

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra technologií a měření**

## **Diplomová práce**

**Nehomogenní dielektrikum a prostorový náboj**

**Pavel Musil**

**Plzeň 2017**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2016/2017

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Pavel MUSIL**

Osobní číslo: **E15N0029P**

Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**

Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**

Název tématu: **Nehomogenní dielektrikum a prostorový náboj**

Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

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

1. Popište v současnosti používané EIS pro vn .
2. Popište polarizace a vznik prostorového náboje v dielektrickém materiálu .
3. Uveďte metody měření prostorového náboje .
4. Popište možnosti experimentálního měření prostorového náboje .
5. Proveďte simulace elektrostatického pole a ověřovací měření na stanovených vzorcích .

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:


1. Mentlík V., Trnka P. a kol., Spolehlivostní aspekty elektrotechnologie, BEN 2011.
2. Elektronické informační zdroje a sborníky konferencí dle doporučení vedoucího
3. Mentlík V, Dielektrické prvky a systémy, BEN 2006.

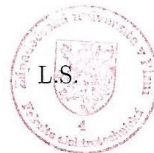
Vedoucí diplomové práce: Doc. Ing. Pavel Trnka, Ph.D.


Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: 14. října 2016

Termín odevzdání diplomové práce: 19. května 2017

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



  
Doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2016

## **Abstrakt**

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na teoretický vznik prostorového náboje v dielektriku. V práci je shrnuto využití izolačních materiálů ve vysokonapěťových systémech. Dále je podrobně rozvedeno základní dělení polarizací a ovlivnění částic v materiálu. Významná část diplomové práce je věnována vzniku prostorového náboje a způsoby jeho měření. V další části bylo nasimulováno rozložení napětí v dielektriku homogenního a nehomogenního. Na teoretický rozbor prostorového náboje v dielektriku navazuje část praktická, v rámci které bylo realizováno měření s jednou zvolenou metodou, na několika typech vzorků.

## **Klíčová slova**

VPI, Resin-Rich, izolační systémy, transformátor, točivé stroje, kabely, oleje, termoplasty, nomex, polarizace, prostorový náboj, dielektrikum, PEA, LIPP, PWP, TS, LIMM, elektroda, I-U charakteristika

**Abstract**

This diploma thesis is focused on the theoretical origination of space charge in dielectrics. There is summarized the application of insulating materials in high voltage systems. Furthermore, the basic division of polarization and influencing of particles in the material is explained in detail. The substantial part of the diploma thesis is engaged in the origin of space charge and methods of its measurement. The stress distribution in homogeneous and non-homogeneous dielectrics was simulated in the following part. The theoretical analysis of the space charge in dielectrics is followed by the practical part in which measurement on several types of samples with one selected method was carried out.

**Key words**

VPI, Resin-Rich, Insulation Systems, Transformer, Rotating Machines, Cables, Oils, Thermoplastics, Nomex, Polarization, Space charge, Dielectric, PEA, LIPP, PWP, TS, LIMM, Electrode, ampere-volt characteristic

## **Prohlášení**

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 17.5.2017

Jméno příjmení

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Doc. Ing. Pavlu Trnkovi Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Jaroslavu Hornakovi za rady k experimentální části diplomové práce a na závěr také své rodině za podporu.

## Obsah

ÚVOD .....	10
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK .....	11
<b>1 VYSOKONAPĚŤOVÉ IZOLAČNÍ SYSTÉMY TOČIVÝCH ELEKTRICKÝCH STROJŮ .....</b>	<b>13</b>
1.1 SYSTÉM RESIN-RICH .....	13
1.1.1 Postup výroby.....	13
1.2 SYSTÉM VPI (VACUUM PRESSURE IMPREGNATION) .....	15
1.2.1 Metody výroby VPI .....	16
1.2.2 Postup výroby.....	17
1.3 POROVNÁNÍ TECHNOLOGIE VPI A RESIN-RICH.....	17
<b>2 IZOLAČNÍ SYSTÉMY TRANSFORMÁTORŮ .....</b>	<b>18</b>
2.1 MATERIÁLY IZOLAČNÍHO SYSTÉMU TRANSFORMÁTORŮ.....	18
2.1.1 Kapalné izolanty .....	18
2.1.2 Minerální oleje.....	19
2.1.3 Rostlinné oleje.....	19
2.1.4 Syntetické izolační kapaliny.....	20
2.1.5 Fluorid sírový SF <sub>6</sub> .....	20
2.1.6 Pevné izolanty.....	20
2.1.7 Transformátorový papír.....	21
2.1.8 Transformátorová lepenka.....	21
2.1.9 Nomex .....	21
<b>3 IZOLAČNÍ SYSTÉM KABELOVÉHO VEDENÍ.....</b>	<b>22</b>
3.1 TERMOPLASTY .....	22
3.1.1 Polyvinylchlorid (PVC).....	22
3.1.2 Polyetylen (PE).....	23
3.2 PRYŽ.....	23
<b>4 POLARIZACE.....</b>	<b>25</b>
4.1 POLARIZACE DIELEKTRIKA .....	25
4.1.1 Polární dielektrika .....	26
4.1.2 Nepochární dielektrika .....	26
4.2 DRUHY POLARIZACÍ.....	27
4.3 DEFORMAČNÍ POLARIZACE .....	27
4.3.1 Elektronová polarizace .....	27
4.3.2 Iontová polarizace .....	28
4.3.3 Pružná dipólová polarizace .....	28
4.4 RELAXAČNÍ POLARIZACE .....	29
4.4.1 Iontová relaxační polarizace .....	31
4.4.2 Dipólová relaxační polarizace.....	32
4.5 MIGRAČNÍ POLARIZACE .....	33
<b>5 PROSTOROVÝ NÁBOJ.....</b>	<b>35</b>
5.1 Kladný prostorový náboj v oblasti elektrod .....	37
5.2 Záporný prostorový náboj v oblasti elektrod.....	37
5.3 Maxwell-Wagner-Sillarsův model .....	37
<b>6 ZPŮSOBY MĚŘENÍ PROSTOROVÉHO NÁBOJE .....</b>	<b>42</b>



---

6.1	METODA MODULACE INTENZITY ZÁŘENÍ LASERU – L IMM.....	42
6.2	METODA TEPELNÉHO SKOKU – TS.....	44
6.3	AKUSTICKÉ METODY (LIPP A PWP).....	44
6.4	PULZNÍ ELEKTROAKUSTICKÁ METODA PEA.....	45
<b>7</b>	<b>MODEL DIELEKTRIKA.....</b>	<b>47</b>
<b>8</b>	<b>EXPERIMENT.....</b>	<b>49</b>
8.1	POUŽITÝ MATERIÁL.....	50
8.2	VÝSLEDKY MĚŘENÍ.....	50
8.3	ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ.....	56
	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>58</b>
	<b>SEZNAM LITERATURY.....</b>	<b>60</b>
	<b>PŘÍLOHY A – I-U CHARAKTERISTIKA NAMĚŘENÝCH HODNOT.....</b>	<b>64</b>
	<b>PŘÍLOHA B – PROUDOVÁ ZÁVISLOST V ČASE.....</b>	<b>76</b>
	<b>PŘÍLOHA C – ZÁVISLOST REZISTIVITY NA ČASE.....</b>	<b>79</b>

## Úvod

Předkládaná diplomová práce popisuje teoreticky vznik prostorového náboje v dielektrickém materiálu, uvádím metody jeho měření spolu s jednoduchým experimentem a měla by posloužit jako ucelený zdroj informací o různých metodách měření prostorového náboje.

„Elektrická zařízení jsou tak dobrá jako nejslabší článek, který obsahují“. Izolace jsou důležitým prvkem životnosti zařízení a je mnoho možností, jakými lze sledovat jejich životnost a provádět zásahy pro její zvýšení např. u elektroizolačních systémů transformátorů a točivých strojů.

Izolační systémy mají své výhody a nevýhody, jelikož nejsou dokonalé, proto se používá široké spektrum materiálů a jejich kombinací pro co nejlepší využití finální vlastnosti daného systému.

Polarizace ovlivňují částice uvnitř materiálu. Vlivem migrační polarizace vzniká v dielektriku prostorový náboj, který ovlivňuje rozložení elektrického pole a tím i dielektrické vlastnosti. Změnu může pozorovat např. pomocí  $I$ - $U$  charakteristiky sledovaného materiálu či systému. Dalo by se říci, že do určité doby platí Ohmův zákon a ve chvíli vzniku prostorového náboje přestane být závislost proudu na napětí ohmická, neboť se v  $I$ - $U$  charakteristice tento náboj projeví.

Tato diplomová práce se zabývá jak složením nejběžnějších izolačních systémů ve vysokonapěťové technice, ale také polarizacemi, vznikem prostorového náboje a jeho možnostmi měření.

Poslední část diplomové práce je věnována experimentu s jednou zvolenou metodou měření prostorového náboje. Na několika typech vzorků bude ukázán vznik prostorového náboje za pomoci grafického znázornění.

## Seznam symbolů a zkratek

VIW	Vacuum Impregnated Winding Method
VIB	Vacuum Impregnated Bar Metod
SF <sub>6</sub>	Fluorid sírový
E <sub>p</sub> [kV·mm <sup>-1</sup> ]	Elektrická pevnost
ρ <sub>v</sub> [Ω·m]	Povrchová rezistivita
ε <sub>r</sub>	Relativní permitivita
PVC	Polyvinylchlorid
PE	Polyetylen
τ [s]	Relaxační doba
f <sub>0</sub> [s <sup>-1</sup> ]	Vlastní frekvence změny polohy kolem rovnovážné polohy
W [kJ·mol <sup>-1</sup> ]	Velikost potenciálové bariéry
k	Boltzmanova konstanta,
T [K]	Termodynamická teplota
ΔW [J]	Energie elektrostatického pole
q [C]	Náboj
l [m]	Délka
MWS	Maxwell Wagner Sillarsova polarizace
P	Polarizační vektor
a <sub>n</sub>	Jednotkový vektor kolmý k povrchu dielektrika
J [A·mm <sup>-2</sup> ]	Proudová hustota
ρ <sub>m</sub> [C·m <sup>-2</sup> ]	Plošná hustota prostorového náboje
σ <sub>r</sub> [S·m <sup>-1</sup> ]	Konduktivita
A [mm]	Průměr
D [mm]	Tloušťka
G [S]	Vodivost
E [V·m <sup>-1</sup> ]	Intenzita elektrostatického pole
U [V]	Napětí
I [A]	Proud
ω [s <sup>-1</sup> ]	Úhlová frekvence
LIMM	Metoda modulace intenzity záření laseru
TS	Metoda tepelného skoku

LIPP	Metoda laserem indukovaného tlakového pulzu
PWP	Metoda pulzní tlakové vlny
PEA	Pulzní elektroakustická metoda

# 1 Vysokonapět'ové izolační systémy točivých elektrických strojů

Vysokonapět'ové izolační systémy točivých elektrických strojů se obvykle provádí dvěma způsoby a to VPI (Vacuum Pressure Impregnation system) a Resin-Rich. Metody VPI a Resin-Rich mají své výhody, specifika, omezení v provedení, materiálech i aplikačních aspektech. [1]

## 1.1 Systém Resin-Rich

Základem tohoto systému je tříložkový kompozit s výchozím izolačním předimpregnovaným materiálem obsahujícím 30 až 40 procent pojiva. Na připravené vodivé části polotovaru se vytvoří kompaktní izolace o požadované tloušťce stěny. Připravené části se vytvrdí ve speciálních formách a dále jsou připraveny k vložení do drážek stroje. [1] [2]

Nosná část systému Resin-Rich je tvořena skleněnou tkaninou typu E (bezalkalické sklo), nebo polyethylenovou fólií. „Skleněná tkanina je obvykle tvořena stáčenými vlákny o tloušťce zhruba 0,14 mm, dnes jsou vlákna rovinná a tloušťka se pohybuje okolo 0,12 mm“ [1]. Předností stlačené skleněné tkaniny je vyšší elektrická pevnost o zhruba 7% a nižší dielektrické ztráty. „Izolační část je tvořena z kalcinovaného nebo nekalcinovaného slídového papíru, který je hutnější, méně nasákavý a pevnější“ [1]. Izolační bariera je spojena s pojivem. Nejčastějším pojivem bývá reaktoplastická bezrospouštědlová novolaková nebo cykloalifatická epoxidová pryskyřice. Složený kompozit je dodáván v předtvrzeném stavu v takzvaném B stavu, aby se jednotlivé vrstvy nábalu v kotoučích vzájemně neslepily. Tloušťka materiálu se pohybuje od 0,15 do 0,2 mm. [1] [2]

### 1.1.1 Postup výroby

Navíjení (izolování) materiálu probíhá dvojitým způsobem a to buď kontinuálně, nebo diskontinuálně. Kontinuální navíjení (izolace jedním druhem pásky) je vytvrzované a lisované buď v celé délce, nebo v rovné části. Diskontinuální navíjení (různými pásky izolované čela a rovná část) je vytvrzované a lisované v rovné části. [1] [2] [3]

Kontinuální navíjení spočívá v navíjení pásky široké obvykle 20 mm s třetinovým překrytím, poloviční nebo dvoutřetinové překrytí bývá po celé délce tyče i čelech vinutí. Tento způsob je vhodným řešením pro velké stroje. Nanášená páska je lepivá, proto se musí ovin provádět určitým tahem k zajištění kvalitně navinuté vrstvy. [1] [2]

Diskontinuální navíjení se provádí pomocí folie, která je nanesena pouze na rovnou část vinutí, a čela jsou zvlášť ovinuta páskou. Nevýhodou je menší elektrická pevnost na

přechodu pásky a fólie, proto je vhodnější pro menší stroje. S ohledem na finální tloušťku se dává o několik procent více izolace z důvodu stlačení v další fázi výroby. Vytvrzení se provádí ve formách umožňujících stlačení izolace na předepsaný rozměr. Před výsledným vytvrzením musí být odstraněna vlhkost, která se může v izolaci vyskytnout. SeparáčnÍ fólie zde slouží k separaci vrstev izolace při vysoušení. Postup: nejdříve se forma přehřeje a částečně stlačí, po dosažení 100 °C začne docházet ke spojování všech složek izolace (gelace), poté se forma dotáhne na požadovanou tloušťku izolace a předepsaným tlakem. Pro konečné vytvrzení se teplota zvýší na 160 – 170 °C, která se udržuje přibližně hodinu v závislosti na použité pryskyřici na předepsanou dobu. Proces ochlazování je poslední fází, která musí být dostatečně pomalá, aby nedocházelo k defektům zapříčiněným různým ochlazováním u vinutí a izolace. Je nutné použít separáčnÍ fólii, aby nedocházelo ke slepení výrobku s formou. K eliminaci částečných výbojů po vychladnutí izolace je použita polovodivá páska. Po ochlazení je izolace ovinuta polovodivou páskou jedním ovinem s polovičnÍm překrytím a výstupy drážek jsou taktéž upraveny polovodivými páskami nebo polovodivými laky. Polovodivé vrstvy mohou být společně s izolací vytvrzeny nebo mohou být také nanášeny po vytvrzení. [1] [2]



*Obr. 1.1 DiskontinuálnÍ navíjení folií, převzato z [4]*

Tab. 1.1. Výhody a nevýhody izolačního systému resin rich, převzato z [3]

Izolační systém	Výhody	Nevýhody
Resin rich kontin. izolace kontin. tvrzení	Vysoká elektrická pevnost v celé délce Téměř shodné vlastnosti izolace drážkové části i v čelech (tepelné i elektrické) Vysoká tepelná vodivost i v čelech Nízká energetická náročnost Opravitelné vinutí	Náročné individuálně vyráběné přípravky – vytvrzování izolace čel
Resin rich kontin. izolace vytvrzení r.č.	Vysoká elektrická pevnost v drážkové části Nízká energetická náročnost Jednoduché přípravky Opravitelné vinutí	Nízká tepelná vodivost čel vinutí
Resin rich diskontinuální izolace	Vysoká elektrická pevnost v drážkové části Nízká energetická náročnost Jednoduché přípravy Opravitelné vinutí	Vyšší pracnost při izolování Nízká tepelná vodivost čel vinutí

## 1.2 Systém VPI (Vacuum Pressure Impregnation)

V technologii VPI se materiál zpracovává při vakuu za vysokého tlaku, jak již vyplývá z českého překladu.

Základním materiálem je v tomto systému savá slídová páska, vyrobená z nekalcinovaného slídového papíru, která se při impregnačním procesu nasytí impregnantem. Tato technologie se stává šetrná k životnímu prostředí při použití bezrozpuštědlových pryskyřic. Nosnou složku tvoří skleněná tkanina, syntetická folie nebo polyesterové rouno. Tento kompozit může obsahovat maximálně 7% pojiva sloužící pro mechanické zajištění možnosti zpracování pásky. Pojivo musí být kompatibilní s použitým impregnantem, aby nemohlo dojít ke vzájemnému napadení při konečném zpracování. Důležitým faktorem je savost materiálu, aby docházelo k dokonalému proimpregnování všech vrstev. Základem dobré savosti je použití nekalcinované slídy, která má hrubší zrnění a je tedy vhodná pro toto využití při odpovídajících mechanických vlastnostech. Jedná se o mechanické vlastnosti jako

je ohebnost a minimální pevnost v tahu materiálu při navíjení, kdy nesmí dojít k porušení slídového papíru. Minimální pevnost materiálu nesmí být menší než  $80 \text{ N} \cdot \text{cm}^{-1}$ . Technologie VPI neobsahuje na rozdíl od Resin-Rich žádná tvrdidla, a proto je důležitá soudržnost nosné části a slídového papíru. Impregnantem pro tuto technologii jsou nízkomolekulární bezrozpouštědlové epoxidové, polyesterové a silikonové pryskyřice se stoprocentním obsahem sušiny. Mají dobré elektrické a mechanické vlastnosti s krátkou vytvrzovací dobou. Lze je použít v teplotních třídách 180 (H) a 200. [1] [5]



Obr. 1.2 VPI linka, převzato z [6]

### 1.2.1 Metody výroby VPI

System VPI je možné provádět dvěma způsoby. Principem první metody VIW (Vacuum Impregnated Winding Method) je impregnování statorového vinutí jako jeden celek. Nevýhodou však spočívá nemožnost opravit jednotlivé části stroje, ale je zde potřeba celkového převinutí. Druhý princip metody VIB (Vacuum Impregnated Bar Method), je založen na impregnaci jednotlivých částí vinutí. Základními zařízeními jsou vakuotěsné a tlakotěsné kotle s ohřívacím a chladicím zařízením, na který je připojen zásobník impregnantu. Mezi kotlem a zásobníkem impregnantu je umístěno zařízení pro ohřívání a chlazení. Poslední část představuje sušárna sloužící pro vytvrzení naimpregnovaného vinutí s teplotním rozsahem do  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ . [1] [2]



### 1.2.2 Postup výroby

Impregnační proces se nejprve zahájí sušením části stroje určené k impregnaci. Sušení probíhá při teplotě vyšší než 100 °C přibližně po dobu 20 hodin. Následuje přenesení předmětu do impregnačního kotle, kde je zavedeno vakuum a ohřátý impregnant začíná postupně ode dna zaplavovat kotel. Poté je zrušeno vakuum a zaveden na hodinu přetlak. Po vypuštění laku je těleso přesunuto do sušárny. A v té probíhá proces sušení nejprve za mírného podtlaku, za účelem urychlení vyprchání těkavých složek. Proudění horkého vzduchu za normálního tlaku následně těleso vytvrdí. [1] [2]

Tab. 1.2 Výhody a nevýhody izolačního systému VPI, převzato z [3]

Izolační systém	Výhody	Nevýhody
VPI - VIW	Velmi dobrá vazba mezi vinutím a magnetickým obvodem Relativně nízká pracnost Téměř shodné vlastnosti izolace drážkové části i v čelech	Vysoké investiční nároky Efektivní pro relativně úzký sortiment Obtížná opravitelnost statoru
VPI - VIB	Téměř shodné vlastnosti izolace drážkové části i v čelech (tepelné i elektrické)	Vysoké investiční nároky Vysoká energetická náročnost

### 1.3 Porovnání technologie VPI a Resin-Rich

Hlavní rozdíl spočívá z časové a technologické náročnosti výroby. VPI je vhodnější pro sériovou výrobu a to z důvodu vysoké pořizovací ceny výrobní linky. Výhodou systému VPI je vysoká homogenita izolovaného vinutí, minimalizace částečných výbojů, lepší odvod tepla a vysoká spolehlivost. Technologie VPI je vhodná pro velké vysokonapěťové stroje a proto jejich hlavní nevýhoda je cena výrobní linky, která musí mít dostatečné rozměry. Jsou-li u systému VPI proimpregnována vinutí do jednoho kompaktního celku, pak prakticky neexistuje možnost opravy jednotlivých dílů, pokud ale jsou impregnovány jednotlivé části, pak je výměna a oprava možná. Hlavní výhoda Resin-Rich je pořizovací cena vybavení a možnost opravy poškozených částí. [1] [2]

## 2 Izolační systémy transformátorů

Elektroizolační systémy transformátorů rozdělujeme dle [1] [7] do tří skupin, a to na suché, zalévané a stroje, u nichž je použit kapalný izolant ve spojení s tuhými izolanty.

Suché transformátory nepoužívají tekutý impregnant. Hlavním chladicím médiem k odvodu nadměrného tepla použitým na suché transformátory je vzduch nebo fluorid sírový SF<sub>6</sub>. Výhodou tedy je absence záchytné jámy nebo vany pro zachycení oleje. Nevýhodou při použití tohoto systému je omezená možnost použití. Izolační prvky použité na suché transformátory jsou papír, Nomex<sup>®</sup>, lepenka, kombinované materiály, jako je například Kapton se skleněnou tkaninou. Pracovní napětí, které je možné použít je do 38 kV, u SF<sub>6</sub> je tato hodnota do 75 kV a výkonu 10 MVA. Díky izolačním materiálům, které jsou těžce zápalné a samozhášivé, je minimální požární zatížení přednost suchých transformátor. V případě požáru nevznikají nebezpečné zplodiny.

Zalévané transformátory jsou stroje, jejichž cívky jsou zalaty do pryskyřice. Příkladem je pryskyřice na bázi alifatických glycidyleterů s tvrdidlem s elektrickou pevností  $E_p = 15 \text{ KV} \cdot \text{mm}^{-1}$ , povrchová rezistivita  $\rho_v = 10^{13} \Omega \cdot \text{m}$ , relativní permitivita  $\epsilon_r = 3,6$  až  $4,2$ ). V případě zalévaného stroje může být použita kompaktní izolace cívek Resin Rich nebo VPI. Napětí zalévaných transformátorů používáme do 35 kV a výkon 20 MVA, který je možné navýšit na 35 MVA.

Poslední skupinou elektroizolačního systému transformátorů jsou stroje, které používají spojení kapalného a tuhého izolantu (papír, Nomex<sup>®</sup>, kompozity). Tyto stroje nemají napěťovou ani výkonovou hranici.

Pro izolační systém vysokonapěťových transformátorů velkých výkonů se používá téměř výhradně izolační systém olej-papír.

### 2.1 Materiály izolačního systému transformátorů

Tato kapitola bude zaměřena na materiály používané k izolačnímu systému transformátorů. Materiály sloužícími k izolačnímu systému (olej – papír) jsou minerální oleje, rostlinné oleje, syntetické oleje, fluorid sírový, transformátorový papír nebo Nomex.

#### 2.1.1 Kapalně izolanty

Pro zachování dobrých vlastností transformátorů je třeba sledovat u všech kapalných izolantů jejich odolnost vůči oxidaci. U elektrických zařízení plní kromě izolační úlohy také funkci chladicích. Kapalně izolanty se rozdělují podle vzniku na minerální, rostlinné

a syntetické. [1] [8] [9]

### 2.1.2 Minerální oleje

Minerální oleje mají vysokou odolnost vůči stárnutí. Jejich hlavní předností je dobrý odvod tepla a požadovaná nízká viskozita.

Minerální oleje se získávají destilací ropy a následnou rafinací. Mají komplikované chemické složení ze směsi různých uhlovodíků obsažených v ropě. V případě, že se dostanou volně do přírody, mohou způsobit ekologickou katastrofu. Dojde-li k zamoření spodních vod, mohou ohrozit zdraví lidí. Tyto uhlovodíky se dělí podle obsahu oleje na parafinickou a naftenickou skupinu.

a) Parafinická skupina (metalová, alkalická) obsahuje větší podíl nasycených parafinických uhlovodíků ze vzorce  $C_nH_{2n-2}$ . [1] [5] [10] [11]

b) naftenická skupina (cyklanická) tvořená jádry naftenického a aromatického typu řady  $C_nH_{2n}$  bez dvojných vazeb. [1] [5] [10] [11]

„Průrazné napětí minerálních olejů se pohybuje mezi 60 až 70 kV / 2,5 mm,  $\text{tg } \delta = 0,001$ ,  $\epsilon_r = 2,1 \div 2,4$ ,  $\rho_v = 10^{12} \div 10^{14} \Omega \cdot m$ , bod vzplanutí mezi 130 až 150 °C“ [1]

### 2.1.3 Rostlinné oleje

Rostlinné oleje se získávají lisováním semen vybraných rostlin nebo extrakcí za tepla a následnou rafinací. Tyto oleje se rozdělují na vysychavé (lněný, tungový, dřevný) a nevysychavé (ricinový, řepkový). Jedná se o směsi esterů, glycerinů a nenasyčených mastných kyselin. Rostlinné oleje mají dobré elektrické vlastnosti, vysoký bod vzplanutí, jsou šetrné k životnímu prostředí a jsou obnovitelné. Rostlinné oleje jsou dobrou alternativou namísto minerálních a syntetických olejů. Nevýhodou této kapaliny je absorpce vody za nízkých teplot (olej má za takových podmínek horší vlastnosti). [10] [12] [13]

Ricinový olej je směs nenasyčených mastných kyselin a esteru glycerinu. Relativní permitivita tohoto oleje se pohybuje v rozmezí  $\epsilon_r = 4,2 - 4,6$ . Jedná se o tekutý polární izolant a jeho významnou vlastností je odolnost vůči částečným výbojům a plynům. [10]

Řepkový olej je získáván ze semen řepky olejné a to buď lisováním za studena, nebo pomocí organických rozpouštědel. V případě lisování za pomoci organických rozpouštědel je v oleji obsažen nadbytečný fosfor. [13]

Envirotemp FR3 Fluid je dielektrická kapalina vyráběna ze semen rostlin a využívána pro výkonové aplikace. Tento olej je zdravotně nezávadný, netoxický a má vysoký bod vzplanutí (okolo 330/360 °C). Chrání izolační papír uvnitř vinutí, který může vydržet až 8x

delší dobu než při použití minerálního oleje. [13]

#### 2.1.4 Syntetické izolační kapaliny

Syntetické izolační kapaliny se rozdělují podle způsobu přípravy a složení na [1]:

a) kapaliny vzniklé polymerací nenasycených uhlovodíků (polybutyleny), jsou odolné proti oxidaci a proti záření. Mají dobré elektrické vlastnosti, nízké dielektrické ztráty, velký měrný odpor a elektrickou pevnost až  $180 \text{ kV}\cdot\text{cm}^{-1}$  a jsou stabilní při vyšších teplotách. [1] [8]

b) organické estery se vyrábí pomocí chemické syntézy. Jako izolační hmoty se používají jen některé pro jejich zvláštní vlastnosti. Organické estery mají nízkou hodnotu ztrátového činitele, odolnost vůči plynům, dobrou teplotní stabilitu. Midel 7131 je kapalina, která byla vyvinuta kvůli nedostatku minerálních olejů u transformátorové techniky. Midel 7131 z hlediska pevnosti, životnosti a izolace ošetřuje izolační papír a nevytváří se v této kapalině koroze. [8] [10] [14]

c) silikonové tekutiny mají poměrně dobré izolační vlastnosti, jsou tepelně stálé v širokém rozmezí teplot a ekologicky nezávadné. Nemohou se tyto kapaliny používat ke zhasnutí oblouku v elektrických vypínačích, protože se z nich při vzniku oblouku jen zvolna vyvíjejí plyny. [1] [8]

#### 2.1.5 Fluorid sírový SF<sub>6</sub>

Elektronegativní plyn vzniká spalováním síry a fluoru. Patří k nejtěžším plynům hustoty hmotnosti  $6,14 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , je bezbarvý, netoxický, bez zápachu a nehořlavý. Snáší se s technickými materiály, chemicky stabilní do 200 °C. Dojde-li v něm k elektrickému výboji, nastane jeho rozklad na jedovaté látky. Používá se u transformátorů jako izolační i chladicí medium místo oleje. Fluorid sírový má při porovnání se vzduchem třikrát větší pevnost ( $89 \text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$ ), je skoro pětkrát těžší, a proto je v uzavřených prostorech nebezpečný, jelikož vytlačí vzduch z prostoru a má téměř desetkrát vyšší vypínací schopnost („v oblasti elektrického oblouku se rozkládá, zhasíná oblouk a ve zlomku sekundy opět zregeneruje“ [1]). [1] [8] [11]

#### 2.1.6 Pevné izolanty

Pevná složka je zastoupena transformátorovým papírem a různými druhy transformátorových lepenek. Druh izolačního materiálu je zvolen podle požadavků konkrétní aplikace.

### 2.1.7 Transformátorový papír

Papír se vyrábí celulózou z buničiny z dřevných rostlinných vláken, semenných nebo lýkových. Nejvíce se používá buničina ze smrkového nebo jedlového dřeva. Vaří se rozsekané části dřevných špalků v roztoku hydroxidu sodného při teplotě 170 °C a tlaku až 1 MPa po dobu 5 h. Taková buničina je nazvána sulfátová. [8]

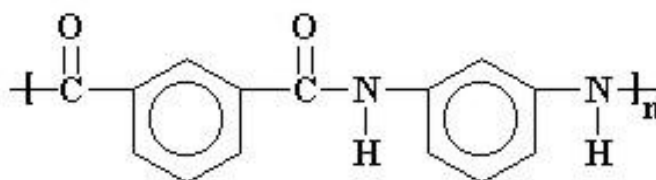
Z elektrických vlastností je nejdůležitější elektrická pevnost. Při napuštění papíru olejem, se zvýší elektrická pevnost až desetkrát. Elektrotechnické papíry se nejvíce vyrábějí ze sulfátové nebělené buničiny. Pro transformátory se používá jemný papír s impregnací. [8] [15]

### 2.1.8 Transformátorová lepenka

Vyrábí se na speciálních strojích s dlouhým sítem, jedním sítem nebo větším počtem sít. Válcové síto se otáčí v nádobě naplněné papírovinou (buničinou a bavlnou) a nabírá na povrch vlákna. Voda, která prošla sítem je odváděna po straně válce. Mokrý papírový pás se nanese na plstěný pás, který ho přenesou na navíjecí válec. Na tomto válci se spojí jednotlivé vrstvy do požadované tloušťky. Nakonec se lepenka ve směru osy válce rozřeže a usuší. Transformátorová lepenka je vyrobena s čisté buničiny. U lepenky je vyžadována vysoká elektrická pevnost, chemická čistota a malá stlačitelnost. [8]

### 2.1.9 Nomex

Nomex je syntetický materiál vyrobený z krátkých vláken a malých vláknitých částí aromatického polyamidu. Vlákno je vysoce odolné proti vysokým teplotám. Vlákno zůstane bez ztráty pevnosti ještě při teplotě 175 °C. Při teplotě 370 °C se začne rozkládat a při teplotě 400 °C zuhelnatí. Nomex má kromě výborné tepelné odolnosti také dobrou odolnost proti většině organických rozpouštědel, vysokou odolnost proti otěru, nehořlavý, má výborné elektrické vlastnosti, vysokou pevnost v tahu. Nedělají mu problém minerální a syntetické oleje používané v transformátorech. Na povrch je možné nanášet pryskyřice. [1] [16] [17]



Obr. 2.1. Chemická struktura Nomexu z [17]

### 3 Izolační systém kabelového vedení

Jako izolační materiál kabelové soustavy se běžně používá měkčené PVC, vodiče jsou měděné a kaučuk SBR se používá jako výplňový materiál.

V praxi se musí brát v úvahu kabely s rozdílnými dielektrickými vlastnostmi z hlediska napěťového přetížení, spojovaným se zvýšeným výskytem provozního přepětí v nových soustavách. [18]

Z tohoto hlediska definujeme dle [18] tři kategorie soustav a to soustavu A, B a C.

- 1) U kategorie A je zemní spojení vypnuto rychle.
- 2) Kategorie B je soustava, která je při poruše provozována po krátkou dobu s jednou uzemněnou fází. V soustavách, kde není porucha okamžitě vypnuta, dochází k namáhání izolace a omezuje životnost kabelu.
- 3) Kategorie C zahrnuje vše ostatní, co nebylo zahrnuto do kategorie A nebo B.

#### 3.1 Termoplasty

Termoplasty jsou polymery. Zvýšením teploty se mění ze stavu tuhého do stavu plastického. Tato změna je vratná a opakovatelná. Při použití v elektrotechnice je důležité sledovat jejich dielektrické vlastnosti při změnách kmitočtu, teploty a vlhkosti. [8] [20]

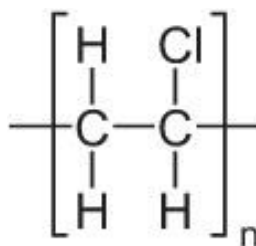
##### 3.1.1 Polyvinylchlorid (PVC)

Polyvinylchlorid patří mezi nejdůležitější termoplasty, jehož využití je velké a nemůže se mu rovnat v tomto ohledu žádný jiný polymer. Důležitou výhodou jeho rozšíření je poměrně levná výroba a dobré vlastnosti. Před více než čtyřiceti lety byl využíván jako potrubí pro studenou vodu a chemikálie díky jeho odolnosti vůči silným minerálním kyselinám. Materiál používaný pro výrobu polyvinylchloridu je monomer vinylchlorid, který vzniká rozkladem dichloreтанu. Polymerací do řetězců vzniká bílý prášek, nebo granulát. Polymer se dále mísí s různými přísadami zlepšující vlastnosti podle cílového použití. Přísady, kombinující s polymerem, jsou především plniva, stabilizátory pro zlepšení tepelné stability tj. látky, které vážou uvolněný chlorovodík, změkčovadla pro získání měkkosti a ohebnosti, maziva pro lepší zpracovatelnost. Starším způsobem výroby PVC je syntéza chlorovodíku a acetylenu. V naší republice se převážně zpracovává měkčené PVC, ačkoliv ve světě převládá zpracování neměkčeného PVC. Neměkčený polymer je dobrou izolační hmotou. Používá se hlavně na trubky a armatury na odpadní a pitnou vodu, ve stavebnictví jako profily oken nebo k výrobě dutých výrobků, jako jsou lahve na čisticí prostředky. Pro

izolaci vodičů a plášťů kabelů se PVC změkčuje přidáním 35% změkčovadel. Měkčený PVC se používá jako těsnění, fólie, desky atd. [8] [19] [20] [21] [22] [23]

Polymer je tepelně stálý při teplotách do 45 °C, měkne při teplotách 85 °C, stává se plastickým a dá se tvářet při teplotách 150 °C. Při vyšších teplotách se odštěpuje z PVC chlorovodík. PVC hoří přiložením vnějšího tepelného zdroje po dosažení zápalné teploty, ale automaticky zhasne po oddálení plamene. Je tedy samozhášivý. [8] [11]

Rizika mohou vzniknout při výrobě, kdy do prostředí může uniknout halogenní prvek chlór a monomer vinylchlorid, který je karcinogenem vyvolávajícím angiosarkomy jater. Zahříváním PVC se uvolňují silně dráždivé látky s korozivně agresivním působením. Vypukne-li požár v místě s uloženou izolací z PVC, pak je největší hrozbou právě jedovatý dým unikající z PVC a nikoliv samotný požár. V uzavřených prostorech (např. v tunelech) a v místech se zvýšeným rizikem požáru je proto snaha omezit použití PVC. Spalování PVC představuje riziko pro zdraví i životní prostředí. [11] [19] [24]



Obr. 3.1 Polyvinylchlorid - základní jednotka z [19]

### 3.1.2 Polyetylen (PE)

Polyetylen se připravuje polymerací etylenu  $\text{C}_2\text{H}_4$ . Etylen musí být čistý. Získává se rafinací nebo z parního krakování ropy nebo zemního plynu. Používají se dva průmyslové procesy, a to syntéza za vysokého tlaku nebo syntéza za nízkého tlaku. Při procesu vysokého tlaku se lisuje při tlaku od 150 MPa do 300 MPa při teplotě 300 °C. Jako katalyzátor je zde použit kyslík. [8] [21] [22]

Polyetylen je tuhá elastická látka. Za normálních podmínek je bílá. Teplota tání se pohybuje od 105 °C do 136 °C. Za běžných teplot je odolný vůči vodě, polárním rozpouštědlům, soli a jejich roztokům, kyselin, zásad. Za zvýšené teploty je však odolnost polyetylenu vůči nepolárním látkám značně omezena. PE má vysokou houževnatost, tažnost a je stálý proti chemickým činidlům. [20] [21]

## 3.2 Pryž

Pryž vzniká z kaučuku vulkanizací působením vulkanizačního činidla (například síra nebo sírné sloučeniny) a tepelné energie při strukturní změně se mění plastická kaučuková

směs v pryži. Tvrdost pryže se hlavně mění podle množství použité síry, která se váže s kaučukem. [8]

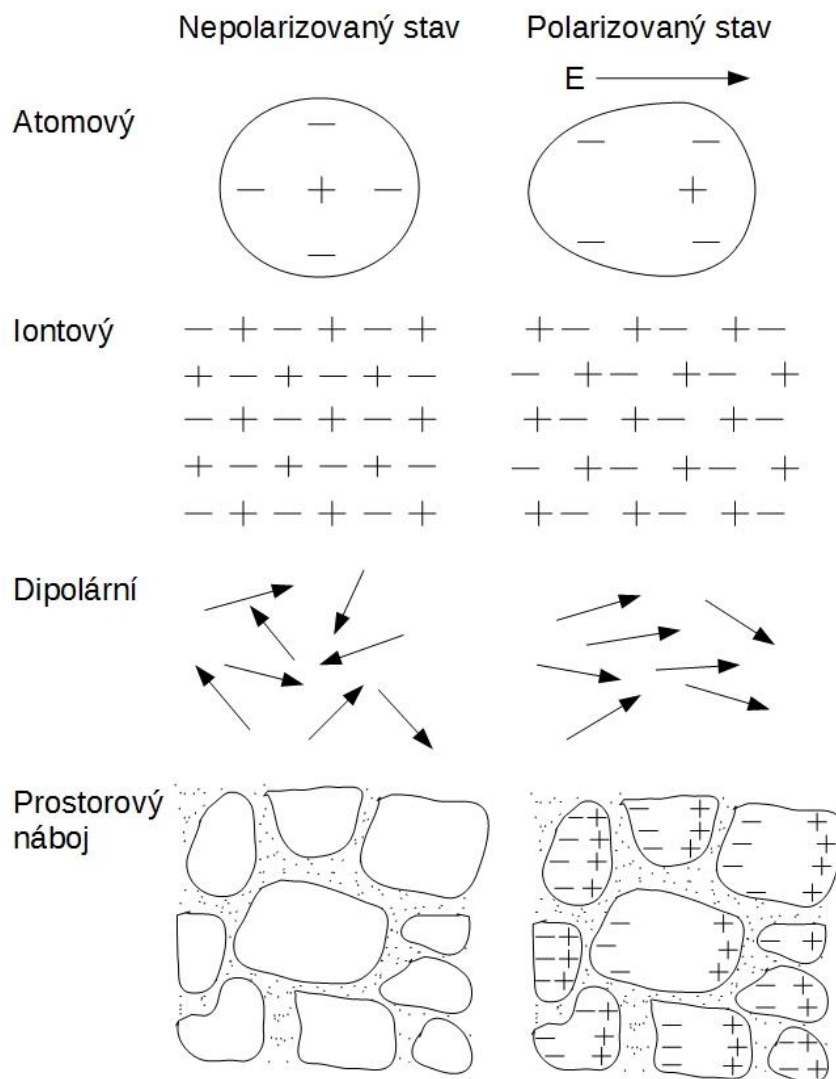
Význam vulkanizace je v přechodu z plastického tvárného stavu kaučukové směsi do elastického pružného stavu vzniklé pryže. [8]

Pryž má značnou chemickou odolnost vůči kyselinám a zásadám, dobré elektroizolační vlastnosti, má velkou elasticitu. Pryž si uchovává svůj tvar získaný vulkanizací. [8] [25]



## 4 Polarizace

Polarizace je děj, který probíhá v dielektriku po vložení do elektrického pole. Elektrické pole působí silově na kladné i záporné náboje dielektrika. Jelikož dielektrikum je nevodivé, nepohybují se náboje volně, ale dochází pouze k malému lokálnímu posuvu nosičů. Stavba a struktura dielektrika rozhoduje o tom, jak bude polarizace probíhat. Hlavní rozdělení spočívá v působení nebo nepůsobení vnějšího elektrického pole na dielektrikum. [1] [26] [27]



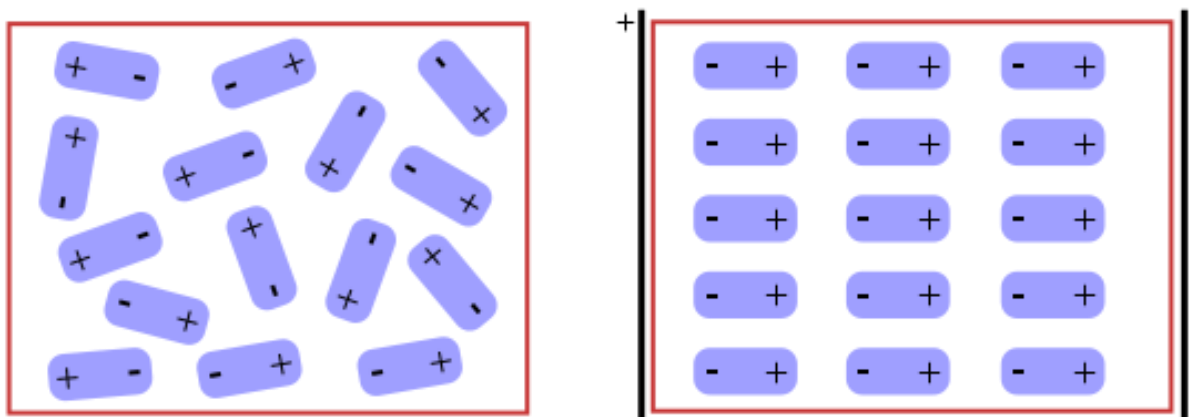
Obr. 4.1 Různé polarizační procesy (překresleno z 28)

### 4.1 Polarizace dielektrika

Dielektrika můžeme rozdělit na polární a nepolární podle struktury materiálu a z toho plyne i odlišné chování v elektrickém poli. [1] [27]

### 4.1.1 Polární dielektrika

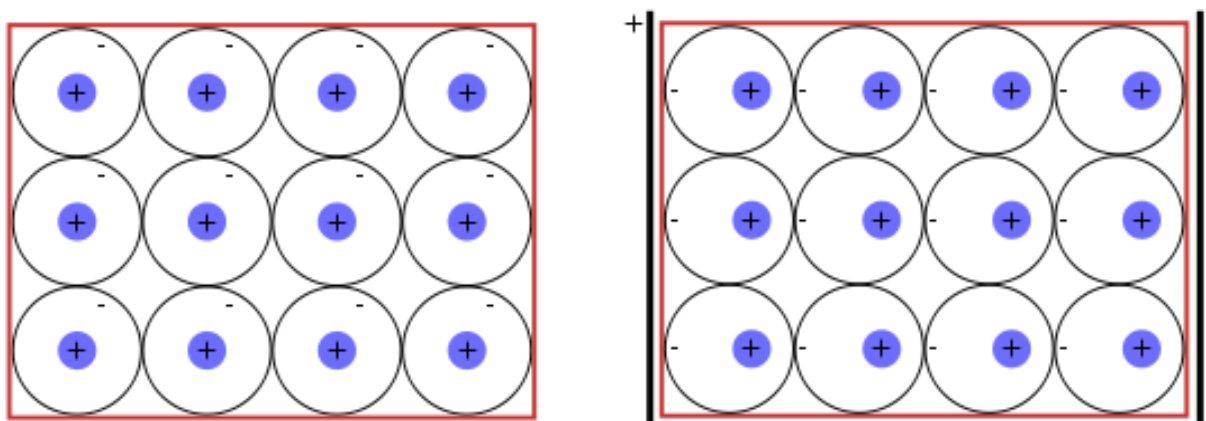
V některých látkách (polární dielektrika) existují dipólové momenty. Polární dielektrikum obsahuje permanentní elementární dipólové momenty i v případě, že na dielektrikum nepůsobí vnější elektrické pole. Nepůsobí-li na dielektrikum vnější pole, pak se elementární dipóly vzájemně ovlivňují, jsou náhodně orientovány a jejich vzájemné působení se vyruší. Působí-li vnější pole na polární dielektrikum, pak dochází k působení točivého momentu na konce dipólů, které se pootočí o určitý úhel závislý na velikosti elektrického pole ve směru působícího pole. [1] [26] [27] [29]



Obr. 4.2 Polární dielektrikum v elektrickém poli z [29]

### 4.1.2 Nepolární dielektrika

Atomy a molekuly, které nemají bez přiloženého vnějšího pole žádné vlastní elektrické dipólové momenty, se nazývají nepolární dielektrika. Polarizační děj se odehrává uvnitř atomu a bez přiloženého vnějšího pole mají kladné i záporné náboje shodné těžiště ve středu jádra. Po vložení do vnějšího elektrostatického pole probíhá jejich polarizace odlišným způsobem. Pole začne vyvolávat malý posun kladného náboje ve směru přiloženého náboje. Záporný náboj se začne vychylovat v opačném směru působícího pole. [27] [29]



Obr. 4.3 Nepolární dielektrikum v elektrickém poli z [29]

## 4.2 Druhy polarizací

Jak již bylo zmíněno, hlavní rozdělení spočívá v tom, zda působí nebo nepůsobí vnější elektrické pole na dielektrikum.

Nepůsobí-li na dielektrikum vnější elektrické pole, pak je polarizace **spontánní, piezoelektrické a pyroelektrické**. [1]

Působí-li na dielektrikum vnější elektrické pole, pak je rozhodující, jestli jsou nosiče elektrického náboje vázané nebo volné. V případě vázaných nosičů záleží, zda jsou vázány slabě nebo silně. Při slabé vazbě se nazývají polarizace relaxačními a dělí se na **iontovou relaxační** a **dipólovou relaxační**. Při silné vazbě se nazývají polarizace deformačními a patří sem **polarizace elektronová, iontová a pružná dipólová**. V případě volných nosičů se jedná o **polarizaci migrační**. [1]

## 4.3 Deformační polarizace

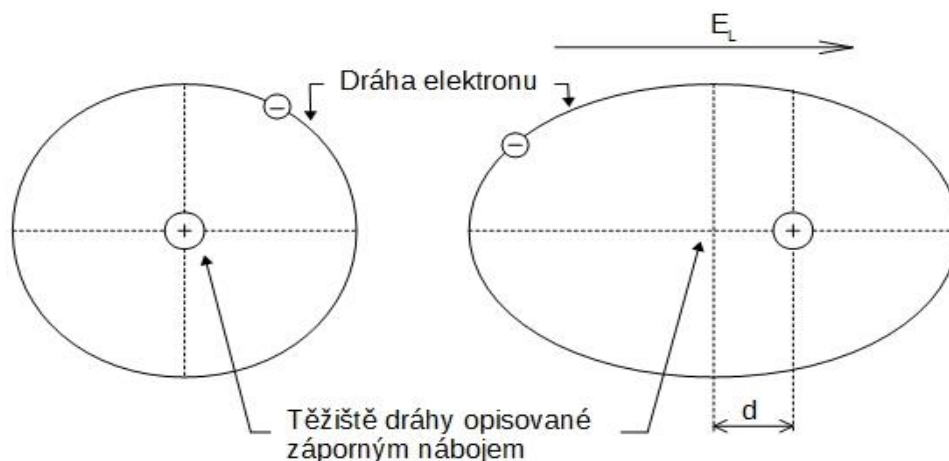
Do této skupiny polarizací patří polarizace iontová, elektronová a pružná dipólová.

U deformačních polarizací je nosičem elektrického náboje obvykle elektron, iont nebo stálý dipól. Nosič náboje je vázán v atomu, molekule nebo krystalu tak silně, že vnější elektrické pole jej může posunout jen o minimální vzdálenost z jeho rovnovážné polohy. Jelikož se posouvá velké množství nosičů o malou vzdálenost, může dojít k výraznému ovlivnění výsledné relativní permitivity dielektrika. Pevná vazba nosičů může za velmi krátké časy ustálení polarizace. Po skončení působení elektrického pole se stejně rychle nosiče náboje navrátí do základních poloh. Díky silné vazbě není ovlivňován pohyb částic jejich tepelným pohybem. Není závislý na tlaku a frekvenci, pokud se nejedná o takový interval teplot a tlaku, který změní strukturu látky. Výhodou těchto polarizací je, že jsou bezeztrátové. [1]

### 4.3.1 Elektronová polarizace

Těžiště kladného náboje (jádro) a těžiště záporného náboje (elektronový obal) jsou v jednom bodě, pokud na atom nepůsobí vnější elektrické pole. Atom není polarizovaný a nemá dipólový moment. Pokud působí na atom vnější elektrické pole, budou na kladný a záporný náboj působit elektrostatické síly opačného směru. Dojde k deformaci původního elektronového obalu a posunutí jader a elektronů v atomu viz obr. 4.4. Elektrony jsou velmi lehké, mají rychlou reakci na změny v materiálu, je možné dokonce sledovat pole v optických frekvencích. Posunutím těžiště nábojů získá atom indukovaný dipólový moment posunutý

o velikost vnějšího pole a schopnost atomu se polarizovat. Těžiště se posune o minimální vzdálenost a velmi rychle se ustálí (v rozmezí  $10^{-16}$  až  $10^{-13}$  s). Tato polarizace je frekvenčně nezávislá pro běžné frekvence, tepelně nezávislá, jelikož se polarizační děj odehrává uvnitř atomu a není spojena se ztrátou energie. K elektronové polarizaci dochází vždy, vyskytuje se u všech látek, ve všech skupenstvích. [1] [30]



Obr. 4.4 Elektronová polarizace na modelu atomu vodíku. Obrázek vlevo je model vodíku bez přítomnosti vnějšího pole a obrázek vpravo znázorňuje model po přiložení vnějšího pole (překresleno z [1])

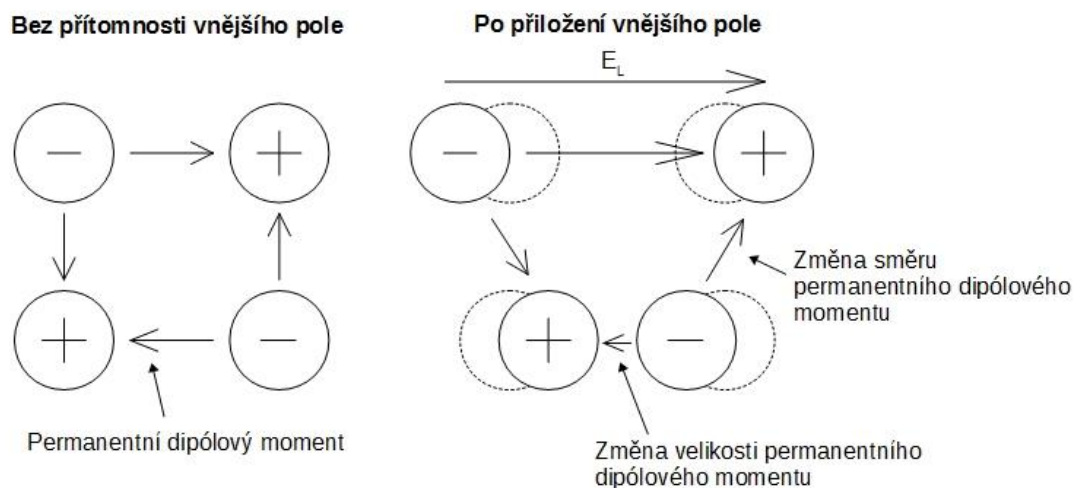
### 4.3.2 Iontová polarizace

Hlavní roli u této polarizace, jak již název napovídá, hrají ionty, které jsou základními prvky iontových krystalů. Rozdílem od elektronové polarizace je existence elementárních dipólových momentů i bez přítomnosti vnějšího pole. Důsledkem těchto dipólových momentů je struktura dielektrika tvořeného iontovými krystaly. Vlivem vnějšího pole dochází k pružnému posunutí iontů, jelikož jsou ionty v uzlech krystalové mřížky vázány silně. Posunutí má za následek změnu velikosti i směru jednotlivých dipólových momentů. Kladné ionty jsou posunuty ve směru aplikovaného pole, zatímco záporné ionty jsou posunuty v opačném směru, takže výsledný dipólový moment se změní v celém tělese - viz obr. 4.5. Iontová polarizace vykazuje pouze nízkou teplotní závislost a je určena především povahou rozhraní, kde mohou hromadit ionty. Je zde větší doba ustálení než u elektronové polarizace (v rozmezí  $10^{-13}$  až  $10^{-12}$  s). Iontová polarizace je frekvenčně nezávislá a jedná se o polarizaci bezztrátovou. Tato polarizace se nenachází pouze u čistě iontové vazby, ale i u látek s přechodnou vazbou mezi vazbami iontovou a kovalentní. [1] [30]

### 4.3.3 Pružná dipólová polarizace

Pružná polarizace se vyskytuje v pevných látkách, kde jsou molekuly vázány

pružnými vazbami, ale vzhledem k silné vazbě může dojít pouze k malým posuvům nosiče. Stejně jako u iontové polarizace dochází vlivem vnějšího elektrického pole ke změně velikosti a směru elementárních dipólových momentů a doby ustálení jsou ve stejném intervalu (v rozmezí  $10^{-13}$  až  $10^{-12}$  s). Pružná polarizace je teplotně nezávislá díky pevné vazbě molekul a považujeme jí za bezetrátovou. [1]



Obr. 4.5 Iontová polarizace (překresleno z [1])

#### 4.4 Relaxační polarizace

Rozdíl relaxační polarizace od polarizace deformační je v době průběhu, která je delší u relaxační polarizace a formou, která je charakterizována relaxačními pochody. Do skupiny relaxačních polarizací je zařazena relaxační polarizace iontová a dipólová. Hlavní faktor u této polarizace je teplota (tepelný pohyb nosičů elektrického náboje). Slabě vázané částice překonávají relativně snadno potenciálové bariéry mezi jednotlivými polohami právě díky tepelnému pohybu. Tepelný pohyb nosičů je chaotický, všechny možné polohy nosičů jsou stejně pravděpodobné a nedochází k nerovnoměrnému rozložení. K polarizaci nedochází bez přítomnosti vnějšího elektrického pole. V momentu, kdy přiložíme elektrické pole, nastane změna poměru výšek potenciálových bariér, tím se stanou některé nosiče energeticky výhodnějšími a tím i pravděpodobnějšími. Nosiče náboje se stanou v jednotce objemu nerovnoměrně rozložené a vzniknou asymetrie, které vedou k získání dipólového momentu. Děje se matematicky popisují pomocí modelu dvojité potenciální jámy za pomoci výše zmíněné asymetrie. Polarizace dielektrika nenastane okamžitě po vložení vnějšího elektrického pole. [1]

Zavádíme zde tzv. relaxační dobu  $\tau$  [s] viz rovnice (4.1). Je to čas potřebný k navrácení dipólových momentů molekul do náhodného rozdělení po odstranění aplikovaného pole  $E$ .

Měří čas potřebný k redukci pořadí na  $1/e$  své původní hodnoty, v důsledku procesu náhodného míchání Brownova pohybu. Brownův pohyb je neuspořádaný pohyb mikroskopických částic rozptýlených v kapalném nebo plynném prostředí (tyto částice mají rozměry řádově mikrometry). Pro představu lze říci, že nosiče potřebují čas k zaujetí nové energeticky výhodnější polohy. Ve chvíli, kdy přestane působit elektrické pole, nosiče se vrací do původních poloh vlivem jejich tepelného pohybu. Relaxační polarizace jsou ztrátové.

[1] [28] [31]

Relaxační doba

$$\tau = \frac{1}{2f_0} * e^{\frac{W}{kT}} \quad (4.1)$$

$f_0$  – vlastní frekvence změny polohy kolem rovnovážné polohy [ $s^{-1}$ ]

$W$  – velikost potenciálové bariéry [ $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ ]

$k$  – Boltzmanova konstanta,  $k = 1,381 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$

$T$  – termodynamická teplota [K]

Energie elektrostatického pole

$$\Delta W = \frac{q * l * E_L}{2} \quad (4.2)$$

$q$  – náboj iontu [C]

$l$  – dráha, kterou iont proběhl (průměrná doba mezi dvěma částicemi) [m]

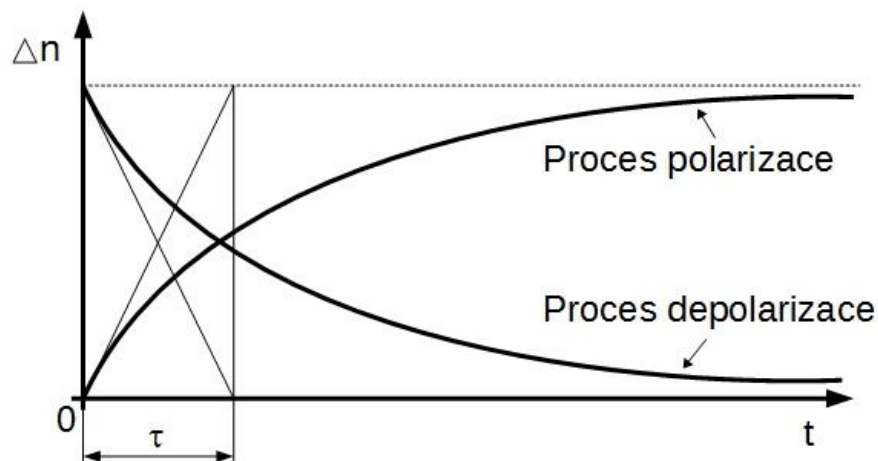
$E_L$  – intenzita elektrostatického pole [ $\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$ ]

Rozložení části exponenciál

$$e^{\frac{\Delta W}{kT}} = 1 + \frac{\Delta W}{kT} + \dots \quad (4.3)$$

$$e^{-\frac{\Delta W}{kT}} = 1 - \frac{\Delta W}{kT} - \dots \quad (4.4)$$

Není třeba počítat s ostatní členy, jelikož se předpokládá velmi slabé elektrické pole. Pro toto pole platí  $\Delta W \ll kT$ .

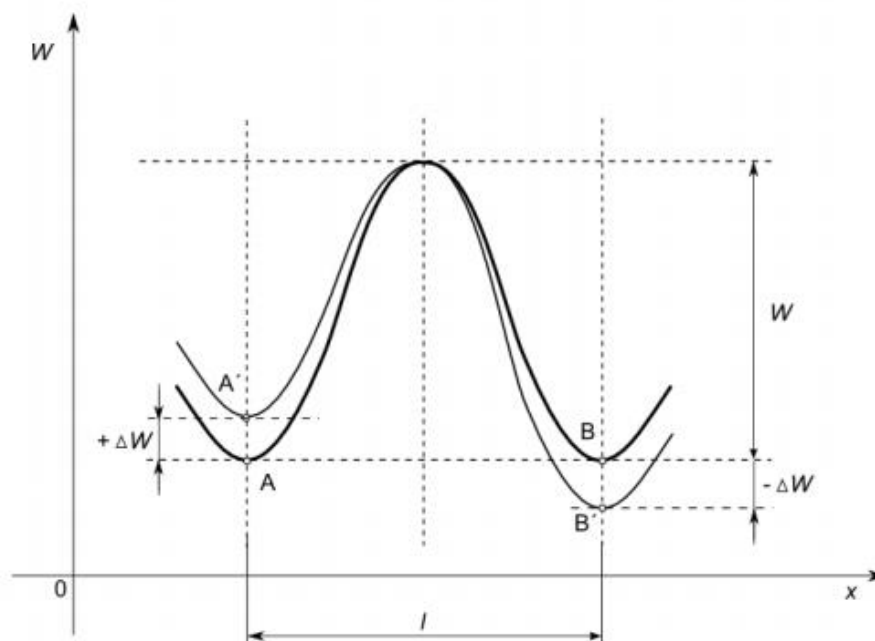


Obr. 4.6. Časový průběh relaxační polarizace (překresleno z [1])

#### 4.4.1 Iontová relaxační polarizace

Klíčovou roli zde hrají látky složené z iontů nebo obsahující atomy a molekuly, které jsou slabě vázány k sousedním stavebním látkám. Na vnější elektrické pole jsou tedy velice citlivé. K popisu dějů je zaveden matematický model, tzv. model dvojité potenciálové jámy, viz obr. 4.7, který se používá i pro jiné typy relaxačních dějů. Model se využívá za předpokladu, že nosiče elektrického náboje obou polarit mohou zaujímat dvě různé energeticky rovnocenné polohy. Pokud neprochází látkou vnější elektrické pole, pak leží obě polohy A i B na stejné energetické úrovni. Nosiče elektrického náboje překonávají díky svému tepelnému pohybu potenciálovou bariéru o velikosti  $W$  mezi těmito polohami. [1]

V okamžiku, kdy začne protékat vnější elektrické pole, dojde k výrazné změně (posunu) energetických úrovní jednotlivých poloh. Tyto polohy jsou označeny jako  $A'$  a  $B'$ . Částice má nižší bariéru v poloze  $A'$ , než před přiložením elektrického pole, a naopak v poloze  $B'$  má před sebou bariéru vyšší. Z toho vyplývá, že přechod nosičů z  $A'$  do  $B'$  je mnohem pravděpodobnější než v opačném směru. Iontová relaxační polarizace je frekvenčně a silně tepelně závislá vzhledem k delším časům potřebným k ustálení. S rostoucí teplotou klesá polarizovatelnost i polarizace. [1]



Obr. 4.7. Princip dvojité potenciálové jámy, převzato z [32]

#### 4.4.2 Dipólová relaxační polarizace

Vyskytují se v polárních látkách, kde jsou jejich elementární dipólové molekuly vázány slabě. Vlivem vnějšího elektrického pole se mohou snadno natáčet ve směru siločar působícího pole. Toto natáčení molekul zabraňuje tepelnému pohybu částic. Z tohoto důvodu je velmi silně závislá na teplotě a je těž ztrátová. [1]

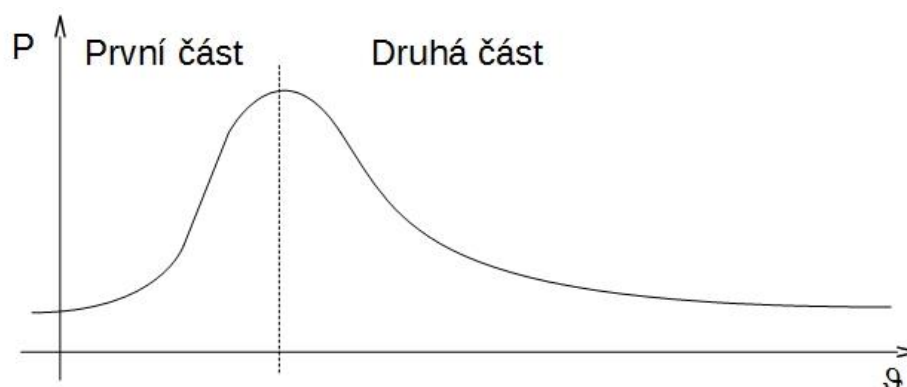
Nepůsobí-li na látku žádné vnější elektrické pole, pak je rozložení a směr orientace dipólových momentů zcela chaotické a náhodné. Všechny orientace jsou stejně pravděpodobné a látka se chová elektricky neutrálně. Výsledný dipólový moment je nulový.

Po přiložení vnějšího elektrického pole na látku, dojde ke změně poměru v jejím objemu. V tomto případě to lze popsat pomocí modelu dvojité potenciální jámy. V okamžiku připojení vnějšího elektrického pole jsou energeticky daleko výhodnější polohy dipólů (shodná orientace dipólového momentu s orientací lokálního pole). Nepředpokládáme dvě možné polohy nosiče elektrického náboje, ale dvě orientace elementárního permanentního dipólového momentu. Pro přechod z jedné polohy do druhé s minimálním využitím energie znamená otočení dipólu o  $180^\circ$ . [1]

Průběh teplotní závislosti je vyjádřen na obr. 4.8. V první části grafu s rostoucí teplotou slábnou mezimolekulární síly, tím se zmenší překážky pro polarizaci. V druhé části grafu stále pokračuje zeslabování mezimolekulárních sil, ale zároveň molekuly získávají pro



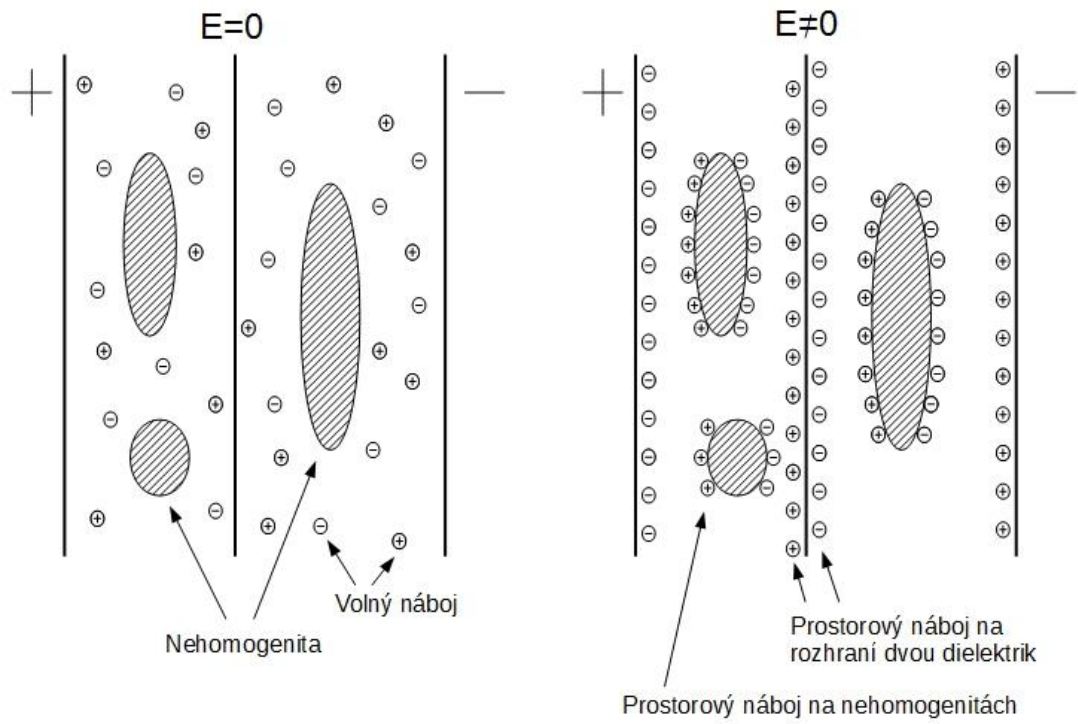
svůj tepelný chaotický pohyb větší energii. Tepelný pohyb je v tomto okamžiku tak výrazný, že začne působit proti vlivu vnějšího elektrického pole a dojde k zeslabování polarizace. [1]



Obr. 4.8. Teplotní závislost dipólové relaxační polarizace (překresleno z [1])

#### 4.5 Migrační polarizace

Migrační polarizaci se jinak nazývá mezifázová nebo také Maxwell–Wagner–Sillarsova (MWS) polarizace a obsahuje volné nosiče náboje, viz obr. 4.9. Je to polarizace vznikající prostorovým nábojem. **Podmínkou vzniku prostorového náboje je zmíněný volný nosič náboje a existence makroskopických nehomogenit v dielektriku.** Nehomogenitami se v dielektriku myslí různé bublinky, nečistoty, prasklinky a jiné strukturální defekty, vzniklé vlivem nedokonalého technologického postupu, během provozu zařízení různými degradačními provozními činiteli. Tato oblast má jiné vlastnosti než dielektrikum (jiná relativní permitivita a konduktivita). Právě na těchto nehomogenitách se po přiložení elektrického pole zachycují volné nosiče náboje, které se uspořádají na jinou prostorovou hustotu elektrického náboje. Toto uspořádání se projeví jako polarizace dielektrika. Nosiče se zachycují na homogenitách hlavně z důvodu odlišného rozhraní dvou prostředí, ve kterých mají nosiče odlišnou pohyblivost. Migrační polarizace jsou nejpomalejšími polarizacemi a jsou spojeny se ztrátou energie. [1] [33]



Obr. 4.9. Vznik prostorového náboje v nehomogenitách dielektriku (překresleno z [1])

## 5 Prostorový náboj

V předchozí kapitole bylo zmíněno, že prostorový náboj vzniká v dielektriku, ve kterém se vyskytují makroskopické nehomogenity a volný náboj. V souvislosti s dielektrikem, termínem "prostorového náboje" se obvykle rozumí nekompensovaný skutečný náboj generovaný v objemu vzorku v důsledku vstřikování elektronů, v poli za pomoci tepelné ionizace nečistot v objemu dielektrika a použití mechanického / tepelného namáhání, v případě, že materiál je piezoelektrický / pyroelektrický. Vázaný (nebo zdánlivý) objem náboje bude generován částečným vyrovnáním dipolárními molekulami rozloženými ve hmotě. Polarizace také vytváří vázaný povrchový náboj  $P \cdot a_n$ , kde  $P$  je polarizační vektor a  $a_n$  je jednotkový vektor kolmý k povrchu dielektrika, směřující směrem ven. Pokud je polarizace nehomogenní, pak nebude mít vázaný náboj žádný objem. Náboje se usazují u polymerních dielektrik v důsledku jedné nebo více z těchto procesů, jsou typicky v rozmezí 0,1 až  $1 \text{ C}\cdot\text{cm}^{-3}$ . [1] [33] [34]

Prostorový náboj výrazně zkresluje průběh intenzity elektrického pole v tloušťce materiálu. To má za následek ovlivnění vodivostních jevů v materiálu a elektrickou pevnost. V izolantu prostorový náboj zkresluje průměrné elektrické pole tak, že může vést k ohrožení elektrické pevnosti. K elektrickému průrazu nedochází v místě s největší hodnotou intenzity, ale v blízkosti elektrody vstřikování elektronů. [1]

Na prostorový náboj má vliv také teplota a velikost přiloženého napětí. Významná závislost na teplotě s elektrickým polem se dá očekávat u polymerního materiálu. Při malém napětí mají vliv na vznik prostorového náboje hlavně jen nosiče náboje disociované v objemu polymeru. Při zvyšování napětí roste vliv vstřikovaných elektronů. Formování prostorového náboje může dojít na rozhraní dvou dielektrik bez ohledu na polaritu a to mnohem mohutněji než v blízkosti elektrod. [1] [35]

Náboj se projevuje nejvíce v oblasti nízkých až středních frekvencí. S rostoucí frekvencí klesá vliv prostorového náboje, jelikož je překryt vlivem ostatních polarizací. Dále se nejvýrazněji projeví u vysokonapěťových zařízení pracujících se stejnosměrným napětím. Hlavním zdrojem prostorového náboje je především u polymerních materiálů tzv. vstřikování nosičů náboje z elektrod přiléhajících k materiálu. Jsou dva způsoby vstřikování, a to buď vstřikování elektronů katodou, nebo vstřikování děr anodou, takzvaná extrakce na anodě. Hlavní úlohu tedy hrají volné elektrony (nikoli ionty). Na tvorbě prostorového náboje u různých polymerních materiálů se podílí odlišný dominantní typ. Elektrony jsou dominantní například u materiálů polyethylen, polyethylentereftalát nebo polyethylenafthalát. Díry jsou

dominantní například u materiálů kopolymer ethylen-vinyl-acetát nebo poly-p-xylen. Velikost a tvar prostorového náboje závisí kromě polymeru i na materiálu elektrod, jelikož musí elektrony při emitování překonat energetickou bariéru o velikosti závislé na výstupní práci kovu elektrody. Elektrony mohou být vstřikovány i částečnými výboji v dutinách materiálu.

[1]

Pevné dielektrické materiály se používají jako izolační materiály v řadě aplikací. Existují však obavy o jejich dlouhodobý výkon z hlediska pracovního namáhání. Izolační systém navrhnutý s podprahovým napětím by zajistil dlouhou životnost a vysokou spolehlivost za předpokladu, že na izolaci nedojde k žádnému jinému významnému namáhání. Prahová hodnota elektrického stárnutí stejnosměrného pole může být blízká prahové hodnotě, nad kterou se prostorový náboj zachycuje v izolaci. Předpokladem je, že izolace je vystavena jen mírným polím a je bez makroskopických defektů. Existuje však řada sporů ohledně prahu, od prahu pro akumulaci zachyceného prostorového náboje až po prahovou hodnotu elektrického stárnutí. [36]

Nejvhodnější je vliv prostorového náboje na napětíovou závislost proudu ( $I$   $U$  charakteristiky). Pro porovnání materiálů je dobré brát v potaz i jejich tloušťku. Proto se zde pracuje s  $E$  (intenzita elektrického pole). Proudová hustota  $J$  [ $A \cdot m^{-2}$ ] bere poté v potaz plochu elektrod. Tudiž je možné porovnat dva materiály s odlišnou tloušťkou, měřené elektrodami s různými rozměry. Přítomnost prostorového náboje modifikuje vnitřní rozložení pole v dielektriku, ze kterého nastane přechodná odchylka proudové hustoty  $J$ . Po dosažení rovnovážného stavu,  $\text{div } J$  bude rovna nule. [36]

$$J(x) = \rho_m(x)\mu E(x) \quad (5.1)$$

$\rho_m$  je plošná hustota prostorového náboje [ $C \cdot m^{-2}$ ] umístěna buď v rozšířených stavech (pokud existují v materiálu), nebo v lokalizovaných stavech, kde jsou zachyceny kratší dobu. Mobilita této složky prostorového náboje je označena  $\mu$ . Podmínka kontinuity znamená, že hustota prostorového náboje se mění s časem, dokud nejsou dosaženy podmínky ustáleného stavu ( $\text{div } J = 0$ ). Tato podmínka definuje vzájemný vztah mezi rozložením hustoty prostorového náboje a rozložením elektrického pole viz rovnice (5.2). [36]

$$E(x) \propto J(\rho_m(x))^{-1} \quad (5.2)$$

Když je rovnice (5.2) kombinovaná s Poissonovou rovnicí, která se vztahuje ke gradientu pole

k prostorovému náboji [36]

$$\frac{dE(x)}{dx} = \rho(x)/\epsilon_0\epsilon_r \quad (5.3)$$

kde  $\rho(x)$  je celkový prostorový náboj v poloze  $x$  a  $\epsilon_0$  a  $\epsilon_r$  je permitivita materiálu. Z toho vyplývá nelineární vztah mezi proudem a aplikovaným napětím. Když je  $\rho(x)$  nula (není zde žádný prostorový náboj), pak je elektrické pole rovnoměrné a platí lineární vztah mezi proudem a napětím (ohmická charakteristika). Prostorový náboj nevyhnutelně deformuje pole a vede k nelineárnímu chování, tj. ohmické chování a prostorové náboje jsou navzájem neslučitelné. [36]

Při nízkém napětí přechodový proud bude mít tendenci reagovat lineárně na aplikované pole. Nad určitým napětím však dominuje vodivostní proud. Proto nemá žádný skutečný význam, pokud jde o přechod ze stavu bez prostorového náboje do stavu s prostorovým nábojem (nemůže být použit k odvození existence prahové hodnoty náboje). Aby se mohl tento měřící proud použít, musí se blížit k ustálenému stavu proudu. [36]

### 5.1 Kladný prostorový náboj v oblasti elektrod

V tomto případě je nedostatek záporných elektronů u katody, jelikož pohyb elektronů v dielektriku je větší než schopnost elektrony emitovat katodou. Proto se v blízkosti katody vytváří kladný prostorový náboj (hetero-náboj) zvyšující významně elektrický náboj na katodě. Zesílení dojde však i u emisí na katodě, která právě tento kladný prostorový náboj zmenšuje ve své blízkosti, dokud nedojde k ustálení. Tenká vrstva hetero-náboje vznikne i na anodě. [1]

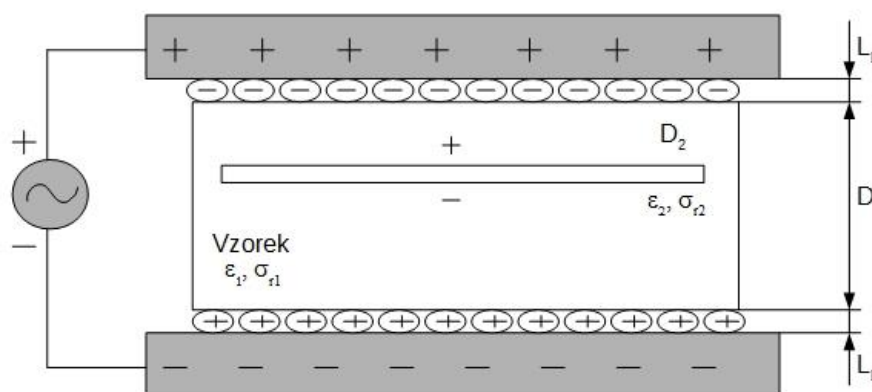
### 5.2 Záporný prostorový náboj v oblasti elektrod

Zde je naopak vstřikování elektronů katodou moc rychlé a do dielektrika se dostává více elektronů. Dielektrikum nedokáže absorbovat takové množství elektronů a vzniká v blízkosti katody přebytek záporných elektronů. Tento náboj nazýváme homo-náboj, jelikož má stejnou polaritu s polaritou katody. V blízkosti katody dochází vlivem homo-náboje ke zmenšení intenzity elektrického pole. Postupně se zmenší úroveň vstřikování elektronů, dokud nedojde k ustálení rovnováhy. Na anodě vzniká také nějaký homo-náboj. [1]

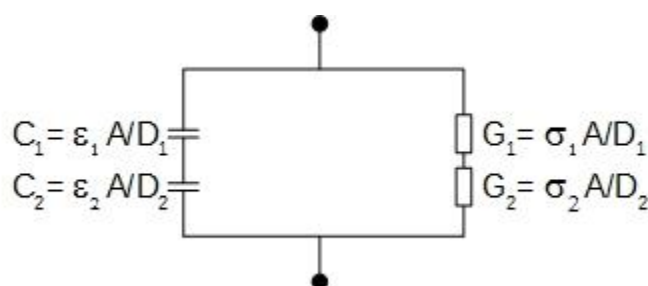
### 5.3 Maxwell-Wagner-Sillarsův model

Maxwell-Wagner-Sillarsův model se stal matematicky prvním modelem popisujícím

chování nehomogenního dielektrika ve vnějším elektrickém poli. MWS model a jeho náhradní obvod, který je načrtnut na obr 4.10 a obr 4.11, je velmi jednoduchý a používá se k označení nehomogenní struktury s ohledem na uspořádání vrstev, kde se každá vrstva vyznačuje svou permitivitou  $\epsilon_i$  a konduktivitou  $\sigma_{ri}$  [ $S \cdot m^{-1}$ ]. Předpokládá se, že permitivity ani vodivosti nejsou závislé na hodnotě intenzity elektrického pole a ani na čase působení pole. Před přiložením napětí na kondenzátor není na rozhraní dielektrik nebo na elektrodách nahromaděný náboj a siločáry jsou po celé ploše elektrod kolmé k rozhraní vrstev a elektrodám. První vrstva představuje amorfnní látku a vyznačuje se permitivitou  $\epsilon_1$  a konduktivitou  $\sigma_{r1}$ . Zatímco druhá vrstva vytvořená na počátku krystalizace se vyznačuje permitivitou  $\epsilon_2$  a konduktivitou  $\sigma_{r2}$ . [1] [37]



Obr. 5.1. Dvě dielektrické vrstvy v sérii. ( $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$ ) a ( $\sigma_{r1}$ ,  $\sigma_{r2}$ ) s odpovídající dielektrickou permitivitou a vodivostí. (překresleno z [37])



Obr. 5.2. Ekvivalentní obvod, kde  $A$  [mm] je průměr elektrod. ( $D_1$  [mm],  $D_2$  [mm]) a ( $G_1$  [S],  $G_2$  [S]) je tloušťka a vodivost dvou vrstev. (překresleno z [37])

Znamení reprezentované (-) a (+) ukazují, jak mohou být nosiče náboje blokovány dalšími vnitřními povrchy vytvořené v počátečních fázích krystalizace. Pokud se má, že tloušťka první a druhé vrstvy je stejná,  $D_1 = D_2$ , relaxační doba  $\tau_{MW}$  [s] na mezifázové polarizace je dána vztahem: [37]

$$\tau_{MW} = \varepsilon_0 \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{\gamma_{r1} + \gamma_{r2}} \quad (5.4)$$

$\tau_{MW}$  – relaxační doba [s]

$\varepsilon$  – permitivita

$\gamma$  – konduktivita [ $S \cdot m^{-1}$ ]

Z rovnice (5.4) doba relaxace váhy je nepřímo úměrná vodivosti systému. Tento poměrně jednoduchý příklad ukazuje, že dielektrická odezva nehomogenním látkou může být závislá na frekvenci. [37]

Časová konstanta přechodového děje nazvaná relaxační doba nabíjení technického dielektrika má vztah:

$$\tau = \frac{d_1 \varepsilon_2 + d_2 \varepsilon_1}{d_1 \gamma_2 + d_2 \gamma_1} \quad (5.5)$$

$\tau$  – relaxační doba nabíjení technického dielektrika [s]

$d$  – tloušťka [mm]

V okamžiku připojení napětí se intenzita elektrického pole rozloží. Pro napětí mezi elektrodami platí vztah (5.5). Intenzity v jednotlivých vrstvách lze určit vztahem (5.6) a (5.7). Po odeznění nárazu posuvného proudu, začne důsledkem polarizace dielektrika přitékat na elektrody další náboj. Ve stejnou dobu se vlivem elektrického pole začnou hromadit volné náboje na rozhraní. Tím se počáteční rozložení intenzit mění a postupně přestávají platit (vztah 5.6, 5.8 a 5.9) [1]

$$D = \varepsilon_1 E_1 = \varepsilon_2 E_2 \quad (5.6)$$

$$U_0 = U_1 + U_2 = d_1 E_1 + d_2 E_2 \quad (5.7)$$

$$E_1 = \frac{\varepsilon_2}{d_1 \varepsilon_2 + d_2 \varepsilon_1} U_0 \quad (5.8)$$

$$E_2 = \frac{\varepsilon_1}{d_1\varepsilon_2 + d_2\varepsilon_1} U_0 \quad (5.9)$$

D – normálová složka vektoru

U – napětí na elektrodách [V]

E – intenzita [ $\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$ ]

Nahradí se proto podmínkou pro normálovou složku vektoru proudové hustoty J na rozhraní viz vztah (5.10), (5.11) a (5.12). Je zde vidět, že po nějakém čase rozhoduje o hodnotách intenzit konduktivita. Pokud by se rovnaly intenzity v ustáleném stavu a v momentě připojení, pak by nedošlo k hromadění volných nábojů. Pokud platí vztah (5.13), pak nedojde ke vzniku prostorového náboje. [1]

$$J = \gamma_1 E_1 = \gamma_2 E_2 \quad (5.10)$$

$$E_1 = \frac{\gamma_2}{d_1\gamma_2 + d_2\gamma_1} U_0 \quad (5.11)$$

$$E_2 = \frac{\gamma_1}{d_1\gamma_2 + d_2\gamma_1} U_0 \quad (5.12)$$

$$\frac{\varepsilon_1}{\gamma_1} = \frac{\varepsilon_2}{\gamma_2} \quad (5.13)$$

J – proudová hustota [ $\text{A}\cdot\text{mm}^{-2}$ ]

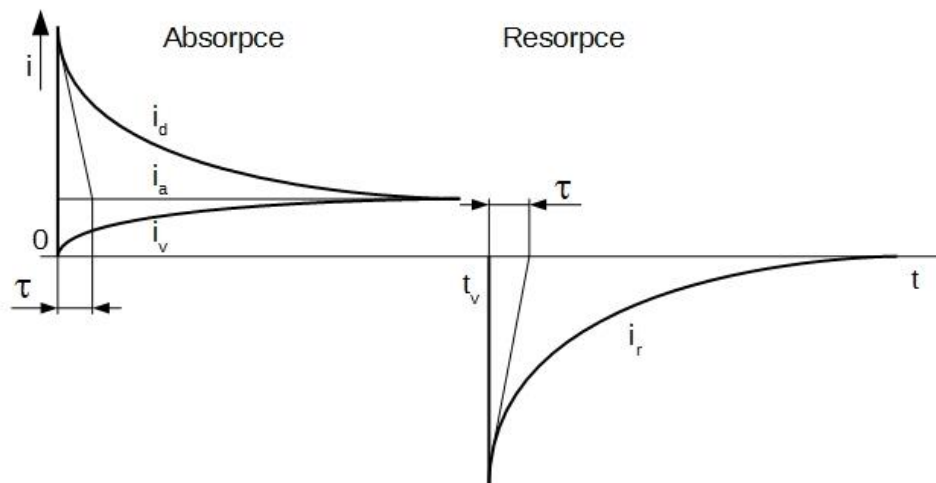
Proud tekoucí dielektrikem  $i_d$  [A] má dvě složky proudu. První složka proudu je vodivostní  $i_v$  [A] a druhá složka je absorpční  $i_a$  [A]. Průběh proudu při vybíjení se značí  $t_v$  [s], vybíjecí proud se nazývá resorpční  $i_r$  [A]. Průběh proudu podle MWS modelu je znázorněn na obr.5.3. [1]



$$i = i_v + i_a \quad (5.14)$$

$$i_v = \frac{\gamma_1 \gamma_2 U_0 S}{d_1 \gamma_2 + d_2 \gamma_1} \quad (5.15)$$

$$i_a = \frac{(\varepsilon_1 \gamma_2 - \varepsilon_2 \gamma_1)^2 d_1 d_2 U_0 S}{(d_1 \varepsilon_2 + d_2 \varepsilon_1)^2 (d_1 \gamma_2 + d_2 \gamma_1)} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (5.16)$$



Obr. 5.3. Průběh proudu podle MWS modelu (překresleno z [1])

## 6 Způsoby měření prostorového náboje

Vývoj technik měření prostorového náboje byl popsán podrobně Lewinerem [38] a ty, které se běžně používají, byly rozsáhle dokumentovány velmi nedávno Ahmedem a Srinivasem [39]. V důsledku toho se zde hovoří pouze o techniky nejčastěji používané v současné době.

První způsob měření prostorového náboje spočívalo v rozřezání dielektrika na tenké destičky, na které byl nanesen prášek  $Pb_3O_4$  (detekující kladný náboj) a žlutá síra (detekující záporný náboj). Prášek postupně přilnul k náboji na destičkách. Tento způsob měl mnoho nevýhod a samotné rozřezání destiček ovlivnilo sledované rozložení prostorového náboje. [1]

Dnešní úspěšné nedestruktivní měření prostorového náboje techniky jsou v podstatě úpravy a vylepšení techniky zavedené Collinsem v polovině 1970 [40]. Společnou charakteristikou je dočasné, nedestruktivní přemístění prostorového náboje v objemu vzorku vytvořené poruchy, jako je například tepelné nebo tlakové vlny, což vede ke změně v závislosti na čase v náboji indukovaného na elektrodách podle prostorového náboje

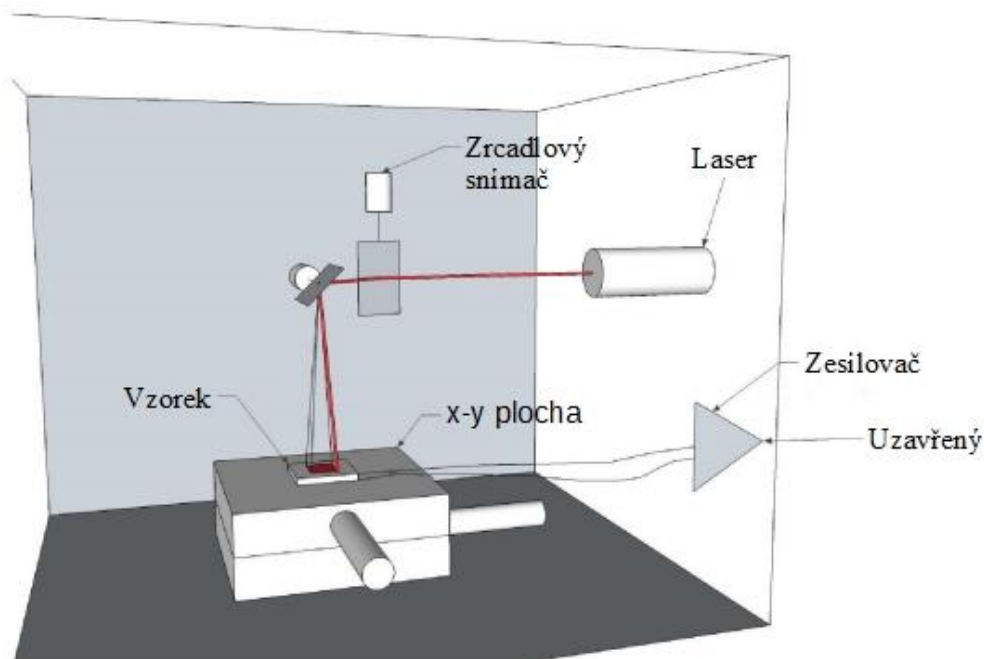
Mezi nedestruktivní a zatím i nejdokonalejší metody měření prostorového náboje jsou metody L IMM, TS, LIPP, PWP, PEA.

Kompresi či expanzi vzorku také přispěje ke změně vyvolaného náboje na elektrodách, a to prostřednictvím změny relativní permitivity. Změna náboje elektrody se analyzuje, čímž se získá rozložení prostorového náboje. (Ukázalo se však, že tepelné impulsní techniky, jak byly původně prováděny Collinsem [40], jsou vyneseny pouze na první moment distribuce náboje a jeho prvních Fourierových koeficientů, protože malé chyby (<1%) v měření otevřeného signálu v napětí naprázdno ( $t$ ) může způsobit velké chyby v dedukované distribuci [41]).

### 6.1 Metoda modulace intenzity záření laseru – L IMM

Dvěma hlavními vývojovými postupy Collinse, také zahrnujícími zahřívání vzorku, jsou: modulace intenzity záření laseru (laser intensity modulation method - L IMM) [42], a metoda tepelného skoku (thermal step method TS) [43]. V prvním případě, oba povrchy tenkého filmu vzorku jsou vystaveny sinusově modulovanému laserovému paprsku (obvykle červený), který je silně absorbován elektrodami. Výsledné sinusové kolísání teplot elektrod vytváří periodické kolísání teplot v celém objemu vzorku, které interagují s prostorovým nábojem pro generování pyroelektrického proudu. Tento proud je určen modulační frekvencí

a rozložením prostorového náboje. Měření se provádí na několika frekvencích. Postup dekonvoluce vyžaduje, aby se extrahoval distribucí z dat. Nejlepší dosažitelné prostorové rozlišení je asi 2  $\mu\text{m}$ , ale rozlišení je samozřejmě mnohem lepší, v blízkosti povrchu vzorku než uvnitř, kvůli útlumu a disperzi horkých vln v přenosu. Polymerní vzorky s tloušťkami mezi 1  $\mu\text{m}$  a 2 mm mohou být zkoumány za předpokladu, že se (obvykle) hodnota tepelné vodivosti pohybuje kolem  $10^{-3} \text{ cm}^2 / \text{s}$ .



Obr. 6.1. Metoda LIMM (převzato z [44])

V poslední době byla metoda použita v trojrozměrném režimu. Generování proudu v Limm metodě je rovněž více zapojené, než v případě, jednorozměrného. Obecně platí, že tepelně vytvořené proudy se nazývají pyroelektrické proudy, a pro feroelektrické materiály se měří pyroelektrický koeficient dán následujícím:

$$p_i^\sigma = p_i^\varepsilon + \alpha_{jk}^E c_{jklm}^{E,T} d_{ilm}^T \quad (6.1)$$

kde první člen je pyroelektrický proud měřený při konstantním napětí, nazývaný primární pyroelektrický efekt,  $p_i^\varepsilon$ , a druhý člen je proud vyroben z piezoelektrických efektů přes tepelnou roztažnost. Ve snímací Limm metodě existují i další možnosti, jako je například tepelná roztažnost v neaktivní části vzorku, způsobená termoakustickou vlnou, která se pak zvedne piezoelektricky ve vzorku. [44]

Problém harmonického tepelného toku lze vyřešit analyticky pro jednorozměrné případy, kde je průměr laserového paprsku mnohem širší, než je hloubka průniku, a získá se teplota v jakékoli hloubce. [44]

Z toho může být prokázáno, že hloubka průniku tepelné vlny,  $x$ , závisí na úhlové frekvenci  $\omega$ , a tepelná vodivost,  $\alpha$ , viz rovnice (6.2). [44]

$$x = \sqrt{\frac{2\alpha}{\omega}} \quad (6.2)$$

## 6.2 Metoda tepelného skoku – TS

Ve způsobu tepelného skoku [43], jsou obě elektrody na počátku v kontaktu s chladičem, při teplotě okolo  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Zdroj tepla (typicky při  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) se pak uvede do styku s jednou elektrodou a teplotní profil přes vzorek začne vyvíjet směrem k rovnováze v souladu s novými okrajovými podmínkami. Výsledná teplotní roztažnost vzorku způsobuje průtok proudu mezi elektrodami a použití vhodného postupu dekonvoluce s použitím Fourierovy analýzy umožňuje extrakci rozložení prostorového náboje od aktuálních údajů průtoku. Tato technika je zvláště vhodná pro silnější vzorky, zhruba mezi 2 a 20 mm, protože tam je v podstatě neomezené množství tepla k dispozici a užitečná data mohou být shromažďována až do rovnovážného stavu rozložení teploty napříč vzorkem.

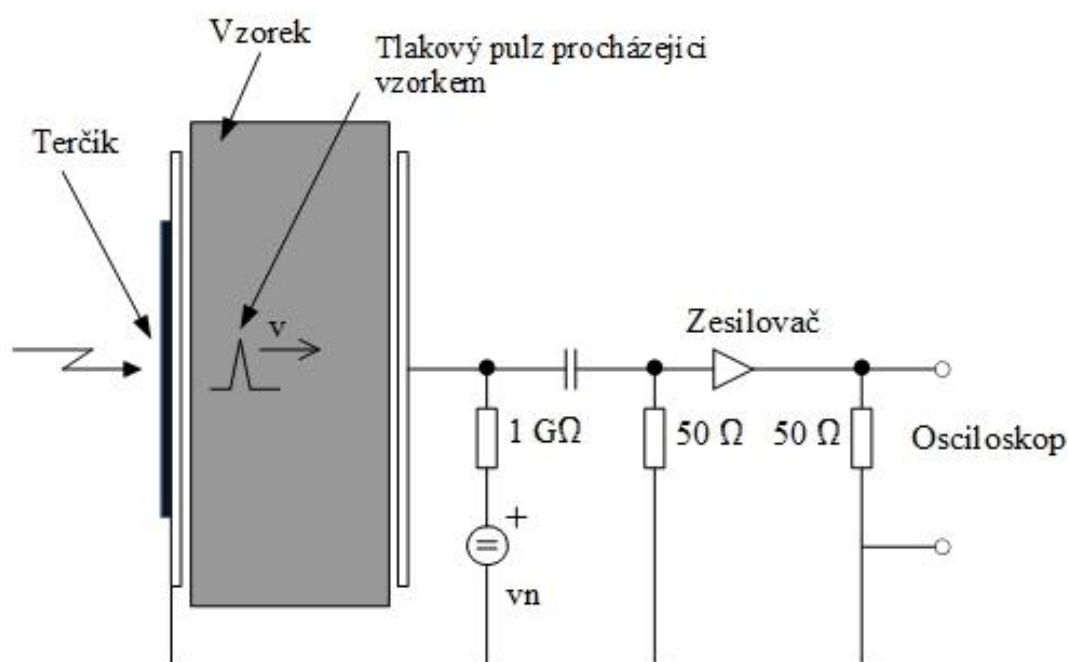
## 6.3 Akustické metody (LIPP a PWP)

Dočasné posunutí prostorového náboje může být také dosaženo za použití tlakového impulsu v podobě podélné zvukové vlny. Taková vlna je generována prostřednictvím zachování hybnosti, kdy malé množství cíle připojené ke vzorku je odstraněno následující absorpcí energie předané ve formě krátkého laserového pulsu. Dvě laboratoře vyvinuly tento postup, pojmenovaly je metoda pulzní tlakové vlny (Pressure wave propagation - PWP) [45] a metoda laserem indukovaného pulzu (Laser Induced Pressure Pulse - LIPP) [46]. Většinou PWP využívá pulzní zdroj (generátor), tlakové vlny působí nejdříve na piezo materiál [47]. Velkou výhodou Lipp (nebo PWP) je, že jelikož tlakové pulzy jsou krátké (typicky 5ns), profil prostorového náboje v polymerním vzorku (rychlost zvuku  $\gg 2000\text{ m/s}$ ) lze získat bez dekonvoluce, s prostorovým rozlišením v nejhorším případě 10% tloušťky vzorku, za předpokladu, že tloušťka vzorku je menší než přibližně  $100\text{ }\mu\text{m}$ .

LIPP metoda má tlakový pulz vytvořen pomocí laserového záblesku, který dopadá na

terčik elektrody viz. obr. 6.2. Tlaková vlna prochází vzorkem rychlostí zvuku. Indukovaný proud je přímo úměrný rozložení prostorového náboje uvnitř vzorku. Nevýhodou této metody je značná technická náročnost měřicího systému. [1]

Zajímavý vývoj metody PWP získá troj dimenzionálně mapovaný profil prostorového náboje [48]. Pulzní napětí 500 V 400 ns aplikované na piezoelektrické zařízení vytváří tlakový impuls, který je zaměřen na horní povrch (XY) vzorku akustickou čočkou. Průměr tlakového pulzu v ohnisku je asi 0,8 mm, tak, aby prostorové rozlišení v rovině XY bylo přibližně 1 mm<sup>2</sup>.

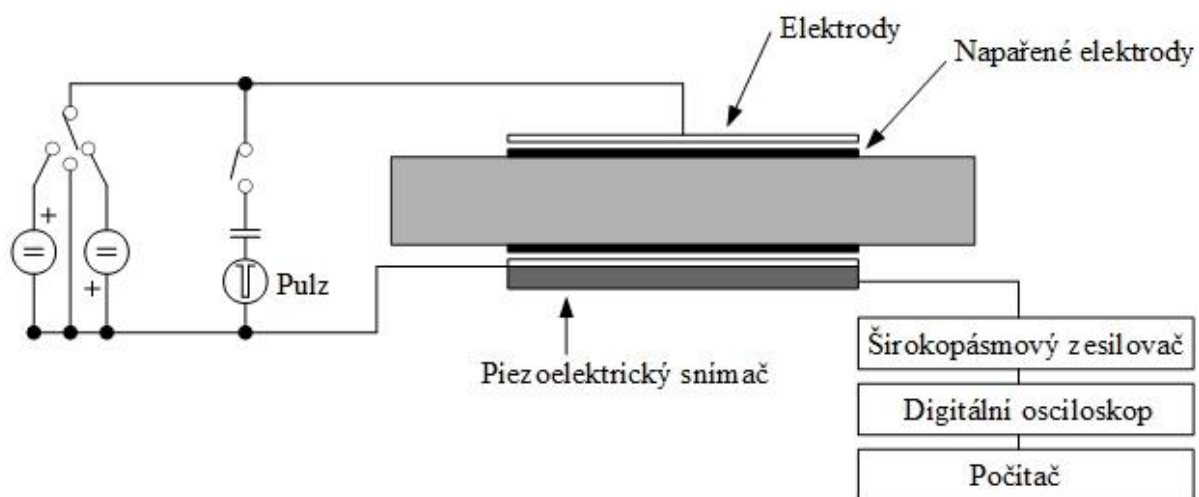


Obr. 6.2. Metoda LIPP (překresleno z [1])

#### 6.4 Pulzní elektroakustická metoda PEA

Alternativně lze pulzní tlak generovat elektro akustickou aplikací krátkých vysokonapěťových impulsů na vzorku. Výsledné elektrické pole působí silou po celém rozložení prostorového náboje a tím vytváří akustické pulzy na celém objemu vzorku s tlakem přímo úměrný lokální hustotě náboje [49]. Tyto impulsy se šíří skrze vzorek směrem k oběma elektrodám a jsou detekovány uzemněným piezoelektrickým měničem připojeným k jedné z nich. Nejprve byla dekonvoluce zapotřebí k extrahování rozložení prostorového náboje z výstupu snímače, a to i v tenkých vzorcích. Nyní do značné míry eliminuje potřebu dekonvoluce použitím tenkých měničů na bázi polyvinylidenfluoridu. Tento způsob se běžně nazývá pulzní elektroakustická metoda (Pulsed Electroacoustic PEA).

Minimální tloušťka vzorku pro akustické techniky je kolem desetinásobku prostorového rozlišení a maximální tloušťka vzorku je určena útlumem a disperzi tlakového impulsu při přenosu. Korekce útlumu a disperze tlakového impulsu při přenosu přes vzorek by měla být stanovena pro polymerní vzorky tlusté více než přibližně 100 mm. Ve vzorku polyethylenu se korekce Lipp a PEA dat pro útlum a rozptyl stávají nepřesné při tloušťkách větších jak 4-5 mm. Nicméně byla hlášena měření PEA na vzorcích tlustších než 5 mm. [50]

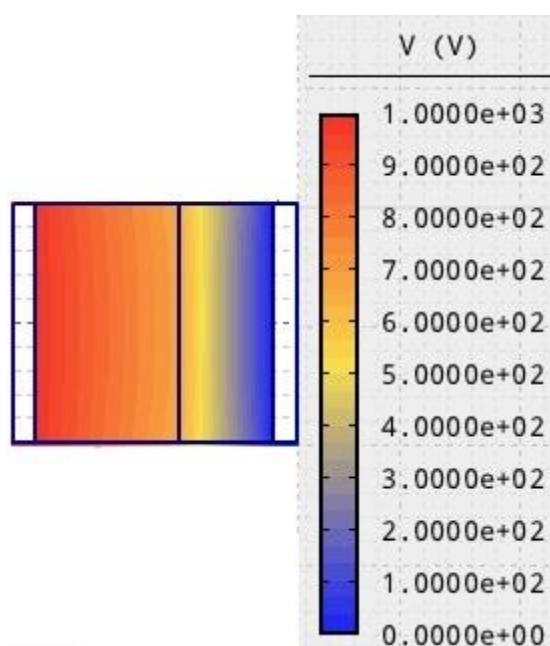


Obr. 6.3. Metoda PEA (překresleno z [1])

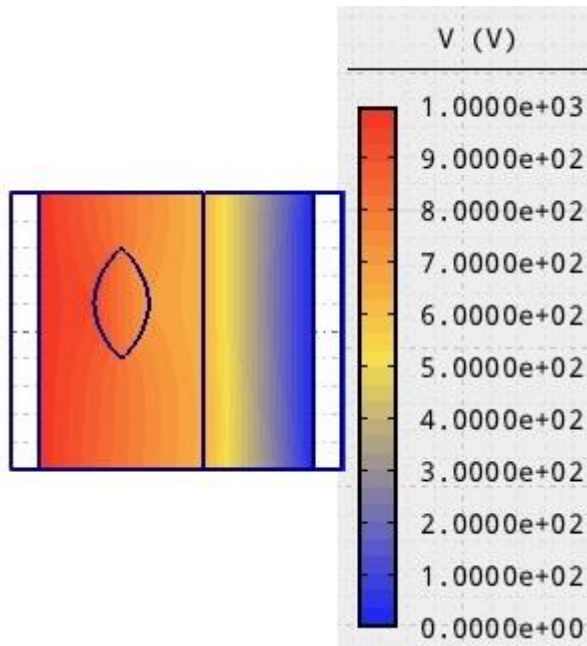
## 7 Model dielektrika

V této kapitole bude znázorněn model dielektrika připojeného k elektrodám vytvořený v programu agros2D. Na jedné elektrodě je připojené napětí 1000 V a druhá elektroda je zemnicí. Dielektrikum se skládá ze dvou částí o různé permitivitě. Permittivita materiálu bližšího k řídicí elektrodě je rovna  $\epsilon_{r1}=7$ , a permitivita dielektrika bližší zemnicí elektrodě  $\epsilon_{r2}=2$ . Model se nachází v prostředí se vzduchem. Další model viz obr. 7.2, znázorňuje dielektrikum s nehomogenitou v materiálu o relativní permitivitě  $\epsilon_{r3}=1$  (vzduchu) a obr. 7.3 znázorňuje dielektrikum s nehomogenitou v materiálu o relativní permitivitě  $\epsilon_{r3}=12$ .

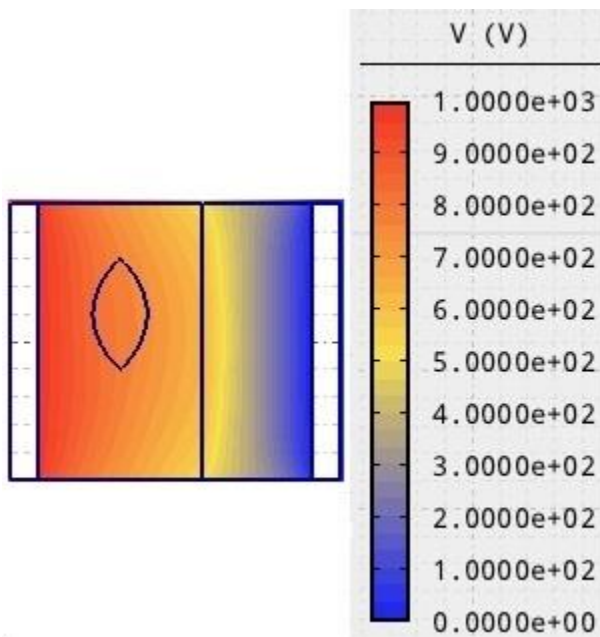
V obr. 7.2 je vidět, že napětí u nehomogenity se zmenšuje a neprochází přes něj tak dobře. Zatímco na modelu s nehomogenitou  $\epsilon_{r3}=12$  viz obr. 7.3 napětí na nehomogenitě prochází lépe než přes původní materiál o elativní permitivitě  $\epsilon_{r1}=7$ .



Obr. 7.1. Model dvou dielektrik ( $\epsilon_{r1}=7$ ,  $\epsilon_{r2}=2$ ) připojených na elektrody



Obr. 7.2. Model dvou dielektrik ( $\epsilon_{r1}=7$ ,  $\epsilon_{r2}=2$ ) s nehomogenitou o  $\epsilon_{r3}=1$  připojených na elektrody



Obr. 7.3. Model dvou dielektrik ( $\epsilon_{r1}=7$ ,  $\epsilon_{r2}=2$ ) s nehomogenitou o  $\epsilon_{r3}=12$  připojených na elektrody



## 8 Experiment

V experimentální části bylo provedeno měření prostorového náboje vznikající v dielektrickém materiálu. Měření prostorového náboje probíhalo za použití nedestruktivní metody PEA (pulzní elektroakustická metoda), která je popsána v předchozí kapitole.

Všechna měření v rámci experimentální části probíhala s pomocí multimetru KEITHLEY a elektrodovém systému KEITHLEY viz obr. 8.1. Mezi tyto elektrody se umístí měřený vzorek a elektrody se ke vzorku přitisknou. Poslední součástí sestavy byl počítač propojený s měřicími přístroji, který řídí průběh měření a průběžně zaznamenává naměřená data.

Před samotným měřením byly jednotlivé vzorky ve zkratovacích deskách po dobu delší 24 hodin, aby měření nebylo ovlivněno zbytkovou energií. Z důvodu, aby nedocházelo k elektrostatickému výboji od obsluhy měřicího systému v době výměny materiálu (mohla by totiž ve výsledku vzniknout určitá chyba měření), byl použit uzemněný elektrostatický náramek připevněný k ruce a její druhá část k uzemněné svorce.

Experimentální měření se skládalo z doby vybíjení, doby polarizace (nabíjení nebo napájení), po kterém následovala doba depolarizace, kde bylo odstraněno napájecí napětí. Měření byla opakována při různých úrovních napětí a to od 100 V do 1000 V, z nichž každé opakování trvalo 2 hodiny. Po zaznamenání dat bylo možné data z počítače exportovat na flash disk a následně je zpracovat v softwaru MS Excel.



Obr. 8.1. Měřicí systém pro měření prostorového náboje s PEN vzorkem umístěným na elektrodě.

## 8.1 Použitý materiál

Měření prostorového náboje bylo prováděno na třech polymerních vzorcích. První dva vzorky byly PET folie od různých výrobců a třetí vzorek byl PEN TEONEX folie. Kromě polymerních vzorků bylo pro zajímavost měřeno také na vzorku lepenky, kartitu a relastiku.

Tloušťky materiálu byly změřeny mikrometrem. Průměrná tloušťka PEN TEONEX činila 25  $\mu\text{m}$ , pro PET-1 měla hodnotu 30  $\mu\text{m}$  a PET-2 činila 30  $\mu\text{m}$ . Všechny použité vzorky byly upraveny na rozměr 10 x 10 mm.

## 8.2 Výsledky měření

Tab. 8.1. Naměřené hodnoty PET-1 folie v určitých časových bodech

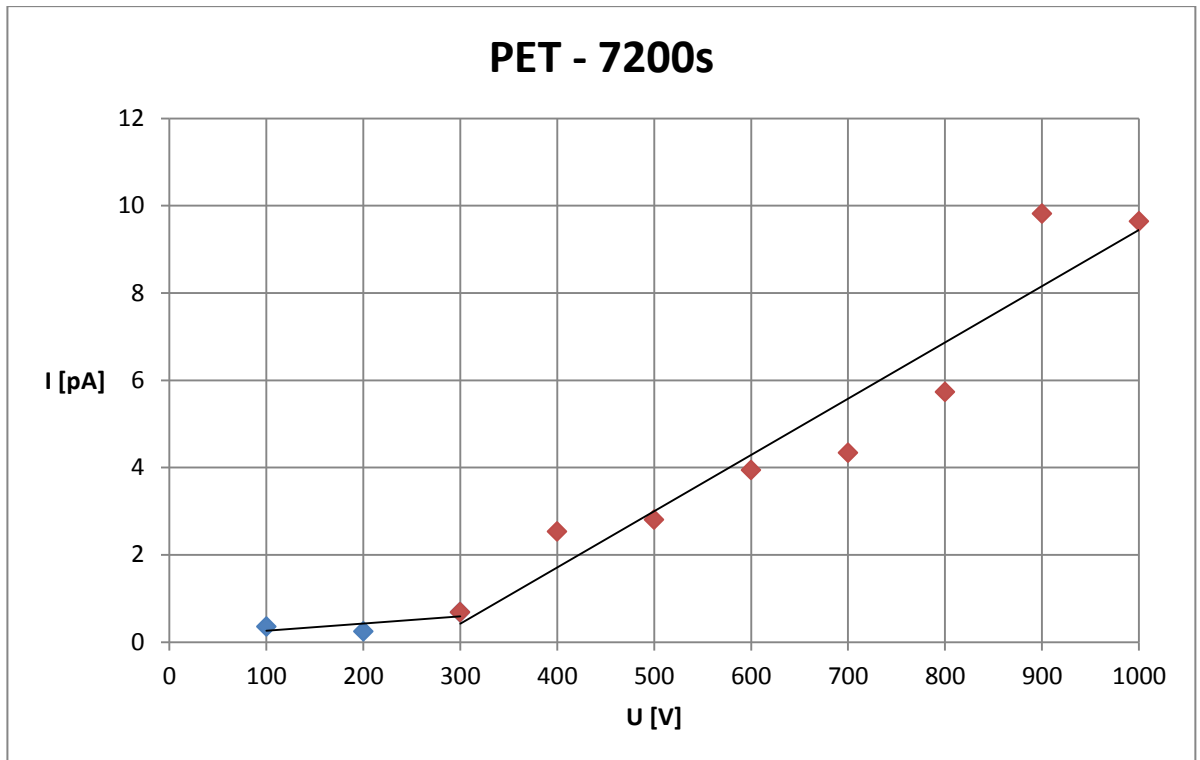
PET-1	60s	600s	1800s	3600s	5400s	7200s
100	4.5312	0.9045	0.592	0.0216	0.3122	0.3533
200	9.1521	1.6319	0.5957	0.4227	0.4753	0.245
300	15.1305	2.3266	1.2103	1.1839	0.7299	0.6831
400	40.7	10.0761	5.2305	3.1433	2.7627	2.53
500	39.118	9.0198	4.9651	3.9035	3.3903	2.805
600	73.942	17.62	8.7717	5.8794	4.723	3.9386
700	59.682	12.6784	8.2724	5.9721	5.1605	4.3361
800	73.068	15.6198	9.7957	7.0171	5.8355	5.7262
900	254.4	54.158	24.785	15.7641	11.6876	9.8141
1000	130.716	29.177	17.6842	13.4713	11.3075	9.6409
U [V]	I [pA]	I [pA]	I [pA]	I [pA]	I [pA]	I [pA]

Tab. 8.2. Naměřené hodnoty PET-2 folie v určitých časových bodech

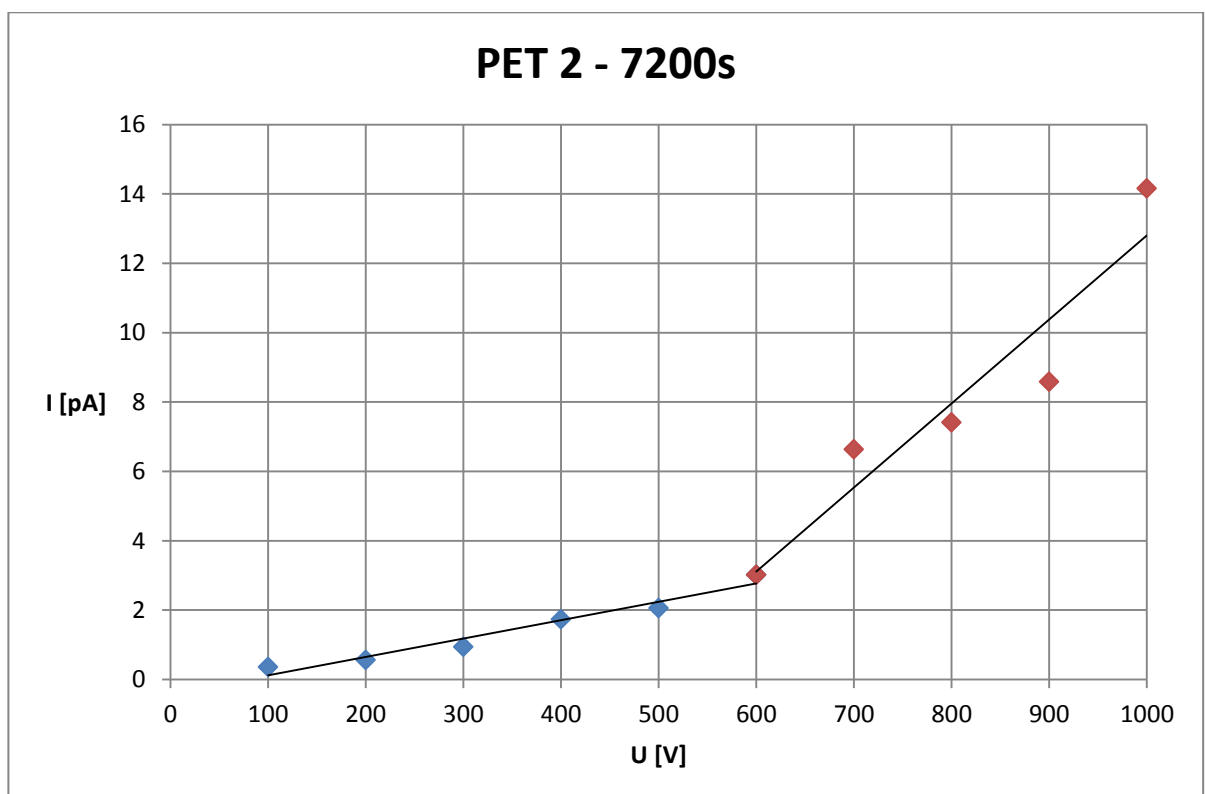
PET-2	60s	600s	1800s	3600s	5400s	7200s
100	6.6476	1.4956	0.7542	0.4504	0.5904	0.3555
200	12.3602	2.2043	1.1811	0.7399	0.4633	0.5632
300	21.863	3.9918	1.581	1.5185	0.9431	0.9411
400	37.367	7.8169	3.9554	2.4101	1.929	1.7312
500	41.376	6.9272	4.1133	3.1373	2.6718	2.0535
600	56.131	9.8067	5.4726	3.8518	3.5545	3.0113
700	142.263	32.123	15.7895	9.9265	8.1572	6.6341
800	101.04	22.394	12.8964	10.3592	8.5761	7.4121
900	129.083	26.295	15.5262	11.3138	10.023	8.5808
1000	222.19	60.392	31.805	20.78	16.5299	14.1519
U [V]	I [pA]	I [pA]	I [pA]	I [pA]	I [pA]	I [pA]

Tab. 8.3. Naměřené hodnoty PEN TEONEX folie v určitých časových bodech

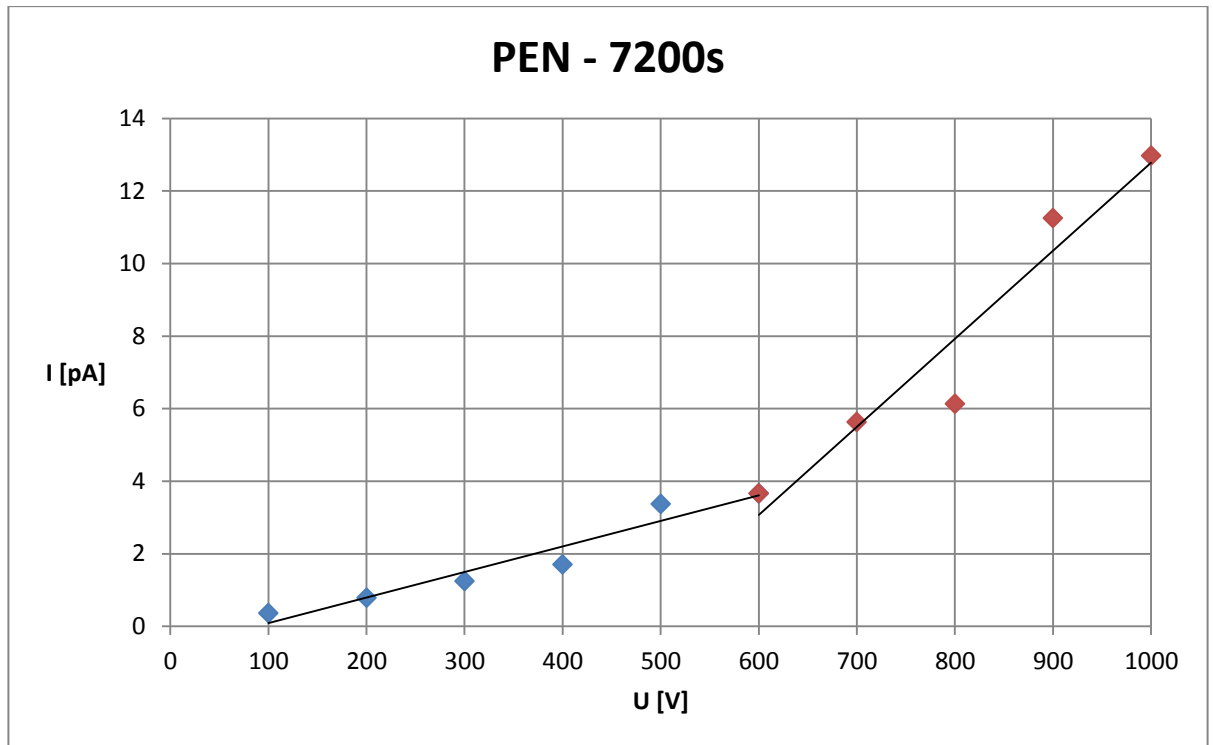
PEN	60s	600s	1800s	3600s	5400s	7200s
100	8.5657	1.334	0.4203	0.7163	0.1395	0.3633
200	22.072	5.2949	2.1889	1.1836	0.9935	0.7876
300	28.302	5.7438	2.7292	1.7688	1.3749	1.2401
400	40.98	7.71E+00	3.8744	2.8621	2.4453	1.6996
500	55.108	10.6569	5.5205	3.7626	3.2331	3.3716
600	74.239	14.0454	7.1367	5.4604	5.0499	3.6585
700	125.736	25.589	12.8637	8.7029	6.6027	5.6244
800	131.969	25.775	13.139	8.5192	6.6547	6.1314
900	243.09	50.878	25.962	16.8094	13.8646	11.2493
1000	185.594	40.253	22.987	16.0966	13.2523	12.9728
U [V]	I [pA]	I [pA]	I [pA]	I [pA]	I [pA]	I [pA]



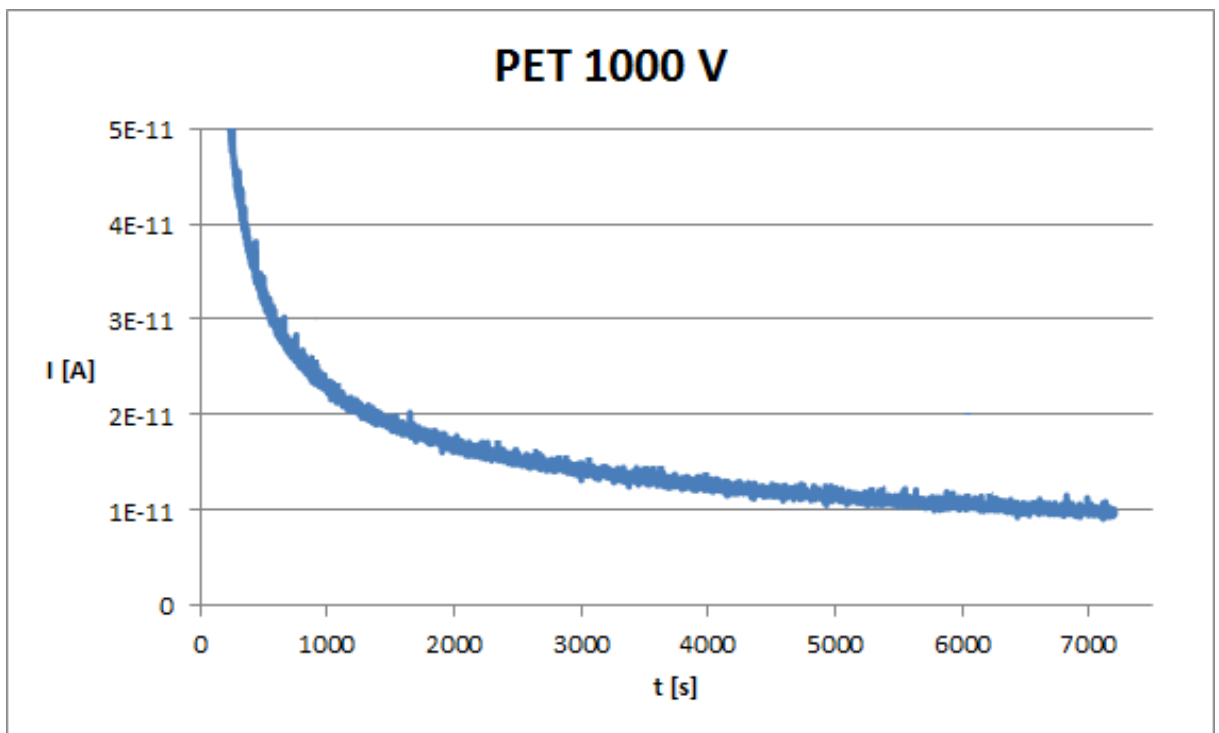
Obr. 8.2. I-U charakteristika naměřených hodnot na vzorku PET folie



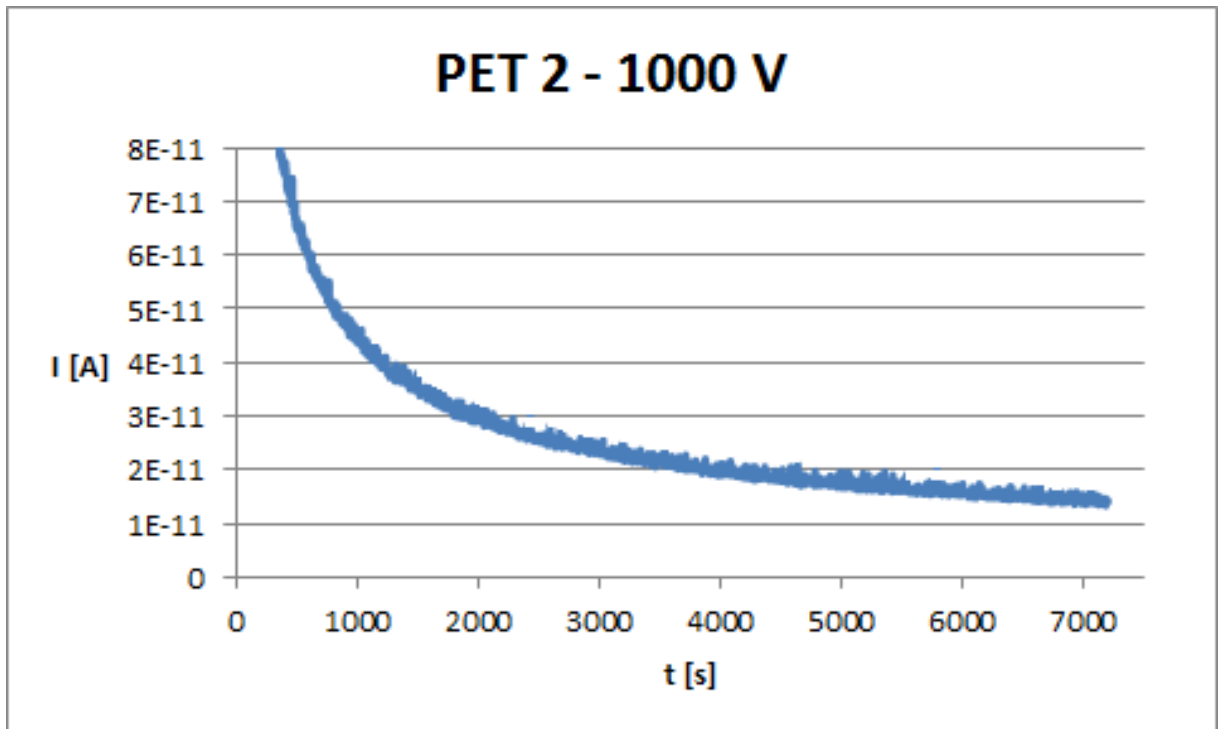
Obr. 8.3. I-U charakteristika naměřených hodnot na vzorku PET-2 folie



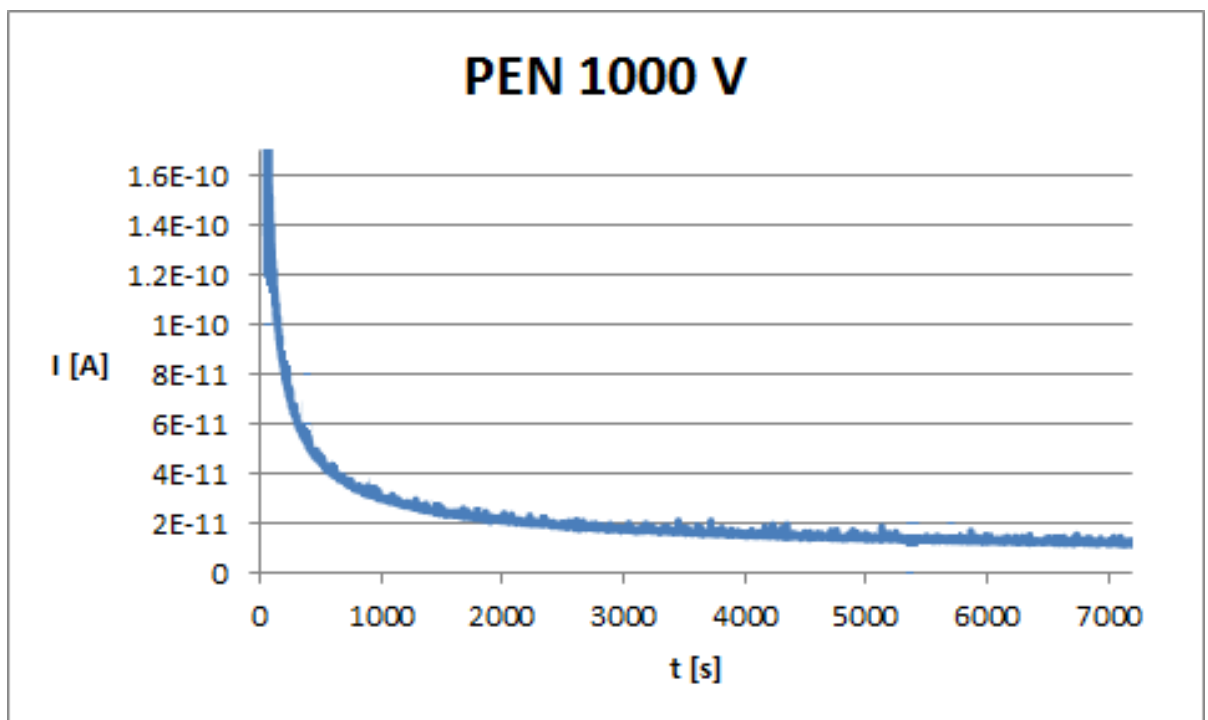
Obr. 8.4. I-U charakteristika naměřených hodnot na vzorku PEN TEONEX



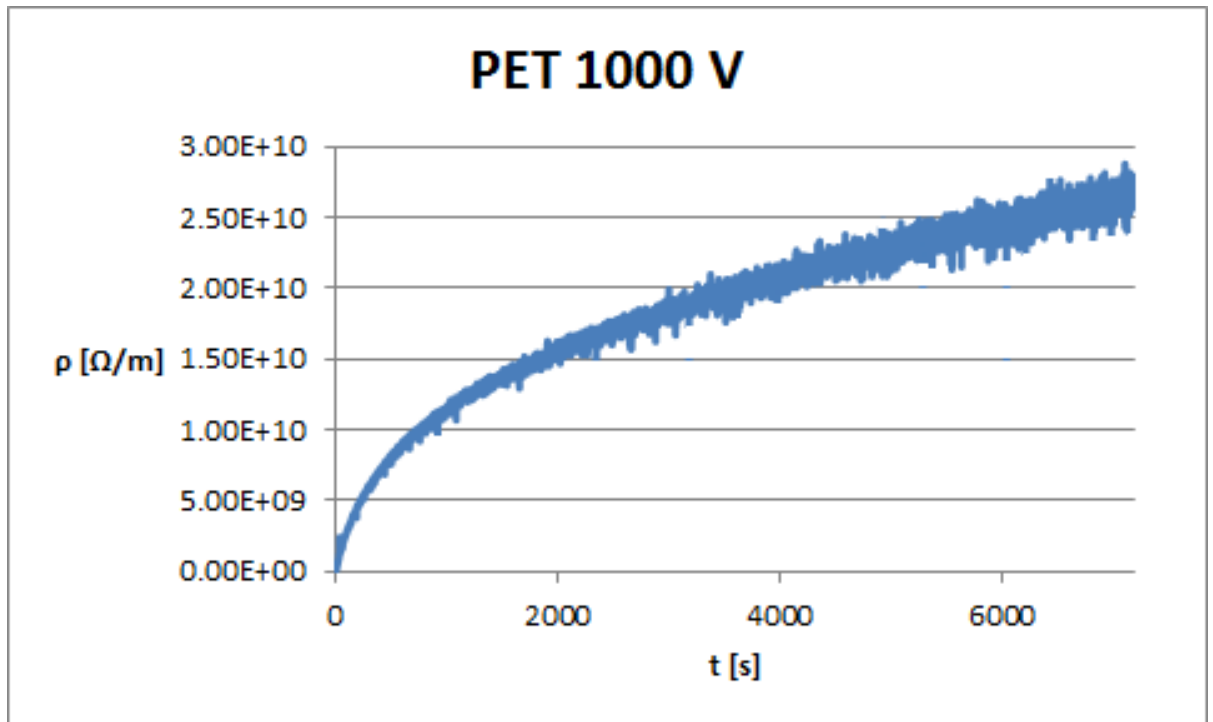
Obr. 8.5. Proudová závislost v čase PET folie



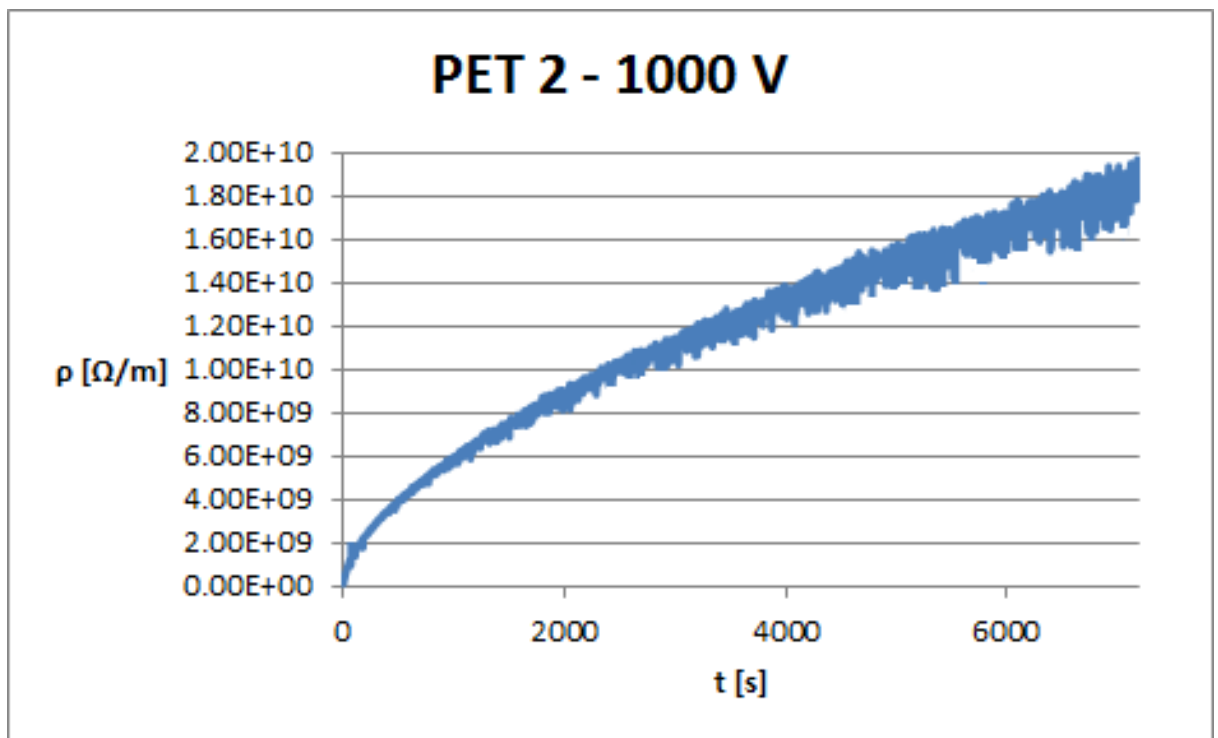
Obr. 8.6. Proudová závislost v čase PET-2 folie



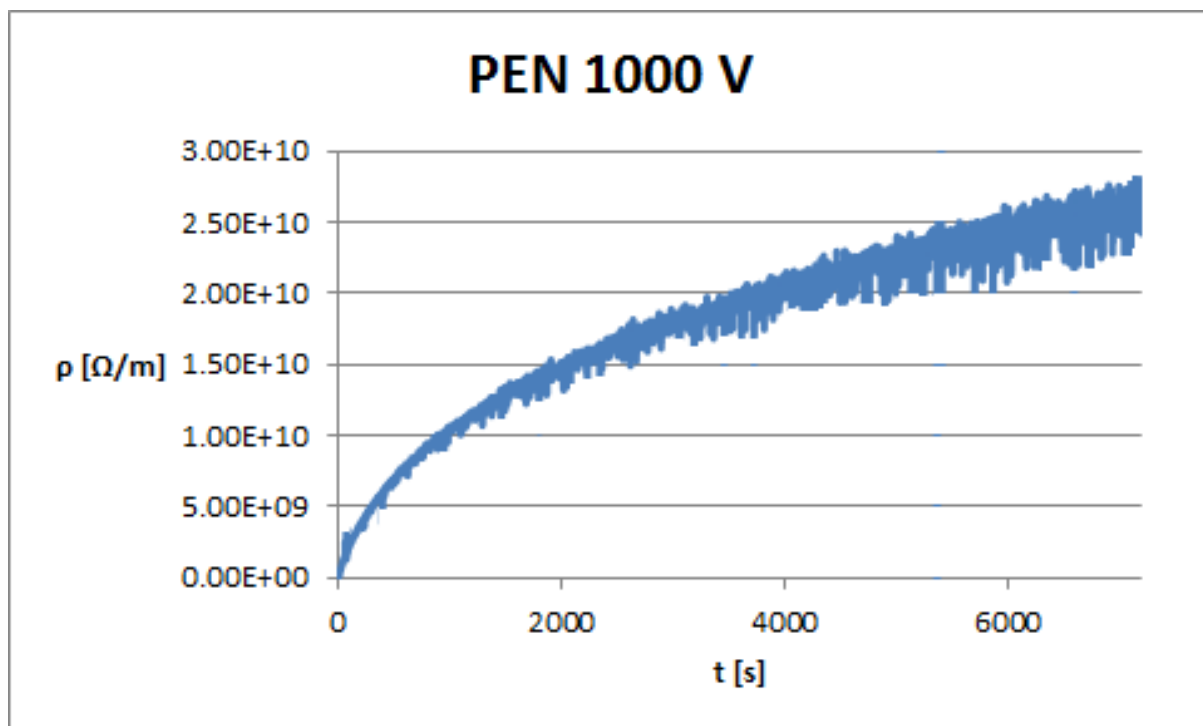
Obr. 8.7. Proudová závislost v čase PEN TEONEX folie



Obr. 8.8. Závislost rezistivity na čase PET folie



Obr. 8.9. Závislost rezistivity na čase PET-2 folie



Obr. 8.10. Závislost rezistivity na čase PEN TEONEX folie

### 8.3 Zhodnocení výsledků měření

V rámci experimentální části byla provedena měření prostorového náboje vznikající ve vybraných vzorcích nepřímou metodou. Pro vyhodnocení byla použita metoda napěťové závislosti na proudu (I-U charakteristika). Tyto charakteristiky v čase 7200s můžeme vidět na obr. 8.2, obr. 8.3 a obr. 8.4. Dále byly zobrazeny proudy v čase (charakteristiky při konstantním napětí 1000 V můžeme vidět na obr. 8.5, obr. 8.6, obr. 8.7) a rezistivita v čase jednotlivých vzorků (charakteristiky při konstantním napětí 1000 V můžeme vidět na obr. 8.8, obr. 8.9, obr. 8.10). I-U charakteristiky byly zpracovány u polymerních materiálů v časech 60 s, 600 s, 1800 s, 3600 s, 5400 s a 7200 s, jejich hodnoty jsou vidět v tab. 8.1, tab. 8.2 a tab. 8.3. Pro lepenku, kartit a relastik byly I-U charakteristiky zpracovány v časech 15 s, 60 s a 420 s (tyto charakteristiky se nachází v příloze A). Zbylé grafy I-U charakteristik se nachází v příloze A, grafy proudové závislosti na čase jsou umístěny do přílohy B a závislost rezistivity na čase je v příloze C.

Ze závislosti proudu na napětí je u polymerních materiálů patrný vyšší nárůst hodnot proudu při rostoucím napětí. Jak je vidět na obr. 8.2, pro materiál PET-1 má I-U charakteristika do hodnoty napětí 300 V lineární nárůst proudu a od hodnoty 300 V, je tento



nárůst proudu rapidně rychlejší, což je důkaz prostorového náboje v materiálu, který na tyto hodnoty působí. Rozdíl I-U charakteristik v čase spočíval ve velikosti proudu.

U materiálu PET – 2, který je znázorněn na obr. 8.3 je změna sklonu od jiného napětí, než je tomu u materiálu PET. I-U charakteristika do napětí 600 V má lineární nárůst proudu a od hodnoty 600 V, mění sklon a proud rychleji roste.

Pro materiál PEN jak je vidět na obr. 8.4 má na I-U charakteristice stejně jako to bylo u materiálu PET-2 větší nárůst proudu od hodnoty 600 V.

V případě vzorku lepenky, kartitu a relastiku byla I-U charakteristika dle předpokladů ohmická.

Na obr. 8.5, obr. 8.6 a obr. 8.7 jsou vidět závislosti proudu na čase. Hodnoty těchto grafů pro různé materiály jsou v tab. 8.1, tab. 8.2 a tab. 8.3. Dle tab. 8.1 v čase 60s při napětí 1000 V dosahoval proud hodnoty 130,72 pA a v čase 7200 s tento proud byl znatelně menší a to 9,64 pA (při stejném napětí). Proud je na počátku napájení větší a postupem času se zmenšuje a přibližuje se k ustálenému stavu.

Na obr. 8.8, obr. 8.9 a obr. 8.10 si můžeme povšimnout závislosti rezistivity na čase, která se zvětšuje v průběhu doby napájení dle předpokladu.

## Závěr

Tato práce se věnuje problematice prostorového náboje v dielektriku.

Úvodní kapitola byla zaměřena na izolační soustavy točivých elektrických strojů rozdělené na systém VPI a Resin-Rich. V této kapitole jsou popsány výhody, nevýhody, porovnání těchto systémů a jejich využití u strojů.

Druhá kapitola je zaměřena na izolační systémy transformátorů. Jsou zde popsány suché, zalévané a kombinované izolace transformátorů a následně popsány materiály používané pro izolační systémy, jako je fluorid sírový, minerální, rostlinné a syntetické oleje. U organických esterů je popsán Midel 7131, který byl vyvinut kvůli nedostatku minerálních olejů u transformátorové techniky. Midel má mnoho výhod, jako je malý dopad na životní prostředí, velká odolnost proti vlhkosti, nevytváří korozi a má vysoký bod hoření. Nechybí zde ani zástupci pevných izolantů transformátoru jako je Nomex, transformátorový papír a transformátorová lepenka.

Další kapitola byla zaměřena na izolační systémy kabelového vedení. Kde byly zmíněny nejzákladnější termoplasty. Mezi vůbec nejrozšířenější a nejmasověji vyráběné patří polyvinylchlorid a polyetylen.

Čtvrtá kapitola se věnuje polarizacím a jejich rozdělením z hlediska ztrátových a bezztrátových, dielektrika jsou polární a nepolární. Pro problematiku vzniku prostorového náboje je podstatná polarizace migrační, **ve které je první zmínka o prostorovém náboji, který byl v této diplomové práci experimentálně měřen na vzorcích.**

Prostorový náboj vznikající v dielektrických materiálech a způsoby měření byly popsány v následujících kapitolách. Prostorový náboj výrazně ovlivňuje vodivostní jevy v materiálu a elektrickou pevnost.

Předposlední kapitola byla věnována modelu dielektrika s různou permitivitou, který byl **připojený na elektrody**. Bylo nasimulováno rozložení napětí v dielektriku homogenním a nehomogenním. Dielektrikum bylo namodelováno v programu agros2D.

Experimentální část potvrdila poznatky z části teoretické. Na polymerních vzorcích se hromadí prostorový náboj při vyšších napětích a zkresluje I-U charakteristiku. Proud se postupem času zmenšuje a přibližuje se k ustálenému stavu.

Prostorový náboj byl v práci teoreticky popsán, uvedeny vhodné metody jeho měření a provedeny jednoduché simulace rozložení elektrického pole v nehomogenním dielektriku. V rámci experimentu diplomové práce byl prostorový náboj měřen pomocí nepřímé metody IU charakteristika. V současné době jsou připravovány vzorky elektroizolačních

materiálů s různou vnitřní strukturou, tedy i homogenitou, které budou měřeny pomocí metody PEA. Zařízení pro měření prostorového náboje je v současné době na KET dokončováno.

## Seznam literatury

- [1] MENTLÍK, Václav. Dielektrické prvky a systémy. 1. vyd. Praha: BEN-technická literatura, 2006, 235 s. ISBN 80-730-0189-6.
- [2] TUREK, Miroslav. Točivé stroje a jejich izolační systémy. [online] [cit. 2016-09-18] [https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/10485/turekm\\_bakalarska\\_prace\\_tocive\\_stroje\\_a\\_jejich\\_izolacni\\_systemy\\_complete.pdf?sequence=1](https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/10485/turekm_bakalarska_prace_tocive_stroje_a_jejich_izolacni_systemy_complete.pdf?sequence=1)
- [3] ŽIVNÝ, Petr. Izolační systém resin rich pro vinutí generátorů. Diplomová práce. Západočeská universita. Fakulta elektrotechnická. Katedra elektrotechniky a výkonové elektroniky. Vedoucí práce Ing. Josef Pihera, Ph.D.
- [4] Materiály pro hlavní izolaci izolačních systémů Resin-Rich. [online] [cit. 2016-09-18] <http://www.silent-czech.cz/produkty/izolacni-materialy/slidove-materialy/c-materialy-pro-hlavni-izolaci-izolacnich-systemu-resin-rich/>
- [5] Vacuum Pressure Impregnation (VPI) Systems. [online] [cit. 2016-09-19]. Dostupné z: <http://www.wsf-industries.com/VPI.htm>
- [6] Vacuum Pressure Impregnation Plant. [online] [cit. 2016-09-19]. Dostupné z: <http://www.arengg.com/vacuum-pressure-impregnation-plant.htm>
- [7] SGB. Proč suché transformátory? [online]. [cit. 2016-09-20]. Dostupné z: <http://www.sgbsk.sk/download/clanky-v-tlaci/proc-suche-transformatory.pdf>
- [8] HASSDENTEUFEL, J. *Elektrotechnické materiály*. Bratislava: SNTL, 1971, 554 s.
- [9] MENTLÍK, Václav. *Elektrotechnické materiály*. Plzeň: Západočeská univerzita, 1995. ISBN 80-7082-227-9.
- [10] REŇÁK, Ladislav. Elektrická vodivost alternativních elektroizolačních kapalin [online]. [cit. 2016-10-12]. Dostupné z: [http://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=40101](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=40101)
- [11] KUČEROVÁ, Eva. *Elektrotechnické materiály*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2002. ISBN 80-7082-940-0.
- [12] VAŠMUCIUS, Adam. Oleje aplikovatelné ve výkonových transformátorech [online]. [cit. 2016-10-13]. Dostupné z: [https://otik.uk.zcu.cz/xmlui/bitstream/handle/11025/4737/Vasmucius\\_Adam.pdf?sequence=1](https://otik.uk.zcu.cz/xmlui/bitstream/handle/11025/4737/Vasmucius_Adam.pdf?sequence=1)
- [13] DIVÍLEK, Petr. Analýza reologických vlastností rostlinných olejů a jejich složek [online]. [cit. 2016-10-13]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=85654](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=85654)
- [14] MIDEL. Proteties of Midel Esters. [online] [cit. 2016-10-20]. Dostupné z:

<http://www.midel.com/applications/distribution>

[15] Izolační systémy a jejich charakteristiky [online] [cit. 2016-10-20]. Dostupné z:

[https://www.powerwiki.cz/attach/VNZ/VNZ\\_4-Izolacni\\_systemy.pdf](https://www.powerwiki.cz/attach/VNZ/VNZ_4-Izolacni_systemy.pdf)

[16] Nomex [online] [cit. 2016-10-21]. Dostupné z:

<https://cs.wikipedia.org/wiki/Nomex>

[17] Specifikace materiálu: NOMEX [online] [cit. 2016-10-21]. Dostupné z:

[http://www.odetka.cz/net20/cz/specmat\\_nomex.aspx](http://www.odetka.cz/net20/cz/specmat_nomex.aspx)

[18] Izolační hladiny vysokonapětových kabelů [online] [cit. 2016-10-22]. Dostupné z:

<http://www.elektroprumysl.cz/kabely-a-vodice/izolacni-hladiny-vysokonapetovych-kabelu>

[19] Polyvinylchlorid [online] [cit. 2016-11-1]. Dostupné z:

<https://cs.wikipedia.org/wiki/Polyvinylchlorid>

[20] DUCHÁČEK, V. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 3., přeprac. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2011. ISBN 978-80-7080-788-0.

[21] MLEZIVA, J. *Polymery - výroba, struktura, vlastnosti a použití*. Praha: Sobotáles, 1993. ISBN 80-901570-4-1.

[22] CARDARELLI, F. *Materials handbook*. 2nd ed. London: Springer, 1998. ISBN 978-184-6286-698.

[23] ŠKEŘÍK, J. *Plasty v elektrotechnice a elektronice*. 1. vyd. Praha: SNTL Nakladatelství technické literatury, 1991. ISBN 80-030-0657-0.

[24] PINKEROVÁ, M. a R. POLANSKÝ. *Nové trendy v materiálech používaných pro izolaci a opláštění kabelů*. 2012, č.3. [cit. 2016-11-2]. Dostupné z:

[http://147.228.94.30/images/PDF/Rocnik2012/Cislo3\\_2012/r6c2c4.pdf](http://147.228.94.30/images/PDF/Rocnik2012/Cislo3_2012/r6c2c4.pdf)

[25] Pryž [online] [cit. 2016-12-5]. Dostupné z:

<https://www.opi.zcu.cz/download/pryz.pdf>

[26] Dielektrika [online] [cit. 2016-12-5]. Dostupné z:

<http://dielektrika.kvalitne.cz/mechpolar.html>

[27] HOFMANN, J. a M. URBANOVÁ. *Fyzika I*. Vyd. 3., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2011. ISBN 978-80-7080-777-4.

[28] Debye relaxation model [online] [cit. 2016-12-5]. Dostupné z:

[http://www.mse.iastate.edu/~nbowler/MSE-EE\\_590\\_Fall\\_2011/slides/590-11-Debye.pdf](http://www.mse.iastate.edu/~nbowler/MSE-EE_590_Fall_2011/slides/590-11-Debye.pdf)

[29] Polarizace dielektrika [online] [cit. 2016-12-15]. Dostupné z:

<https://cs.wikipedia.org/wiki/Dielektrikum>

[30] Dielectric relaxation phenomena in complex materials [online] [cit. 2017-2-2]. Dostupné

z:

<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.455.258&rep=rep1&type=pdf>

[31] Brownův pohyb [online] [cit. 2017-2-2]. Dostupné z:

[http://fyzweb.cz/materialy/aplety\\_hwang/brown/gas2D/gas2D\\_cz.html](http://fyzweb.cz/materialy/aplety_hwang/brown/gas2D/gas2D_cz.html)

[32] MENTLÍK, Václav. *Spolehlivostní aspekty elektrotechnologie*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2011, 118 s. ISBN 978-80-7300-412-5.

[33] M.N.O. Sadiku, *Elements of Electromagnetics*, Oxford University Press, New York, 2nd Edition, 1995, p.195.

[34] G.M. Sessler, IEEE Trans. Diel. Elec. Insul. **4**, 614 (1997).

[35] I.W. McAllister, G.C. Crichton and A. Pedersen, Conference Record 1994 IEEE Inter. Symp. Elec. Insul. p.212.

[36] L.A. Dissado, C. Laurent, G.C. Montanari and P.H.F. Morshuis. IEEE Demonstrating a Threshold for Trapped Space Charge Accumulation in Solid Dielectrics under dc Field, 9 (2005).

[37] Early stages of polymer crystallization studied by dielectric spectroscopy [online] [cit. 2017-3-6]. Dostupné z:

<http://www.polymerphysik.uni-rostock.de/publication/theses/pdf/soliman.pdf>

[38] J. Lewiner, IEEE Trans.Elec.Insul. EI-21, 351 (1986).

[39] N.H. Ahmed and N.N. Srinivas, IEEE Trans. Diel. Elec. Insul. **4**, 644 (1997).

[40] R.E. Collins, (a) Appl Phys Letters, **26**, 675 (1975) (b) J. Appl. Phys. **48**, 4804 (1976).

[41] H. von Seggern, Appl. Phys. Letters, **33**, 134 (1978).

[42] S.B. Lang and D.K. Das-Gupta, J. Appl. Phys. **59**, 2151 (1986) (b) S.B. Lang, Ferroelectrics, **118**, 343 (1991).

[43] A. Cherifi, M. Abou Dakka and A. Toureille, IEEE Trans. Elec. Insul. **EI-27**, 1152 (1992).

[44] M. Stewart and M. Cain. Use of scanning LIMM (Laser Intensity Modulation Method) to characterise polarisation variability in dielectric materials. [online] [cit. 2017-4-16]. Dostupné z: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/183/1/012001/pdf>

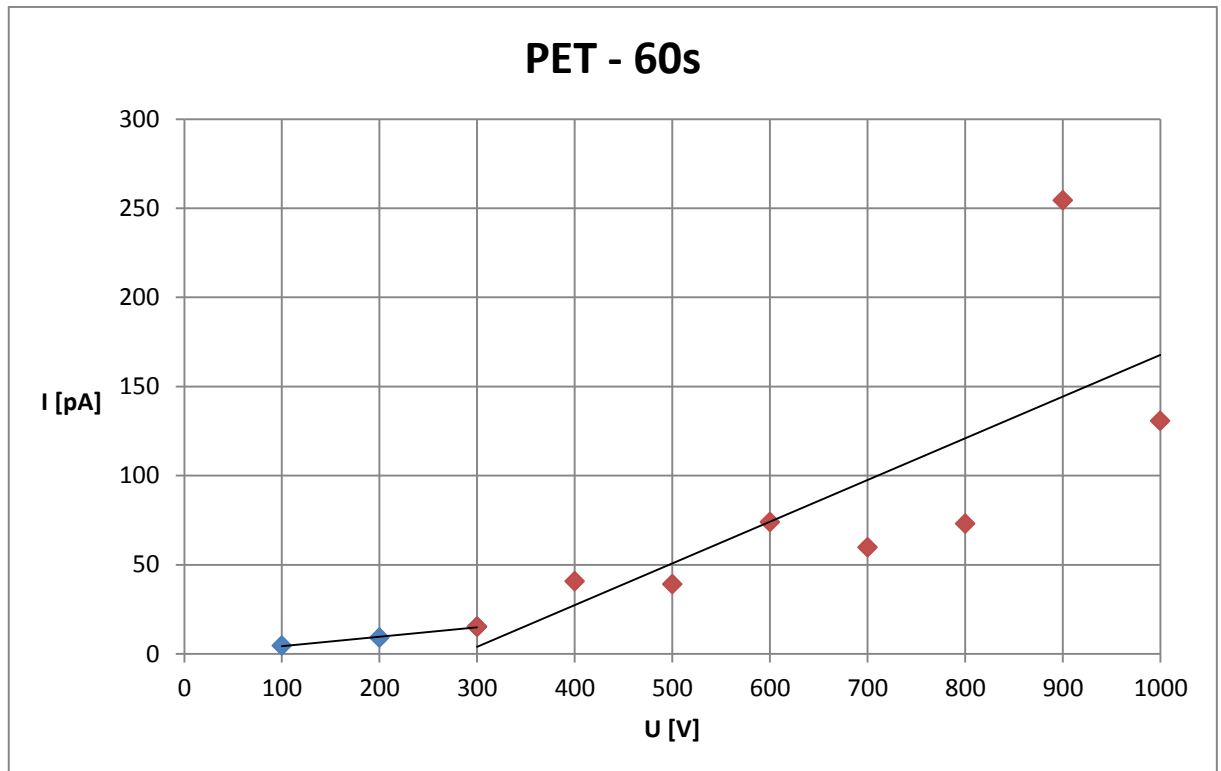
[45] C. Alquie, G. Dreyfus and J. Lewiner, Phys. Rev. Letters, **47**, 1483 (1981).

[46] G.M. Sessler, J.E. West and G. Gerhard, Phys. Rev. Letters, **48**, 563 (1982).

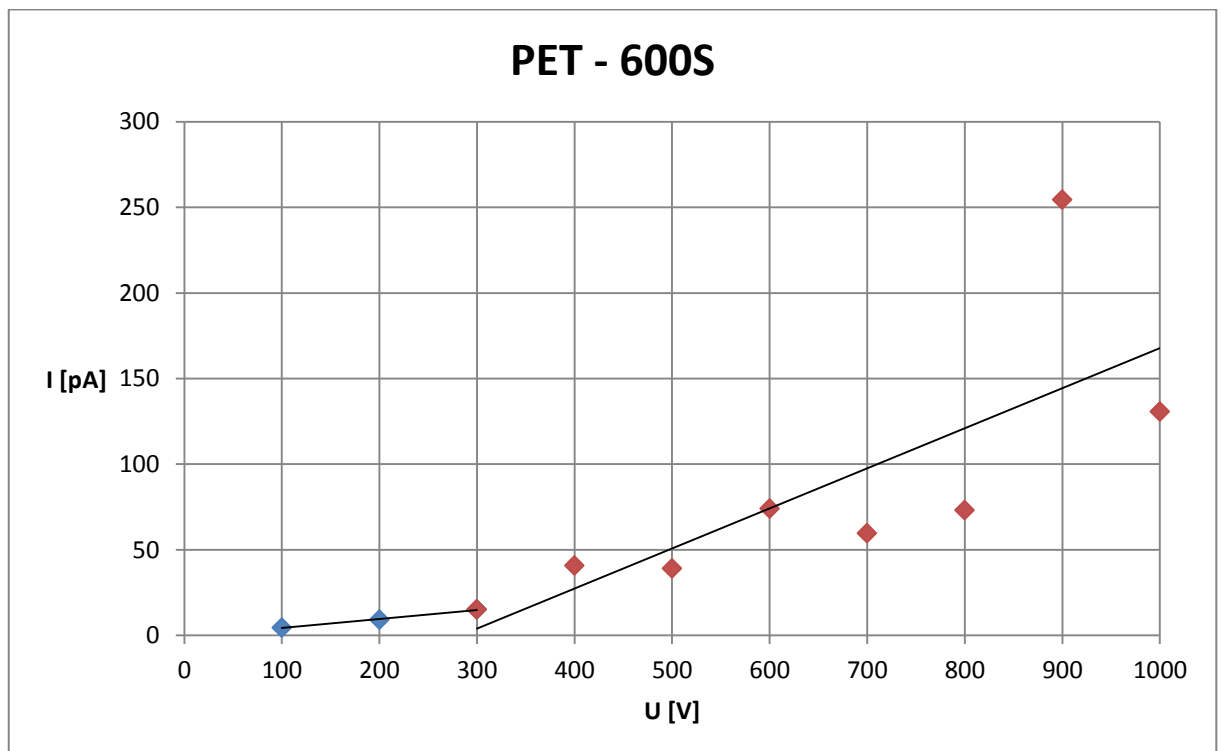
[47] P. Laurenceau, G. Dreyfus and J. Lewiner, Phys. Rev. Letters, **38**, 46 (1977).

[48] X. Qin, K. Suzuki, M. Sasaki, Y. Tanaka and T. Takada, Proc.6th Int.Conf. on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics, IEEE Dielectrics and Electrical Insulation Society, Vasteras, Sweden, June 1998, p.13.

- [49] Y. Li, M. Yasuda and T. Takada, IEEE Trans. Dielect. Elec. Insul. **1**, 188 (1994)
- [50] J.B. Bernstein and C.M. Cooke, IEEE Trans. Elec. Insul. **EI-26**, 1080 (1991).

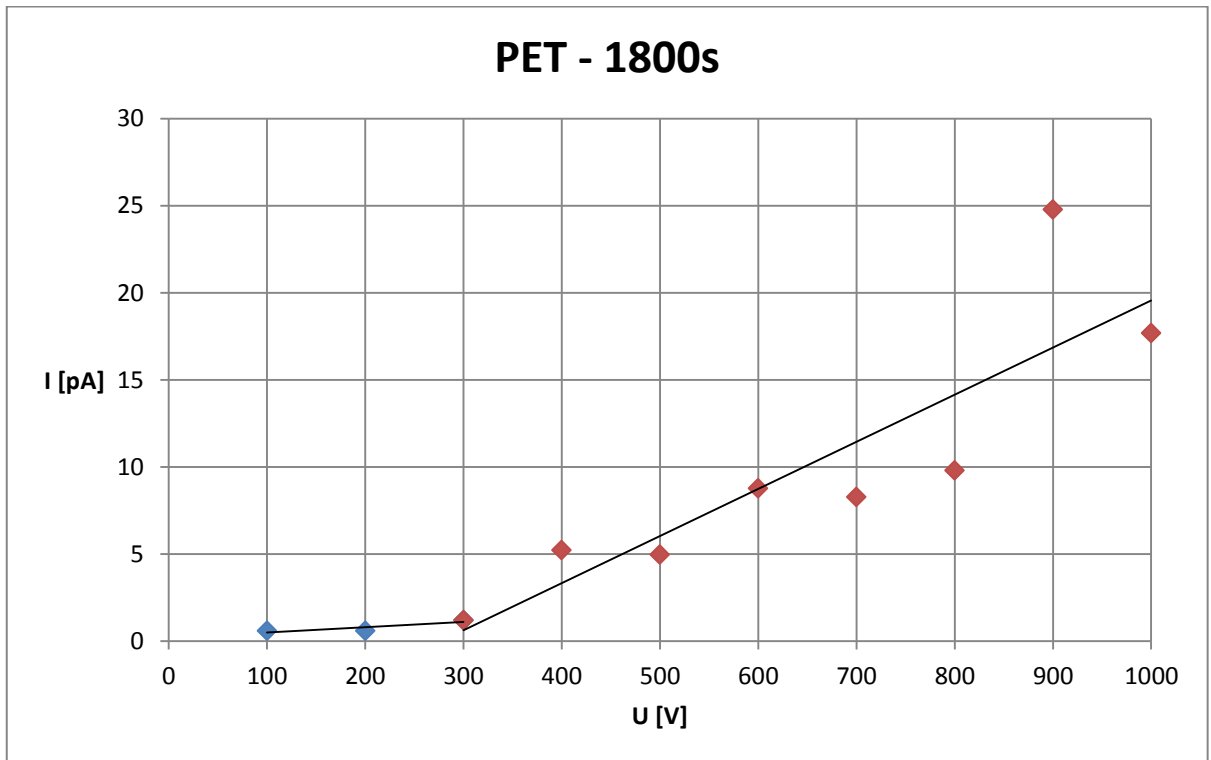
**Přílohy A – I-U charakteristika naměřených hodnot**

Obr. A.1. I-U charakteristika naměřených hodnot na vzorku PET folie v čase 60s

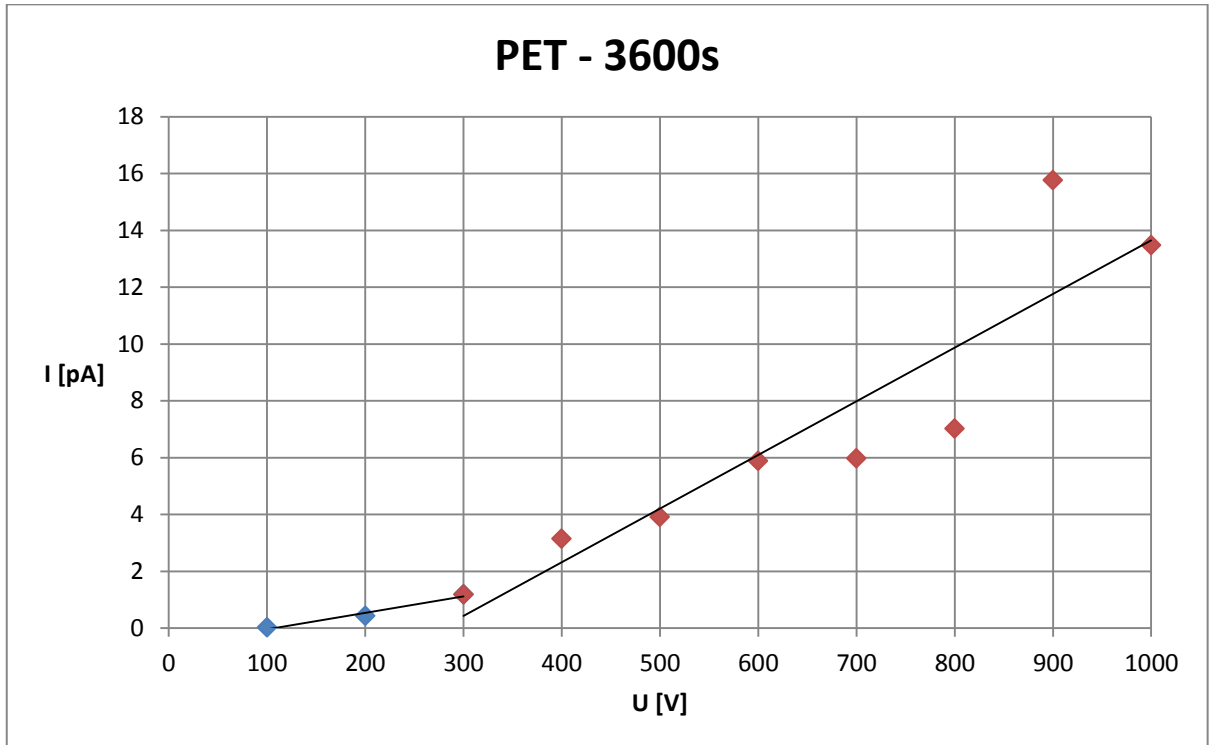


Obr. A.2. I-U charakteristika naměřených hodnot na vzorku PET folie v čase 600s

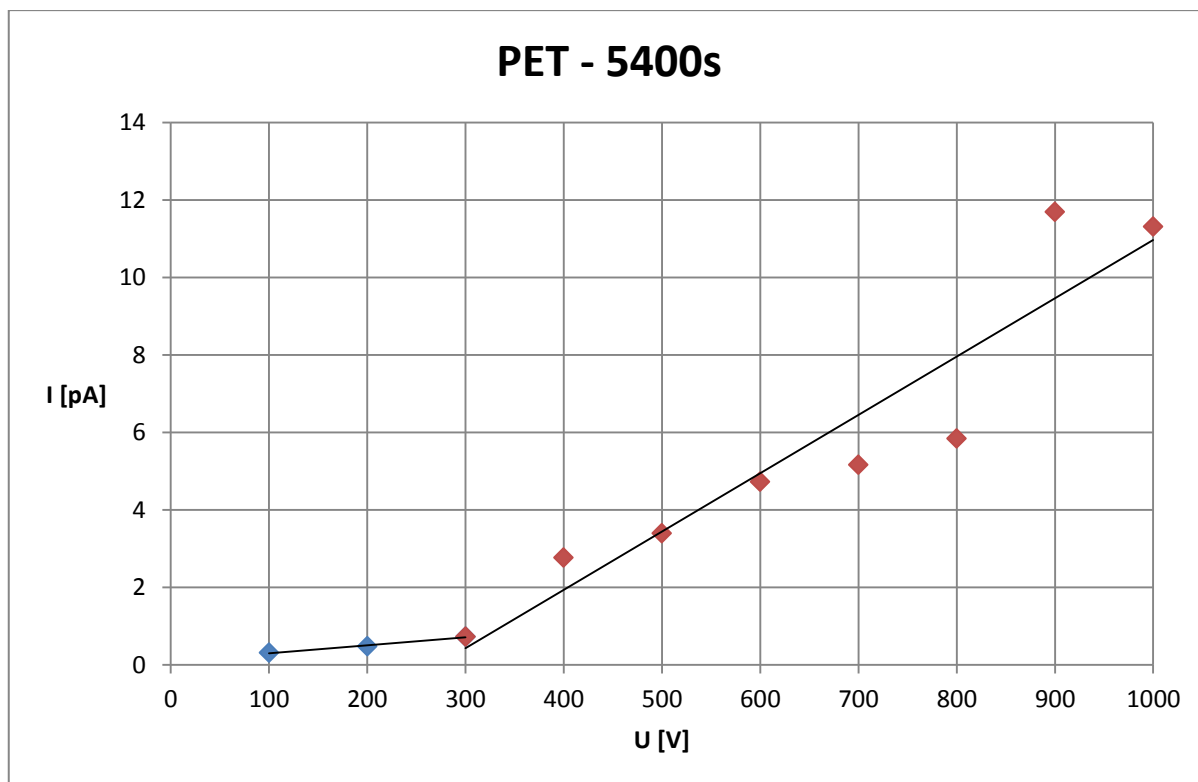




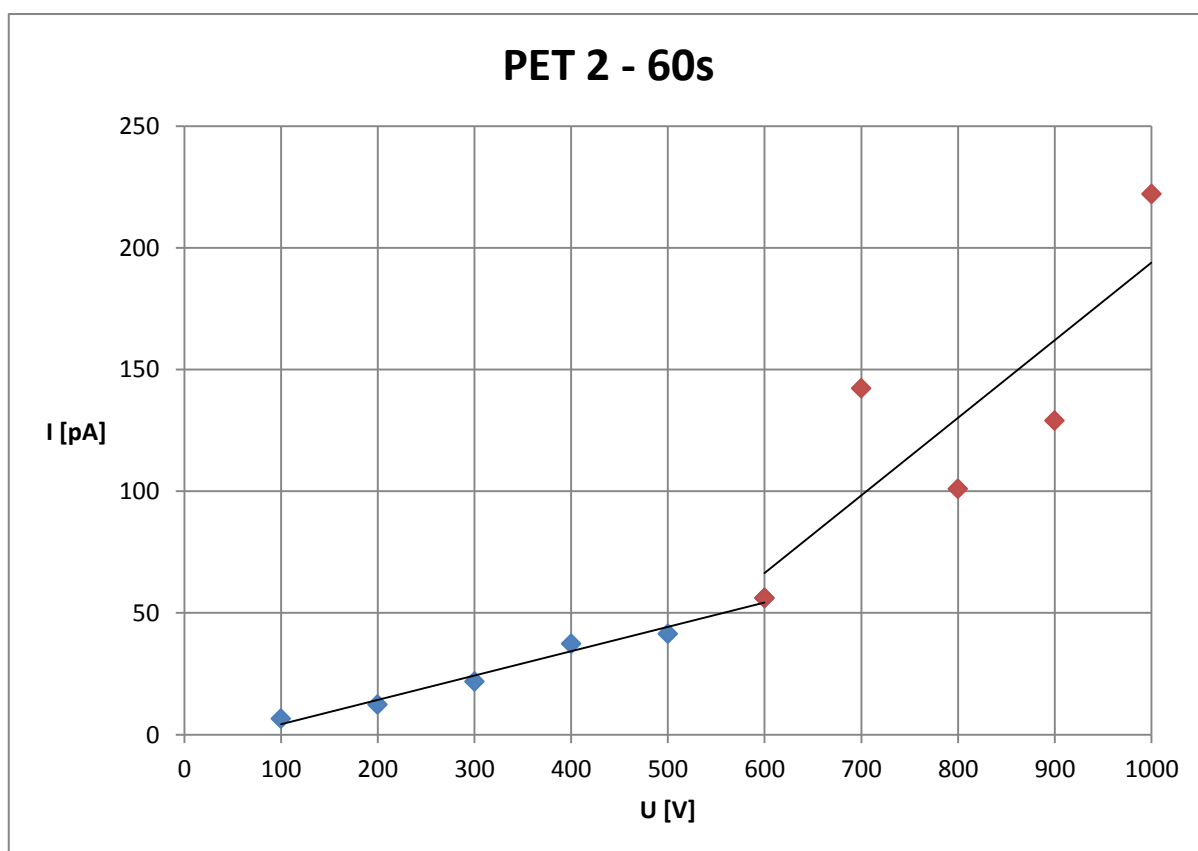
Obr. A.3. I-U charakteristika naměřených hodnot na vzorku PET folie v čase 1800s



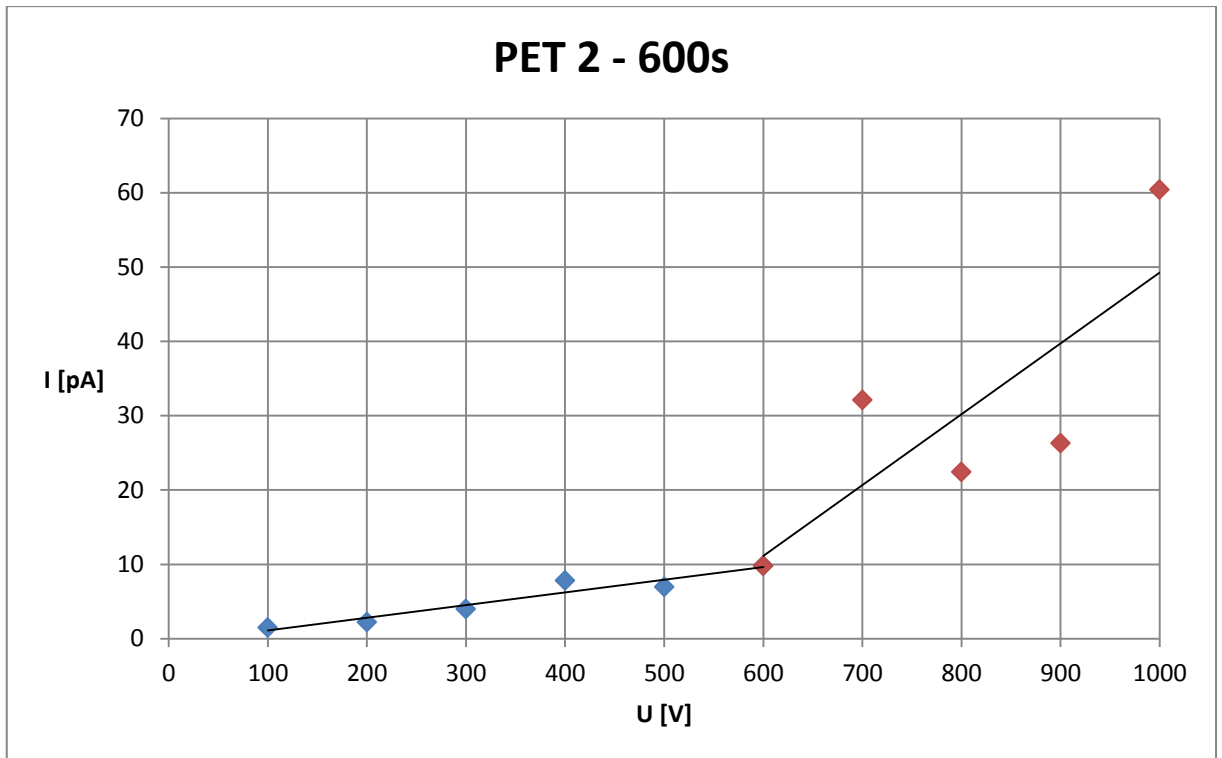
Obr. A.4. I-U charakteristika naměřených hodnot na vzorku PET folie v čase 3600s



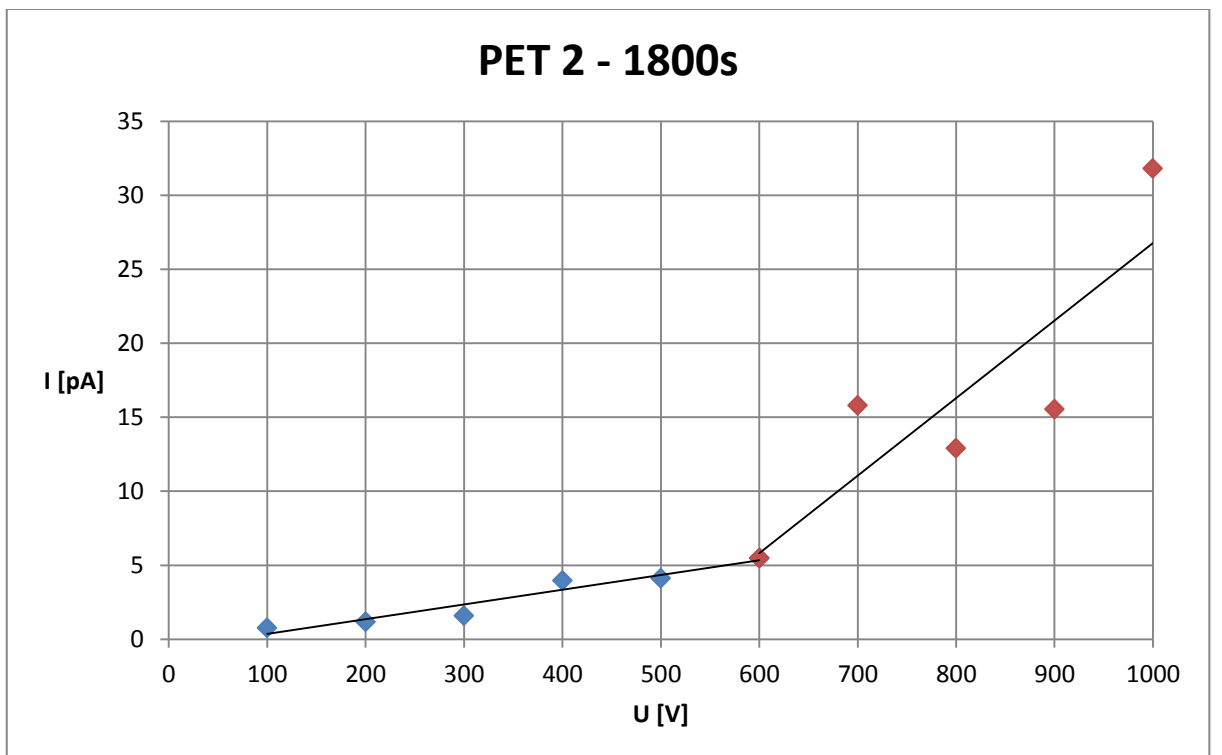
Obr. A.5.  $I$ - $U$  charakteristika naměřených hodnot na vzorku PET folie v čase 5400s



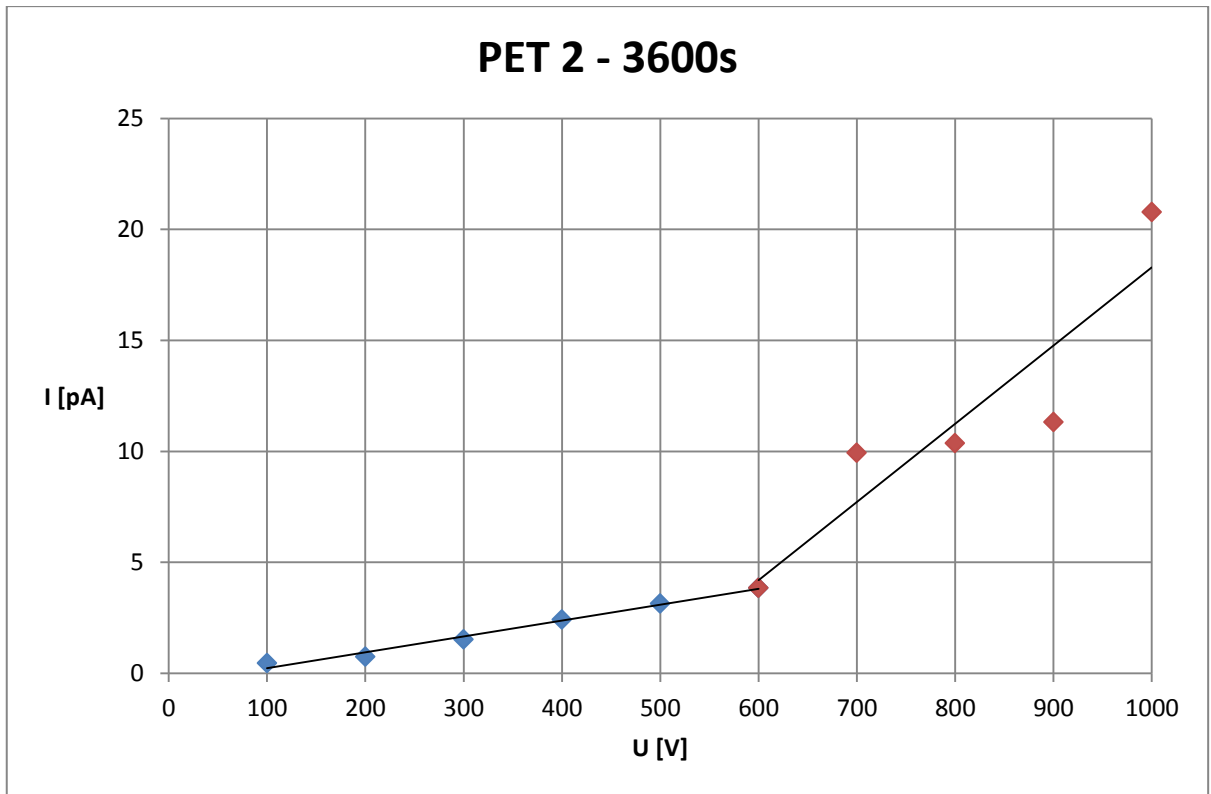
Obr. A.6  $I$ - $U$  charakteristika naměřených hodnot na vzorku PET-2 folie v čase 60s



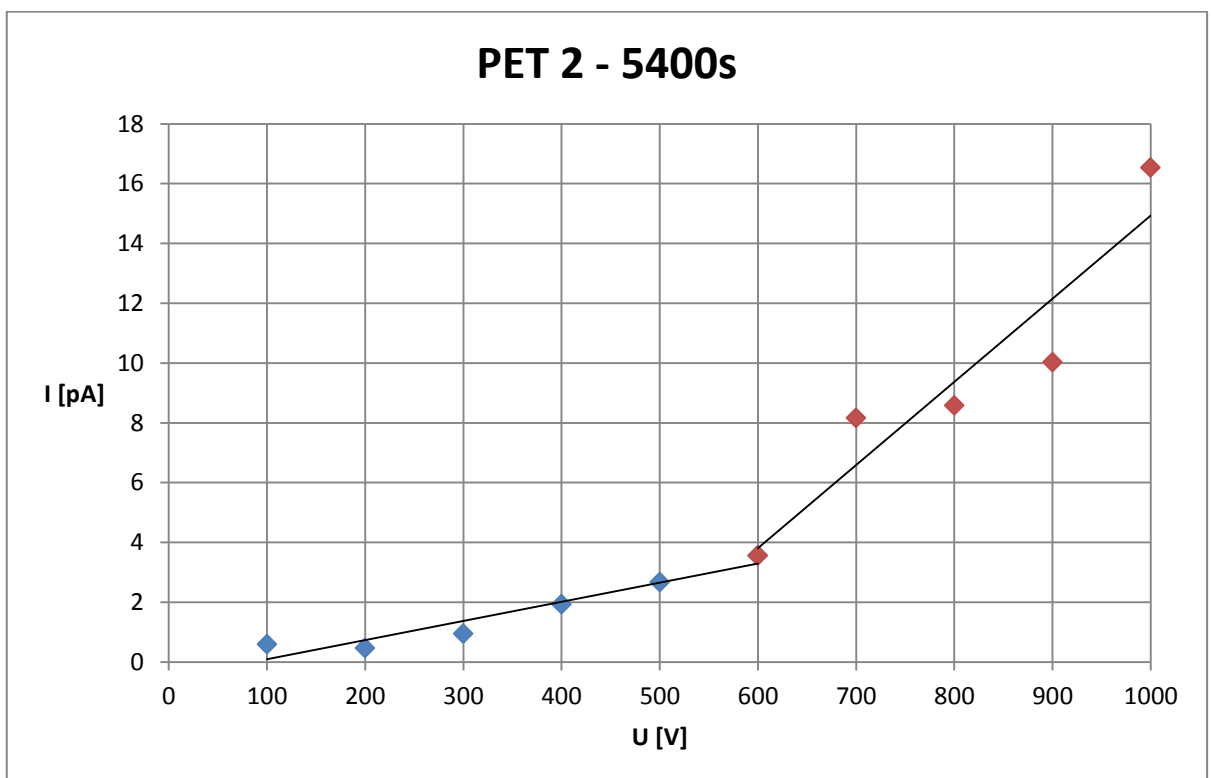
Obr. A.7 I-U charakteristika naměřených hodnot na vzorku PET-2 folie v čase 600s



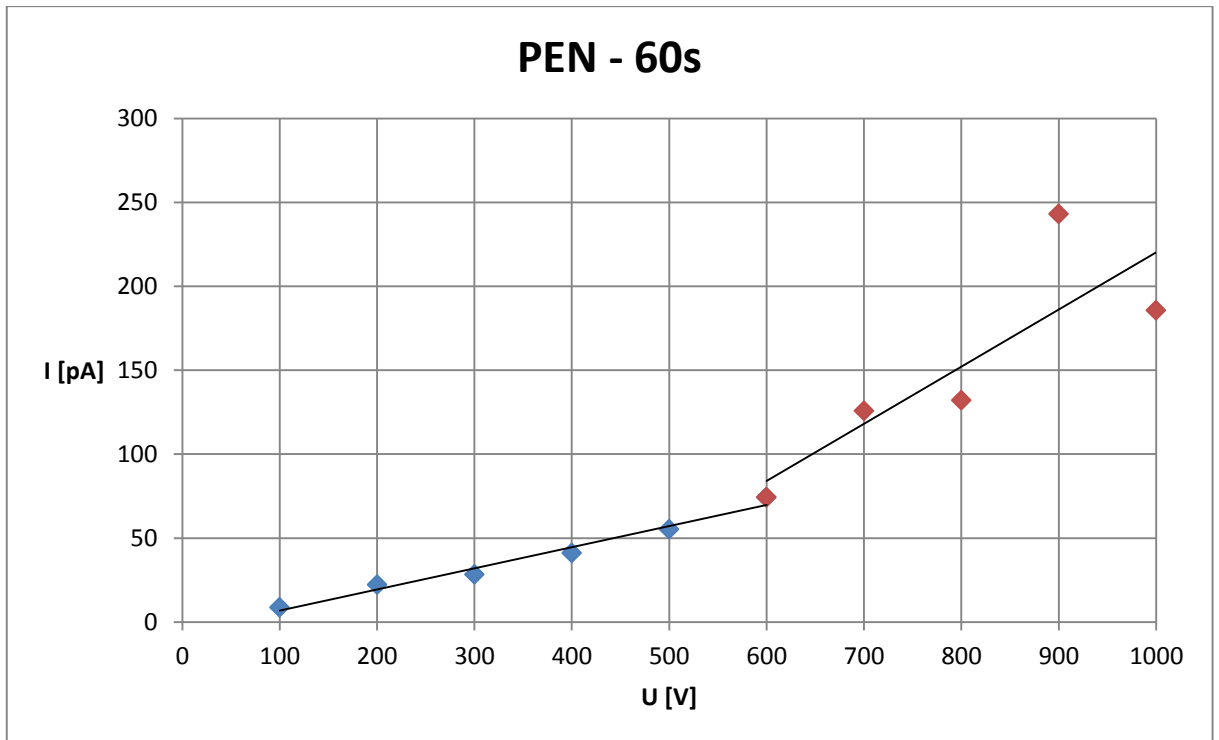
Obr. A.8 I-U charakteristika naměřených hodnot na vzorku PET-2 folie v čase 1800s



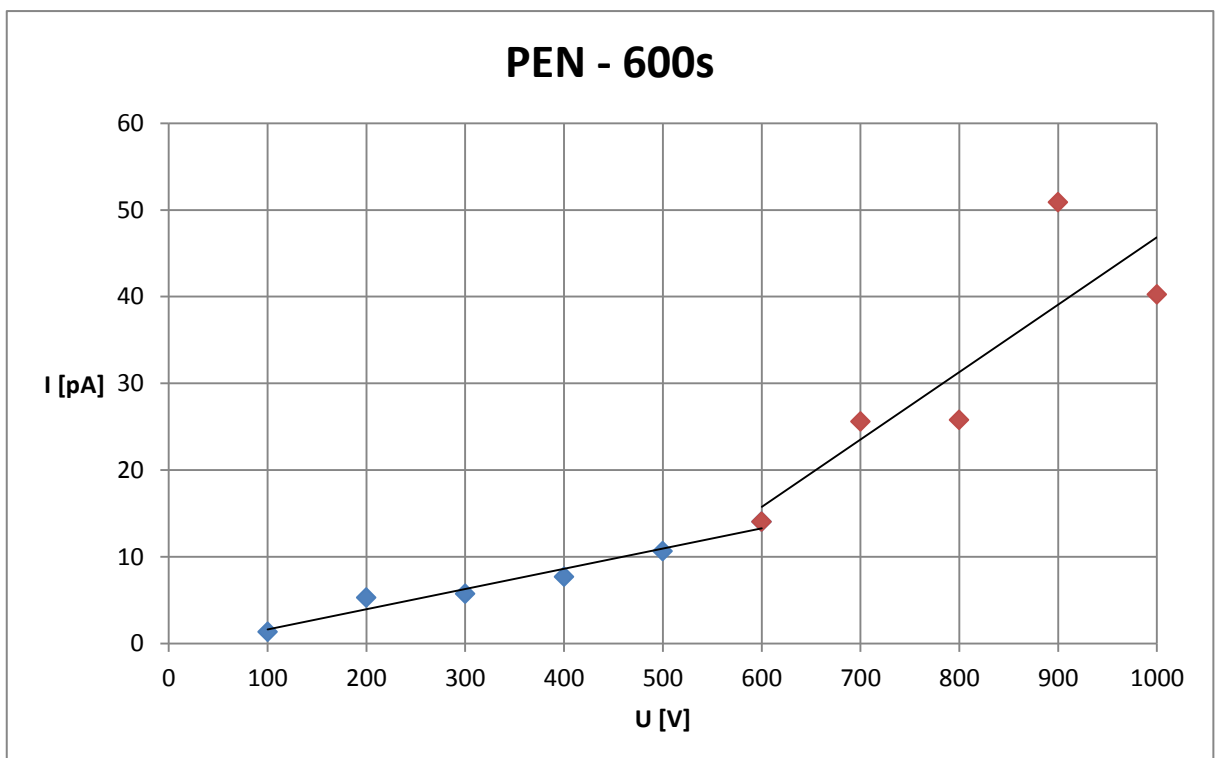
Obr. A.9 I-U charakteristika naměřených hodnot na vzorku PET-2 folie v čase 3600s



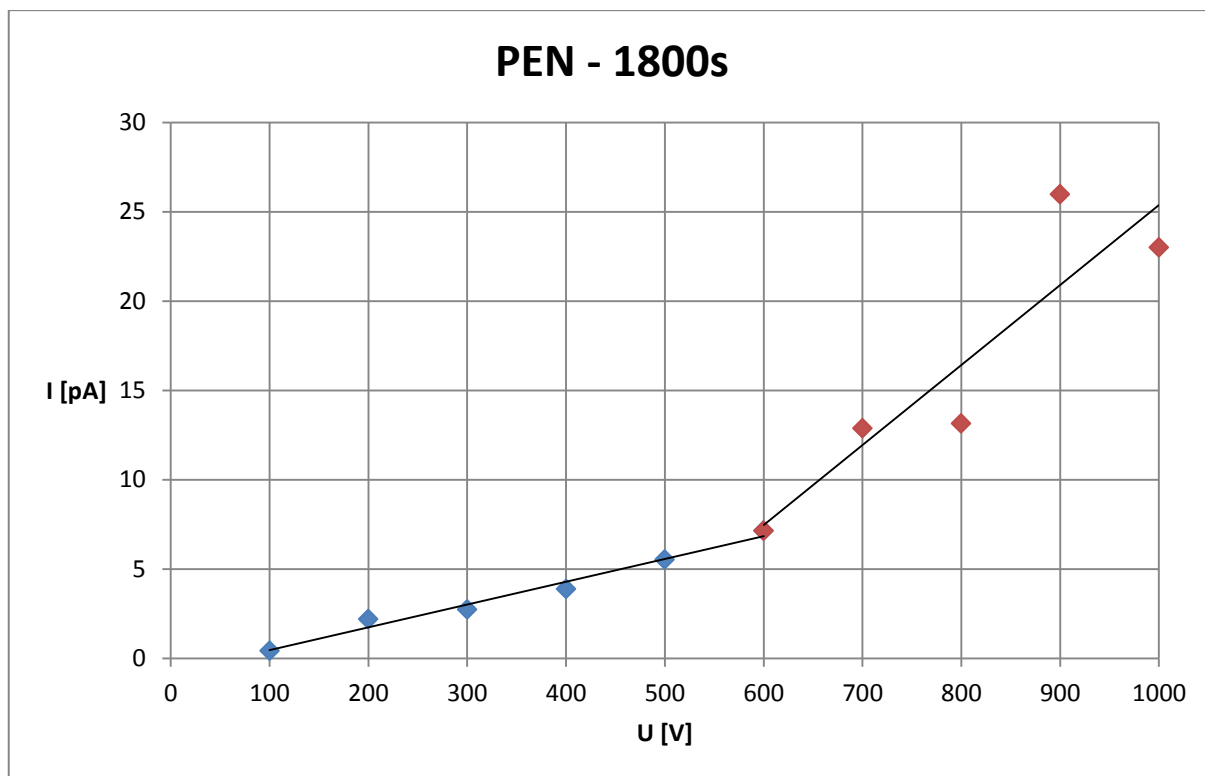
Obr. A.10 I-U charakteristika naměřených hodnot na vzorku PET-2 folie v čase 5400s



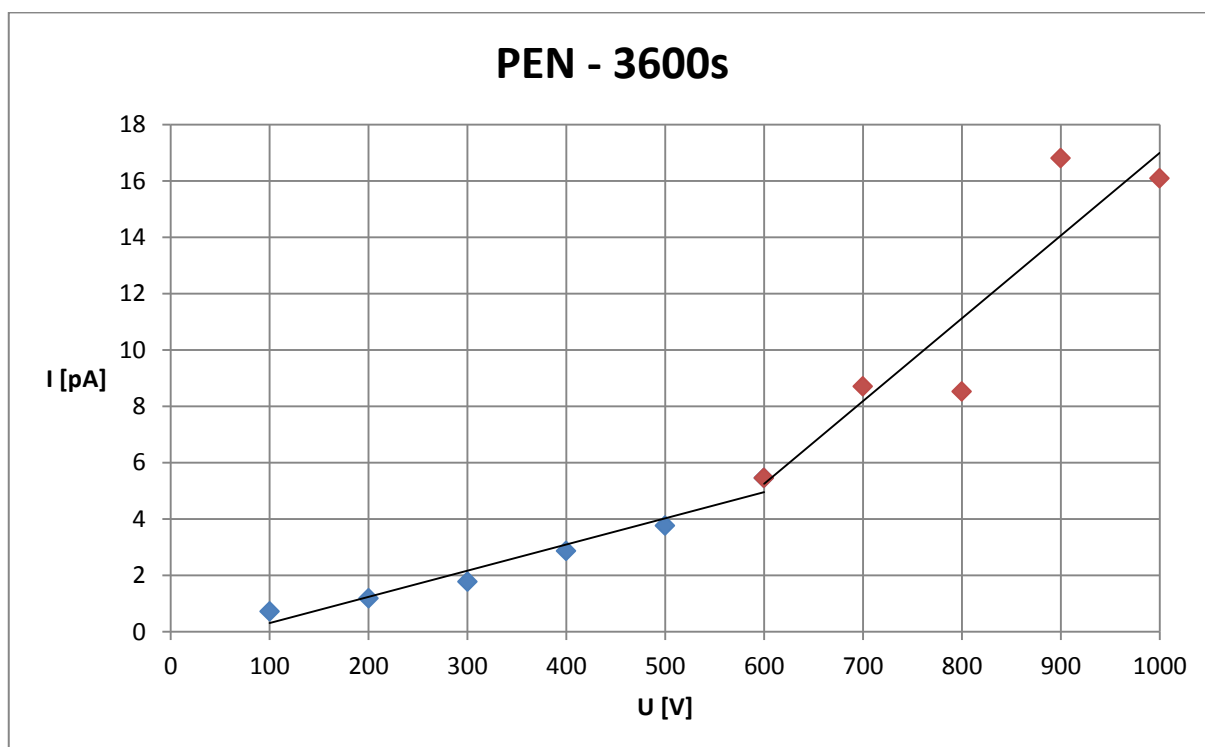
Obr. A.11 I-U charakteristika naměřených hodnot na vzorku PEN TEONEX folie v čase 60s



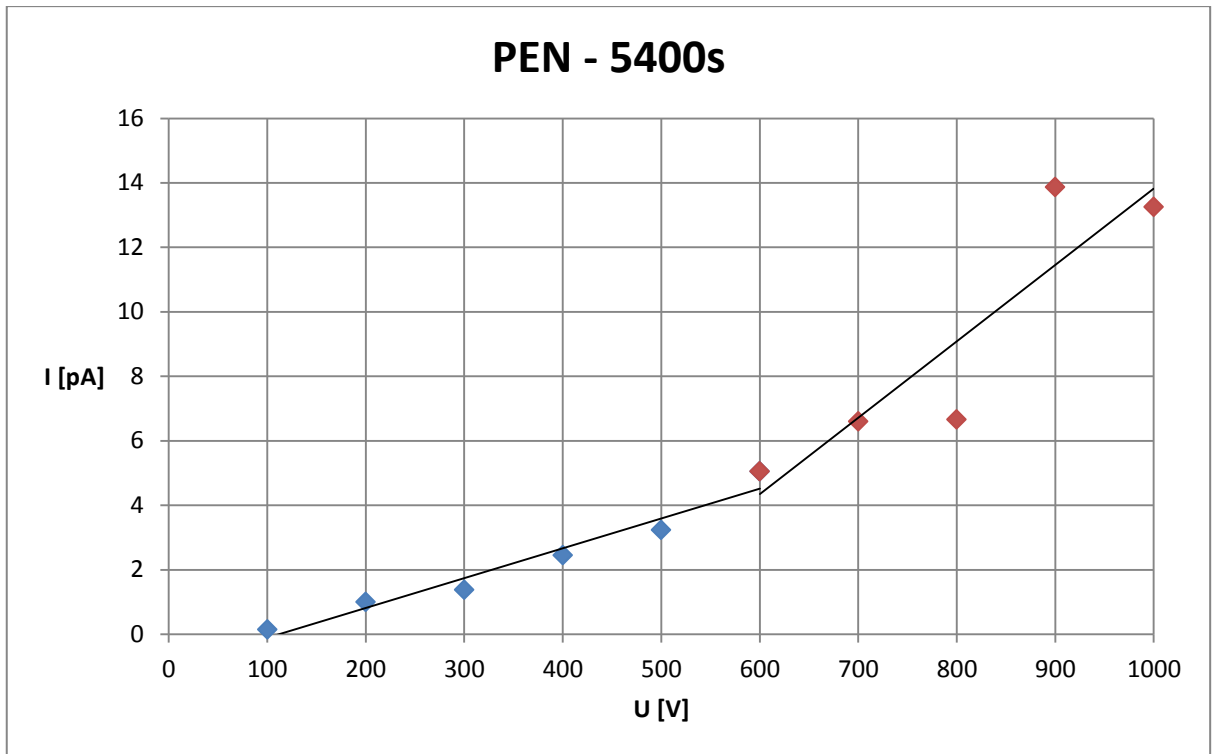
Obr. A.12 I-U charakteristika naměřených hodnot na vzorku PEN TEONEX folie v čase 600s



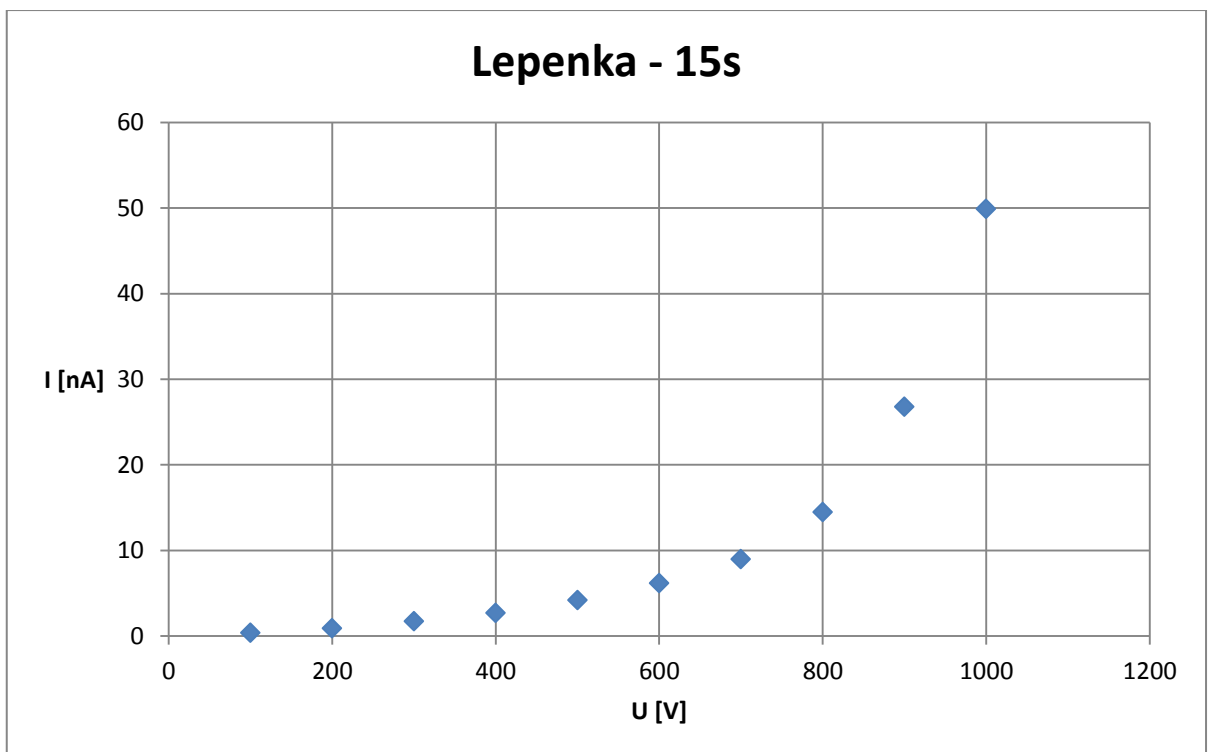
Obr. A.13 I-U charakteristika naměřených hodnot na vzorku PEN TEONEX folie v čase 1800s



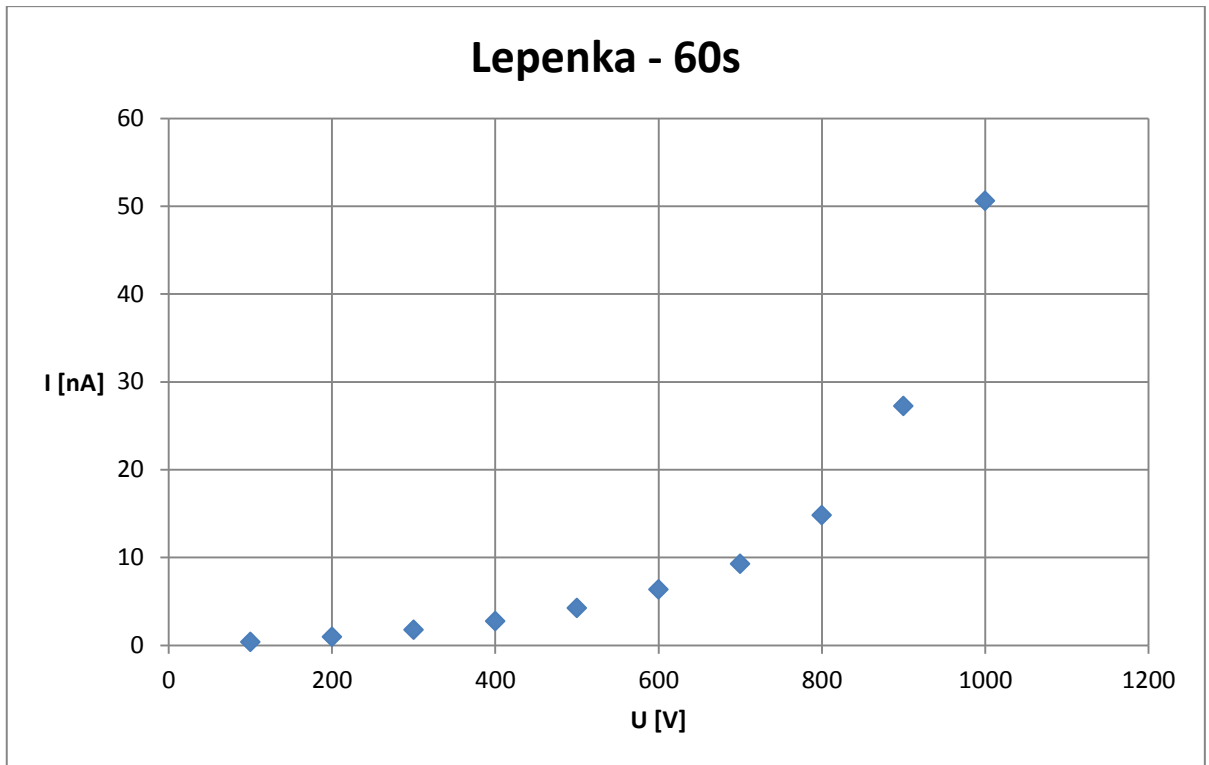
Obr. A.14 I-U charakteristika naměřených hodnot na vzorku PEN TEONEX folie v čase 3600s



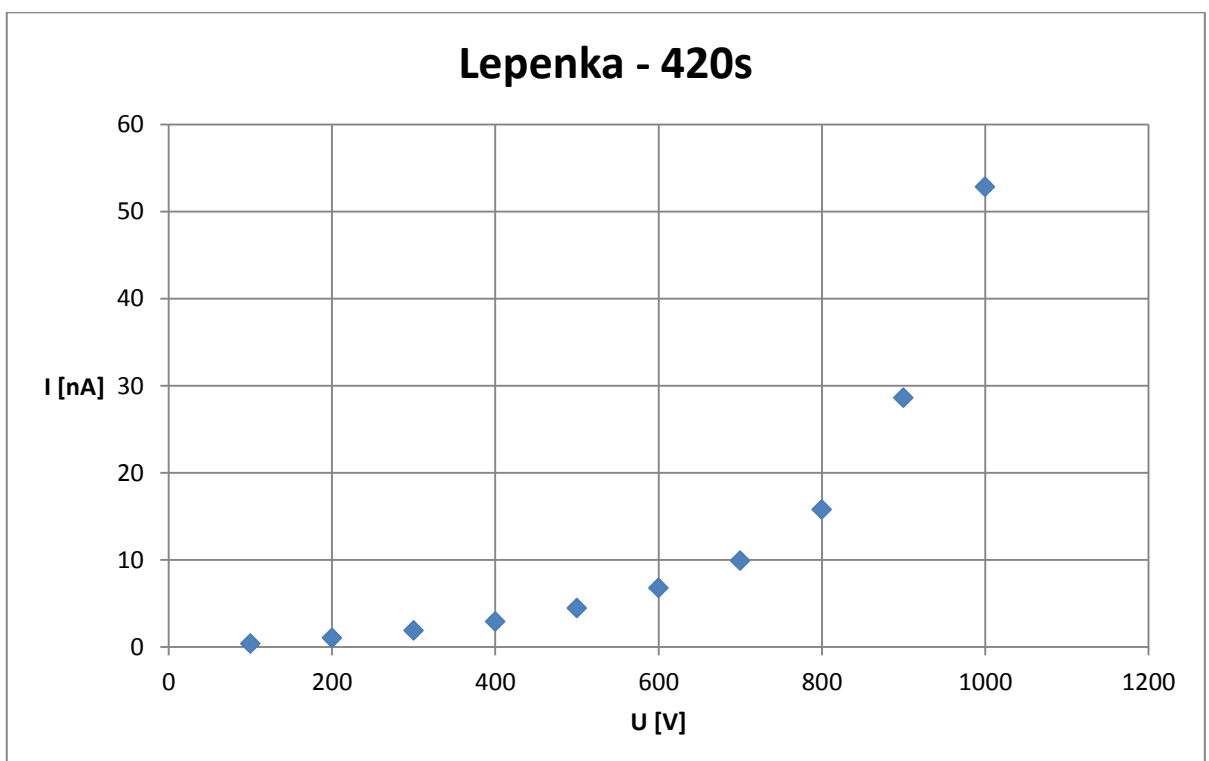
Obr. A.15 I-U charakteristika naměřených hodnot na vzorku PEN TEONEX folie v čase 5400s



Obr. A.16 I-U charakteristika naměřených hodnot na vzorku lepenky v čase 15s

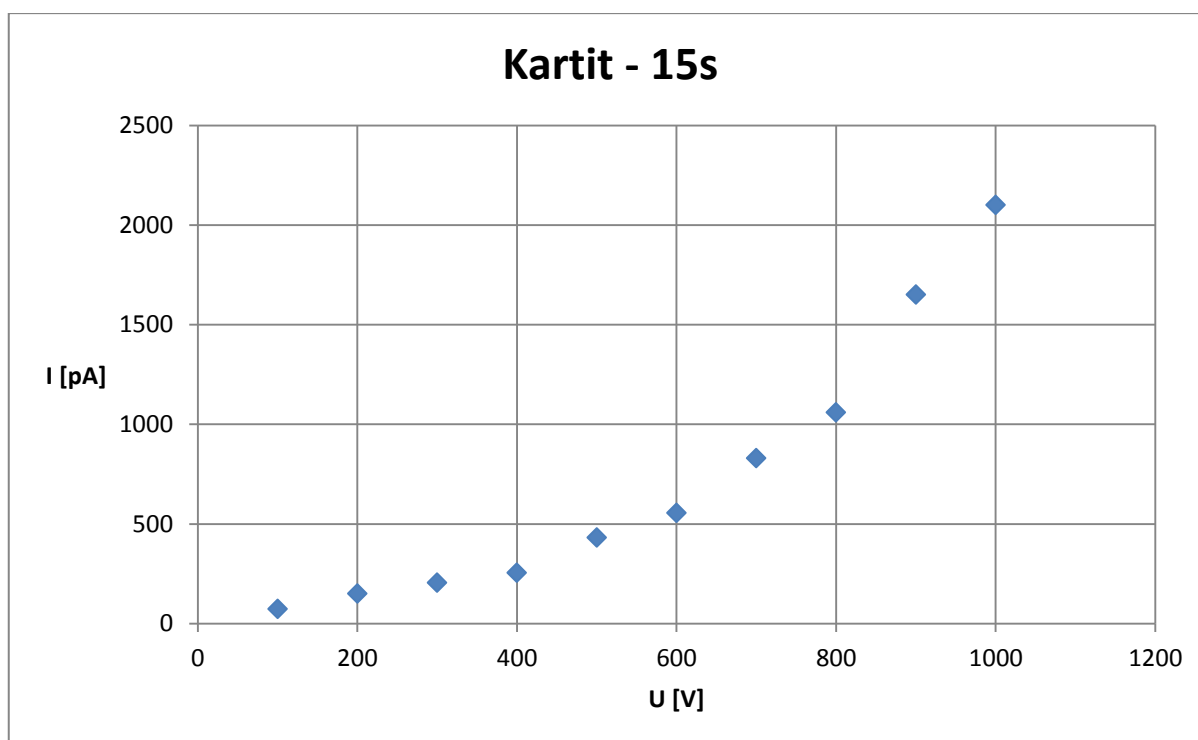


Obr. A.17 I-U charakteristika naměřených hodnot na vzorku lepenky v čase 60s

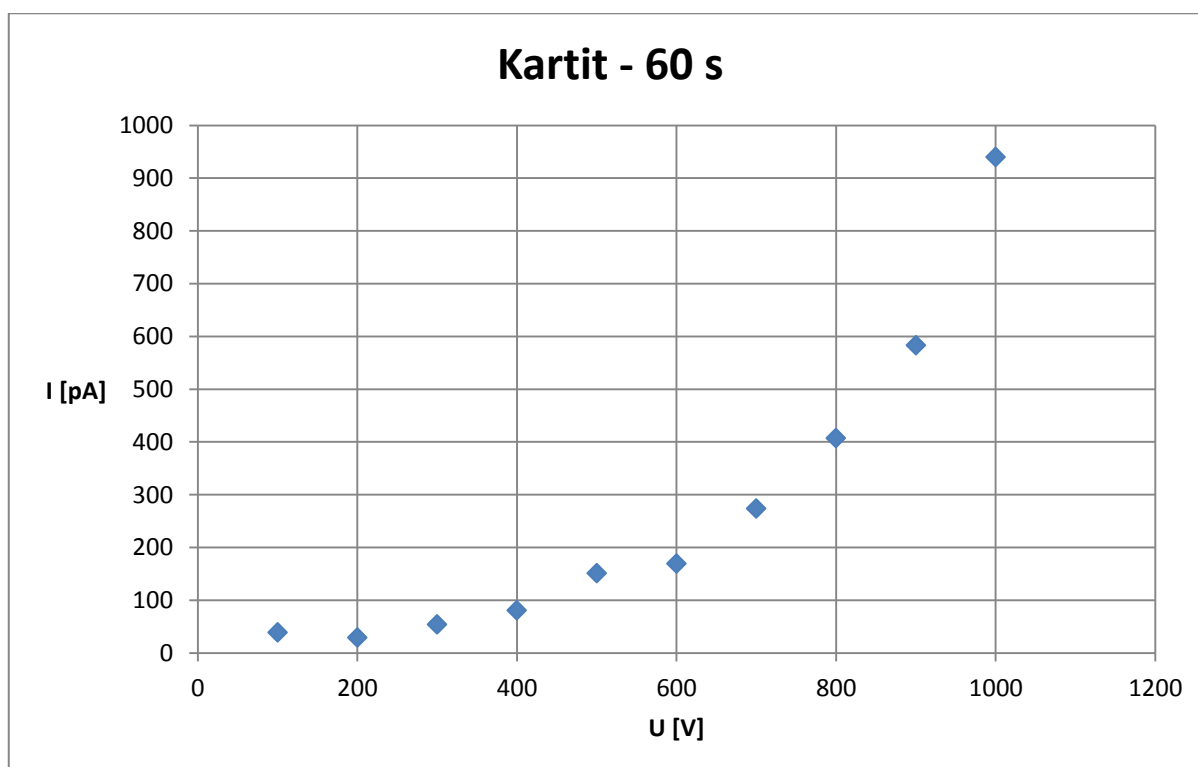


Obr. A.18 I-U charakteristika naměřených hodnot na vzorku lepenky v čase 420s

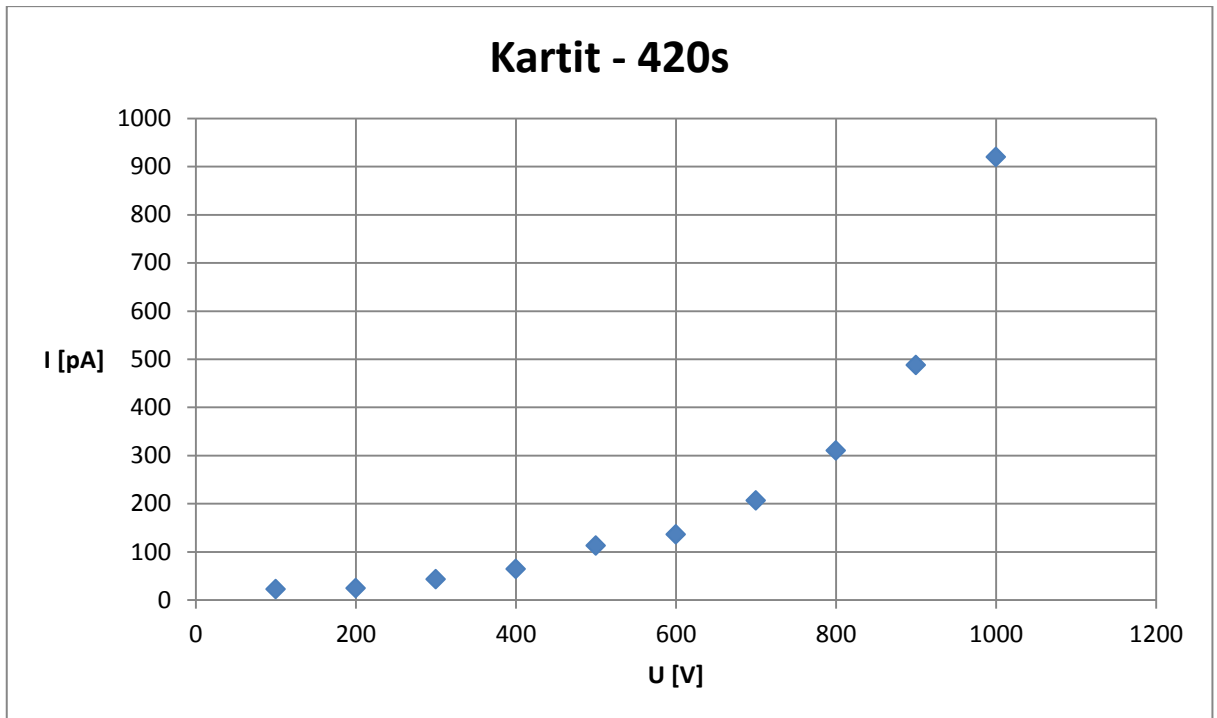




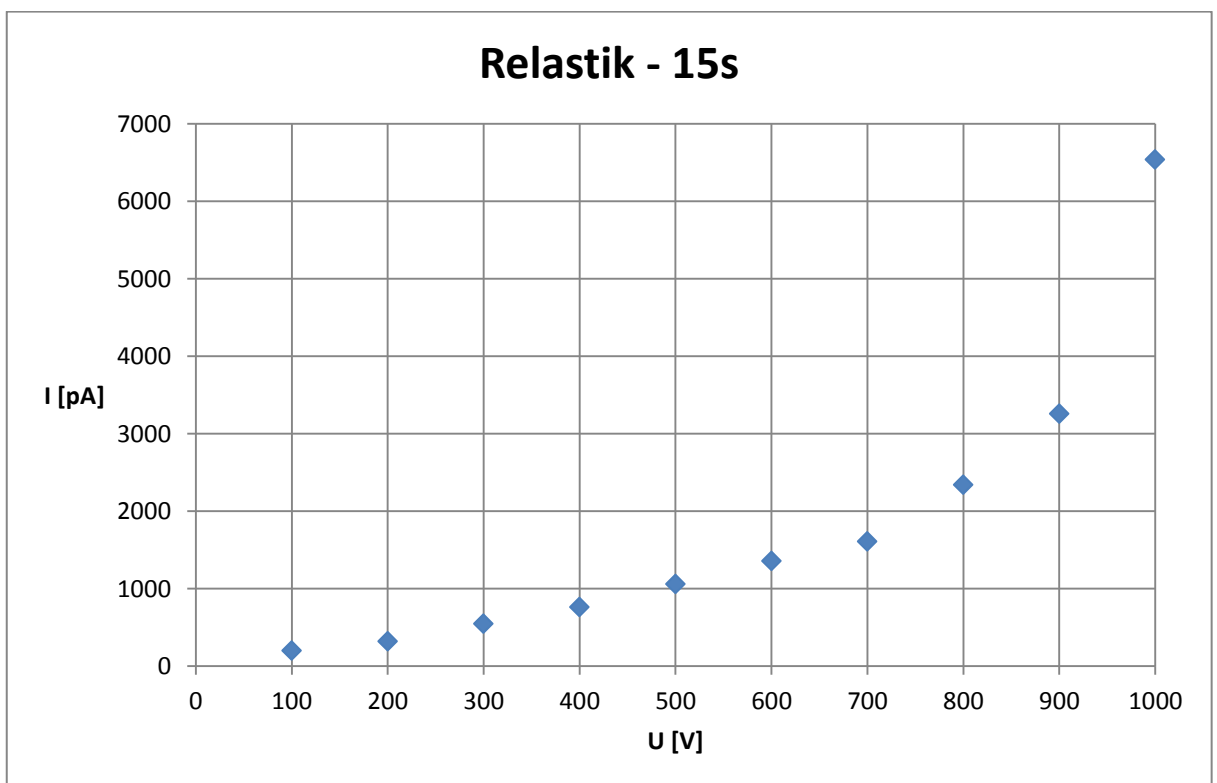
Obr. A.19 I-U charakteristika naměřených hodnot na vzorku kartitu v čase 15s



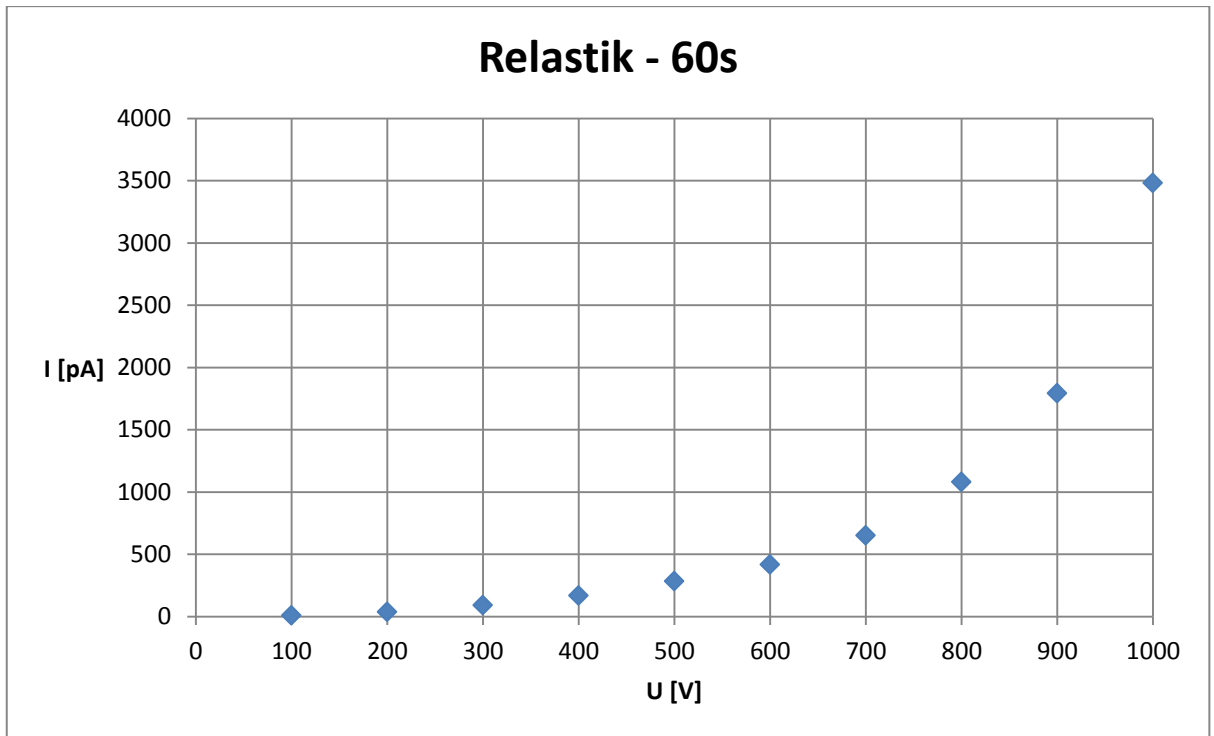
Obr. A.20 I-U charakteristika naměřených hodnot na vzorku kartitu v čase 60s



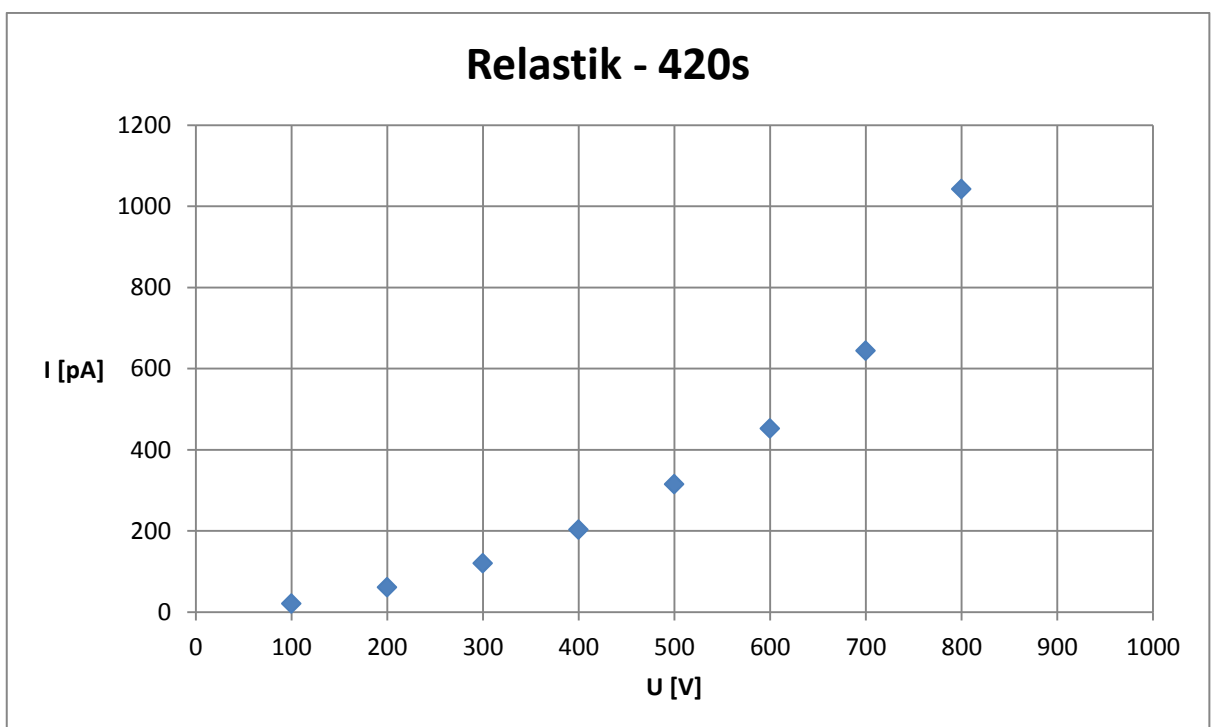
Obr. A.21 I-U charakteristika naměřených hodnot na vzorku kartitu v čase 420s



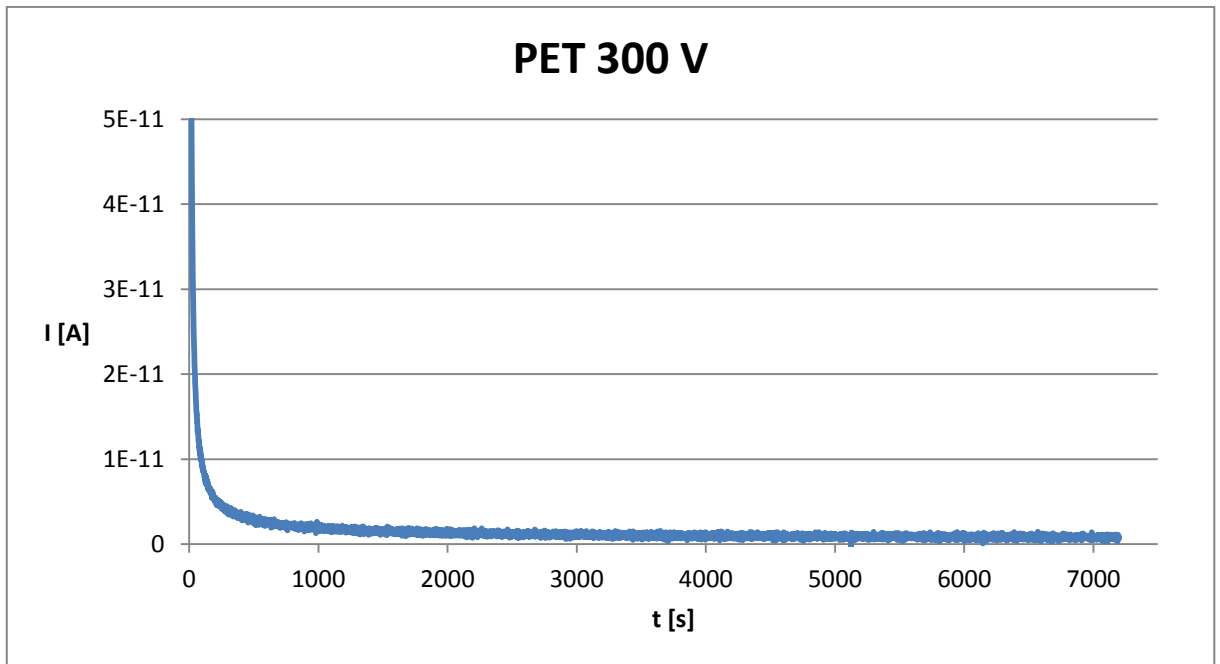
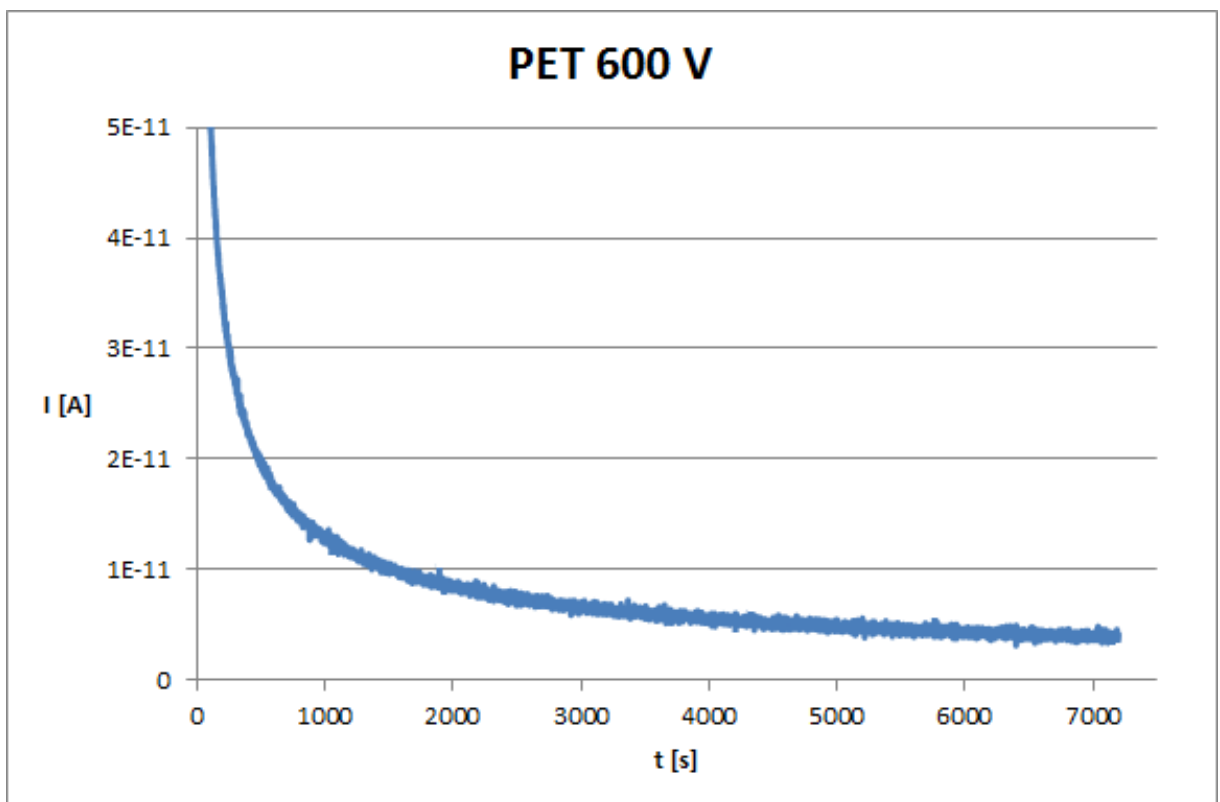
Obr. A.22 I-U charakteristika naměřených hodnot na vzorku relastiku v čase 15s

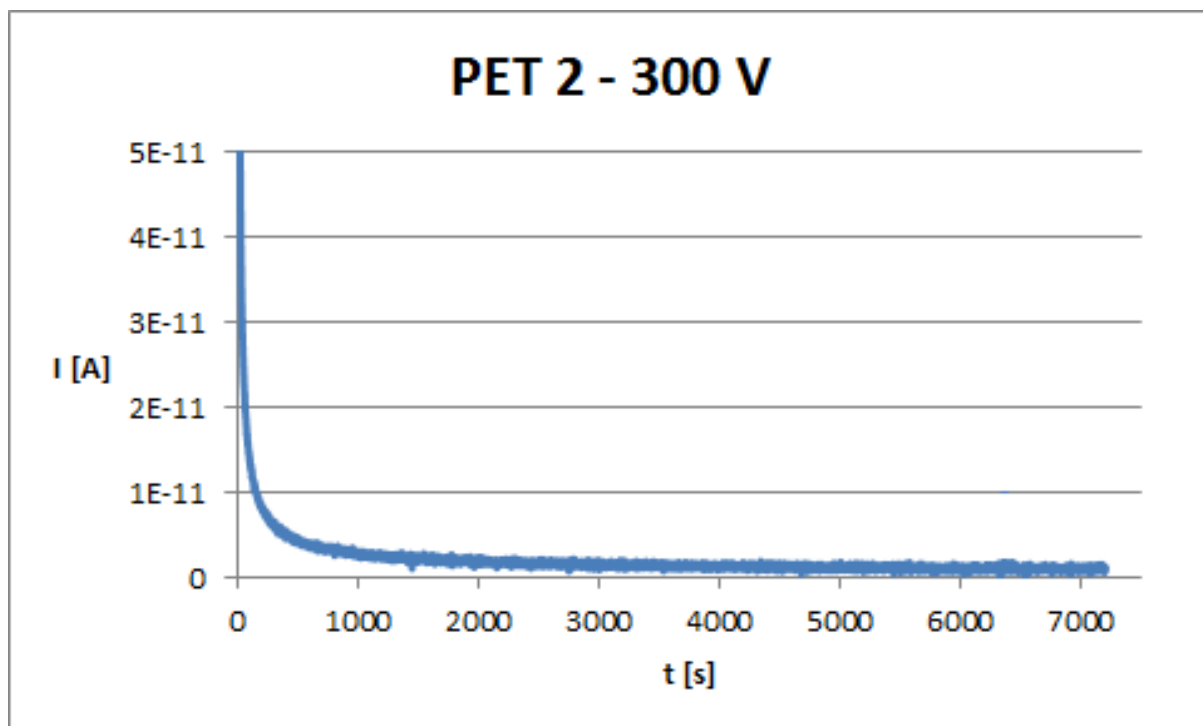


Obr. A.23 I-U charakteristika naměřených hodnot na vzorku relastiku v čase 60s

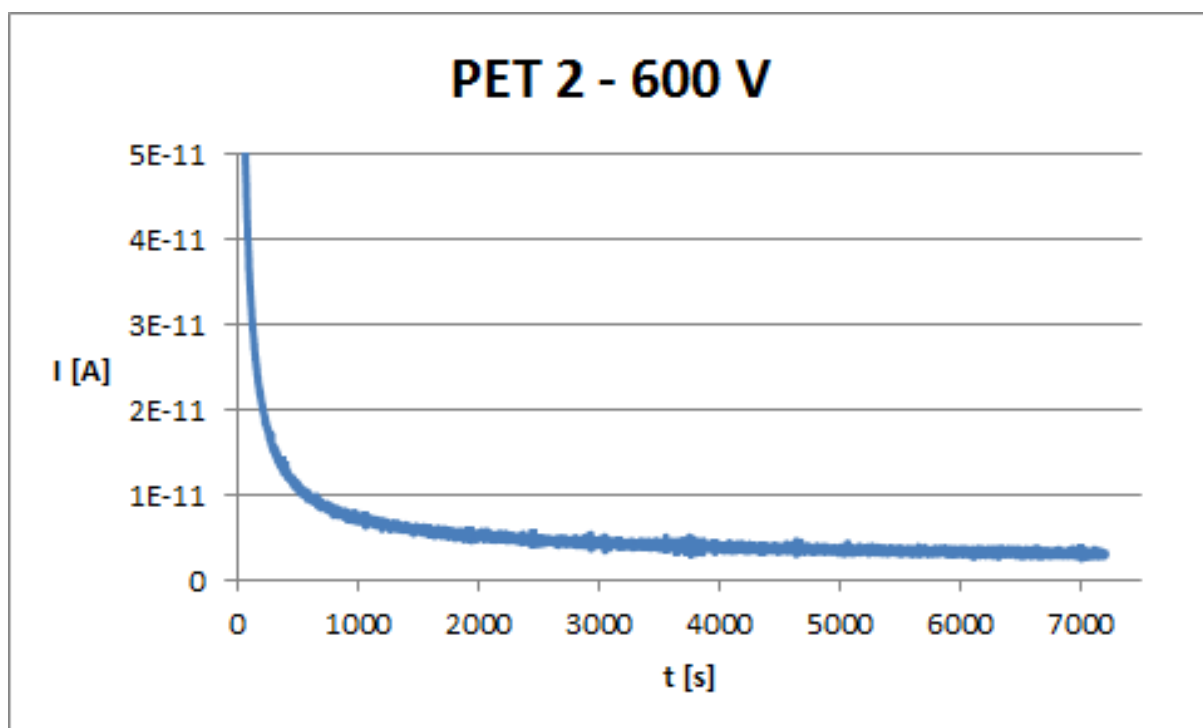


Obr. A.24 I-U charakteristika naměřených hodnot na vzorku relastiku v čase 420s

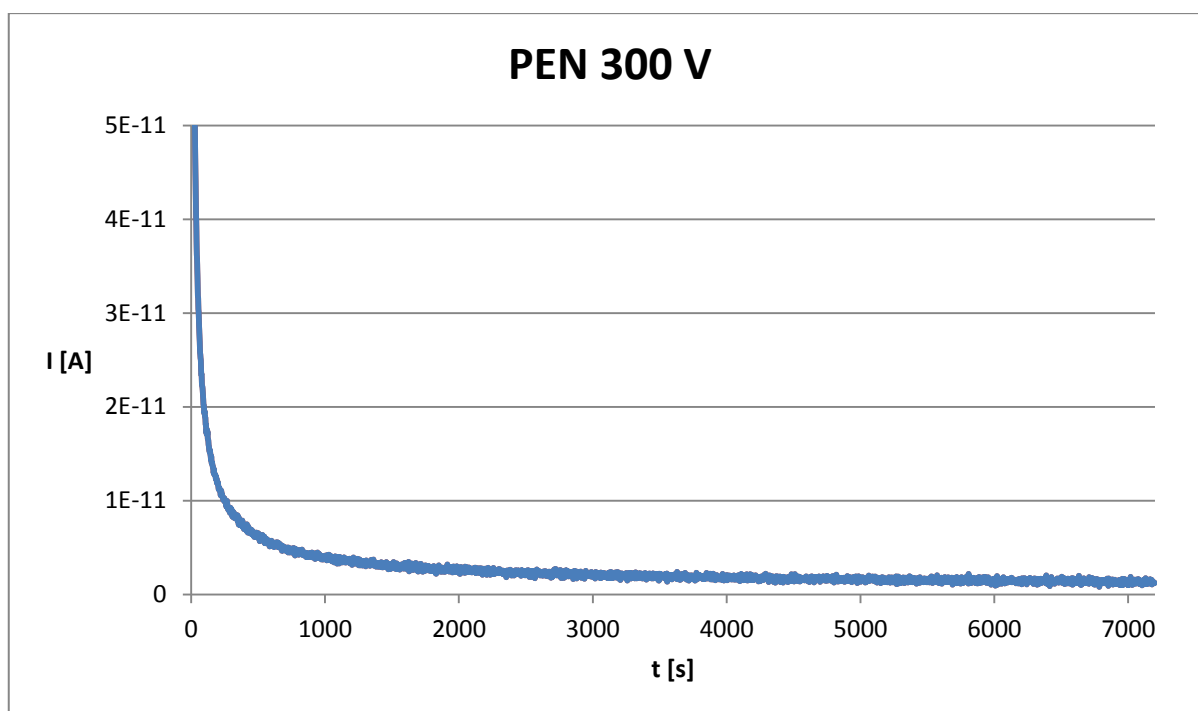
**Příloha B – proudová závislost v čase***Obr. B.1. Proudová závislost v čase PET folie**Obr. B.2 Proudová závislost v čase PET folie*



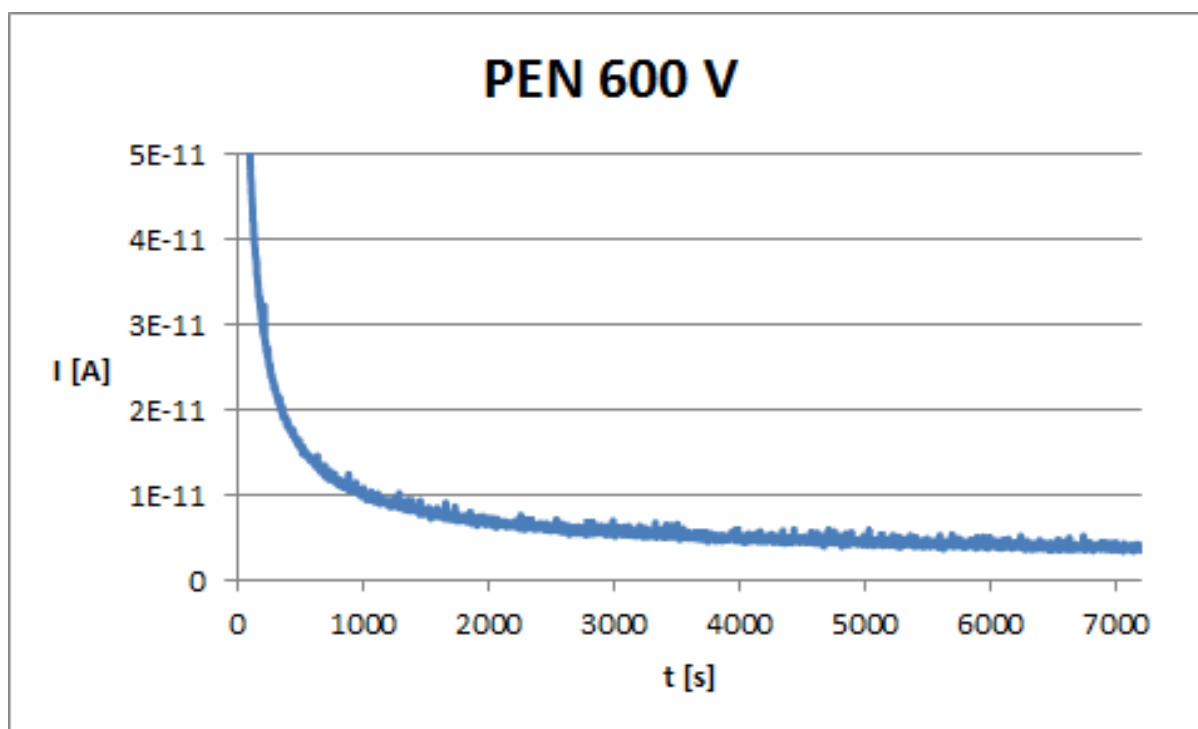
Obr. B.3. Proudová závislost v čase PET-2 folie



Obr. B.4. Proudová závislost v čase PET-2 folie

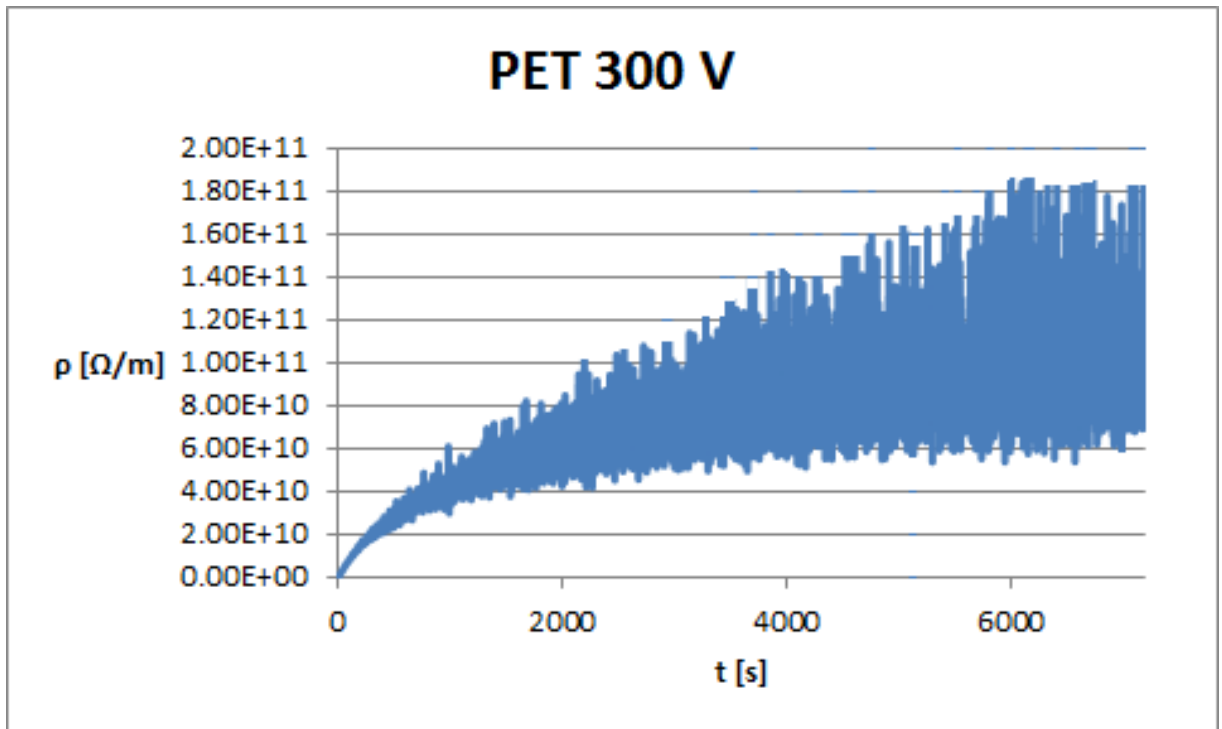


Obr. B.5. Proudová závislost v čase PET TEONEX folie

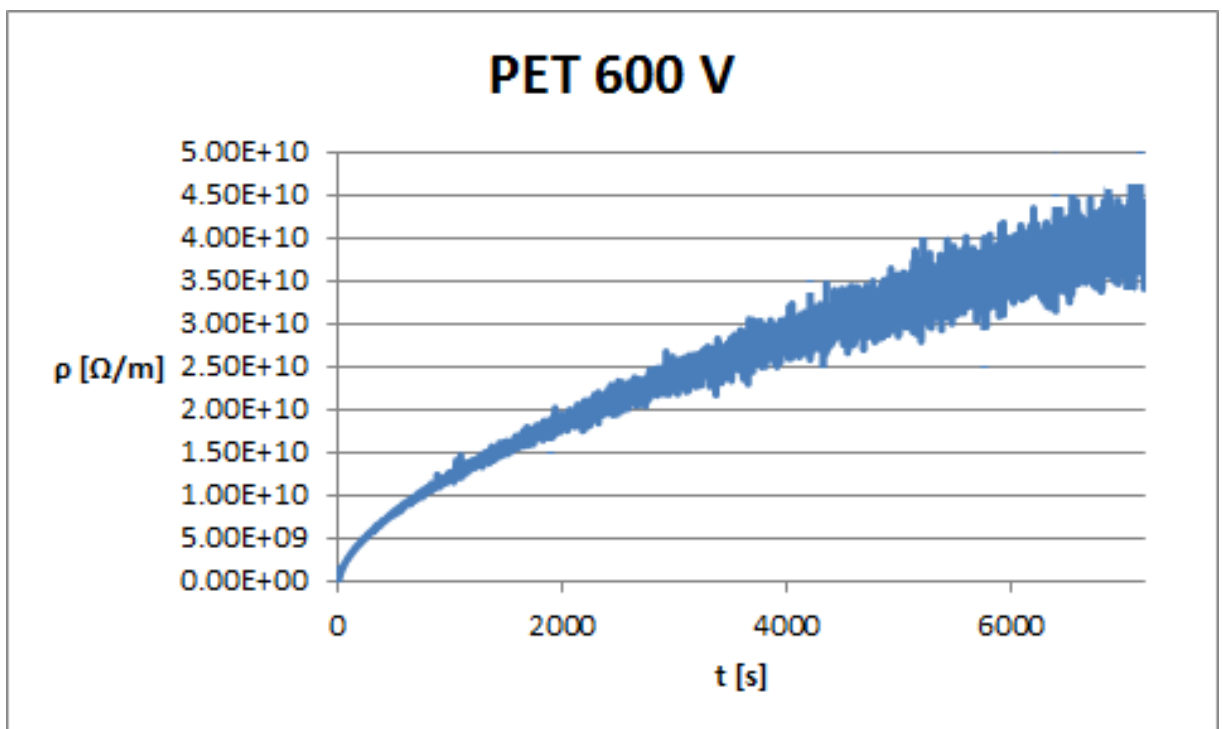


Obr. B.6. Proudová závislost v čase PET TEONEX folie

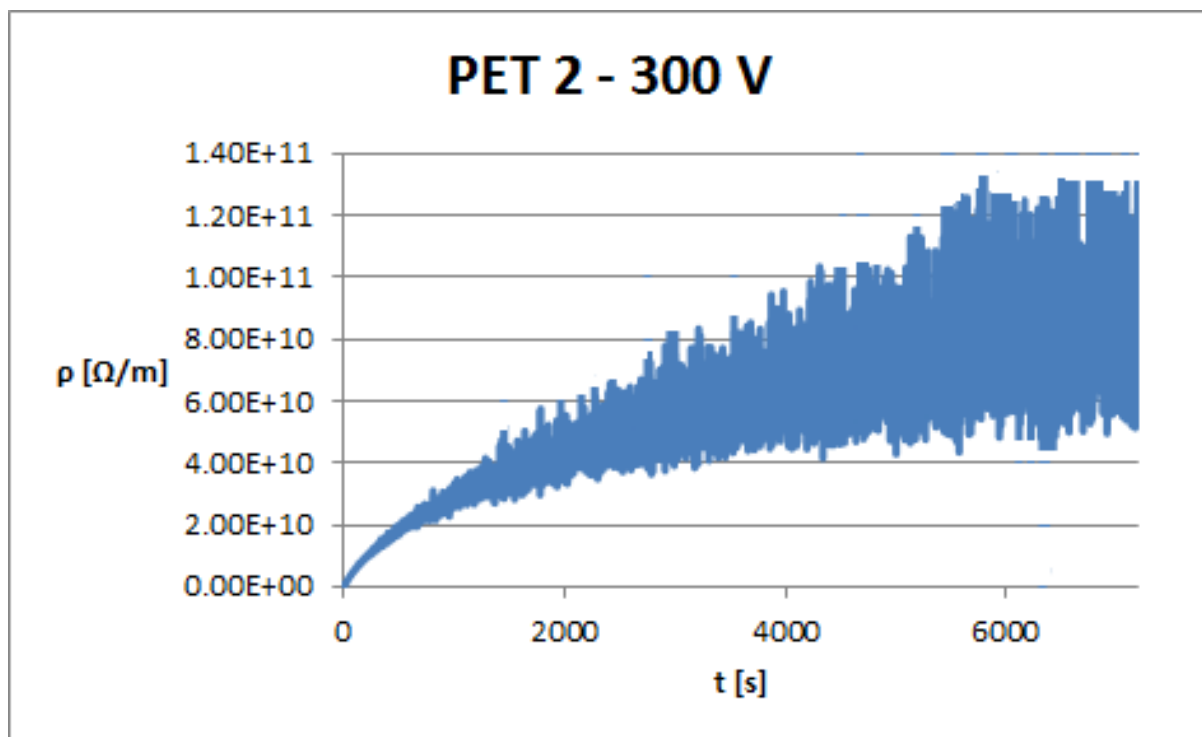
## Příloha C – závislost rezistivity na čase



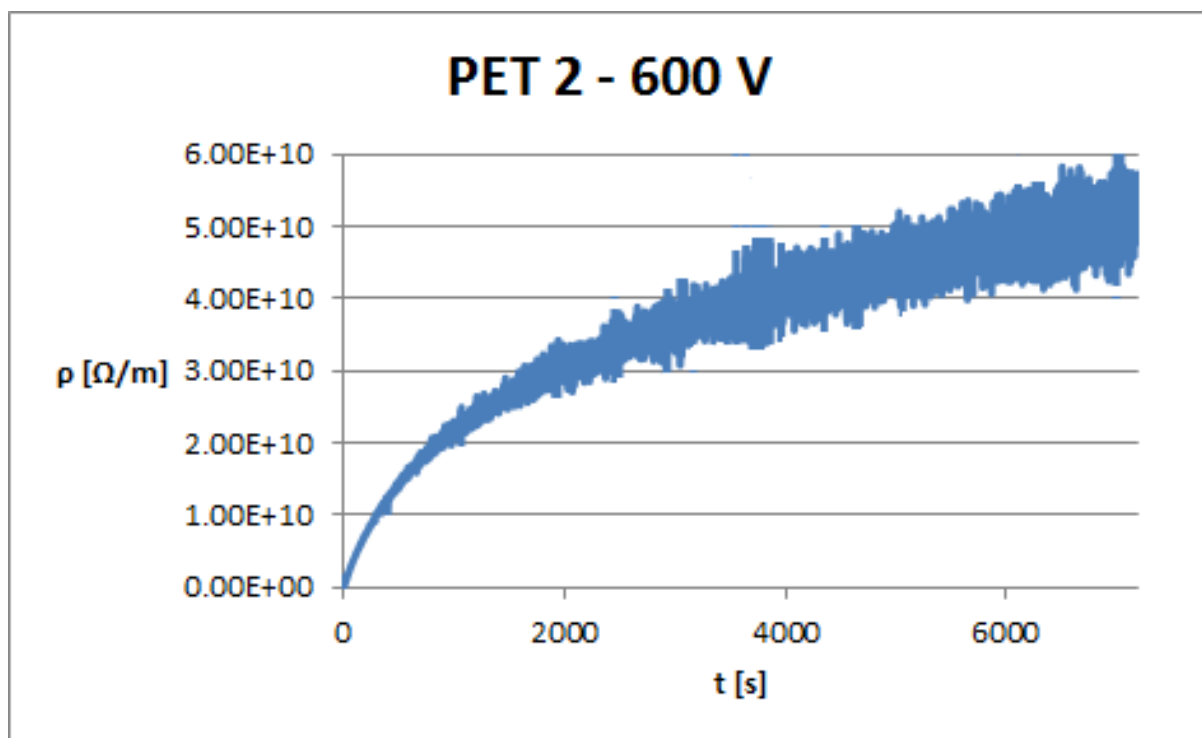
Obr. C.1. Závislost rezistivity na čase PET folie



Obr. C.2. Závislost rezistivity na čase PET folie

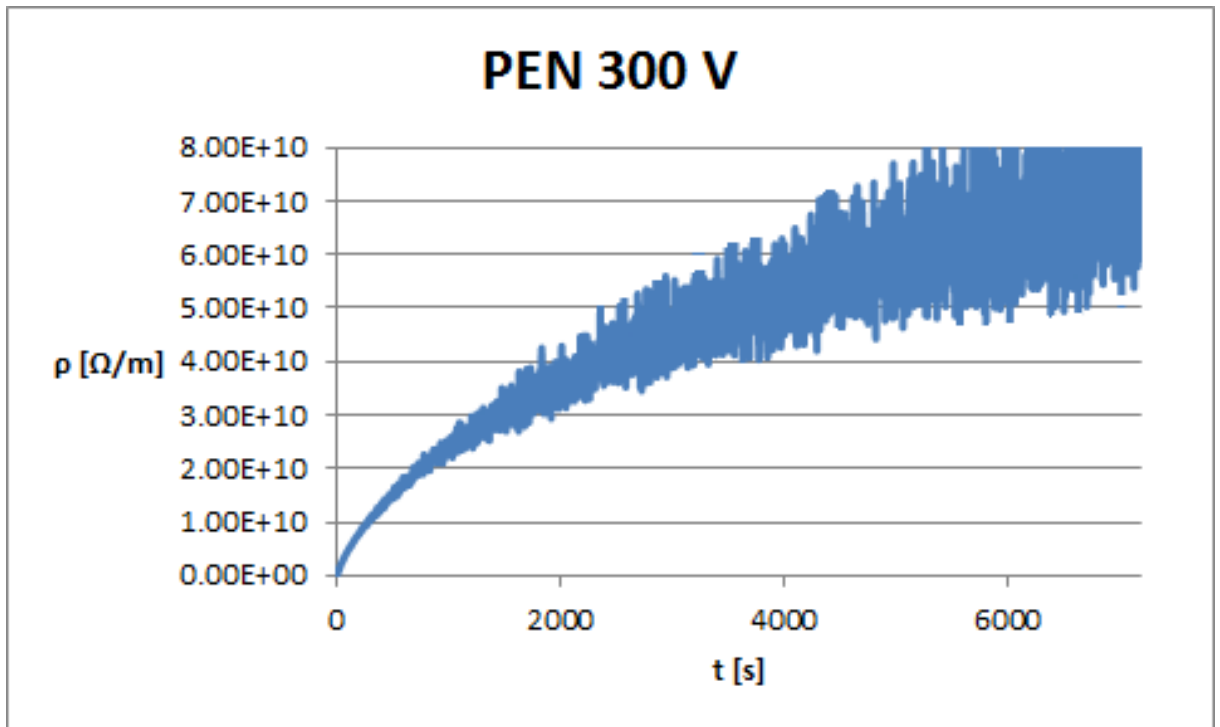


Obr. C.3. Závislost rezistivity na čase PET-2 folie

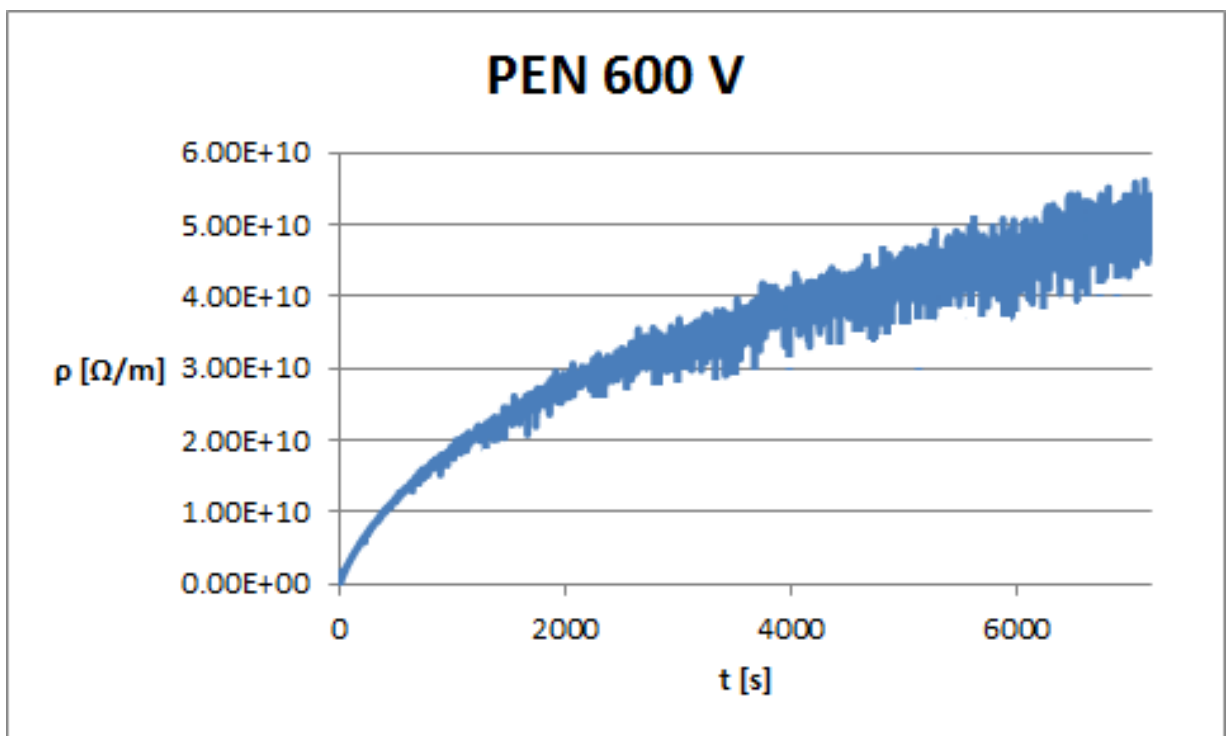


Obr. C.4. Závislost rezistivity na čase PET-2 folie





Obr. C.5. Závislost rezistivity na čase PEN TEONEX folie



Obr. C.6. Závislost rezistivity na čase PEN TEONEX folie