

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

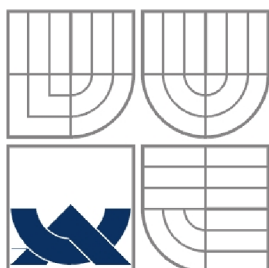
OVĚŘENÍ VLIVU TEPLoty A VLHKOSTI NA IZOLAČNÍ ODPOR ELEKTROMOTORŮ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

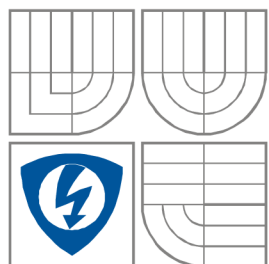
Petr Fiala

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

**ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY
A ELEKTRONIKY**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC
ENGINEERING

OVĚŘENÍ VLIVU TEPLoty A VLHKOSTI NA IZOLAČNÍ ODPOR ELEKTROMOTORŮ

**TEMPERATURE AND HUMIDITY INFLUENCE ON INSULATION RESISTANCE OF ELECTRIC
MOTORS**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

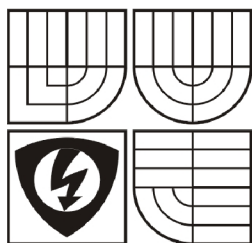
Petr Fiala

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.

BRNO, 2014



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika

Student: Petr Fiala

ID: 138693

Ročník: 3

Akademický rok: 2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

Ověření vlivu teploty a vlhkosti na izolační odpor elektromotorů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Definujte základní požadavky na izolaci elektrických strojů.
2. Porovnejte katalogové hodnoty izolačních odporů různých výrobců.
3. Zvolte dva základní izolační systémy pro porovnávací měření.
4. Za použití klimatické komory analyzujte vliv teploty a vlhkosti na hodnotu izolačního odporu.
5. Dosažené výsledky vyhodnoťte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Cigánek, L., Bauer, M.: Elektrické stroje a přístroje
- [2] Fitzgerald, A.E., Kingsley, Ch., Kusko, A.: Electric machinery. McGraw Hill 1971
- [3] Firemní podklady Siemens Mohelnice

Termín zadání: 27.9.2013

Termín odevzdání: 2.6.2014

Vedoucí práce: doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor semestrální práce nesmí při vytváření semestrální práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

Abstrakt

V této práci se řeší vlivy teploty a relativní vlhkosti na izolační odpory elektromotorů a jejich polarizační indexy. V první kapitole je popsán princip měření izolačních odporů, měřené objekty, použité měřicí přístroje a podmínky, za jakých měření probíhá. Druhá kapitola definuje základní požadavky izolačních systémů a zabývá se především vyhodnocením měření jednotlivých částí motorů a určením polarizačních indexů. Třetí kapitola pak pojednává o vlivech teploty a vlhkosti na izolační odpor, jsou v ní zformulovány obecné předpoklady a následně po použití klimatické komory prezentovány výsledky měření na reálných motorech z průmyslové praxe.

Abstract

The bachelor's thesis studies the effects of temperature and relative humidity on the insulation resistance of electric motors and their polarization index. The first chapter describes measuring principle of insulation resistance, measured objects, used measuring instruments and actual environmental conditions. The second chapter defines the basic requirements of insulation systems and there is especially solved evaluation of the measurement of individual parts of motors and calculation of polarization index. Third chapter discusses the influence of temperature and relative humidity on insulation resistance, there are formulated general preconditions and after using climate chamber there are presented measurement results on real motors in the industrial practice.

Klíčová slova

izolační odpor; polarizační index; točivý elektrický stroj; teplota a vlhkost

Keywords

insulation resistance; polarization index; rotating electric machine;
temperature and relative humidity

Bibliografická citace

FIALA, P. Ověření vlivu teploty a vlhkosti na izolační odpor elektromotorů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 60 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc..

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma *Ověření vlivu teploty a vlhkosti na izolační odpor elektromotorů* jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Čestmíru Ondrůškovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce a dále Ing. Miloši Pěničkovi a p. Jiřímu Rajčulovi ze společnosti Siemens s.r.o. – odštěpný závod Elektromotory Mohelnice za zprostředkování odborných konzultací a možnost realizace kompletního měření na zkušebně a vývojové dílně.

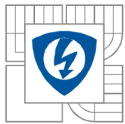
V Brně dne

Podpis autora



Obsah

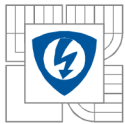
SEZNAM OBRÁZKŮ	9
SEZNAM TABULEK	11
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	13
ÚVOD	14
1 MĚŘENÍ IZOLAČNÍHO ODPORU	15
1.1 MĚŘENÉ OBJEKTY	15
1.2 ZPŮSOB MĚŘENÍ	16
1.3 POUŽITÉ MĚŘICÍ PŘÍSTROJE	17
1.3.1 MĚŘENÍ TEPLoty A VLHKOSTI.....	17
1.3.2 MĚŘENÍ IZOLAČNÍHO ODPORU	17
1.4 PRŮBĚH MĚŘENÍ	18
1.4.1 SEZNÁMENÍ S MĚŘICÍM PLÁNEM	18
1.4.2 PODMÍNKY MĚŘENÍ A PRACOVNÍ PROSTŘEDÍ	18
2 VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ	19
2.1 ZÁKLADNÍ POŽADAVKY NA IZOLACI	19
2.1.1 INDEXY	19
2.1.2 VÝPOČET IZOLAČNÍHO ODPORU	20
2.2 SROVNÁNÍ VÝROBCŮ	20
2.3 JEDNOTLIVÉ MĚŘENÉ ČÁSTI	20
2.3.1 NAVINUTÉ STATOROVÉ SVAZKY	21
2.3.2 SVAZKY ZALISOVANÉ DO KOSTRY	22
2.3.3 DOKOMPLETOVANÉ MOTORY S OTEVŘENOU SKŘÍŇÍ SVORKOVNICE	23
3 VLIV KLIMATU, TEPLoty A VLHKOSTI NA IZOLACI	29
3.1 KLIMA, PROSTŘEDÍ A DALŠÍ FAKTORY	29
3.1.1 PODNEBÍ - ZEMSKÉ PÁSY	29
3.1.2 PRACOVNÍ PROSTOR	31
3.1.3 TECHNICKÁ ŘEŠENÍ	31
3.1.4 IMPREGNACE	31
3.1.5 MÍKROORGANISMY	31
3.1.6 PLAZIVÉ PROUDY	32
3.2 TEPLota	32
3.3 VLHKOST	35
3.4 KLIMATICKÁ KOMORA	38
3.5 MĚŘENÍ PRO OVĚŘENÍ VLIVŮ	39
3.5.1 HORKÉ PROSTŘEDÍ, S KRYTEM SVORKOVNICE.....	40
3.5.2 MÍRNÉ PROSTŘEDÍ, S KRYTEM SVORKOVNICE	42
3.5.3 CHLADNÉ PROSTŘEDÍ, S KRYTEM SVORKOVNICE	44
3.5.4 HORKÉ PROSTŘEDÍ, BEZ KRYTU SVORKOVNICE	46
3.5.5 MÍRNÉ PROSTŘEDÍ, BEZ KRYTU SVORKOVNICE.....	48



3.5.6 CHLADNÉ PROSTŘEDÍ, BEZ KRYTU SVORKOVNICE.....	50
3.5.7 ABSOLUTNĚ VLHKÉ PROSTŘEDÍ, BEZ KRYTU SVORKOVNICE.....	52
3.5.8 OVĚŘOVACÍ MĚŘENÍ PO VYSOUŠENÍ V PECI.....	54
4 ZÁVĚR.....	57
LITERATURA.....	59
PŘÍLOHY.....	60

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1 – měřený asynchronní motor.....</i>	<i>15</i>
<i>Obrázek 2 – schéma zapojení při měření izolačního odporu fáze proti zemi (převzato z [2]).....</i>	<i>16</i>
<i>Obrázek 3 – digitální teploměr a vlhkoměr THZIINT (výrobce COMET System).....</i>	<i>17</i>
<i>Obrázek 4 – měřič izolačního odporu C.A6541 (výrobce Chavin Arnoux).....</i>	<i>17</i>
<i>Obrázek 5 – měření na navinutém svazku, odpor fáze-kostra přes kontaktní šroub.....</i>	<i>21</i>
<i>Obrázek 6 – měření na svazku zalisovaném v hliníkové kostře.....</i>	<i>22</i>
<i>Obrázek 7 – průběhy izolačních odporů v čase mezi fázemi U-V a mezi fází U a kostrou pro svazky zalisované v kostře.....</i>	<i>23</i>
<i>Obrázek 8 – průběhy izolačních odporů v čase mezi fázemi U-V a mezi fází U a kostrou u dokončovaných motorů s nepřipojenými vodiči na svorkovnici.....</i>	<i>24</i>
<i>Obrázek 9 – černá svorkovnice (Bakelite) a bílá svorkovnice (Keripol).....</i>	<i>25</i>
<i>Obrázek 10 – svorkovnicová skříň s bílou svorkovnicí a připojenými vodiči.....</i>	<i>26</i>
<i>Obrázek 11 – průběhy izolačních odporů v čase mezi fázemi U-V a mezi fází U a kostrou u dokončovaných motorů s vodiči připojenými na bílou na svorkovnici.....</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 12 – indikace překročení rozsahu (naměřeno $>4T\Omega$).....</i>	<i>28</i>
<i>Obrázek 13 – Köppenova klasifikace klimatu (převzato z [11]).....</i>	<i>30</i>
<i>Obrázek 14 – Grafické znázornění Montsingerova pravidla stárnutí izolace (převzato z [14])..</i>	<i>34</i>
<i>Obrázek 15 – diagram vztahu teploty, relativní vlhkosti a množství vody ve vzduchu (převzato z [10]).....</i>	<i>35</i>
<i>Obrázek 16 – průběh navlhnutí kabelového papíru v závislosti na čase uložení pro různé relativní vlhkosti vzduchu (převzato z [4]).....</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 17 – příklady úhlu smáčení (převzato z [16]).....</i>	<i>37</i>
<i>Obrázek 18 – příklad závislosti izolačních odporů pro navlhlou (M1) a suchou izolaci (M2) (převzato z [2]).....</i>	<i>38</i>
<i>Obrázek 19 – motory umístěné v aplikačním prostoru klimatické komory WK3-340/70.....</i>	<i>39</i>
<i>Obrázek 20 – průběhy izolačních odporů v čase mezi fázemi U-V a mezi fází U a kostrou při měření čistě na vinutí po simulaci horkého prostředí s krytem svorkovnice.....</i>	<i>42</i>
<i>Obrázek 21 – průběhy izolačních odporů v čase mezi fázemi U-V a mezi fází U a kostrou při měření čistě na vinutí po simulaci mírného prostředí s krytem svorkovnice.....</i>	<i>44</i>
<i>Obrázek 22 – průběhy izolačních odporů v čase mezi fázemi U-V a mezi fází U a kostrou při měření čistě na vinutí po simulaci chladného prostředí s krytem svorkovnice.....</i>	<i>46</i>
<i>Obrázek 23 – průběhy izolačních odporů v čase mezi fázemi U-V a mezi fází U a kostrou při měření čistě na vinutí po simulaci horkého prostředí bez krytu svorkovnice.....</i>	<i>47</i>
<i>Obrázek 24 – průběhy izolačních odporů v čase mezi fázemi U-V a mezi fází U a kostrou při měření čistě na vinutí po simulaci mírného prostředí bez krytu svorkovnice.....</i>	<i>49</i>

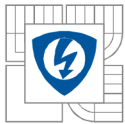


<i>Obrázek 25 – průběhy izolačních odporů v čase mezi fázemi U-V a mezi fází U a kostrou při měření čistě na vinutí po simulaci chladného prostředí bez krytu svorkovnice</i>	<i>51</i>
<i>Obrázek 26 – odlomený kus bakelitové svorkové desky na jednom z motorů</i>	<i>51</i>
<i>Obrázek 27 – průběhy izolačních odporů v čase mezi fázemi U-V a mezi fází U a kostrou při měření čistě na vinutí po simulaci prostředí o 100% relativní vlhkosti bez krytu svorkovnice</i>	<i>54</i>
<i>Obrázek 28 – průběhy izolačních odporů v čase mezi fázemi U-V a mezi fází U a kostrou při měření čistě na vinutí po vysoušení v peci.....</i>	<i>55</i>
<i>Obrázek 29 – motory po vysoušení.....</i>	<i>56</i>

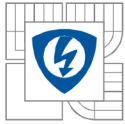


SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1 – Vyhodnocení izolace dle indexů (převzato z [5])</i>	<i>20</i>
<i>Tabulka 2 – Měření izolačního odporu na navinutých statorových svazcích.....</i>	<i>21</i>
<i>Tabulka 3 – Měření izolačního odporu na svazcích zalisovaných v kostře (č.1 a č.4)</i>	<i>22</i>
<i>Tabulka 4 – Měření izolačního odporu na dokompletovaných motorech bez připojení vodičů na svorkovnici (č.1 a č.4).....</i>	<i>24</i>
<i>Tabulka 5 – Měření izolačního odporu na dokompletovaných motorech s využitím černé svorkové desky</i>	<i>25</i>
<i>Tabulka 6 – Měření izolačního odporu na dokompletovaných motorech s připojením vodičů na bílou svorkovou desku (č.1 a č.4)</i>	<i>27</i>
<i>Tabulka 7 – Rozdělení izolantů do tepelných tříd</i>	<i>33</i>
<i>Tabulka 8 – Průvodka pro jednotlivé cykly klimatické komory.....</i>	<i>40</i>
<i>Tabulka 9 – Měření izolačního odporu na motorech s využitím černé svorkové desky po simulaci horkého prostředí s krytem svorkovnice.</i>	<i>40</i>
<i>Tabulka 10 – Měření izolačního odporu na motorech čistě na vinutí po simulaci horkého prostředí s krytem svorkovnice.</i>	<i>41</i>
<i>Tabulka 11 – Měření izolačního odporu na motorech s využitím černé svorkové desky po simulaci mírného prostředí s krytem svorkovnice.</i>	<i>42</i>
<i>Tabulka 12 – Měření izolačního odporu na motorech čistě na vinutí po simulaci mírného prostředí s krytem svorkovnice.</i>	<i>43</i>
<i>Tabulka 13 – Měření izolačního odporu na motorech s využitím černé svorkové desky po simulaci chladného prostředí s krytem svorkovnice.</i>	<i>44</i>
<i>Tabulka 14 – Měření izolačního odporu na motorech čistě na vinutí po simulaci chladného prostředí s krytem svorkovnice.</i>	<i>45</i>
<i>Tabulka 15 – Měření izolačního odporu na motorech s využitím černé svorkové desky po simulaci horkého prostředí bez krytu svorkovnice.</i>	<i>46</i>
<i>Tabulka 16 – Měření izolačního odporu na motorech čistě na vinutí po simulaci horkého prostředí bez krytu svorkovnice.</i>	<i>47</i>
<i>Tabulka 17 – Měření izolačního odporu na motorech s využitím černé svorkové desky po simulaci mírného prostředí bez krytu svorkovnice.....</i>	<i>48</i>
<i>Tabulka 18 – Měření izolačního odporu na motorech čistě na vinutí po simulaci mírného prostředí bez krytu svorkovnice.</i>	<i>49</i>
<i>Tabulka 19 – Měření izolačního odporu na motorech s využitím černé svorkové desky po simulaci chladného prostředí bez krytu svorkovnice.</i>	<i>50</i>
<i>Tabulka 20 – Měření izolačního odporu na motorech čistě na vinutí po simulaci chladného prostředí bez krytu svorkovnice.</i>	<i>50</i>
<i>Tabulka 21 – Měření izolačního odporu na motorech s využitím černé svorkové desky po simulaci prostředí o 100% relativní vlhkosti bez krytu svorkovnice.....</i>	<i>52</i>

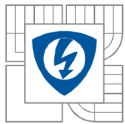


<i>Tabulka 22 – Měření izolačního odporu na motorech čistě na vinutí po simulaci prostředí o 100% relativní vlhkosti bez krytu svorkovnice.</i>	<i>53</i>
<i>Tabulka 23 – Měření izolačního odporu na motorech s využitím černé svorkové desky po vysoušení v peci.</i>	<i>54</i>
<i>Tabulka 24 – Měření izolačního odporu na motorech čistě na vinutí po vysoušení v peci.</i>	<i>55</i>



SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

$\cos \varphi$	–	účinník
m.p.	–	měřicí přístroj
R_i	–	izolační odpor
φ	–	relativní vlhkost okolí
ϑ	–	teplota okolí
t	–	čas
t_k	–	doba trvání cyklu klima komory
PI_{60}, PI_{600}	–	polarizační indexy
DAR	–	index dielektrické absorpce
U_N	–	jmenovité napětí
P_N	–	jmenovitý výkon motoru



ÚVOD

Jedním ze základních předpokladů pro spolehlivě fungující točivý elektrický stroj je bezpochyby kvalitní izolace. Ta je dána jednak složením a strukturou použitých izolačních materiálů, ale také je výrazně závislá na okolním prostředí. Existuje mnoho různých činitelů majících vliv na rychlost stárnutí a celkovou životnost točivých elektrických strojů. Mezi velmi významné patří zcela jistě působení teploty, vlhkosti, elektrického a mechanického namáhání, všemožná chemická činidla a spousta dalších vlivů, z nichž my se v této práci budeme zabývat prvními dvěma jmenovanými, tedy teplotou a vlhkostí.

Při výrobě elektrických strojů je nutno respektovat požadavky na izolaci, především v jakých klimatických podmínkách bude stroj pracovat. Konkrétně je nutné vědět například jakým teplotám bude vystaven, z toho důvodu je třeba určit, jak velké rozpětí teplot musí izolace vydržet, dále znát povětrnostní podmínky prostředí, do jaké polohy bude elektromotor umístěn a podobně. Abychom po výrobě motoru mohli garantovat určité předepsané hodnoty na jeho štítu a splnění požadavků, provádí se různé druhy zkoušek, kdy měníme určité parametry a sledujeme, jak se mění některé fyzikální veličiny v čase (zatěžovací zkouška, oteplovací zkouška a jiné). Izolace může být díky nestálosti prostředí výrazně ovlivněna změnou některé podmínky, z toho důvodu je velmi užitečné měřit a vyhodnocovat izolační odpor.

Aby takové měření na elektromotoru mělo co největší vypovídací schopnost o kvalitě použité izolace a aby byly naměřené hodnoty pokud možno dále porovnatelné (např. s měřením izolačního odporu na jiném elektromotoru, v jiném průmyslovém podniku, jiným měřicím přístrojem atp.), je nutné stanovit určitá pravidla, respektive metodiku pro samotné měření. Pokud by se tak nestalo, mohl by celý diagnostický proces být znehodnocen a výsledky takového měření by nabyly nesprávných hodnot. Když by takto nedostačující a nekvalitní izolační systém testováním prošel, v nejhorším možném případě by mohlo u stroje v provozu dojít k vážné havárii, která by mohla ohrozit bezpečnost a zdraví osob nacházejících se v okolí, a také vysoce negativně působit na výrobně-ekonomickou situaci podniku. Vždy se snažíme takovým stavům předcházet, i z toho důvodu existuje několik norem, které se problematikou přímo zabývají a o nichž se v práci dále zmíním.

Vzhledem k faktu, že elektromotory pracují v nejrůznějších klimatických podmínkách prakticky po celé naší planetě, je nutné mít k dispozici velkou škálu použitelných izolačních materiálů, z nichž každý se bude hodit do trochu jiného prostředí. Obecně se dá říci, že na motory používané v tropickém podnebí budou velmi pravděpodobně kladeny odlišné nároky z hlediska izolace než na obdobné motory, které budou konat práci v mírném podnebí. Právě měnící se teploty a vlhkosti (absolutní i relativní) mají zásadní vliv na volbu izolačního materiálu a tím na samotnou hodnotu izolačního odporu, což ověříme v této práci.

1 MĚŘENÍ IZOLAČNÍHO ODPORU

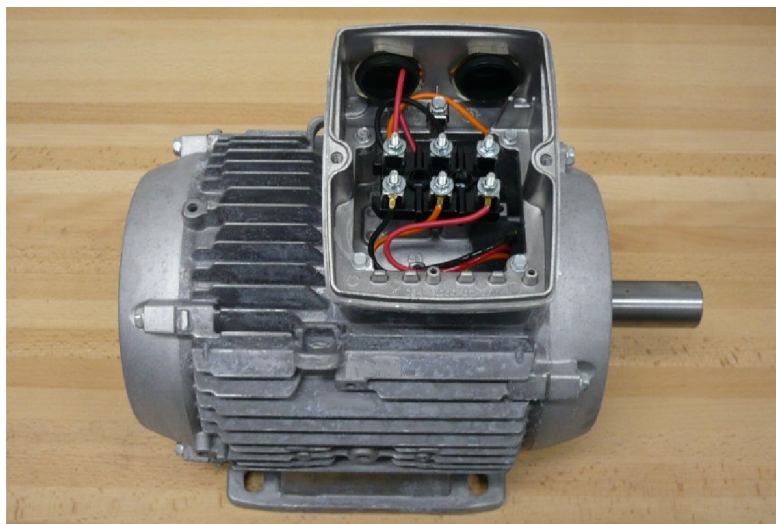
Aby samotné měření vůbec mělo vypovídající hodnotu, je nutné splnit určité požadavky na měřicí přístroj, měřený motor, okolní podmínky měření a stanovit vhodný měřicí postup tak, abychom zajistili pokud možno co největší porovnatelnost mezi jednotlivými měřeními. Proto je vhodné si při měření průběžně kontrolovat a zapisovat nastavené parametry a vyhodnocovat, jak se v čase mění.

1.1 Měřené objekty

Předmětem našeho měření byly asynchronní motory s kotvou nakrátko, resp. jeho jednotlivé části od firmy Siemens. Jedná se o třífázové elektromotory standardní produkce typové řady 1LE1 s osovou výškou 100 mm (označení AH100) ve dvoupólovém provedení. Bylo vyrobeno a otestováno celkem 6 těchto motorů ve dvou variantách. Parametry při frekvenci 50 Hz:

- jmenovitý výkon 1,2 kW
- účinník $\cos \varphi$ 0,89
- jmenovité otáčky 2860 min^{-1}
- účinnost 75,7 %
- poměr proudu nakrátko ku jmenovitému 7,6
- poměr momentu zvratu ku jmenovitému 3,9
- poměr maximálního momentu ku jmenovitému 3,5
- průřez přívodních vodičů $0,75 \text{ mm}^2$

První tři motory (dále označovány čísly 1, 2, 3) mají izolační systém pro třídu izolace F s vodiči s jednonásobnou drážkovou izolací a jednonásobnou impregnací, další tři (č. 4, 5, 6) pak izolační systém pro stejnou třídu izolace F, ovšem vodiče s dvojnásobnou izolací a dvojnásobnou impregnací (jsou dvakrát namočené v impregnačním laku). Vždy jsme měřili hodnoty izolačního odporu mezi jednotlivými fázemi (kombinace U-V, U-W, V-W) a také každou fází proti kostře (označeno U-k, V-k, W-k).



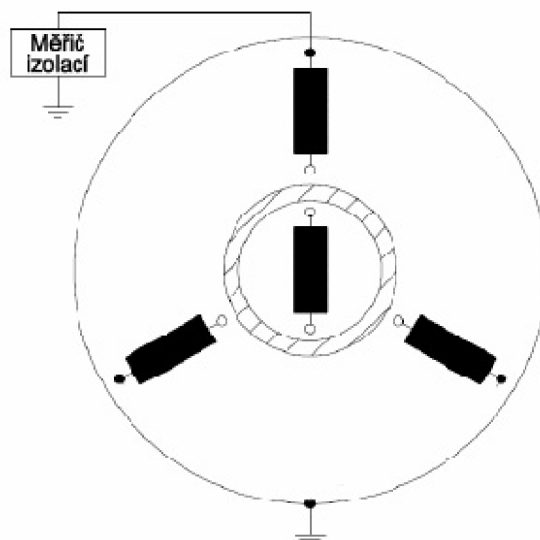
Obrázek 1 – měřený asynchronní motor

1.2 Způsob měření

Podmínky, které je třeba splnit a určitý měřicí postup je naznačen v normě ČSN 35 0010 s názvem „Točivé elektrické stroje. Zkoušky“, která popisuje základní druhy a principy zkoušek točivých elektrických strojů, např. oteplovací a rozběhové zkoušky a právě také měření izolačního odporu, kterým se podrobněji v textu normy zabývá kapitola 8, kde kromě všeobecného pojednání je popsána spousta dalších faktů, jako jsou zásady pro měření a stanovení hodnot, možné měřicí metody, postup pro určení polarizačních indexů a jiné. Je nutné mít na paměti pár důležitých zásad, vybrané jsou zmíněny níže [1].

1. Obecně platí, že pokud je stroj čistý a suchý, pak se izolační odpor bude přibližně v prvních deseti minutách po připojení měřiče zvětšovat.
2. S rostoucí hodnotou měřicího napětí nám bude klesat izolační odpor.
3. Pro každé měření je třeba si zapsat také měřicí napětí, typ měřicího přístroje, teplotu.
4. Při běžných zkouškách teplota vinutí nesmí být nižší než rosný bod (výjimka platí pro klimatické zkoušky).
5. Pro studený stav (stroj není v chodu) platí, že teplota vinutí se přibližně rovná teplotě okolí.

Hodnoty izolačního odporu byly v našem případě měřeny pomocí měřiče izolace (viz. podkapitola níže) a vždy při nastaveném měřicím napětí 1000 V. Při mezifázovém měření postupně přitlačujeme hroty na jednotlivé vývody fázových vodičů, u měření fáze-kostra se jeden z kontaktů přitiskne na takové místo na kostře, kde není žádné tmelení nebo nátěr a druhý se postupně přepojuje na vývody vinutí.



Obrázek 2 – schéma zapojení při měření izolačního odporu fáze proti zemi (převzato z [2])

1.3 Použité měřicí přístroje

1.3.1 Měření teploty a vlhkosti

Pro zjištění okolní teploty a relativní vlhkosti byl využit digitální teploměr a vlhkoměr od firmy COMET System – typ THZ11INT s teplotním rozsahem 0-40 °C a přesností $\pm 0,4$ °C a rozsahem relativní vlhkosti 5-95 % s přesností měření ± 1 %. Tento měřicí přístroj je přenosný a napájen z 9V baterie.



Obrázek 3 – digitální teploměr a vlhkoměr THZ11INT (výrobce COMET System)

1.3.2 Měření izolačního odporu

Byl použit speciální digitální měřič izolačního odporu od výrobce Chavin Arnoux, jedná se o přenosný přístroj s označením C.A6541 s rozsahem 0-4 T Ω a nastavitelným zkušebním napětím 50 V, 100 V, 250 V, 500 V nebo 1000 V (v našem případě bylo používáno nejvyšší jmenované zkušební napětí). Hodnoty jsou zobrazeny na LED displeji s rozlišením 4 $\frac{3}{4}$ (3999 digitů), pro nejvyšší nastavený rozsah 4 T Ω je tedy rozlišení 1 G Ω a přesnost $\pm(15\%rdg+10dgt)$. Přístroj je napájen z 8x baterie 1,5V-LR14.



Obrázek 4 – měřič izolačního odporu C.A6541 (výrobce Chavin Arnoux)

1.4 Průběh měření

1.4.1 Seznámení s měřicím plánem

V první fázi jsme prováděli kontrolní měření pouze na navinutých a naimpregnovaných statorových svazcích a v čase 20 s po spuštění měřiče izolace, abychom vůbec získali představu, jakých hodnot izolační odpor může nabývat. Následně jsme svazky nechali zalisovat do hliníkové kostry s přilítnými patkami a opět provedli měření, nyní již v různých časech od spuštění měřiče, konkrétně 15 s, 20 s, 30 s, 60 s, abychom mohli sledovat a vyhodnotit jak se izolační odpor vyvíjí v čase. Pro měření mezi fázemi U-V a fáze U proti kostře jsme dále měřili i v časech 180 s, 300 s a 600 s pro zjištění polarizačního indexu PI_{600} , který bude popsán v kapitole níže. Stejným způsobem jsme měření opakovali po dokončení všech motorů (navinutý svazek v kostře i s rotorem a hřídelí, štíty a svorkovnicí) a pro porovnání se dvěma typy svorkovnice. V poslední fázi jsme za pomoci klimakomory simulovali odlišné klimatické podmínky od našich běžných, naprogramovali jsme například ustálenou hodnotu teploty $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ a relativní vlhkosti 70 % a tyto udržovali po dobu 164 hodin. Po skončení cyklu jsme motory vyndali, přibližně hodinu nechali chládnout a provedli shodná měření s příslušným vyhodnocením.

1.4.2 Podmínky měření a pracovní prostředí

Z důvodu zajištění správnosti a alespoň částečné reprodukovatelnosti výsledků je vhodné udržovat při měření pokud možno konstantní podmínky, především co se týká teploty a okolní vlhkosti. Dále je nutné se vyhnout různým dalším rušivým elementům, jako například prudkému závanu větru při otevření dveří a v neposlední řadě také neovlivňovat proces otřesy nebo saháním na měřicí vodiče a měřený objekt v průběhu samotného měření. Všechny tyto příčiny mohou mít za následek vznik velkých nepřesností a náhlých výkyvů hodnot izolačního odporu v čase, o čemž jsme se mohli osobně přesvědčit. Naše měření proběhlo na čistém pracovním stole umístěném ve vytápěné průmyslové hale s udržováním pokojové teploty, tedy můžeme konstatovat, že podmínky byly vyhovující [3].

2 VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ

2.1 Základní požadavky na izolaci

Kvalitu izolačního systému lze posoudit jednak přímo na základě naměřené hodnoty izolačního odporu (je-li hodnota dostatečná pro podmínky, ve kterých bude motor pracovat) a dále na základě tvaru absorpční charakteristiky. Jedná se o závislost velikosti izolačního odporu na době připojení měřicího napětí, které by mělo být v průběhu měření konstantní (dovolená odchylka $\pm 0,1\%$).

$$R_i = f(t) \text{ při } U_m = \text{konst.}$$

Izolační systém musí být suchý a čistý, v bezvadném stavu bude absorpční charakteristika stoupat rychleji než pokud by izolace byla na některém místě porušena. Proud, který protéká izolací se skládá ze tří složek [2]:

- kapacitní – složka nabíjecího proudu, která po připojení měřiče izolace zanikne během několika sekund
- absorpční – je způsobena nehomogenitou jednotlivých vrstev izolace, dochází k polarizaci dielektrika, postupně zaniká během několika minut až hodin
- svodová – stálá složka proudu

Počáteční odpor je v čase $t=0$ (ihned po připojení a spuštění měřiče izolace) nižší, ale postupně roste právě díky poklesu absorpční složky proudu.

2.1.1 Indexy

Dalším z ukazatelů kvality izolace je tzv. polarizační index. Vyjadřuje se obecně jako poměr dvou hodnot izolačního odporu naměřených v určitých časech od zapnutí měřiče, jedná se o bezrozměrnou veličinu. Velká výhoda oproti posuzování izolace jen podle odporu je v tom, že tento index nezávisí na rozměrech izolačního systému. V technické praxi se uznávají dvě varianty, první je původem ze Spojených států a vypočítá se podle vztahu

$$PI_{600} = \frac{R_{t600}}{R_{t60}} [-]$$

kde se jedná o podíl hodnot v časech 600 s ku 60 s. Druhá možnost pochází ze Sovětského svazu, v tomto případě zjistíme index podílem v časech 60 s ku 15 s.

$$PI_{60} = \frac{R_{t60}}{R_{t15}} [-]$$

Další možností pro charakterizování stavu izolace je výpočet tzv. dielektrického absorpčního indexu, což není nic jiného než opět poměr odporů, ale měřených v čase 60 s a 30 s [2].

$$DAR = \frac{R_{t60}}{R_{t30}} [-]$$

Poznámka: Tyto vztahy byly převzaty z [2].

Takto vypočtené indexy napovídají o kvalitě izolačního systému – viz. následující tabulka se slovním ohodnocením.

Tabulka 1 – Vyhodnocení izolace dle indexů (převzato z [5])

PI ₆₀₀ [-]	DAR [-]	stav izolace
<1	<1,25	neadekvátní, dokonce nebezpečí
<2		
<4	<1,6	dobrý
>4	>1,6	vynikající

2.1.2 Výpočet izolačního odporu

Na základě normy ČSN 35 0000 – Točivé elektrické stroje, Část 1-1: Doplnující požadavky, kapitola 4.3 lze vypočítat hodnotu minimálního izolačního odporu, které musí mít vinutí v teplém stavu navzájem mezi sebou a proti kostře. Norma byla vydána v červenci roku 1997.

$$R_i = \frac{U_N}{\frac{P_N}{100} + 1000} \text{ [M}\Omega\text{]}$$

kde U_N je jmenovité napětí ve voltech a P_N jmenovitý výkon motoru v kW. Pro stroje ve studeném stavu platí, že izolace musí mít minimálně pětinásobek vypočteného R_i [6].

2.2 Srovnání výrobců

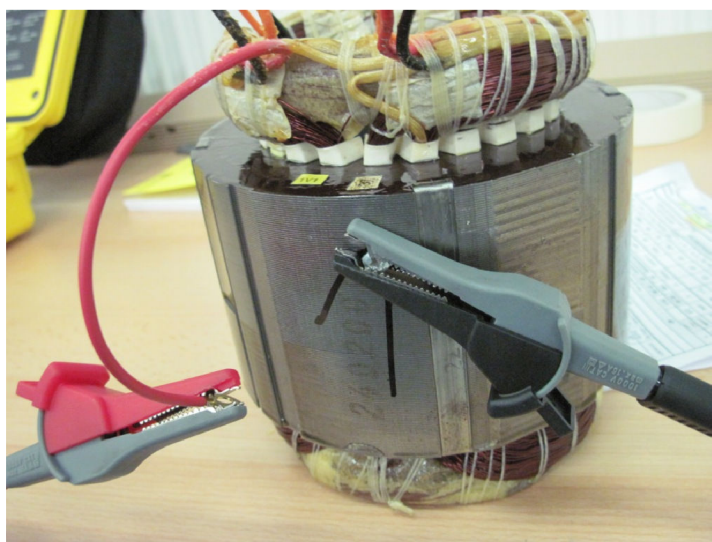
Katalogy různých výrobců asynchronních elektromotorů s kotvou nakrátko povětšinou neuvádějí přímo konkrétní hodnoty izolačních odporů, ale spíše udávají, pro jakou třídu izolace je izolační systém navržen. Nahlédli jsme do katalogů společností Siemens a Leroy Somer, což jsou jedni z nejvýznamnější výrobců elektromotorů na světě. Motory podobné rozměrům a parametrům našich měřených strojů většinou pro běžné použití v našich klimatických podmínkách spadají stejně jako tyto motory do třídy F, která má udanou mezní teplotu 155 °C. Jedná se v podstatě o maximální teplotu, do které jsou izolanty schopné zajistit dostatečný izolační stav a zároveň splnit podmínku, že naměřený odpor bude vyšší nebo alespoň roven minimálnímu vypočtenému dle kapitoly 2.1.2. Při okolních teplotách vyšších než mezních pro danou třídu hrozí zničení izolace a tím celého motoru [7],[8].

2.3 Jednotlivé měřené části

Bylo proměřeno všech 6 motorů ve srovnatelných podmínkách, z důvodu přehledné prezentace výsledků budou pro většinu měřených částí v této práci uváděny hodnoty a průběhy pouze pro motory č.1 a č.4, toto nám plně postačuje pro porovnání dvou druhů izolačního systému. Kompletní tabulky (všechny motory, všechny kombinace fází) budou uvedeny jako příloha této práce zvlášť v souboru.

2.3.1 Navinuté statorové svazky

Pro každý měřený motor je zaznamenána teplota, relativní vlhkost vzduchu a hodnoty izolačního odporu, který byl změřen jednak mezi každými dvěma fázemi, a také mezi každou fází vinutí a kostrou. Protože uchycení svorky bylo v této fázi dost problematické, byl pro vyloučení možných parazitních faktorů (zbytkový lak, malý kontaktní přitlak), které by mohly způsobit významné nepřesnosti, do statorových plechů vyvrtán otvor a do něj závit, aby mohlo proběhnout porovnávací měření odporu fáze-kostra nově přes doplněný šroub uchycený v otvoru.



Obrázek 5 – měření na navinutém svazku, odpor fáze-kostra přes kontaktní šroub

Tabulka 2 – Měření izolačního odporu na navinutých statorových svazcích

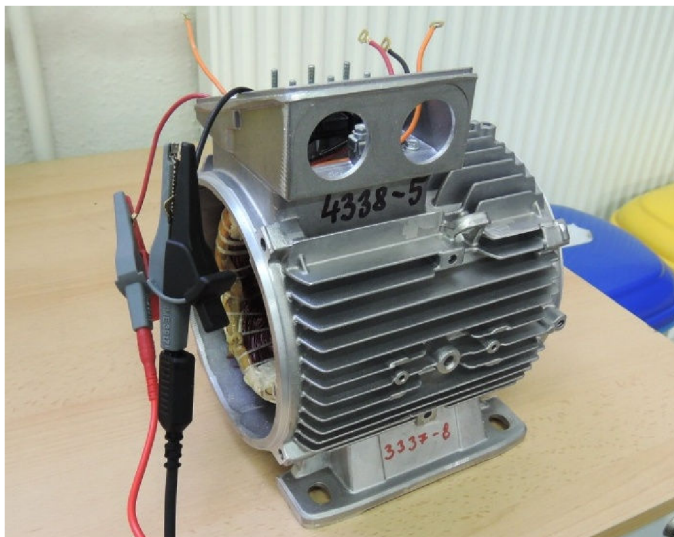
č.motoru	ϑ [°C]	φ [%]	R_i [G Ω]					
			U-V	U-W	V-W	U-k	V-k	W-k
1	21,7	55	1180	900	780	1240	1410	1140
2	21,6	54	1570	1150	1060	1280	1130	1190
3	21,5	53	1220	1000	940	1610	1390	1400
4	21,8	52	620	590	560	530	540	520
5	22,0	52	1240	1110	980	1270	1050	1150
6	21,9	52	780	700	650	550	540	510

Poznámka: pro všechny hodnoty - měřicí napětí nastavené 1000 V, skutečné 1024 V
- odečteno z displeje v čase 20 s od zapnutí m.p.

Z výše uvedených záznamů v tabulce vyplývá, že hodnoty teplot a vlhkostí se téměř nemění, lze je tedy pro toto měření považovat za konstantní. Zjištěné izolační odpory se pohybují ve velmi vysokých hodnotách, řádově stovky až tisíce gigaohmů. Zajímavostí bezesporu je, že u motorů s jednonásobnou izolací (č.1,2,3) byl obecně odečten větší odpor než u motorů s izolací dvojnásobnou (č.4,5,6).

2.3.2 Svazky zalisované do kostry

Pro následné měření se svazky vrátily zpět do výroby, kde proběhlo jejich zalisování do hliníkových koster s přilítnými patkami. Pro toto měření již byl izolační odpor zaznamenáván v různých časech od spuštění měřiče izolace, abychom mohli sledovat, jak se vyvíjí v čase a byli schopni vykreslit grafický průběh a vypočítat polarizační indexy. Porovnáme nyní motory č.1 a 4., konkrétně mezi fázemi U a V a dále fází U a klostrou. Teplotu i vlhkost se snažíme držet konstantní.

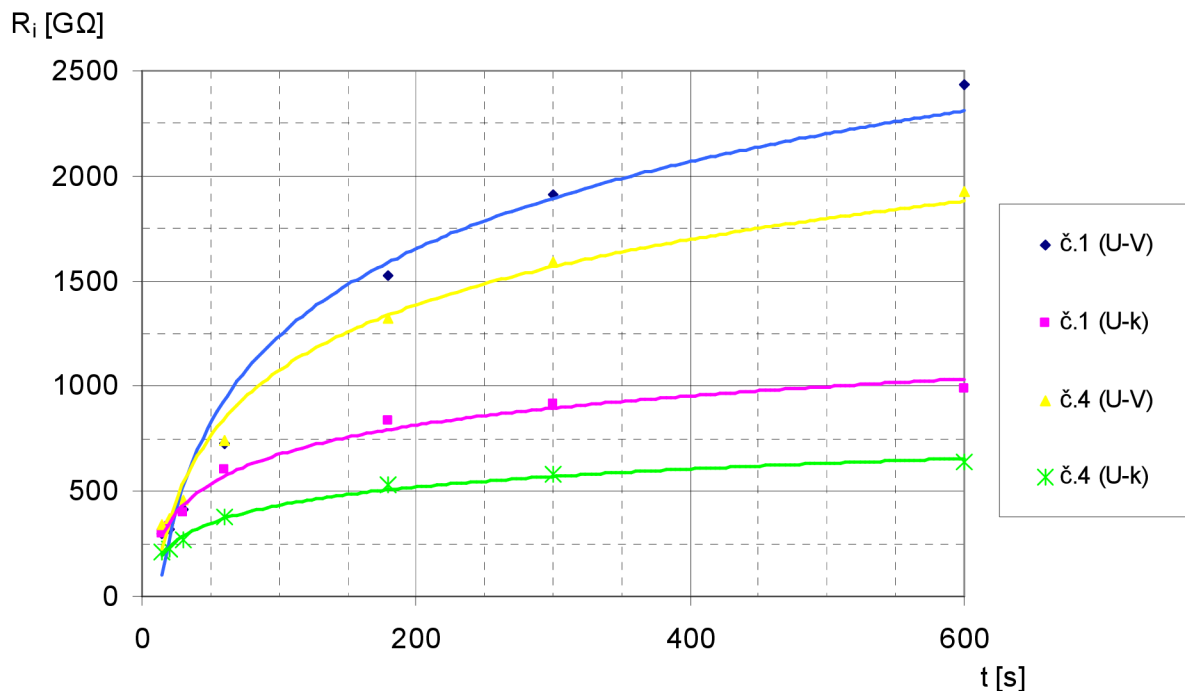


Obrázek 6 – měření na svazku zalisovaném v hliníkové kostře

Tabulka 3 – Měření izolačního odporu na svazcích zalisovaných v kostře (č.1 a č.4)

č.motoru	ϑ [°C]	φ [%]	t [s]	R_i [G Ω]	
				U-V	U-k
1	21,6	48	15	295	301
			20	323	332
			30	414	401
			60	726	605
			180	1525	837
			300	1911	914
			600	2437	986
vypočítané indexy			PI_{60} [-]	2,46	2,01
			DAR [-]	1,75	1,51
			PI_{600} [-]	3,36	1,63
4	20,8	47	15	340	208
			20	368	223
			30	456	268
			60	740	379
			180	1322	527
			300	1590	579
			600	1928	636
vypočítané indexy			PI_{60} [-]	2,18	1,82
			DAR [-]	1,62	1,41
			PI_{600} [-]	2,61	1,68

Poznámka: pro všechny hodnoty - měřicí napětí nastavené 1000 V, skutečné 1024 V



Obrázek 7 – průběhy izolačních odporů v čase mezi fázemi U-V a mezi fází U a kostrou pro svazky zalisované v kostře

Z tabulky i grafického průběhu můžeme pozorovat, že u obou vybraných svazků je izolační odpor mezi fázemi vyšší než mezi fází a kostrou. Dalším dílčím závěrem je to, že pro jednonásobnou izolaci je vyšší odpor než pro dvojnásobnou, stejně jako tomu bylo v případě měření čistě jen svazků (kapitola 2.2.1). Tomu odpovídají i vypočtené polarizační indexy a index dielektrické absorpce, kdy pro měření mezi fázemi jsou vždy vyšší hodnoty. Tyto pravidla platí obecně pro všechny měřené svazky. Zjištěná teplota i vlhkost odpovídají normálním podmínkám okolí v našem podnebí.

2.3.3 Dokompletované motory s otevřenou skříní svorkovnice

Měření a vyhodnocování na kompletních vyrobených motorech proběhla postupně ve třech variantách v tomto pořadí:

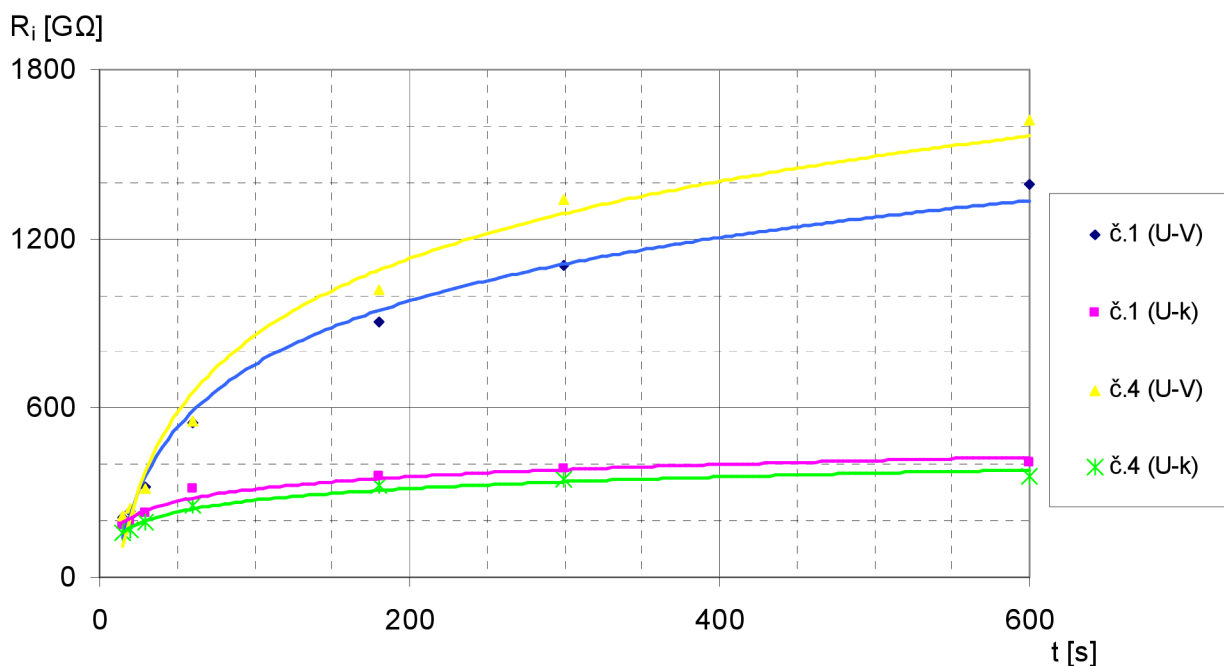
1. vodiče nebyly na svorkovnici připojeny
2. vodiče připojeny k „černé“ svorkovnici
3. vodiče připojeny k „bílé“ svorkovnici

V prvním případě jsme chtěli prověřit, jak se izolační odpor na motoru bude vyvíjet, když budeme měřit přímo na vinutí jako doposud bez svorkovnice (abychom mohli vyloučit její vliv). Dvě varianty použitých svorkovnic pak slouží jednak pro samotné porovnání kvality jejich materiálů, ale především díky již kompletnímu zapojení nám dávají obraz o chování systému izolace v běžném provozu. Provedeme stejné porovnání jako v kapitole 2.3.2, nejprve pro motory bez svorkovnice dle bodu 1.

Tabulka 4 – Měření izolačního odporu na dokompletovaných motorech bez připojení vodičů na svorkovnici (č.1 a č.4)

č.motoru	ϑ [°C]	φ [%]	t [s]	R_i [G Ω]	
				U-V	U-k
1	20,7	52	15	213	187
			20	235	197
			30	318	229
			60	547	314
			180	903	360
			300	1104	387
			600	1394	404
vypočítané indexy			PI_{60} [-]	2,57	1,68
			DAR [-]	1,72	1,37
			PI_{600} [-]	2,55	1,29
4	21,0	51	15	217	156
			20	242	167
			30	315	195
			60	553	257
			180	1017	327
			300	1341	348
			600	1620	356
vypočítané indexy			PI_{60} [-]	2,55	1,65
			DAR [-]	1,76	1,32
			PI_{600} [-]	2,93	1,39

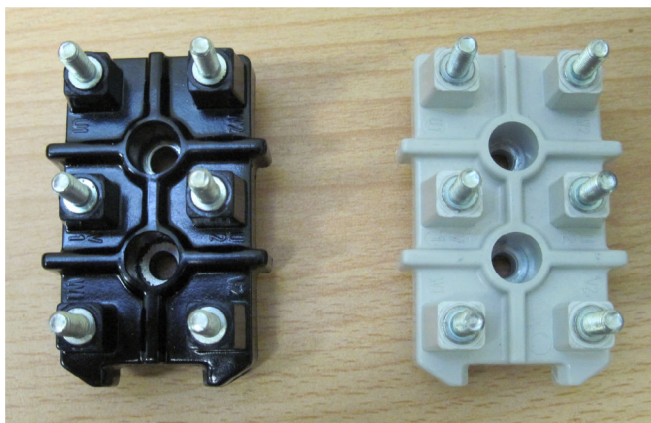
Poznámka: pro všechny hodnoty - měřicí napětí nastavené 1000 V, skutečné 1024 V



Obrázek 8 – průběhy izolačních odporů v čase mezi fázemi U-V a mezi fází U a kostrou u dokompletovaných motorů s nepřipojenými vodiči na svorkovnici

Z výsledků je zřejmé, že vlivem namontování štítů, rotoru a dalších částí motoru se izolační odpory celkově zmenšily - řádově o stovky GΩ. Z charakteristik si můžeme povšimnout mnohem rychlejší ustalování odporů fáze-kostra než v předchozím měření (kapitola 2.3.2), prakticky se dá říct, že po pěti minutách se již téměř nemění. Změnil se také stav u mezifázových odporů, nyní vykazuje dvojnásobná izolace lepší hodnoty než jednonásobná.

V další fázi jsme do svorkovnicových skříní namontovali nejprve „černou“ svorkovnici, která je vyrobena dle interního podnikového označení z materiálu *Bakelite-PF* (jedná se o reaktoplast), a po měření vyměnili za „bílé“ z materiálu nazvaného *Keripol UP 804*.



Obrázek 9 – černá svorkovnice (*Bakelite*) a bílá svorkovnice (*Keripol*)

Výsledky získané při měření černé svorkové desky jsou naprosto odlišné od dosavadních získaných. V následující tabulce jsou zaznamenány všechny motory z důvodu porovnání s měřeními po proběhlém cyklu v klimatické komoře – viz. kapitola 3.

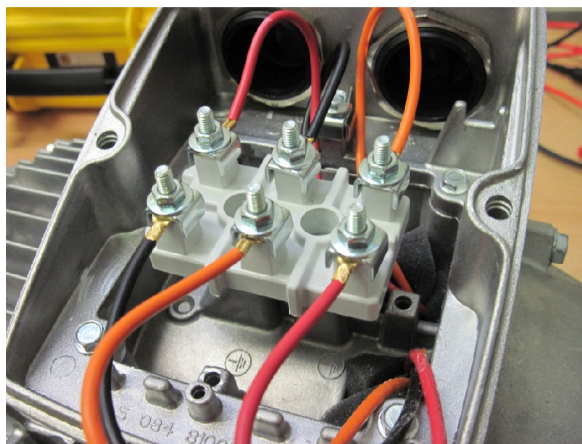
Tabulka 5 – Měření izolačního odporu na dokonpletovaných motorech s využitím černé svorkové desky

č.motoru	ϑ [°C]	φ [%]	R_i [MΩ]					
			U-V	U-W	V-W	U-k	V-k	W-k
1	20,7	51	690	683	707	747	884	843
2	20,8	50	767	792	781	763	878	871
3	21,1	51	1026	968	1128	3704	3841	3940
4	20,9	50	1164	1064	1100	1582	1692	1473
5	20,7	52	1195	1220	1144	1740	1869	1915
6	20,7	51	809	812	837	960	1103	1067

Poznámka: pro všechny hodnoty - měřicí napětí nastavené 1000 V, skutečné 1024 V
 - odečteno z displeje v čase 20 s od zapnutí m.p.

V první řadě je potřeba upozornit na rapidní pokles hodnot obecně pro všechna měření, izolační odpor klesl o několik řádů! Je vhodné upozornit, že současné hodnoty v tabulkách mají jednotku $M\Omega$, nikoliv $G\Omega$ jako tomu bylo v předchozích případech. Navíc po připojení a zapnutí měřiče izolace se odpor v čase v podstatě nevyvíjel, jeho hodnota zůstala téměř konstantní (měnila se pouze o pár jednotek $M\Omega$), z toho důvodu byl vždy zaznamenán výsledek jen pro čas 20s, další hodnoty by neměly pro tento bod smysl. Logicky proto ani není důvod se zabývat výpočtem indexů, jejich hodnota by se výrazně blížila k jedničce, což by dle *Tabulky 1* bylo vyhodnoceno jako havarijný stav izolace. Na základě získaných faktů můžeme konstatovat, že materiál použité svorkovnice velmi negativně ovlivňuje izolační schopnosti.

Oproti tomu využití bílé svorkové desky vykazuje výrazně lepší hodnoty.



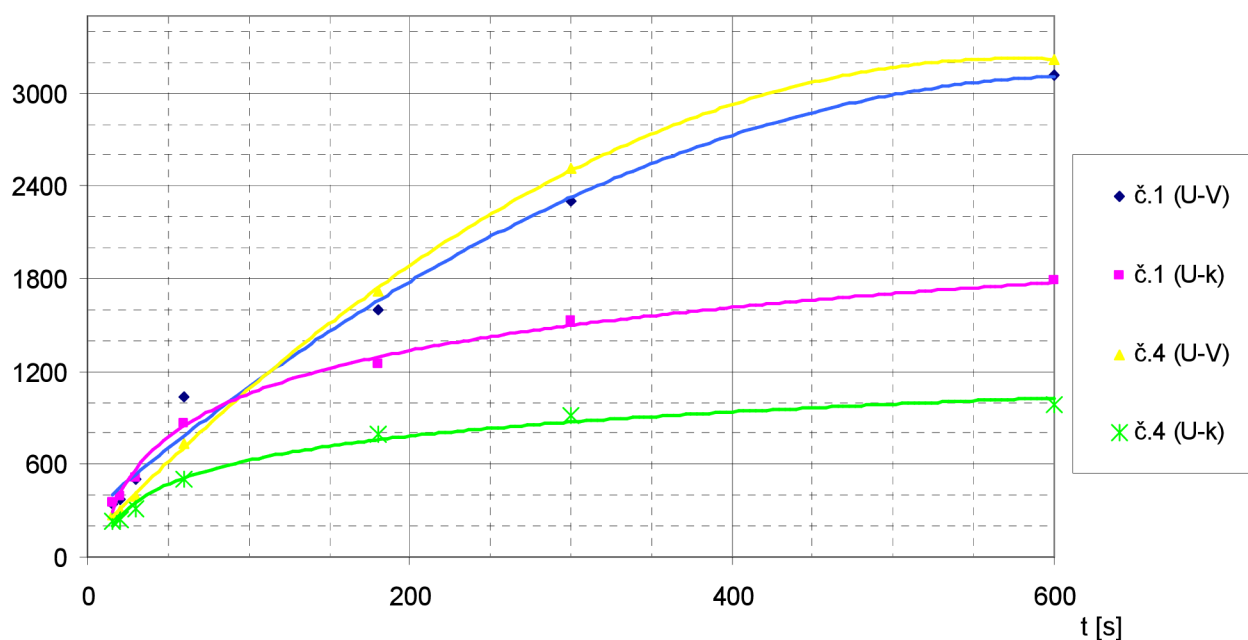
Obrázek 10 – svorkovnicová skříň s bílou svorkovnicí a připojenými vodiči

Tabulka 6 – Měření izolačního odporu na dokompletovaných motorech s připojením vodičů na bílou svorkovou desku (č.1 a č.4)

č.motoru	ϑ [°C]	φ [%]	t [s]	R_i [G Ω]	
				U-V	U-k
1	20,9	51	15	337	356
			20	373	394
			30	498	509
			60	1032	867
			180	1602	1250
			300	2306	1527
			600	3119	1790
vypočítané indexy			PI_{60} [-]	3,06	2,44
			DAR [-]	2,07	1,70
			PI_{600} [-]	3,02	2,06
4	20,9	51	15	272	229
			20	301	245
			30	392	312
			60	737	507
			180	1717	792
			300	2514	914
			600	3220	984
vypočítané indexy			PI_{60} [-]	2,71	2,21
			DAR [-]	1,88	1,63
			PI_{600} [-]	4,37	1,94

Poznámka: pro všechny hodnoty - měřící napětí nastavené 1000 V, skutečné 1024 V

R_i [G Ω]



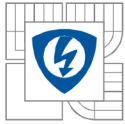
Obrázek 11 – průběhy izolačních odporů v čase mezi fázemi U-V a mezi fází U a kostrou u dokompletovaných motorů s vodiči připojenými na bílou na svorkovnici

Bílá svorkovnice jednoznačně zlepšila izolační stav ve srovnání s černou, hodnoty se pohybují opět v řádu stovek $G\Omega$ a je taktéž patrný nárůst odporu v čase, charakteristika dokonce stoupá výrazněji a dosahuje vyšších konečných hodnot než v případě měření volných vodičů bez využití svorkovnice. Mezi fázemi U a V jsme se dostali dokonce přes tři teraohmy pro oba motory. Pro motory č.2 a č.3 jsme ani nebyli schopni přesnou hodnotu zjistit, jelikož byla tak velká, že měřicí přístroj vykazoval překročení rozsahu ($>4 T\Omega$).



Obrázek 12 – indikace překročení rozsahu (naměřeno $>4 T\Omega$)

Vypočtené indexy dosahují nadprůměrných hodnot s přiřazeným slovním hodnocením výborných izolačních schopností.



3 VLIV KLIMATU, TEPLoty A VLHKOSTI NA IZOLACI

3.1 Klima, prostředí a další faktory

3.1.1 Podnebí - zemské pásy

Izolace může částečně nebo dokonce úplně ztratit způsobilost v případě, že pracuje v jiných klimatických podmínkách, než do kterých byla původně navrhována. Je potřeba mít to na paměti především při exportu elektrických strojů do různých zemí světa, kde jsou izolanty vystaveny naprosto odlišnému podnebí ve srovnání s podnebím České Republiky. Vzhledem k tomu, že v nejrůznějších oblastech naší planety panuje rozdílné podnebí, tak z praktického hlediska lze rozdělit zemský povrch na určité oblasti, které lze samostatně popsat určitými parametry, jež jsou pro danou skupinu typické. Na klasifikaci klimatu existuje více různých pohledů, hojně se užívá poměrně detailní klasifikace podle W. Köppena, která se zakládá na teplotním a srážkovém režimu a v podstatě definuje pět základních pásů:

- A –vlhké tropické klima
- B – suché klima
- C – mírně teplé klima
- D – mírně studené (boreální) klima
- E – polární (sněžné) klima

Tyto jsou dále členěny právě dle teplot a srážek na klimatické typy na základě ročního režimu:

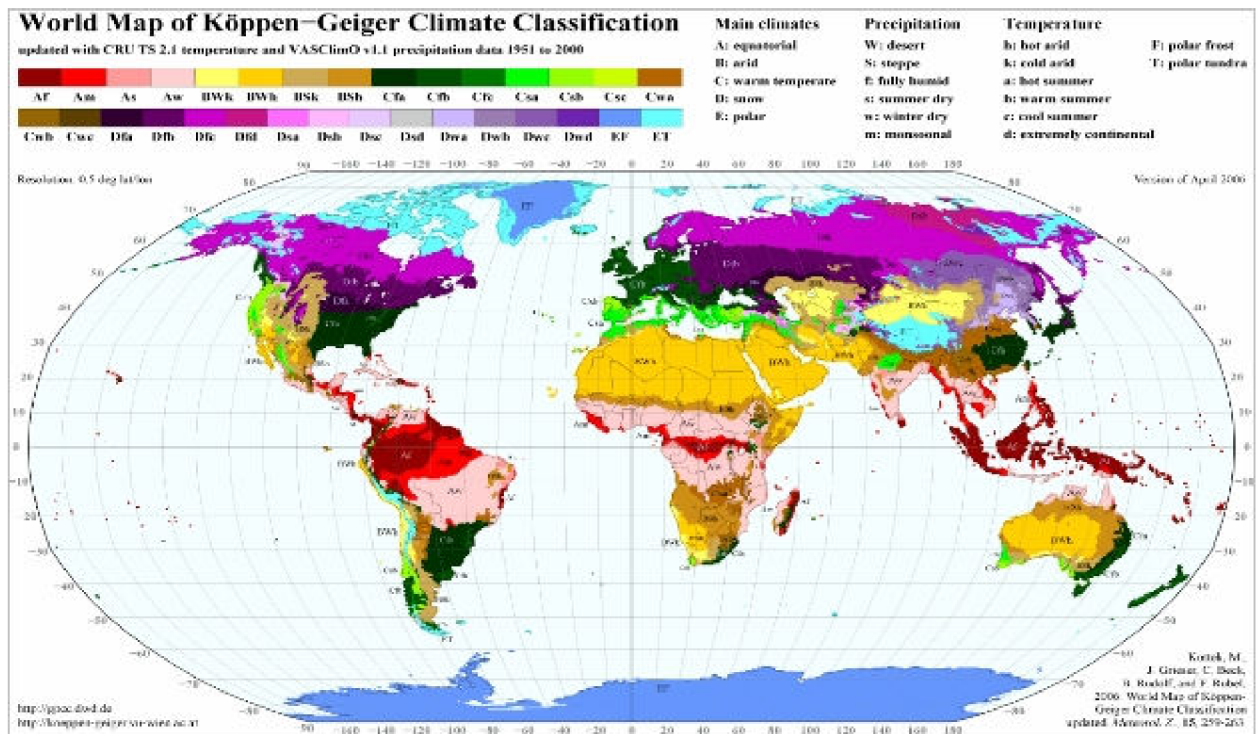
- W - poušť
- w – suchá zima
- f – rozložení srážek v roce je rovnoměrné
- m – periodické srážky (monzunové deště)
- s – suché léto
- S - stepi
- H – horské klima

Například označení Cw tedy znamená mírně teplé klima se suchou zimou. Na pevnině je nejvíce rozšířen typ Df (mírně studené klima a rovnoměrné zastoupení srážek) a Bs (suché klima vyznačující se suchým létem). Nejlépe je rozložení vidět na obrázku níže.

Další možný pohled na klasifikaci klimatu uvádí B.P.Alisov, který stanovil na každé polokouli čtyři hlavní (rovníkový, tropický, mírný a polární) pásy a tři přechodné pásy – subekvatoriální, subtropický, subarktický pás [11].

Co se týče oblasti mírného pásu, tak klimatické faktory nebudou dosahovat žádných extrémních hodnot. Oproti tomu v tropickém podnebí vlhkém se dá očekávat, že vliv vyšších teplot a především dlouhotrvající vysoké vlhkosti bude výrazně působit na izolační systém.

Takové parametry prostředí navíc poskytují uspokojivé podmínky pro vznik a vývoj mikroorganismů, které pak mohou přispívat k poškozování izolace, pokud tato není proti jejich napadení dostatečně ochráněna. V případě tropického deště je obrovským rizikem prudký pokles teplot u předmětů a částí, které byly slunečním zářením natolik vyhřáté, že nyní jejich teplota rychle klesne o několik desítek stupňů Celsia, což může například u pevných izolačních materiálů mít za následek jejich popraskání a tím celkovou degradaci.



Obrázek 13 – Köppenova klasifikace klimatu (převzato z [11])

Pokud to srovnáme s tropickým podnebím suchým, tak v něm budou přes den převažovat vysoké teploty vzduchu (s horní hranicí 50–60 °C), z důvodu velké intenzity slunečního záření, v kombinaci s nízkou vlhkostí, ale v noci mohou teploty klesnout o několik desítek stupňů, klidně až pod bod mrazu. Toto prostředí charakteristické pro pouště opět izolacím nesvědčí, také kvůli většímu množství poletujícího písku a prachu, kdy hrozí nebezpečí jejich usazení v nežádoucích místech stroje. Dále přímé sluneční záření o větší intenzitě je nebezpečné hlavně kvůli své dlouhověnné složce, která může způsobit výrazné oteplení (teplota v některých případech klidně překročí 100 °C), jehož velikost ovlivňuje barva povrchu spolu s jeho jakostí. Z toho důvodu je potřeba dopředu na uvedená rizika myslet, přizpůsobit se pracovnímu prostředí a zabránit zvýšenému nežádoucímu oteplení například tak, že příslušnému el. stroji nainstalujeme přídavné chlazení nebo snížíme výkon stroje a tím se zamezí zvýšenému oteplení, aby nebyla překročena maximální dovolená pracovní teplota [4].

Ke střídavému působení vyšších teplot vzduchu v kombinaci s větší vlhkostí dochází v subtropickém pásu. Studený pás je jednoznačně určen nízkými teplotami. Detailnější popis vlivů teplot a vlhkostí bude uveden v další podkapitole.

3.1.2 Pracovní prostor

Je důležité mít na zřeteli nejen celkovou klimatickou oblast, ale vzít v úvahu také místní mikroklima, ve kterém bude stroj konat práci. Dále se mnohdy zapomíná na konkrétní místo využití, kterými mohou být třeba uzavřené prostory, kdy dochází k značnému působení vlhkosti. Vodní páry se mohou dostat do míst, kde nedochází k dostatečné výměně vzduchu s vnějším prostředím a částečně se do některých materiálů mohou vsáknout. Během dne se totiž vevnitř začne srážet voda v případě, že okolní teplota prostředí bude vyšší jako vnitřní. To se obrátí naopak obvykle během noci, kdy bude již vnější teplota nižší a tedy díky vyššímu tlaku vodních par uvnitř sice vlhkost bude postupně klesat, ale vlivem špatné cirkulace vzduchu bude tento pokles pomalejší jako její předchozí nárůst. Z toho jednoznačně vyplývá, že uzavřené prostory jsou problematická místa a je potřeba zajistit jejich odvětrávání. Typickým příkladem mohou být různá nevětraná skladiště nebo přepravní prostory hlavně v případě lodní dopravy. Zejména pro elektrotechnické výrobky při zámořské přepravě je velmi důležité vhodně zvolit takový obalový materiál, který by dokázal zabránit průniku vlhkosti nad únosnou úroveň dovnitř stroje. Dále je možno použít vysoušedel, které dokáží přebytečnou vlhkost absorbovat.

3.1.3 Technická řešení

Kvalita zpracování elektrotechnických výrobků samotných také značně může napovědět o jejich životnosti. U elektromotorů a dalších strojů či měřicích přístrojů je velmi důležité, aby byly jejich kryty důkladně dotaženy dostatečným momentem případně byly hermeticky uzavřené, zapájené, zatmelované nebo zalité vrstvou laku atd., jinak nebezpečí průniku vlhkosti hrozí právě zde a na celkovou izolační schopnost má citelný vliv. Pokud chceme zamezit kondenzaci vodních par ve stroji, které pracuje v prostředí, jež je absolutně nasycené, lze to dosáhnout i mírným zvýšením teploty vzduchu přímo ve stroji, což způsobí pokles relativní vlhkosti a ke kondenzaci tak nedojde.

3.1.4 Impregnace

Základem pro správné fungování elektrického stroje je výběr vhodných izolačních materiálů, pro klima odlišné od našeho v ČR to platí několikanásobně. V případě využití bavlny nebo papíru (jedná se o materiály, které mohou lehce navlhnout) se nutně musí impregnovat a pokud víme, že pracovní prostředí motoru bude místním klimatem velmi ovlivněno (zvýšená nebo kolísající vlhkost), pak přistupujeme dokonce k několikanásobné impregnaci. Je třeba mít na paměti, že impregnace jako taková dokáže navlhnutí výrazně zpomalit, avšak nikdy jej úplně nelze zastavit. Do jaké míry bude izolovat, závisí na zvoleném materiálu impregnačního laku a také na jeho tloušťce a rovnoměrnosti impregnace [12].

3.1.5 Mikroorganismy

Vznik a rozvíjení různých plísní, případně bakterií, má za výsledek pokles vnitřního i povrchového odporu, který v krajním případě by mohl znamenat až průraz elektrického stroje. Při relativní vlhkosti nad 70 % a teplotě 20 – 40 °C mají plísně ideální podmínky pro svůj vývoj. Ty pak napadají především materiály na bázi celulózy (bavlna, papír, částečně laky atd.). Nejlepším

opatřením proti těmto mikroorganismům je dostatečné větrání. Dále je možné použít přísady do izolace – takzvané fungicidy. Ty sice zajistí, že plísně nebudou izolanty napadat, ale častokrát mají nepříznivé účinky na elektrické vlastnosti izolace a při vyšších teplotách se mohou rozkládat a vypřchat. Z toho důvodu je potřeba jejich použití důkladně promyslet a aplikovat je v malém množství [4].

3.1.6 Plazivé proudy

Bylo upozorováno, že u některých vylišovaných izolantů v případě jejich dlouhodobého vystavení vlhkému prostředí a přítomnosti nečistot dochází v povrchové vrstvičce k vodivému spojení mezi jednotlivými kovovými částmi, které jsou od sebe navzájem oddělené (mají různý potenciál). Vodivá dráha se nazývá plazivá stopa a má nepravidelně rozvětvený tvar. Tento jev byl později zaznamenán u různých dalších materiálů.

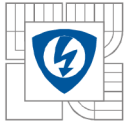
Pokud izolant není hydrofobní, tak dochází při zvýšené vlhkosti k usazování těchto nečistot. Povrchová vrstvička se stává elektrolyticky vodivou vlivem polárních látek v nečistotách. Teplo vzniklé průchodem proudu mezi kovovými částmi způsobuje vysušení – lokální snížení vlhkosti. Vzhledem k tomu, že materiál ani elektrické pole nejsou naprosto homogenní a množství usazených nečistot je na různých místech povrchu odlišné, proto dochází k rozdílně rychlému vysušování v jednotlivých bodech. Sušší místa znamenají vyšší odpor, vlhčejší naopak menší, vzniká mezi nimi velký úbytek napětí – v případě překročení elektrické pevnosti nastává výboj. Ten zapříčiní oteplení soustředěné do jednoho místa – v nejhorším případě může dojít až k tepelné destrukci izolantu [4].

3.2 Teplota

Teplota je jedna z nejdůležitějších veličin, které se sledují při technických měřeních obecně. Je potřebné znát její hodnotu pro správné vyhodnocení mikroklimatu. Existuje několik používaných stupnic, z nichž nejznámější a nejpoužívanější pro meteorologická měření je Celsiova stupnice. Využíváme ji i my při našem měření pro zjištění okolních podmínek.

Izolanty se změnou teploty mění své vlastnosti více či méně v závislosti na konkrétním využitém materiálu. Je třeba být při návrhu vhodného materiálu seznámen s jejich vlastnostmi v celém rozsahu teplot, ve kterých by mohl elektromotor pracovat. Nutno brát v úvahu nejen nízkou či vysokou teplotu okolního prostředí, ale nesmí se také zapomínat na zvýšení teploty způsobené ztrátami elektrické energie ve vodičích vlivem průchodu elektrického proudu. O tyto ztráty je důležité se zajímat i z ekonomického pohledu.

Dá se volně definovat tzv. krátkodobá tepelná odolnost – jedná se o maximální teplotu, kterou může izolace nabýt, tak aby při přechodných změnách zůstala zachována její funkce a nedošlo k ohrožení bezpečnosti. Trvalá tepelná odolnost pak značí rezistenci vůči tepelnému stárnutí. Za pomoci těchto důležitých hodnot se zavedlo třídění izolací do jednotlivých tříd právě dle trvalé tepelné odolnosti. Na základě předchozích zkušeností, důsledným a dlouhodobým zkoušením se vytvořilo následující rozdělení [13]:



Tabulka 7 – Rozdělení izolanů do tepelných tříd

Třída	Mezní teplota [°C]	Izolant /charakteristika
Y	< 90	organické látky neimpregnované (papír, bavlna..)
A	< 105	bavlna, papír, hedvábí – vhodně impregnované nebo lakované
E	< 120	látky, u kterých se experimentálně zjistila schopnost pracovat při teplotě o 15°C vyšší než u třídy A
B	< 130	skelná vlákna, slída, azbest atd.
F	< 155	skelná vlákna, slída, azbest v kombinaci s vhodnými pojivy
H	< 180	různé silikonové elastomery, dále kombinace jako slída, azbest / silikonové živice
C	> 180	sklo, porcelán i v kombinaci s anorganickými pojivy

Poznámka: Při sestavování rozdělení se vycházelo z hlavních tříd A a B, jejichž definované mezní teploty se po mnoho let dříve uznávaly a užívaly po celém světě.

Tepelná odolnost izolace nám bude omezovat maximální možnou pracovní teplotu celého motoru. Celý proces poklesu izolačních schopností izolanů má samozřejmě spojitost s jejich strukturou. Ve většině případů při nárůstu teploty okolí se zvýší kinetická energie molekul a může docházet k různým chemickým reakcím, plastické hmoty budou měknout, klesá jejich modul pružnosti a tím se sníží mechanická pevnost. Riziko poškození pak úměrně teplotě stoupá, například vrstvu laku lze při dostatečně vysoké teplotě poměrně lehce promáčknout. Další zvýšení teploty by mohlo způsobit až roztavení látky, která tak přejde do kapalného skupenství. V tomto stavu se izolační hmota začne více odpařovat díky poklesu viskozity, tím dojde ke snížení elektrického odporu a zároveň celkové elektrické pevnosti, protože narůstá ztrátový činitel a relativní permitivita materiálu.

Pokud dojde naopak k poklesu teploty, vznikají jiné problematické jevy. Viskozita sice bude narůstat, spolu s ní také elektrický odpor izolace, pevnost hmot bude taktéž stoupat, ale kvůli snižování tažnosti při tvrdnutí budou křehké, a to znamená mnohem náchylnější k mechanickému poškození, které v těchto případech bývá nevratné – např. lámání. V případě, že by k takovému poškození došlo, může izolační systém dosáhnout havarijního stavu.

Chemické reakce probíhají neustále i při pokojové teplotě, jsou však velice pomalé, proto v dohledném čase na první pohled nejsme schopni vysledovat žádné změny izolanu. Avšak při zvýšení teploty vzroste v molekulách energie, která znamená urychlení probíhajících reakcí. Významné jsou reakce s kyslíkem, který je přirozenou součástí okolního vzduchu a někdy také izolanu samotného. Oxidační reakce způsobují stárnutí hlavně u laků, olejů a obecně u materiálů na bázi celulózy, jako je papír. Doba životnosti resp. rychlost stárnutí závisí nejen na velikosti

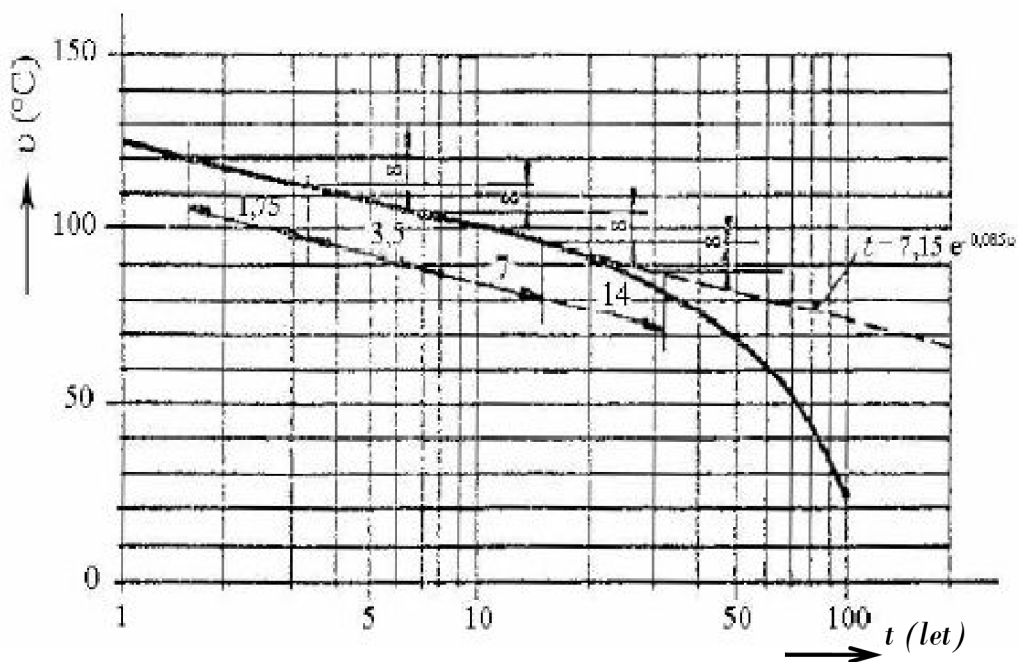
teploty, ale také v jaké míře se kyslík k izolaci dostane a samozřejmě na druhu samotného použitého izolantu. Životnost lze prodloužit několika metodami, první je zmenšení styčného povrchu izolantu se vzduchem. Další možností je použití antioxidantu, který na sebe vlastně naváže kyslík. Tady je nevýhodou, že antioxidant se časem spotřebuje a pouze tím oddálí oxidační pochody. Nejúčinněji se jeví hermetické uzavření a tím oddělení prostoru pro izolant od přístupu kyslíku nebo v tomto prostoru použít inertní plyn. Mimo oxidaci probíhají další nežádoucí jevy jako polykondenzace, polymerace, štěpení makromolekul a podobně.

Mimo chemické změny, které jsou nepochybně jedním z hlavních důvodů stárnutí izolace, také fyzikální změny se budou podílet na poškozování. Při zvýšené teplotě se například mohou vypařovat změkčovače, díky tomu dojde ke snížení jejich účinků a izolant začne nejen tvrdnout, ale zároveň s tím se bohužel stává křehčím a to zvyšuje nebezpečí popraskání. Dále je vhodné připomenout také možnost tepelné dilatace, kdy vlivem roztažení či smrštění materiálu dochází k nežádoucímu namáhání [4].

Existuje tzv. Montsingerovo pravidlo, jež se snaží co nejlépe popsat stárnutí izolace v závislosti na teplotě, které je tato vystavena. Na základě jeho pokusů, kdy na papírové izolaci zjišťoval její dobu života konkrétně v olejových transformátorech, se nakonec dospělo k empirickému vztahu:

$$\tau = A.e^{-b\vartheta} \text{ [let]} \quad (\text{převzato z [14]})$$

kde τ představuje hledanou dobu života, A je doba života při teplotě 0°C , b značí materiálovou konstantu a ϑ udává trvalou teplotu stárnutí. Toto pravidlo dalo dobrý základ pro další výzkumy stárnutí izolace, nelze však v žádném případě hovořit o obecné platnosti pro všechny izolační systémy a materiály, jednalo se o experiment na konkrétním případě, a proto je potřeba se na něj spíše dívat jako na orientační metodu určení doby života.



Obrázek 14 – Grafické znázornění Montsingerova pravidla stárnutí izolace (převzato z [14])

Při zahřátí izolantu se tím jemu dodá energie způsobující nárůst reakční rychlosti, takový možný popis uvádí Arrheniova rovnice:

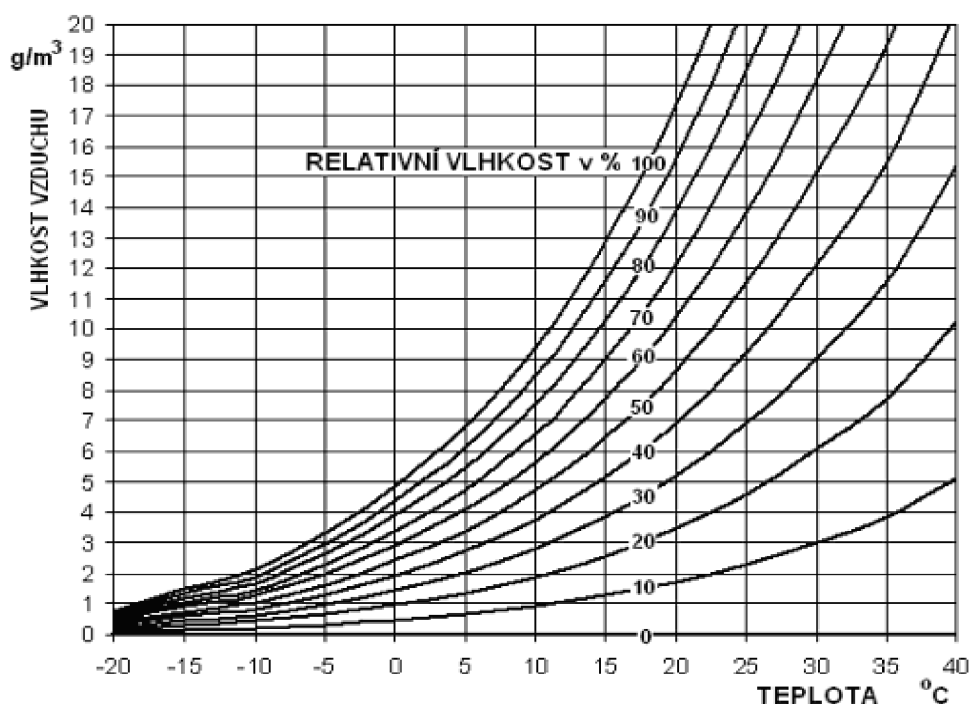
$$t = K \cdot e^{\frac{E_a}{R \cdot T}} \text{ [let]} \quad (\text{převzato z [14]})$$

kde t označuje dobu života, K pak kmitočtový faktor (ten závisí na počtu/pravděpodobnosti vzájemných srážek molekul za jednotku času), E_a aktivační energii, R je plynová konstanta a T je vyjádření termodynamické teploty [14].

3.3 Vlhkost

Tato veličina nám říká, jak moc je okolní vzduch nasycen vodní parou. Rozlišujeme tzv. absolutní (vyjadřuje v podstatě měrnou hmotnost vodní páry a má jednotku g/m^3) a relativní, ta se uvádí v procentech (je-li vzduch maximálně nasycen vodní parou, pak hodnota je 100 %, pokud v něm není obsažena vůbec žádná pára, zaznamenáme nulovou hodnotu). Vlhkost významně souvisí právě s teplotou, obecně čím bude teplota vzduchu vyšší, tím bude k jeho nasycení třeba více vodní páry. Dále platí, že v případě, kdy jí bude více než je třeba k naprostému nasycení vzduchu, bude kondenzovat [9].

Pro meteorologická měření je tato veličina jedním ze základních pilířů spolu s teplotou a okolním tlakem vzduchu. Vztah mezi teplotou, absolutní a relativní vlhkostí je nejlépe patrný z následujícího obrázku.



Obrázek 15 – diagram vztahu teploty, relativní vlhkosti a množství vody ve vzduchu (převzato z [10])

Elektrické vlastnosti se téměř u všech izolantů zhorší právě působením vlhkosti, ať už více či méně. Celé to je způsobeno snížením jak vnitřního, tak povrchového odporu a elektrické pevnosti zároveň. Naproti tomu porostou nežádoucí dielektrické ztráty a spolu s nimi také permitivita. Voda díky své velké relativní permitivitě $\varepsilon = 81$ je příčinou zvýšené elektrolytické vodivosti a

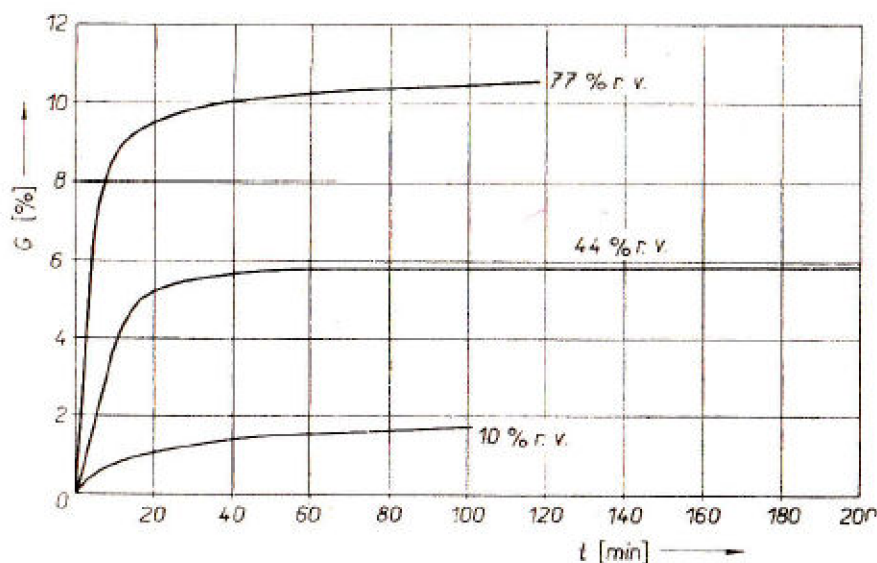
navíc způsobuje další disociaci molekul ostatních látek, což vlivem nově vzniklých iontů ještě více zvýší vodivost.

Samotná atmosféra, v níž se izolanty přirozeně umisťují, je nejdůležitějším zdrojem vlhkosti. Pokud dojde ke kontaktu vlhkého ovzduší s pevnou látkou můžeme rozlišovat dva děje – adsorpce vody (voda se hromadí na povrchu pevné látky) a její absorpce (vstřebání dovnitř). Adsorpce je způsobena vlivem působících sil mezi molekulami vody a izolantu. To se navenek nejprve projeví snížením povrchového odporu, toto snížení bude tím větší, čím více vzroste relativní vlhkost. Vzhledem ke skutečnosti, že na povrchu izolantu se vyskytují téměř vždy různé další nečistoty, tím více vzroste elektrolytická vodivost. Dalším problémem je nerovnoměrnost povrchu izolantu, nikdy se prakticky nepodaří vyrobit dokonale hladký materiál a pokud není zajištěn dostatečně kompaktní povrch, respektive jsou něm vidět póry nebo je vláknitý, pak dojde ke zhoršení nejen odporu povrchového, ale stejně tak vnitřního a další elektrických vlastností.

Voda, respektive její molekuly se přirozeně dostanou v určité míře i do struktury nepoškozených, kompaktních izolantů. V případě ustáleného stavu vrstvou izolantu projde množství par, jehož velikost se určí z rovnice:

$$Q = P.A.\frac{p_1 - p_2}{h}.t \text{ [g]} \quad (\text{převzato z [4]})$$

kde Q je množství par, P značí tzv. koeficient propustnosti (jedná se vlastně o množství, které projde jednotkovou plochou jednotkové hloubky za jednotku času a při jednotkovém rozdílu tlaků z obou stran vrstvy), h představuje hloubku izolantu, A pak plochu, p_1 a p_2 jsou tlaky vodních par na jedné a druhé straně vrstvy. Koeficient propustnosti se například u plastických hmot pohybuje v řádu 10^{-7} až 10^{-11} , což značí jednak poměrně velký rozptyl rychlostí průniku pro konkrétní materiály a také fakt, že vodní páry se poměrně málo v těchto hmotách rozpouštějí v porovnání s jinými. Na základě velikosti koeficientu je u některých izolačních hmot dlouhá doba k dosažení ustáleného stavu navlhnutí, u jiných naopak poměrně krátká. Na obrázku níže je uveden příklad pro kabelový papír, který ukazuje, jak navlhání (díky přijímání vlhkosti dojde k přírůstku hmoty) daného materiálu v čase závisí i na relativní vlhkosti vzduchu.



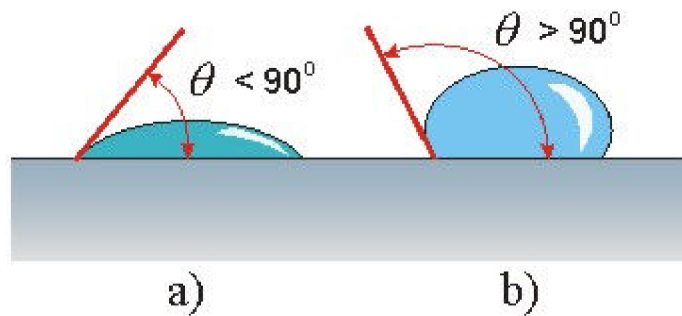
Obrázek 16 – průběh navlhnutí kabelového papíru v závislosti na čase uložení pro různé relativní vlhkosti vzduchu (převzato z [4])

Samotná rychlost průniku není konstantou, nýbrž se odvíjí od teploty, jedná se o exponenciální závislost:

$$P = P_0 \cdot e^{-E_p/R.T} \text{ [g.cm}^{-1}\text{.hod}^{-1}\text{.torr}^{-1}] \quad (\text{převzato z [4]})$$

kde P označuje zjišťovaný koeficient propustnosti charakterizující právě rychlost průniku, P_0 je konstanta pro daný materiál, R plynová konstanta, E_p vyjadřuje aktivační energii, T termodynamickou teplotu. Prakticky se pro plastické hmoty v průměru udává při nárůstu teploty o 10 °C přibližně zdvojnásobení hodnoty koeficientu P [4].

Dostane-li se izolant do styku s vodou, respektive nasycenou vodní parou kdy dochází ke kondenzaci, pak dalším rozhodujícím faktorem pro dostatečnou odolnost proti vodě je smáčivost, jejíž mírou je tzv. úhel smáčení. Pokud je menší než 90°, tak je látka hydrofilní, což značí, že vtahuje vodu silou povrchového napětí a kapka se postupně roztéká po povrchu. Naopak v případě velikosti >90° hovoříme o hydrofobní látce, kterou voda nesmáčí – dochází k rozdělování na menší kapky na povrchu.

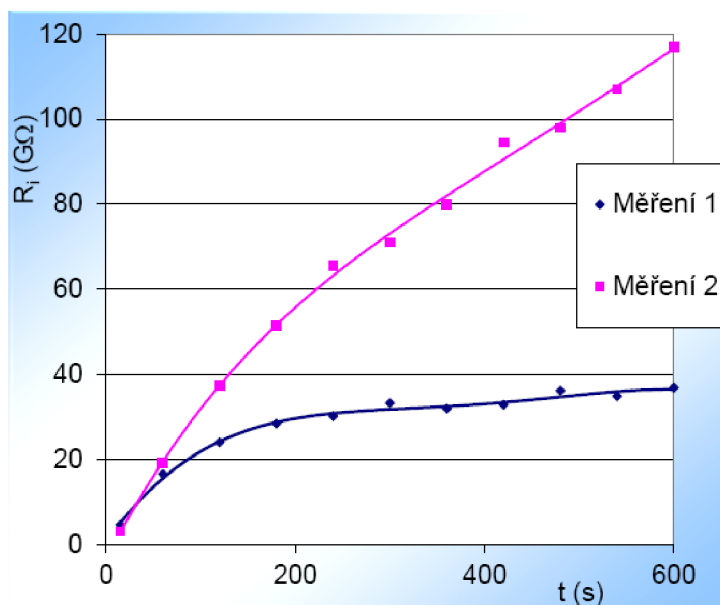


Obrázek 17 – příklady úhlu smáčení (převzato z [16])

Co se týče organických izolantů při styku s vodou, velmi dobré elektrické vlastnosti si udrží polytetrafluoretylén (PTFE), solidní pak polystyren, polyetylén a další nepolární látky, které jsou hydrofobní. K výraznějšímu snížení odolnosti vlivem velké smáčivosti dochází z plastů například u polyvinylchloridu (PVC), ještě znatelnější je pokles prakticky u všech materiálů na bázi celulózy – papíru, bavlny, dřeva atd. U anorganických materiálů jako jsou slída, porcelán a sklo je obecně velmi dobrá odolnost proti vodě. Horší je to s azbestem a jinými nekompaktními látkami [15].

Proces navlhání lze do určité míry zpomalit, nikdy se však úplně nedá zastavit. Vhodnými úpravami povrchu, především impregnační případně lakováním se dá docílit dostatečné ochrany. Vlhkost působí negativně i díky látkám, jež jsou součástí struktury samotného izolantu od jeho vzniku, byly přidány ve výrobním procesu (mýdla, emulgátory a jiné). Je nutné věnovat pozornost také korozi kovových částí, zalisovaných do plastových izolantů. K ní by mohlo dojít uvolňováním a rozpouštěním nežádoucích látek z izolantu. Dalším možným důsledkem je změna tvarů a objemu vlivem přijímání nadměrného množství vody.

Pro izolace pak v zásadě platí: zvýší-li se vlhkost v izolačním systému, bude to mít za následek celkové snížení hodnot izolačních odporů. U navlhých izolací bude z absorpční charakteristiky evidentní pomalejší nárůst odporu v čase a mnohem dříve dojde k ustálení, než u suché a čisté izolace. Příkladem budiž následující graf, kde měření 1 provedeno na navlhle izolaci a měření 2 na suché [2].

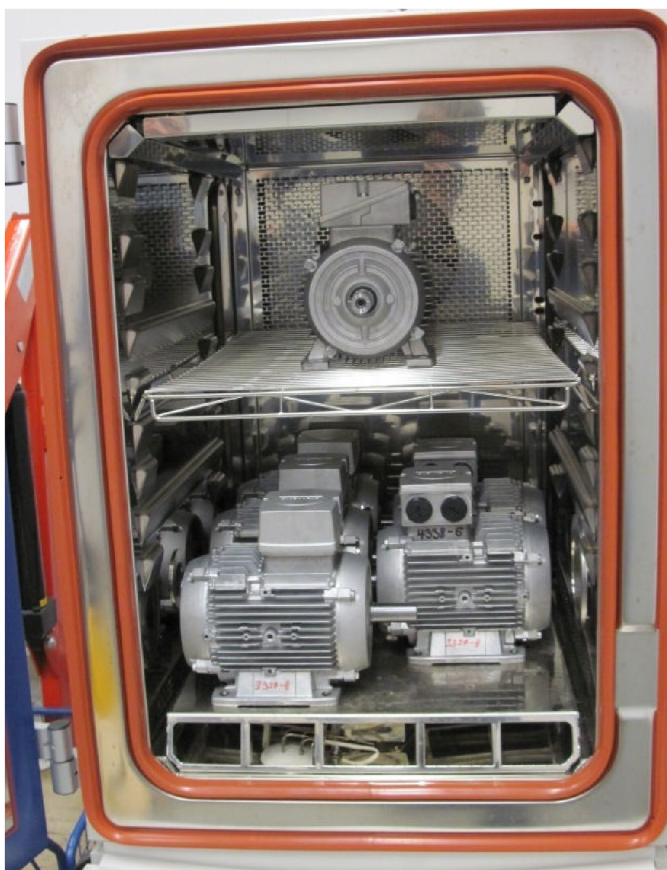


Obrázek 18 – příklad závislosti izolačních odporů pro navhlou (M1) a suchou izolaci (M2) (převzato z [2])

3.4 Klimatická komora

Slouží k naprogramování takových teplot a relativních vlhkostí, kterým chceme naše motory vystavit. Lze tak uvnitř napodobovat různé atmosférické podmínky, náhlé teplotní výkyvy v přírodě a podobně. Parametry, kterých bude dosaženo v aplikačním prostoru, si můžeme sami určit s ohledem na minimální a maximální možné hodnoty, které klimakomora zvládne.

My máme k dispozici typ WK3-340/70 od výrobce Weiss Umwelttechnik z Německa. Vnitřní prostor pro umístění měřených objektů má rozměry přibližně 0,6 m na šířku, 0,8 m na výšku a 0,8 m hloubku. Teplotní rozsah se pohybuje od -70 °C do 180 °C, nastavení vlhkosti možno teoreticky v rozmezí od 0 % do 100 %. V praxi se ovšem nikdy nepodaří prostor vysušit úplně, reálná spodní hranice pro naše umístěné motory je asi 20 %.



Obrázek 19 – motory umístěné v aplikačním prostoru klimatické komory WK3-340/70

3.5 Měření pro ověření vlivů

Abychom ověřili, zda se izolační odpor v praxi skutečně změní, rozhodli jsme se provést několik testů a naprogramovat klimatickou komoru pro simulaci různých prostředí v následujících variantách uvedených v tabulce (měníme teplotu prostředí, jeho vlhkost a nastavujeme dobu trvání cyklu).

Veškerá měření proběhla dle stejné metodiky jako v kapitole 2.3.3, ale v pořadí:

a) s černou svorkovou deskou (uvádíme veškeré naměřené hodnoty přímo, jelikož se hodnoty v čase prakticky vůbec nemění po žádném z následujících cyklů – výjimka pouze u zkoušky 100% relativní vlhkosti, odečítáme je v jednom zvoleném čase)

b) čistě na vinutí – svorková deska se odstranila (v rozboru výsledků práce jsou opět uvedeny pouze motory č.1 a 4, slouží pro porovnání dvou druhů izolačních systémů, ostatní data jsou k nahlédnutí v příloze).

S bílou svorkovou deskou se již dále nezkoušelo. Více bude popsáno v jednotlivých podkapitolách zvlášť.

Tabulka 8 – Přívodka pro jednotlivé cykly klimatické komory.

Podkapitola	Pracovní název	Parametry - ϑ , φ , t_k
3.5.1	Horké prostředí, s krytem svorkovnice	+60°C, 70%, 164 h
3.5.2	Mírné prostředí, s krytem svorkovnice	+6°C, 50%, 214 h
3.5.3	Chladné prostředí, s krytem svorkovnice	-30°C, 30%, 164 h
3.5.4	Horké prostředí, bez krytu svorkovnice	+60°C, 70%, 164 h
3.5.5	Mírné prostředí, bez krytu svorkovnice	+6°C, 50%, 164 h
3.5.6	Chladné prostředí, bez krytu svorkovnice	-30°C, 30%, 300 h
3.5.7	Absolutně vlhké prostředí, bez krytu svorkovnice	+40°C, 99%, 164 h
3.5.8	Ověřovací měření po vysoušení v peci	+80°C, -, 12 h (pozn. – vysoušecí cyklus)

Poznámka: Zkoušky proběhly v pořadí výše uvedeném, jak je z tabulky patrné, nejprve všechny tři varianty s krytem svorkové desky, až poté bez něj.

3.5.1 Horké prostředí, s krytem svorkovnice

Vysoká teplota zvolená v tomto cyklu může simulovat např. vystavení motoru přímému slunečnímu záření. Při kombinaci s vyšší vlhkostí si představme, že motory budou muset fungovat v subtropickém až tropickém prostředí.

a) s černou svorkovou deskou

Tabulka 9 – Měření izolačního odporu na motorech s využitím černé svorkové desky po simulaci horkého prostředí s krytem svorkovnice.

č.motoru	ϑ [°C]	φ [%]	R_i [M Ω]					
			U-V	U-W	V-W	U-k	V-k	W-k
1	24,7	36	118	199	196	172	148	157
2	24,8	37	170	170	196	348	434	414
3	24,9	36	201	205	202	255	265	264
4	24,8	36	133	143	166	154	194	203
5	24,6	35	129	140	151	132	163	172
6	24,7	37	200	219	217	213	244	254

Poznámka: pro všechny hodnoty - měřicí napětí nastavené 1000 V, skutečné 1024 V
- odečteno z displeje v čase 20 s od zapnutí m.p.

Po odstranění krytu svorkovnice nebylo patrné žádné mechanické poškození. Z výsledků je naprosto evidentní, že izolační odpor se v porovnání se shodným měřením v kapitole 2.3.3 pro dokompletované motory s černou svorkovnicovou deskou několikrát zmenšil ve všech případech. Největší rozdíly vlivem teploty a vlhkosti jsou vidět u motoru č.5, kdy jsme např. pro mezifázové hodnoty U-V dosahovali před použitím klimakomory hodnoty 1195 MΩ a nyní pouze 129 MΩ, to znamená pouhých 10,8 % původního izolačního odporu.

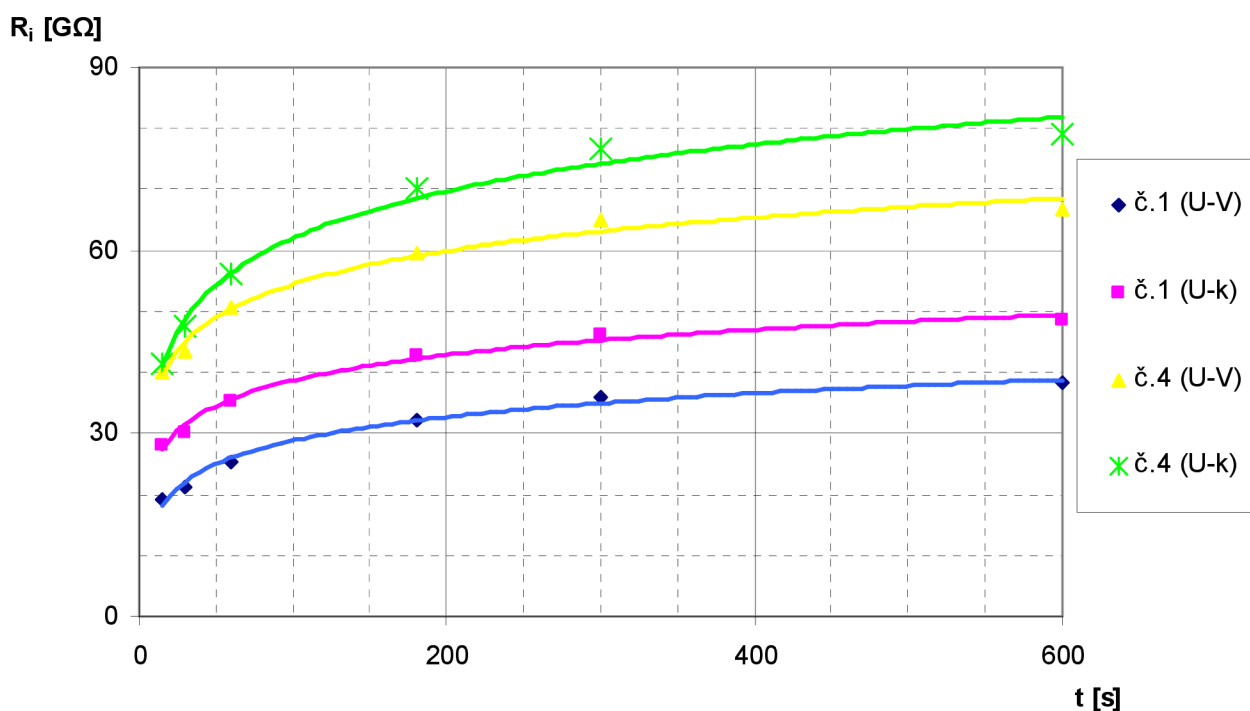
b) čistě na vinutí

Tabulka 10 – Měření izolačního odporu na motorech čistě na vinutí po simulaci horkého prostředí s krytem svorkovnice.

č.motoru	θ [°C]	φ [%]	t [s]	R_i [GΩ]	
				U-V	U-k
1	22,7	38	15	19,28	28,15
			30	21,12	30,21
			60	25,43	35,37
			180	32,02	42,7
			300	36,07	46,2
			600	38,42	48,7
vypočítané indexy			PI_{60} [-]	1,32	1,26
			DAR [-]	1,20	1,17
			PI_{600} [-]	1,51	1,38
4	22,6	38	15	39,97	41,3
			30	43,4	47,4
			60	50,8	56,0
			180	59,7	70,1
			300	65,1	76,8
			600	66,7	79,1
vypočítané indexy			PI_{60} [-]	1,27	1,36
			DAR [-]	1,17	1,18
			PI_{600} [-]	1,31	1,41

Poznámka: pro všechny hodnoty - měřicí napětí nastavené 1000 V, skutečné 1024 V

Jak vyčteme z tabulek a z grafu níže, hodnoty izolačního odporu se ve všech případech snížily řádově oproti shodnému měření provedenému před simulací v klimakomoře, je dosaženo desítek GΩ. V tomto případě vykazuje dvojnásobný izolační systém vyšší hodnoty. Vzhledem k faktu, že motor č.1 byl umístěn v horním patře v komoře a motor č.4 dole společně se všemi ostatními motory a navíc byl č.1 po otevření vytažen jako první, tak důvodem může být právě tento „teplotní šok“. Jelikož první motor zažil nejprudší změnu prostředí při vytahování, lze takto částečně vysvětlit nižší hodnoty. Povšimněme si také rychlejšího ustalování hodnot a z toho vyplývajících nižších indexů.



Obrázek 20 – průběhy izolačních odporů v čase mezi fázemi U-V a mezi fází U a kostrou při měření čistě na vinutí po simulaci horkého prostředí s krytem svorkovnice

3.5.2 Mírné prostředí, s krytem svorkovnice

Snahou bylo vytvořit prostředí mezi minimálním a maximálním extrémním stavem, určitý střed pro porovnání. Pod tímto si můžeme představit třeba větrané chladnější skladovací prostory, kde relativní vlhkost dosahuje hodnot charakteristických pro naše mírné prostředí.

a) s černou svorkovou deskou

Tabulka 11 – Měření izolačního odporu na motorech s využitím černé svorkové desky po simulaci mírného prostředí s krytem svorkovnice.

č.motoru	θ [°C]	φ [%]	R_i [MΩ]					
			U-V	U-W	V-W	U-k	V-k	W-k
1	25,1	38	679	619	634	845	987	921
2	24,9	39	602	535	592	1035	1202	1092
3	24,8	39	782	967	1134	1157	1258	1251
4	25,0	38	495	469	501	608	714	663
5	25,1	37	383	368	392	453	526	487
6	24,8	38	758	730	722	915	965	925

Poznámka: pro všechny hodnoty - měřicí napětí nastavené 1000 V, skutečné 1024 V
- odečteno z displeje v čase 20 s od zapnutí m.p.

Všechny hodnoty několikrát vzrostly, přibližně 3-5krát, porovnáme-li je s předchozím „horkým stavem“. Dále motory s jednonásobnou izolací dosahují v některých případech opětovně vyšších hodnot odporů, navíc všechny mezifázové hodnoty jsou obecně nižší než fáze-kostra. Z pohledu výsledků bychom nejlepší izolační stav prohlásili u č.2 a č.3. Velký vliv na významné zvýšení hodnot má nejen pro izolanty příznivá teplota a vlhkost charakterizující mírné prostředí, ale i delší doba cyklu 214 hodin, po kterou se motory mohly „chladit“ a mikroklima tak v jednotlivých místech lépe sjednotit.

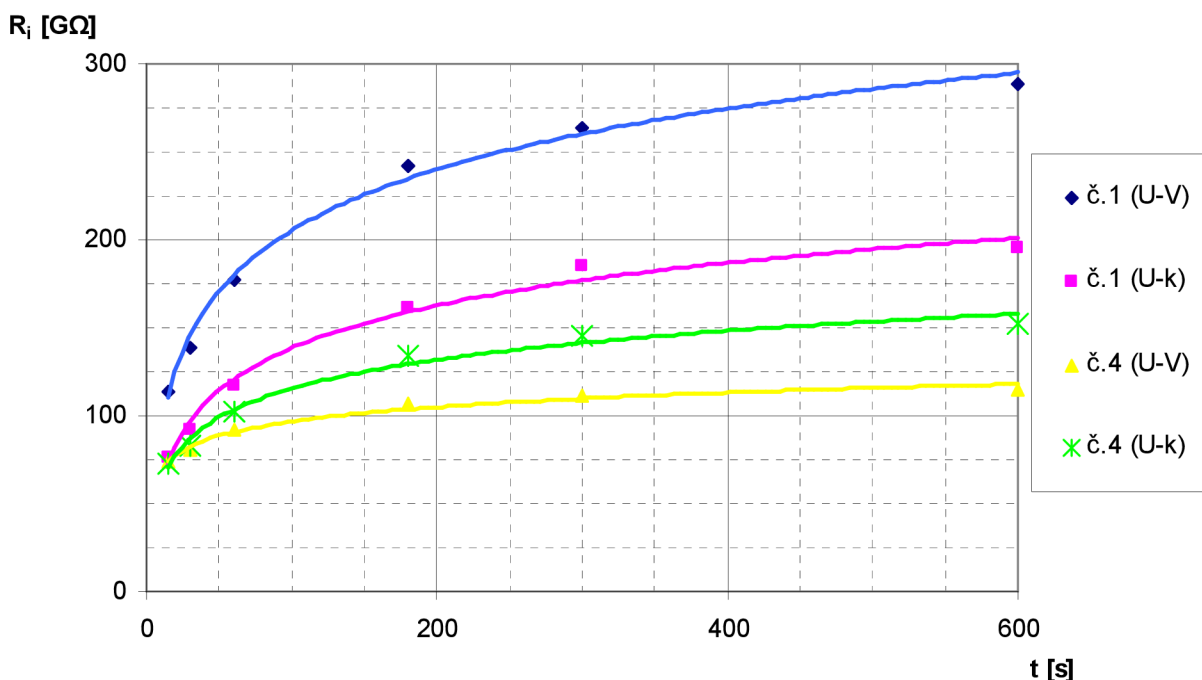
b) čistě na vinutí

Tabulka 12 – Měření izolačního odporu na motorech čistě na vinutí po simulaci mírného prostředí s krytem svorkovnice.

č.motoru	θ [°C]	φ [%]	t [s]	R_i [G Ω]	
				U-V	U-k
1	25,2	37	15	114,2	76,6
			30	138,4	91,5
			60	177,5	116,6
			180	242,2	161,4
			300	264,2	184,8
			600	288,9	195,6
vypočítané indexy			PI_{60} [-]	1,55	1,52
			DAR [-]	1,28	1,27
			PI_{600} [-]	1,63	1,68
4	24,6	36	15	73,8	72,2
			30	80,2	82,7
			60	92,1	102,2
			180	106,7	134,5
			300	111,2	145,1
			600	114,5	152,7
vypočítané indexy			PI_{60} [-]	1,25	1,42
			DAR [-]	1,15	1,24
			PI_{600} [-]	1,24	1,49

Poznámka: pro všechny hodnoty - měřicí napětí nastavené 1000 V, skutečné 1024 V

Hodnoty vzrostly na desítky až stovky G Ω , nejvyšší byly zjištěny u motorů č.1 a č.3, u těchto se v ustáleném stavu blíží odpor k hodnotě 300 G Ω . Z podobných důvodů jako v kap. 3.5.1 vykazuje první měřený motor odlišných hodnot, v tomto případě vyšších, kvůli možné lepší cirkulaci chladnějšího vzduchu v horním patře (motor je tam umístěn samostatně). Zlepšení oproti horkému prostředí je sice patrné, avšak nelze čekat, že výsledky měření izolace budou tak dobré jako před prvním cyklem v komoře. Z dosavadních výsledků lze usuzovat, že i přechodný nárůst teploty a vlhkosti (v našem případě týden v horkém prostředí) bude mít trvalý vliv na izolační schopnosti.



Obrázek 21 – průběhy izolačních odporů v čase mezi fázemi U-V a mezi fází U a kostrou při měření čistě na vinutí po simulaci mírného prostředí s krytem svorkovnice

3.5.3 Chladné prostředí, s krytem svorkovnice

Cílem je v této fázi zjistit, jak izolace bude reagovat při simulaci nižší teploty a vlhkosti, než je pro naše mírné prostředí typické. Nízká relativní vlhkost v kombinaci s výraznějším minusovou teplotou může představovat severské podmínky, jež jsou charakteristické například pro subarktický pás.

a) s černou svorkovou deskou

Tabulka 13 – Měření izolačního odporu na motorech s využitím černé svorkové desky po simulaci chladného prostředí s krytem svorkovnice.

č.motoru	θ [°C]	φ [%]	R_i [MΩ]					
			U-V	U-W	V-W	U-k	V-k	W-k
1	25,0	30	890	853	878	1100	1302	1220
2	24,9	30	930	914	853	1432	1265	1502
3	25,0	30	896	1082	1231	1306	1323	1437
4	25,2	29	561	541	560	854	957	912
5	25,1	29	504	479	506	656	743	694
6	24,9	30	874	836	789	1258	1324	1264

Poznámka: pro všechny hodnoty - měřicí napětí nastavené 1000 V, skutečné 1024 V
- odečteno z displeje v čase 20 s od zapnutí m.p.

Dá se vypořádat určitý nárůst oproti měření po simulaci „mírného prostředí“, ve většině případů o několik desítek, spíše stovek $M\Omega$. Vlivem snížení teploty a vlhkosti roste především izolační odpor i mechanická pevnost bakelitové svorkové desky, ale bohužel zároveň s tím klesá její plasticita a to se projevilo naprasknutím části při mechanické námaze (potřeba uvolnit vinutí ze svorkové desky odtažením šroubů pro měření čistě na vinutí). V tomto prostředí již destička zkrátka ztrácí své mechanické vlastnosti (je příliš křehká). Ty se opět zlepšují po zahřátí na vyšší teplotu, pak nebude k praskání tak náchylná.

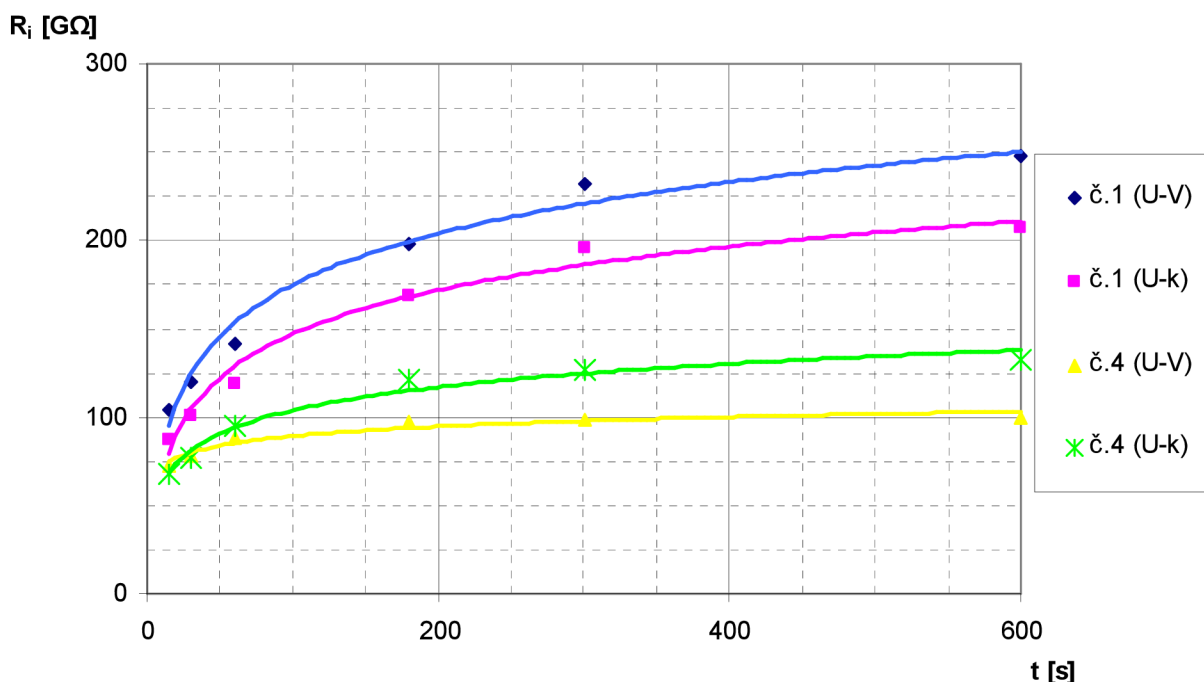
b) čistě na vinutí

Tabulka 14 – Měření izolačního odporu na motorech čistě na vinutí po simulaci chladného prostředí s krytem svorkovnice.

č.motoru	θ [°C]	φ [%]	t [s]	R_i [G Ω]	
				U-V	U-k
1	24,6	29	15	104,2	87,2
			30	120,4	100,5
			60	141,6	118,4
			180	197,7	168,3
			300	231,8	195,9
			600	247,9	207,7
vypočítané indexy		PI_{60} [-]	1,36	1,36	
		DAR [-]	1,18	1,18	
		PI_{600} [-]	1,75	1,75	
4	24,8	29	15	72,8	67,9
			30	78,2	77,1
			60	88,4	95,1
			180	97,1	121,5
			300	98,9	127,2
			600	99,4	132,0
vypočítané indexy		PI_{60} [-]	1,21	1,40	
		DAR [-]	1,13	1,23	
		PI_{600} [-]	1,12	1,39	

Poznámka: pro všechny hodnoty - měřicí napětí nastavené 1000 V, skutečné 1024 V

Nedá se říci, že by hodnoty byly obecně vyšší, v některých případech ve srovnání s předchozím měřením tomu tak je, ale v některých nikoliv. Teoreticky bychom se sníženou vlhkostí očekávali i lepší elektrické vlastnosti, po vytažení motoru z komory do normálního prostředí pracovní místnosti se na něm však pomalu rozpouští vzniklá námraza, která se samozřejmě postupně mění ve vodu, a ta přirozeně další významnější nárůst odporu nedovoluje. S každým následujícím zkušebním cyklem, kterým si všechny motory projdou, je možno pozorovat stále větší rozptyl hodnot po každém jednotlivém měření mezi motory navzájem. Záleží jednak na jejich počáteční kvalitě izolace z výroby a pak také na konkrétní pozici v klimatické komoře (na spodní desce je pro každé měření umístěno vždy 5 motorů vedle sebe a na horní samostatně motor č.1).



Obrázek 22 – průběhy izolačních odporů v čase mezi fázemi U-V a mezi fází U a kostrou při měření čistě na vinutí po simulaci chladného prostředí s krytem svorkovnice

3.5.4 Horké prostředí, bez krytu svorkovnice

V následující fázi zkoušení se v podstatě opakují ty samé podmínky prostředí jako v kapitole 3.5.1, ale otevřená skříň svorkovnice znamená rozšířenou možnost průniku vlhkosti do izolačního systému.

a) s černou svorkovou deskou

Tabulka 15 – Měření izolačního odporu na motorech s využitím černé svorkové desky po simulaci horkého prostředí bez krytu svorkovnice.

č.motoru	θ [°C]	φ [%]	R_i [MΩ]					
			U-V	U-W	V-W	U-k	V-k	W-k
1	23,6	38	45,0	48,9	50,1	34,81	42,6	44,3
2	23,4	37	62,3	62,0	72,9	119,6	145,3	144,5
3	23,3	36	73,7	95,7	109,1	71,5	79,4	96,3
4	23,5	36	53,8	53,3	61,7	52,7	68,7	65,1
5	23,3	37	42,2	46,3	46,1	43,8	49,2	51,7
6	23,5	36	82,5	83,1	75,8	86,8	91,7	87,2

Poznámka: pro všechny hodnoty - měřicí napětí nastavené 1000 V, skutečné 1024 V
- odečteno z displeje v čase 20 s od zapnutí m.p.

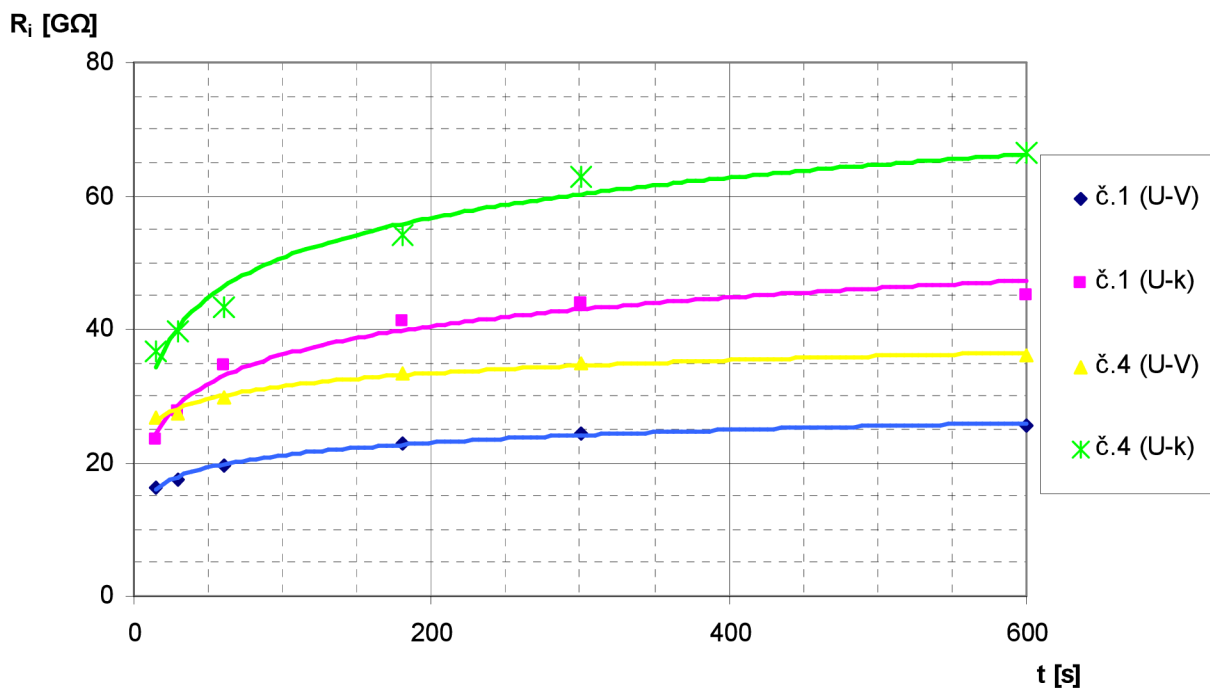
Oproti srovnatelnému měření při uzavřené svorkovnici (3.5.1) lze vyzorovat celkové snížení odporů přibližně v rozptylu 2-5krát. Je splněn předpoklad, že při odstraněném krytu vlhkost významněji zvýšila povrchovou vodivost bakelitové destičky, což se na výsledných hodnotách muselo projevit.

b) čistě na vinutí

Tabulka 16 – Měření izolačního odporu na motorech čistě na vinutí po simulaci horkého prostředí bez krytu svorkovnice.

č.motoru	θ [°C]	φ [%]	t [s]	R_i [G Ω]	
				U-V	U-k
1	22,9	36	15	16,33	23,55
			30	17,31	27,63
			60	19,62	34,56
			180	22,88	41,3
			300	24,48	43,9
			600	25,71	45,1
vypočítané indexy			PI_{60} [-]	1,20	1,47
			DAR [-]	1,13	1,25
			PI_{600} [-]	1,31	1,30
4	23,5	36	15	26,70	36,68
			30	27,44	39,71
			60	29,91	43,4
			180	33,37	54,0
			300	35,02	62,8
			600	36,10	66,6
vypočítané indexy			PI_{60} [-]	1,12	1,18
			DAR [-]	1,09	1,09
			PI_{600} [-]	1,21	1,53

Poznámka: pro všechny hodnoty - měřící napětí nastavené 1000 V, skutečné 1024 V



Obrázek 23 – průběhy izolačních odporů v čase mezi fázemi U-V a mezi fází U a kostrou při měření čistě na vinutí po simulaci horkého prostředí bez krytu svorkovnice

Vliv otevřené svorkovnice není přímo na vinutí až tak patrný, hodnoty se sice ve srovnání se shodným měřením o něco snížily, pokles to však není nijak dramatický – obvykle několik jednotek až pár desítek $G\Omega$.

3.5.5 Mírné prostředí, bez krytu svorkovnice

a) s černou svorkovou deskou

Tabulka 17 – Měření izolačního odporu na motorech s využitím černé svorkové desky po simulaci mírného prostředí bez krytu svorkovnice.

č.motoru	θ [°C]	φ [%]	R_i [$M\Omega$]					
			U-V	U-W	V-W	U-k	V-k	W-k
1	23,3	39	461	452	451	496	575	541
2	23,2	39	624	564	664	1084	1361	1243
3	23,1	39	704	841	1030	1003	1115	1149
4	23,3	38	489	438	547	606	805	688
5	23,3	39	423	400	429	511	586	547
6	23,2	38	732	690	648	924	984	898

Poznámka: pro všechny hodnoty - měřicí napětí nastavené 1000 V, skutečné 1024 V
- odečteno z displeje v čase 20 s od zapnutí m.p.

Po vystřídání horkého prostředí mírným došlo k předpokládanému nárůstu izolačních odporů obecně pro všechny motory, dosahují nyní stovek $M\Omega$, v jednotlivých případech pro č.2 a č.3 až jednotek $G\Omega$. Při otevřené svorkovnici by se dal kvůli lepší cirkulaci vzduchu ve svorkovnicovém prostoru očekávat o něco vyšší nárůst, ale ten je na druhou stranu kompenzován již značně znečištěnou svorkovou destičkou z důvodu velkého počtu předchozích měření a s tím souvisejícím vystavením působení vlhkosti.

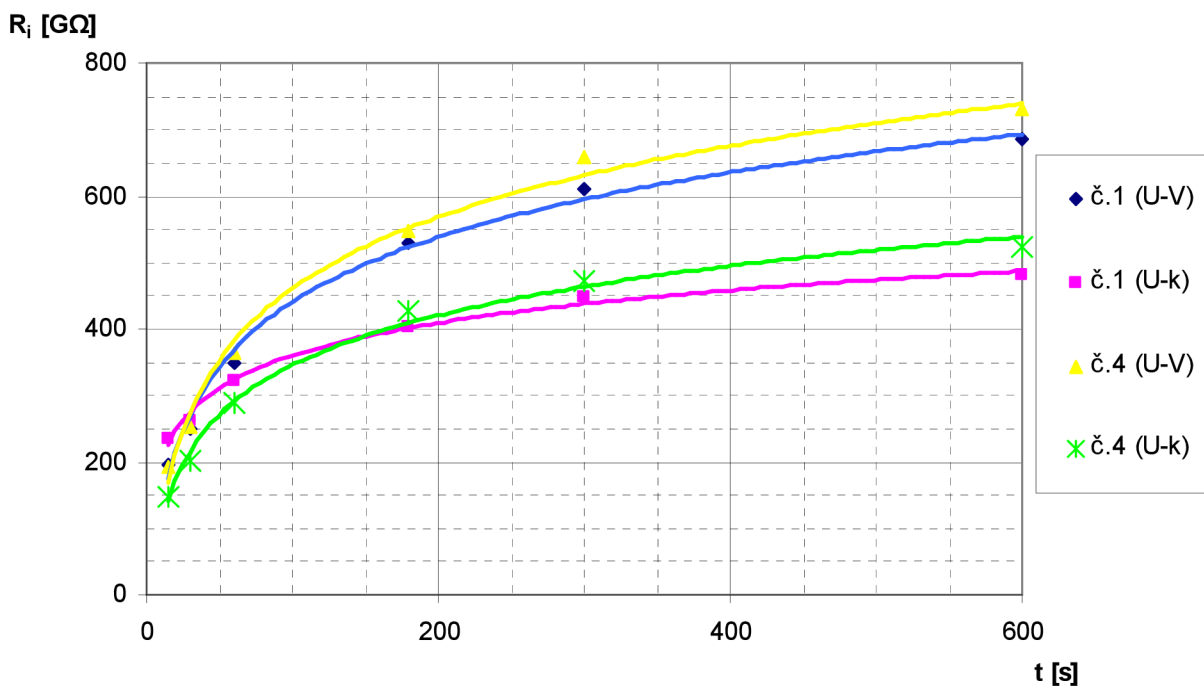
b) čistě na vinutí

V této fázi měření dosahují izolační odpory vynikajících hodnot, vzrostly na řádově stovky gigaohmů. Na rozdíl od výsledků shodného programu z kap. 3.5.2 je nepřehlédnutelný mnohem rychlejší a výraznější náběh, to se odráží na hodnotách jednotlivých indexů, které v některých případech opět dosahují dobrého až velmi dobrého slovního ohodnocení. Díky otevřené svorkovnici se mnohem lépe odvětrávají i prostory, které by jinak byly schované pod krytem, může zde volně cirkulovat vzduch a tím se v daných místech sníží množství vlhkosti.

Tabulka 18 – Měření izolačního odporu na motorech čistě na vinutí po simulaci mírného prostředí bez krytu svorkovnice.

č.motoru	θ [°C]	φ [%]	t [s]	R_i [G Ω]	
				U-V	U-k
1	23,2	39	15	196,6	235,7
			30	250,8	262,3
			60	349,4	320,7
			180	530	403
			300	610	448
			600	687	481
vypočítané indexy			Pl_{60} [-]	1,78	1,36
			DAR [-]	1,39	1,22
			Pl_{600} [-]	1,97	1,50
4	23,1	38	15	192,4	148,7
			30	253,5	200,6
			60	364,9	289,3
			180	546	427
			300	658	471
			600	731	524
vypočítané indexy			Pl_{60} [-]	1,90	1,95
			DAR [-]	1,44	1,44
			Pl_{600} [-]	2,00	1,81

Poznámka: pro všechny hodnoty - měřicí napětí nastavené 1000 V, skutečné 1024 V



Obrázek 24 – průběhy izolačních odporů v čase mezi fázemi U-V a mezi fází U a kostrou při měření čistě na vinutí po simulaci mírného prostředí bez krytu svorkovnice

3.5.6 Chladné prostředí, bez krytu svorkovnice

a) s černou svorkovou deskou

Tabulka 19 – Měření izolačního odporu na motorech s využitím černé svorkové desky po simulaci chladného prostředí bez krytu svorkovnice.

č.motoru	θ [°C]	φ [%]	R_i [M Ω]					
			U-V	U-W	V-W	U-k	V-k	W-k
1	24,4	40	700	670	662	937	959	1020
2	24,5	39	829	757	898	1602	1734	1652
3	24,4	39	1134	1390	1523	1792	1756	1808
4	24,6	38	841	764	942	1144	1284	1181
5	24,5	38	704	661	716	1139	1262	1169
6	24,6	38	1035	1022	904	1335	1435	1251

Poznámka: pro všechny hodnoty - měřicí napětí nastavené 1000 V, skutečné 1024 V

- odečteno z displeje v čase 20 s od zapnutí m.p.

Bez krytu svorkovnice je v tomto případě dosaženo vlivem lepší cirkulace vzduchu a dokonalejšího ochlazení vnitřních prostor ještě lepších výsledků než v předchozím bodě. Bohužel již zmiňovaná ztráta plasticity a tím vzniklá obrovská křehkost zapříčinila další lámání částí svorkové desky.

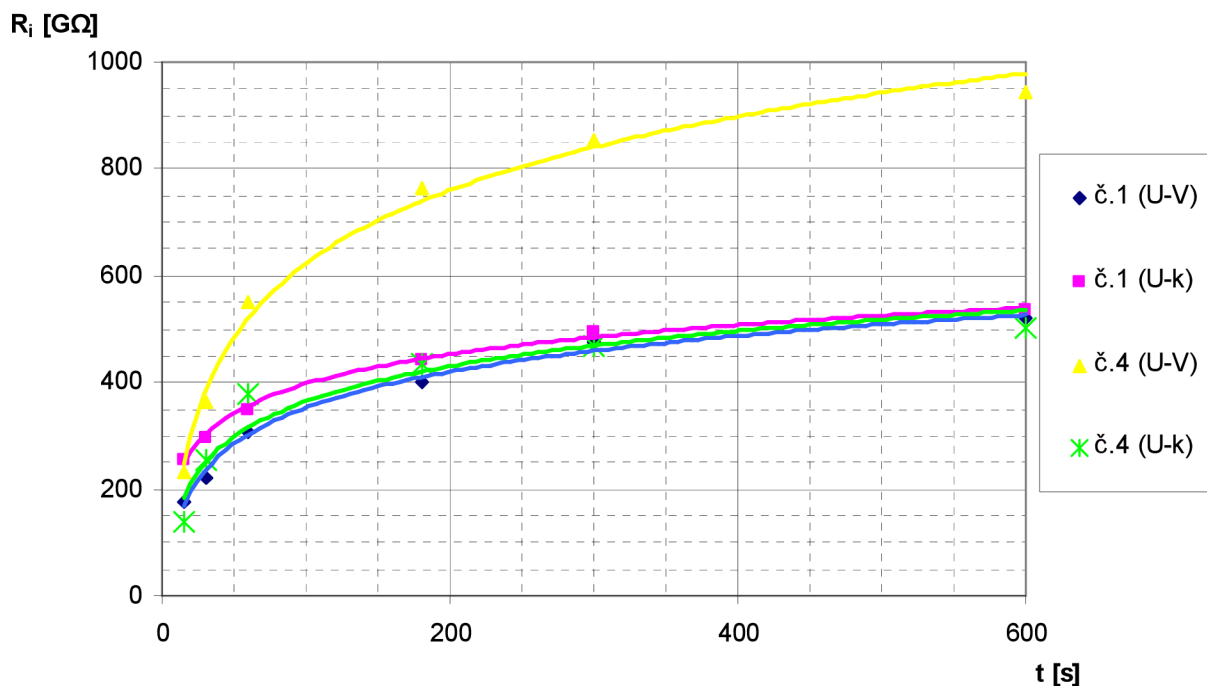
b) čistě na vinutí

Tabulka 20 – Měření izolačního odporu na motorech čistě na vinutí po simulaci chladného prostředí bez krytu svorkovnice.

č.motoru	θ [°C]	φ [%]	t [s]	R_i [G Ω]	
				U-V	U-k
1	25,3	37	15	177,7	255,6
			30	221,3	297,2
			60	306,3	348,2
			180	402	442
			300	474	495
			600	521	537
vypočítané indexy			PI_{60} [-]	1,72	1,36
			DAR [-]	1,38	1,17
			PI_{600} [-]	1,70	1,54
4	25,1	37	15	233,7	137,4
			30	361,7	253,1
			60	551	379,7
			180	764	434
			300	855	468
			600	944	502
vypočítané indexy			PI_{60} [-]	2,36	2,76
			DAR [-]	1,52	1,50
			PI_{600} [-]	1,71	1,32

Poznámka: pro všechny hodnoty - měřicí napětí nastavené 1000 V, skutečné 1024 V

Za zmínku stojí především výrazný rozdíl u mezifázových napětí – v našem případě je u motoru č.4 zjištěna téměř dvakrát taková hodnota odporu než pro jednonásobnou izolaci. Řádově se však hodnoty nemění.



Obrázek 25 – průběhy izolačních odporů v čase mezi fázemi U-V a mezi fází U a kostrou při měření čistě na vinutí po simulaci chladného prostředí bez krytu svorkovnice



Obrázek 26 – odlomený kus bakelitové svorkové desky na jednom z motorů

3.5.7 Absolutně vlhké prostředí, bez krytu svorkovnice

Poslední cyklus v komoře při nastavené teplotě 40 °C a 100% relativní vlhkosti simuluje alternativu pro tropické vlhké prostředí (pozn.: klimatická komora dosáhne reálné hodnoty vlhkosti maximálně 99 %).

a) s černou svorkovou deskou

Tabulka 21 – Měření izolačního odporu na motorech s využitím černé svorkové desky po simulaci prostředí o 100% relativní vlhkosti bez krytu svorkovnice.

č.motoru	θ [°C]	φ [%]	t [s]	R_i [M Ω]					
				U-V	U-W	V-W	U-k	V-k	W-k
1	24,8	39	15	1,390	2,092	1,424	1,992	2,047	1,174
			30	1,685	2,194	1,588	2,188	2,303	1,488
			60	2,050	2,334	1,863	2,317	2,556	1,830
vypočítané indexy		PI ₆₀ [-]		1,47	1,12	1,31	1,16	1,25	1,56
		DAR [-]		1,22	1,06	1,17	1,06	1,11	1,23
2	25,6	37	15	1,581	2,177	1,078	2,468	1,088	1,786
			30	1,861	2,346	1,132	2,722	1,132	2,043
			60	2,222	2,557	1,217	3,027	1,194	2,431
vypočítané indexy		PI ₆₀ [-]		1,41	1,17	1,13	1,23	1,10	1,36
		DAR [-]		1,19	1,09	1,08	1,11	1,05	1,19
3	25,2	36	15	1,008	1,348	0,792	1,571	1,047	1,005
			30	1,186	1,477	0,988	1,734	1,208	1,231
			60	1,462	1,625	1,142	1,932	1,422	1,306
vypočítané indexy		PI ₆₀ [-]		1,45	1,21	1,44	1,23	1,36	1,30
		DAR [-]		1,23	1,10	1,16	1,11	1,18	1,06
4	25,8	35	15	0,959	1,397	0,938	1,225	0,576	0,708
			30	1,006	1,418	0,970	1,456	0,639	0,752
			60	1,012	1,567	1,037	1,658	0,751	0,799
vypočítané indexy		PI ₆₀ [-]		1,06	1,12	1,11	1,35	1,30	1,13
		DAR [-]		1,01	1,11	1,07	1,14	1,18	1,06
5	25,7	36	15	1,086	0,918	1,519	0,858	2,437	1,084
			30	1,187	0,949	1,638	0,903	2,595	1,112
			60	1,282	0,981	1,776	1,038	2,807	1,160
vypočítané indexy		PI ₆₀ [-]		1,18	1,07	1,17	1,21	1,15	1,07
		DAR [-]		1,08	1,03	1,08	1,15	1,08	1,04
6	25,4	36	15	0,850	0,927	1,050	1,208	1,239	1,118
			30	0,948	1,081	1,122	1,341	1,402	1,348
			60	1,027	1,182	1,221	1,488	1,577	1,617
vypočítané indexy		PI ₆₀ [-]		1,21	1,28	1,16	1,23	1,27	1,45
		DAR [-]		1,08	1,09	1,09	1,11	1,12	1,20

Poznámka: pro všechny hodnoty - měřící napětí nastavené 1000 V, skutečné 1024 V

Po vytažení motorů z komory se odpor v tomto případě již vyvíjel v čase, s delším časem měření postupně také vzrůstal. Hodnoty se obecně propadly do řádu jednotek M Ω , v určitých případech se dokonce dostaly pod 1 M Ω . Pokud se dosadí do vzorce v kapitole 2.1.2 při

uvažování zkušební napětí 1000 V, pak nutná minimální hodnota izolačního odporu motoru je stanovena na základě uvedeného výpočtu takto:

$$R_i = \frac{U}{\frac{P_N}{100} + 1000} = \frac{1000}{\frac{1,2}{100} + 1000} = \underline{\underline{1M\Omega}}$$

Vzhledem k faktu, že minimální izolační odpor, který by měly měřené motory dle výše uvedeného výpočtu v teplém stavu splňovat, je 1 MΩ v teplém a 5 MΩ ve studeném stavu, není už v tomto případě splněná dostatečná izolační schopnost měřeného objektu, z toho vyplývá naprosto nevhodné použití bakelitové svorkovnice v prostředí o vysoké vlhkosti.

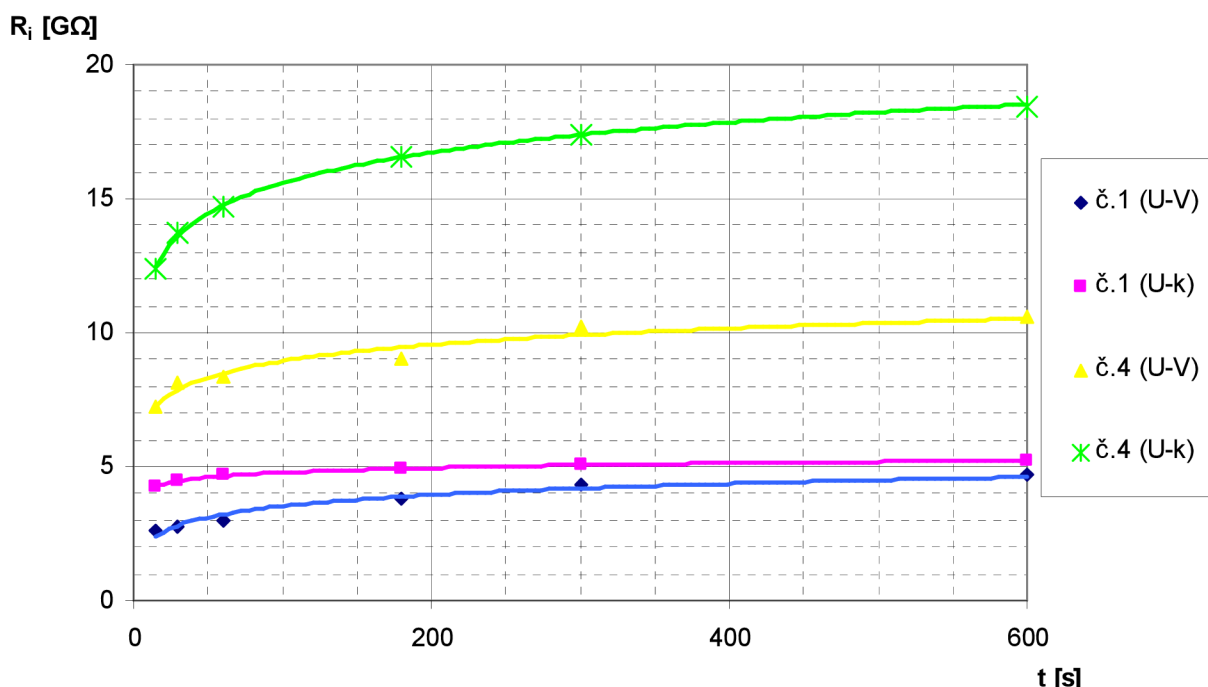
b) čistě na vinutí

Tabulka 22 – Měření izolačního odporu na motorech čistě na vinutí po simulaci prostředí o 100% relativní vlhkosti bez krytu svorkovnice.

č.motoru	θ [°C]	φ [%]	t [s]	R _i [GΩ]	
				U-V	U-k
1	24,7	39	15	2,577	4,28
			30	2,732	4,46
			60	2,981	4,67
			180	3,790	4,92
			300	4,32	5,08
			600	4,67	5,21
vypočítané indexy			PI ₆₀ [-]	1,16	1,09
			DAR [-]	1,09	1,05
			PI ₆₀₀ [-]	1,57	1,12
4	25,4	36	15	7,23	12,39
			30	8,16	13,71
			60	8,34	14,73
			180	9,04	16,58
			300	10,20	17,42
			600	10,58	18,46
vypočítané indexy			PI ₆₀ [-]	1,15	1,19
			DAR [-]	1,02	1,07
			PI ₆₀₀ [-]	1,27	1,25

Poznámka: pro všechny hodnoty - měřicí napětí nastavené 1000 V, skutečné 1024 V

Po odstranění svorkové desky se dosahuje řádově jednotek GΩ. Z grafu vyplývá v tomto případě poměrně slabý nárůst hodnot u jednonásobné izolace oproti předchozím zkouškám, u dvojnásobné izolace je zvyšování izolačního odporu v závislosti na době měření ztelnější. Nutno podotknout, že údaje pro jednotlivé motory se navzájem poměrně dost rozcházejí, například u motoru č.3 se pro čas 10 minut překročí odpor 10 GΩ, kdežto u č.1 se prakticky pohybuje okolo 5 GΩ.



Obrázek 27 – průběhy izolačních odporů v čase mezi fázemi U-V a mezi fází U a kostrou při měření čistě na vinutí po simulaci prostředí o 100% relativní vlhkosti bez krytu svorkovnice

3.5.8 Ověřovací měření po vysoušení v peci

Závěrečná zkouška spočívá v umístění motorů do vysoušecí pece, kde se po stanovenou dobu 12 h zbavují vlhkosti vysoušením – při teplotě 80 °C. Poté znovu proběhlo měření a zjištění, zda motory dokáží opětovně nabýt dostatečných izolačních schopností.

a) s černou svorkovou deskou

Tabulka 23 – Měření izolačního odporu na motorech s využitím černé svorkové desky po vysoušení v peci.

č.motoru	θ [°C]	φ [%]	R_i [MΩ]					
			U-V	U-W	V-W	U-k	V-k	W-k
1	22,3	49	393,9	352,2	366,5	382,8	446	393,4
2	22,3	48	338,1	324,2	386,7	356,5	421	403
3	22,5	48	329,3	383,0	454	342,6	388,7	424
4	22,7	48	12,53	10,30	10,14	13,40	14,02	13,78
5	22,9	47	512	457	529	424	531	500
6	22,9	47	446	427	508	408	497	414

Poznámka: pro všechny hodnoty - měřicí napětí nastavené 1000 V, skutečné 1024 V
- odečteno z displeje v čase 20 s od zapnutí m.p.

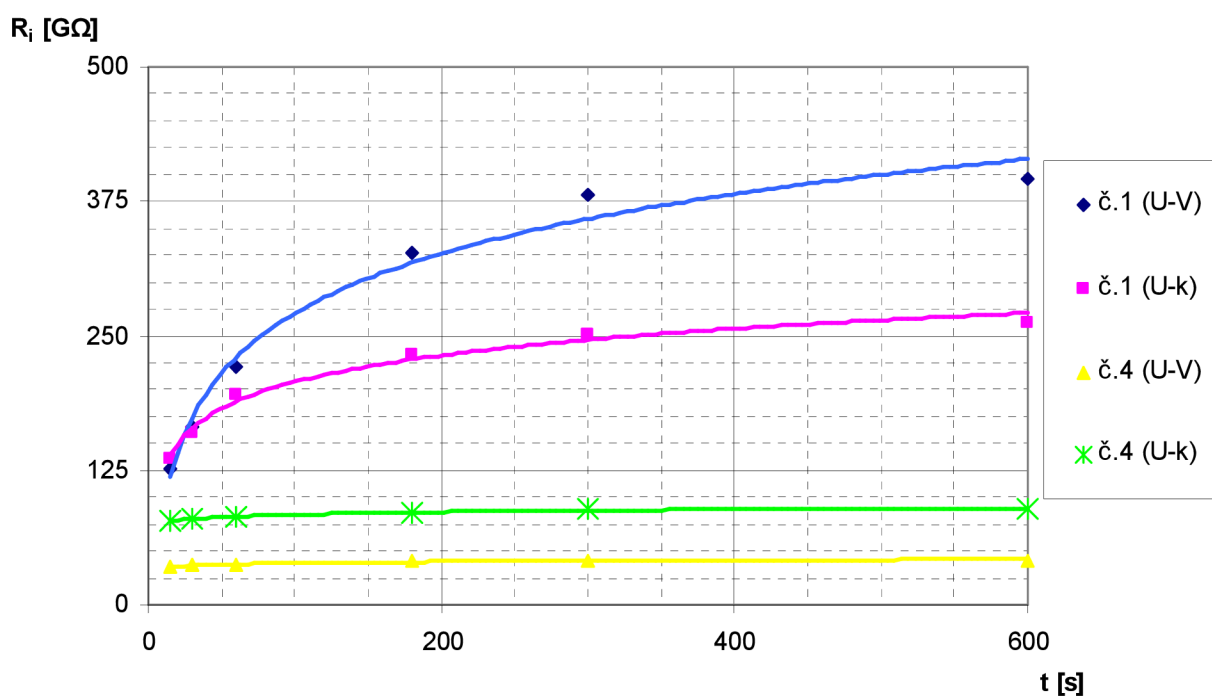
Izolační odpor opětovně vzrostl do řádu stovek MΩ, což znamená znovuobnovení schopnosti izolace, motory by měly plnit správnou funkci bez rizika elektrického průrazu. Výjimkou je však č.4 – velká vlhkost, respektive později pravděpodobně usazená voda uvnitř motoru způsobila nevratné poškození, jednak je patrný rozdíl z výsledků a navíc nelze vůbec otočit hřídelem!

b) čistě na vinutí

Tabulka 24 – Měření izolačního odporu na motorech čistě na vinutí po vysoušení v peci.

č.motoru	θ [°C]	φ [%]	t [s]	R_i [G Ω]	
				U-V	U-k
1	23,3	45	15	126,1	136,2
			30	164,6	159,8
			60	220,4	195,8
			180	326,5	232,9
			300	381,7	251,2
			600	395,4	262,1
vypočítané indexy			PI_{60} [-]	1,75	1,44
			DAR [-]	1,34	1,23
			PI_{600} [-]	1,79	1,34
4	23,1	45	15	34,93	77,7
			30	36,52	79,5
			60	37,65	81,7
			180	40,5	86,2
			300	41,2	88,3
			600	41,4	89,7
vypočítané indexy			PI_{60} [-]	1,08	1,05
			DAR [-]	1,03	1,03
			PI_{600} [-]	1,10	1,10

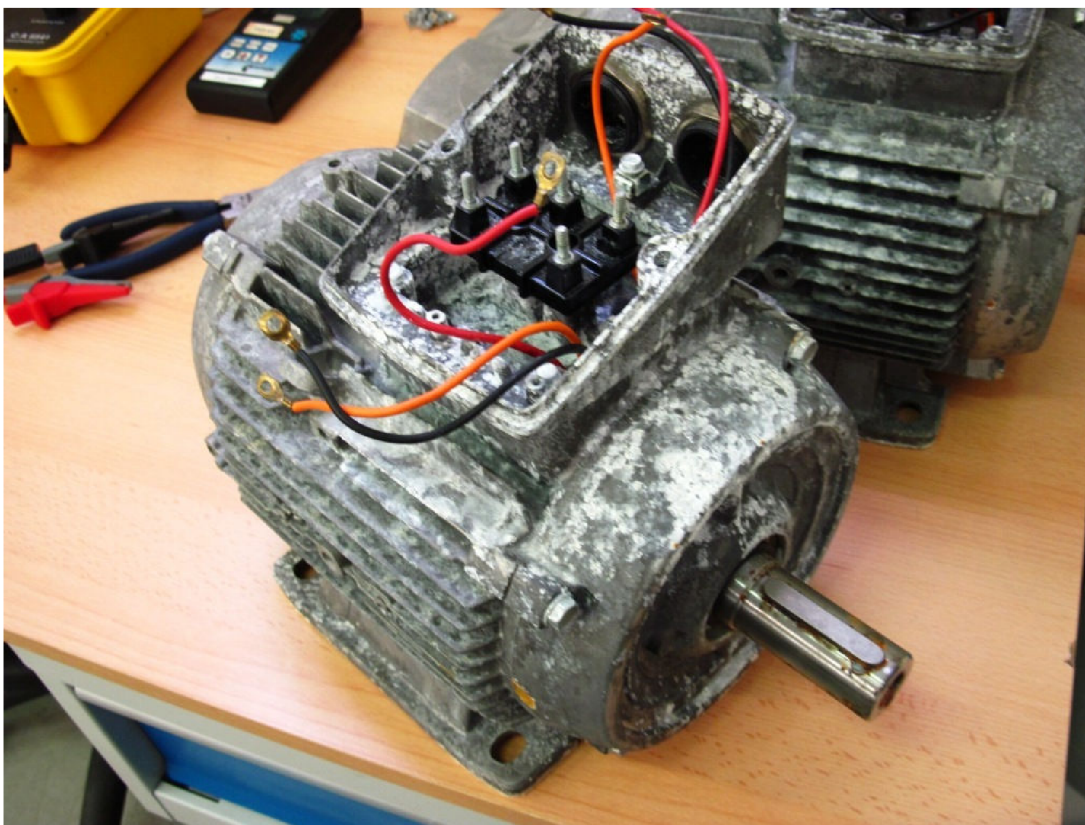
Poznámka: pro všechny hodnoty - měřicí napětí nastavené 1000 V, skutečné 1024 V



Obrázek 28 – průběhy izolačních odporů v čase mezi fázemi U-V a mezi fází U a kostrou při měření čistě na vinutí po vysoušení v peci

Co se týče jednonásobné izolace, hodnoty sice nedosahují k původním výsledkům měření před započetím užívání klimatické komory (až jednotky $T\Omega$), ovšem čísla v řádu stovek $G\Omega$ lze považovat za více než uspokojivá pro zajištění dostatečné izolační schopnosti a tím správné funkčnosti motoru. Poslední zkouška v komoře za působení téměř 100% relativní vlhkosti se bohužel podepsala na neuspokojivém stavu motoru č.4 s dvojnásobným izolačním systémem – hodnoty v desítkách gigaohmů by za normálních okolností plně postačovaly, ovšem nyní je potřeba přihlídnout k faktu, že nejde otočit hřídelem, zvýšená vlhkost tedy napáchala škody uvnitř motoru.

Četnost a rozmanitost zvolených klimatických zkoušek se také negativně projevila na povrchu motorů, viz. foto po vysušení.



Obrázek 29 – motory po vysušení

4 ZÁVĚR

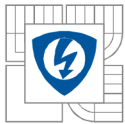
Práce se zabývá měřením izolačních odporů asynchronních motorů na dvou odlišných izolačních systémech a ověřením vlivu teploty a vlhkosti na izolaci. Celkově je práce orientována pro praktické využití v průmyslových závodech.

Dle naměřených hodnot nelze v našem případě jednoznačně prohlásit, že izolační systém s vodiči s dvojitou izolací a dvojitou impregnací vykazuje lepší parametry co se týče izolačních odporů, než jednonásobná izolace, jak bychom původně očekávali. Odporů nabývají značně odlišných hodnot ve srovnání mezifázovém pro ten samý motor i ve srovnání mezi stejnými kombinacemi fází různých motorů. V některých případech dokonce vykazuje jednonásobná izolace vyšší hodnoty.

Vzhledem k tomu, že byla minimální hodnota izolačního odporu ve studeném stavu $5 \text{ M}\Omega$ výrazně překročena prakticky pro všechna měření, lze obecně říci, že izolační systém těchto elektromotorů je bohatě předimenzován a s velkou rezervou vyhovuje požadavkům na izolace. Jedinou výjimkou je absolutně vlhké prostředí, kdy s černou svorkovou deskou se požadovaných parametrů nedosáhlo, bude třeba využít jinou. Elektrická pevnost vinutí je, díky využitým izolačním materiálům o dostatečné tloušťce a celkově kvalitnímu provedení, také velmi dobrá a nepředpokládá se elektrický průraz. Toto může nastat jen při havarijních stavech motoru např. vlivem dlouhodobého přetížení a zároveň špatně nastavených ochran motoru, které mají tomuto přetížení zabránit. Při provozování v prostředí, kde nebudou překročeny teploty pro uvedenou třídu F, toto nehrozí. Motory nemusí být napájeny jen přímým připojením na síť, k napájení lze použít také frekvenční měniče. Pro tyto se vyrábí speciální motory s dvojitou zesílenou impregnací. Motory musí odolat napěťovým špičkám, které mohou hlavně u měničů bez výstupních filtrů vzniknout. Provoz motoru s měničem má velkou výhodu pro rozběhy motorů, které jsou řízeny po nastavených rampách, a také pro přesné řízení otáček motorů (změnou frekvence).

Na základě provedeného teoretického rozboru a veškerých vykonaných měření bylo stanoveno několik doporučení s cílem zlepšit izolační odpor elektromotorů v prostředí, kdy teplota a vlhkost je odlišná od našich běžných podmínek:

1. V prostředí s obzvláště vysokou vlhkostí (respektive s relativní vlhkostí vzduchu blížící se 100 %) v žádném případě **nepoužívat černou svorkovou desku** z materiálu Bakelite. Z výsledků měření jasně vyplývá, že právě tato svorkovnice představuje nejslabší článek izolačního systému. Naopak využít bílé svorkové desky z materiálu Keripol UP804.
2. Velmi kritický moment pro izolace nastává při lodní (zaoceánské) přepravě, kdy motory jsou obvykle uzavřeny ve vnitřních prostorech se špatnou výměnou vzduchu a navíc vystaveny působení vlhkosti a soli od moře. Je třeba jednak vyřešit **dostatečné odvětrávání** těchto prostorů, a dále pak je důležité zajistit **co nejlepší zabalení motorů** – zvolit **vhodný obalový materiál**, aby nedošlo k průniku vlhkosti (nebo aby byl alespoň výrazně omezen) do prostoru elektromotoru.



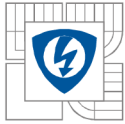
3. Je možné už při výrobě využít jiného materiálu (pro impregnační lak, drážkovou izolaci i izolaci vodičů) s lepšími dielektrickými vlastnostmi (menší ztrátový činitel, který je méně závislý na teplotě, nižší relativní permitivita), případně **zvětšit tloušťku materiálu** využívaného v současnosti.
4. Izolační schopnosti závisí nejen na tloušťce vrstvy impregnačního laku, ale také na jeho rovnoměrném rozložení, protože velikost odporu bude určena nejslabším místem izolace, kterým může být právě příliš tenká vrstva laku v určitém místě (pokud nebude pro tento bod brán v potaz vliv svorkové desky). Tedy **vhodnou technologií zajistit rovnoměrné rozložení laku** po celém impregnovaném povrchu.
5. U elektromotorů užívaných v obzvlášť velkých vlhkostech zajistit **důkladné utěsnění prostorů** mezi jednotlivými částmi, utáhnout šrouby dostatečným momentem (kostra-štíty, kostra-kryt svorkovnice), pro zabránění průniku vlhkosti alespoň dočasně **lze využít antioxidantů**.
6. Vzniká-li předpoklad, že elektromotor při transportu nebo skladování bude muset snášet velmi vysoké teploty a vlhkosti okolního prostředí a z nějakého důvodu, ať už ekonomického nebo jiného, bude využita černá svorková deska Bakelite, pak dobrým opatřením pro zachování dostatečného odporu může být **dodatečná montáž této svorkové desky** (namontovat ji nikoliv ve výrobním závodě před expedicí, ale až na místě určení před prvním spuštěním). Destička samotná, pokud bude převážena v normálním prostředí odděleně od motorů, si zachová lepší izolační vlastnosti.
7. V nejhorším případě, pokud si elektromotory projdou extrémními klimatickými podmínkami a ztratí do určité míry svou **izolační schopnost**, je možné ji vždy **obnovit jejich vysušením**.

Hlavním cílem této práce bylo potvrdit, že hodnota izolačního odporu a jeho rychlost náběhu v čase výrazně závisí na teplotě a vlhkosti daného prostředí, jinak řečeno na klimatu. Tímto považují hlavní cíl práce za splněný.



LITERATURA

- [1] ČSN 350010 *Točivé elektrické stroje. Zkoušky.* (účinnost od 1.8.1992)
- [2] PAVLÍK, Josef. *Vybrané problémy z diagnostiky izolačních systémů točivých elektrických strojů : zkrácená verze Ph.D. Thesis.* [V Brně: Vysoké učení technické], 2011. 21 s. ISBN 978-80-214-4387-7.
- [3] HRUBEŠ, Jan. *Měření izolačního odporu.* Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1965.
- [4] ARTBAUER, Ján, Juraj ŠEDOVIČ a Vladimír ADAMEC. *Izolanty a izolácie.* 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1969, 619 s.
- [5] CHAVIN ARNOUX. *Uživatelský manuál: Megaohmmetr C.A 6541.* Paříž, 2008.
- [6] ČSN 35 0000-1-1 *Točivé elektrické stroje - Část 1-1: Doplnující požadavky.* (účinnost od 1.8.1997)
- [7] *Nizkonapěťové motory: Trojfázové asynchronní motory nakrátko ILa7* [online]. © 2013 [cit. 2013-12-09]. Dostupné z: <http://www.elektromotory-siemens.cz/upload/File/katalog-elektromotoru-1la7-0605-k02-cz.pdf>
- [8] *High efficiency three-phase asynchronous motors* [online]. © 2013 [cit. 2013-12-10]. Dostupné z: <http://www.leroy-somer.com/catalogue-industrie/fichiers/4-LSES-en.pdf>
- [9] Vlhkost vzduchu. *Meteocentrum.cz* [online]. © 2007-2013 [cit. 2013-12-10]. Dostupné z: <http://www.meteocentrum.cz/encyklopedie/vlhkost-vzduchu.php>
- [10] Zvlhčovací systém Merlin. *TZBinfo* [online]. 7.6.2006 [cit. 2013-12-10]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/3345-zvlhcovaci-system-merlin>
- [11] Klimatické klasifikace. *Zemepis.com* [online]. [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: <http://www.zemepis.com/klima.php>
- [12] MAKARIUS, Karel. *Impregnace vinutí elektrických strojů a přístrojů.* Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1962, 224 s.
- [13] ČSN EN 60085 ed. 2. *Elektrická izolace - Tepelné hodnocení a značení.* (účinnost od 1.9.2008)
- [14] KUČERA, Miroslav. *Účinky vícefaktorového namáhání na vlastnosti elektroizolačních materiálů.* Brno: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009.
- [15] HOLUB, Jiří. *Smáčivost povrchu vůči kapalinám a druhá viskozita kapalin.* Brno: Vysoké učení technické, Fakulta strojního inženýrství, 2010.
- [16] Fázová rozhraní. *VŠCHT v Praze* [online]. [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: <http://www.vscht.cz/fch/prikladnik/prikladnik/p.12.1.html>



PŘÍLOHY

Příloha č.1 – samostatná: Měření izolačních odporů – pokojové podmínky

Příloha č.2 – samostatná: Měření izolačních odporů – klimatické zkoušky