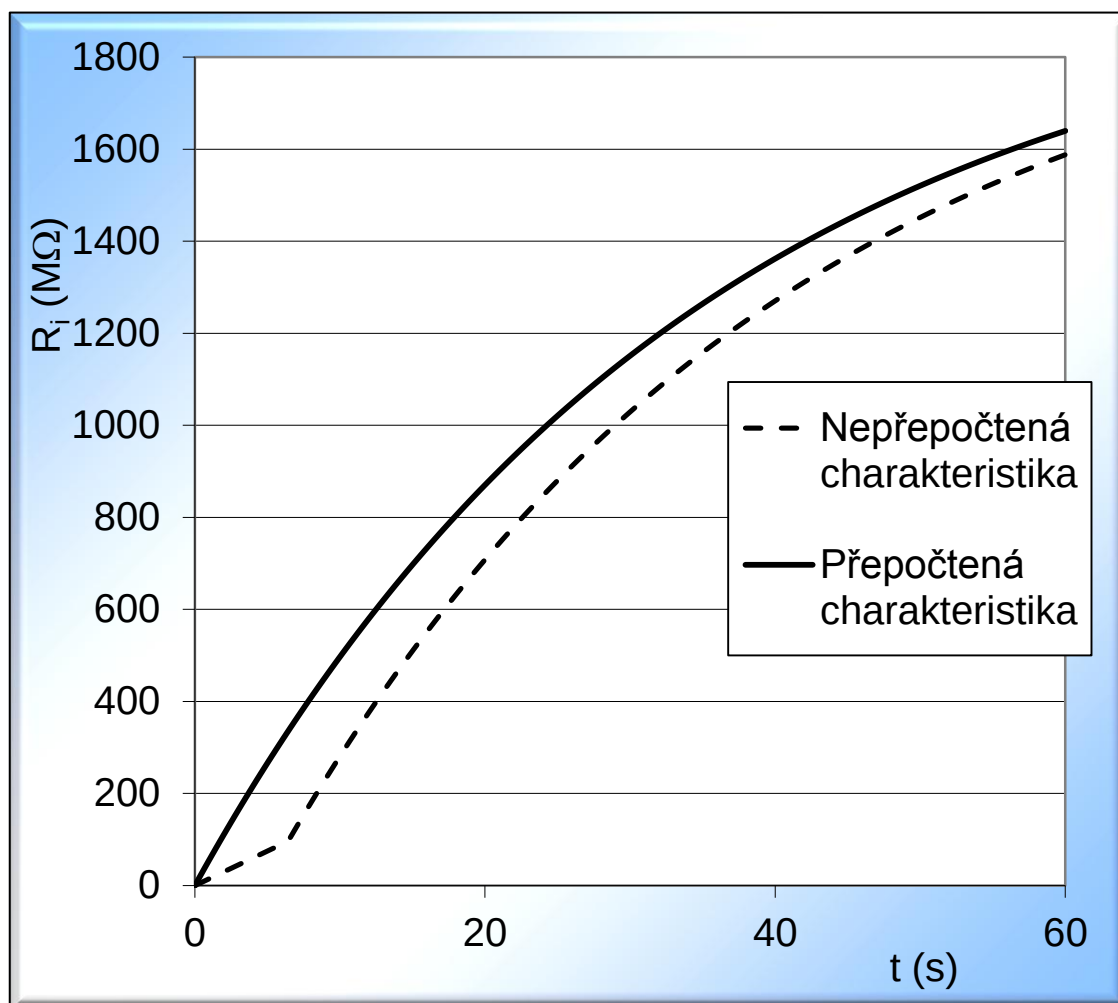
Vliv tohoto omezování lze alespoň částečně omezit přepočtem charakteristiky do počátku souřadnic. Nejprve je nutné odstranit část charakteristiky, která je ovlivněna omezováním a poté proložit charakteristiku až k ose x. Odsud odečteme, v jakém čase byla osa protnuta (lze zjistit i z rovnice charakteristiky).



Obr. 6-4 První krok úpravy absorpční charakteristiky ovlivněné omezováním proudu

Čas, který jsme takto získali, následně odečteme od všech časových údajů v tabulce naměřených hodnot absorpční charakteristiky, čímž obdržíme charakteristiku novou. Nesmíme zapomenout nahradit část charakteristiky, která byla původně ovlivněna omezováním proudu hodnotami získanými z rovnice původní charakteristiky.

S takto získanou charakteristikou už můžeme dále pracovat.



Obr. 6-5 Porovnání přepočtené a nepřepočtené absorpční charakteristiky

Z grafu je patrné, že přepočet bude mít zásadní vliv především na počátku absorpční charakteristiky (R_{i15} a R_{i30}).

Tímto přepočtem je možné z větší části eliminovat vliv omezování proudu dodávaného měřicím přístrojem.

6.6.6 Postup pro výpočty polarizačních indexů

Vzhledem k tomu, že v předchozím průběhu zpracování dat byly provedeny přepočty izolačních odporů podle teploty měřené izolace, napětí i proudu dodávaného měřicím přístrojem, není již třeba provádět přepočty polarizačních indexů. Jsou-li totiž přepočteny izolační odpory, z kterých se polarizační indexy počítají, budou automaticky přepočteny i polarizační indexy.

Vypočítávat polarizační indexy z nepřepočtených hodnot a přepočítávat je podle teploty měřené izolace, napětí a proudu dodávaného měřicím přístrojem by bylo logicky

nesprávné, neboť bychom pouze do výsledných hodnot zavlékali chyby vzniklé při přepočtech (nepřesnosti prokladů charakteristik, zaokrouhlování, ...).

Polarizační indexy tedy můžeme vypočíst zcela běžným způsobem, pouze k tomu účelu musíme použít již přepočtené hodnoty izolačních odporů.

Jako užitečné se však jeví změnit značení polarizačních indexů a to podobně jako v IEEE Std. 43-2000 [13].

Zavedením indexace obou časů získáme možnost používat zcela libovolné polarizační indexy podle potřeb. Vzorec pak bude vypadat takto:

$$p_{i(t2/t1)} = \frac{R_{it2}}{R_{it1}} [-;\Omega,\Omega],$$

Pro příklad dodnes značený polarizační index p_{i60} se nově bude značit $p_{i(60/15)}$, dielektrický absorpční poměr DAR bude shodný s $p_{i(60/30)}$ a podobně.

Je třeba uvést, že velikosti vypočtených polarizačních indexů mohou být (a obvykle také jsou) ovlivněny způsobem zpracování dat naměřených izolačních odporů (absorpčních charakteristik). Výrazně se to může projevit například při přepočtu absorpčních charakteristik na teoreticky neomezený proud dodávaný měřícím přístrojem, viz předchozí kapitola této metodiky. V takovém případě je nutné ověřit, zda běžně používaná kritéria pro stanovení stavu izolací (číselné hodnoty polarizačních indexů odpovídající stavu nebo kvalitě izolace) jsou stále použitelná, nebo zda je potřeba je nějak změnit.

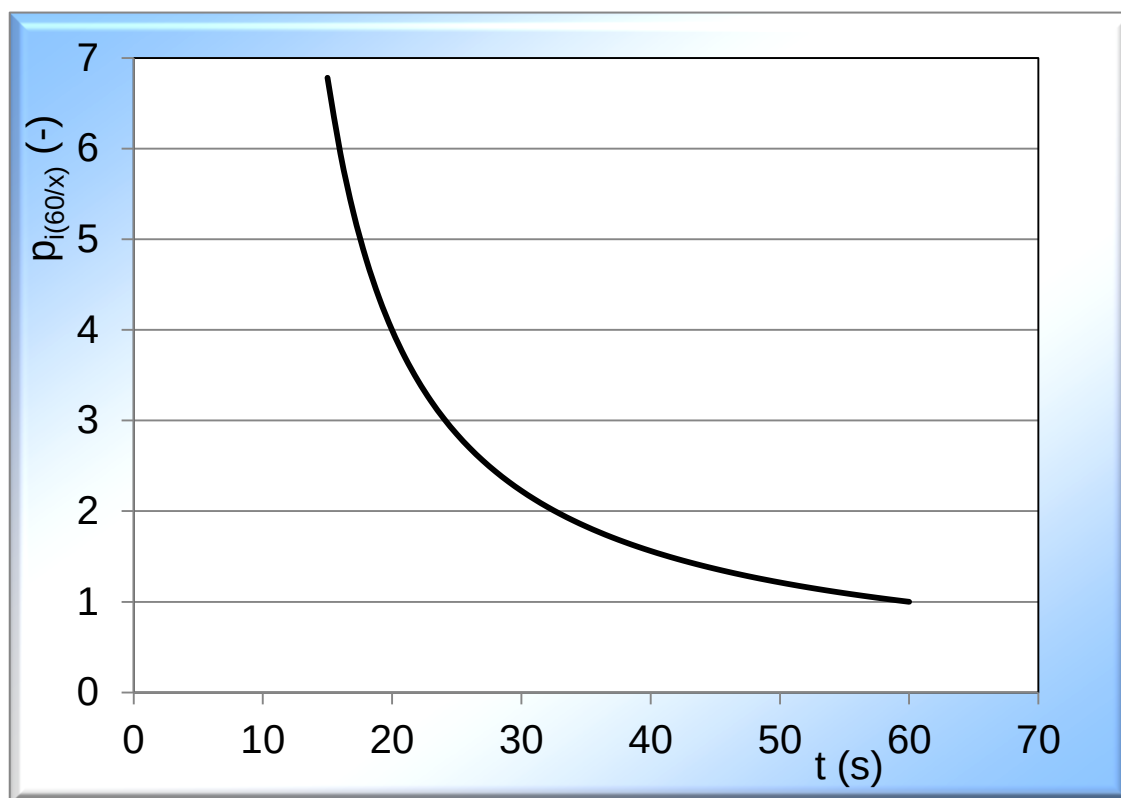
6.6.7 Postup pro výpočet charakteristik polarizačních indexů

Předchozí zavedení libovolných polarizačních indexů umožňuje zavést i charakteristiky z nich sestavené.

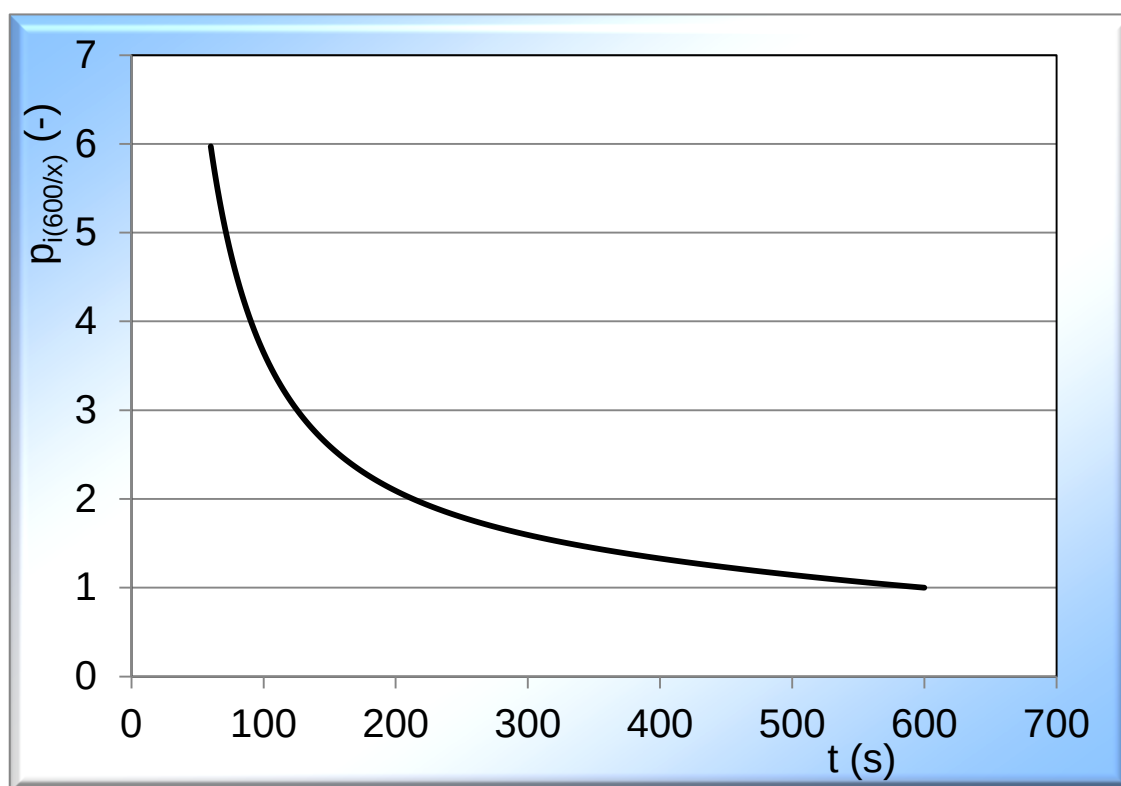
Jako nejvhodnější se jeví charakteristiky s pevným vztažným bodem, to jest jeden bod v čase, obvykle t_2 (a k němu příslušný odpor) určíme jako pevný a druhý čas (odpor) se stane proměnnou. Poté můžeme provést výpočet polarizačních indexů pro všechny vybrané body měření vzhledem k t_2 .

Jako nejvhodnější se jeví charakteristiky:

- 1) Pevný bod v $t_2=60s$ – doporučuje se pracovat s t_1 od 15 do 60s
- 2) Pevný bod v $t_2=600s$ – doporučuje se pracovat s t_1 od 60 do 600s



Obr. 6-6 Příklad charakteristiky polarizačních indexů $p_{i(60/x)}$



Obr. 6-7 Příklad charakteristiky polarizačních indexů $p_{i(600/x)}$

Z těchto charakteristik, z jejich tvaru i hodnot je možné usuzovat na stav měřené izolace.

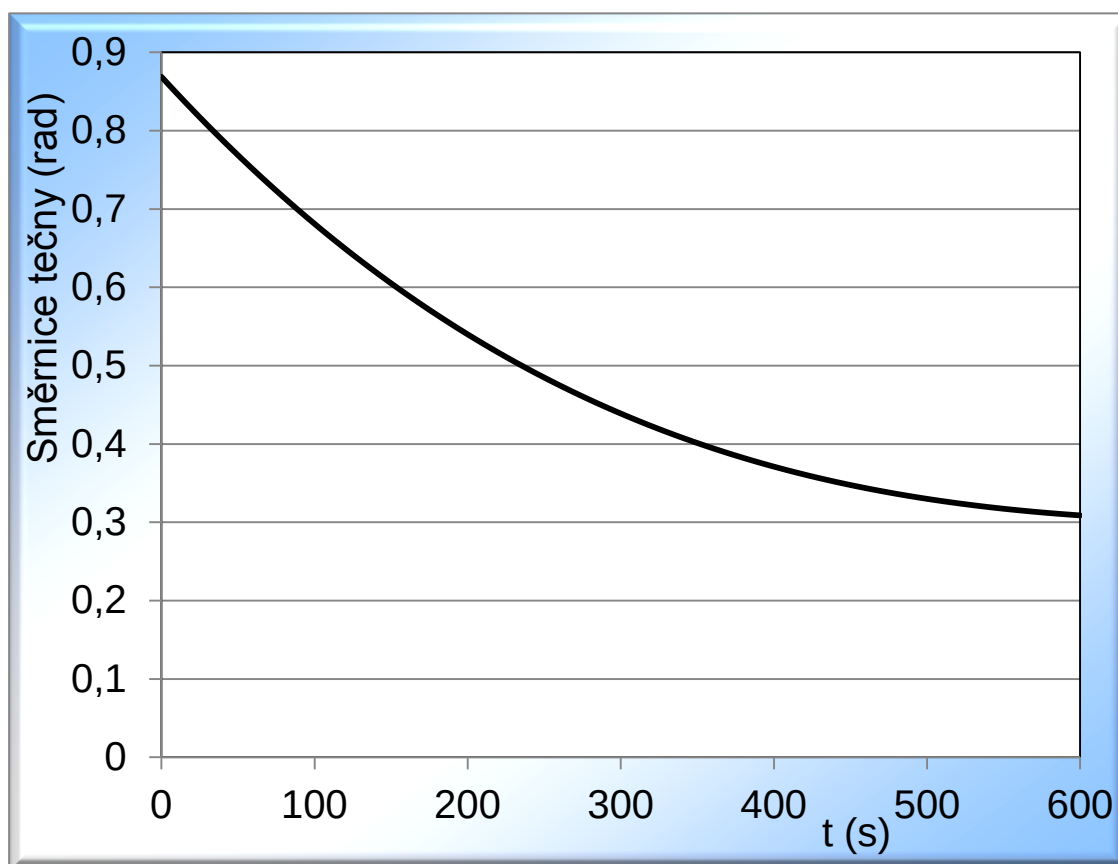
6.6.8 Pravidla pro výpočet charakteristik směrnic tečen

Pro potřeby diagnostiky zavedeme charakteristiku směrnic tečny

Vyjdeme z rovnice, která popisuje kompletně přepočtené hodnoty (tedy po přepočtech podle proudu dodávaného měřicím přístrojem). Následně tuto rovnici zderivujeme podle proměnné, kterou je v našem případě čas (je na ose x) a do rovnice kterou obdržíme, budeme dosazovat časy (hodnoty z osy x) pro které chceme směrnicí tečny zjistit. Lze pouze doporučit provést výpočet pro hodnotu času rovnu každé celé sekundě (601 hodnot).

Pozor!!! U směrnic tečny záleží na tom, v jakých jednotkách (Ω , $k\Omega$, $M\Omega$, $G\Omega$,) je, absorpční charakteristika ze které vycházíme, vynesena. Z toho důvodu musí plán zpracování naměřených dat obsahovat údaj, v jakých jednotkách má být absorpční charakteristika vynesena.

Platí, že u charakteristik izolací v dobrém stavu by směrnic tečen měla klesat co nejpomaleji a končit by mělo na co nejvyšší hodnotě.



Obr. 6-8 Příklad charakteristiky směrnic tečen

6.6.9 Pravidla pro provádění matematických výpočtů

Plán zpracování naměřených dat musí také obsahovat pravidla pro výpočty, prokládání charakteristik a podobně.

Je nutné určit míru zaokrouhlování, matematické postupy a podobně.

Co se týká prokládání charakteristik, jako vhodné se jeví:

- 1) Pro absorpční charakteristiky – obvykle postačí polynom 4. řádu (vyžaduje-li to tvar charakteristiky použije se vyšší řád polynomu)
- 2) Pro napěťové závislosti izolačních odporů – vzhledem k určení ze tří bodů postačí polynom 3. řádu
- 3) Pro závislosti polarizačních indexů – polynom 6. řádu
- 4) Pro závislosti směrnic tečen – obvykle postačí polynom 3. řádu (vyžaduje-li to tvar charakteristiky použije se vyšší řád polynomu)

6.6.10 Pravidla pro nakládání s daty

Součástí plánu zpracování naměřených dat je také soubor pravidel, jak s daty nakládat, kdo k nim má povolený přístup (firemní tajemství, ...), jakým způsobem mají být data zpřístupňována a jakým mají být data skladována. Patří sem i pravidla pro archivaci listinné (papírové) formy protokolů, formulářů a podobně. U elektronických dat by mělo být uvedeno, jakým způsobem má být provedeno jejich zálohování.

6.6.11 Revize plánu zpracování dat

Během času může docházet k změnám plánu zpracování dat, a to obvykle z důvodu nových poznatků z vědy a technické praxe, nebo vzhledem ke změně měřicího plánu (je-li to nutné). Z toho důvodu musí být každá taková změna označena jako samostatná revize měřicího plánu.

Revize se obvykle (stejně jako u měřicího plánu) značí pořadovým číslem, nebo datem vydání (jsou však možné i jiné způsoby). Je vhodné, aby byl plán zpracování dat značen stejným způsobem jako měřicí plán (např. oba pořadovým číslem). U zpracovávaných dat musí být vždy uvedeno, podle které revize plánu zpracování dat byla data zpracována. Při každé změně plánu zpracování dat také musí proběhnout analýza, zda je možné zpracovaná data z jednotlivých zpracování považovat za navzájem srovnatelná, nebo zda změnou plánu zpracování dat došlo k natolik zásadním změnám ve zpracování, že zpracovaná data již navzájem porovnatelná nejsou. Porovnatelnost dat může být také možná až po provedení přepočtu dříve neměřených dat podle nové revize plánu zpracování dat. V takovém případě je třeba ke starým

protokolům vyhotovit dodatek, který bude obsahovat data z původního měření zpracování podle nového plánu zpracování dat. Tento dodatek k protokolu musí být označen tak, aby bylo zřejmé, k jakému původnímu protokolu se vztahuje a jaké revize plánu zpracování dat bylo při jeho tvorbě použito. Zároveň však je nutné zajistit, aby toto označení nebylo matoucí, nesrozumitelné, nebo dokonce zavádějící.

6.6.12 Podklady z měření

V zájmu zjednodušení pozdějšího zpracování naměřených dat a minimalizace rizika, že během měření bude opomenuto zaznamenat některá důležitá data, by plán zpracování dat měl obsahovat podklady pro měření. Ty by měly být ve formě vyplnitelných formulářů a měly by svým rozsahem pokrývat celé měření. Vyplněné formuláře z měření by měly být následně označeny tak, aby bylo zřejmé, ke kterému měření (popřípadě protokolu z měření) se vztahují a měly by být archivovány pro potřeby případné pozdější kontroly.

6.6.13 Protokol o měření

Plán zpracování dat musí obsahovat návod pro zhotovení protokolu o měření a zpracování dat, který je výstupem z měření. Měly by být obsaženy podrobnosti o tom, které informace musí protokol obsahovat (identifikace měřeného objektu, revizi měřicího plánu a plánu zpracování dat, naměřené hodnoty, přepočtené hodnoty, měřicí přístroje, parametry měření jako např. teplota izolace, vlhkost okolí a mnohé další), jakým způsobem mají být uváděny (např. kdy uvádět teploty v stupních celsia a kdy v Kelvinech, kdy uvádět hodnoty v Ω , kdy v $k\Omega$, v $M\Omega$, ...) a jaké má protokol obsahovat přílohy (elektronický záznam naměřených dat z měřicího přístroje, ...).

Za optimální se považuje, když plán zpracování dat obsahuje formulář pro zpracování protokolu (dnes již spíše v elektronické formě), který je možné jednoduše vyplnit a obdržet tak požadovaný protokol. Takovýto formulář může být i součástí informačního systému zhotovitele měření (kvůli dalšímu zpracování například při diagnostice a prognostice měřených strojů).

Za protokol se, z právního hlediska, obvykle nepovažuje elektronická forma, ale listinná forma (byť jinak mohou být obě formy zcela rovnocenné).

6.6.14 Odpovědné osoby

V plánu zpracování naměřených dat musí být konkrétně určeno, kdo z týmu (viz měřicí plán) je zodpovědný za provedení zpracování dat, za kontrolu zpracování a podobně.

Musí zde být také uvedeno, kdo je zodpovědný za zacházení s daty, za jejich archivaci a kdo vydá protokol o měření. To je obvykle velmi důležité z hlediska právního, neboť osoba, která vydává protokol je obvykle také osobou právně zodpovědnou.

6.6.15 Další pokyny k zpracování naměřených dat

Plán zpracování naměřených dat může obsahovat i další pokyny pro zpracování, které nespádají do výše zmíněných kapitol, pakliže jsou třeba pro zdárné a kvalitní provádění zpracování naměřených dat.

7 PŘÍNOS PRÁCE

V disertační práci byly podrobně rozebrány příčiny některých problémů z oblasti měření izolačních odporů a polarizačních indexů a to i takové, které dosud nebyly řešeny. Na základě tohoto rozboru byla sestavena nová, ucelená metodika stanovení izolačních odporů a polarizačních indexů. V práci (a také v metodice) jsou také zmíněny některé nové metody, které by mohly pomoci při diagnostice a tedy i při následné prognostice izolačních systémů elektrických točivých strojů. K tomu přispělo to, že během řešení práce byl splněn nejen hlavní cíl práce, ale i všechny cíle dílčí (viz. Cíle práce).

Na základě provedené práce je možné označit za přínosy práce:

- **Rozebrání příčin napět'ové závislosti izolačního odporu u izolantů**
- **Stanovení vlivu měřicího 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 měřicího 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 měřicího 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

7.1 Přínos pro rozvoj oboru

Přínosy pro obor je možné rozdělit do dvou oblastí, na přínosy technické a na přínosy ekonomické.

Za technické přínosy lze považovat především zkvalitnění diagnostiky, tedy přesnější určení stavu zkoumaných strojů a umožnění porovnatelnosti získaných dat u strojů stejného typu (za jistých předpokladů i u strojů rozdílných typů). Budou-li stroje kvalitněji diagnostikovány, bude možné včasěji zasahovat proti rozvoji nežádoucích jevů (poruch, ...) v izolačním systému, opravy provádět cíleněji a dojde k snížení rizika včasného nezachycení nežádoucích jevů. Podobně i porovnatelnost naměřených dat umožní zlepšit diagnostiku, neboť na jejím základě je možné odhalit některé druhy nežádoucích jevů, které již proběhly na jiných dříve měřených strojích, nebo je možné diagnostikovat přítomnost neznámého nepříznivého děje na základě rozdílných naměřených dat oproti strojům, které jsou v dobrém stavu. To vše povede k tomu, že stroje, na kterých budou výsledky práce aplikovány, budou dlouhodobě v lepším technickém stavu, neboť na nich proběhne včasější odhalení a odstranění nežádoucích jevů. To ve výsledku umožní prodloužení životnosti izolačního systému stroje při zachování vysokých požadavků na jeho kvalitu a zároveň sníží pravděpodobnost poruch (a tedy i odstávky) oproti současnému stavu.

Ekonomické přínosy přímo vycházejí z přínosů technických. Jelikož dojde k přesunu těžiště oprav od oprav velkých (rozvinuté nežádoucí jevy) k opravám malým (malé poruchy a preventivní zásahy), poklesnou celkové náklady na takovéto opravy. Výrazně by měl poklesnout i počet oprav havarijních. Nemalý ekonomický přínos bude mít i prodloužení životnosti izolačního systému, neboť jeho výměna je značně nákladná. Dále je také třeba zmínit, že stroje v dobrém technickém stavu mají obvykle vyšší účinnost a tedy i lepší ekonomiku provozu. Velmi zásadní je také přínos zmenšení rizika havarijní odstávky stroje, neboť nejen že v takovém případě často dochází ke značným škodám na stroji, ale i sám výpadek provozu může mít velké ekonomické

následky. To platí především v kritických aplikacích, jako jsou např. velké elektrárny (především jaderné), velké průmyslové podniky (železářny, cementárny, ...) ale i mnohé další aplikace, které jsou závislé na relativně malém počtu exponovaných strojů. Tyto aplikace jsou obvykle významnými body v elektrizační soustavě a jejich výpadek může mít za následek značné ekonomické škody, které mohou při delší odstávce poměrně rychle přesáhnout i cenu nového stroje.

7.2 Přínos pro rozvoj vědy

Přínos pro rozvoj vědy spočívá u této práce v tom, že aplikací jejich výsledků roste diagnostikovatelnost elektrických točivých strojů. Diagnostikovatelnost je totiž jedním z faktorů, které určují udržovatelnost stroje a udržovatelnost stroje hraje velmi významnou roli v definování jeho spolehlivosti. Je tedy možné říci, že příspěvkem k diagnostikovatelnosti (diagnostice) elektrických strojů točivých byl učiněn i příspěvek k vědeckému oboru spolehlivosti jako takové.

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 z části v práci prezentováno. Z těchto měření se v práci podařilo odvodit značné množství souvislostí a z nich plynoucích pravidel pro stanovení izolačních odporů a polarizačních indexů.

Práce je primárně zacílena tak, aby její výsledky byly využitelné v technické praxi, což podtrhuje i hlavní výsledek práce, 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 (přehled cílů práce je uveden v kapitole Cíle práce).

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.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] BARTÁK, A., MRAVINÁČ L., NEUMANN J., VAŘÁK J.: *Diagnostika poruch izolací elektrických strojů*. (1984), Praha: SNTL,
- [2] HAMMER, M.; PAVLÍK, J.: Stejnoseměrné diagnostické zkoušky - výsledky měření a jejich rozbor: dílčí rozpracovaná výzkumná zpráva, VUT Fakulta strojního inženýrství
- [3] JIRÁK, J., AUTRATA, R., LIEDERMANN, K.; Materiály a technická dokumentace část Materiály v elektrotechnice, Skriptum - Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně
- [4] Protokol o měření 2/2010-M, Orgrez
- [5] Blesk, databázový program
- [6] MENTLÍK, V., PIHERA J., POLANSKÝ R., PROSR P., TRNKA P., *Diagnostika elektrických zařízení*. ISBN 978-80-7300-232-9, (2008), Praha: BEN - technická literatura
- [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, V., *Dielektrické prvky a systémy*. ISBN 80-7300-189-6, (2006), Praha: BEN - technická literatura
- [11] ARTBAUER, J., ŠEDOVIČ, J., ADAMEC, V., *Izolanty a izolácie*, (1969), Nakladatelstvo ALFA, Bratislava
- [12] HAMMER, M., *Metody umělé inteligence v diagnostice elektrických strojů*, ISBN 978-80-7300-231-2, (2009), Praha: BEN - technická literatura
- [13] IEEE Std. 43-2000 Recommended Practice for Testing insulation Resistance of Rotating Machinery
- [14] POLIAK, J.: *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] KOČMAN, V., *Fyzika a technologie elektrotechnických materiálů Izolanty A*, (1971), Praha: SNTL,
- [16] <http://www.epomed.cz/rubriky/vyuka/patofyziologie/> 5.7.2011
- [17] ČSN EN 61557-2 ed. 2 Elektrická bezpečnost v nízkonapěťových rozvodných sítích se střídavým napětím do 1 000 V a se stejnosměrným napětím do 1 500 V - Zařízení ke zkoušení, měření nebo sledování činnosti prostředků ochrany - Část 2: Izolační odpor (účinnost od 1.1.2008)
- [18] 50/1978 Sb. Vyhláška Českého úřadu bezpečnosti práce a Českého báňského úřadu ze dne 19. května 1978 o odborné způsobilosti v elektrotechnice, ve znění zákona č. 98/1982Sb

- [19] www.empos.cz/pdf/pristroje/498.pdf 2.8.2009
- [20] Podniková norma ČEZ evidenční číslo 00/069 rev0 Profylaktika izolačního systému strojů točivých turbogenerátory, hydrogenerátory a vn motory
- [21] Diagnostika izolačních systémů elektrických strojů točivých, ORGREZ, a.s, Praha, 1996
- [22] ČSN IEC 60-1 Technika zkoušek vysokým napětím. Část 1: Obecné definice a požadavky na zkoušky (účinnost od 1.5.1994)
- [23] ČSN EN 60505 ed. 2 Hodnocení a třídění elektroizolačních systémů (účinnost od 1.9.2005)
- [24] ČSN IEC 93 Skúšky tuhých elektroizolačných materiálov. Metódy merania vnútornej resistivity a povrchovej resistivity tuhých elektroizolačných materiálov (účinnost od 1.11.1993)
- [25] BERNAT, P., *On-line diagnostika elektrických strojů točivých.*, sborník konference Diagnostika '97, (1997), Plzeň
- [26] KREIDL, M., ŠMÍD, R., *Technická diagnostika- senzory, metody, analýza signálu*, ISBN 80-7300-158-6, (2006), Praha: BEN - technická literatura
- [27] [http://www.irispower.com/pdf/techpapers/general_testing/EIC_09 - Stator Winding Hipot Testing.pdf](http://www.irispower.com/pdf/techpapers/general_testing/EIC_09_-_Stator_Winding_Hipot_Testing.pdf) 5.7.2011
- [28] http://iep-sa.org/images/paper_data/1ef530b9948f45a.pdf 23.7.2011
- [29] ČSN EN 60034-18-1 ed. 2 Točivé elektrické stroje - Část 18-1: Funkční hodnocení izolačních systémů - Všeobecné návody (účinnost od 1.2.2011)
- [30] ČSN IEC 610 Základní aspekty funkčního hodnocení elektrických izolačních soustav: Mechanizmy stárnutí a diagnostické postupy (účinnost od 1.3.1996, zrušena 1.11.2009)
- [31] ČSN ISO 13379 Monitorování stavu a diagnostika strojů - Obecné směrnice pro interpretaci dat a diagnostické metody (účinnost od 1.9.2004)
- [32] ČSN 35 4055-8 Konstrukční součástky pro elektroniku. Měření izolačního odporu (účinnost od 1.1.1986, zrušena 1.10.2002)
- [33] HAMPL, J. *Materiály pro elektrotechniku*, skriptum, (1991), ČVUT Praha
- [34] CIGÁNEK, L., *Elektrické stroje*, páté vydání, (1950), Vědecko-technické nakladatelství, Praha
- [35] ČSN EN 10282 Magnetické materiály - Metody zkoušení povrchového izolačního odporu plechů a pásů pro elektrotechniku (účinnost od 1.10.2001)
- [36] ČSN EN 62068-1 Elektroizolační systémy - Elektrická namáhání vyvolaná opakovanými impulzy - Část 1: Všeobecná metoda hodnocení elektrické odolnosti (účinnost od 1.8.2004)
- [37] TRNKA, P., PIHERA, J., ŠIRŮČEK, M., *Elektrický stromeček – fenomén v elektroizolačních materiálech*, Elektro, 1/2010, pp. 18-22, ISSN 1210-0889, FCC Public, s.r.o.

- [38] ČSN EN 60034-18-22 Točivé elektrické stroje - Část 18 - 22: Funkční hodnocení izolačních systémů - Zkušební postupy pro vinutá vinutí - Klasifikace změn a náhrad komponent izolace (účinnost od 1.9.2001)
- [39] ČSN EN 60243-2 Elektrická pevnost izolačních materiálů - Zkušební metody - Část 2: Dodatečné požadavky na zkoušky stejnosměrným napětím (účinnost od 1.12.2001)
- [40] SMETANA, J., *Měření vybraných parametrů izolace*, Elektro, 8/2009, pp. 42-43, ISSN 1210-0889, FCC Public, s.r.o.
- [41] SMÉKAL, R., *Trvalé monitorování a lokalizace poruchy izolačního odporu v izolovaných sítích*, Elektro, 6/2008, ppo. 55-57, ISSN 1210-0889, FCC Public, s.r.o.
- [42] http://www.electrocube.com/support/insulation_resistance.asp 15.6.2011
- [43] TRNKA, P., *ZBYTKOVÁ ŽIVOTNOST ELEKTROIZOLAČNÍCH SYSTÉMŮ*, Elektorevue, 2009/22, ISSN 1213-1539, Vysoké učení technické v Brně
- [44] PIHERA, J., POLANSKÝ, R., PROSR, P., TRNKA, P., *Sledování vytvrzovacích charakteristik skloslídových kompozitů*, ElectroScope, 2007/0, ISSN 1802-4564, Západočeská univerzita v Plzni
- [45] TRNKA, P., *Perspektivy diagnostiky malých a středních točivých strojů*, Elektorevue, 2008/11, ISSN 1213-1539, Vysoké učení technické v Brně
- [46] Kopylov, P., a kol., *Stavba elektrických strojů*, Nakladatelství technické literatury, (1988), Praha
- [47] Janda, M., Kuchyňková, H., *Teplotní měření v elektrických strojích*, Elektorevue, 2008/33, ISSN 1213-1539, Vysoké učení technické v Brně
- [48] http://ecmweb.com/mag/electric_insulation_testing/ 25.6.2011
- [49] http://www.aemc.com/techinfo/techworkbooks/megohmmeters/tech_megohm.pdf 22.6.2011
- [50] <http://www.energymanagertraining.com/Journal/09032007/InsulationResistanceandPolarizationIndexTestofGenerator&Motor.pdf> 13.6.2011
- [51] <http://www.davis.com/techinfo/techinfo.asp?htmlfile=flukethermalresistance.html&ID=1216> 19.6.2011
- [52] <http://www.biddlemegger.com/biddle/Stitch-new.pdf> 13.7.2011

VLASTNÍ PUBLIKAČNÍ ČINNOST

- [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 PROBLÉMY ELEKTRICKÝCH STROJŮ A POHONŮ 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 proudu 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.:
Stejnoseměnné 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

VLASTNÍ TECHNICKÉ REALIZACE

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

OSTATNÍ ČINNOSTI

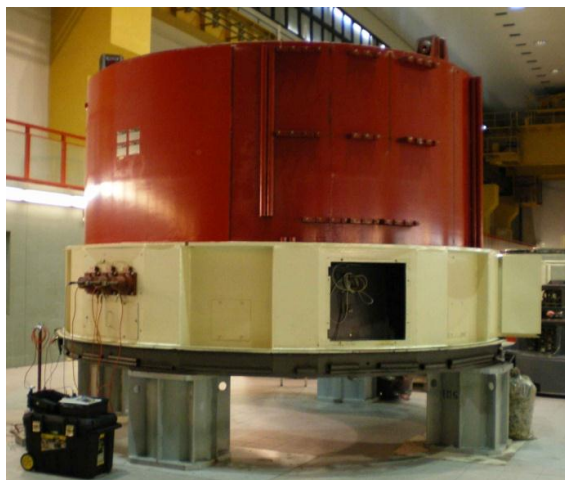
Vedení diplomových prací:

- [1] Konečný, Pavel., Vliv plechů z amorfní oceli na prostupnost rušení transformátory. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. 2010

Spolupráce na projektech:

- [1] Spolupráce na řešení komerčního projektu č. 021335400020 (2006) pro ČEZ,a.s. Univerzální modul výpočtu izolačního odporu izolační soustavy vn točivých elektrických strojů.
- [2] Projekt MPO ČR FI-IM5/173, 2008-2010, název: Metodika stanovení životnosti vysokonapěťových izolačních systémů točivých strojů, spoluřešitel.
- [3] Operační program Vzdělávání pro konkurenceschopnost (OP VK) CZ.1.07/2.3.00/09.0162 Znalosti a dovednosti v mechatronice transfer inovací do praxe
- [4] Operační program Vzdělávání pro konkurenceschopnost (OP VK) CZ.1.07/2.2.00/07.0406 Zavedení problémově orientovaného vzdělávání do studijních plánů strojního inženýrství
- [5] Projekt GAČR GA102/08/1118, 2008-2010, název: Inteligentní diagnostika elektrických strojů, spoluřešitel.
- [6] Juniorský projekt specifického výzkumu BD13102005, 2011: Rozbor spolehlivosti výkonových olejových transformátorů, spoluřešitel.
- [7] Projekt specifického výzkumu FSI-S-11-5, 2011-2013: Enviromentální a bezpečnostní aspekty vývoje, výroby a provozu strojů, spoluřešitel.

Příloha A Dlouhé stráně - stator ponymotoru



Pomocný motor (asynchronní) – stator

Výrobní číslo:	04356
Typ:	2 M 700670S/12
Výrobce:	Škoda
Rok výroby:	1993
Napětí statoru:	10 000 V
Proud statoru:	1824 A
Výkon:	25 000 kW
Otáčky:	495 ot/min
Účinník:	0,82
Frekvence:	50 Hz
Třída izolace:	F

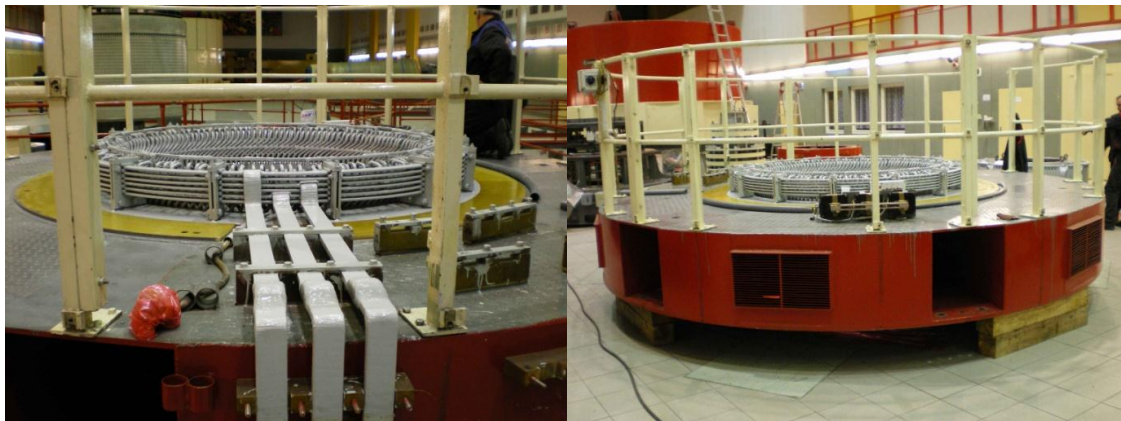
Osa stroje během měření: - směrem do země

Stav stroje mezi měřeními různými přístroji:- svorky stroje zkratovány na kostru a uzemněny

Stav stroje mezi jednotlivými měřeními:

- měřená fáze nebyla odpojována od přístroje, měření následovala okamžitě za sebou
- fáze které nebyly měřeny byly zkratovány na kostru a uzemněny

Příloha B Dlouhé stráně - stator budiče



Budič – stator

Výrobní číslo: 034237
Výrobce: Škoda
Výkon: 1 500 kW
Třída izolace: F

Osa stroje během měření: - směrem do země

Stav stroje mezi měřeními různými přístroji:- svorky stroje zkratovány na kostru a uzemněny

Stav stroje mezi jednotlivými měřeními: - měřen vždy pouze při jednom napětí

Příloha C Motor v.č. 154 317**Motor asynchronní – stator**

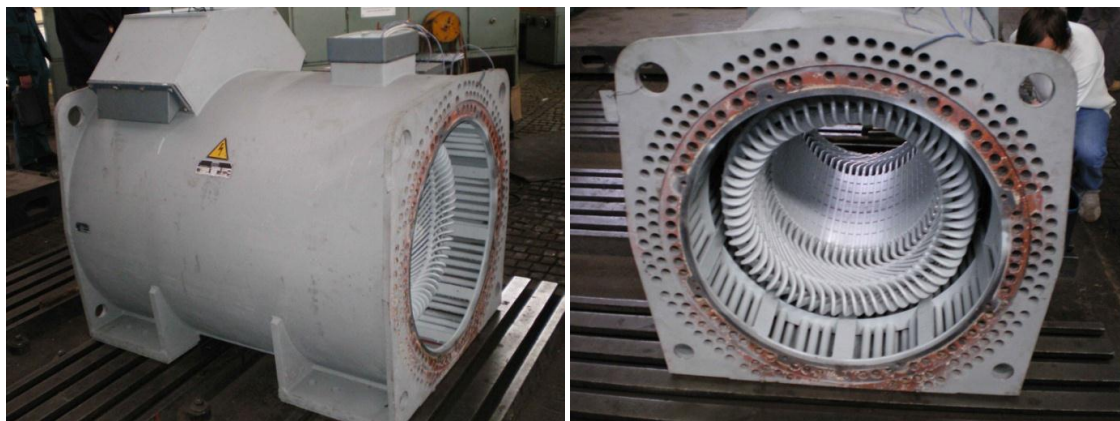
Výrobní číslo:	154 317
Typ:	3N4 710 X-6
Výrobce:	MEZ Brno
Rok výroby:	1987
Napětí statoru:	6 000 V
Proud statoru:	72,8 A
Výkon:	630 kW
Otáčky:	992 ot/min
Frekvence:	50 Hz
Třída izolace:	F

Osa stroje během měření: - jiho-západo-západ, 10° od západu

Stav stroje mezi měřeními různými přístroji:- svorky stroje zkratovány na kostru a uzemněny

Stav stroje mezi jednotlivými měřeními: - měřeny všechny fáze dohromady, tyto nebyly odpojovány od přístroje, měření následovala okamžitě za sebou

Stav stroje mezi jednotlivými dny měření: - svorky stroje zkratovány na kostru

Příloha D Motor v.č. 173 098**Motor asynchronní – stator**

Výrobní číslo:	173 098
Typ:	ARN 500 X-4
Výrobce:	Siemens Drásov
Rok výroby:	1998
Napětí statoru:	6 000 V
Proud statoru:	63,5 A
Výkon:	560 kW
Otáčky:	1490 ot/min
Frekvence:	50 Hz
Účinník:	0,89
Třída izolace:	F

Osa stroje během měření:

- první den měření: severo-severo-západ, 10° od severu
- druhý den měření: jiho-západo-západ, 10° od západu

Stav stroje mezi měřeními různými přístroji:- svorky stroje zkratovány na kostru a uzemněny

Stav stroje mezi jednotlivými měřeními: - měřeny všechny fáze dohromady, tyto nebyly odpojovány od přístroje, měření následovala okamžitě za sebou

Stav stroje mezi jednotlivými dny měření: - svorky stroje zkratovány na kostru

Příloha E Motor v.č. 2130 467**Motor asynchronní – stator**

Výrobní číslo:	2130 467
Typ:	4V206-04V
Výrobce:	ČKD Praha
Rok výroby:	1992
Napětí statoru:	6 000 V
Proud statoru:	218 A
Výkon:	2000 kW
Otáčky:	1490 ot/min
Frekvence:	50 Hz
Účinník:	0,8
Třída izolace:	F

Osa stroje během měření: - severo-západo-západ, 30° od západu

Stav stroje mezi měřeními různými přístroji:- svorky stroje zkratovány na kostru a uzemněny

Stav stroje mezi jednotlivými měřeními: - měřen pouze vstup jedné fáze (stroj zapojen do hvězdy), tato nebyla odpojována od přístroje, měření následovala okamžitě za sebou

Stav stroje mezi jednotlivými dny měření: - svorky stroje zkratovány na kostru

Příloha F Motor v.č. FQ 174 232**Motor asynchronní – stator**

Výrobní číslo: 174 232
Typ: ARN 560 X-8
Výrobce: Siemens Drásov
Rok výroby: 1998
Napětí statoru: 6 000 V
Proud statoru: 59,6 A
Výkon: 500 kW
Otáčky: 744 ot/min
Frekvence: 50 Hz
Účinník: 0,85
Třída izolace: F

Osa stroje během měření: - do země

Stav stroje mezi měřeními různými přístroji:- měřeno pouze jedním přístrojem (byť opakovaně)

Stav stroje mezi jednotlivými měřeními: - měřen pouze vstup jedné fáze (stroj zapojen do hvězdy), tato nebyla odpojována od přístroje, měření následovala okamžitě za sebou

Příloha G Hydrogenerátor v.č. 33784

Generátor synchronní

Výrobní číslo:	33784
Typ:	HV 880742/44
Výrobce:	Škoda Plzeň
Rok výroby:	1976
Napětí statoru:	13 800 V
Proud statoru:	4 470 A
Výkon:	112 500 kVA
Otáčky.	136,3 ot/min
Frekvence:	50 Hz
Účinník:	0,8
Třída izolace:	F

Příloha H Měřicí přístroj Megger S1-5005



Evidenční číslo: 1615 (ČEZ a.s.)

Rozsah měření izolačního odporu: Digitálně:

10k Ω až 500G Ω při 500V

10k Ω až 1T Ω při 1000V

10k Ω až 2,5T Ω při 2500V

10k Ω až 5T Ω při 5000V

Přesnost měření izolačního odporu: $\pm 5\%$ z odečtené hodnoty pro 1M Ω až 1T Ω při 5kV (0 až 30°C)

Proud nakrátko: 5mA nominálně

Příloha I Měřicí přístroj PU 311



Evidenční číslo: 1260021 (ČEZ a.s.)

Rozsah měření izolačního odporu: 0 až 1000M Ω při 100V
0 až 5000T Ω při 500V
0 až 10 000T Ω při 1000V
Každé napětí – tři rozsahy

Přesnost měření izolačního odporu: třída přesnosti 2.5 z délky stupnice

Proud nakrátko: menší než 1mA

Příloha J Měřicí přístroj Megger BM11D



Sériové číslo: 970990 1495 (inv. č. 915 002 ČEZ a.s.)

Rozsah měření izolačního odporu: Digitálně:

10kΩ až 50GΩ	při 500V
10kΩ až 100GΩ	při 1000V
10kΩ až 250GΩ	při 2500V
10kΩ až 500GΩ	při 5000V

Přesnost měření izolačního odporu: $\pm 5\%$ z odečtené hodnoty pro 10MΩ až 100GΩ při 5kV

Proud nakrátko: 1,8mA nominálně, 2mA maximálně

Příloha K Měřicí přístroj Metrel TeraOhm 5kV



Obr. viz [19]

Evidenční číslo prvního exempláře:	103694 (Exmont energo)
Evidenční číslo druhého exempláře:	071 802 39 (Energetické strojírny Brno)
Rozsah měření izolačního odporu:	Digitálně: 0,01MΩ až 5TΩ napěťové hladiny výrobce neudává
Přesnost měření izolačního odporu:	±5% z odečtené hodnoty +3 digity pro 0,01MΩ až 5TΩ
Proud nakrátko:	1,4mA nominálně

Příloha L Absorpční charakteristika motoru v.č. 173 098

t	U=272V	U=543V	U=1063V
(s)	R_i (GΩ)	R_i (GΩ)	R_i (GW)
15	4,95	5,24	4,42
60	10,5	12,3	10,4
120	14,4	17	17,9
180	17,3	19,8	18
240	19,4	21,9	19,9
300	21,3	23,8	19,7
360	23,6	25,2	23,2
420	24,5	26,3	24,3
480	25,5	28,1	25,6
540	26,9	29	26,6
600	28,1	29,9	27,5
660	28,8	31,2	28,8
720	30,4	31,8	29,1
780	31,6	31,9	30
840	32,4	33,3	31
900	33,5	34,9	32,7
960	34,5	34,4	32,9
1020	35,9	35,6	33
1080	35,8	36,1	34,5
1140	36,4	36,9	34,9
1200	37,5	37,7	35,7
1260	38,2	38,3	36,4
1320	38,6	37,6	37
1380	39,7	39,9	37,2
1440	40,7	38,7	37,6
1500	40,6	39,6	38,2
1560	41,6	41,7	39
1620	42,3	41,7	39,7
1680	42,7	41,4	39,7
1740	42,9	42,3	40,2
1800	43,4	42,9	40,8

Příloha M Absorpční charakteristika motoru v.č. 173 098

Měřeno při napětí 500V

t	R_i
(s)	(G Ω)
15	1,21
60	4,64
180	10,9
300	16
600	26,8
780	33,4
840	35,4
900	36
1020	39,2
1200	44,6
1380	51

Příloha N Napěťová závislost izol. odporu generátoru v.č. 33784

Původní hodnoty:

U	(V)	10 000	15 000	20 000	25 000	30 000
R _i	(MΩ)	232	315	372	461	470

Hodnoty z proložení:

U	R _i
(V)	(MΩ)
10000	229,028
11000	247,76507
12000	265,83928
13000	283,25063
14000	299,99912
15000	316,08475
16000	331,50752
17000	346,26743
18000	360,36448
19000	373,79867
20000	386,57
21000	398,67847
22000	410,12408
23000	420,90683
24000	431,02672
25000	440,48375
26000	449,27792
27000	457,40923
28000	464,87768
29000	471,68327
30000	477,826

Příloha O Závislost absorpční charakteristiky ponymotoru v.č. 04356

Závislost na napětí (fáze W)

t	U=100V	U=500V	U=1000V
(s)	R_i (G Ω)	R_i (G Ω)	R_i (G Ω)
15	1,09	1,66	2,32
60	6,7	8,85	11,6
180	16,3	20,6	24,2
300	24,4	29	33
600	39,8	45	49,2

Závislost na proudu dodávaném měřicím přístrojem (Fáze U):

t	$I_k=5\text{mA}$	$I_k=2\text{mA}$
(s)	R_i (G Ω)	R_i (G Ω)
15	1,57	1,41
60	8,5	7,85
180	20,4	18,8
300	29,2	28,2
600	47,2	46,6

Závislost na proudu dodávaném měřicím přístrojem (Fáze V):

t	$I_k=5\text{mA}$	$I_k=2\text{mA}$
(s)	R_i (G Ω)	R_i (G Ω)
15	1,77	1,42
60	9,2	7,9
180	21	19,2
300	29,6	28,2
600	46	46,2

Příloha P Přepočet absorpční charakteristiky ponymotoru v.č. 04356

Přepočtené absorpční charakteristiky – proklad polynomem 4. řádů (Fáze U):

t	$I_k=5\text{mA}$	$I_k=2\text{mA}$
(s)	$R_i \text{ (G}\Omega\text{)}$	$R_i \text{ (G}\Omega\text{)}$
15	1,570025013	1,409989
30	4,102967806	3,787491
60	8,500031296	7,849978
120	15,27309434	14,00756
180	20,40020858	18,79997
240	24,83854778	23,32307
300	29,20084	28,1999
360	33,75536762	33,58063
420	38,4259673	39,14262
480	42,79203002	44,09035
540	46,08850106	47,1555
600	47,20588	46,59686

Přepočtené absorpční charakteristiky – přepočet do počátku souřadnic (Fáze U):

t	$I_k=5\text{mA}$	$I_k=2\text{mA}$
(s)	$R_i \text{ (G}\Omega\text{)}$	$R_i \text{ (G}\Omega\text{)}$
15	2,6756118	2,523446985
30	5,10493291	4,788035757
60	9,3266353	8,666736912
120	15,8604591	14,60148019
180	20,8664142	19,31937307
240	25,2649974	23,86268467
300	29,63226	28,80081
360	34,1998076	34,23026995
420	39,0071063	39,95292731

480	43,1399516	44,58490675
540	46,2535307	47,33875483
600	47,04936	46,24128

Příloha Q Absorpční charakteristiky motoru v.č. 2130 467

Původní absorpční charakteristiky:

t	$I_k=5\text{mA}$	$I_k=1,4\text{mA}$
(s)	$R_i \text{ (G}\Omega\text{)}$	$R_i \text{ (G}\Omega\text{)}$
15	3	2,98
60	15,3	11,2
120	22,8	20,7
180	28,4	28
240	36,8	34,8
300	42,2	39,3
360	47	43,3
420	51,5	49,8
480	54	53
540	59,5	58,2
600	61,5	60,4

Přepočtené absorpční charakteristiky – proklad polynomem 4. řádů (Fáze U):

t	$I_k=5\text{mA}$	$I_k=1,4\text{mA}$
(s)	$R_i \text{ (G}\Omega\text{)}$	$R_i \text{ (G}\Omega\text{)}$
15	4,019482	2,737198
30	7,333648	5,894624
60	13,27361	11,56623
120	22,89816	20,81127
180	30,34069	28,04524
240	36,40265	34,03198
300	41,66978	39,32965
360	46,51211	44,29068
420	51,08397	49,06186
480	55,32398	53,58424

540	58,95506	57,59322
600	61,48442	60,61849

Přepočtené absorpční charakteristiky – přepočet do počátku souřadnic (Fáze U):

t	$I_k=5\text{mA}$	$I_k=1,4\text{mA}$
(s)	$R_i \text{ (G}\Omega\text{)}$	$R_i \text{ (G}\Omega\text{)}$
15	3,601886	3,350037627
30	6,945906	6,464510708
60	12,93866	12,06041076
120	22,64399	21,19056768
180	30,13976	28,35030132
240	36,234	34,29376704
300	41,51903	39,569445
360	46,37147	44,52014016
420	50,95224	49,28298228
480	55,20651	53,78942592
540	58,86376	57,76525044
600	61,43777	60,73056

Příloha R Teplotní závislosti generátoru v.č. 33784

Závislost absorpční charakteristiky na teplotě měřené izolace (fáze V):

t	57°C	43°C	35°C	30°C
(s)	R_i (GΩ)	R_i (GΩ)	R_i (GΩ)	R_i (GΩ)
15	71	150	197	241
30	136	307	424	520
45	185	425	605	786
60	221	528	788	1 020
90	279	706	1 100	1 430
120	328	868	1 370	1 830
180	402	1 140	1 860	2 540
240	463	1 370	2 260	3 180
300	515	1 580	2 650	3 580
360	562	1 770	3 050	4 030
420	603	1 940	3 150	4 530
480	645	2 120	3 460	4 950
540	680	2 270	3 720	5 370
600	718	2 390	4 040	5 760

Příloha S Vliv vlhkosti na izolační odpor u motoru v.č. 154 317

Absorpční charakteristiky pro různé vlhkosti izolace (napětí 500V)

t	Vlhká	Částečně vysušená
(s)	R_i (GΩ)	R_i (GΩ)
15	4,59	3,05
60	16,5	19,2
120	24	37,4
180	28,4	51,5
240	30,1	65,5
300	33,2	71
360	31,9	80
420	32,8	94,5
480	36,1	98
540	34,8	107
600	36,8	117

Absorpční charakteristiky pro různé vlhkosti izolace – proklad polynomem 4. řádu
(napětí 500V)

t	Vlhká	Částečně vysušená
(s)	R_i (GΩ)	R_i (GΩ)
15	5,056092	2,880022
30	9,009451	8,778873
60	15,55457	19,53186
120	24,22997	37,46286
180	28,74865	51,67435
240	30,82716	63,26534
300	31,77162	73,1548
360	32,47777	82,08166
420	33,43089	90,60482
480	34,70587	99,10313
540	35,96718	107,7754
600	36,46887	116,6404

Příloha T Napět'ová závislost polarizačních indexů ponymotoru v.č. 04356

Hodnoty z prokladu – polynom 4. řádu (fáze W):

U	R _{i15}	R _{i30}	R _{i60}	R _{i600}
(V)	(GΩ)	(GΩ)	(GΩ)	(GΩ)
50	1,016125325	3,016555	6,433676	39,03496
100	1,0900003	3,152271	6,697218	39,79996
150	1,163291925	3,286868	6,960065	40,53941
200	1,2360002	3,420345	7,222218	41,2533
250	1,308125125	3,552703	7,483677	41,94163
300	1,3796667	3,683941	7,744441	42,60441
350	1,450624925	3,81406	8,00451	43,24164
400	1,5209998	3,943059	8,263886	43,8533
450	1,590791325	4,070939	8,522566	44,43942
500	1,6599995	4,1977	8,780553	44,99998
550	1,728624325	4,323341	9,037844	45,53498
600	1,7966658	4,447863	9,294442	46,04442
650	1,864123925	4,571266	9,550344	46,52832
700	1,9309987	4,693549	9,805553	46,98665
750	1,997290125	4,814713	10,06007	47,41943
800	2,0629982	4,934757	10,31389	47,82666
850	2,128122925	5,053682	10,56701	48,20833
900	2,1926643	5,171487	10,81944	48,56444
950	2,256622325	5,288173	11,07118	48,895
1000	2,319997	5,40374	11,32222	49,2
1050	2,382788325	5,518187	11,57257	49,47945
1100	2,4449963	5,631515	11,82222	49,73334

Příloha U Charakteristiky polarizačních indexů motoru v.č. 154 317

Charakteristiky s pevným bodem pro $p_{i(60/x)}$:

t	Vlhká	Částečně vysušená
(s)	$p_{i(60/x)} (-)$	$p_{i(60/x)} (-)$
15	3,07640156	6,781843699
20	2,41973571	3,996497007
25	2,00820814	2,85001715
30	1,7264727	2,224870888
35	1,52174298	1,831400572
40	1,36644361	1,560998015
45	1,24476447	1,363765865
50	1,1469907	1,213568692
55	1,06682354	1,095393022
60	1	1

Charakteristiky s pevným bodem pro $p_{i(600/x)}$:

t	Vlhká	Částečně vysušená
(s)	$p_{i(600/x)} (-)$	$p_{i(600/x)} (-)$
60	2,344575959	5,971802594
120	1,50511395	3,113494641
180	1,268541979	2,257220769
240	1,18301122	1,843670129
300	1,147844199	1,594432857
360	1,122887329	1,421028907
420	1,090873537	1,287353283
480	1,050798281	1,176959939
540	1,013948468	1,082254494
600	1	1

Charakteristiky s pevným časem pro $p_{i(t_2/t_2-15s)}$:

t	Vlhká	Částečně vysušená
(s)	$p_{i(t_2/t_2-15s)} (-)$	$p_{i(t_2/t_2-15s)} (-)$
30	1,781899921	3,04819652
45	1,386987453	1,631417053
60	1,244764466	1,363765865
75	1,171515414	1,250786417
90	1,126918403	1,188612337
105	1,096990025	1,149379342
120	1,075602417	1,122459146
135	1,059649083	1,102917114
150	1,047389192	1,088149674

Příloha V Charakteristiky směrnic tečen motoru v.č. 154 317

Hodnoty z prokladu – polynom 3. řádu:

t	Vlhká	Částečně vysušená
(s)	$p_{i(600/x)} (-)$	$p_{i(600/x)} (-)$
0	0,315209	0,43167
20	0,26889	0,397293
40	0,227397	0,365674
60	0,190476	0,336702
80	0,157874	0,310264
100	0,129337	0,286251
120	0,104612	0,264551
140	0,083447	0,245053
160	0,065586	0,227646
180	0,050778	0,212218
200	0,038769	0,198659
220	0,029305	0,186857
240	0,022133	0,176701
260	0,017	0,168081
280	0,013653	0,160884
300	0,011837	0,155
320	0,0113	0,150318
340	0,011789	0,146727
360	0,013049	0,144114
380	0,014828	0,142371
400	0,016873	0,141384
420	0,01893	0,141043
440	0,020745	0,141237
460	0,022065	0,141855
480	0,022638	0,142786

500	0,022209	0,143918
520	0,020525	0,14514
540	0,017334	0,146342
560	0,012381	0,147412
580	0,005413	0,148238
600	-0,00382	0,14871

Příloha W Absorpční charakteristiky motoru v.č. FQ 174 232

Měřeno při napětí 542V:

t	R _i
(s)	(GΩ)
15	4,48
60	24,1
120	38,2
180	44,4
240	55,6
300	63,8
360	69
420	79,1
480	84,3
540	93,3
600	96,4
660	98,4
720	102
780	108
840	116
900	120
960	128
1020	123
1080	113
1140	128
1200	131
1260	134
1320	130
1380	128

1440	132
1500	137
1560	150
1620	149
1680	142
1740	149
1800	153

Příloha X Charakteristiky stroje EDA TG3

Měřeno na fázi B:

Datum měření	R_{i15}	R_{i60}	P_{i60}
(-)	(MΩ)	(MΩ)	(-)
11.10.1978	100	480	4,8
21.5.1980	100	900	9
21.8.1981	350	1000	2,857142857
18.3.1982	200	1000	5
30.9.1985	110	560	5,090909091
13.10.1986	120	640	5,333333333
6.5.1987	160	640	4
23.3.1989	120	1200	10
24.10.1989	150	800	5,333333333
3.9.1990	400	1500	3,75
6.3.1992	17	400	23,52941176
1.6.1992	19	320	16,84210526
8.3.1994	70	480	6,857142857
28.8.1995	80	400	5
11.9.1996	140	850	6,071428571
17.9.1997	130	1000	7,692307692
7.1.1999	90	900	10
2.5.2000	110	650	5,909090909
21.8.2000	90	500	5,555555556
10.9.2001	90	500	5,555555556
10.9.2002	100	500	5
11.11.2003	312	1140	3,653846154
7.9.2004	278	935	3,363309353

Příloha Y Charakteristiky stroje EL1 TG2

Měřeno na fázi A:

Datum měření	R_{i15}	R_{i60}	P_{i60}
(-)	(MΩ)	(MΩ)	(-)
14.4.1981	180	420	2,333333333
16.9.1982	200	900	4,5
16.12.1982	200	800	4
3.5.1983	220	1200	5,454545455
2.6.1983	35	60	1,714285714
1.12.1983	240	1900	7,916666667
1.3.1984	220	1100	5
14.9.1988	200	1100	5,5
7.2.1995	200	1100	5,5
10.6.1996	300	1400	4,666666667
12.5.1997	833	2353	2,824729892
5.10.1999	350	1750	5
10.4.2000	350	1650	4,714285714
2.7.2001	200	1000	5
17.10.2002	190	1150	6,052631579
22.9.2003	458	1450	3,165938865
23.9.2004	438	1580	3,607305936

Příloha Z Absorpční charakteristika generátoru v.č. 33784

Měřeno na fázi U při 57°C:

t	R _i
(s)	(GΩ)
15	68
30	129
45	174
60	209
90	260
120	300
180	366
240	418
300	465
360	508
420	546
480	583
540	617
600	652

Příloha AA Absorpční charakteristiky motoru v.č. 154 317

Měřeno při napětí 253V ($I_k=5\text{mA}$):

t	R_i
(s)	($G\Omega$)
15	1,62
60	16
120	25,2
180	40
240	50
300	59
360	63
420	70,5
480	76,5
540	78,5
600	90,5
660	92,5
720	95
780	103
840	101
900	111
960	120
1020	112
1080	113
1140	130
1200	165
1260	141
1320	128
1380	134
1440	139

1500	132
1560	152
1620	157
1680	154
1740	151
1800	160