



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

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

ELEKTRICKÁ VODIVOST ALTERNATIVNÍCH ELEKTROIZOLAČNÍCH KAPALIN

ELECTRICAL CONDUCTION OF ALTERNATIVE ELECTROINSULATING LIQUIDS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. LADISLAV REŇÁK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MARTIN FRK, Ph.D.

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektrotechnologie

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektrotechnická výroba a management

Student: Bc. Ladislav Reňák

ID: 83300

Ročník: 2

Akademický rok: 2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Elektrická vodivost alternativních elektroizolačních kapalin

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Vytvořte přehled možných elektroizolačních kapalin používaných v elektrotechnickém průmyslu. Prostudujte mechanismy elektrické vodivosti izolačních materiálů včetně jevů vyskytujících se na rozhraní elektroda-dielektrikum. Seznamte se s metodami měření velmi malých proudů a s činiteli ovlivňujícími výslednou přesnost měření.

Navrhněte a sestavte pracoviště pro snímání absorpčních charakteristik elektroizolačních materiálů. Vzorky vybraných kapalných materiálů analyzujte z pohledu chování v elektrickém poli. Naměřená data aproximujte vhodnou matematickou funkcí, podejte fyzikální interpretaci výsledků experimentu a proveďte porovnání z pohledu druhu zkoumané kapaliny.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího diplomové práce.

Termín zadání: 7.2.2011

Termín odevzdání: 26.5.2011

Vedoucí práce: Ing. Martin Frk, Ph.D.

prof. Ing. Jiří Kazelle, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové 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 části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Předkládaná práce se zabývá vlastnostmi alternativních elektroizolačních kapalin a kapalin na bázi ropy. Je zkoumáno jejich použití v elektrotechnickém průmyslu. V praktické části práce se zabývá měřením absorpčních charakteristik biologicky odbouratelné elektroizolační kapaliny MIDEL 7131 a transformátorového oleje na bázi ropy TRAFON. Výsledky měření jsou poté kontrolovány pomocí náhradní matematické funkce.

Abstract

This labor deals with features of alternative electrical insulating liquids and also petroleum-base liquids. It examines their usage in the electrotechnical industry. The practical part of the thesis deals with measurement of absorption characteristics of biodegradable electrical insulating liquid MIDEL 7131 and the petroleum - based transformer oil TRAFON. The results of the measurement are examined by the help of substitutional math function.

Klíčová slova

Elektroizolační kapalina, elektrická vodivost, nabíjecí proud, vnitřní rezistivita.

Keywords

Electrical insulating liquids, electrical conductivity, charge current, internal resistivity.

Bibliografická citace díla:

REŇÁK, L. *Elektrická vodivost alternativních elektroizolačních kapalin*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 47 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Frk, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla:

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci na téma Elektrická vodivost alternativních elektroizolačních kapalin vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce, s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové 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

Poděkování:

Děkuji vedoucímu práce Ing. Martinu Frkovi, Phd. za metodické a cíleně orientované vedení při plnění úkolů realizovaných v diplomové práci.

OBSAH

OBSAH	6
ÚVOD	7
1 TEORETICKÁ ČÁST	8
1.1 Přehled elektroizolačních kapalin využívaných v elektrotechnickém průmyslu	8
1.1.1 Minerální oleje.....	9
1.1.2 Rostlinné oleje	10
1.1.3 Syntetické kapalné izolanty	11
1.2 Elektrická vodivost kapalných izolantů.....	12
1.2.1 Závislost elektrické vodivosti na struktuře kapalného izolantu	16
1.2.2 Jevy vyskytující se na rozhraní elektroda – dielektrikum	17
1.3 Metody měření velmi malých proudů	17
1.3.1 Metody přímé	17
1.3.2 Metody porovnávací	18
1.4 Zdroje chyb při měření velmi malých proudů	21
1.4.1 Vnější zdroje chyb	21
1.4.2 Chyby způsobené měřicím přístrojem.....	25
2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	26
2.1 Měřicí pracoviště	26
2.1.1 TETTEX 2903	26
2.1.2 Elektrometr Keithley 617	28
2.1.3 Vysokonapěťový zdroj SRS PS 350.....	28
2.1.4 Megaohmmeter IM 6.....	29
2.1.5 Brána Agilent E5810A	29
2.2 Zkušební vzorky	30
2.3 Způsob měření	30
2.4 Výsledky měření.....	32
2.5 Matematická interpretace výsledků	38
2.6 Vyhodnocení měření	40
3 ZÁVĚR	41
4 POUŽITÁ LITERATURA	42

Úvod

Izolační kapaliny používané v elektrotechnickém průmyslu byly ještě do nedávné doby vyráběny hlavně z ropy – minerální oleje. Protože ale na Zemi nejsou zásoby ropy nevyčerpatelné, tyto kapaliny jsou ekologicky škodlivé a jejich likvidace je velmi drahá, čím dál více se v elektrotechnickém průmyslu používají kapaliny biologicky odbouratelné. Mezi tyto kapaliny patří hlavně rostlinné a syntetické oleje.

Vhodnost použití těchto olejů je v některých případech omezena jen na nízké napětí, ale i to může pomoci ke snížení spotřeby olejů na bázi ropy.

Před samotným používáním těchto elektroizolačních kapalin v praxi je nutné zjistit jejich vlastnosti v laboratoři, kde se podrobují sérii testů.

Jedním z testů, který je pro elektroizolační kapaliny velmi důležitý, je zjištění jejich vodivosti, která by měla být co nejmenší. Zjišťuje se pomocí měření absorpčních charakteristik.

Tato metoda je realizována i v této práci na elektroizolačních kapalinách MIDEL 7131 a TRAFON.

1 Teoretická část

1.1 Přehled elektroizolačních kapalin využívaných v elektrotechnickém průmyslu

Kapaliny tvoří přechod mezi plynnými a tuhými látkami. Na rozdíl od tuhých látek nemají pravidelně uspořádanou krystalickou strukturu – jsou amorfní. Také si však zachovávají svůj objem – na rozdíl od látek plyných.

Kapaliny se všeobecně považují za chaoticky se pohybující soubor molekul, ale studium jejich struktury pomocí rentgenografických metod ukázalo, že i ony mají určité pravidelné uspořádání, které se však omezuje pouze na prostorově malé útvary složené z několika set molekul. Ty se na krátký čas seskupují do krystalových mřížek. Mřížky se po určitém čase rozpadnou a pohyb molekul zapříčiní, že se znovu uspořádají na jiném místě.

Kapaliny, které se používají v elektrotechnickém průmyslu mají obvykle charakter izolantů nebo dielektrik. Pokud pomineme skupinu kapalin, která se jeví jako silné nebo slabé elektrolyty, můžeme kapaliny pro elektrotechnický průmysl rozdělit podle různých znaků.

1. Podle původu:

- přírodní minerální oleje na bázi ropy,
- přírodní rostlinné oleje,
- syntetické kapaliny.

2. Podle charakteru většiny molekul:

- nepolární kapaliny,
- polární kapaliny.

3. Podle použití:

- kapaliny pro transformátory a vypínače,
- kapaliny pro impregnaci kabelové izolace,
- kapaliny pro kondenzátory a impregnaci kondenzátorů,
- kapaliny pro chlazení elektrických strojů (nemusí to být vždy izolanty).

4. Podle trvalé teplotní odolnosti:

- do 90 °C – minerální oleje,
- do 130 °C – syntetické kapaliny,
- do 200 °C – některé druhy fluorovaných uhlovodíků a silikonové kapaliny.

5. Podle hořlavosti:

- hořlavé,
- nehořlavé.

Konkrétní požadavky na jednotlivé druhy kapalin vychází většinou ze dvou hlavních bodů. Prvním je celkové uspořádání a konstrukce zařízení, ve kterém má kapalina plnit danou činnost a druhým jsou provozní podmínky dané druhem zařízení.

Kapalné izolační materiály se většinou používají v kombinaci s vhodným tuhým dielektrikem nebo izolantem. Zaplněním pórů a dutin v elektroizolačním systému zamezují vzniku částečných výbojů a tím prodlužují životnost izolace. V tomto smyslu jsou elektroizolační kapaliny nezastupitelné v celém elektrotechnickém průmyslu [13].

1.1.1 Minerální oleje

Minerální oleje jsou produktem, který se získává při zpracování ropy. Jelikož ropa se podle svého původu rozlišuje různým chemickým složením, i minerální oleje mají různé složení. Složení minerálního oleje se ještě ovlivňuje použitou výrobní technologií a metodami rafinace.

Minerální oleje se skládají hlavně z uhlovodíků, které můžeme rozdělit do tří skupin.

1. Parafinické uhlovodíky – nasycené uhlovodíky se všeobecným vzorcem C_nH_{2n+2} .
V minerálních olejích se vyskytují s lineárním i rozvětveným řetězcem.
2. Alkylcyklánové uhlovodíky – jejich molekuly se skládají z jednoho nebo více cykloalkanových kruhů.
3. Aromatické uhlovodíky – jsou zastoupené v malém množství.

Mezi další důležité složky minerálních olejů patří asfaltopryskyřičné komponenty (neutrální pryskyřice, karbeny), sloučeniny s obsahem síry (sulfidy, disulfidy), dusíkaté komponenty, kovové komponenty (soli organických kyselin a sloučeniny kovů) [13].

Minerální oleje se používají hlavně jako oleje transformátorové, kabelové a kondenzátorové.

Transformátorové oleje se vyznačují vysokou odolností vůči stárnutí. Jejich hlavní funkcí je zprostředkování dobrého odvodu tepla. Je u nich požadována co nejnižší viskozita.

Kondenzátorové oleje se od transformátorových liší zpravidla ostřejší rafinací. Jejich nevýhodou je poměrně nízká relativní permitivita a hořlavost.

Kabelové oleje se vyznačují vysokou hodnotou viskozity, aby olej nestékal z povrchu izolace, což by mělo za následek průrazy v místech izolace, odkud olej odtekl [2].

1.1.2 Rostlinné oleje

Rostlinné oleje se získávají lisováním semen vybraných rostlin nebo i extrakcí za tepla a následnou rafinací. Jsou směsí esterů, glycerinů a nenasycených mastných kyselin. Dají se rozdělit na oleje vysychavé (lněný, tungový, dřevný) a nevysychavé (ricinový).

Lněný olej je určený hlavně na výrobu laků. Je čiré (průzračné) barvy. Tungový (dřevný) olej je světlolžluté barvy a také se využíval na výrobu laků. Má dobrou odolnost vůči účinkům vody a plísní, ale jeho hlavní nevýhodou je tepelné stárnutí, při kterém praská a odlupuje se od povrchu, na který byl nanesen. V současné době se tyto oleje nahrazují syntetickými pryskyřicemi.

Ricinový olej je směsí esteru glycerinu a nenasycených mastných kyselin. Jedná se o tekutý polární izolant, jehož relativní permitivita se pohybuje v rozmezí $\epsilon_r = 4,2 - 4,6$. Jeho významnou vlastností je, že je odolný vůči částečným výbojům a plynům. Využívá se hlavně v kondenzátorech ve stejnosměrných obvodech [13].

1.1.3 Syntetické kapalné izolanty

Hlavním důvodem pro používání syntetických kapalin jsou jejich některé specifické vlastnosti, jako např. nehořlavost a odolnost vůči vyšším teplotám, než mají minerální oleje. Jelikož se syntetických kapalin pro elektrotechnický průmysl vyrábí velké množství, budou uvedeny jen základní skupiny.

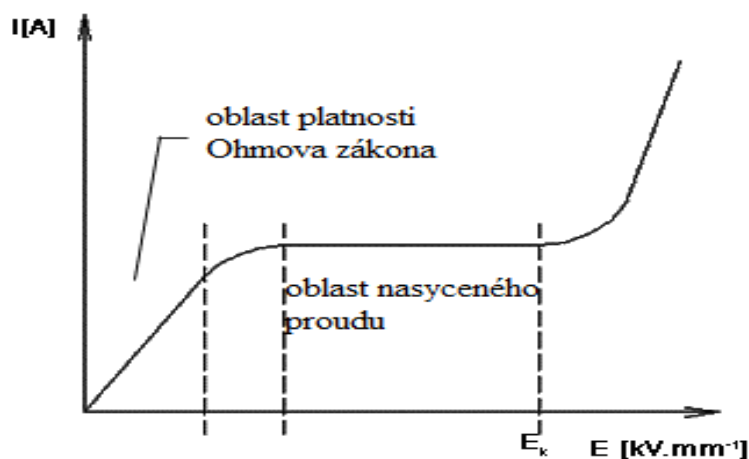
1. Polybuteny – kapaliny, které vznikají polymerizací nenasycených uhlovodíků. Jsou směsí polymerů butenu, jejich molekuly jsou nepolární. Vyznačují se nejen výbornými chemickými i elektrickými vlastnostmi, ale jsou i odolné vůči vyšším teplotám a oxidaci.
2. Silikonové kapaliny – jsou to bezbarvé kapaliny, které jsou hydrofobní a ekologicky nezávadné. Jsou tepelně stálé v širokém rozsahu teplot. Jejich permitivita i ztrátový činitel se v rozsahu frekvencí $f = 10^2 - 10^8$ Hz mění jen zanedbatelně. Nezpůsobují koroze kovů a nejsou agresivní vůči organickým izolantům.
3. Chlorované uhlovodíky – mohou se vyrobit substitucí atomu vodíku chlorem v molekule uhlovodíku. Jsou nehořlavé a nevýbušné, ale po jejich masivním užívání ve dvacátém století se prokázala jejich ekologická závadnost. Proto se už nevyrábějí.
4. Fluorované kapaliny – jsou to deriváty uhlovodíků, aminů a esterů, ve kterých jsou atomy vodíku nahrazeny atomy fluoru. Jsou chemicky velmi stabilní. Mají velmi dobré elektrické vlastnosti, proto se využívají například jako náplně transformátorů nebo výkonových spínačů [13].
5. Organické estery – jsou vyráběny pomocí chemické syntézy. Vyznačují se dobrou teplotní stabilitou, jsou odolné vůči plynům, mají nízké hodnoty ztrátového činitele. V současné době se používají jako hlavní náhrada za oleje na ropné bázi. Na našem trhu jsou dostupné tyto kapaliny s názvy: Aral 4569, Shell fluid 4600 nebo MIDEL 7131, která je zkoumaným objektem v experimentální části této práce.

1.2 Elektrická vodivost kapalných izolantů

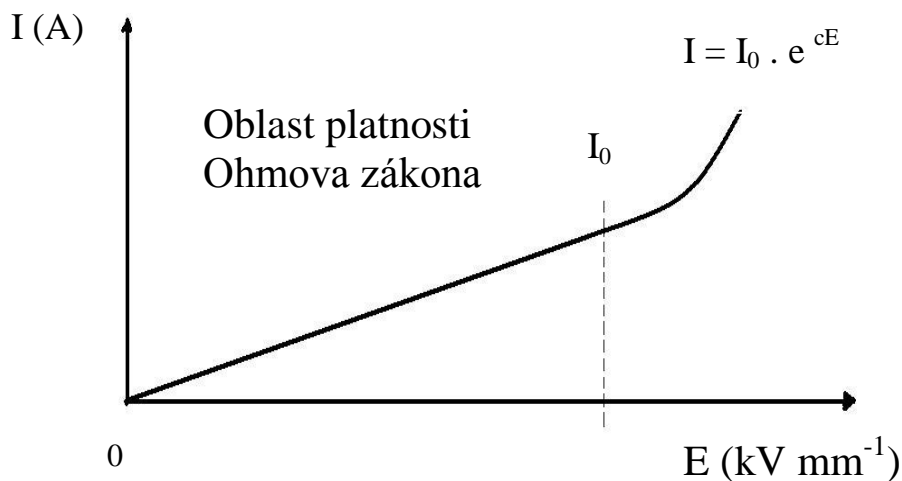
Elektrická vodivost je fyzikální veličina, která popisuje schopnost materiálu vést elektrický proud. Její velikost silně ovlivňují hlavně složení kapaliny a její struktura, dále také množství příměsí a nečistot.

Kapalné izolanty se rozlišují na dvě hlavní skupiny:

- extrémně čisté kapalné izolanty,
- technicky čisté kapalné izolanty.



Obr. 1. Voltampérová charakteristika extrémně čistého kapalného izolantu [9]



Obr. 2. Voltampérová charakteristika technicky čistého kapalného izolantu [9]

Na Obr. 1 a Obr. 2 můžeme vidět rozdíly, které se vyskytují u extrémně čistých a technicky čistých kapalných izolantů – zatímco u extrémně čistých kapalných izolantů je oblast nasyceného proudu, u technicky čistých kapalných izolantů se tato oblast nevyskytuje [9].

Extrémně čisté kapalně izolanty mají velmi nízkou hladinu konduktivity $\gamma = 10^{-14} - 10^{-15} \text{ Sm}^{-1}$, ta je způsobena volnými nosiči elektrického náboje, které vznikají několika způsoby:

- ionizací neutrálních molekul (působením ionizujícího činidla – záření),
- tepelnou excitací elektronů,
- emisí elektronů z katody,
- disociací molekul vlastní kapaliny [9].

Technicky čisté kapalně izolanty mají v důsledku zvýšené koncentrace volných nosičů elektrického náboje hodnoty konduktivity $\gamma = 10^{-11} - 10^{-12} \text{ Sm}^{-1}$. Volné nosiče elektrického náboje jsou různého charakteru, závisí na druhu příměsí a velikosti přítomných částic. V technicky čistých kapalných izolantech se vyskytují dva typy vodivosti – iontová a elektroforetická.

Iontová elektrická vodivost kapalných izolantů se dělí na vodivost vlastní a nevlastní.

Nevlastní elektrická vodivost kapalných izolantů je způsobena disociovanými příměsemi a objevuje se u všech technicky čistých kapalných izolantů. Disociace příměsí závisí hlavně na jejich koncentraci, struktuře a relativní permitivitě rozpouštědla.

Vlastní elektrická vodivost kapalných izolantů je způsobena pohybem disociovaných molekul vlastního kapalného izolantu. Disociace závisí na relativní permitivitě izolantu [9].

Vliv vnějšího elektrického pole může vyvolat pohyb iontu v kapalném izolantu, ale může k němu dojít i při zachycení iontu na molekule a vytvoření jednoho celku. Iont se však může vlivem tepelného pohybu od molekuly odtrhnout. Při odtržení musí iont překonat určitou potenciálovou bariéru W , což je tzv. aktivační energie.

Pro popis pohybu volného iontu kapalinou se využívá model dvojité potenciálové jámy. Pravděpodobnost přeskočení iontu do jiné rovnovážné polohy je dána Boltzmannovým rozdělením:

$$P(A \rightarrow B) \approx e^{\frac{-W}{kT}}, \quad (1)$$

kde W je výška potenciálové bariéry, k je Boltzmannova konstanta, T je termodynamická teplota.

Určení počtu přeskoků, které připadají na jeden iont za jednu sekundu:

$$z = \frac{f_0 \cdot q \cdot l}{6 \cdot k \cdot T} \cdot E \cdot e^{\frac{-W}{kT}}, \quad (2)$$

kde z je počet přeskoků, f_0 je kmitočet vlastních tepelných kmitů okolo rovnovážných poloh, q je náboj iontu, E je elektrická intenzita.

Driftová pohyblivost iontu b vyvolaná působícím elektrickým polem je dána vztahem:

$$b = \frac{v}{E} = \frac{z \cdot l}{E} = \frac{f_0 \cdot q \cdot l^2}{6 \cdot k \cdot T} e^{\frac{-W}{kT}} \quad (3)$$

Z tohoto vztahu je vidět, že driftová pohyblivost není závislá na intenzitě slabého elektrického pole. V silných elektrických polích přírůstek energie iontu nelze zanedbat, driftová pohyblivost iontu tady závisí na intenzitě elektrického pole.

Za předpokladu, že kladné i záporné ionty mají stejnou pohyblivost, můžeme konduktivitu kapalného izolantu určit takto:

$$\gamma = n \cdot q \cdot b, \quad (4)$$

kde n je koncentrace volných nosičů náboje (iontů).

Pokud dosadíme z rovnice (3) do rovnice (4) získáme vztah:

$$\gamma = \frac{n \cdot f_0 \cdot q^2 \cdot l^2}{6 \cdot k \cdot T} e^{\frac{-W}{kT}}. \quad (5)$$

Pokud položíme

$$\frac{n \cdot f_0 \cdot q \cdot l^2}{6 \cdot k} = A, \quad (6)$$

$$\frac{W}{k} = a, \quad (7)$$

můžeme rovnici (5) přepsat na vztah:

$$\gamma = \frac{A}{T} e^{\frac{-a}{T}}. \quad (8)$$

Díky tomu, že $\frac{A}{T}$ se mění s teplotou podstatně méně, než exponenciální výraz, můžeme rovnici (8) převést na tvar:

$$\gamma = A' \cdot e^{\frac{-a}{T}}, \quad (9)$$

kde A' a a jsou materiálové konstanty.

Pro konduktivitu kapalných izolantů platí v úzkém intervalu teplot ještě následující vztah:

$$\gamma = \gamma_0 \cdot e^{\alpha \cdot \vartheta}, \quad (10)$$

kde γ_0 je konduktivita při 0 °C, ϑ je teplota.

Elektroforetická vodivost se od vodivosti iontové výrazně neliší. Vyskytuje se v koloidních systémech, které se vyznačují tím, že jsou tvořeny dvěma fázemi. Jedna fáze je ve formě jemných částic – drobné pevné částice, kapky. Tato fáze se nazývá disperzní. Je rozptýlena ve fázi druhé – disperzním prostředí. V kapalných izolantech se vyskytují emulze i suspenze. V emulzi jsou obě fáze kapaliny, zatímco v suspenzi je disperzní fáze tvořena pevnou látkou a disperzní prostředí je kapalné. Na povrchu částic disperzní fáze se nachází elektrické náboje, které svými silovými účinky zapříčiní, že se obě fáze neoddelí. Podle Coehnova pravidla se koloidní částice nabíjí kladným nábojem, je-li jejich relativní permitivita větší, než relativní permitivita disperzního prostředí. Pokud je jejich relativní permitivita menší, koloidní částice se nabíjí záporným nábojem [9].

1.2.1 Závislost elektrické vodivosti na struktuře kapalného izolantu

Elektrická vodivost kapalných izolantů závisí silně také na jejich struktuře. Podle jejich struktury, tedy podle chemických vazeb v molekulách kapalin můžeme kapalně izolanty rozdělit takto:

1. Kapaliny s kovalentními vazbami – v čistém stavu to jsou izolanty, které se dělí dále podle polárnosti vazeb:
 - Polární kapalně izolanty – vodivost má iontový charakter, ionty vznikají disociací molekul příměsí a nečistot a také částečnou disociací molekul vlastního kapalného izolantu. Většinou je v nich větší koncentrace nečistot, než v nepolárních izolantech, protože se v nich nečistoty lépe rozpouštějí a hůře se z nich odstraňují.
 - Silně polární kapalně izolanty – v praxi jsou jako izolační materiály nepoužitelné. Jsou to např. dokonale čistá voda, čistý nitrobenzen a další alkoholy a kyseliny.
 - Nepolární kapalně izolanty – elektrická vodivost má iontový charakter, ionty vznikají disociací molekul příměsí a nečistot v kapalném izolantu. Elektrickou vodivost nepolárních kapalných izolantů silně ovlivňuje voda, protože její molekuly snadno disociují a navíc podporují disociaci molekul příměsí a nečistot.
2. Kapaliny s kovovými vazbami – jedná se o roztavené kovy nebo jejich slitiny, jde o vodiče prvního druhu.
3. Kapaliny s iontovými vazbami – jde o roztoky elektrolytů, jsou to tedy vodiče druhé třídy bez elektroizolačních schopností [9].

1.2.2 Jevy vyskytující se na rozhraní elektroda – dielektrikum

Na rozhraní elektroda – dielektrikum se vyskytuje více jevů, které zajišťují, že dochází k přechodu volných nosičů náboje přes izolační vrstvu. Pochopení mechanismů jejich přechodu nám může pomoci optimalizovat izolační vrstvu tak, abychom maximálně omezili svodové proudy, ale nezhoršili tím další elektrické vlastnosti.

Schopnost izolační vrstvy zamezit průtoku svodových proudů na rozhraní elektroda – dielektrikum závisí na složení izolační vrstvy a také na tom, jestli izolační vrstva obsahuje nějaké příměsi a nečistoty, které degradují její izolační schopnosti.

Mezi hlavní jevy, které se vyskytují na rozhraní elektroda – dielektrikum patří Schottkyho a Poole – Frenkelův jev.

Schotkyho jev spočívá ve snížení výšky potenciálové bariéry a následné emise elektronů z kovové elektrody do izolantu.

Poole – Frenkelův jev spočívá v uvolnění nosičů náboje z pastí vlivem tepelné energie. Nosiče náboje poté překonají sníženou potenciálovou bariéru ve směru působení elektrického pole [3].

1.3 Metody měření velmi malých proudů

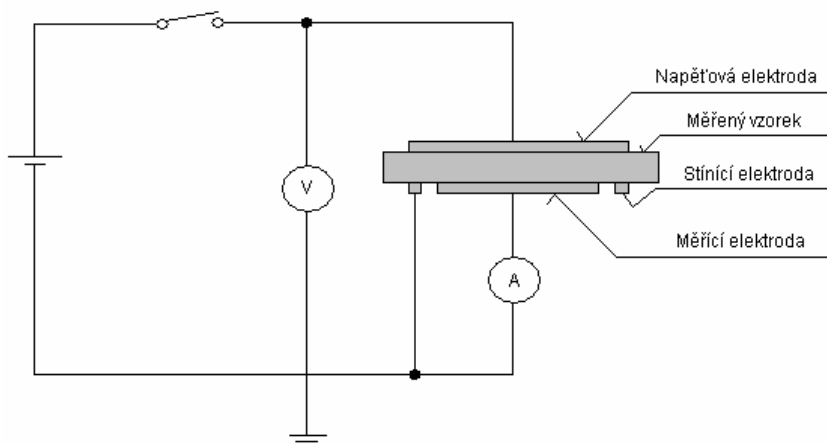
Pro měření velmi malých proudů se využívá několik metod, které můžeme rozdělit na metody přímé a porovnávací.

1.3.1 Metody přímé

Jsou založeny na současném měření proudu, který protéká neznámým odporem a stejnosměrného napětí, které je na tento odpor připojeno. Mezi tyto metody patří:

- **Voltampérová metoda**

Je to jedna z nejjednodušších metod pro přímé měření velmi malých proudů. Její zapojení je uvedeno na Obr. 3. Napětíové hladiny stejnosměrného napětí se volí v rozsahu 100, 250, 500, 1000, 2500, 5000, 10000, 15000 V. Pro měření protékajícího proudu se doporučuje používat ampérmetr s minimální citlivostí 10^{-16} A [9].



Obr. 3. Schéma zapojení pro měření velmi malých proudů voltampérovou metodou [17]

1.3.2 Metody porovnávací

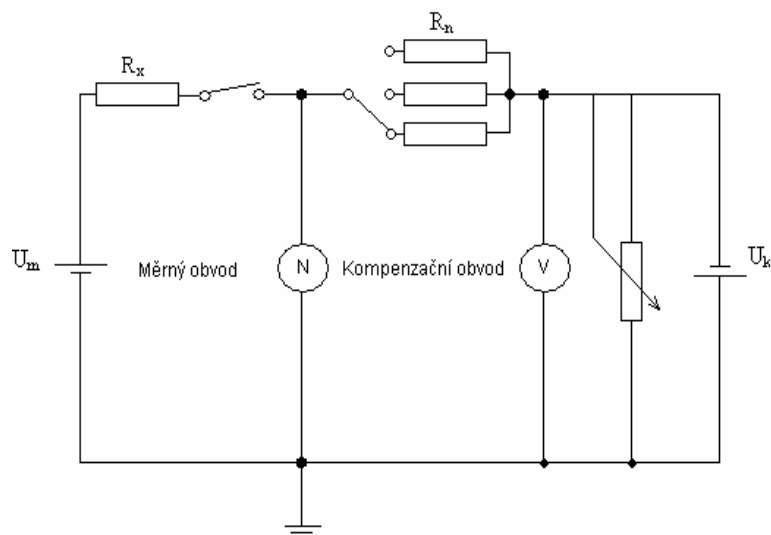
Tyto metody určují poměr mezi neznámým odporem a známým odporníkem v můstkovém zapojení. Mohou také porovnávat proudy, které protékají přes odpory při konstantním napětí. Mezi tyto metody patří:

- **Kompenzační metoda**

Zapojení této metody je vidět na Obr. 4. Zapojení je rozděleno na dva obvody – měrný obvod MO a kompenzační obvod KO. V MO je umístěn zdroj napětí U_M a neznámý odpor R_X připojený na měrné napětí. V KO je umístěn zdroj kompenzačního napětí U_K a referenční odpor R_N . Princip této metody je v kompenzaci úbytku napětí na známém odporu R_N pomocí proměnlivého napětí U_K . Pokud bude obvod vykompenzován, nebude nulovým indikátorem N protékat proud a neznámý odpor R_X zjistíme ze vztahu:

$$R_X = R_N \frac{U_M}{U_K}, \quad (11)$$

kde U_M je měrné napětí a U_K je kompenzační napětí na voltmetru [9].

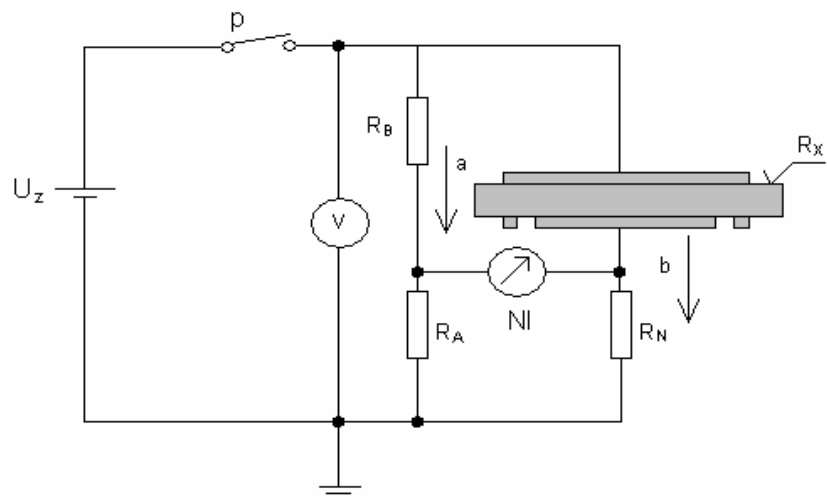


Obr. 4. Schéma zapojení pro měření velmi malých proudů kompenzační metodou [17]

- **Wheatsonova metoda**

Tato metoda vychází z principu Wheatsonova můstku, to znamená, že jde o porovnání neznámého odporu s odporem známým, který má velkou hodnotu. Proměřovaný odpor je zapojen do jedné větve Wheatsonova můstku. Do dalších tří větví jsou zapojeny známé odpory. Odpor R_B slouží jako dekáda, odpor R_A slouží k jemnému vyrovnávání a odpor R_N se nemění. Nulový indikátor tvoří stejnosměrný zesilovač s odpory v jakékoliv větvi můstku. Pokud je můstek vyvážený, platí pro odpor R_X vztah:

$$R_x = R_N \frac{R_B}{R_A}. \quad (12)$$



Obr. 5. : Schéma zapojení pro měření velmi malých proudů pomocí Wheatsonova můstku [17]

Podle praktických zkušeností je pro měření proměnných absorpčních proudů nejvhodnější voltampérová metoda, která je při použití kvalitních měřicích přístrojů schopná měřit proudy až do $10^{-14} - 10^{-16}$ A [9].

1.4 Zdroje chyb při měření velmi malých proudů

Při měření velmi malých proudů je nutné vyvarovat se vnášení jakýchkoliv chyb do měření, protože i malá chyba může při měření velmi malých hodnot značně ovlivnit jeho výsledek. Tyto chyby většinou pramení ze dvou zdrojů:

- vnější zdroje
- měřicí přístroj [7].

1.4.1 Vnější zdroje chyb

- **Svodové proudy a stínění**

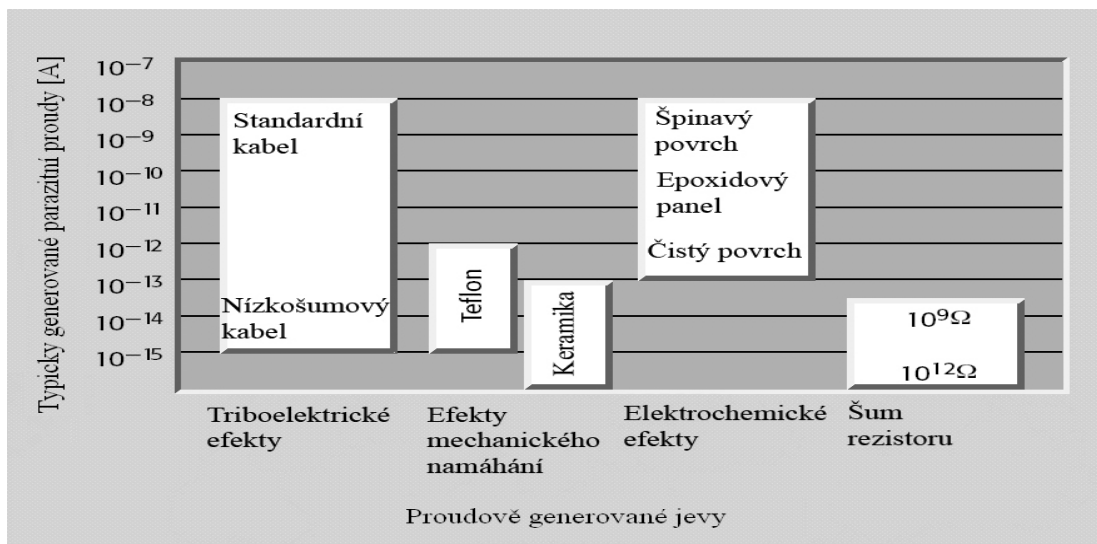
Základem správného měření bez vnesení nežádoucích chyb měření je omezení svodových proudů, použití kvalitních materiálů, redukce úrovně vlhkosti v testovaném prostředí a použití stínění.

Svodové proudy jsou tvořeny „zbloudilými“ odporovými cestami mezi měřeným obvodem a zdrojem elektrického napětí. Tyto proudy značně ovlivňují přesnost měření velmi malých proudů. Dalším důležitým pravidlem je použití kvalitních izolačních materiálů při stavbě zkušebního obvodu, kterými lze také předejít svodovým proudům. Velmi účinným způsobem, jak snížit svodové proudy, je také použití stínění, které současně pomáhá snížit i účinek parazitních kapacit v měřeném obvodu.

Měření velmi malých proudů hodně ovlivňuje i relativní vlhkost. Každý typ izolačního materiálu absorbuje různé množství vlhkosti z okolí, proto je vhodné vybrat izolační materiál, u kterého nedochází k tvorbě tenkého spojitého vodního filmu na povrchu materiálu. U materiálu, který snadno absorbuje vlhkost, je vhodné provádět experiment v kontrolovaných místnostech nebo klimatických komorách, kde lze zajistit stabilní podmínky. V některých případech může být izolační látka iontově znečištěna, čímž by mohla tvořit rušivý proud obzvláště při vysoké vlhkosti [7].

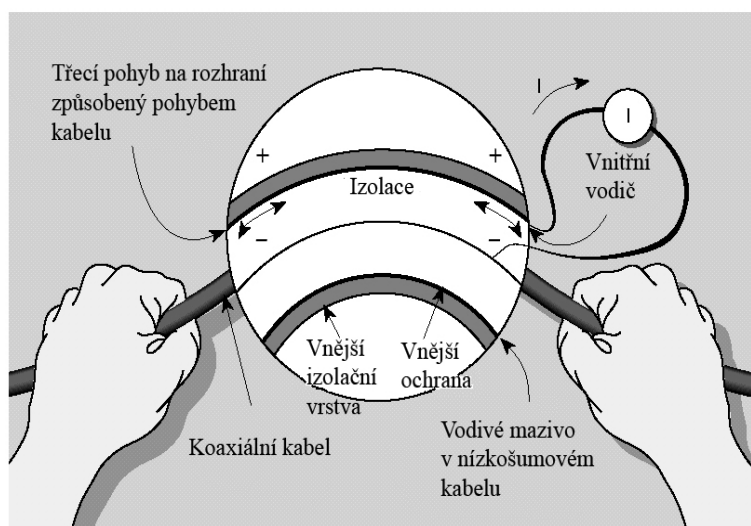
- **Vytváření chybných proudů**

Odchylky, které způsobují proudy vytvořené mimo měřicí zařízení, se sčítají s naměřeným proudem a tím způsobují chybné hodnoty na měřicím zařízení. Vznik těchto proudů může být způsoben iontovým znečištěním v izolačním materiálu, triboelektrickými a piezoelektrickými efekty a také může pocházet od vodičů, které jsou připojené k měřicímu přístroji. Obr. 6 ukazuje velikosti a množství takto vytvořených parazitních proudů [6].



Obr. 6. : Velikosti proudů způsobujících chyby měření [11]

- **Triboelektrický efekt**



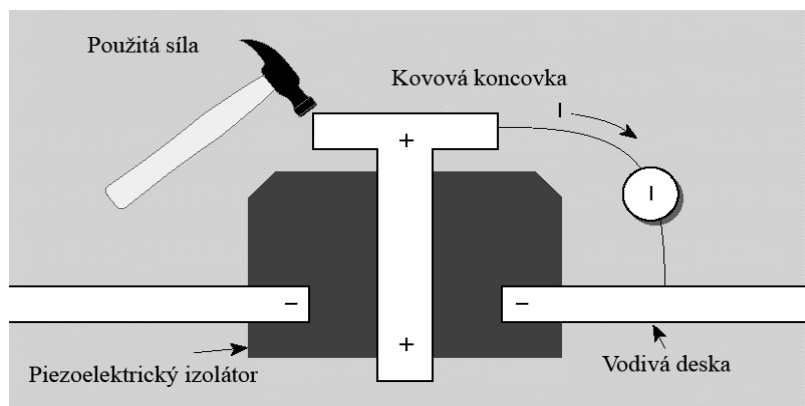
Obr. 7. : Triboelektrický efekt [11]

Triboelektrické proudy jsou tvořeny nábojem, který vzniká třením mezi vodičem a izolačním materiálem. Na tomto rozhraní se vytváří nábojová nerovnováha, která způsobí tok proudu. Typickým příkladem tohoto jevu mohou být elektrické proudy vytvořené izolačními materiály a vodiči, u kterých dochází k vzájemnému tření v koaxiálním kabelu.

Tento efekt je možno snížit použitím „nízkošumových“ kabelů vytvořených ze speciálních materiálů.

Šum ale vytváří i „nízkošumový“ kabel, a to pokud je vystaven vibracím nebo je spojován, proto by měla všechna spojení zůstat krátká [7].

- **Piezoelektrický efekt**



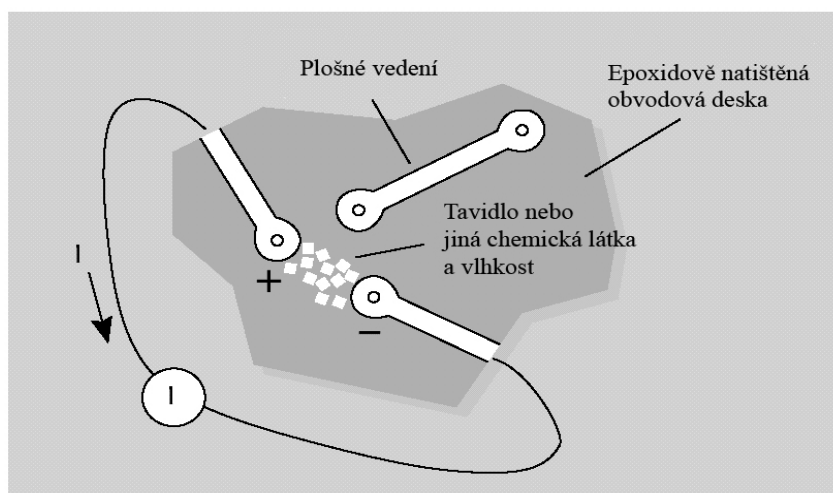
Obr. 8. : Piezoelektrický efekt [11]

Piezoelektrické proudy jsou tvořeny mechanickým namáháním působícím na krystalické materiály, které se používají pro izolaci konektorů a koncovek pro spojování s přístroji.

Jako materiály piezoelektrické se mohou rovněž chovat některé plasty, u kterých se mohou vyskytnout nerovnoměrně rozložené náboje.

K minimalizování proudů, které způsobují tyto účinky, je vhodné potlačit mechanické namáhání izolačních materiálů. Důležité je také používat materiály s minimálními piezoelektrickými vlastnostmi [7].

- **Elektrochemický efekt**



Obr. 9. : *Chemický efekt* [11]

Zdrojem chyb při měření mohou být také elektrochemické efekty. Ty způsobují snížení odporu izolačního materiálu vysokou vlhkostí okolí nebo iontovým znečištěním. Vysoká vlhkost se projeví kondenzací nebo absorpcí vlhkosti na zkušební materiál. Iontové znečištění na zkušebním materiálu může být způsobeno oleji, solí, nebo tavidly pájky. Prvním výsledkem těchto znečištění je snížení izolačního odporu. Kombinace vysoké vlhkosti a iontového znečištění může dále způsobit vytvoření vodivé cesty. Také může dojít k tomu, že se izolační materiál začne chovat jako elektrochemický článek s vysokým předřadným odporem. Elektrochemický článek vytvořený tímto způsobem může způsobit, že budou zdrojem protékat malé proudy.

Pro minimalizaci účinků znečištění a vlhkosti, by měli být vybírány hydrofobní izolační látky [7].

1.4.2 Chyby způsobené měřicím přístrojem

- **Vytváření chybných proudů**

Proudy vytvořené uvnitř měřicích přístrojů mohou způsobit chybu při měření. Tyto chybné proudy se přičtou k proudu měřenému a přístroj ukáže chybnou hodnotu. Ideální ampérmetr nastaví nulu, pokud jsou jeho vstupní koncovky ponechány otevřené. Reálné ampérmetry ale vytvářejí malý proud, který protéká obvodem, i když jsou vstupní koncovky otevřené. Je způsoben spádovými proudy aktivních obvodových prvků a svodovými proudy, které procházejí izolanty uvnitř měřicího přístroje. Velikost chybně naměřených proudů je určena zvoleným proudovým rozsahem měřicího přístroje [7].

- **Šum vstupního signálu**

Výrazně ovlivnit měření malých proudů může i šum vstupního napětí. Ten většinou vytváří zdroj. Pokud jej měřicí přístroj nerozpozná, může dojít k zobrazení chybné hodnoty proudu. Tento šum vstupního signálu je ovlivňován kapacitou a odporem zdroje [7].

- **Ochrana proti přetížení**

U měřicích přístrojů hrozí i poškození při přiložení příliš vysokého napětí na vstup. Maximální napětí, které je dovoleno přiložit na vstup mají přístroje uvedeny ve svých katalogových listech. Při překročení tohoto napětí může přístroj ještě fungovat, ale hodnoty, které zobrazuje na výstupu mohou být chybné. Proto se používá v přímo v přístrojích ochrany proti přetížení [7].

2 Experimentální část

2.1 Měřicí pracoviště

Pro měření nabíjecích a vybíjecích proudů, z nichž se poté počítají potřebné veličiny bylo použito měřicí sestavy od firmy TETTEX A. G. ZURICH, dále elektrometru Keithley 617 a vysokonapěťového zdroje SRS PS350, který byl po poruše nahrazen přístrojem Megaohmmetr IM 6. Přístroje byly propojeny s počítačem přes síť pomocí brány Agilent E5810A.

2.1.1 TETTEX 2903

Měřicí systém od firmy TETTEX se skládá z měřicího systému s válcovým kondenzátorem typu 2903 s ochranným kroužkem pro kapalně materiály, dále z regulátoru teploty typu 2965 a měřiče teploty typu 2105c.



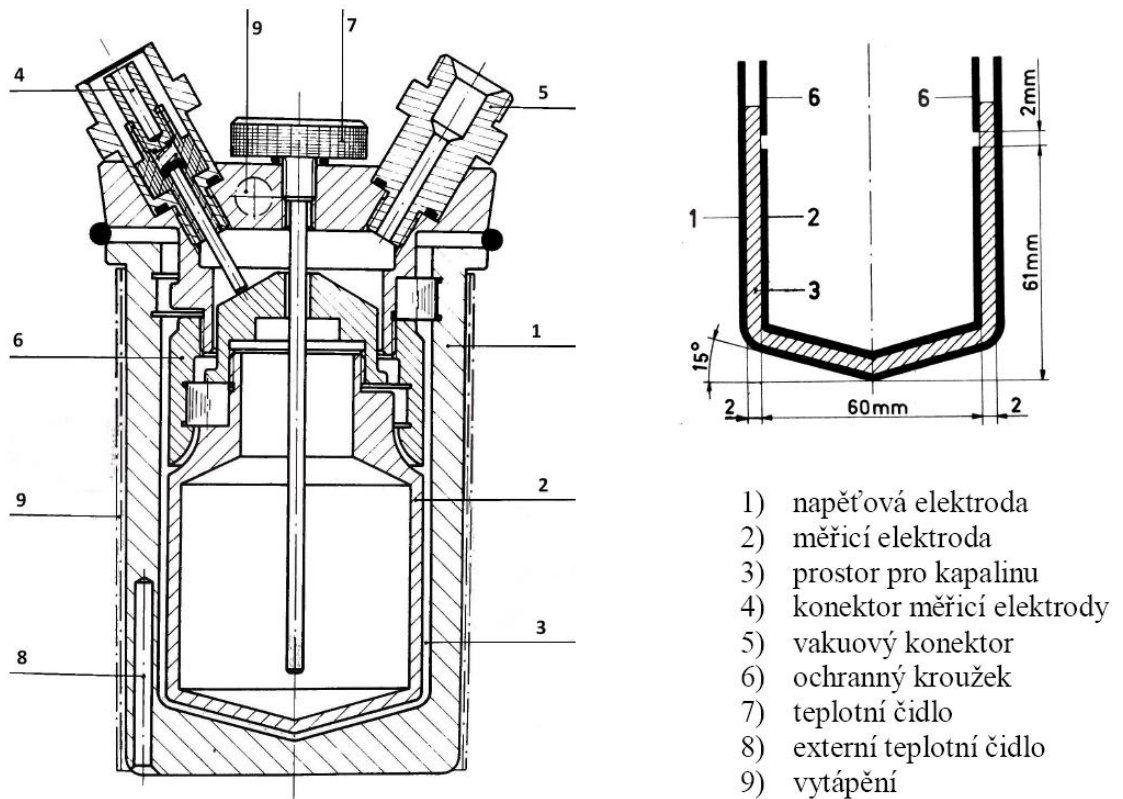
Obr. 10. Měřicí systém 2903 s válcovým kondenzátorem [16]

Technické parametry měřicího systému 2903 :

Rozteč elektrod (mm)	2
Kapacita naprázdno (pF)	60
Maximální napětí (V)	2000
Požadované množství kapaliny (cm ³)	40
Rozměry (mm)	průměr 240 x 220

[16]

Vnitřní schéma systému 2903 :



Obr. 11. Vnitřní schéma měřicího systému 2903 [16]

Pro výpočet měrné rezistivity se u tohoto elektrodového systému používá vztah :

$$\rho = \frac{R \cdot C_0}{\varepsilon_0}, \quad (13)$$

kde R je odpor měřené kapaliny, C_0 je kapacita elektrodového systému naprázdno, ε_0 je absolutní permitivita [16].

2.1.2 Elektrometr Keithley 617

Je to vysoce citlivý přístroj pro měření napětí, proudu, náboje a odporu [8].

Měřicí rozsah elektrometru Keithley 617:

Měření napětí	10 μ V – 200V
Měření proudu	0,1 fA – 20 mA
Měření odporu	0,1 Ω – 10 ¹⁶ Ω
Měření náboje	20 nC



Obr. 12. Elektrometr Keithley 617 [8]

2.1.3 Vysokonapěťový zdroj SRS PS 350

Je to přesný a programovatelný přístroj pro využití v laboratořích. Má možnost využití opačné polaroty a nízkou hodnotu zvlnění. Výstupní napětí můžeme nastavit pomocí předního panelu, vzdáleného analogového napětí nebo pomocí GPIB rozhraní.[15]

Výstupní napětí	50 V – 5000 V
Rozlišovací schopnost	1 V
Výstupní proud	max. 5 mA



Obr. 13. Vysokonapěťový zdroj SRS PS350 [15]

2.1.4 Megaohmmeter IM 6

Tento přístroj slouží k přesnému měření velkých odporů a velmi malých proudů [14].

Parametry přístroje IM 6 :

Výstupní napětí	1 V – 999 V
Měření odporu	1 M Ω – 100T Ω
Měření proudu	1 pA – 1 mA



Obr. 14. Megaohmmeter IM 6 [14]

2.1.5 Brána Agilent E5810A

Pomocí brány Agilent E5810A byly přes GPIB rozhraní propojeny přístroje přes internetovou síť s počítačem [1].



Obr. 15. Brána Agilent E5810A [1]

2.2 Zkušební vzorky

Pro měření se používalo dvou typů elektroizolačních olejů – MIDEL 7131 a TRAFON.

MIDEL 7131 je celosvětově vyzkoušená a osvědčená syntetická izolační kapalina na bázi organických esterů. Používá se jako náhrada za minerální oleje v transformátorech tam, kde je nutná zvýšená ochrana lidí a majetku před nebezpečím ohně, nebo v místech kde jsou zvýšené požadavky na ochranu životního prostředí.

MIDEL 7131 byl vyroben s izolačními a chladicími schopnostmi srovnatelnými s vlastnostmi běžně používaných minerálních olejů a jeho nízká vlhkost a čistý vzhled odpovídají požadavkům výrobců transformátorů. Dobře se snáší se standardními materiály používanými při výrobě transformátorů. Části plněné olejem MIDEL 7131 nemusí být při výrobě nijak upravovány co se týče vinutí nebo chladicích systémů.

Je velmi dobře odolný proti oxidaci a je schopen absorbovat mnohem více vlhkosti než minerální oleje, bez projevů zhoršení jeho funkce jako izolantu.

V hermeticky uzavřených transformátorech pracujících při běžných teplotách, je MIDEL 7131 schopen absorbovat vlhkost produkovanou rozpadem celulózy z vinutí a v době životnosti transformátoru je nepravděpodobné, že by MIDEL 7131 potřeboval údržbu [10].

PARAMO TRAFON je neinhibovaný transformátorový olej s vynikajícími elektroizolačními vlastnostmi. Je vyroben z jakostního hydrogenovaného hluboce rafinovaného základového oleje, který se získává z naftenické ropy. Vyznačuje se velmi dobrou oxidační stabilitou.

PARAMO TRAFON je určen jako izolační a chladicí kapalina do transformátorů všech napěťových hladin, včetně strojů nejvyšších napětí a výkonů. Lze ho použít i do spínačů, stykačů, kondenzátorů a jiných elektrických zařízení [12].

2.3 Způsob měření

Měřicí pracoviště bylo sestaveno z uvedených přístrojů, které byly pomocí GPIB sběrnice propojeny s bránou Agilent E5810A. Pomocí internetové sítě poté došlo k propojení přístrojů s počítačem. Samotné měření absorpčních charakteristik probíhalo při napětí 500 V. Měření probíhalo při teplotách 20 °C, 40 °C, 60 °C a 80 °C. Nejprve byl měřený vzorek kapalného izolantu měřen 24 hodin při připojeném napětí – tedy při nabíjení, poté bylo napětí odpojeno a vzorek byl měřen 24 hodin při vybíjení. Při měření byl k elektrodovému systému Tettex 2903 připojen teplotní regulátor Tettex typ 2965, který zaručoval konstantní teplotu měřeného vzorku.

Před vlastním proměřováním vzorku při teplotách 40 °C, 60 °C a 80 °C byl kapalným izolantem 24 hodin předem vyhřátý na danou teplotu, která byla poté udržována, aby byl vzorek dostatečně prohřátý a předešlo se chybám při měření.

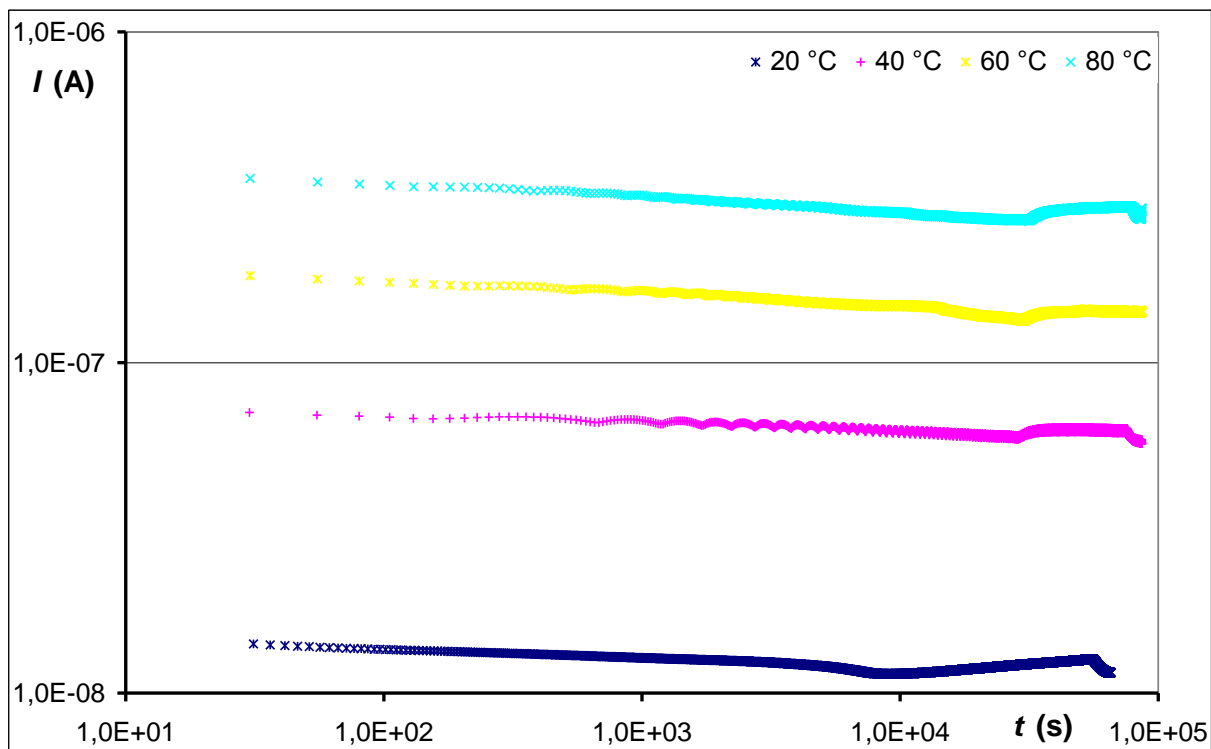
Kvůli tomu, aby bylo měření automatizováno, byl vytvořen řídicí program, pomocí kterého se celé měření ovládalo. Tento program byl vytvořen v programovém rozhraní VEE Pro od firmy Agilent Technologies.



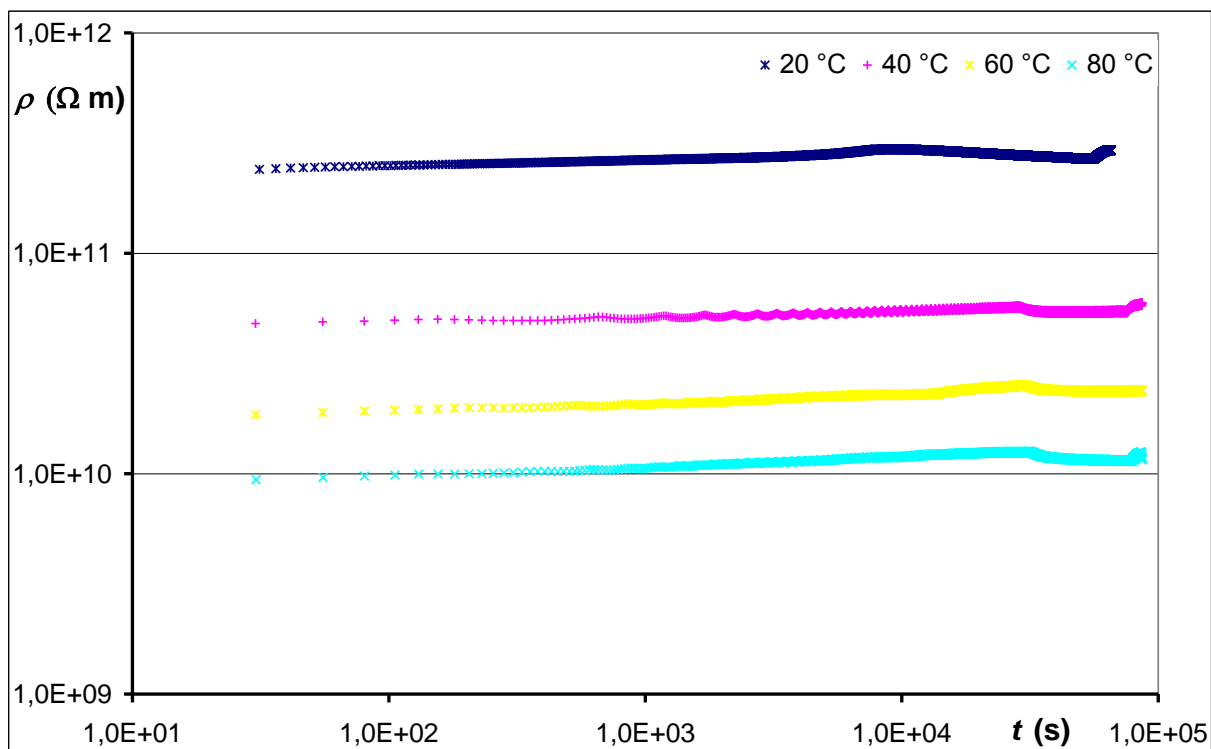
Obr. 16. Grafická podoba vytvořeného ovládacího programu

Program byl vytvořen tak, aby plně komunikoval s měřicími přístroji. V jednoduchém okně programu se nastaví požadovaná měřená veličina, požadované napětí, doba měření. Program po zahájení měření zapisoval výstupy, které získal z měřících přístrojů do programu Microsoft Excel, který byl také využíván při výpočtech hodnot měrné rezistivity z naměřených hodnot a nakonec v něm byly sestrojeny grafické podoby naměřených a vypočtených veličin.

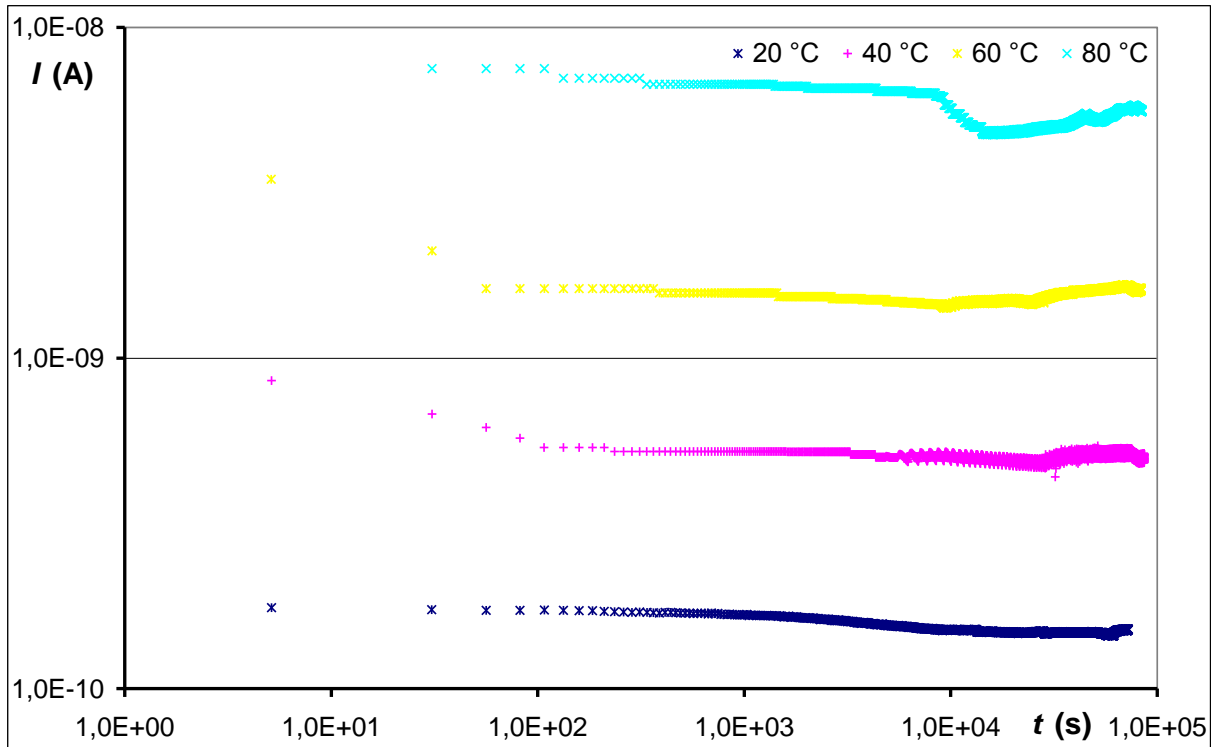
2.4 Výsledky měření



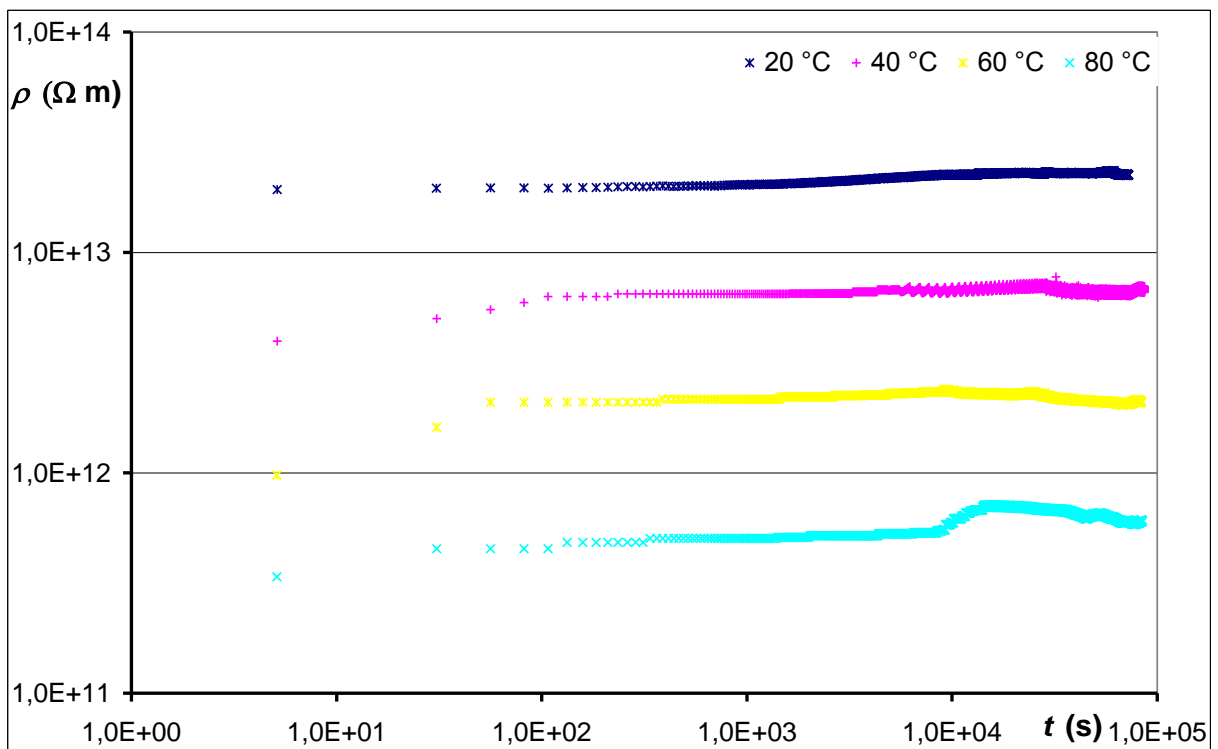
Obr. 17. Závislost nabíjecích proudů na čase s teplotou jako parametrem pro izolační kapalinu MIDEL 7131



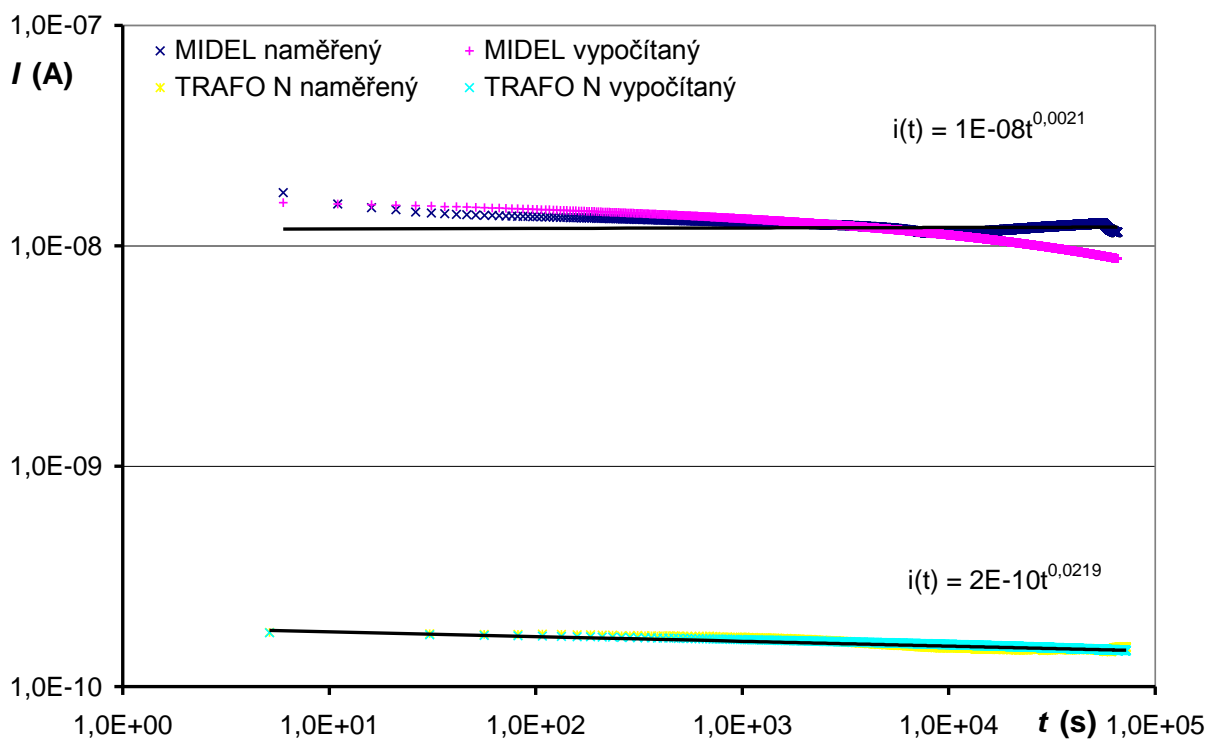
Obr. 18. Závislost vnitřní rezistivity na čase s teplotou jako parametrem pro izolační kapalinu MIDEL 7131



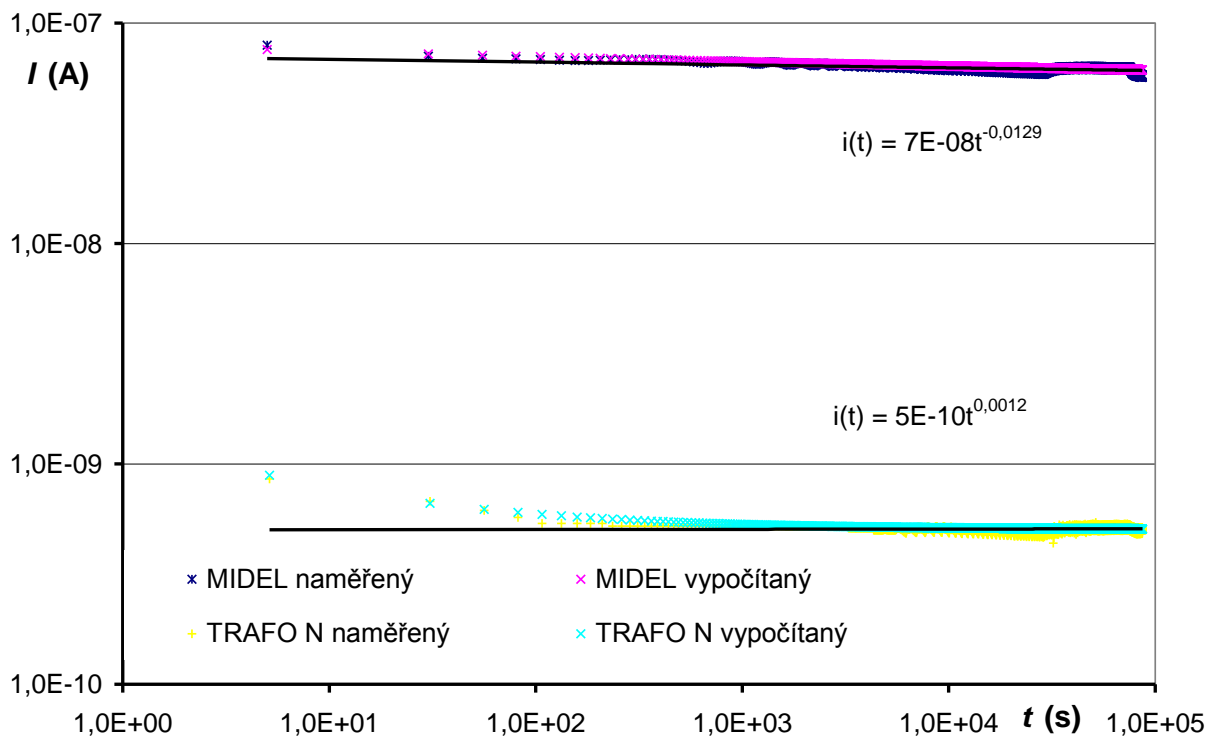
Obr. 19. Závislost nabíjecích proudů na čase s teplotou jako parametrem pro izolační kapalinu TRAFON



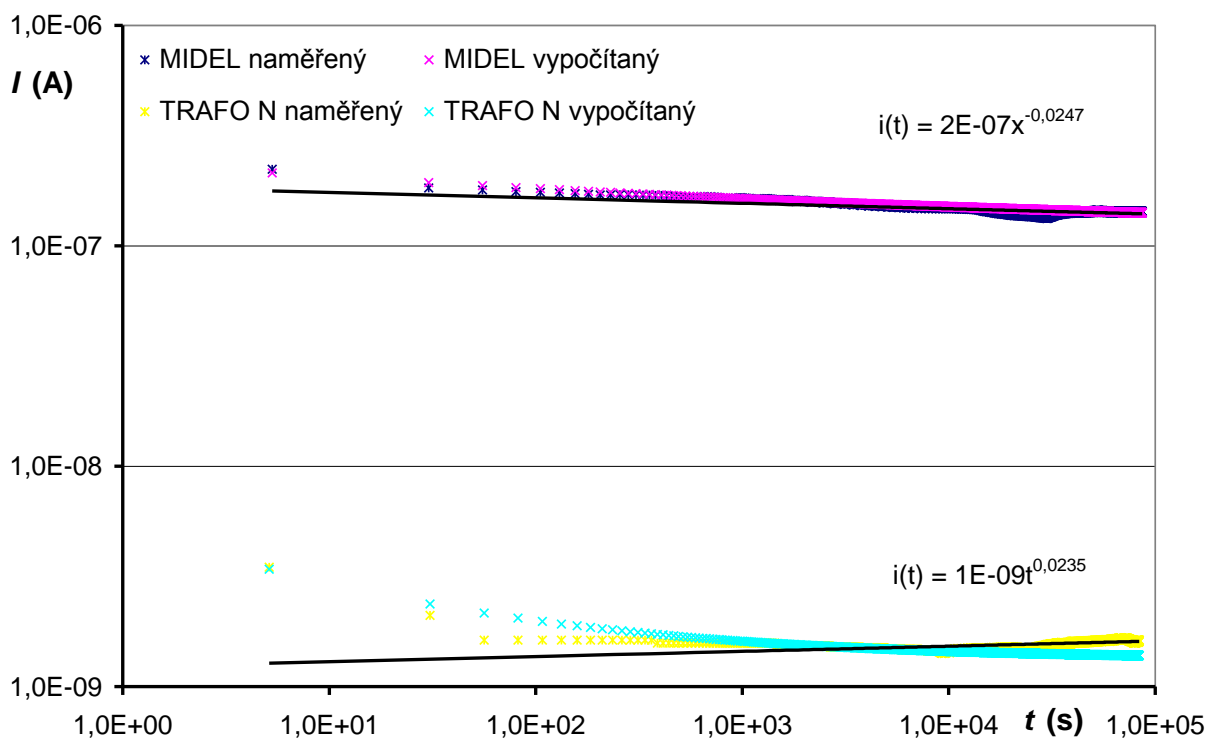
Obr. 20. Závislost vnitřní rezistivity na čase s teplotou jako parametrem pro izolační kapalinu TRAFON



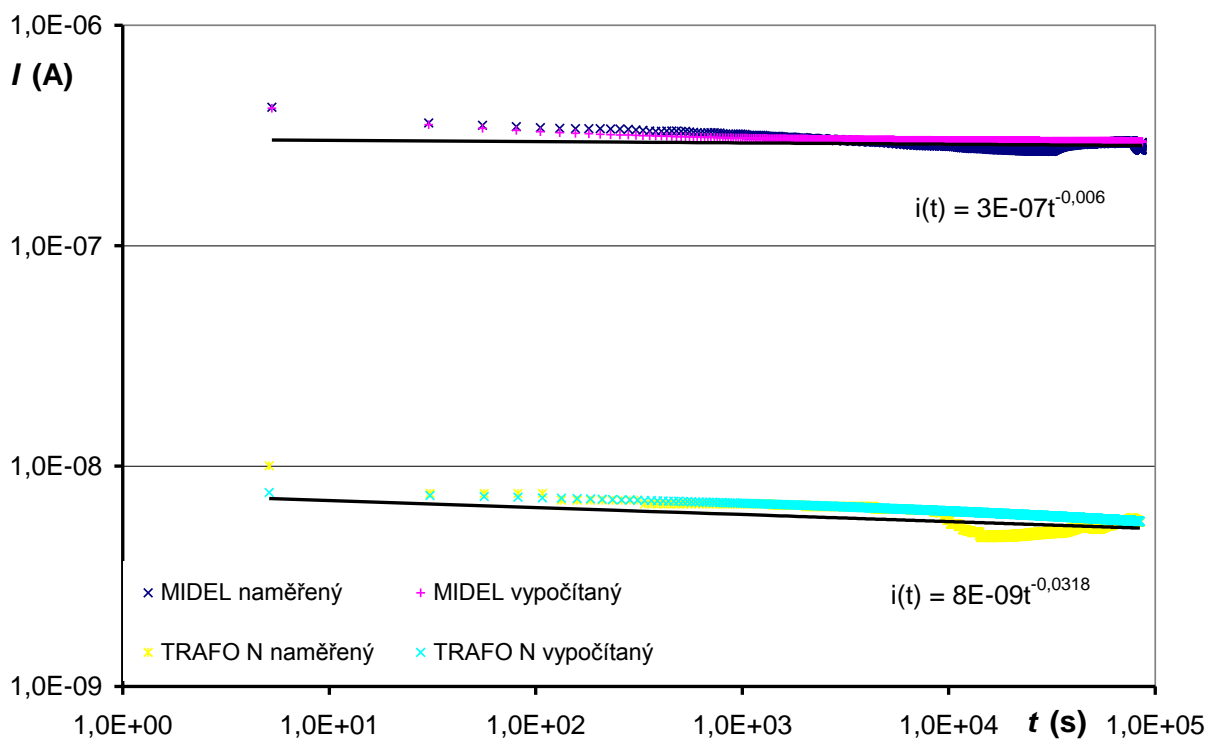
Obr. 21. Závislost nabíjecích proudů naměřených a vypočítaných na čase při teplotě 20 °C



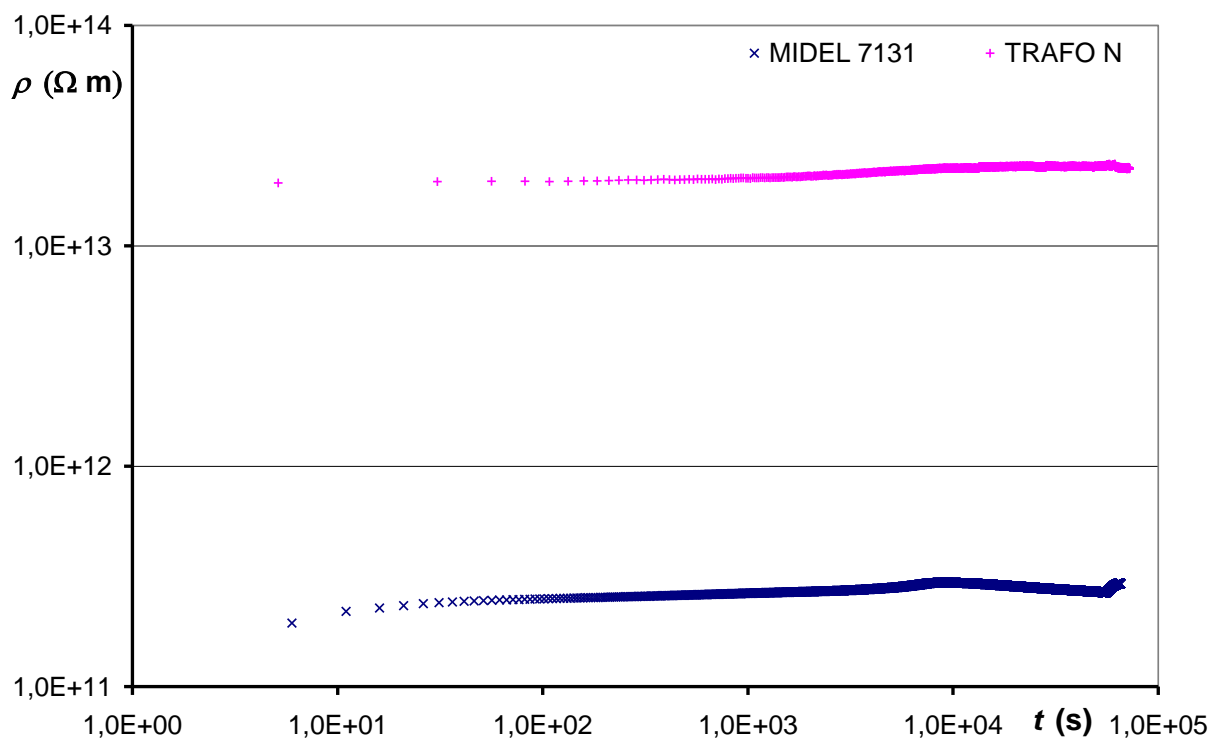
Obr. 22. Závislost nabíjecích proudů naměřených a vypočítaných na čase při teplotě 40 °C



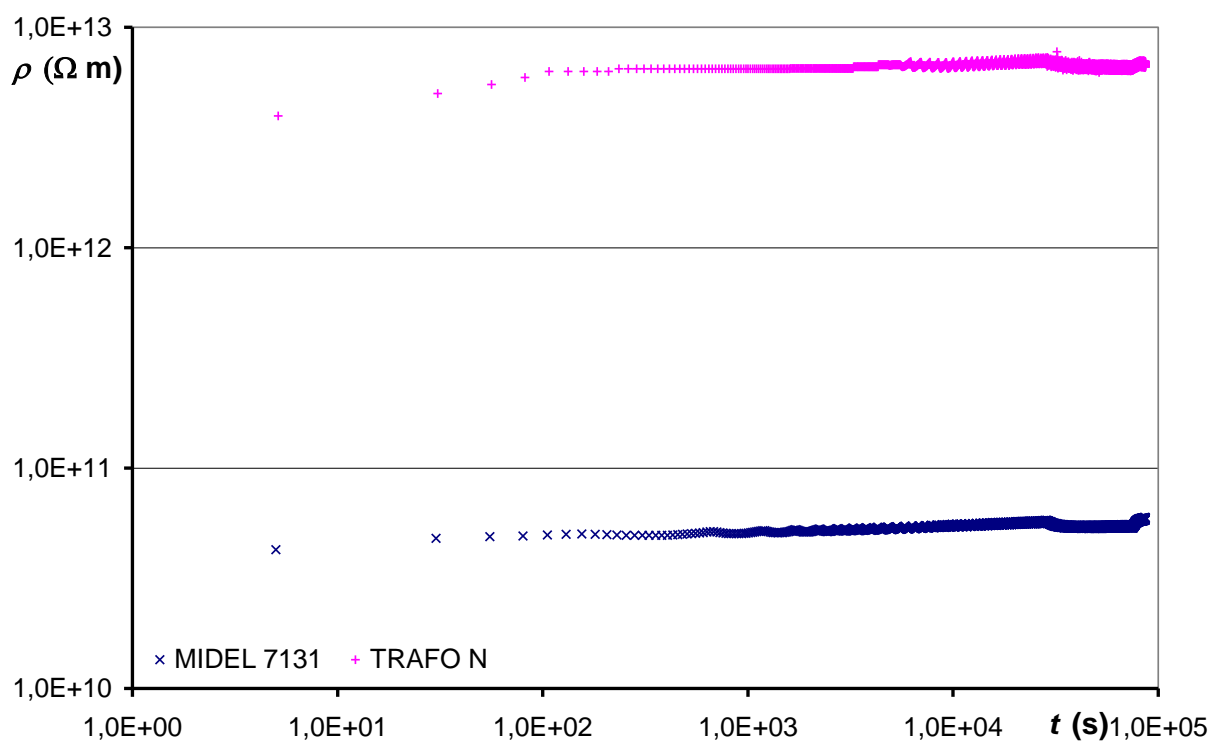
Obr. 23. Závislost nabíjecích proudů naměřených a vypočítaných na čase při teplotě 60 °C



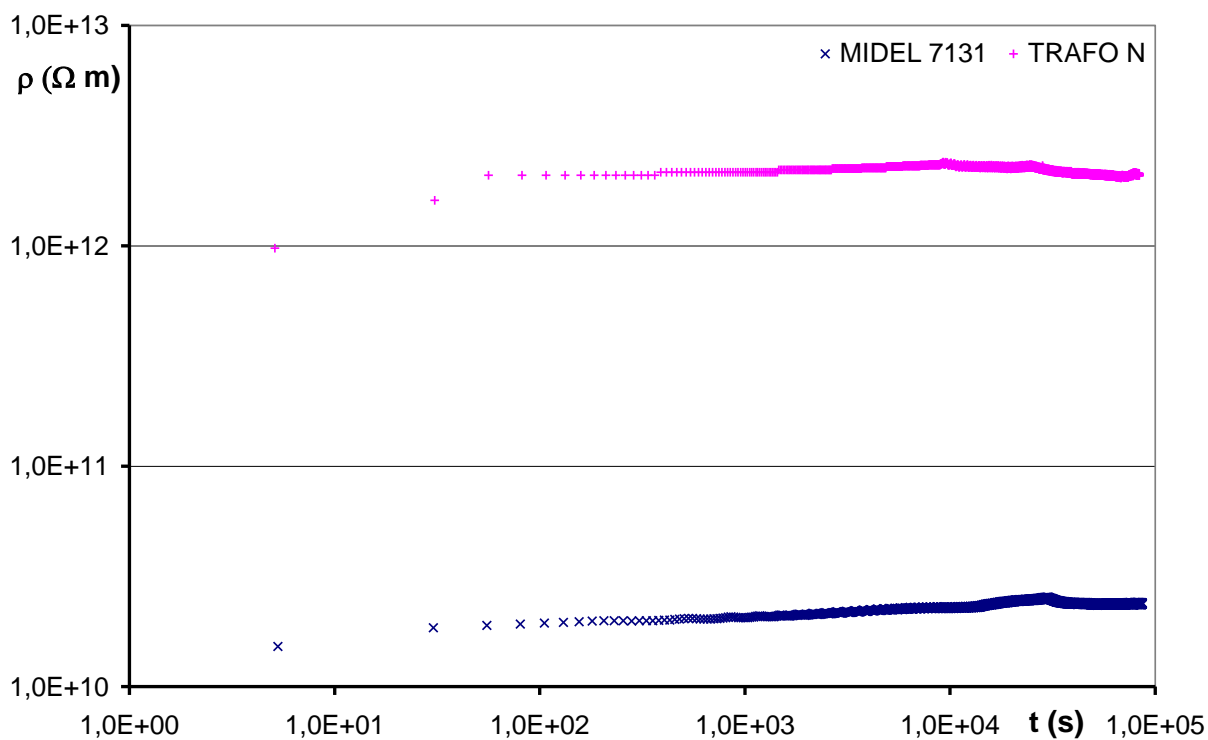
Obr. 24. Závislost nabíjecích proudů naměřených a vypočítaných na čase při teplotě 80 °C



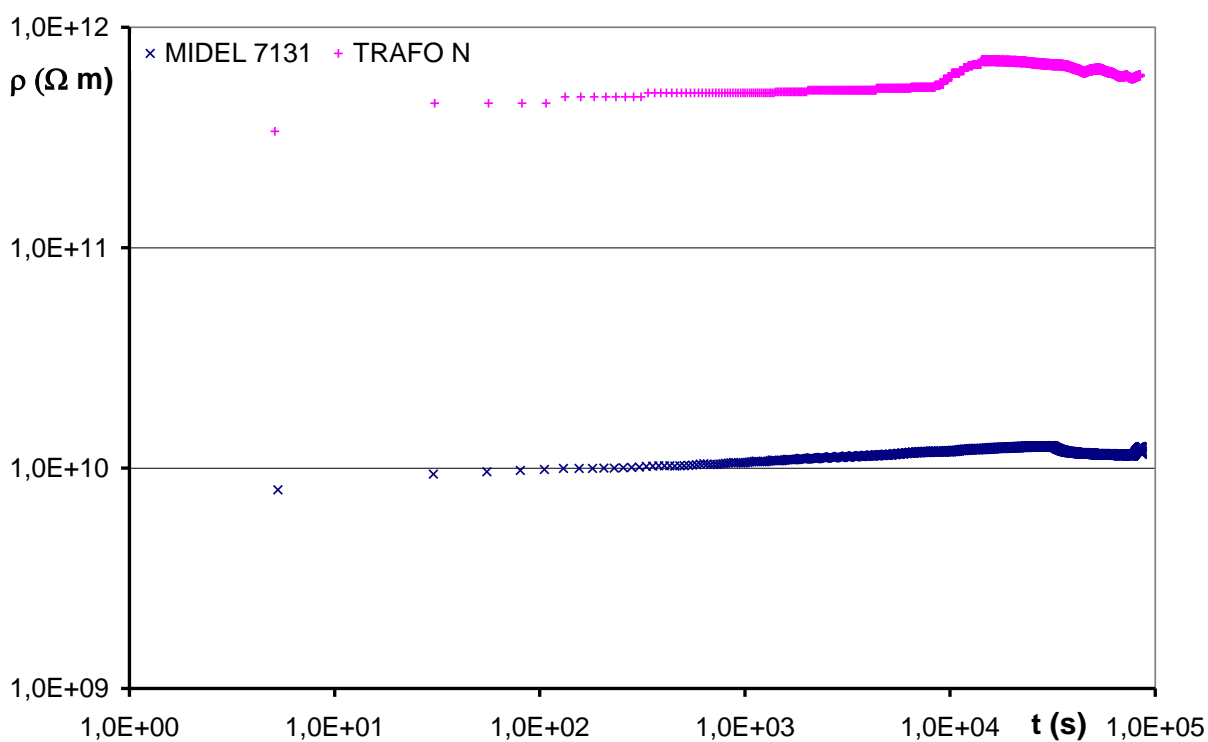
Obr. 25. Závislost vnitřní rezistivity na čase při teplotě 20 °C



Obr. 26. Závislost vnitřní rezistivity na čase při teplotě 40 °C



Obr. 27. Závislost vnitřní rezistivity na čase při teplotě 60 °C



Obr. 28. Závislost vnitřní rezistivity na čase při teplotě 80 °C

2.5 Matematická interpretace výsledků

Pro ověření naměřených hodnot byla vypočtena náhradní matematická funkce k časové závislosti nabíjecího proudu.

Výpočet této náhradní funkce vychází ze tří rovnic o třech neznámých:

$$\begin{aligned}I_1 &= A \cdot t_1^{-n} + I_{vod} \\I_2 &= A \cdot t_2^{-n} + I_{vod} , \\I_3 &= A \cdot t_3^{-n} + I_{vod}\end{aligned}\tag{14}$$

kde I_1 je proud a t_1 je čas v bodě měření 1, I_2 je proud a t_2 je čas v bodě měření 2, I_3 je proud a t_3 je čas v bodě měření 3. A a n jsou konstanty a I_{vod} je vodivostní složka proudu.

Při řešení soustavy rovnic byla druhá rovnice odečtena od první:

$$I_1 - I_2 = A \cdot (t_1^{-n} - t_2^{-n}).\tag{15}$$

Z této rovnice byla vyjádřena konstanta A :

$$A = \frac{I_1 - I_2}{t_1^{-n} - t_2^{-n}}.\tag{16}$$

Ta byla poté dosazena do druhé rovnice:

$$I_2 = \frac{I_1 - I_2}{t_1^{-n} - t_2^{-n}} \cdot t_2^{-n} + I_{vod},\tag{17}$$

ze které se vyjádří vodivostní složka proudu:

$$I_{vod} = I_2 - \frac{I_1 - I_2}{t_1^{-n} - t_2^{-n}} \cdot t_2^{-n}.\tag{18}$$

Po dosazení vyjádřených veličin do třetí rovnice a jejich úpravách, bylo dosaženo vztahu:

$$\frac{I_3 - I_2}{I_1 - I_2} = \frac{t_3^{-n} - t_2^{-n}}{t_1^{-n} - t_2^{-n}}.\tag{19}$$

Tato rovnice nešla řešit analytickou metodou, proto byl v Matlabu vytvořen program, který vypočítal konstantu n .

Zdrojový kód programu, který byl vytvořen v Matlabu :

```
clear all
```

```
syms x
```

```
F = (8413.5214^(-x)-3003.883^(-x))/(10.996^(-x)-3003.883^(-x))+0.3226;
```

```
n = solve ( F )
```

Výstupem z tohoto programu byla hodnota konstanty n , pomocí které byla dopočítána konstanta A a vodivostní složka proudu I_{vod} . Poté byla v programu Microsoft Excel vypočítána hodnota proudu, která byla porovnána s hodnotou naměřenou.

2.6 Vyhodnocení měření

Na obrázku Obr. 17 je vidět, že s rostoucí teplotou při měření u oleje MIDEL 7131 se zvyšuje hodnota nabíjecího proudu od $1,39 \cdot 10^{-8}$ A při 20 °C do $4,25 \cdot 10^{-7}$ A při 80 °C. Uvedené zvýšení proudu je způsobeno zvýšenou pohyblivostí iontů kapaliny při zvyšování její teploty.

Při zvyšování proudu se zvyšující se teplotou dochází k poklesu vnitřní rezistivity elektroizolační kapaliny z hodnoty $2,44 \cdot 10^{11}$ Ω m na hodnotu $7,97 \cdot 10^9$ Ω m, jak je vidět na obrázku Obr. 18.

U minerálního oleje TRAFON s rostoucí teplotou stoupá hodnota nabíjecího proudu od $1,75 \cdot 10^{-10}$ A při 20 °C po hodnotu $1 \cdot 10^{-8}$ A při 80 °C. Vzdělání nabíjecího proudu a s tím související pokles vnitřní rezistivity je rovněž způsoben zvýšeným pohybem iontů minerálního oleje. Tyto průběhy jsou na Obr. 19 a Obr. 20.

Při porovnání hodnot nabíjecího proudu při teplotách 20 °C, 40 °C, 60 °C a 80 °C u olejů MIDEL 7131 a TRAFON na Obr. 21, Obr. 22, Obr. 23, Obr. 24 je zřetelné, že hodnoty u oleje MIDEL 7131 jsou asi o dva řády vyšší, než hodnoty u oleje TRAFON. Zároveň jsou na těchto grafech vyznačeny křivky matematických interpretací hodnot u obou olejů, které vychází z výpočtu náhradní matematické funkce. Výsledné naměřené křivky byly aproximovány mocninnou funkcí, jejíž rovnice je vždy uvedena u dané křivky.

Z porovnání hodnot vnitřní rezistivity při teplotách 20 °C, 40 °C, 60 °C a 80 °C mezi oleji MIDEL 7131 a TRAFON, které je uvedeno na Obr. 25, Obr. 26, Obr. 27, Obr. 28 vyplývá, že minerální olej TRAFON má u všech proměřovaných teplot vnitřní rezistivitu asi o dva řády vyšší, než syntetický olej MIDEL 7131.

3 Závěr

Hlavním cílem této diplomové práce bylo sestavení pracoviště pro měření absorpčních charakteristik u izolačních kapalin používaných v elektrotechnickém průmyslu a následné proměření vzorků těchto kapalin.

K měření byl vybrán minerální transformátorový olej TRAFON a biologicky odbouratelná syntetická kapalina MIDEL 7131, která se jako transformátorový olej používá také.

Z výsledků měření vyplývá, že minerální olej TRAFON má o asi o dva řády vyšší vnitřní rezistivitu než syntetický olej MIDEL 7131, díky čemuž je jeho vodivost menší, než vodivost syntetického oleje MIDEL 7131.

Oleje v transformátorech slouží pro přenos tepelné energie a jako izolant, proto je lepší, vzhledem k naměřeným hodnotám, použití minerálního oleje na bázi ropy TRAFON, který ale není biologicky odbouratelný.

Při matematické interpretaci naměřených výsledků křivky téměř kopírují průběhy křivek naměřených.

4 Použitá literatura

- [1] Agilent Technologies. *Agilent E5810A LAN/GPIB Gateway for Windows. User`s Guide* [cit. 2011-03-09]. Dostupné z: <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/E5810-90001.pdf>
- [2] Artbauer, J., Šedovič, J., Adamec, V. *Izolanty a izolácie*. Prvé vydanie. Bratislava: Alfa, 1969. 620 s.
- [3] Čičo, K. *Aplikácia Al₂O₃ dielektrických vrstiev v technológii tranzistorov s heteropriechodom na baze InAlN/GaN* [cit. 2011-05-19]. [Disertační práce]. Slovenská academia věd Bratislava, 2009. Dostupné z: <http://www.elu.sav.sk/news/sutaz/cico.pdf>
- [4] Jiráček, J. *Materiály a technická dokumentace*. Interní učební texty. FEKT VUT Brno, 2004
- [5] Jonscher, A.K. *Dielectric relaxation in solids*. London: Chelsea Dielectrics Press Limited, 1983. 380 p. ISBN 0-9508711-0-9.
- [6] Keithley Instruments, Inc., Cleveland. *Low level measurements Application note series*. 2006
- [7] Keithley Instruments, Inc., Cleveland. *Low level measurements handbook, sixth edition*. 2004. 247 p.
- [8] Keithley Instruments, Inc., Cleveland. *Programmable Electrometer Instruction Manual, 1984*.
- [9] Mentlík, V. *Dielektrické prvky a systémy*. BEN – technická literatura Praha 2006. 240 s. ISBN 80 – 7300 – 189 – 6.
- [10] MIDEL 7131. *Materiálový list oleje MIDEL 7131* [cit. 2011-04-10]. Dostupné z: http://midel.sk/index.php?co=nabidka_vice&id=6
- [11] Odehnal, M. *Dielektrická spektra kompozitního slídového materiálu při dlouhodobém teplotním namáhání*. [Diplomová práce]. VUT Brno, 2006.
- [12] PARAMO TRAFON. *Materiálový list oleje TRAFON* [cit. 2011-04-10]. Dostupné z: <http://www.omacz.cz/?p=2&kat=27>
- [13] Poljak, F. *Štruktúra a vlastnosti materiálov II*. Edičné stredisko SVŠT Bratislava, 1986. 155 s.
- [14] Radiometer; Copenhagen. *Přístrojový list Megohmmeteru IM 6* [cit. 2011-05-18]. Dostupné z: <http://www.helmut-singer.de/pdf/radiim6.pdf>

- [15] Stanford Research Systems. *PS350 Manual*, 2007.
- [16] Tettex A.G. Zurich. *Přístrojový list typu 2903* [cit. 2010-04-20]. Dostupné z:
< http://www.haefely.com/pdf/LL_2903.pdf >
- [17] Volf, M. *Využití stejnosměrných metod v diagnostice izolačních materiálů*.
[Diplomová práce]. VUT Brno, 2008.

Seznam symbolů

A^l	(-)	materiálová konstanta
a	(-)	materiálová konstanta
b	($\text{m}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$)	driftová pohyblivost iontu
E	(V m^{-1})	intenzita elektrického pole
f_0	(Hz)	kmitočet vlastních tepelných kmitů
I	(A)	elektrický proud
I_{vod}	(A)	vodivostní složka proudu
k	(J K^{-1})	Boltzmannova konstanta
n	(m^{-3})	koncentrace volných nosičů náboje
q	(C)	náboj
R_N	(Ω)	známý odpor
R_x	(Ω)	neznámý odpor
T	(K)	termodynamická teplota
t	(s)	čas
U	(V)	elektrické napětí
U_K	(V)	kompenzační napětí
U_M	(V)	měrné napětí
W	(kJ mol^{-1})	výška potenciálové bariéry
z	(-)	počet přeskoků iontů
ϵ_r	(-)	relativní permitivita
ϵ_0	(-)	absolutní permitivita
γ	(S m^{-1})	konduktivita
γ_0	(S m^{-1})	konduktivita při 0 °C
ρ	($\Omega \text{ m}$)	vnitřní rezistivita