

Západočeská univerzita v Plzni

Fakulta elektrotechnická

Katedra technologií a měření

# **DISERTAČNÍ PRÁCE**

Nové přístupy k optimalizaci polovodivých  
ochran

**PLZEŇ, 2014**

**Ing. Ondřej Krpal**

**Fakulta elektrotechnická**

**DISERTAČNÍ PRÁCE**

k získání akademického titulu doktor  
v oboru

Elektrotechnika

**Ing. Ondřej Krpal**

**Nové přístupy k optimalizaci polovodiivých  
ochran**

*Školitel:* doc. Ing. Eva Kučerová, CSc.

*Datum státní doktorské zkoušky:* 11. 7. 2011

*Datum odevzdání práce:* 22. 10. 2014

V Plzni, 2014

## **Prohlášení o duševním vlastnictví**

Tímto předkládám k posouzení a obhajobě disertační práci na téma „Zlepšování parametrů výkonových transformátorů“ zpracovanou během doktorského studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni pod vedením doc. Ing. Evy Kučerové, CSc.

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně s použitím literatury a zdrojů uvedených v seznamu na konci této práce.

V Plzni, 22. 10. 2014

.....

Ondřej Krpal

## **NOVÉ PŘÍSTUPY K OPTIMALIZACI POLOVODIVÝCH OCHRAN**

Disertační práce se zabývá řešením nových přístupů při návrhu polovodivých ochran (dále EGS ochran) u vysokonapěťových točivých strojů.

Tyto ochrany jsou aplikovány na statorové tyče v oblasti výstupu z čel generátoru a jsou elektricky namáhány jak při provozu stroje, tak hlavně při mezioperačních zkouškách v průběhu výroby stroje. Namáhání lze snížit optimálním navržením EGS ochrany.

Cílem této práce je najít řešení pro návrh způsobu aplikace EGS ochran, které by dokázaly ideálně rozložit elektrické pole, aby nedocházelo ke vzniku částečných výbojů při provozu stroje při jmenovitém napětí nebo k destrukci celé ochrany v průběhu mezioperačních zkoušek při zkušebním napětí. V práci se řeší také možnost použití nových laků založených na organických polymerech.

Výzkumy a experimenty uvedené v práci byly podpořeny grantem Studentské grantové soutěže ZČU č. SGS 2012-026 „Materiálové a technologické systémy v elektrotechnice“.

103 stran

68 obrázků

14 tabulek

5 příloh

## **NEW APPROACHES FOR OPTIMIZING SEMICONDUCTIVE PROTECTIONS**

The dissertation deals with the new approaches in the design of semiconductive protection (the EGS protection) in high-voltage rotating machines.

These protections are applied to the stator bars in the end-winding of the generator and are electrically stressed during the machine operation, especially within testing during manufacture of the machine. The stress can be reduced by designing the optimal EGS protection.

The aim of this work is to find a method for designing the application of EGS protection, which would be able to ideally distribute the electric field to avoid the occurrence of partial discharge when operating at rated voltage or the destruction of the entire protection during testing at the test voltage. The work also deals with the possibility of using new varnishes based on organic polymers.

Research and experiments in the thesis were supported by Student Grant Agency of the WBU in Pilsen, grant No. SGS 2012 – 026 “Material and Technology Systems in Electrical Engineering”.

103 pages

68 pictures

14 tables

5 supplement

## **NEUE ANSÄTZE ZUR OPTIMIERUNG DES ENDENGLIMMSCHUTZES**

Die Dissertation befasst sich mit neuen Ansätzen bei der Entwicklung vom Endenglimmschutz (EGS) bei rotierenden Hochspannungsmaschinen.

Dieser Schutz wird insbesondere bei Ständerstäben im Austrittsbereich der Seiten des Generators, bei einer elektrischen Beanspruchung und hauptsächlich bei In-Prozess Tests, während der Herstellung von Maschinen, angewendet. Die Beanspruchung kann durch die Gestaltung des optimalen EGS reduziert werden.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, eine Lösung für die Gestaltung der Applikationsmethode von EGS zu finden, die idealerweise in der Lage wäre, das elektrische Feld zu verteilen, damit das Auftreten von Teilentladungen im laufenden Prozess der Maschine bei Nennspannung oder der Zerstörung des gesamten Schutzes bei Zwischenprüfung der Testspannung vermieden werden kann. Die Arbeit beschreibt auch die Möglichkeit der Verwendung von neuen Beschichtungen auf Basis organischer Polymere.

In der Arbeit genannte Forschungen und Experimente wurden durch einen Zuschuss aus dem Stipendium-Wettbewerb UWB der Westböhmisches Universität in Pilsen, Nr. SGS 2012-026 "Werkstoffe und technische Systeme in der Elektrotechnik", unterstützt.

103 Seiten

68 Abbildungen

14 Tabellen

5 Anlagen

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval svému školiteli doc. Ing. Evě Kučerová, CSc. za systematické vedení, rady a připomínky během zpracování práce. Dále bych chtěl poděkovat Jaroslavu Bartoňovi za pomoc při realizaci experimentální části a kolektivu pod vedením prof. Václava Mentlíka, CSc. Stejně jako ostatním kolegům i kolegyním z oddělení za rady a pomoc při zpracovávání. V neposlední řadě bych rád využil tyto řádky pro vyjádření vděčnosti své rodině za dlouhodobou podporu během studia.

## Obsah

Seznam symbolů .....	13
Seznam použitých zkratk .....	14
Úvod .....	15
<b>1 Současný stav v oblasti EGS ochran .....</b>	<b>16</b>
<b>2 Cíle práce .....</b>	<b>19</b>
<b>3 Výbojová činnost v točivém stroji.....</b>	<b>20</b>
<b>3.1 Vliv částečných výbojů na materiály .....</b>	<b>20</b>
<b>3.2 Uspořádání statorových cívek a místa výbojové činnosti .....</b>	<b>21</b>
3.2.1 Vnější ochrana proti koruně v drážkové části (AGS).....	25
3.2.2 Ochrana proti koruně u výstupu z drážky (EGS).....	26
<b>4 Současná nabídka AGS a EGS ochran .....</b>	<b>27</b>
<b>4.1 Von Roll Holding AG .....</b>	<b>27</b>
<b>4.2 Krempel GmbH .....</b>	<b>29</b>
<b>4.3 Isolvolta AG .....</b>	<b>29</b>
<b>4.4 Ostatní výrobci.....</b>	<b>29</b>
<b>5 Vzorky statorových tyčí.....</b>	<b>32</b>
<b>5.1 Výroba statorových tyčí.....</b>	<b>32</b>
<b>5.2 Měření <math>\text{tg } \delta</math> a <math>\epsilon_r</math> vzorků statorových cívek.....</b>	<b>34</b>
<b>6 Charakter EGS ochran.....</b>	<b>36</b>
<b>6.1 Plniva pro EGS ochrany .....</b>	<b>37</b>
6.1.1 Materiály na bázi SiC částic .....	38
6.1.2 Materiály na bázi mikrovaristorů ZnO .....	40
<b>6.2 Vlastnosti EGS ochran.....</b>	<b>41</b>
6.2.1 V-A charakteristiky EGS ochran.....	41
6.2.2 Rozdílnost měření V-A charakteristik střídavým a stejnosměrným elektrickým napětím ..	45
6.2.3 Stárnutí EGS ochran a jejich V-A charakteristiky .....	47



6.2.4	Srovnání V-A charakteristik měřených na sklotextitových trubkách a vzorcích statorových tyčí .....	49
6.2.5	Měření vodivosti a kapacity EGS pásek dielektrickou spektroskopii .....	52
<b>7</b>	<b>Napět'ové poměry na izolaci vinutí na výstupu z drážky VN točivého stroje .....</b>	<b>55</b>
7.1	Zhotovení vzorků .....	56
7.2	Měření rozložení napětí podél vzorku statorové cívky .....	56
7.3	Měření rozložení teploty podél vzorku statorové cívky .....	60
7.4	Měření částečných výbojů koronovou kamerou .....	62
<b>8</b>	<b>Matematický model napět'ových a teplotních poměrů na EGS ochraně .....</b>	<b>65</b>
8.1	Vytvoření geometrie vzorku .....	67
8.2	Model rozložení napětí podél EGS ochrany .....	68
8.2.1	Model rozložení napětí pro 2 vrstvou EGS ochranu .....	70
8.3	Model rozložení teploty podél EGS ochrany .....	72
8.3.1	Model rozložení teploty pro 2 vrstvou EGS ochranu .....	74
<b>9</b>	<b>Antikoronní ochrany na bázi organických polymerů .....</b>	<b>76</b>
9.1	PEDOT:PSS .....	76
9.2	Přehled zkoumaných vzorků organických polymerů PEDOT:PSS .....	77
9.3	Měření V-A charakteristik PEDOT:PSS .....	78
9.3.1	Porovnání výsledků měření na obou variantách vzorků .....	79
9.3.2	Srovnání konvenčních EGS ochran s laky na bázi PEDOT:PSS .....	82
9.4	Strukturální metody .....	83
9.4.1	Vyhodnocení výsledků strukturálních metod a srovnání nových materiálů s konvenčními ochranami .....	84
<b>10</b>	<b>Přínosy disertační práce .....</b>	<b>89</b>
<b>11</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>92</b>
	<b>Literatura .....</b>	<b>93</b>
	<b>Seznam příloh .....</b>	<b>100</b>
	<b>Publikační činnost autora .....</b>	<b>101</b>

## Seznam obrázků

Obr. 3.1	Uspořádání statorových cívek a jejich ochran, převzato a upraveno z [2].....	21
Obr. 3.2	Místa vzniků částečných výbojů, převzato a upraveno z [17] .....	22
Obr. 3.3	Klouzavé výboje na výstupu vinutí z drážek statoru, převzato a upraveno z [20].....	23
Obr. 3.4	Rozložení napětí podél statorové cívky s a bez EGS ochrany, převzato a .....	
	upraveno z [2] .....	24
Obr. 3.5	Měření čtvercového odporu .....	24
Obr. 3.6	Ilustrativní porovnání AGS a EGS ochrany, převzato z [22].....	25
Obr. 4.1	Různé závislosti typů ochran na gradientu elektrického pole .....	28
Obr. 5.1	Vzorek statorové cívky (mm).....	33
Obr. 5.2	Vytvrzovací lis .....	33
Obr. 5.3	Průběh vytvrzování vzorku statorové cívky .....	33
Obr. 5.4	Uspořádání vzorku při měření .....	34
Obr. 5.5	Průběh ztrátového činitele a relativní permitivity na el. napětí.....	35
Obr. 6.1	Aproximovaný průběh nelineární charakteristiky EGS ochrany, převzato z [24] .....	36
Obr. 6.2	Částečky karbidu křemíku, převzato z [82].....	38
Obr. 6.3	a) Náhradní obvod mezizrnkových kontaktů b) Mezizrnkové kontakty na mikro a	
	makroskopické úrovni, převzato z [30] .....	39
Obr. 6.4	Vliv koncentrace prášku na rezistivitu, převzato z [30].....	40
Obr. 6.5	Vzorek pro měření V-A charakteristiky .....	42
Obr. 6.6	Zapojení měření V-A charakteristik (mm).....	43
Obr. 6.7	Měření V-A charakteristik.....	43
Obr. 6.8	V-A charakteristika EGS ochran .....	44
Obr. 6.9	Závislost čtvercového odporu na intenzitě elektrického pole .....	44
Obr. 6.10	Proložení lineární spojnicí trendu (typ 217.03 - střídavé a stejnosměrné napětí) ....	46
Obr. 6.11	Hodnota měrné rezistivity v průběhu stárnutí – lak P8001 .....	48
Obr. 6.12	Hodnoty měrných rezistivit EGS ochran v průběhu stárnutí .....	49
Obr. 6.13	Uspořádání měření V-A charakteristik na vzorcích statorových tyčí .....	50
Obr. 6.14	Vzorek statorové tyče při měření V-A charakteristiky EGS ochrany .....	50
Obr. 6.15	Srovnání V-A charakteristiky EGS pásky Von Roll CoronaShield 217.21 měřené na	
	sklotextitové trubce a na vzorku statorové tyče.....	51
Obr. 6.16	Vzorek pro měření dielektrickou spektroskopii .....	52

Obr. 6.17	Uspořádání měření pro dielektrickou spektroskopii .....	52
Obr. 6.18	Měřicí přístroj Novocontrol .....	53
Obr. 6.19	Elektrodové uspořádání měřícího přístroje Novocontrol .....	53
Obr. 6.20	Závislost elektrické vodivosti a kapacity na teplotě měřené pro 6 frekvencí .....	54
Obr. 7.1	Nanášení různých délek a typů ochran.....	56
Obr. 7.2	Zapojení pro měření rozložení napětí podél EGS ochrany .....	57
Obr. 7.3	Měření rozložení napětí podél EGS ochrany .....	58
Obr. 7.4	Ilustrativní obrázek rozložení napětí podél EGS ochrany.....	57
Obr. 7.5	Rozložení napětí na jednotlivých typech EGS ochran délky 15 cm podél vzorku statorové cívky při připojeném střídavém napětí 45 kV .....	58
Obr. 7.6	Rozložení napětí na jednotlivých typech EGS ochran délky 20 cm podél vzorku statorové cívky při připojeném střídavém napětí 45 kV .....	59
Obr. 7.7	Rozložení napětí na jednotlivých typech EGS ochran délky 25 cm podél vzorku statorové cívky při připojeném střídavém napětí 45 kV .....	59
Obr. 7.8	Uspořádání vzorků při měření rozložení teploty .....	61
Obr. 7.9	Snímky z termokamery při připojeném napětí 45 kV a) 217.01 b) 217.02.....	61
Obr. 7.10	Termosnímek pořízený kamerou Fluke.....	63
Obr. 7.11	Graf vykreslený ze snímků termokamery.....	63
Obr. 7.12	Princip korona kamery a) spektrum korony b) blokové schéma korona kamery.....	64
Obr. 7.13	Zapojení měření koronovou kamerou.....	64
Obr. 7.14	Částečné výboje na konci EGS ochrany 217.01 o délce 100 mm při různých napěťových hladinách a) 15 kV b) 30 kV c) 45 kV.....	65
Obr. 8.1	Elektrický obvodu představující element EGS ochrany u výstupu vinutí z drážky, převzato z [1] .....	65
Obr. 8.2	Geometrické uspořádání vzorku pro simulaci.....	67
Obr. 8.3	3D model rozložení napětí u EGS ochrany typu 217.02.....	69
Obr. 8.4	Srovnání simulace a měření rozložení napětí EGS ochrany typu 217.02 .....	70
Obr. 8.5	Čtvercové odpory u dvoustupňové ochrany .....	71
Obr. 8.6	Dvoustupňové geometrické uspořádání vzorku pro simulaci .....	71
Obr. 8.7	Průběhy napětí podél statorové cívky u jednostupňové a dvoustupňové ochrany .....	72
Obr. 8.8	3D model rozložení teploty u EGS ochrany typu 217.02.....	73
Obr. 8.9	Simulace a měření rozložení teploty podél EGS ochrany 217.02.....	74
Obr. 8.10	Simulace a měření rozložení teploty podél dvoustupňové EGS ochrany 217.02 .....	75
Obr. 9.1	Struktura PEDOT:PSS, převzato z [47] .....	76

Obr. 9.2 Stereomikroskopický snímek vzorku 020813/2 v režimu procházejícího světla .....	78
Obr. 9.3 Ukázka vzorku s nánosem PEDOT:PSS .....	79
Obr. 9.4 Schéma zapojení pro měření vzorků PEDOT:PSS V-A metodou .....	79
Obr. 9.5 Fotografie z měření vzorků PEDOT:PSS.....	79
Obr. 9.6 Průběhy měření laků na sklotextitových trubkách a skleněných destičkách.....	82
Obr. 9.7 Srovnání konvenčních EGS ochran a vzorků na bázi PEDOT:PSS.....	83
Obr. 9.8 Lineární proložení průběhu termogravimetrické analýzy .....	84
Obr. 9.9 Grafické znázornění směrnic poklesů průběhů TGA .....	85
Obr. 9.10 Grafické znázornění hodnot residuí a teplot, při kterých dochází k 3% úbytkům hmotnosti .....	86
Obr. 9.11 Průběhy STA a DSC u vzorku 300713/1 .....	87
Obr. 9.12 Srovnání konvenčních EGS ochran, vzorků na bázi PEDOT:PSS a stárnutých vzorků na bázi PEDOT:PSS .....	88

## Seznam tabulek

Tab. 4.1 Přehled vybraných parametrů AGS pásek [23].....	30
Tab. 4.2 Přehled vybraných parametrů EGS pásek [23] .....	31
Tab. 6.1 Seznam typů EGS ochran měřených na sklotextitové trubce .....	42
Tab. 6.2 Srovnání hodnot n a K EGS ochran .....	47
Tab. 6.3 Hodnoty n a K laků po jejich expozici .....	48
Tab. 6.4 Hodnoty n a K po expozici vzorků při 155 °C.....	48
Tab. 6.5 Seznam typů EGS ochran měřených na vzorcích statorových tyčí.....	50
Tab. 6.6 Hodnoty n a K EGS ochran na rozdílných geometrických uspořádáních.....	51
Tab. 7.1 Měřené délky a typy EGS ochran.....	56
Tab. 8.1 Materiálové konstanty .....	68
Tab. 9.1 Přehled zkoumaných vzorků organických polymerů PEDOT:PSS .....	77
Tab. 9.2 Hodnoty lineárního regresního modelu s umělými proměnnými pro EGS lak P8001 .....	80
Tab. 9.3 Hodnoty lineárního regresního modelu s umělými proměnnými pro EGS lak P8002 .....	81
Tab. 9.4 Nelinearity n získané z průběhů TGA.....	85

## Seznam symbolů

<b>C</b>	Kapacita	[F]
<b>C<sub>D</sub></b>	Frekvenčně nezávislá, bezeztrátová kapacita	[F]
<b>C<sub>p</sub></b>	Tepelná kapacita	[J·(kg·K) <sup>-1</sup> ]
<b>C<sub>S</sub></b>	Nelineární a frekvenčně nezávislá kapacita	[F]
<b>d</b>	Tloušťka izolace	[m]
<b>E</b>	Intenzita elektrického pole	[V·m <sup>-1</sup> ]
<b>E<sub>n</sub></b>	Normální složka intenzity elektrického pole	[V·m <sup>-1</sup> ]
<b>E<sub>t</sub></b>	Tečná složka intenzity elektrického pole	[V·m <sup>-1</sup> ]
<b>f</b>	Frekvence	[Hz]
<b>I</b>	Proud	[A]
<b>J</b>	Hustota elektrického proudu	[A·m <sup>-2</sup> ]
<b>J<sub>e</sub></b>	Externí hustota elektrického proudu	[A·m <sup>-2</sup> ]
<b>K</b>	Konstanta typická pro danou EGS ochranu	[-]
<b>k</b>	Tepelná vodivost	[W·(m·K) <sup>-1</sup> ]
<b>l</b>	Délka	[m]
<b>n</b>	Konstanta typická pro danou EGS ochranu	[-]
<b>P</b>	Ztráty	[W]
<b>Q</b>	Měrné tepelné ztráty	[W·m <sup>-3</sup> ]
<b>Q<sub>i</sub></b>	Elektrický náboj	[C]
<b>R</b>	Odpor	[Ω]
<b>R<sub>□</sub></b>	Čtvercový odpor	[Ω]
<b>r<sub>1</sub></b>	Poloměr sklotextitové trubky bez vrstvy laku	[m]
<b>r<sub>2</sub></b>	Poloměr sklotextitové trubky s vrstvou laku	[m]
<b>R<sub>S</sub></b>	Nelineární odpor	[Ω]
<b>S</b>	Plocha elektrody	[m <sup>2</sup> ]
<b>š</b>	Šířka	[m]
<b>t</b>	Tloušťka	[m]
<b>T</b>	Teplota	[°C, °K]
<b>t<sub>1</sub></b>	Tloušťka vzorku bez vrstvy laku	[m]
<b>t<sub>2</sub></b>	Tloušťka vzorku s vrstvou laku	[m]
<b>tg δ</b>	Ztrátový činitel	[-]
<b>U</b>	Napětí	[V]
<b>U<sub>0</sub></b>	Počáteční napětí korony	[V]
<b>U<sub>n</sub></b>	Jmenovité napětí	[V]
<b>U<sub>st</sub></b>	Počáteční napětí klouzavých stvolů	[V]
<b>U<sub>z</sub></b>	Zkoušecí napětí	[V]
<b>α</b>	Součinitel přestupu tepla	[W·(m <sup>2</sup> ·K) <sup>-1</sup> ]
<b>β</b>	Koeficient nelinearity	[-]
<b>ε<sub>0</sub></b>	Permitivita vakua	[F·m <sup>-1</sup> ]
<b>ε<sub>r</sub></b>	Relativní permitivita	[-]

$\rho$	Rezistivita	$[\Omega \cdot \text{m}]$
$\rho$	Hustota	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$
$\rho_p$	Povrchová rezistivita	$[\Omega]$
$\rho_v$	Vnitřní rezistivita	$[\Omega \cdot \text{m}]$
$\sigma$	Elektrická vodivost	$[\text{S} \cdot \text{m}^{-1}]$

## Seznam použitých zkratk

<b>AGS</b>	Vnější ochrana proti koruně
<b>CCD</b>	Charge Coupled Device
<b>CIGRE</b>	Mezinárodní rada pro velké elektrické systémy
<b>ČSN</b>	Československé státní normy
<b>ČV</b>	Částečné výboje
<b>DSC</b>	Diferenční skenovací kalorimetrie
<b>DTG</b>	Dynamická termogravimetrie
<b>EGS</b>	Koncová ochrana proti koruně
<b>EN</b>	Evropské normy
<b>IGS</b>	Vnitřní ochrana proti koruně
<b>MKP</b>	Metoda konečných prvků
<b>TGA</b>	Termogravimetrická analýza
<b>UV</b>	Ultrafialové záření
<b>VPI</b>	VacuumPressureImpregnation
<b>VN</b>	Vysoké napětí
<b>VVN</b>	Velmi vysoké napětí

## Úvod

Synchronní stroje jsou nejčastěji používané na výrobu elektrické energie, tedy jako alternátory. Jejich bezproblémový chod je proto velmi důležitý pro celou elektrizační soustavu. Velký vliv na životnost má bezpochyby izolační systém tohoto točivého stroje, který z důvodů materiálů používaných pro jeho výrobu prakticky určuje její dobu, ale i potřeby odstávky z důvodu diagnostiky nebo opravy.

Izolační systém je v průběhu provozu stroje vystaven několika druhům namáhání. Jedním z nich je namáhání elektrickým polem, kdy se u točivých strojů mohou objevovat částečné výboje, které způsobují intenzivní degradaci izolačního systému, urychlují stárnutí izolace a na konec mohou způsobit předčasné selhání stroje. Mají podstatný vliv na určování doby životnosti izolačního systému. Částečné výboje se dělí na vnitřní a povrchové výboje. Vnitřní výboje vznikají v plynové mezeře mezi statorovou cívkou a magnetickým obvodem, povrchové výboje pak na výstupu vinutí z drážky statoru. Pro potlačení vnitřních výbojů se používají tzv. AGS ochrany (z německého Aussenglimmschutz), které se aplikují na povrch statorové tyče v její drážkové části. Pro potlačení povrchových výbojů se statorové cívka opatřuje tzv. EGS ochranou (z německého Endenglimmschutz), která se nanáší u výstupu vinutí z čel.

EGS ochrany jsou namáhány jak v průběhu provozu točivého stroje, tak hlavně při mezioperačních zkouškách, kdy jsou hodnoty připojeného zkušební napětí násobně vyšší než jmenovité napětí stroje.

Návrh aplikace těchto ochran je do značné míry velmi obtížný, jelikož k teoretickému řešení tohoto problému se zatím využívají telegrafní rovnice. Ty musí popsat rozložení napětí podél EGS ochrany, které se chová jako dlouhé vedení s rozloženými parametry. Ty navíc vykazují vysokou nelinearitu závislou na elektrickém poli a teplotě. Vzhledem ke složitosti teoretického přístupu zde nastává možnost řešit tento problém prakticky, a to reálným měřením na vysokém počtu laboratorních vzorků statorových tyčí. Jako alternativa k teoretickému řešení lze použít modelování toho jevu pomocí metody konečných prvků.

Ideální řešení této problematiky lze spatřit v porovnatelnosti výsledků simulovaných a reálně naměřených dat, tzn., že před aplikací EGS ochrany by existovala možnost navrhnout parametry EGS ochrany pomocí metody konečných prvků tak, aby došlo k optimálnímu rozložení napětí podél této ochrany a tudíž k minimalizaci pravděpodobnosti vzniku částečných výbojů.

## 1 Současný stav v oblasti EGS ochran

Práce je zaměřena na optimalizaci EGS ochran u výstupu vinutí z čel synchronního generátoru. Ochrany jsou tvořeny aplikací tzv. polovodivých (dále EGS) laků nebo pásek a slouží jako ochrana proti povrchovým výbojům. Ty vznikají v důsledku vysokého gradientu elektrického pole podél statorové cívky u výstupu z drážkové části stroje. Povrchové výboje způsobují degradaci izolačního systému a vedou ke zkrácení životnosti a snížení provozní spolehlivosti. [1]

V současné době je známo několik možností, jak vhodně rozložit potenciál a minimalizovat tak částečné výboje. Ke snížení gradientu elektrického pole se dříve nejvíce užívala odporová metoda (při výpočtech brána jako napět'ově nezávislá), neboli aplikace vrstev o různém odporu, kdy se jejich měrný povrchový odpor zvyšuje ve směru od drážkové části směrem ke konci statorové cívky. [2] [3]

Dnes je z hlediska ekonomického i technologického nejvíce rozšířena stále odporová metoda použitím napět'ově závislých materiálů, jejichž charakteristika je respektována i při výpočtově a je nejčastěji označována jako nelineární ochrana. Problematika nelineárních ochran je rozebrána v mnoha publikacích, ať již z pohledu teoretického, tzn. výpočtem nebo simulací rozložení elektrického pole [1],[3],[4],[5], nebo experimentálně, tzn. jejím měřením. [6] [7]

Při provozu synchronních generátorů není intenzita degradace elektrickým polem výrazná a nepřevyšuje účinky ostatních degradačních vlivů, nicméně vysoký gradient elektrického pole hraje významnou roli při mezioperačních zkouškách tyčí a cívek [1]. Zkoušky elektrické pevnosti izolace tyčí se řídí dle evropské normy ČSN EN 50209[8], která předepisuje zkušební napětí jako  $U_z = 2 \cdot U_n + 1$  kV po dobu jedné minuty, poté se napětí zvyšuje rychlostí 1 kV/s až do průrazu. Finální zkouška navinutého statoru je zkoušena podle ČSN EN 60034-1[9], tzn. napětí na hladině  $U_z = 2 \cdot U_n + 1$  kV (50 Hz) po dobu jedné minuty. Více v článku [10]. Z těchto norem vyplývá, že zkoušky jsou vzhledem k provozním podmínkám vysoce náročné. U antikoronní ochrany, která není dimenzována na zkušební napětí, může dojít k povrchovým výbojům, vzniku zuhelnatělých vodivých kanálů podél EGS ochrany (odkaz na obr.) a k poškození izolace. Popř. statorovou cívku nebude možné testovat, jelikož ke vzniku výbojů bude docházet již při napětím nižším, než je napětí zkušební. [1]

Někteří výrobci nelineárních ochran, ale i autoři některých článků doporučují ideální délku ochrany jako polovinu z maximálního testovacího napětí. Pokud je jmenovité napětí  $U_n$



vyšší než 13,8 kV, je doporučeno nanést dvě vrstvy, z nichž horní bude dosahovat poloviny délky spodní vrstvy. Tzn., že např. pro  $U_n = 15,75$  kV by podle evropské normy ČSN EN 50209 měla být EGS ochrana dvouvrstvá (dvoustupňová). [11]

Takto obecně navržená ochrana nemusí být pro konkrétní stroj ideální, tzn., může se v nejhorším případě i poddimenzovat. Předložená práce se věnuje zjištění optimálního provedení ochran izolace tak, aby gradient elektrického pole a jeho vliv při různých napětích byl co nejlépe eliminován. Jde o co nejefektivnější využití EGS ochran v závislosti na jejich typu a způsobu aplikace.

Problematika gradientu elektrického pole je v několika publikacích řešena i pomocí matematického modelu. Modelu, který je uveden v [3], se věnuje rozložení napětí podél lineárních odporových ochran, tedy ochran, které jsou již v průmyslu minimálně zastoupeny. Jeden z prvních matematických modelů zkoumající rozložení napětí na povrchu nelineární odporové ochrany je popsán v [1]. Článek uvádí i řešení výstupní oblasti vinutí turbogenerátoru a výkonu 500 MW, nicméně posléze nedokládá srovnání s naměřenými hodnotami, tudíž neprokazuje správnost výpočtu. Srovnání matematického modelu s naměřenými daty je uveden v článku [5]. V tomto případě se autoři věnují aplikací různých typů EGS ochran, ale pouze o jedné délce EGS ochrany na jedné hodnotě připojeného napětí (32 kV). Navíc tento článek uvádí, že hodnota napětí na povrchu EGS ochrany dosahuje až hodnoty 35 kV, tedy vyššího než připojené napětí. Jednou z možných příčin této hodnoty napětí může být Ferrantiho jev nebo fázový posun.

Z těchto i dalších prací je patrné, že chybí srovnání matematického modelu s hodnotami měřenými na různých hladinách napětí u různých délek a druhů EGS ochran, které je zkoumáno v této práci.

V dnešní době se navíc nabízí možnost prozkoumat statorové vinutí také pod koronovou kamerou a lokalizovat tak přesné místa povrchových výbojů a srovnat tyto oblasti například s jejich teplotním ohřevem pomocí termokamery. Tímto zjištěním by bylo možné určit přesná místa nejvyššího namáhání, tedy místa s vysokou pravděpodobností selhání.

V několika člancích (např. [4]) je zmíněna také závislost odporu EGS ochrany na intenzitě elektrického pole  $R = R(E)$ , která je zásadní pro její nelineární chování, zanedbává se však vliv teploty. Nicméně i dlouhodobější působení teploty, tedy její stárnutí, určuje změnu V-A charakteristik EGS ochran. Vzniká tedy potřeba zjistit, jaký vliv má působení teploty na stárnutí EGS ochran a tudíž na změnu jejich elektrických vlastností.

V současné době jsou pro EGS ochrany používány materiály založené na karbidu křemíku (SiC), které jsou zatím nejvíce rozšířené [12]. Do popředí se však dostávají nové

materiály, konkrétně oxid zinečnatý (ZnO), který vykazuje podobné nelineární vlastnosti. Na naší katedře je možnost díky projektu COPOMA zkoumat vodivé polymery na bázi PEDOT, které by mohly být použity také u výstupu vinutí z čel točivých strojů a sloužit jako alternativa k materiálům založených na bázi karbidu křemíku.

## 2 Cíle práce

I když se problematikou výskytu vlivu a eliminace výbojové činnosti na vinutí elektrických točivých strojů zabývají konstruktéři již řadu let, přesto je tato otázka stále aktuálním problémem. Neustále je snaha výrobců elektrických točivých strojů vyrábět stroje s vyšší spolehlivostí a životností a je nutné hledat nové materiálové a technologické možnosti, které budou přínosem v této oblasti. Z výše zmíněného současného stavu problematiky EGS ochran, jsem si vybral následující cíle mé disertační práce:

1. zhotovit laboratorní vzorky odpovídající v měřítku 1:3 reálnému provedení, aplikovat EGS ochrany a změřit vliv různých délek a typů ochran na rozložení napětí podél vinutí
2. zjistit rozložení teplot na vzorcích při přiloženém napětí pomocí termokamery
3. vytvořit matematický model vinutí pro výpočet rozložení napětí a teploty a ověřit shodu získaných výsledků s body 1 a 2
4. zmapovat místa vzniku povrchových výbojů pomocí koronové kamery
5. popsat vliv teploty na nelinearitu V-A charakteristiky u EGS ochran a zabudovat V-A charakteristiku do návrhu
6. ověřit možnosti aplikací nových materiálů – polymerů na bázi PEDOT.

### 3 Výbojová činnost v točivém stroji

Izolační systém točivých strojů podléhá po celou dobu provozu stroje několika druhům namáhání, které vedou ke změnám vlastností materiálů. Na stroje působí mechanické namáhání, elektrické namáhání a s tím související tepelné namáhání. Všechny tyto vlivy postupně snižují životnost izolace. Pokud se hodnoty jednofázového provozního napětí točivého stroje pohybují nad 6 kV [13], objevuje se zde i výbojová činnost, která nevede k přímému zničení izolace, ale způsobuje několik pochodů, které přispívají k možnému selhání celého izolačního systému.[14][15]

#### 3.1 Vliv částečných výbojů na materiály

Částečné výboje způsobují v nehomogenitách izolantu chemické, tepelné a fyzikální změny, které jsou nevratné. Tyto pochody vedou až k selhání dlouhodobě namáhaných částí izolačního systému. Degradace elektroizolačních materiálů částečnými výboji je důsledkem především dvou dějů: chemickou degradací dielektrika a bombardováním stěn dutiny částicemi (např. ionty) dopadajícími na povrch izolantu. [14][15]

##### **Chemické účinky**

Při výboji vzniká z atomů kyslíků ozón v dutince, který má silné oxidační účinky. V některých případech může ozón společně s oxidy dusíku vytvářet agresivní kyselinu dusičnou. Také produkty vlastního rozkladu izolace částečným výbojem zapříčiňují chemickou destrukci. Takto vzniklé produkty mohou dále difundovat do pevného izolantu a vytvářet tak vodivé cesty. [15]

##### **Elektro-erozivní účinky**

Vyvine-li se v dutince oblouk, je jeho pravděpodobným následkem vytvoření vodivé dráhy. Při vysokých hodnotách intenzity elektrického pole může koncentrace elektrického pole způsobit v tomto místě čistě elektrický průraz a vodivá dráha se může postupně šířit izolantem. Ničivý účinek mají též ionty a elektrony tím, že bombardují stěny dutinky, čímž způsobují její erozi. Postupným zvětšováním dutinky může dojít až k průrazu celého izolantu. [15]

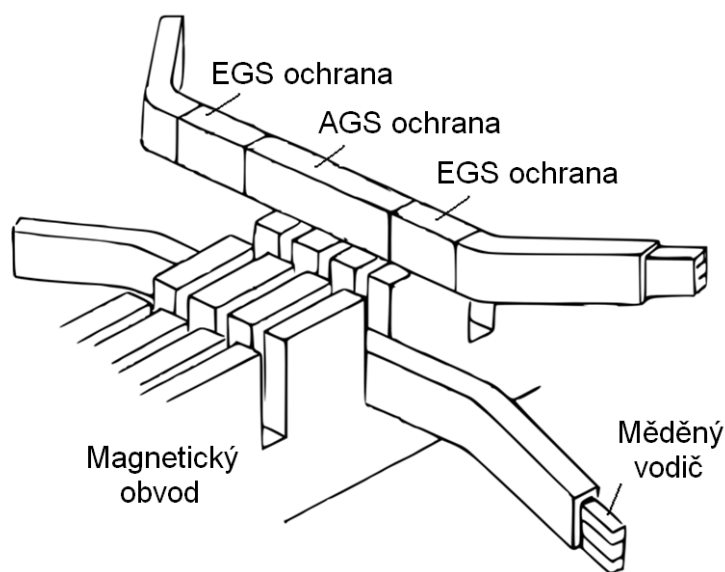
## Tepelné účinky

Částečné výboje způsobují opakované ohřívání izolantu, což vede ke snižování hladiny napětí tepelného průrazu. Důsledkem toho je tepelná nestabilita. [15]

V současné době jsou vysokonapěťové izolační systémy točivých strojů velice složité a je nereálné, aby se jim výbojové činnosti zcela vyhnuly. Podle mezinárodního sdružení CIGRE [16] je satorové vinutí nejslabším místem v elektrických strojích. Z toho je zřejmé, že se aktivita částečných výbojů musí ve vysokonapěťových strojích minimalizovat.

## 3.2 Uspořádání satorových cívek a místa výbojové činnosti

Satorová cívka je tvořena měděným vodičem, na který je navinuta izolace. Takto zhotovená cívka je poté ještě opatřena vnější ochranou proti koruně v drážkové části (AGS) a ochranou proti koruně u výstupu vinutí čel z magnetického obvodu (EGS), viz *Obr. 3.1*. Oba typy ochran jsou popsány v následujících kapitolách.



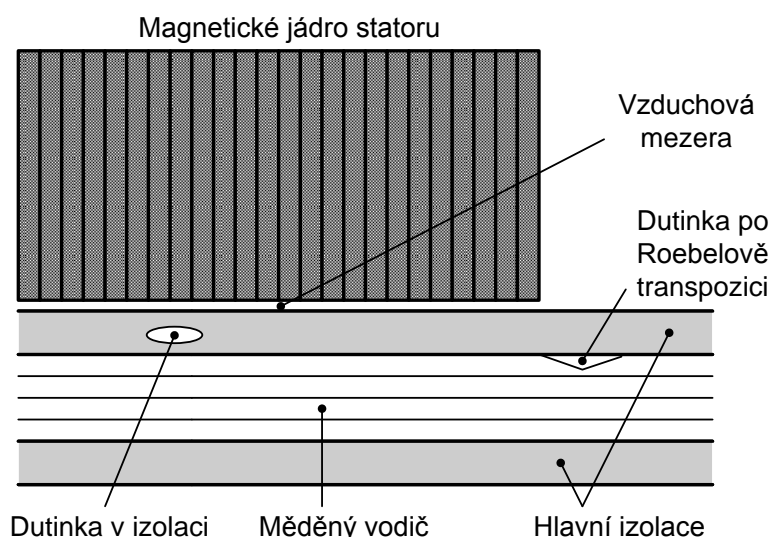
*Obr. 3.1 Uspořádání satorových cívek a jejich ochran, převzato a upraveno z [2]*

Částečné výboje (ČV), lze rozdělit na vnitřní (interní), vnější (externí) a povrchové (klouzavé). [15]

Vnitřní částečné výboje vznikají v dutinkách v izolaci (*Obr. 3.2*), kde lokální elektrické pole překročí elektrickou pevnost dané nehomogenity. Obvykle vnitřní dutinky již existují v izolačním systému slídivé pásy. Vznikat mohou i delaminací během výroby satorové cívky nebo posléze jejím zvýšeným mechanickým či tepelným namáháním během provozu. Se zvyšujícím se počtem vzduchových dutinek dochází i ke zhoršení tepelné

vodivosti izolace. K delaminaci může také docházet mezi vodiči a hlavní izolací. V tomto případě pak mohou ČV poškodit izolaci vinutí. Vnitřní dutinky nelze odstranit a jejich výskyt je určen kvalitou technologického postupu. Dutinky, které vzniknou po Roebelově transpozici lze funkčně eliminovat aplikací polovodiivého tmelu nebo měkkou polovodiivou páskou, která jako nosič používá polyesterovou nebo izolační pásku. [17]

Vnější výboje se objevují podél povrchu drážkové části statorové cívky. Při výrobě statoru jsou cívky vyrobeny mimo magnetický obvod statoru a poté se vkládají do jeho drážek. Cívky tedy musí být nepatrně užší, než šířka drážky statoru. Takto vznikne plynová mezera mezi cívkou a magnetickým obvodem, která je elektricky namáhána v obráceném poměru permitivit. Drážkové části cívek se tedy opatřují AGS ochranou, která sníží hodnotu elektrického namáhání plynových mezer a předejde tak vzniku vnějších ČV. [18]



Obr. 3.2 Místa vzniků částečných výbojů, převzato a upraveno z [17]

Problematickou částí ohledně ČV je také výstup vinutí z čel generátoru. V této oblasti dochází ke strmému nárůstu napětí ve směru od magnetického jádra k vodiči (vysoký gradient elektrického pole) a vzniku povrchových výbojů.

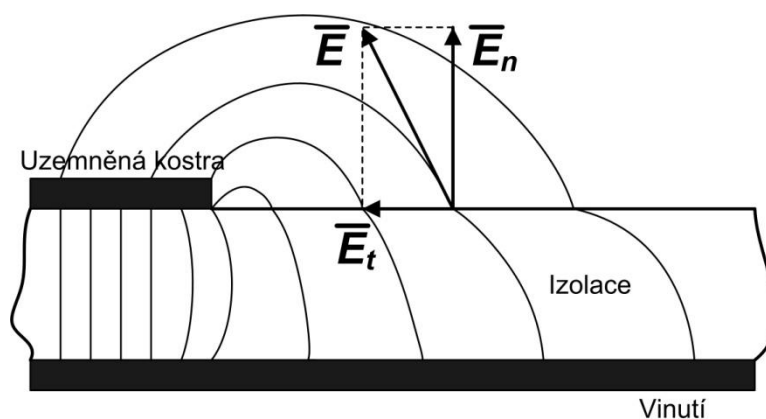
Tento princip vzniku povrchových výbojů na cívce u výstupu vinutí čel, pokud by nebyla opatřena EGS ochranou, lze popsat na modelu jednoduché průchodky.[19]

Zvyšováním napětí mezi svorníkem a objímkou dojde zde při určité hladině napětí ke vzniku souvislého prstence (směs koronového a trsového výboje). Toto napětí je označováno jako **počáteční napětí koróny**  $U_0$ . Při dalším zvyšování napětí se začne náboj šířit po povrchu průchodky směrem ke svorníku ve formě světélkujících vláken. Jestliže napětí, tzv. **počáteční napětí klouzavých stvolů**  $U_{st}$ , překročí určitou mez, objeví se na povrchu izolantu

jasně svítící stvoly jiskrového charakteru. Tento jev je doprovázen charakteristickým praskotem. S dalším zvyšováním napětí budou tyto útvary přecházet v klouzavé jiskry a přeskakovat na druhou elektrodu.

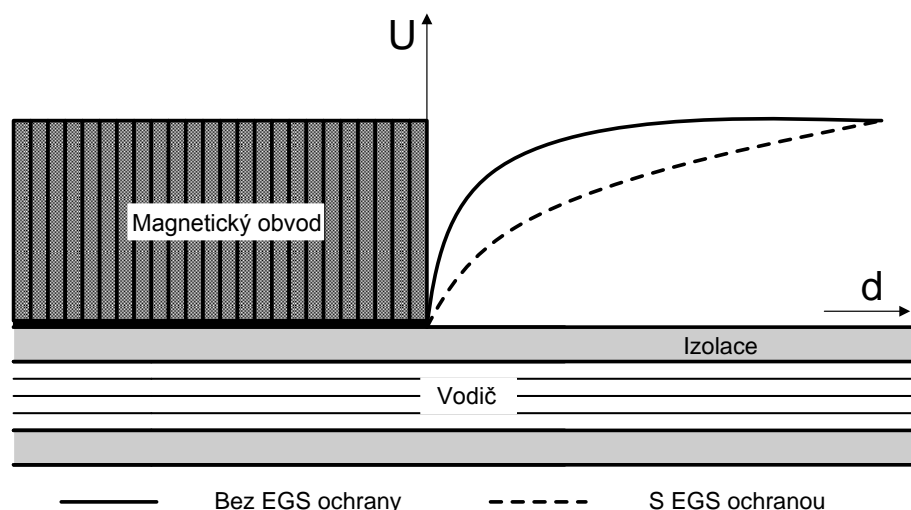
Podmínky pro vznik a šíření povrchových výbojů byly stanoveny německým fyzikem Toeplerem, *Obr. 3.3*:

1. šikmý směr vstupu silových čar původního elektrického pole do rozhraní, tj. existence normální složky intenzity pole  $E_n$  k rozhraní v tomto místě, která drží nosiče jednoho znaménka na ploše rozhraní, a existence tečné (tangenciální) složky intenzity pole  $E_t$ , která odsává nosiče druhého znaménka směrem k elektrodě, kolem níž klouzavé výboje vznikají,
2. pro vznik klouzavých výbojů je podle experimentálních poznatků nutná časová změna přiloženého napětí.



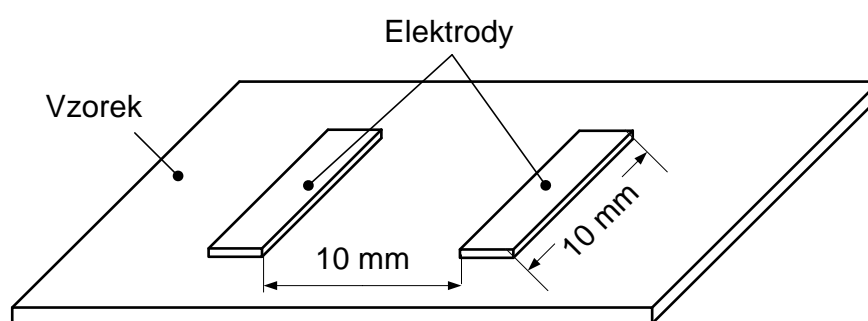
*Obr. 3.3 Klouzavé výboje na výstupu vinutí z drážek statoru, převzato a upraveno z [20]*

Ke snížení gradientu elektrického pole a k eliminaci povrchových výbojů se na povrch cívky u výstupu vinutí z čel aplikuje EGS ochrana. Na ilustračním *Obr. 3.4* je vidět nárůst napětí podél statorové cívky v případě, kdy je statorová cívka opatřena EGS ochranou a v případě, kdy je bez EGS ochrany.



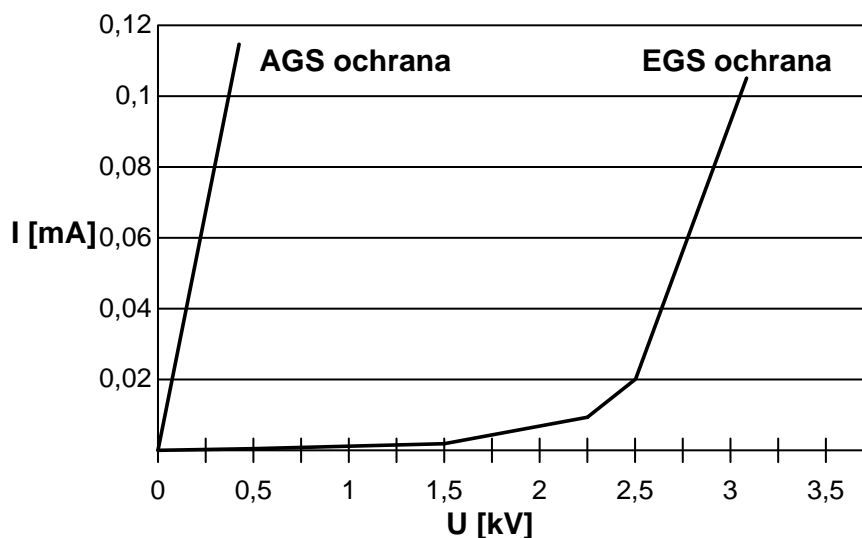
Obr. 3.4 Rozložení napětí podél statorové cívky s a bez EGS ochrany, převzato a upraveno z [17]

Zásadní rozdíl mezi AGS a EGS ochranou je v hodnotě tzv. čtvercového odporu (rezistivity) a průběhu volt-ampérové charakteristiky. Čtvercový odpor je hodnota odporu, která je změřena mezi dvěma elektrodami umístěnými paralelně ve vzdálenosti délky strany měřeného čtverce (Obr. 3.5). Zatímco se hodnota čtvercového odporu u AGS ochrany pohybuje  $R_{\square} \approx 500 \Omega - 15 \text{ k}\Omega$  v závislosti na stroji, u EGS ochrany jsou tyto hodnoty řádově  $R_{\square} \approx 100 \text{ k}\Omega$  [11]. Volt-ampérová charakteristika EGS ochrany má nelineární průběh zatímco V-A charakteristiky AGS je lineární, avšak jen do určité hodnoty intenzity elektrického pole (v extrémně vysokých hodnotách  $E \approx 10 \text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$  vykazuje nelinearitu i AGS ochrana). Srovnání průběhů V-A charakteristiky je zobrazen v Obr. 3.6. [11]



Obr. 3.5 Měření čtvercového odporu





Obr. 3.6 Ilustrativní porovnání AGS a EGS ochrany,

### 3.2.1 Vnější ochrana proti koruně v drážkové části (AGS)

Vnější ochrana proti koruně, neboli AGS (z německého slova Aussenglimmschutz) se používá v drážkové části magnetického obvodu. Její primární funkce je eliminace částečných výbojů napříč plynovou mezerou v drážce, v některých případech může sekundárně sloužit také jako boční klín. AGS ochrana by měla zamezovat drážkovým výbojům způsobených nerovnostmi na povrchu povlaku, které vznikají v průběhu navíjení vinutí nebo posléze vibracemi cívek v drážce v průběhu provozu.

Nanesená AGS ochrana na hlavní izolaci je v kontaktu na mnoha místech podél drážky s uzemněným magnetickým obvodem a tedy na jeho potenciálu. Tzn., že rozdíl napětí na povrchu jakékoli mezery nebude převyšovat hodnotu elektrického namáhání, která je kritická pro vznik částečných výbojů.

AGS ochrana je vyráběna ve formě pásek, laků, tmelů, ale i desek nebo vlnoců. Všechny formy používají grafitové plnivo, jehož množství a typ určuje vodivost dané ochrany. AGS pásy používají jako nosič skelnou, v současnosti spíše polyesterovou tkaninu, která je impregnována syntetickou pryskyřicí s grafitovým plnivem. AGS laky jsou většinou alkydové pryskyřice, opět s grafitovým plnivem. Způsob aplikací AGS ochran udává každý výrobce ve svých katalogových listech.

V současné době není stále ujednoceno názvosloví. V tomto textu se tato ochrana označuje jako AGS ochrana. Pro doplnění jsou zde ještě uvedeny v literatuře nečastěji se vyskytující anglické termíny:

- *Semi-conductive, low resistance, black carbon/graphite, corona shielded, conductive armor tape*

### 3.2.2 Ochrana proti koruně u výstupu z drážky (EGS)

Ke snížení gradientu u výstupu vinutí z čel je v současné době nejvíce rozšířená nelineární odporová metoda, tedy použití nejčastěji EGS pásek, ale i laků s nelineární voltampérovou charakteristikou. V této práci se tato ochrana značí zkratkou EGS (z německého Endenglimmschutz).

EGS ochrana může být podobně jako v případě AGS ochrany ve formě pásky, tzn. impregnována polyesterová tkanina nebo ve formě laku, tzn. modifikovaná fenolická pryskyřice. V obou případech slouží jako plnivo SiC (karbid křemíku), který způsobuje jejich typický nelineární průběh voltampérové charakteristiky. Pásky jsou dodávány předvytvrzené (ve stavu B) nebo vytvrzené (ve stavu C) a jsou použitelné až do teplotní třídy F (155 °C).

EGS ochrany stejně jako AGS ochrany nezískaly v odborné literatuře jednotný termín, proto se v anglické literatuře můžeme setkat s označeními:

- *Semi-conductive, silicone carbide, high resistance, grey, stress grading tapes.*

V anglické literatuře existuje ještě několik označení pro systém ochran proti povrchovým výbojům použitím materiálů s nelineární voltampérovou charakteristikou:

- *Voltage grading system, non-linear resistance grading, anti-corona protection, semiconductive protection, corona suppression, end corona protection, voltage smoothing system, field smoothing system, end winding corona protection.*

Dříve než bude přistoupeno k samotnému řešení, resp. návrhu EGS ochran, následující kapitola bude věnována popisu v současnosti používaných AGS a EGS ochran.

## 4 Současná nabídka AGS a EGS ochran

V dnešní době působí na trhu výrobců EGS ochran několik firem, které dodávají na trh výrobky s různými vlastnostmi. V následující kapitole je stručně uveden přehled výrobců a jejich produktů. Kapitola je doplněna i celkovým srovnáním v současné době dostupných výrobků.

### 4.1 Von Roll Holding AG

K lídrům tohoto odvětví patří Švýcarská firma *Von Roll Holding AG*, která do svého portfolia řadí mimo jiné i izolační materiály, komponenty pro průmyslové aplikace, tepelné a ohnivzdorné izolační výrobky. Von Roll Holding AG disponuje řadou produktů proti částečným výbojům. Své produkty dělí do třech základních řad:

- IGS (Innenglimmschutz) – vnitřní ochrana proti koroně
- AGS (Aussenglimmschutz) – vnější ochrana proti koroně
- EGS (Endenglimmschutz) – koncová ochrana proti koroně

První produktová řada *IGS* se používá jako ochrana proti částečným výbojům působících v dutinkách, které vzniknou pro Roebelově transpozici. Tyto dutinky se odstraňují aplikací AGS pásek, laků (identických jako pro ochranu AGS) nebo AGS tmelu [17].

Produktová řada *AGS* slouží k potlačení částečných výbojů vznikajících mezi hlavní izolací Roeblovy tyče a magnetickým obvodem točivého stroje. Aplikací ochrany AGS dojde k vyrovnání potenciálu podél celé délky cívky s potenciálem magnetického obvodu.[17][21]

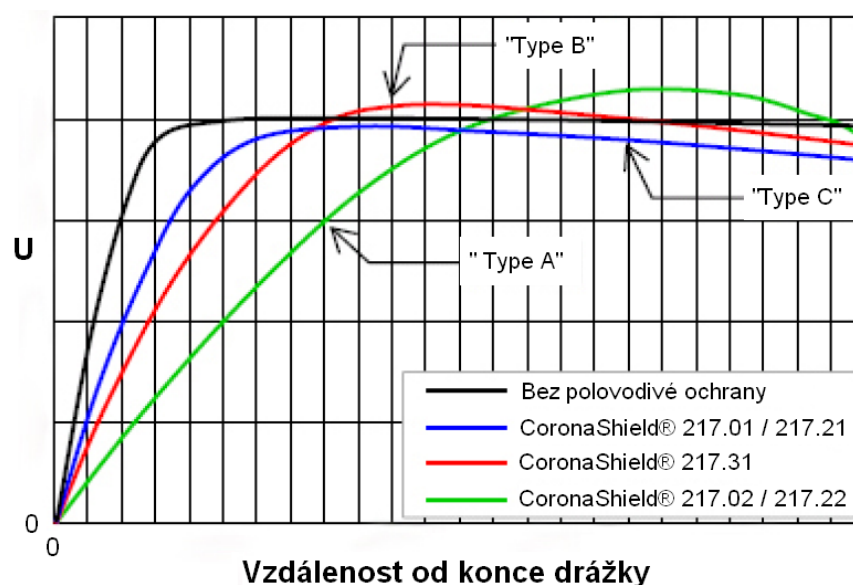
Pro řadu EGS vyrábí Von Roll Holding AG dva EGS laky P 8001 a P8002, které tvoří modifikovaná fenolová pryskyřice s plnivem částicek SiC. Pásky pro tuto produktovou řadu disponují stejným nosičem – tkaná polyesterová látka impregnována pryskyřicí s plnivem SiC částicek, použitelná opět až do teplotní třídy F (155 °C). Pásky se označují CoronaShield® 217.XX, ke XX pak udává konkrétní typ pásky.

Pásy výrobce dělí na tři typy, popisující jejich závislost na gradientu elektrického pole *Obr. 4.1*:

Typ A – silná závislost na gradientu

Typ B – střední závislost na gradientu

Typ C – slabá závislost na gradientu



*Obr. 4.1 Různé závislosti typů ochran na gradientu elektrického pole, převzato z [22]*

Číslo 0 uváděné v názvu za tečkou (např. CoronaShield® 217.01) značí přítomnost lemu po obou stranách pásy. Naopak číslo 2 na stejné pozici znamená jeho absenci (např. CoronaShield® 217.21).

Von Roll Holding AG doporučuje aplikovat všechny EGS ochrany s překryvem 2 cm přes drážkovou AGS ochranu. Jejich ideální délku poté *rovnici (4.1)* [22]:

$$l = \frac{U_z}{2}, \quad (4.1)$$

kde  $l$  ideální délka [cm];  
 $U_z$  maximální zkušební napětí [kV].

## 4.2 Krempel GmbH

Dalším výrobcem je německá firma *Krempel GmbH*, která mimo AGS a EGS ochrany vyrábí ještě izolační materiály a speciální lamináty.

Jejím jediným produktem v oblasti EGS ochran je EGS páska AKASIC 4b. Písmeno *b* zde značí stav vytvrzení pásky, tedy ve stavu B (částečně vytvrzená). Ochrana je samosmršťující v podélném směru, což zajišťuje dobrý kontakt s izolací a nevznikají tak pod EGS ochranou dutinky.

## 4.3 Isolvolta AG

Antikorónní ochrany vyrábí i rakouská firma *Isolvolta AG*. Její portfolio nabízí pouze AGS a EGS pásy, nikoli laky. EGS pásy jsou dvojího typu. První s označením EGSB® 2969 pro použití pro technologii ResinRich. Druhý typ pásky EGSB® 2709, je tvořen polyesterovou tkaninou a používá se pro technologii VPI.

## 4.4 Ostatní výrobci

Firmy, které ještě dodávají antikorónní ochrany:

*Vidyut* – indická firma nabízející 2 druhy AGS pásek (řada VID-ANTICOR) a 2 druhy EGS pásek (řada VIDSTRESS):

VID-ANTICOR 3.85 a VID-ANTICOR 5.110 – použitelné pro technologii ResinRich i VPI, teplotní třída F, plně vytvrzené, impregnované speciálním lakem s uhlíkovými a grafitovými částicemi na obou stranách

VIDSTRESS 8.300 a 10.350 – jemně tkaná polyesterová skelná tkanina impregnovaná lakem s částicemi karbidu křemíku, použitelné pro technologii ResinRich i VPI, teplotní třída F, vytvrzené ve stavu B

*Consultionsupplies* dodává 2 typy AGS pásek (3.85 a 5.11), a dva typy EGS pásek (8.3 a 5.125) použitelné pro technologii ResinRich i VPI.

Tabulka *Tab. 4.1* uvádí přehled všech AGS ochran s vybranými parametry, *Tab. 4.2* uvádí přehled všech EGS ochran.

Tab. 4.1 Přehled vybraných parametrů AGS pásek [23]

Výrobce	Značení pásky	Tloušťka [mm]	Prodloužení [%]	pevnost v tahu [N/cm]	$\rho_p$ [ $\Omega/\square$ ]
<b>VonRoll</b>	CoronaShield® C 215.51	0,1 ± 0,02	≥ 10	≥ 30	200 - 400
	CoronaShield® C 215.51-03	0,1 ± 0,02	≥ 10	≥ 30	400 - 1000
	CoronaShield® C 215.55	0,085 ± 0,02	≥ 8	≥ 30	200 - 400
	CoronaShield® C 215.63	0,17 ± 0,03	≥ 5	≥ 12	200 - 400
	CoronaShield 250 N 85	0,085 ± 0,01	-	21 ± 4	100 - 400
	CoronaShield 2500	0,125 ± 0,015	-	38 ± 5	100 - 400
	CoronaShield® 2500 NB 70	0,07 ± 0,01	≥ 5	≥ 35	1500 - 3000
<b>Chhaperia</b>	C1530-1	0,08 ± 0,03	≥ 8	≥ 25	500 - 1800
	C1530-1A	0,09 ± 0,02	≥ 8	≥ 30	200 - 800
	C1530-1B	0,09 ± 0,03	≥ 15	≥ 60	1000 - 5000
<b>Vidyut</b>	VID-ANTICOR 3.85	0,085 ± 0,002	8	> 30	40 - 400
	VID-ANTICOR 5.110	0,115 ± 0,015	15	> 50	200 - 1000
<b>Krempel</b>	06 EWR 15 AA	0,18 ± 0,036	≥ 8	≥ 20	400 - 6000
	07 EWR 05 AA	0,13 ± 0,026	≥ 9	≥ 28	400 - 5000
	10 EWR 02 AA	0,2 ± 0,04	≥ 10	≥ 12	400 - 20000
	12 EWR 01 AA	0,29 ± 0,058	≥ 4	≥ 12	400 - 6000
	03 ELR 19 AA	0,05 ± 0,01	≥ 10	≥ 12	400 - 1000
	06 ELR 14 AA	0,1 ± 0,02	≥ 15	≥ 40	1000
	06 ELR 14 CB	0,12 ± 0,024	≥ 12	≥ 60	1200
	06 ELR 14 CC	0,1 ± 0,02	≥ 15	≥ 40	150 - 1500
	03 EFR 13 AA	0,08 ± 0,016	≥ 12	≥ 30	1000 - 2000
	03 EFR 13 BA	0,08 ± 0,016	≥ 12	≥ 30	400
	07 EFR 18 AA	0,14 ± 0,028	≥ 10	≥ 60	400 - 5000
	07 EFR 18 BA	0,14 ± 0,028	≥ 14	≥ 60	400 - 5000
	04 ESR 22 AA	0,22 ± 0,044	≥ 14	≥ 20	400 - 1000
	04 ESR 22 AA-sk	0,24 ± 0,048	≥ 14	≥ 20	400 - 1000
<b>Isovolta</b>	CONTADEL® 2716	0,11 ± 0,02	-	≥ 40	200 - 600
	CONTADEL® ME 3107	0,11 ± 0,02	-	≥ 40	200 - 600
	CONTAVAL® 2017	0,3 ± 0,15	-	-	500 - 50000
	CONTADEL® 3080	0,08 ± 0,02	-	≥ 40	500 - 1500
	CONTADEL® H 0865	0,12 ± 0,02	-	≥ 40	150 - 250
	CONTADELPREG® 2564	0,18 ± 0,03	-	≥ 25	10000
	CONTAGLAS® 2912	0,07 ± 0,02	-	≥ 120	500 - 1500
<b>ConsulationSupplies</b>	3.85	0,085 ± 0,02	8	> 30	200 - 400
	5.11	0,12 ± 0,02	15	> 50	50 - 250

Tab. 4.2 Přehled vybraných parametrů EGS pásek [23]

výrobce	značení pásky	tloušťka [mm]	prodlo užení [%]	pevnost v tahu [N/cm]	$\rho_p$ [ $\Omega/\square$ ]
<b>VonRoll</b>	CoronaShield® SC 217.01	0,22 ± 0,03	≥ 12	≥ 80	-
	CoronaShield® SC 217.02	0,22 ± 0,03	≥ 12	≥ 80	-
	CoronaShield® SC 217.31	0,25 ± 0,05	≥ 10	≥ 80	-
<b>Chhaperia</b>	C1530-2	0,2 ± 0,04	≥ 10	≥ 60	$5 \cdot 10^4 - 5 \cdot 10^6$
	C1530-2A	0,2 ± 0,04	≥ 10	≥ 60	$5 \cdot 10^7 - 5 \cdot 10^9$
	C1530-2B	0,2 ± 0,05	≥ 15	≥ 60	$10^{10} - 10^{12}$
<b>Vidyut</b>	VIDSTRESS 8.300	0,2 ± 0,05	≥ 8	≥ 60	-
	VIDSTRESS 10.350	0,25 ± 0,05	≥ 8	≥ 60	-
<b>Krempel</b>	AKASIC 4b	0,2 ± 0,02	≥ 20	≥ 50	-
<b>Isovolta</b>	EGSB® 2709	0,24 ± 0,04	≥ 10	≥ 80	≥ $10^{11}$
	EGSB® 2969	0,15 ± 0,03	≥ 20	≥ 40	≥ $10^{11}$
<b>ConsulationSupplies</b>	8.3	0,2 ± 0,03	≥ 8	>100	-
	5.125	0,13 ± 0,02	≥ 8	>100	-

## 5 Vzorky statorových tyčí

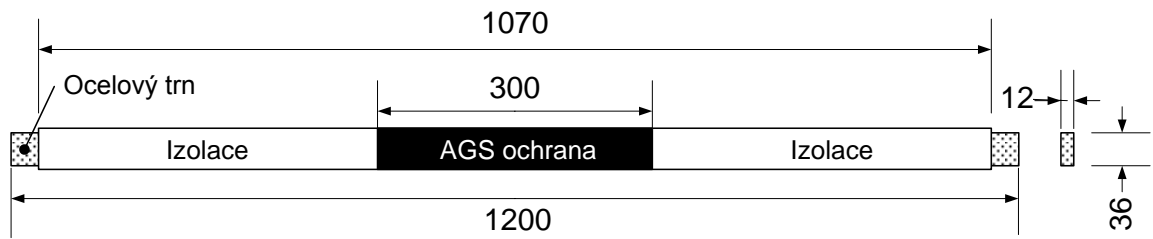
Pro výzkum EGS ochran byly vyrobeny laboratorní vzorky statorových tyčí. Rozměry vodiče jsou zmenšeny v poměru 1:3 vůči reálným rozměrům statorových tyčí používaných ve firmě Brush S.E.M. s.r.o. Izolace (Relanex 45.033 od firmy COGEBI a.s. v Táboře) byla zhotovena tak, aby vydržela krátkodobou zátěž napětí zhruba na hladině 70 kV. Po vytvrzení izolace na tyčích byly změřeny její vybrané vlastnosti, tzn. ztrátový činitel  $\tan \delta$  a relativní permitivita  $\epsilon_r$ .

### 5.1 Výroba statorových tyčí

Jednotlivé vzorky vinutí byly vyrobeny z ocelové tyče o rozměrech  $36 \times 12 \times 1200$  mm. Ocel byla mechanicky upravena brusným papírem a následně důkladně zbavena nečistot (odmaštěna). Finální rozměr (tloušťka a šířka) byl kontrolován na pěti místech délky ve vzdálenosti od jedné hrany, tj. v 280, 440, 600, 760 a 920 mm). Na takto připravenou tyč byla strojově navinuta elektroizolační páska ve dvanácti vrstvách s polovičním překrytím. Poslední, třináctá vrstva byla navinuta na styk. Na střed izolace byla navinuta AGS ochrana určená pro drážkovou část o délce 300 mm (*Obr. 5.1*). Takto připravená tyč byla opatřena separační páskou a navíc, před vložením do lisu, byla každá tyč obalena ještě jednou separační fólií, aby bylo zabráněno přilepení pojiva ke stěnám lisu. Následovalo vytvrzení izolace za působení zvýšené teploty. Nejprve byl lis předehřát na 60 °C, poté byla vložena připravená tyč, přiložena lisovací pravítka a pak byla teplota zvýšena na 110 °C. Po 15 min následovalo dotažení čelistí lisu a ohřev na vytvrzovací teplotu, tj. na 165 °C, na které byla výdrž po dobu 80 min. Poté byl lis nechán samovolně chladnout zpět na počátečních 60 °C. Doba celého vytvrzovacího procesu trvala přibližně 160 min. Lis je zobrazen na *Obr. 5.2*. Průběh vytvrzování prvního vzorku je na *Obr. 5.3*.

Po vytvrzení byla ze vzorků odebrána separační fólie a tyč byla očištěna i od separační pásky. Opět byly změřeny šířky a tloušťky tyčí v již popsáných vzdálenostech od hrany ocelové tyče tak, aby se zjistily průměrné tloušťky izolačních stěn. Výsledná zprůměrovaná tloušťka byla 3,46 mm.

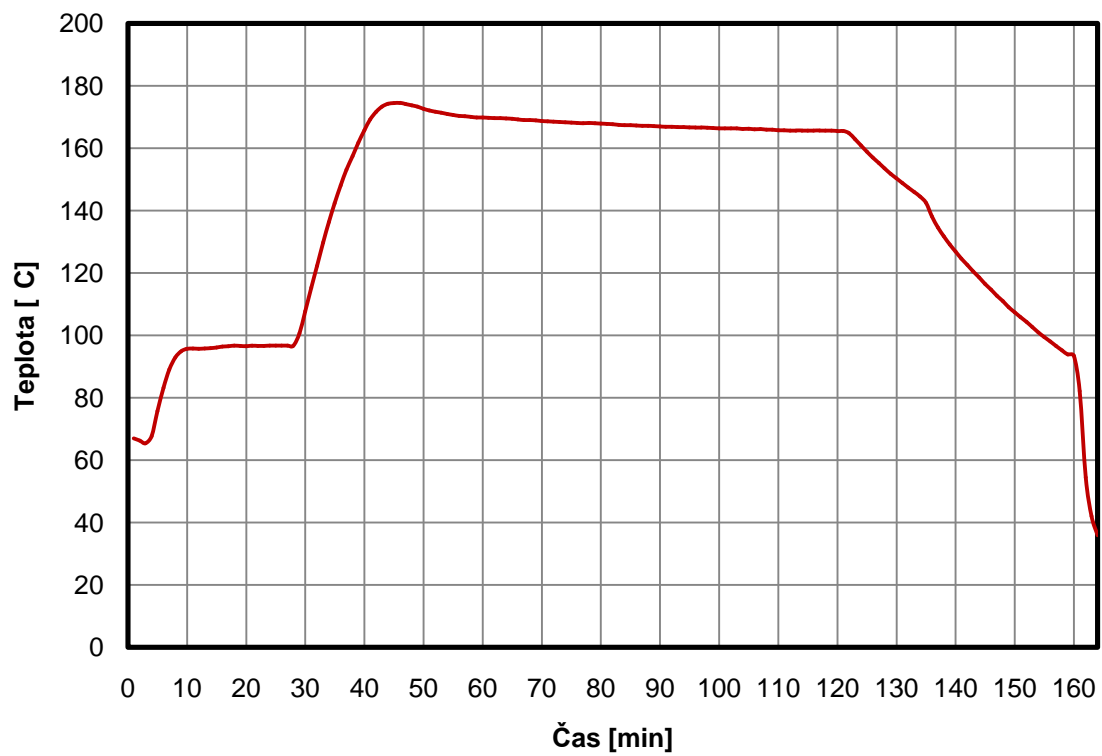




Obr. 5.1 Vzorek statorové cívky (mm)



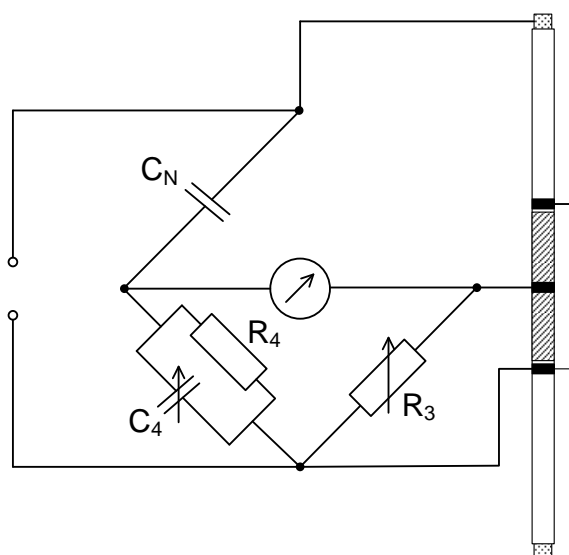
Obr. 5.2 Vytvrzovací lis



Obr. 5.3 Průběh vytvrzování vzorku statorové cívky

## 5.2 Měření $\text{tg } \delta$ a $\epsilon_r$ vzorků statorových cívek

Na zhotovených laboratorních vzorcích byly měřeny vybrané elektrické parametry ztrátový činitel a kapacita izolace, ze které byla počítána relativní permitivita. Měření bylo provedeno pomocí Scheringova můstku, jehož schéma zapojení je na *Obr. 5.4*. Dále bylo měřeno rozložení napětí na tyči proto, aby se zjistilo, zda zvolená EGS ochrana plní svou funkci a umožní zabránit skokové změně napětí na výstupu vinutí z drážky. Na vzorek statorového vinutí byly umístěny dvě stínící elektrody ve vzdálenosti 3,5 mm (tloušťka izolační stěny vzorku) od konců AGS pásky. Uprostřed AGS pásky byla nalepena snímatelná měděná elektroda. Ocelová tyč byla poté připojena ke zdroji střídavého napětí s frekvencí 50 Hz. Napětí bylo zvyšováno krokově po 3 kV v rozsahu od 3 do 18 kV. Získané výsledky měření jsou uvedeny na *Obr. 5.5*. Hodnoty  $\text{tg } \delta$  a kapacity byly měřeny na všech 25 vyrobených vzorcích. V grafu jsou znázorněny průměrné hodnoty všech vykonaných měření. Z naměřené kapacity byla poté vypočtena relativní permitivita izolace podle *rovnice (5.1)*.

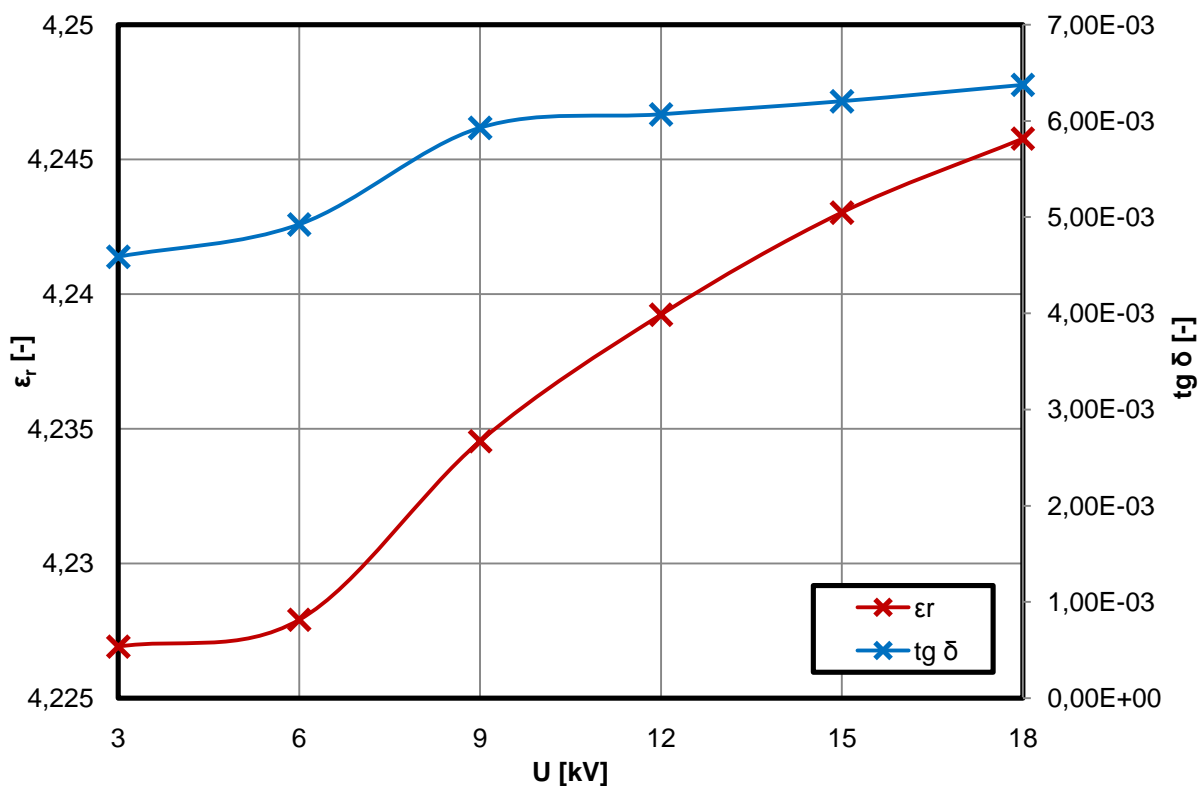


*Obr. 5.4* Uspořádání vzorku při měření

$$\epsilon_r = \frac{C \cdot d}{\epsilon_0 \cdot S}, \quad (5.1)$$

kde	$\epsilon_r$	relativní permitivita [-];
	$\epsilon_0$	permitivita vakua [ $\text{F} \cdot \text{m}^{-1}$ ];
	C	změřená kapacita vzorku [F];
	d	tloušťka izolace [m];
	S	plocha elektrody [ $\text{m}^2$ ].

Plocha  $S$  byla brána jako plocha celé AGS ochrany, která byla ovinuta ve středu statorové tyče (Obr. 5.1), tzn. délka 0,300 m násobena obvodem cívky 0,1238 m.



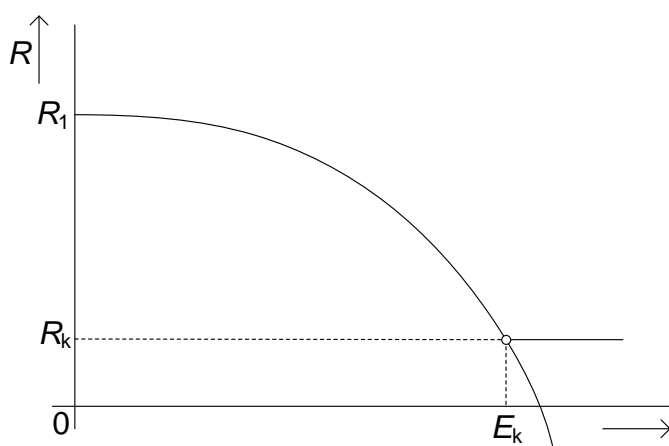
Obr. 5.5 Průběh ztrátového činitele a relativní permitivity na el. napětí

Z výsledků měření všech tyčí bylo patrné, že izolace splňuje stanovené požadavky. Při výzkumu EGS ochran může docházet k několikanásobně vyššímu elektrickému namáhání, než je hodnota jmenovitého napětí. Tím může dojít ke zkrácení životnosti izolace.

## 6 Charakter EGS ochran

Podle článku [12] lze metody pro zajištění rozložení potenciálu rozdělit na dvě metody – kapacitní a odporovou. V této publikaci se však budeme věnovat pouze odporové metodě, která je v točivých strojích výhradně používána. Princip spočívá v aplikaci speciálních odporových materiálů s příslušnou voltampérovou charakteristikou [11]. Vlastnosti těchto ochran jsou podrobně rozebrány v následujícím textu.

Princip funkce EGS materiálu spočívá v působení silného elektrického pole, které přivádí částice do takového vodivého stavu, který formuje a vytváří vyvážené elektrické pole. Odpor se tedy vyznačuje nelineární vodivostí závislou na elektrickém poli a platí tak  $\sigma(E)$ . Vodivost roste z nízké hodnoty elektrického pole  $\sigma(0)$  do vysoké. Tato závislost může být také zobrazena jako závislost odporu na elektrickém poli (Obr. 6.1). [12]



Obr. 6.1 Aproximovaný průběh nelineární charakteristiky EGS ochrany, převzato z [24]

Na EGS ochrany jsou kladeny následující požadavky:

- Koeficient nelinearity  $\beta$  udává strmost nárůstu vodivosti v závislosti na intenzitě elektrického pole a u prakticky používaných materiálů se pohybuje v rozmezí  $\beta = 10 - 40$  (podle použití EGS ochrany) a udává se rovnicí (6.1)[12]:

$$\beta = 1 + \frac{d \ln(\sigma)}{d \ln(E)}, \quad (6.1)$$

kde  $\beta$  koeficient nelinearity [-];  
 $\sigma$  elektrické vodivosti [ $S \cdot m^{-1}$ ];  
 $E$  hodnota intenzity elektrického pole [ $V \cdot m^{-1}$ ].

- Z hodnoty koeficientu nelinearity pak vyplývají také podmínky pro odpovídající hodnoty rezistivity materiálu v závislosti na působícím elektrickém poli. Ve slabých elektrických polích ( $E < 1 \text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$ ) musí být s ohledem na vznikající ztráty konduktivita materiálu  $\sigma < 3\cdot 10^{-10} \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$  (vnitřní rezistivita  $> 10^{10}\Omega\cdot\text{m}$ ). Pro intenzitu  $2 \text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$  pak při frekvenci  $f = 50 \text{ Hz}$  a relativní permitivitě materiálu  $\epsilon = 10$  by konduktivita materiálu měla splňovat podmínku, že  $\sigma \gg \epsilon\cdot\omega$ , z čehož  $\sigma \gg 3\cdot 10^{-8} \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$  (ideálně  $10^{-7} - 10^{-6} \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$ ). [12]
- Dalším kritériálním parametrem, vymežujícím vlastnosti ochranného povlaku je velikost dovolených tepelných ztrát v izolaci, které jsou determinovány procházejícím elektrickým proudem. Podle reálných měření by velikost proudů tekoucích ochrannou vrstvou na výstupu z drážky měla být menší než cca  $50 \mu\text{A}$  a vzniklé Jouleovské ztráty by neměly překročit zhruba  $0,2 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$  plochy izolace. [12]

Pomocí koeficientu nelinearity lze tedy určit okamžitou hodnotu vodivosti při dané hodnotě intenzity elektrického pole podle rovnice (6.2) [25]:

$$\sigma = \sigma_0 \left[ 1 + \left( \frac{E}{E_b} \right)^\beta \right], \quad (6.2)$$

kde	$\beta$	koeficient nelinearity [-];
	$\sigma$	elektrické vodivost [ $\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$ ];
	$\sigma_0$	elektrické vodivost při nízké hodnotě intenzity elektrického pole (před strmým nárůstem vodivost) [ $\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$ ];
	$E$	hodnota intenzity elektrického pole [ $\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$ ];
	$E_b$	hodnota intenzity elektrického pole, při které dochází ke strmému nárůstu elektrické vodivosti [ $\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$ ].

## 6.1 Plniva pro EGS ochrany

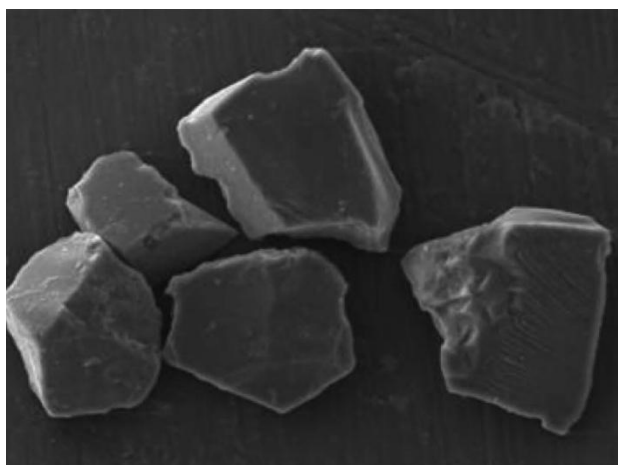
Jako EGS ochrany pro vysokonapěťové aplikace (točivé stroje, průchodky, kabely) se dříve využívalo buď nátěrů lihovým roztokem pryskyřice a koloidního grafitu nebo navinutím asbestové grafitové tkanice nebo i postřikem kovovým popraškem, např. hliníkem, který byl vodivě spojen s plechy [3]. V současné době jsou jako plnivo nejvíce rozšířené částičky karbidu křemíku, avšak nedávno se začala testovat také plniva založená na mikrovaristorech, které jsou dopované oxidem zinečnatým (ZnO). [12]

### 6.1.1 Materiály na bázi SiC částic

Karbid křemíku se vyskytuje v přírodě velice vzácně jako minerál moissanite, avšak vzhledem k jeho vzácnosti se od roku 1893 začal připravovat synteticky. Nejjednodušší varianta jeho přípravy je sloučení silikonového prášku a uhlíku v Achesonově elektrické odporové peci při vysoké teplotě, která se pohybuje mezi 1 600 – 2 500 °C. Jemné částice SiO<sub>2</sub> materiálu zahřátím převádí na SiC [26]. Materiál vyrobený Achesonovou metodou se liší svojí čistotou v závislosti na vzdálenosti od zdroje tepla. Bezbarvé, světležluté nebo zelené krystaly vykazují vysokou čistotu na rozdíl od modrých nebo černých krystalů, jejichž čistota je menší. Nečistoty jsou způsobeny částicemi dusíku nebo alumina a ovlivňují elektrickou vodivost SiC. [27]

Čistý karbid křemíku lze připravit tzv. Lelyho procesem. Uhlíkový kelímek se naplní SiC práškem a na jeho víku je přichycen substrát. Po zahřátí kelímku na hodnotu přibližně 2 400 °C začne prášek znatelně sublimovat. Teplota se udržuje na takové hodnotě, aby měl prášek vyšší teplotu než substrát na vrchu. Prášek SiC posléze sublimuje a kondenzuje na chladnější substrát na horní části kelímku. Pro rychlost růstu krystalu je důležitý teplotní rozdíl, jelikož je exponenciálně úměrný rostoucí teplotě. Tlak v peci je udržován pod 50 mbar, protože nízký tlak zajišťuje optimální přenos materiálu na substrát. Poměr mezi hlavními složkami při sublimaci (Si, Si<sub>2</sub>C a SiC<sub>2</sub>) závisí na teplotě. [28]

Karbid křemíku existuje v přibližně 250 krystalických formách a nachází se v několika stupních čistoty, od nízké 90,0% až do vysoké čistoty 99,9995%, která se používá například na výrobu polovodičových destiček. Jeho částičky jsou nepravidelné s ostrými hranami (*Obr. 6.2*). SiC je extrémně tvrdý (na Mohsově stupnici má hodnotu 9,5). Vyznačuje se vysokou tepelnou vodivostí a nízkou teplotní roztažností. Je odolný vůči většině kyselin a zásaditým roztokům. [29]

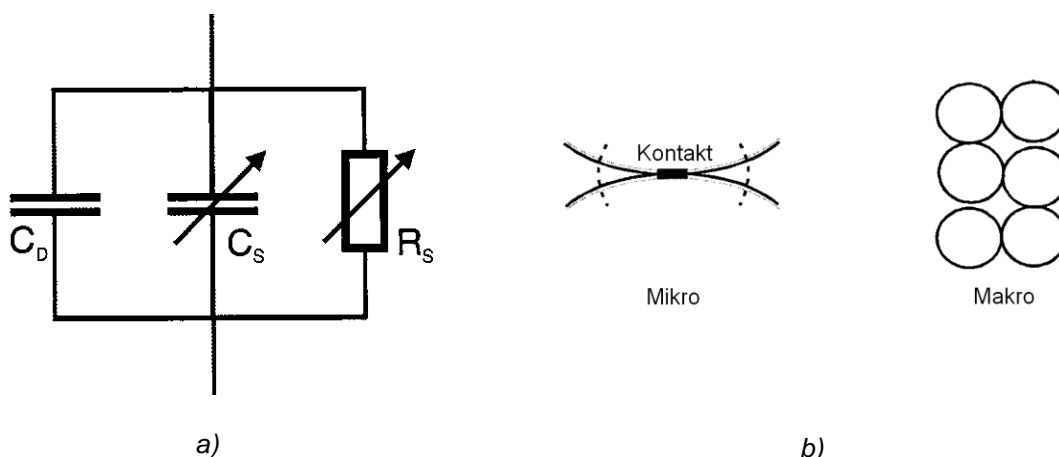


*Obr. 6.2 Částičky karbidu křemíku, převzato z [82]*

SiC prášek je tvořen z SiC zrn, která jsou vždy obklopena určitou látkou. Dielektrické vlastnosti tohoto uspořádání jsou určeny kontaktními zónami na mikroskopické úrovni a vodivými cestami, které jsou tvořené jinými kontaktními zónami, na makroskopické úrovni. Pokud se tedy určují elektrické vlastnosti, oba tyto pohledy musí být zahrnuty. Chování ve stejnosměrném elektrickém poli je určeno pouze odporem na kontaktech. Pokud se jedná o napětí střídavé, celkovou charakteristiku určuje odpor, kapacita, ale i okolní prostředí, ve kterém je prášek umístěn. [30]

Pokud se za okolní prostředí SiC prášku bude považovat pouze vzduch, lze nakreslit náhradní uspořádání (*Obr. 6.3 a*), kde  $C_D$  je frekvenčně nezávislá, bezztrátová kapacita reprezentující vzduch, spojená paralelně pro každý kontakt. Ztrátová část kontaktu je reprezentována nelineární odporem  $R_S$ . Kapacitní část představuje nelineární a frekvenčně nezávislá kapacita  $C_S$ . Vliv kapacity přechodu závisí částečně na přiloženém napětí, částečně na efektivní kontaktní ploše, ale také na úrovni legování SiC zrn, které se legují buď dusíkem (poskytující donory typu N) nebo hliníkem, popřípadě borem (poskytující akceptory typu P). Z těchto důvodů se proto kapacita může měnit. [30] [31]

Náhradní schéma v *Obr. 6.3 a*) reprezentuje jednu kontaktní oblast. Každá kontaktní oblast je různá, jak naznačuje *Obr. 6.3 b*). Největší vliv na deviaci hodnot  $R_S$  a  $C_S$  má změna efektivní kontaktní plochy. Některá zrna se ani nemusejí dotýkat. [30]



*Obr. 6.3 a) Náhradní obvod mezizrnkových kontaktů b) Mezizrnkové kontakty na mikro a makroskopické úrovni, převzato z [30]*

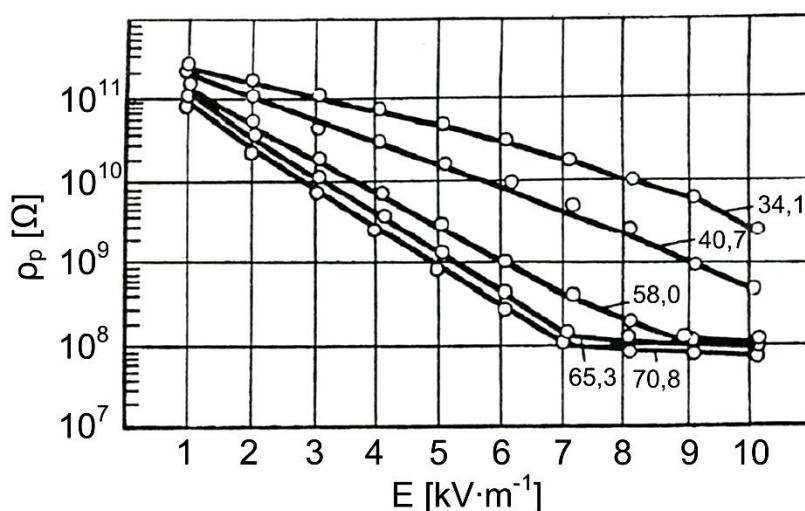
Nelineární voltampérová charakteristika karbidu křemíku je důležitá pro vlastnosti EGS ochran. Úroveň rezistivity SiC se pohybuje v řádech  $10^2 - 10^6 \Omega/\text{cm}$ .

Permitivita  $\epsilon_r$  karbidu křemíku je obvykle brána jako konstantní nebo dokonce jako bezvýznamná hodnota v porovnání s vodivostí [30]. Žádný zdroj neuvádí, že permitivita prokazuje výraznou nelinearitu, ale některé výzkumy SiC částic poukazují na téměř

zdvojnásobení hodnoty  $\varepsilon_r$  při zvýšení hodnot elektrického pole od 0 do 1,5 kV/mm, což může vést k jinému rozložení elektrického pole, tzn. jinému namáhání izolace.

Článek [32] uvádí studii dvou různých typů SiC prášků: zelený SiC označený jako KZM a černý označený jako KChM. Závislost odporu složky na intenzitě elektrického pole byla studována v rozsahu od 1kV/cm až do 10kV/cm. Výsledky jsou následující:

1. Zmenšením rozměrů hlavních částecek SiC se zvyšuje odpor a zároveň snižuje koeficient nelinearity  $\beta$ .
2. Existuje jistá hodnota koncentrace SiC prášku ve složce, nad kterou se již hodnota odporu nemění (Obr. 6.4). Pokud je koncentrace SiC vyšší než její limit, složka se stává porézní a hodnota odporu může poklesnout navlhnutím.
3. Každý typ prášku a jeho koncentrace v kompozitu určuje jistou kritickou hodnotu elektrického namáhání, nad kterou se zastavuje pokles odporu. Koeficient nelinearity má jasné maximum. [30]



Obr. 6.4 Vliv koncentrace prášku na rezistivitu, převzato z [30]

### 6.1.2 Materiály na bázi mikrovaristorů ZnO

Mikrovaristory jsou malé sintrované částičky s příměsí oxidu zinečnatého, které vykazují vysoké nelineární elektrické vlastnosti podobné keramickým varistorům. Částice jsou produkovány sušením rozprašované kašovité hmoty, která obsahuje ZnO a jejich příměsí. Částice jsou poté sintrované při teplotě nad 1000 °C. Sintrovací proces, podmínky při spékání, sintrovací čas a teplota, určuje strukturu hranic zrn, které stanovují nelineární elektrické



vlastnosti. Každé sintrované zrno se chová jako varistor, tzn. proud jím tekoucí závisí na hodnotě elektrického pole. [33]

Technologie na bázi mikrovaristorů s příměsí ZnO má výrazně rozdílné vlastnosti než např. technologie založená na částechkách SiC.

1. Vyznačují se nižšími ztrátami v nepřetržitém provozu nebo při zvýšených hladinách zkušebních napětí.
2. Vyznačují se ostrou změnou spínání a vysokou nelinearitou překračující několik dekád proudové hustoty (nebo rezistivity), umožňující efektivní omezení impulzů elektrického pole.
3. Hodnota jejich relativní permitivity se pohybuje mezi 10 až 15.

Tato technologie se z hlediska Joulova tepla vznikajícího při jmenovitém napětí jeví lepší, než stávající, založená na SiC částicích. Joulovo teplo materiálů na bázi mikrovaristorů ZnO je nižší než u ochran založených na SiC [12]. Mohou se tedy použít ochrany s vyšší vodivostí, která napomáhá k přiblížení se pseudolineárnímu rozložení napětí podél EGS ochrany. Otevírají se tím tak nové možnosti pro řízení elektrického pole ve VN (částečně i VVN) aplikacích.

## 6.2 Vlastnosti EGS ochran

V následujících kapitolách budou popsány vlastnosti EGS ochran, tzn. jejich V-A charakteristiky a porovnání chování ve střídavém a stejnosměrném poli. Dále bude zjištěn vliv geometrického uspořádání na měření V-A charakteristik EGS ochran.

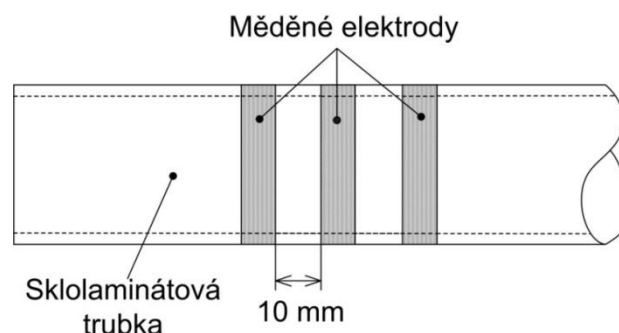
### 6.2.1 V-A charakteristiky EGS ochran

V-A charakteristiky jsou důležitým parametrem EGS ochran. Jejich průběh je nelineární (*Obr. 3.6*), tzn., že při zvyšující se intenzitě elektrického pole se snižuje hodnota čtvercového odporu. V této kapitole je popsáno měření V-A charakteristik EGS ochran tak, jak bylo prováděno při experimentálním měření.

Vzorky (*Tab. 6.1*) byly naneseny na trubky ze sklotextitu (imitace izolace vinutí).

1. *EGS pásy* byly navinuty s polovičním překrytím a poté vytvrzeny po dobu 2 hodin při 120 °C.

2. EGS laky se nejdříve důkladně promíchaly, poté se na sklotextitovou trubku nanesly čtyři vrstvy štětcem. Mezi každým nátěrem byla 1 hodinová pauza, aby lak uschl. Po nánosu všech vrstev se lak nechal doschnout 24 hodin.



Obr. 6.5 Vzorek pro měření V-A charakteristiky

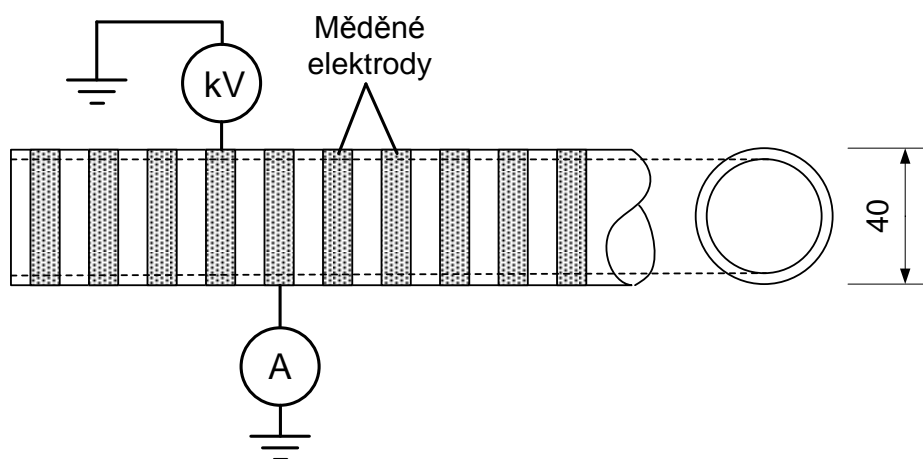
Pro měření V-A charakteristik ochran byly vybrány všechny EGS ochrany od výrobce Von Roll Holding AG, tzn. EGS pásy řady CoronaShiled® typy 217.01; 217.02; 217.03; 217.21; 217.22 a 217.31. Z laků pak řada CoronaShiled® typy P8001 a P8002. K dispozici byla také páska AKASIC 4b firmy Krempel GmbH, která již však byla v předvytvrzeném stavu skladována 2 roky při 7 °C. Podrobnější popis použitých vzorků je uveden v kapitole: „Současná nabídka AGS a EGS ochran“.

Tab. 6.1 Seznam typů EGS ochran měřených na sklotextitové trubce

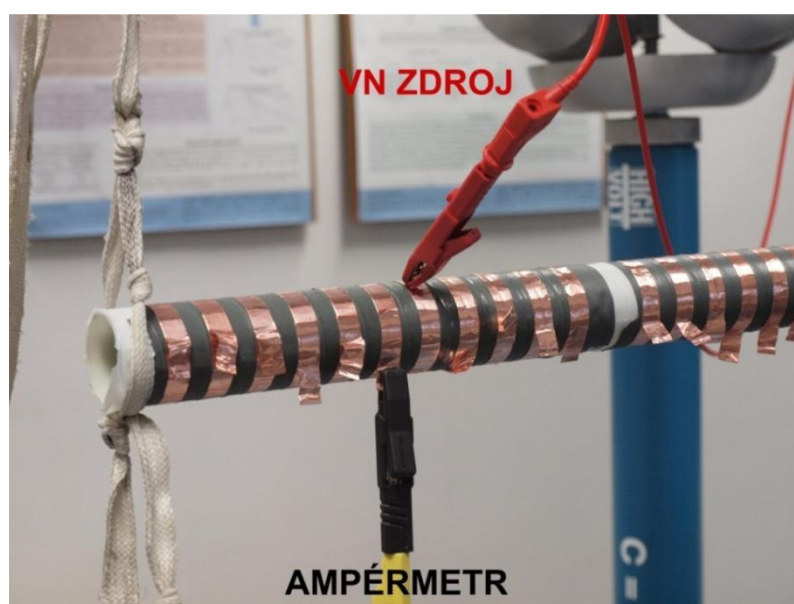
Značení pásy		Délka elektrody [m]	Aktivní průřez vrstvou [m <sup>2</sup> ]	Závislost rezistivity na gradientu elektrického pole
CoronaShiled® 217.01	páska	0,1274	$6,06 \cdot 10^{-5}$	Typ C
CoronaShiled® 217.21	páska		$6,23 \cdot 10^{-5}$	Typ C
CoronaShiled® 217.02	páska		$5,28 \cdot 10^{-5}$	Typ A
CoronaShiled® 217.22	páska		$5,45 \cdot 10^{-5}$	Typ A
CoronaShiled® 217.03	páska		$6,10 \cdot 10^{-5}$	Typ B
CoronaShiled® 217.31	páska		-	Typ B
CoronaShiled® P8001	lak		$5,13 \cdot 10^{-5}$	Neuvedeno <sup>1)</sup>
CoronaShiled® P8002	lak		$4,75 \cdot 10^{-5}$	Neuvedeno <sup>1)</sup>
AKASIC 4b	páska		$5,22 \cdot 10^{-5}$	Neuvedeno <sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> výrobce tyto údaje neposkytuje

Pro měření V-A charakteristik se na povrch EGS ochran umístily měděné samolepící elektrody o šířce 10 mm ve vzdálenosti 10 mm od sebe. Takto bylo nalepeno 11 měděných pásek a vzniklo tak 10 měřících políček (Obr. 6.7). V každém z nich se poté měřila V-A charakteristika podle zapojení uvedeného v Obr. 6.6. Na jednu elektrodu se připojil zdroj napětí, ze sousední elektrody se odčítal protékající proud přes EGS ochranu. Na počátku měření bylo připojeno maximální možné napětí 4,5 kV a vyčkalo se do ustálení protékajícího proudu. Kvůli zpřesnění měření byl určen jednotný čas 3 minuty mezi připojením napětí a následnému odečtení první hodnoty protékajícího proudu. Po uplynutí této doby se pak napětí po kroku 0,25 kV snižovalo až do nejnižší hodnoty 0,25 kV. V-A charakteristiky byly měřeny střídavým i stejnosměrným napětím.

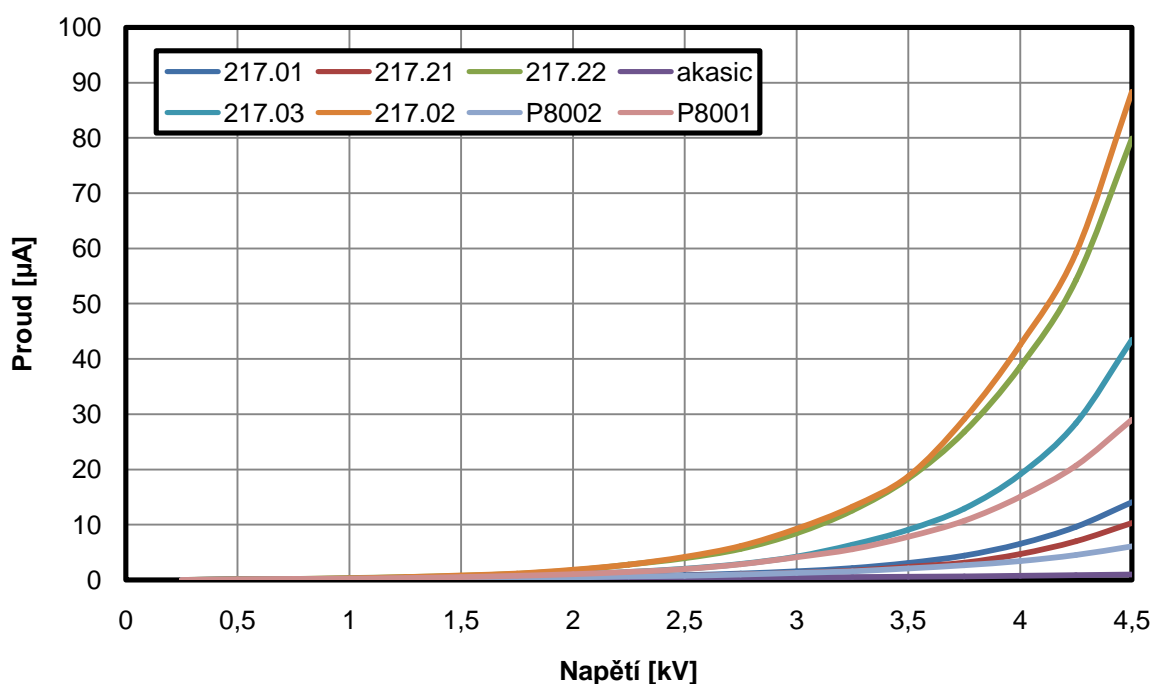


Obr. 6.6 Zapojení měření V-A charakteristik (mm)

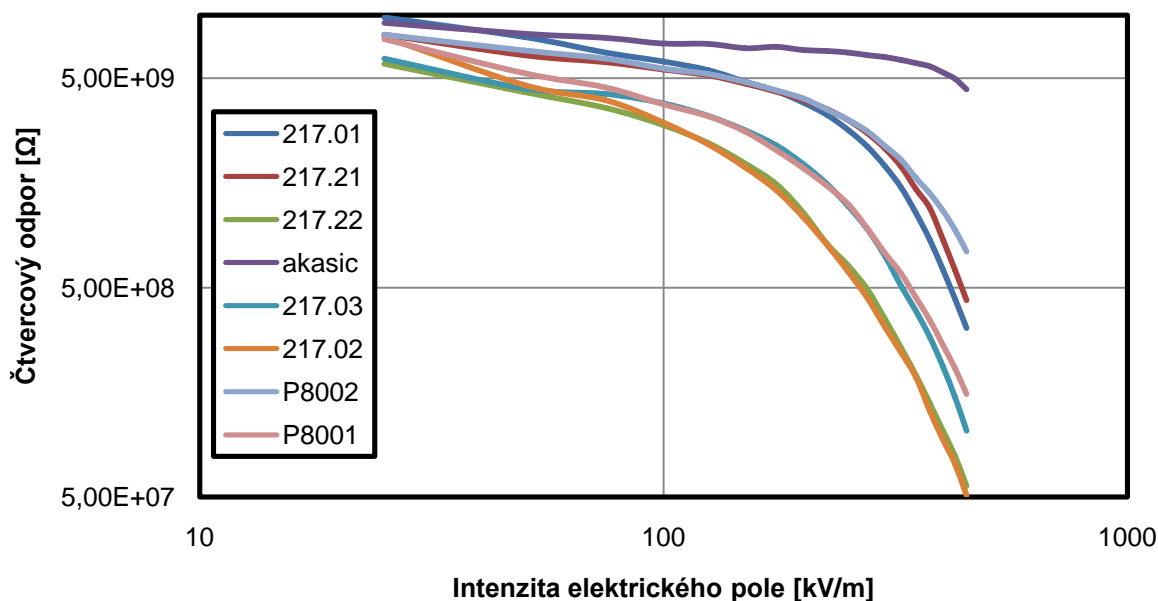


Obr. 6.7 Měření V-A charakteristik

Naměřené hodnoty se mohou zobrazit v několika závislostech. V případě, kdy jsou vzorky stejně geometricky uspořádané, stačí hodnoty vynést bez dalších úprav jako závislost proudu na napětí. Pro lepší srovnání lze hodnoty proudu vydělit obvodem vzorku, v tomto případě 12,8 cm a získat tak proud tekoucí jedním  $\text{cm}^2$  (Obr. 6.8). Z těchto hodnot lze následně dostat čtvercový odpor podle rovnice  $R=U/I$ . Tento průběh je zobrazen na Obr. 6.9 s logaritmickými osami.



Obr. 6.8 V-A charakteristika EGS ochran



Obr. 6.9 Závislost čtvercového odporu na intenzitě elektrického pole

## 6.2.2 Rozdílnost měření V-A charakteristik střídavým a stejnosměrným elektrickým napětím

Při měření V-A charakteristik se může použít jak střídavé tak stejnosměrné napětí. Stejnosměrná metoda měření V-A charakteristik je vhodnější z hlediska přesnosti, jelikož se měří velmi malé proudy v řádech  $10^{-6}$ A. Vzhledem k faktu, že u stejnosměrného pole je po překročení hodnoty  $E_b$  nárůst vodivosti strmější než ve střídavém poli, lze pomocí stejnosměrného pole snadněji a přesněji dopočítat koeficient nelinearity  $\beta$ . Měření stejnosměrným napětím také není zatížené chybami, které způsobují kapacitní vazby. Měření střídavým napětím může naopak vést k větším zkreslením proudových průběhů v důsledku silné nelinearity EGS ochran a následně i k možným chybám při vyhodnocování střídavého proudu. [34]

Většina publikací zkoumající vlastnosti materiálů EGS ochran, např. [25], [30], [34], [35], měří V-A charakteristiku pomocí stejnosměrného pole vzhledem k vyšší přesnosti při měření. Nicméně v praxi se používá pouze střídavé napětí, proto bylo vhodné věnovat kapitulu srovnání V-A charakteristik měřených ve střídavém a stejnosměrném elektrickém poli.

Naměřené V-A charakteristiky byly přepočítány na závislost rezistivity  $\rho$  [ $\Omega \cdot m$ ] na intenzitě elektrického pole  $E$  [kV/m]. Měrná rezistivita byla zvolena z důvodu přesnějšího srovnávání EGS ochran vyloučením tloušťky nánosu pásky nebo laku.

Nejdříve se z hodnot  $U$  a  $I$  dopočítal odpor  $R$  pomocí rovnice (6.3):

$$R = \frac{U}{I}, \quad (6.3)$$

kde  $R$  odpor vzorku [ $\Omega$ ];  
 $U$  napětí připojené k elektrodě [V];  
 $I$  proud protékající vzorkem [A].

Poté byl dopočítáný průřez vzorku, jímž tekla proud, podle rovnice (6.4):

$$S = \pi \cdot (r_2^2 - r_1^2), \quad (6.4)$$

kde  $S$  plocha, přes níž tekla proud [ $m^2$ ];  
 $r_1$  poloměr sklotextitové trubky bez vrstvy laku [m];  
 $r_2$  poloměr sklotextitové trubky s vrstvou laku [m].

Následně se dopočítala měrná rezistivita  $\rho$  podle rovnice (6.5):

$$\rho = \frac{R \cdot S}{l}, \quad (6.5)$$

kde	$\rho$	měrná rezistivita [ $\Omega \cdot m$ ];
	$R$	odpor získaný z rovnice [ $\Omega$ ];
	$S$	plocha získaná z rovnice [ $m^2$ ];
	$l$	vzdálenost elektrod, v tomto případě 0,01 m [m].

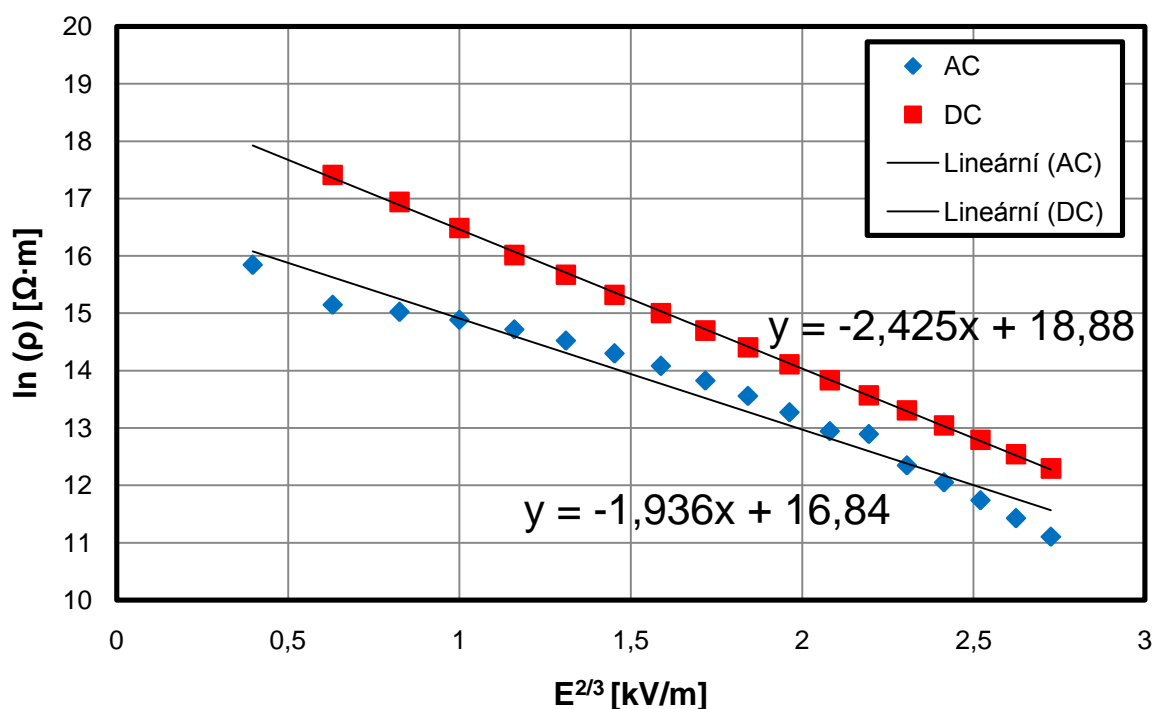
Tyto průběhy byly poté podle metodiky uvedené v článku [34] převedeny na hodnoty  $K$  a  $n$  uvedené v rovnici (6.6). Pro srovnání V-A charakteristiky bylo vybráno jen 5 typů EGS ochran, jelikož podle výrobce Von Roll, se typ 217.01 výrazně neliší od typu 217.21 a typ 217.02 od typu 217.22, viz kapitola 4.1.

$$\rho = K \cdot e^{(n \cdot E^{2/3})}, \quad (6.6)$$

kde	$\rho$	měrná rezistivita [ $\Omega \cdot m$ ];
	$E$	intenzita elektrického pole [ $kV \cdot cm^{-1}$ ];
	$n$	konstanta typická pro daný materiál [-];
	$K$	konstanta typická pro daný materiál [-].

Hodnoty vnitřní rezistivity byly zlogaritmovány přirozeným logaritmem a vyneseny do grafu v závislosti na intenzitě elektrického pole mocněnou na 2/3. Takto vynesené průběhy byly lineárně proloženy. Z rovnice přímky (6.7) byly následně odečteny hodnoty  $n$  (derivovaná hodnota  $nx$ ) a  $K$  (Obr. 6.10).

$$y = nx + K \quad (6.7)$$



Obr. 6.10 Proložení lineární spojnicí trendu (typ 217.03 - střídavé a stejnosměrné napětí)

Srovnání hodnot  $n$  a  $K$  je uvedeno v *Tab. 6.2*.

*Tab. 6.2 Srovnání hodnot  $n$  a  $K$  EGS ochran*

Typ EGS ochrany	AC		DC	
	$n$	$K$	$n$	$K$
<b>217.01</b>	1,1286	16,028	1,8314	18,623
<b>217.02</b>	2,4055	16,455	2,8581	18,099
<b>217.03</b>	1,9361	16,85	2,2425	18,882
<b>P8001</b>	1,7628	16,337	1,9974	17,711
<b>P8002</b>	0,9819	15,892	1,8973	18,896

Z hodnot je patrné, že při měření stejnosměrným napětím jsou konstanty  $K$  nižší oproti měření střídavým napětím. Tento jev je způsoben větší reálnou složkou, jelikož při měření střídavým napětím musí být uvažovány kapacitní vazby a tudíž kapacitní proud. Hodnota  $n$  ukazuje na strmost nárůstu proudu při zvyšování napětí.

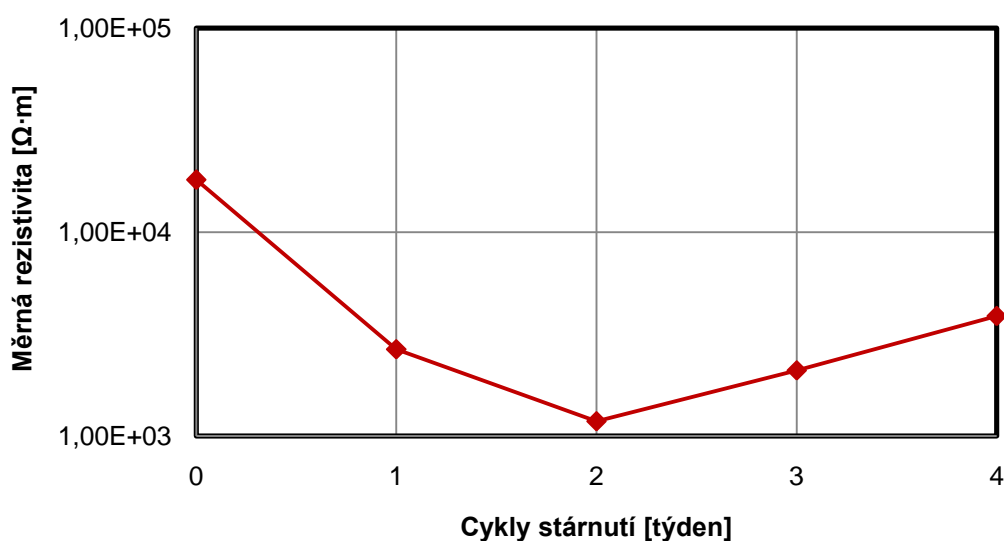
### 6.2.3 Stárnutí EGS ochran a jejich V-A charakteristiky

V průběhu provozu je stroj vystaven kromě mechanického a elektrického namáhání, také namáhání tepelnému. Výše zmíněné EGS ochrany patří do teplotní třídy F, tzn. do 155 °C [36]. Norma[37] uvádí pro stárnutí materiálů třídy F teplotu 180 °C po dobu 7 dní, jakožto jeden cyklus, celkově pak až 28 dní, tedy 4 týdny. Všechna měření V-A charakteristik poté probíhala podle normy.[38]

U všech typů EGS pásek (tzn. 217.01, 217.02 a 217.03) došlo k jejich destrukci, kdy u hodnot  $n$  (směrnic) došlo po prvním cyklu k prudkému poklesu, který značil ztrátu nelinearity. U laků (P8001 a P8002) došlo následkem teplotního stárnutí ke zvýšení nelinearity, tzn. hodnota  $n$  se zvýšila. Toto lze přičíst vyschnutí laku. Měření všech tří pásek se po 1. cyklu stárnutí již neprováděla vzhledem k jejich zničení. V *Obr. 6.11* je uveden průběh hodnoty měrné rezistivity laku P8001 závislé na cyklech stárnutí a měřené vždy při napětí 4,5 kV. V *Tab. 6.3* jsou uvedeny hodnoty  $n$  a  $K$ .

Tab. 6.3 Hodnoty  $n$  a  $K$  laků po jejich expozici

Stárnutí při 180 °C										
	Nestárnuté		1. cyklus		2. cyklus		3. cyklus		4. cyklus	
	n	K	n	K	n	K	n	K	n	K
<b>P8001</b>	1,762	16,5	2,501	15,67	3,239	16,04	3,136	16,19	3,096	16,55
<b>P8002</b>	0,981	16,13	1,237	16,38	1,285	16,5	1,391	16,47	1,1	16,24
<b>217.01</b>	1,128	15,79	0,060	15,74	-	-	-	-	-	-
<b>217.02</b>	2,405	16,59	0,063	15,52	-	-	-	-	-	-
<b>217.03</b>	1,936	16,76	0,062	15,72	-	-	-	-	-	-



Obr. 6.11 Hodnota měrné rezistivity v průběhu stárnutí – lak P8001

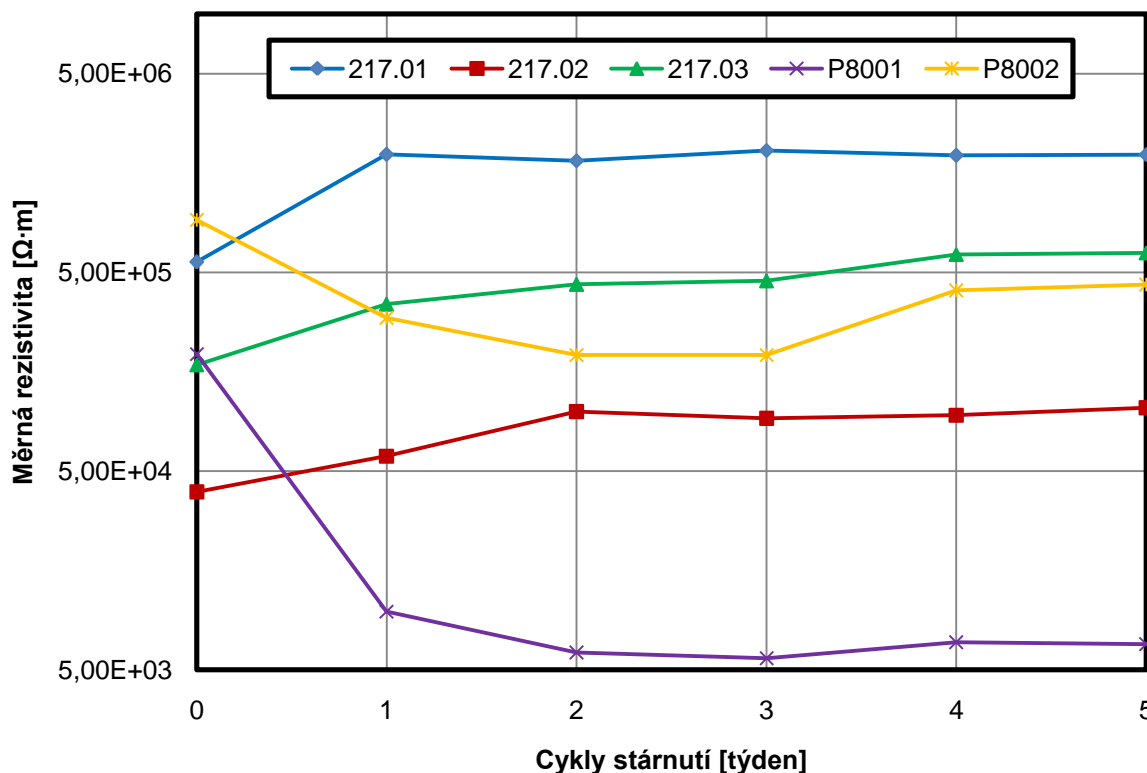
Jelikož stárnutím vzorků při teplotě 180 °C došlo k jejich destrukci již po prvním cyklu, druhá sada vzorků byla stárnuta při teplotě 155 °C, tzn. při maximální hodnotě pro tepelnou třídu F. Hodnoty  $n$  a  $K$  jsou uvedeny v Tab. 6.4.

Tab. 6.4 Hodnoty  $n$  a  $K$  po expozici vzorků při 155 °C

	Nestárnuté		1. cyklus		2. cyklus		3. cyklus		4. cyklus		5. cyklus	
	n	K	n	K	n	K	n	K	n	K	n	K
<b>P8001</b>	1,762	16,5	2,538	15,15	2,75	15,07	2,831	15,27	2,888	15,48	2,895	15,47
<b>P8002</b>	0,981	16,13	1,503	16,31	1,731	16,41	1,667	16,29	1,262	16,05	1,259	16,11
<b>217.01</b>	1,128	16,02	0,651	16,05	0,686	16,08	0,613	16	0,635	16	0,635	16,01
<b>217.02</b>	2,405	16,59	2,523	17,14	2,438	17,11	2,354	17,18	2,293	17,09	2,302	17,17
<b>217.03</b>	1,936	16,84	1,7	16,93	1,561	16,87	1,539	16,83	1,333	16,59	1,326	16,58

V grafu (Obr. 6.12) jsou vyneseny závislosti měrné rezistivity závislé na cyklech stárnutí a měřené vždy při napětí 3,75 kV.





Obr. 6.12 Hodnoty měrných rezistivit EGS ochran v průběhu stárnutí

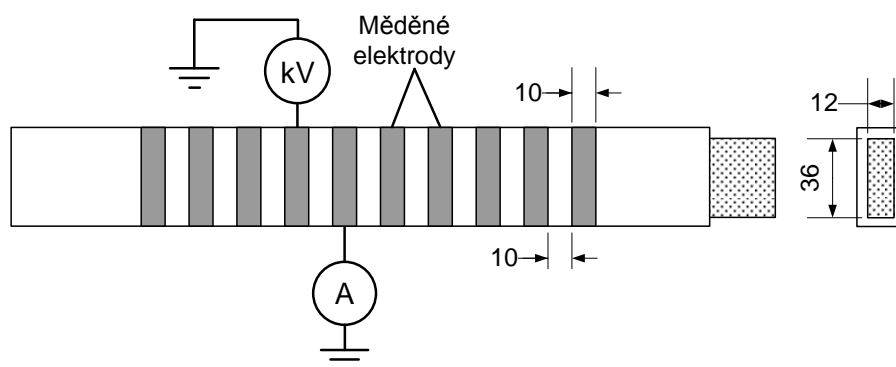
Ze získaných hodnot je patrné, že u obou laků se po prvním cyklu zvýšila vodivost i nelinearita. Po čtvrtém a pátém cyklu stárnutí však vodivost klesla. U pásek došlo naopak ke snížení nelinearity a vodivosti. Nejvíce degradována byla páska 217.01, kdy se její hodnoty  $n$  a  $K$  ustálily po prvním cyklu. Pozvolnější stárnutí vykazovaly pásy 217.02 a 217.03.

#### 6.2.4 Srovnání V-A charakteristik měřených na sklotextitových trubkách a vzorcích statorových tyčí

Měření V-A charakteristik EGS ochran bylo provedeno podle normy od firmy Isovolta SIB 14.07a [38], tzn. měření na sklotextitových trubkách o průměru 40 mm. Toto geometrické uspořádání je ale rozdílné od uspořádání statorových tyčí, které mají obdélníkový průřez, v tomto případě s poměrem stran 1:3. Za tímto účelem byly změřeny ještě V-A charakteristiky EGS ochran, které byly navinuty na laboratorních vzorcích statorových tyčí Obr. 6.13, fotografie reálného vzorku je zobrazena v Obr. 6.14. Hodnoty  $n$  a  $K$  jsou uvedeny v Tab. 6.6.

Tab. 6.5 Seznam typů EGS ochran měřených na vzorcích statorových tyčí

Značení pásky		Délka elektrody [m]	Aktivní průřez vrstvou [m <sup>2</sup> ]	Závislost rezistivity na gradientu elektrického pole
CoronaShiled® 217.01	páska	0,1276	$1,89 \cdot 10^{-4}$	Typ C
CoronaShiled® 217.21	páska		$6,18 \cdot 10^{-5}$	Typ C
CoronaShiled® 217.02	páska		$7,35 \cdot 10^{-5}$	Typ A
CoronaShiled® 217.22	páska		$6,15 \cdot 10^{-5}$	Typ A
CoronaShiled® 217.03	páska		$6,80 \cdot 10^{-5}$	Typ B
CoronaShiled® 217.31	páska		-	Typ B
CoronaShiled® P8001	lak		$6,04 \cdot 10^{-5}$	Neuvedeno
CoronaShiled® P8002	lak		$4,40 \cdot 10^{-5}$	Neuvedeno
AKASIC 4b	páska		$5,83 \cdot 10^{-5}$	Neuvedeno



Obr. 6.13 Uspořádání měření V-A charakteristik na vzorcích statorových tyčí



Obr. 6.14 Vzorek statorové tyče při měření V-A charakteristiky EGS ochrany

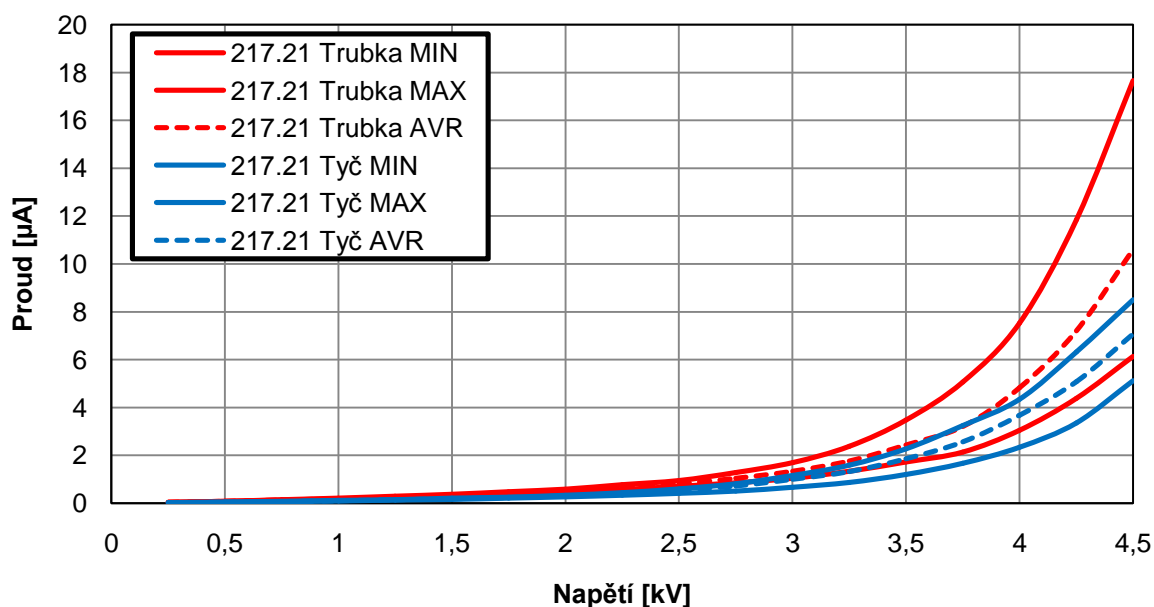
Tab. 6.6 Hodnoty  $n$  a  $K$  EGS ochran na rozdílných geometrických uspořádáních

	217.01		217.02		217.03		217.21	
	n	K	n	K	n	K	n	K
<b>Trubka</b>	1,379	16,29	2,151	16,16	1,729	16,1	1,125	15,95
<b>Trn</b>	1,321	18,03	2,81	17,48	2,587	17,7	1,36	16,83
	217.22		Akasic		P8001		P8002	
	n	K	n	K	n	K	n	K
<b>Trubka</b>	2,041	16	0,24	15,34	1,646	15,89	0,97	15,54
<b>Trn</b>	2,664	17,43	0,398	16,12	2,516	17,18	1,277	16,42

Až na EGS ochranu 217.01 jsou hodnoty ostatních směrnic vyšší u měření na trnech. Příčinou jsou pravděpodobně ostré hrany vzorků statorových tyčí, kde se může objevit vyšší intenzita elektrického pole, což může vést ke snížení odporu EGS ochrany a zvýšení protékajícího proudu.

Konstanty  $K$  jsou všechny vyšší v případě měření na trnech. To značí, že v nižších intenzitách elektrických polí mají vyšší odpor ochrany měřené na trnech, ve vyšších intenzitách elektrických polí je tomu obráceně, tzn. vyšší odpor vykazují ochrany měřené na trubkách.

S přihlédnutím, že každý vzorek byl měřen s četností 10, však nelze dělat jasné závěry.



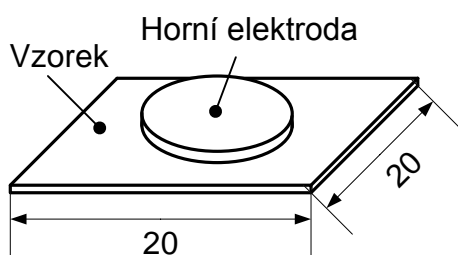
Obr. 6.15 Srovnání V-A charakteristiky EGS pásy Von Roll CoronaShield 217.21 měřené na sklotextitové trubce a na vzorku statorové tyče

### 6.2.5 Měření vodivosti a kapacity EGS pásek dielektrickou spektroskopií

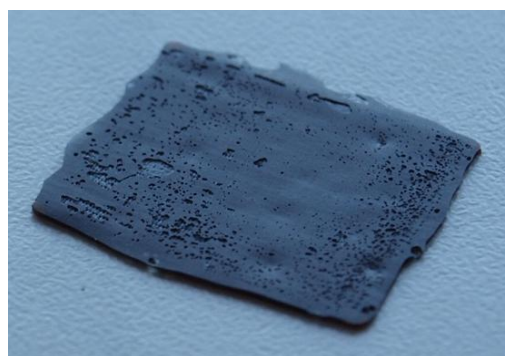
Dielektrická spektroskopie je nedestruktivní diagnostická metoda sloužící ke sledování molekulární dynamiky zkoumaných materiálů. Její princip spočívá ve sledování polarizačních odezev nosičů nábojů ve střídavém poli, tzn. na základě změny frekvence vnějšího elektrického pole, ale také teploty. Využití tedy nachází tam, kde dochází ke změnám elektrických dipólů nebo k jejich vzájemné interakci. Dielektrickou spektroskopií se může zkoumat proces stárnutí dielektrických materiálů. Metoda se používá i pro měření ztrát v dielektriku. [39][40]

Dielektrická spektroskopie zde byla zvolena za účelem zjištění, jak se mění elektrická vodivost EGS pásek se zvyšující se teplotou. V průběhu provozu se mění teplota EGS pásky až o několik desítek stupňů. Tato změna může mít vliv na změnu elektrické vodivosti a tím pádem také na funkci EGS ochrany. Podobný vliv může mít teplota i na hodnotu kapacity EGS ochrany, tzn. na kapacitní proudy tekoucí skrz ochranu a posléze i na rozložení napětí podél jejího povrchu.

Měření probíhalo na dvouvrstvých čtvercových vzorcích o délce hrany 20 mm obr.. EGS páska o šířce 20 mm se nastříhala na čtverečky o délky strany 20 mm. Dva takovéto čtverečky byly umístěny na sebe a vytvrzeny při 120 °C po dobu 2 hodin, tak jak je uvedeno v technické dokumentaci [22]. Vzorky (Obr. 6.16) byly v průběhu vytvrzování zatíženy ocelovou deskou tak, aby nedošlo k jejich zkroucení. Tyto vzorky byly umístěny mezi dvě elektrody o průměru 10 mm (Obr. 6.17 a Obr. 6.19), které byly posléze umístěny do měřícího přístroje Novocontrol (Obr. 6.18).



Obr. 6.17 Uspořádání měření pro dielektrickou spektroskopií

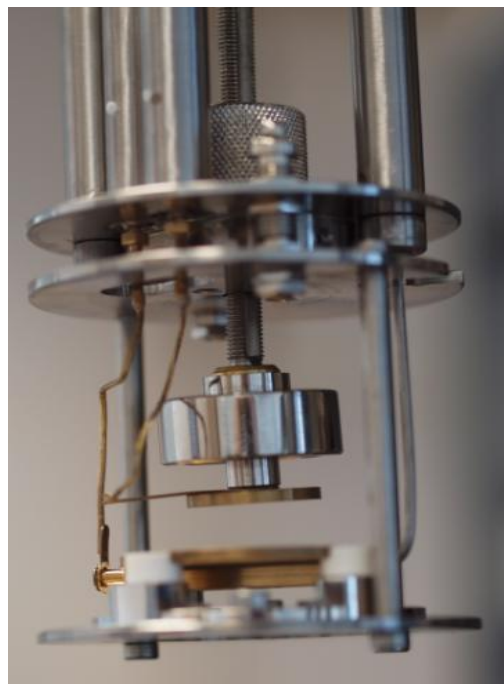


Obr. 6.16 Vzorek pro měření dielektrickou spektroskopií

Při měření dielektrických vlastností EGS pásek se zjišťovala závislost kapacity a elektrické vodivosti na teplotě. Rozsah teplot se pohyboval v rozmezí 20 – 170 °C. Teplotní závislost se měřila pro šest frekvencí – 0,5; 1; 5; 50; 150 a 300 Hz. Výsledný graf pro EGS pásku 217.03 je uveden v *Obr. 6.20*. V *příloze E* jsou pak uvedeny zbývající grafy obou EGS pásek (217.01 s 217.02).



*Obr. 6.18 Měřicí přístroj Novocontrol*

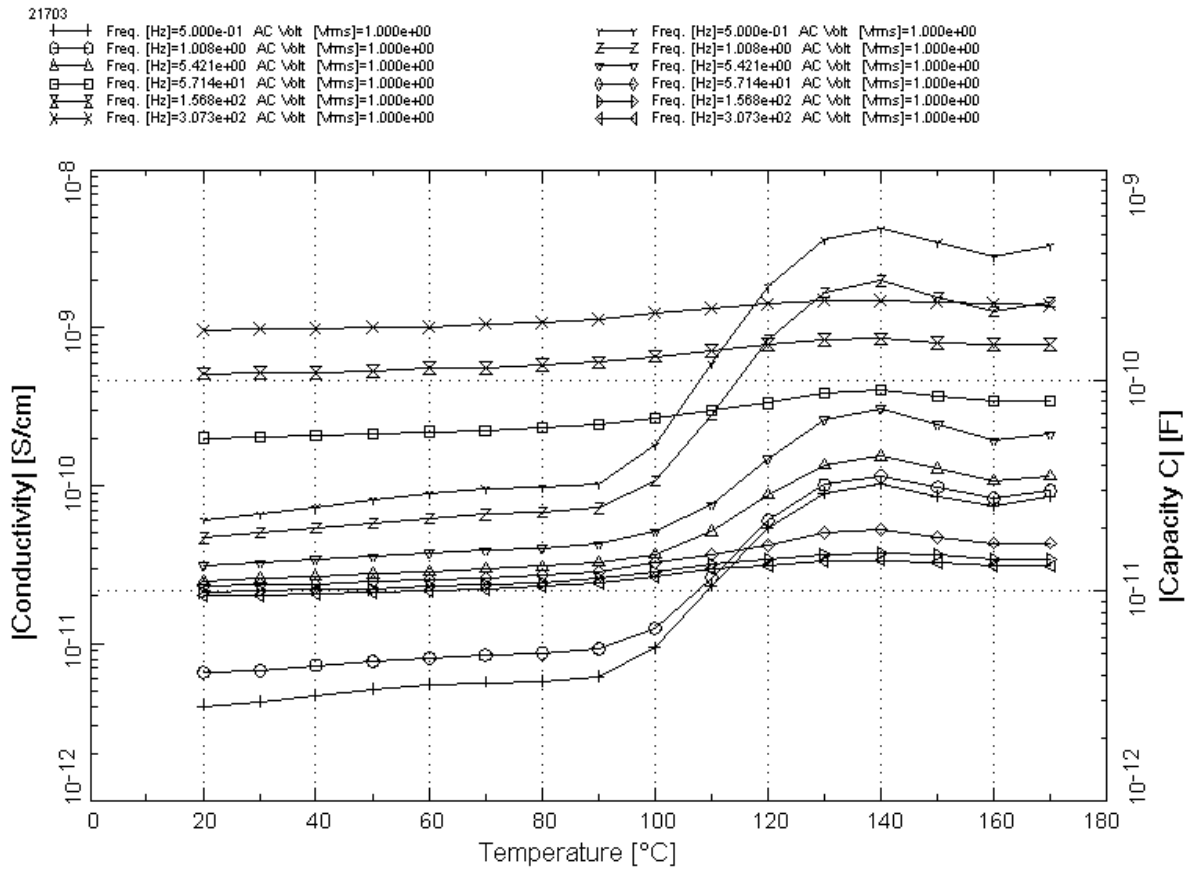


*Obr. 6.19 Elektrodové uspořádání měřícího přístroje Novocontrol*

Z výsledků jsou patrné velké vlivy frekvence na elektrickou vodivost, kdy při zvyšující se frekvenci její hodnota roste. Hodnota teploty má na průběh elektrické vodivosti ve vyšších frekvencích malý vliv, nicméně je vidět její mírný nárůst se zvyšující se teplotou. U frekvence 0,5 a 1 Hz dochází kolem hodnoty 100 °C k strmému nárůstu vodivosti až o jeden řád. Obecně lze tedy říci, že se zvyšující teplotou roste také elektrická vodivost EGS pásek, strmost vzrůstu pak závisí na frekvenci přiloženého napětí. Se zvyšující teplotou se také zmenšují rozdíly elektrické vodivosti způsobené rozdílnými frekvencemi.

Kapacita nevykazuje velké změny v závislosti na frekvenci při teplotě 20 °C. Avšak s rostoucí teplotou dochází u nižších frekvencí (0,5 a 1 Hz) ke znatelnému nárůstu kapacity. U vyšších frekvencí se pak hodnota kapacity zvyšuje společně s teplotou jen minimálně. To může mít vliv na fázový posun napětí a proudu a může částečně vysvětlovat poklesy rozložení

napětí podél satorové cívky. Zjištěné průběhy jsou zřejmě způsobené relaxačními polarizacemi. [41]



Obr. 6.20 Závislost elektrické vodivosti a kapacity na teplotě měřené pro 6 frekvencí

## 7 Napěťové poměry na izolaci vinutí na výstupu z drážky VN točivého stroje

Izolační systém vinutí VN elektrického točivého stroje je při provozu vystaven, jak již bylo řečeno, elektrickému, tepelnému a mechanickému namáhání. V rovné části tyče je rozložení napětí až na plynovou mezeru identické, ale na jejím výstupu z drážky dochází k nárůstu gradientu, který při nevhodném návržení ochrany, jež slouží pro řízení podélného gradientu, vede k výbojům.

Proto je snaha učinit taková opatření, která povedou ke snížení gradientu elektrického pole. Teoreticky je tento problém obtížně řešitelný, jelikož ochrana u výstupu vinutí se chová jako dlouhé vedení s rozloženými parametry se silnou nelinearitou (elektrické pole, teplota), které vedou na řešení telegrafních rovnic. Tato kapitola se proto zabývá přímým měřením napětí podél této ochrany. Jak již bylo zmíněno výše, dosud zavedenou praxí je nanášení AGS a EGS materiálů na povrch izolace. Rovná část vinutí je obvykle ovijena AGS páskou k zabránění vzniku drážkových výbojů ve statorové drážce a v návaznosti na ni i na oblast výstupu z drážky jsou následně ovijeny EGS pásy pro zamezení vzniku koronových výbojů v důsledku skokové změny napětí. EGS ochrana musí být navržena tak, aby nevznikal ani jeden ze tří níže uvedených jevů.

1. pokud je odpor nevhodně zvolený (veliký), i přes jeho pseudolineární průběh je gradient natolik velký, že vede k ČV,
2. ČV se objeví na konci EGS ochrany, což značí, že ochrana nemá dostatečnou délku pro připojené napětí nebo není odpor ochrany dostatečně vysoký
3. ohmické ztráty (zahřívání) EGS ochrany jsou natolik velké, že jsou nad limit provozuschopnosti materiálu. [5]

Otázkou je tedy výběr a způsob nanášení vhodných EGS materiálů tak, aby v ideálním případě bylo napětí podél ochrany co nejbližší lineárnímu průběhu (konstantní gradient po celé délce ochrany s takovým napětím na konci izolace, které by nevedlo k podélným výbojům po povrchu nechráněné izolace). Z praxe je známo, že vhodně navržená EGS ochrana dokáže značně snížit výskyt povrchových výbojů a tím prodloužit dobu do údržby a ve výsledku i prodloužit životnost izolace elektrického stroje.

## 7.1 Zhotovení vzorků

Na laboratorní vzorky statorových cívek (*kapitola 5*) byly nanесeny různé typy EGS ochran v jejich různých délkách. Pásky byly navinuty s polovičním překrytím a přesahovaly vždy 2 cm přes AGS ochranu (*Obr. 7.1*). Takto byly vytvořeny vzorky, jejichž přehled je uveden v *Tab. 7.1*. Celkově bylo vytvořeno 35 různých vzorků EGS ochran.



*Obr. 7.1 Nanášení různých délek a typů ochran*

*Tab. 7.1 Měřené délky a typy EGS ochran*

Typ EGS ochrany	Délka EGS ochrany (mm)				
	50	100	150	200	250
<b>217.01</b>	X	X	X	X	X
<b>217.02</b>	X	X	X	X	X
<b>217.03</b>	X	X	X	X	X
<b>217.21</b>	X	X	X	X	X
<b>217.22</b>	X	X	X	X	X
<b>P8001</b>	X	X	X	X	X
<b>P8002</b>	X	X	X	X	X

Vzorky s již nanесenou EGS ochranou byly umístěny ve ventilační sušce, aby došlo k vytvrzení ochrany způsobem, který uvádí výrobce EGS ochran v příslušné dokumentaci. Teplota se postupně zvyšovala z 20 na 120 °C. Maximální teplota byla držena po dobu 120 min. Poté se vzorky nechaly samovolně vychladnout zpět až na 20 °C.

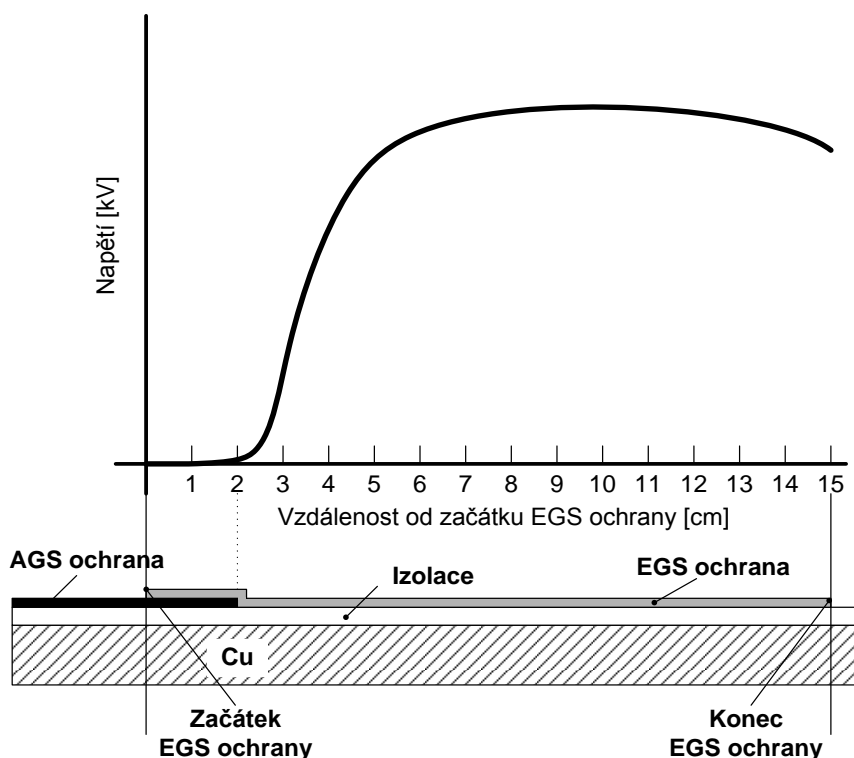
## 7.2 Měření rozložení napětí podél vzorku statorové cívk

Po aplikaci EGS ochran následovalo měření rozložení napětí podél jejich povrchu. Zdroj napětí byl připojen k ocelovému trnu a AGS ochrana byla přes měděnou elektrodu uzemněna tak, aby simulovala kontakt s uzemněným magnetickým obvodem synchronního generátoru (*Obr. 7.3* a *Obr. 7.4*). Měření probíhalo na několika měřicích hladinách od 5 do 45 kV po 5kV krocích. Napětí podél EGS ochrany bylo odečítáno na měřicí

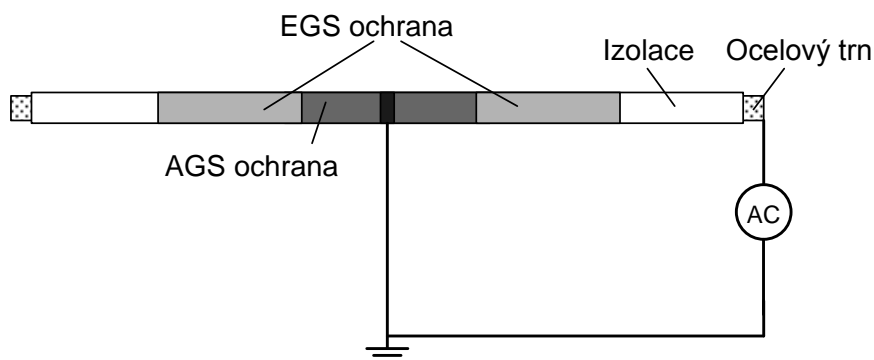


elektrodě, která se po 1 cm posouvala směrem od AGS ochrany až do konce EGS ochrany. Z těchto hodnot byly vykresleny průběhy rozložení absolutních hodnot napětí pro EGS ochranu v příslušných délkách. *Obr. 7.2* ilustruje průběh napětí podél statorové tyče u výstupu vinutí z čel a definuje začátek a konec EGS ochrany tak, jak je pak použito v následujících grafech a a zbytku práce.

*Obr. 7.5*, *Obr. 7.6* a *Obr. 7.7* zobrazují rozložení napětí pro různé typy ochran ve třech rozdílných délkách – 15, 20 a 25 cm. Na svislé ose je zobrazeno napětí odečtené z měřicí elektrody, vodorovná osa vzdálenost od AGS ochrany. Jednotlivé průběhy odpovídají napětí připojenému na ocelový trn, v tomto případě 45 kV.



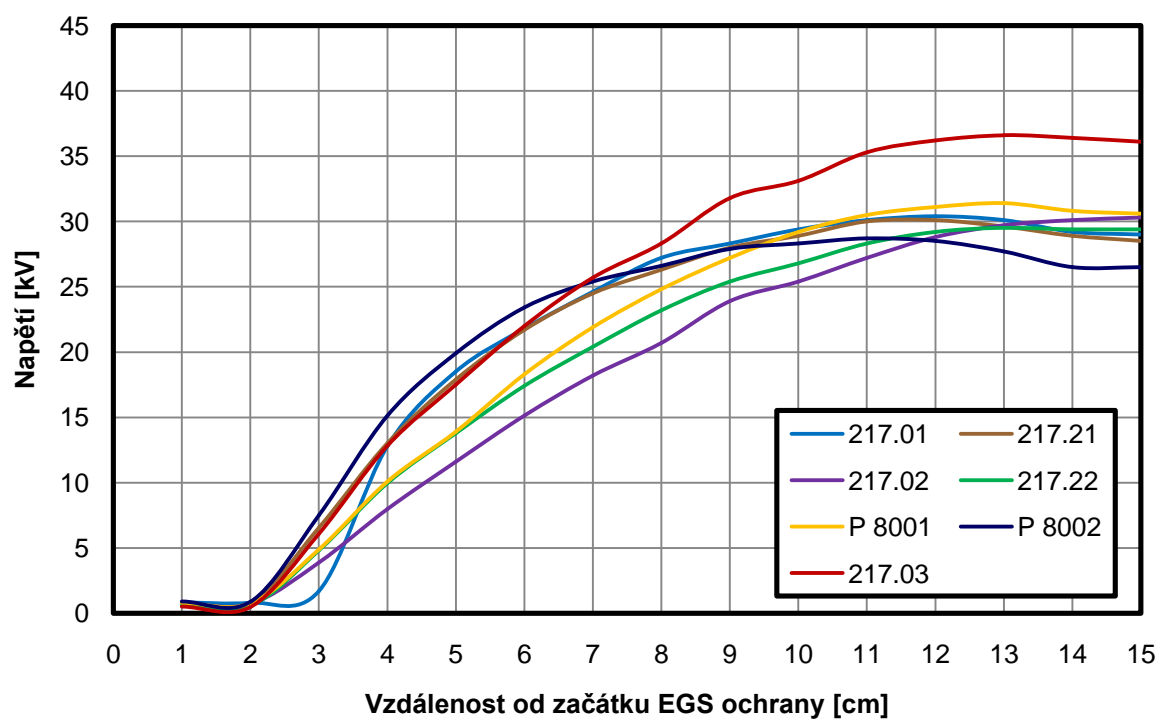
*Obr. 7.2* Ilustrativní obrázek rozložení napětí podél EGS ochrany



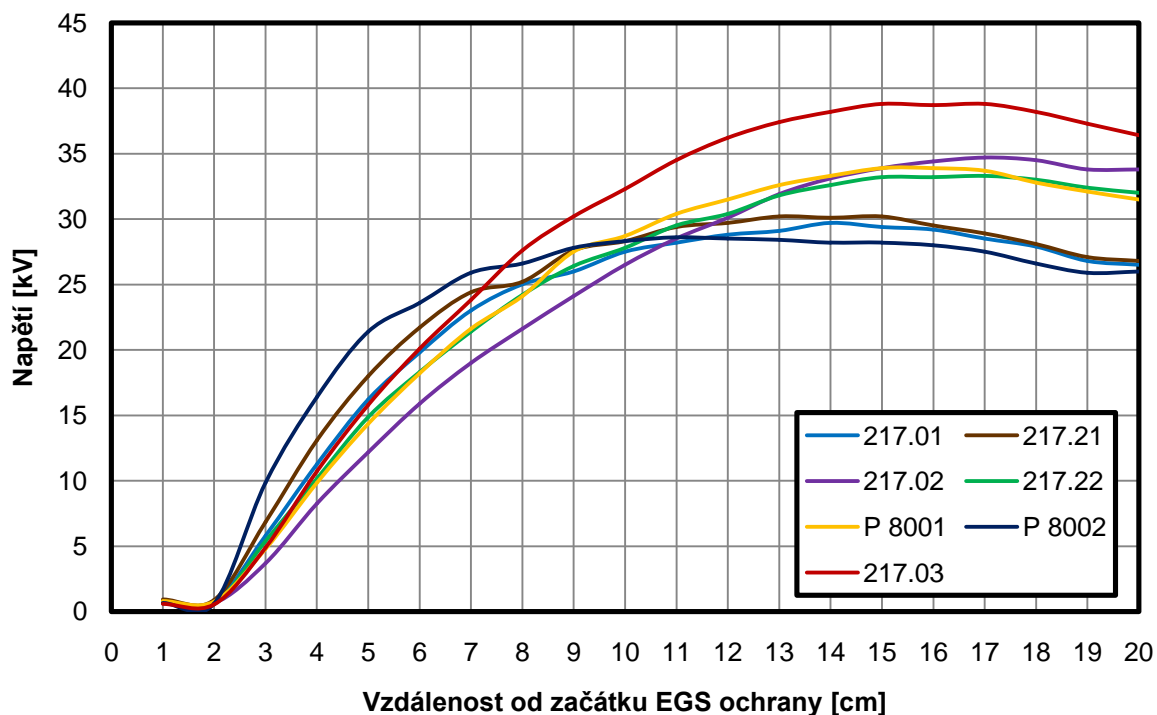
*Obr. 7.3* Zapojení pro měření rozložení napětí podél EGS ochrany



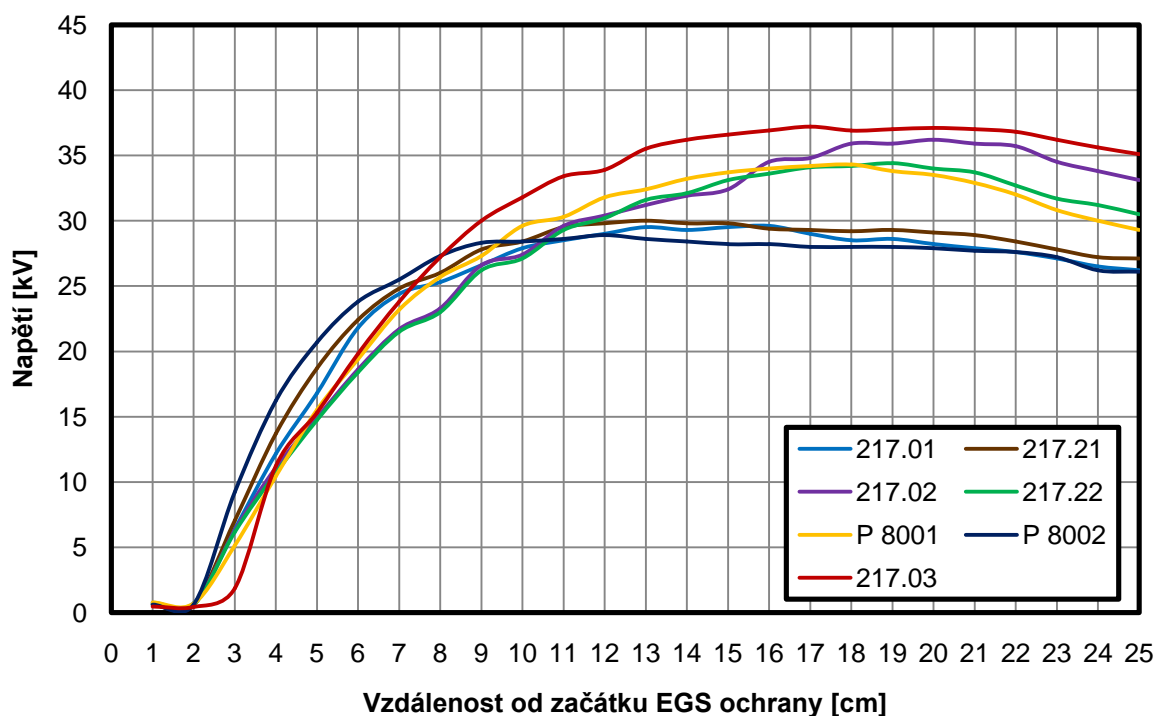
Obr. 7.4 Měření rozložení napětí podél EGS ochrany



Obr. 7.5 Rozložení napětí na jednotlivých typech EGS ochran délky 15 cm podél vzorku statorové cívky při připojeném střídavém napětí 45 kV



Obr. 7.6 Rozložení napětí na jednotlivých typech EGS ochran délky 20 cm podél vzorku statorové cívky při připojeném střídavém napětí 45 kV



Obr. 7.7 Rozložení napětí na jednotlivých typech EGS ochran délky 25 cm podél vzorku statorové cívky při připojeném střídavém napětí 45 kV

Jak je uvedeno v úvodu této kapitoly, EGS ochrany musí rozložit elektrické napětí podél cívky tak, aby v ideálním případě gradient elektrického pole podél celé ochrany byl konstantní a aby se hodnota napětí na konci EGS ochrany blížila co nejvíce hodnotě napětí připojenému k ocelovému trnu, v tomto případě 45 kV. Toto vše za podmínky, že v EGS ochraně nebudou vznikat vysoké ztráty způsobené proudem tekoucím ochranou, aby nedošlo k jejich tepelné destrukci.

Z grafů je patrné, že tedy páska 217.02 vykazuje optimální průběh, neboli napětí rozložené pomocí této ochrany se nejvíce blíží lineárnímu průběhu. Tato ochrana typu A (viz. kapitola 4.1) se silnou závislostí na gradientu elektrického pole optimalizuje rozložení napětí nejlépe, oproti např. ochraně typu 217.01 nebo 217.21 (slabá závislost na gradientu elektrického pole). Napětí na konci EGS ochrany, které se nejvíce blíží připojenému napětí na ocelový trn, je na povrchu ochrany typu 217.03. Ačkoli ochrana typu 217.02 optimalizuje rozložení napětí nejlépe, v důsledku její nevyšší elektrické vodivosti může docházet k vysokému teplotnímu ohřevu pásky a k jejímu následnému zničení (viz. kapitola 7.3). Z průběhů napětí na EGS ochranách délek 5 a 10 cm bylo patrné, že tyto ochrany nebyly schopné dostatečně snížit gradient elektrického pole na takovou hodnotu, aby nevznikaly částečné výboje. Jejich nedostatečná délka také způsobovala částečné výboje na jejich koncích. Z těchto důvodů již tyto ochrany nebyly víc zkoumány.

### 7.3 Měření rozložení teploty podél vzorku statorové cívky

Při návrhu EGS ochrany nelze pouze sledovat elektrické namáhání. EGS ochrana je ohřívána v důsledku ztrát, které vznikají protékajícím proudem danou ochranou. Tyto ztráty vyjadřuje rovnice (7.1):

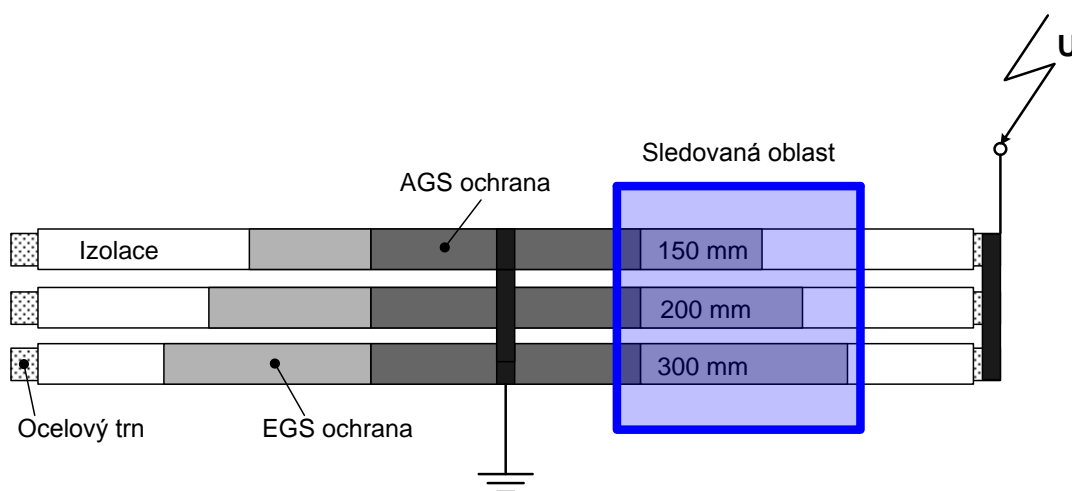
$$P = R \cdot I^2, \quad (7.1)$$

kde P ztráty [W];  
R čtvercový odpor [ $\Omega$ ];  
I proud [A].

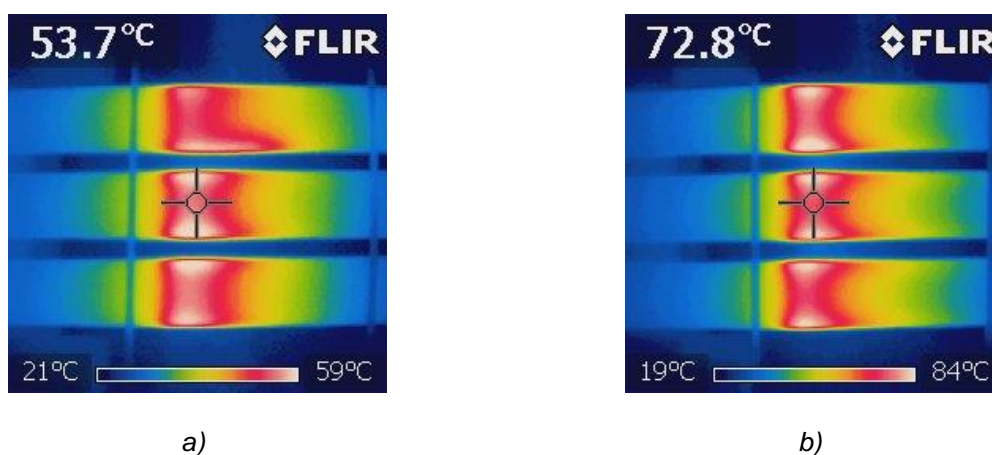
Aby tedy nedošlo ke zničení EGS ochrany, je nutné znát rozložení teploty podél izolace. Teplota byla měřena pomocí termokamery, kdy byly jednotlivé vzorky statorových tyčí zapojeny podle Obr. 7.8.

Měření probíhalo na 3 napěťových hladinách - 15 kV, 35 kV a 45 kV, napětí bylo připojeno po dobu 5 minut. Poté se udělal snímek na termokameře. Měření byly pouze délky

ochran 15 cm, 20 cm a 25 cm z důvodů zmíněných v kapitole 7.2. Na snímcích termokamery (Obr. 7.9) jsou vidět vždy dvě světlé čáry. Čára vlevo značí začátek EGS ochrany, druhá čára značí 15cm vzdálenost od první. Zbylá měření jsou uvedena v příloze B.



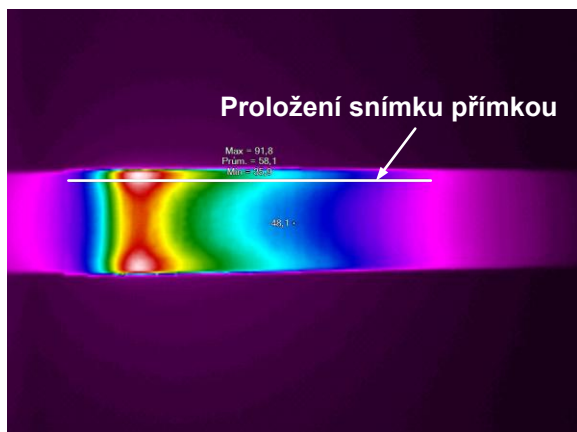
Obr. 7.8 Uspořádání vzorků při měření rozložení teploty



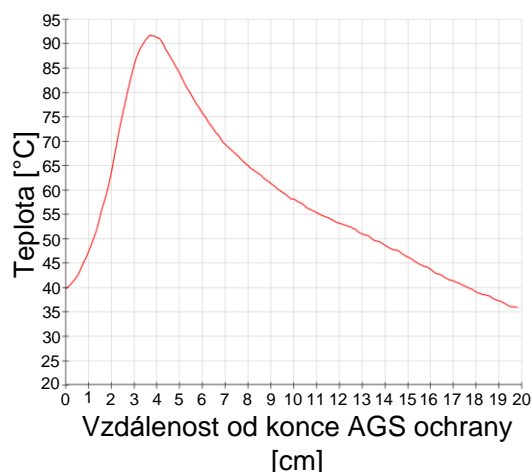
Obr. 7.9 Snímky z termokamery při připojeném napětí 45 kV a) 217.01 b) 217.02

Pro návrh EGS ochrany je důležité, aby bylo napětí rozloženo lineárně. To splňují nejlépe takové ochrany, které mají silnou závislost na gradientu elektrického pole, tzn. ochrany s vysokou elektrickou vodivostí. Z měření pomocí termokamery je zřejmé, že ale právě tato vlastnost je nežádoucí z hlediska rozložení teploty. Na EGS ochrany jsou tudíž kladeny protichůdné požadavky.

Měření teploty se ještě u vybraných vzorků provádělo pomocí dalšího typu termokamery Fluke, která umožňuje z pořízených snímků exportovat data. Do snímku se vloží přímka (Obr. 7.10), podél které se vykreslí graf (Obr. 7.11). Hodnoty z grafu byly poté použity ke srovnání se simulací, viz kapitola 8.3.



Obr. 7.10 Termosnímek pořízený kamerou  
Fluke

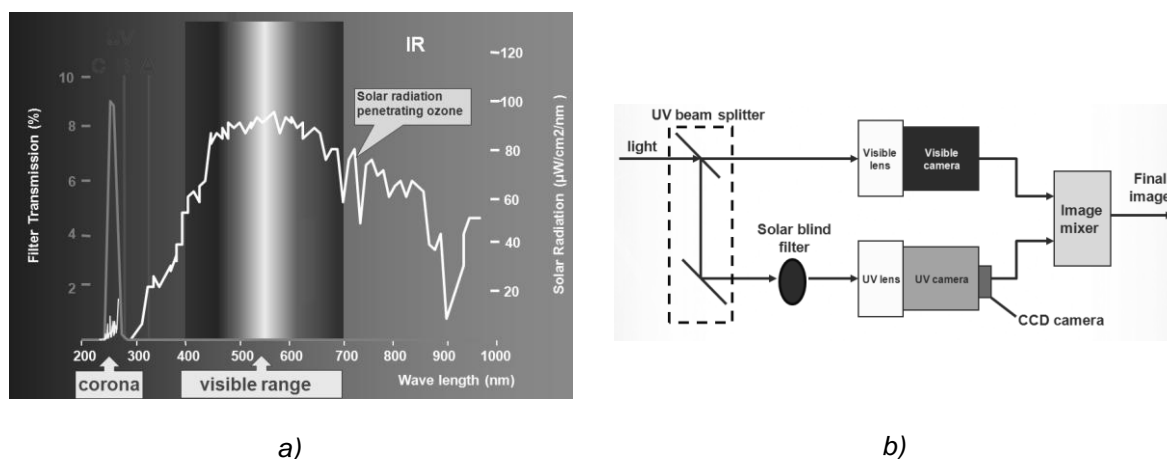


Obr. 7.11 Graf vykreslený ze snímku  
termokamery

## 7.4 Měření částečných výbojů koronovou kamerou

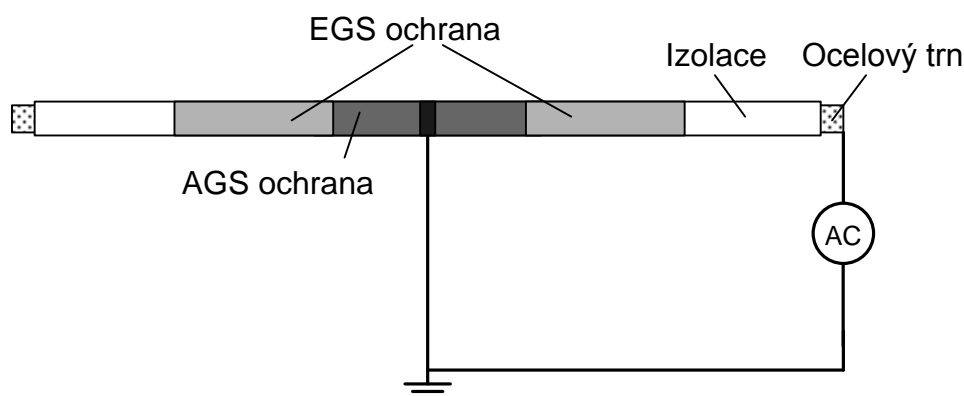
EGS ochrany musí být navrženy tak, aby na nich a jejich koncích nevznikaly částečné výboje vedoucí k jejímu zničení. Při určitém napětí dojde ke vzniku částečných výbojů i na jejím konci. Sledování optimálního navržení ochrany lze provádět pomocí koronové kamery.

Vlnová délka koróny leží v ultrafialovém vlnovém pásmu, tzn. v rozsahu 100 nm - 280 nm, jak je zobrazeno na Obr. 7.12 a). Světlo je nejdříve rozděleno tzv. „UV BeamSplitter“ (Obr. 7.12 b)) na dva paprsky. Jeden paprsek pokračuje do kamery, která má filtr pro viditelné záření tak, aby ve výsledném obrazu bylo vidět i okolí snímaného objektu. Druhý paprsek jde nejdříve skrz UV filtr, který propouští jen vlnovou délku korony. Poté paprsek prochází UV čočkou, UV kamerou a CCD kamerou. Poté jsou oba paprsky sloučeny v Image Mixer. Korona kamera tedy může zobrazovat buď pouze jeden obraz nebo oba obrazy najednou, aby došlo snadněji k lokalizaci částečných výbojů.



Obr. 7.12 Princip korona kamery a) spektrum korony b) blokové schéma korona kamery

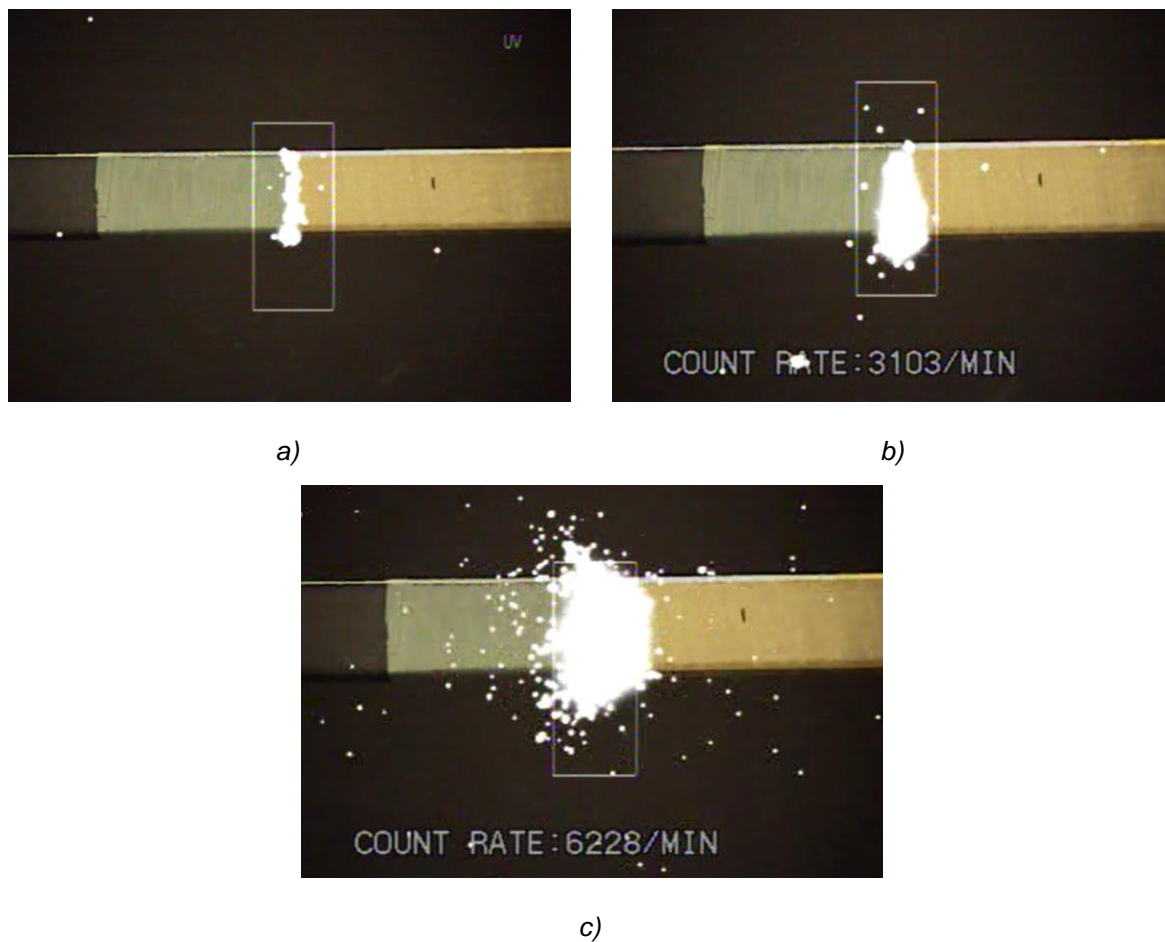
Měření probíhalo na výše popsáních laboratorních vzorků statorových tyčí s EGS ochranami typů 217.01, P8001 a P8002 o délkách 50, 100, 150, 200 a 250 mm. Zapojení měření je na Obr. 7.13, kdy zem byla přes měděnou samolepící elektrodu připevněna k AGS pásce, aby simulovala kontakt s uzemněným magnetickým obvodem. Elektrické napětí bylo připojeno k ocelovému trnu. Měřilo se na třech napěťových hladinách: 15, 30 a 35 kV.



Obr. 7.13 Zapojení pro měření koronovou kamerou

Data z měření jsou ve formátu „mpg“, tedy video. Zde jsou pouze zobrazeny obrázky, které byly pořízeny z daných filmových klipů.

Ze záběrů koronové kamery je patrné, že 100 mm dlouhá ochrana typu 217.01 již není při 15 kV schopna optimalizovat rozložení pole tak, aby na konci její délky nevznikaly částečné výboje (Obr. 7.14 a). V dalších obrázcích jsou vidět částečné výboje při napájení elektrickým napětím 30 kV (Obr. 7.14 b) a 45 kV (Obr. 7.14 c). Oba obrázky také ukazují četnost částečných výbojů, kdy lze vidět, že se zvýšením napětí z 30 kV na 45 kV došlo prakticky ke zdvojnásobení této četnosti.



Obr. 7.14 Částečné výboje na konci EGS ochrany 217.01 o délce 100 mm při různých napěťových hladinách a) 15 kV b) 30 kV c) 45 kV

Ze záběrů z koronové kamery je možnost zjistit, při jakých napětích se u daného uspořádání EGS ochrany objevují ČV. Použití koronové kamery může výrazně pomoci při návrhu EGS ochrany a k zajištění její správné funkce.



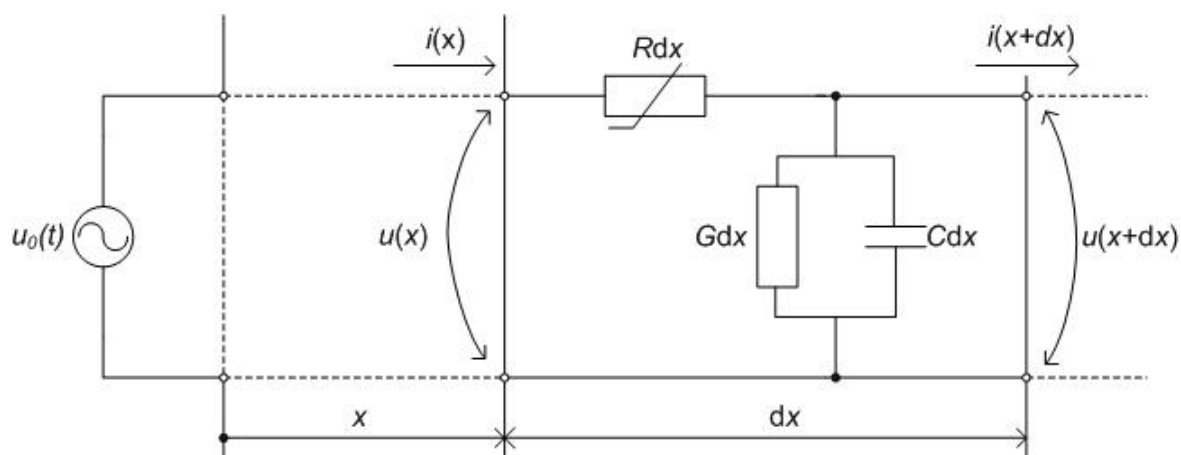
## 8 Matematický model napěťových a teplotních poměrů na EGS ochraně

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, je tento problém, vzhledem k nelineárním vlastnostem EGS ochrany, obtížně teoreticky řešitelný. Matematickým modelem se zabývali již někteří autoři ve svých publikacích [1],[3], [4], [42]. Autoři vesměs řeší tento problém pomocí kaskádního zapojení dvojbranů, kdy jednotlivé dvojbrany představují elementy EGS ochrany, pro které se dopočítává hodnota odporu  $R$  v závislosti na intenzitě elektrického pole.

U nelineárních ochran je závislost měrného povrchového odporu na intenzitě elektrického pole vyjádřena vztahem [1][24]:

$$\bar{R} = \bar{R}(E), \quad (8.1)$$

Matematický model řešeného problému, který byl popsán v článku [46], lze řešit pomocí obvodu s rozprostřenými parametry, tvořeným výše zmíněným kaskádním spojením dvojbranů, jak je uvedeno v Obr. 8.1., který zároveň slouží pro odvození spojitě formulace.



Obr. 8.1 El. obvodu představující element EGS ochrany u výstupu vinutí z drážky, převzato z [1]

Parametry  $R$  (odpor),  $C$  (kapacita),  $G$  (svod) jsou vztaženy na délkovou jednotku tyče. Pro bod  $x$  se dvojbran formuluje následně:

$$-\frac{\partial i}{\partial x} = uG + \frac{\partial u}{\partial t} C \quad (8.2)$$

$$-\frac{\partial u}{\partial x} = -e = iR \quad (8.3)$$

kde	$i$	celkový proud protékající EGS ochranou [A];
	$u$	napětí v daném místě [V];
	$e$	intenzita elektrického pole [ $V \cdot m^{-1}$ ];
	$G$	Svod [S];
	$C$	Kapacita [F];
	$R$	Odpor [ $\Omega$ ].

Odpor EGS ochrany se vyjadřuje jako závislost odporu  $\bar{R} = \bar{R}(e)[\Omega]$  vzorku o rozměrech 1 x 1 cm. [1][24]

Zderivováním rovnice (8.3) dostaneme

$$-\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = R \frac{\partial i}{\partial x} + \frac{\partial R}{\partial x} i(x) \quad (8.4)$$

Po dosazení rovnice (8.2) do rovnice (8.4), dostáváme:

$$-\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = R \left( -uG - \frac{\partial u}{\partial t} C \right) + \frac{\partial R}{\partial x} i(x) \quad (8.5)$$

Z rovnice (8.3) plyne vztah:

$$-e = iR, \text{ tzn } i = -\frac{e}{R} \quad (8.6)$$

Po dosazení rovnice (8.6) do rovnice (8.5) a úpravách dostáváme:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - GRu - RC \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{e}{R} \frac{\partial R}{\partial x} = 0 \quad (8.7)$$

Z charakteru rovnice (8.7) vyplývá tvar paraboly 2. stupně (vyskytuje se zde druhá derivace prostorová a první derivace časová). Tuto závislost lze proto aproximovat parabolou 2. stupně.

Tento postup numerického výpočtu elektrických a tepelných ztrát je poměrně stále komplikovaný. Navíc je řešen pouze jednodimenzionálně. Dnešní doba nabízí nové možnosti výpočtu napěťových poměrů, zvláště použitím metody konečných prvků (MKP) lze počítat rozložení i 3D polí a tím získat komplexnější pohled na celou oblast.

Matematický model byl vypracován za účelem zjednodušení návrhu EGS ochran a usnadnění práce návrhářů el. točivých strojů. Byl vytvořen napěťový a teplotní model, který

lze použít jak pro modelování rozložení napětí podél pásky nebo laku aplikovaného na satorové tyči u výstupu vinutí z čel. Model byl sestaven tak, aby bylo možné relativně snadně měnit parametry EGS ochrany, tzn. její délku, elektrickou a tepelnou vodivost a zkrátit tak dobu potřebnou pro určení optimálního provedení EGS ochrany.

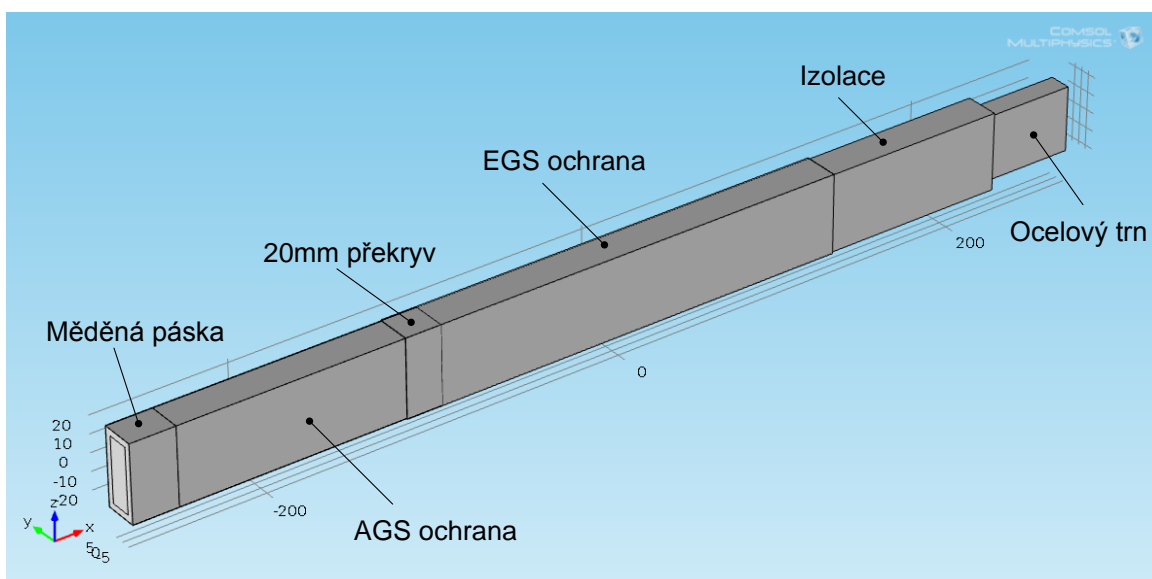
K simulaci byl použit software COMSOL Multiphysics, který používá zmíněnou metodu konečných prvků.

Někteří autoři se již zabývali modelováním této problematiky[5], [6], [35], [43], nicméně ani jedna studie se nevěnovala srovnání hodnot z měření a hodnot ze simulace v takovém rozsahu, jako v této práci. Matematický model byl navíc rozšířen o výpočet rozložení napětí a teploty pro dvoustupňovou EGS ochranu. Modelování takto provedené ochrany zatím nebylo nikde publikováno.

## 8.1 Vytvoření geometrie vzorku

Prvním krokem bylo vytvoření geometrie vzorku. Ta byla zvolená tak, aby se co nejvíce přibližovala geometrii reálných vzorků, na kterých již byly měřeny průběhy elektrického napětí a teploty podél EGS ochrany (viz. kapitola 7.2 a 7.3).

Pro model byly uvažovány rozměry ocelového trnu 12 x 36 x 550 mm. Tloušťka izolační stěny byla 3,46 mm a tloušťka AGS ochrany 0,2 mm. Tloušťka EGS ochrany byla 0,5 mm. Délku EGS ochrany je možné měnit, nicméně v následujících kapitolách se používá jednotná délka 250 mm. EGS ochrana překrývá ve všech modelovaných případech AGS ochranu 20 milimetry. Geometrické uspořádání vzorku je zobrazeno na Obr. 8.2.



Obr. 8.2 Geometrické uspořádání vzorku pro simulaci

Jednotlivé části vzorku byly charakterizovány vlastnostmi, které shrnuje *Tab. 8.1*.

*Tab. 8.1 Materiálové konstanty*

Materiálové konstanty částí modelu						
		Izolace	EGS vrstva	AGS vrstva	Ocelový trn	Jednotky
<b>Relativní permitivita</b>	$\epsilon_r$	4	12	4	1	[-]
<b>Elektrická vodivost</b>	$\sigma$	$1 \cdot 10^{-13}$	volitelné	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$4,032 \cdot 10^6$	[S·m <sup>-1</sup> ]
<b>Tepelná kapacita</b>	$C_p$	1200	3200	5000	475	[J·(kg·K) <sup>-1</sup> ]
<b>Hustota</b>	$\rho$	3200	3200	3200	7850	[kg·m <sup>-3</sup> ]
<b>Tepelná vodivost</b>	$k$	0,2	20	30	44,5	[W·(m·K) <sup>-1</sup> ]

## 8.2 Model rozložení napětí podél EGS ochrany

Pro výpočet rozložení podél napětí podél EGS ochrany byly použity *rovnice (8.8)*, *(8.9)* a *(8.10)*, kde pouze  $U$  je proměnná neznámá.

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = Q_i \quad (8.8)$$

$$\mathbf{J} = (\sigma + j\omega\epsilon_0\epsilon_r)\mathbf{E} + \mathbf{J}_e \quad (8.9)$$

$$\mathbf{E} = -\nabla U \quad (8.10)$$

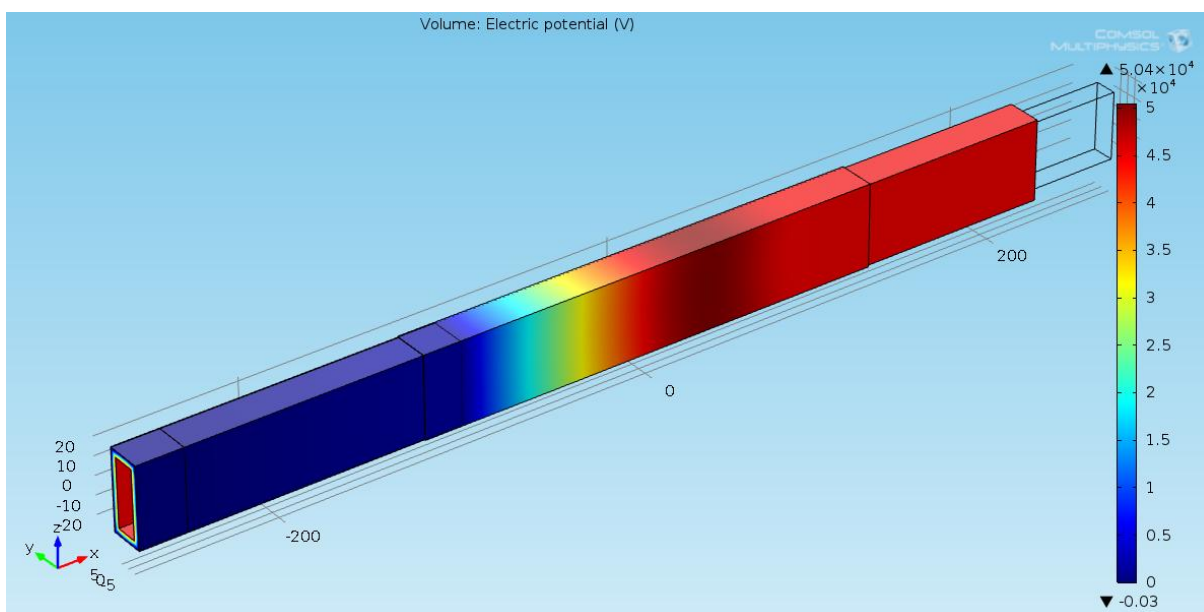
kde	$\mathbf{J}$	hustota elektrického proudu [A·m <sup>-2</sup> ];
	$Q_i$	elektrický náboj [C];
	$\sigma$	vodivost [S·m <sup>-1</sup> ];
	$\epsilon_0$	permitivita vakua [F·m <sup>-1</sup> ];
	$\epsilon_r$	relativní permitivita [-];
	$\mathbf{E}$	intenzita elektrického pole [V·m <sup>-1</sup> ];
	$\mathbf{J}_e$	externí hustota elektrického proudu [A·m <sup>-2</sup> ];
	$U$	napětí [V].

Modelována byla situace jednostupňové EGS ochrany o délce 250 mm a typu 217.02. Do vytvořeného modelu jsem tedy zadal parametry elektrické vodivosti  $\sigma$  [S·m<sup>-1</sup>] EGS ochrany v závislosti na intenzitě elektrického pole  $\mathbf{E}$  [V·m<sup>-1</sup>] příslušného typu ochrany (217.02), tak jak byly měřeny a počítány v *kapitole 6.2.1*. Zadala se příslušná hodnota elektrického napětí připojeného k ocelovému trnu (*Obr. 8.2*). V tomto případě to byla hodnota

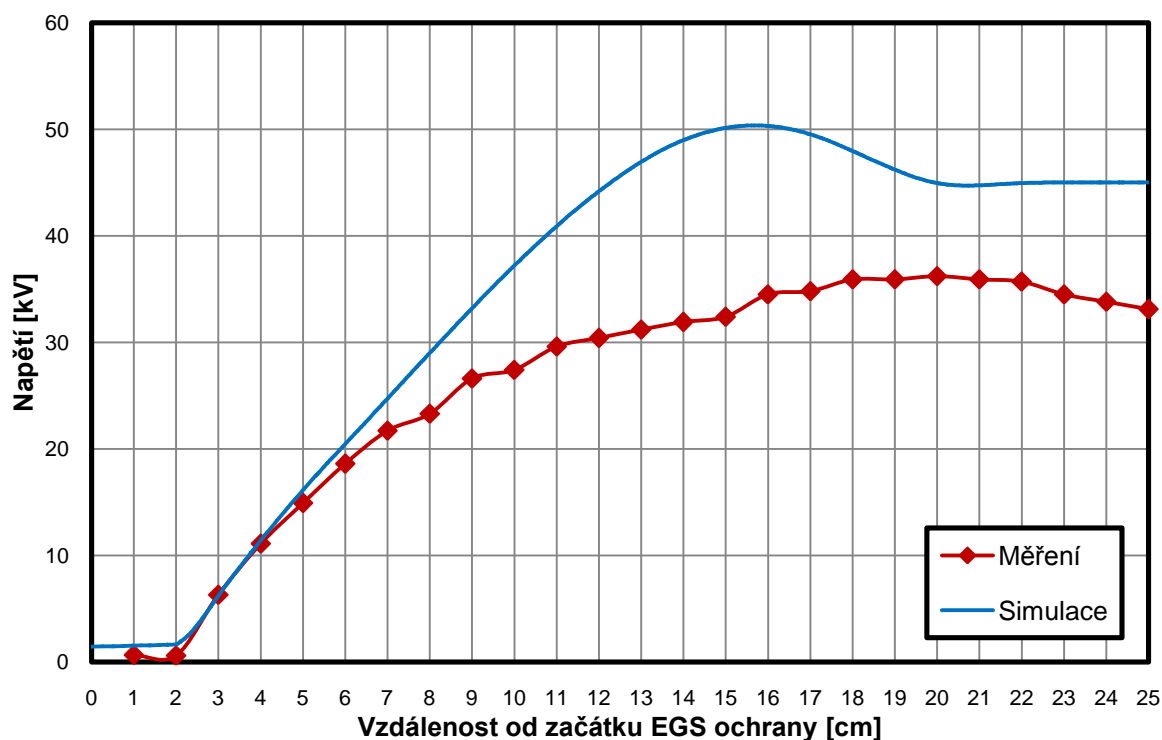
45 kV. V grafu (Obr. 8.4) jsou pak porovnány průběhy vypočtených a reálně naměřených hodnot (viz kapitola 7.2).

Z grafu (Obr. 8.4) je patrné, že kolem vzdálenosti 7 cm od začátku EGS ochrany se napětí různí. Tento jev může být způsoben rostoucím vlivem impedance měřicího přístroje při vyšších napětích nebo i rozdílností parametrů nanesených ochran s přihlédnutím na její stárnutí při skladování, jelikož EGS páska byla na vzorek statorové tyče nanášena s ročním odstupem, nežli byly vytvořené vzorky pro měření V-A charakteristiky této ochrany. Mohlo tedy dojít ke snížení nelinearity a vodivosti pásky, tedy ke snížení závislosti rezistivity na gradientu intenzity elektrického pole. Jelikož ochranou protéká proud kapacitního charakteru, lze také jako možnou příčinu poklesu napětí na konci EGS ochrany spatřit v posunutí fáze napětí vůči proudu, tzn. v tzv. Ferrantiho jevu.

Hodnota napětí na konci EGS ochrany dosahuje podle simulace hodnoty připojeného napětí na ocelový trn. Tento fakt měřením prokázán nebyl. Hodnota napětí dosáhla v tomto případě pouze 33,1 kV, což mohlo být způsobeno výše zmíněnými skutečnostmi. Jako důvod viditelného překmitu přes hodnotu připojeného napětí u výsledků simulace se jako nejpravděpodobněji jeví vysoká nelinearita EGS ochrany.



Obr. 8.3 3D model rozložení napětí u EGS ochrany typu 217.02



Obr. 8.4 Srovnání simulace a měření rozložení napětí EGS ochrany typu 217.02

### 8.2.1 Model rozložení napětí pro 2 vrstvou EGS ochranu

Pro dvoustupňovou EGS ochranu byl geometrický model upraven. EGS vrstva byla v půlce rozdělena na dvě samostatné části (EGS vrstva 1 a EGS vrstva 2) a každé z nich byla přidělena jiná elektrická vodivost (Obr. 8.6). Výsledná délka EGS ochrany je opět 250 mm. Pokud se jednalo o dvoustupňovou ochranu tvořenou ze stejného typu EGS ochrany (Obr. 8.5), byla elektrická vodivost EGS ochrany vynásobena dvěma (neboli elektrická rezistivita vydělena 2). Číslo 2 vychází z rovnice (8.11) za podmínky  $R_{1\Box} = R_{2\Box}$ .

$$R_{\Box} = \frac{R_{1\Box} \cdot R_{2\Box}}{R_{1\Box} + R_{2\Box}}, \quad (8.11)$$

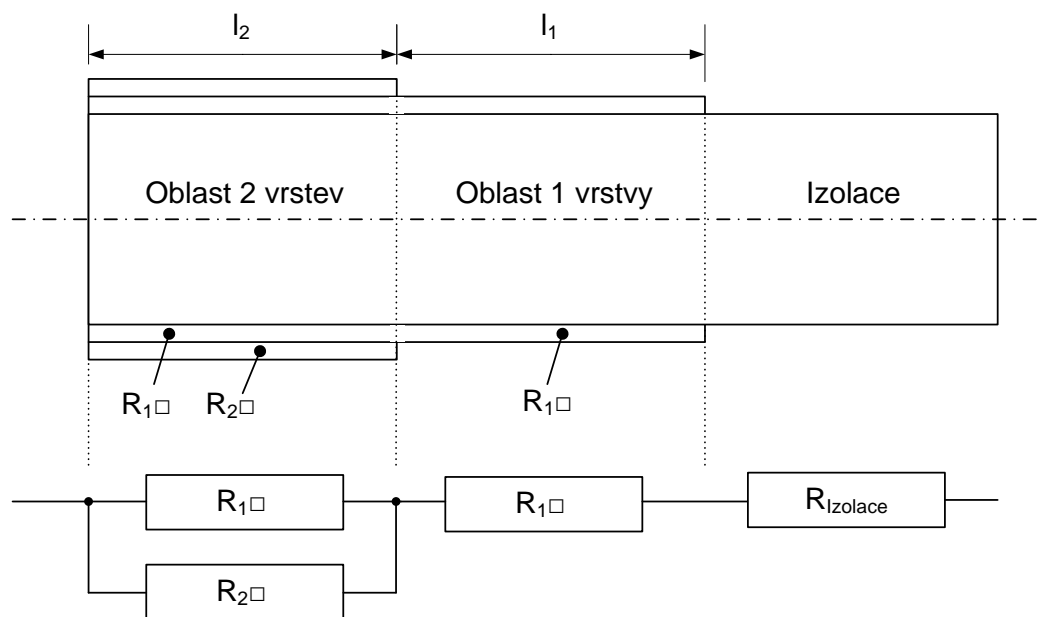
kde  $R_{\Box}$  čtvercový odpor oblasti 2 vrstev [ $\Omega$ ];

$R_{1\Box}$  čtvercový odpor 1. vrstvy [ $\Omega$ ];

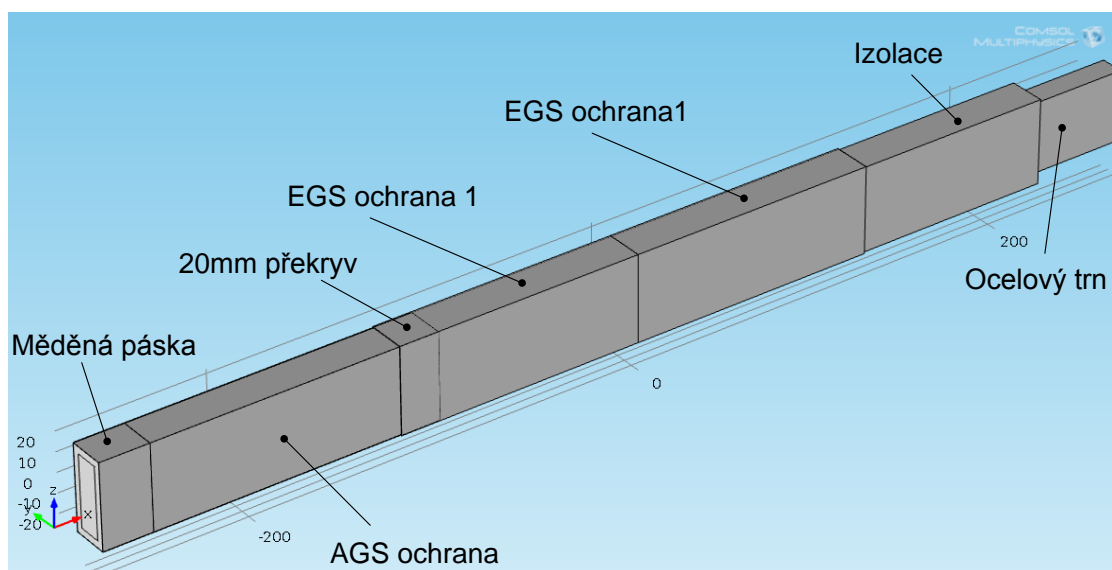
$R_{2\Box}$  čtvercový odpor 2. vrstvy [ $\Omega$ ].

Obr. 8.5 vysvětluje rovnici (8.11). Dvoustupňová ochrana je reprezentována dvěma odpory o stejné hodnotě a zapojenými paralelně (z toho tedy vychází zmíněné číslo 2). Jednostupňová ochrana je pouze jeden odpor. Uspořádání dvoustupňové ochrany stejného typu si lze tedy představit jako dva paralelní odpory o stejné hodnotě zapojené do série

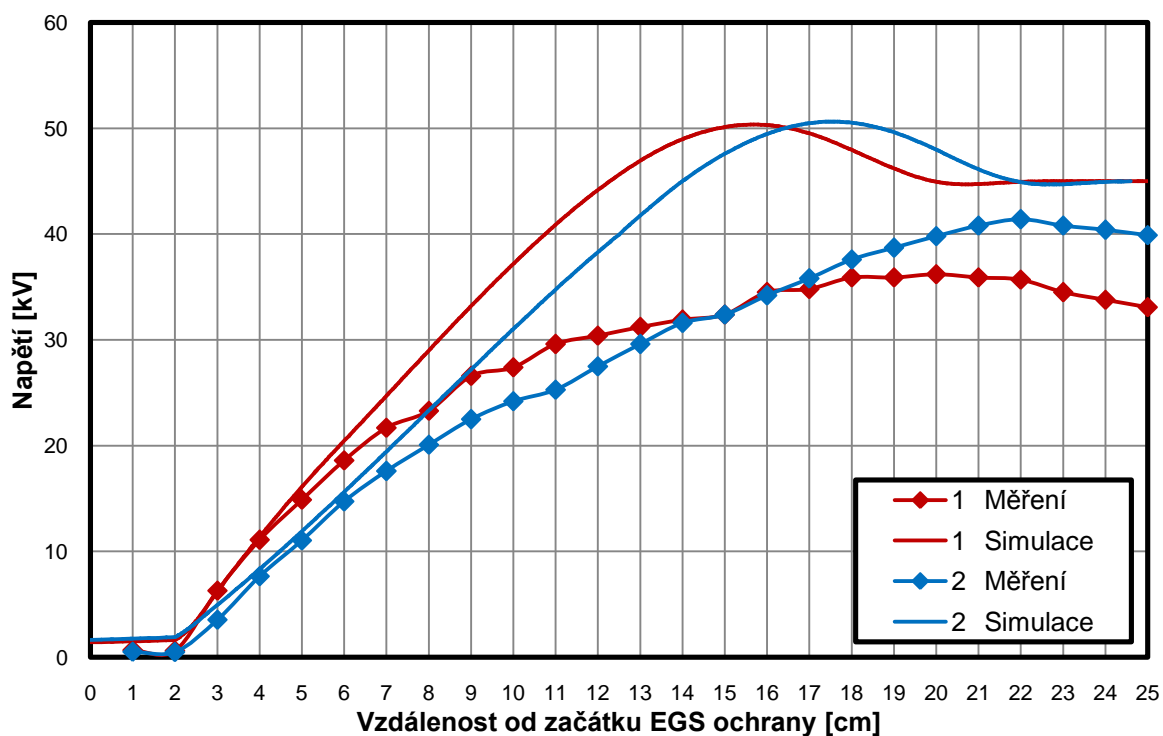
s jedním odporem téže hodnoty. Odpor výsledné celkové EGS ochrany je tedy v délce  $l_2$  vypočítaný odpor  $R_{\square}$  a odpor vrstvy v délce  $l_1$  zůstává na hodnotě  $R_{1\square}$ .



Obr. 8.5 Čtvercové odpory u dvoustupňové ochrany



Obr. 8.6 Dvoustupňové geometrické uspořádání vzorku pro simulaci



Obr. 8.7 Průběhy napětí podél statorové cívky u jednostíupňové a dvoustupňové ochrany

Z grafu je patrné, že při aplikaci dvoustupňové ochrany dojde k lineárnějšímu rozložení napětí podél vzorku statorové tyče, toto je zřejmé jak z reálného měření, tak ze simulace. Měřením bylo také zjištěno, že hodnoty napětí změřených na dvoustupňové ochraně jsou více lineární a u konce EGS ochrany se více přibližují hodnotě napětí připojené na ocelový trn, v tomto případě tedy hodnotě 45 kV. V grafu jsou opět patrné odchylky hodnot mezi simulacemi a měřeními, které již byly vysvětleny v kapitole 8.2. Překmány jsou opět s největší pravděpodobností způsobeny vysokou nelinearitou EGS ochrany, tak jak bylo již uvedeno v závěru kapitoly s jednovrstvou ochranou.

### 8.3 Model rozložení teploty podél EGS ochrany

Pro rozložení teploty podél EGS ochrany se opět použila geometrie z Obr. 8.6, tak jako v případě simulace napěťových poměrů. Teplotní rozložení pole v ustáleném stavu bylo simulováno podle rovnice (8.12):

$$\nabla \cdot (k\nabla T) + Q = 0, \quad (8.12)$$

kde T      teplota [K];  
 k        tepelná vodivost [ $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ ];  
 Q        měrné tepelné ztráty [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$ ].



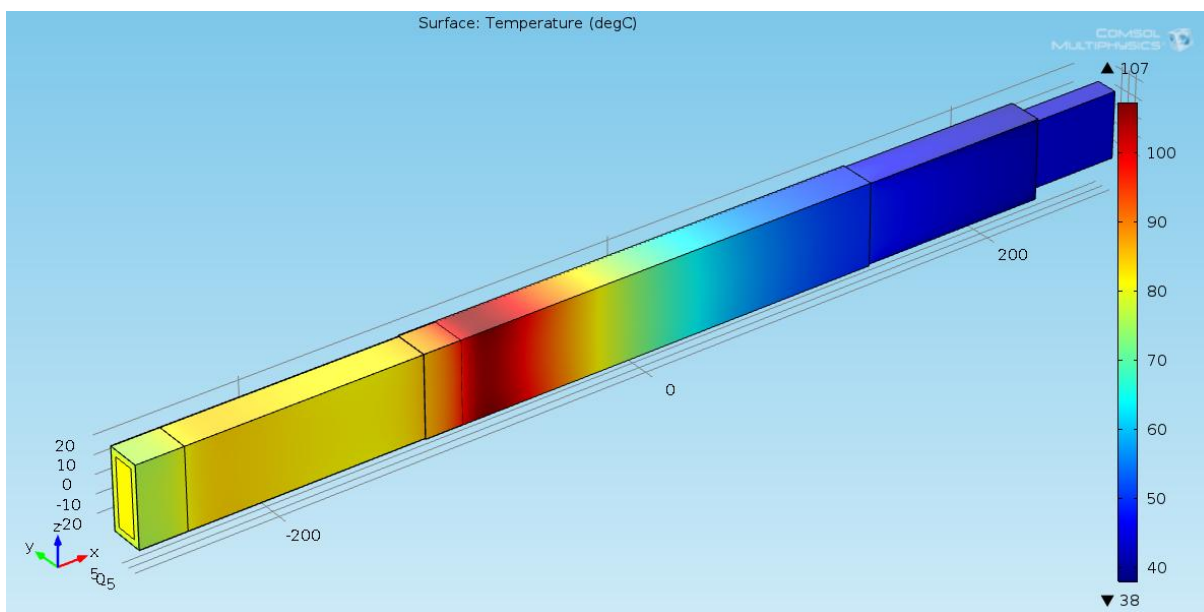
Přestup tepla se řídí pomocí rovnice (8.13):

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha (t - t_{\text{ext}}), \quad (8.13)$$

kde  $k$  tepelná vodivost [ $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ ];  
 $\alpha$  součinitel přestupu tepla [ $\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$ ];  
 $t$  teplota povrchu [ $^{\circ}\text{C}$ ];  
 $t_{\text{ext}}$  externí teplota [ $^{\circ}\text{C}$ ];

a člen  $\frac{\partial T}{\partial n}$  vyjadřuje derivaci teploty podle normálu.

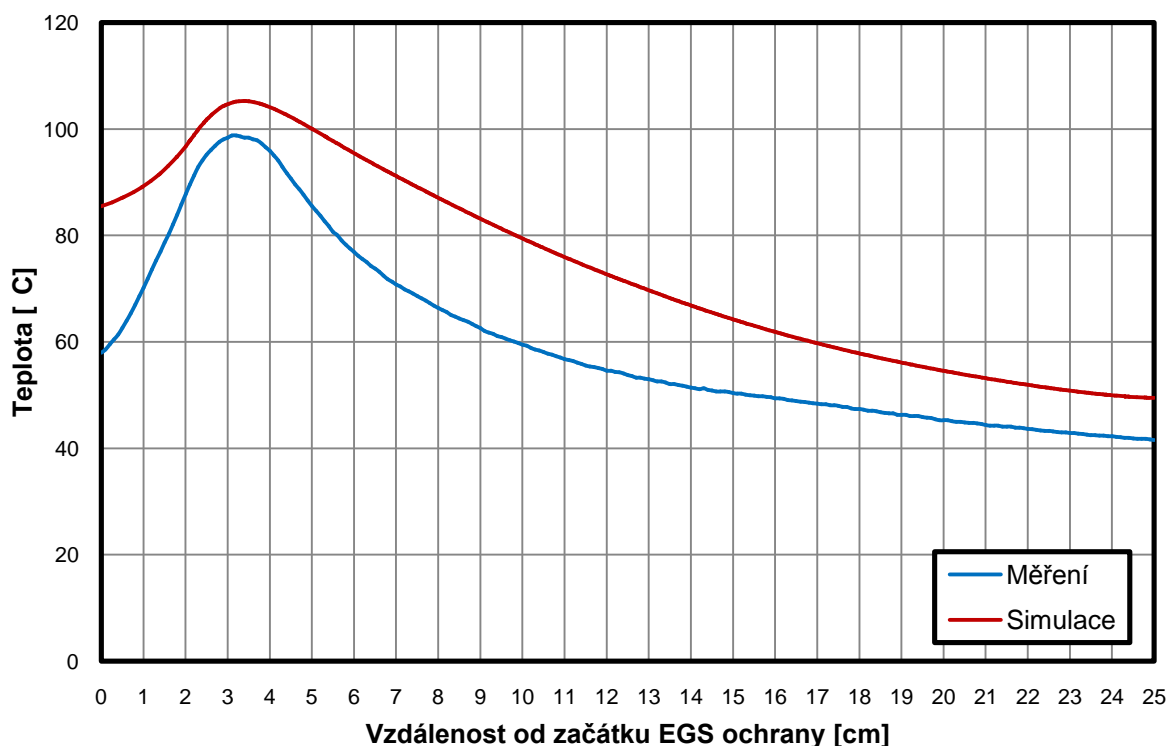
Materiálové konstanty jsem zadal podle *Tab. 8.1*. Hodnota hustoty EGS ochrany byla stejná jako hodnota hustoty hlavní izolace. Do globální definice simulace jsem opět vložil parametry ochrany typu 217.02, tzn. její závislost elektrické vodivosti na intenzitě elektrického pole a hodnotu elektrického napětí 45 kV, tzn. takovou hodnotu napětí, které bylo připojeno na ocelový trn při měření teplotního rozložení EGS ochrany na reálných vzorcích. 3D model rozložení napětí podél vzorku statorové tyče je zobrazen v *Obr. 8.8*. V grafu (*Obr. 8.9*) je uveden průběh teploty získaný ze simulace v porovnání s průběhem získaným měřením pomocí termokamery (viz kapitola 7.3).



*Obr. 8.8* 3D model rozložení teploty u EGS ochrany typu 217.02

Z průběhů, získaných při simulaci a při měření, které jsou vyneseny v grafu (*Obr. 8.9*) je patrná odlišnost. Simulace dosahuje svého maxima v hodnotě 105,3  $^{\circ}\text{C}$ , naměřené hodnoty v hodnotě 98,8  $^{\circ}\text{C}$ . Tento rozdíl mohl být způsoben měřením teploty, kdy při měření muselo z bezpečnostních důvodů dojít k odepnutí zdroje, uzemnění vzorku a pak až pořízení snímku.

Časové prodlení mohlo způsobit částečné vyhladnutí EGS ochrany. Z grafu je také patrné, že průběh simulace vykazuje mírnější pokles. Tento fakt lze připisovat nevhodně zvoleným materiálovým konstantám. Při návrhu stroje je nejdůležitější sledovat maximální hodnotu teploty, která se na EGS ochraně objeví. Z toho pohledu lze říci, že teplotní model dokáže s jistou odchylkou toto maximum určit.



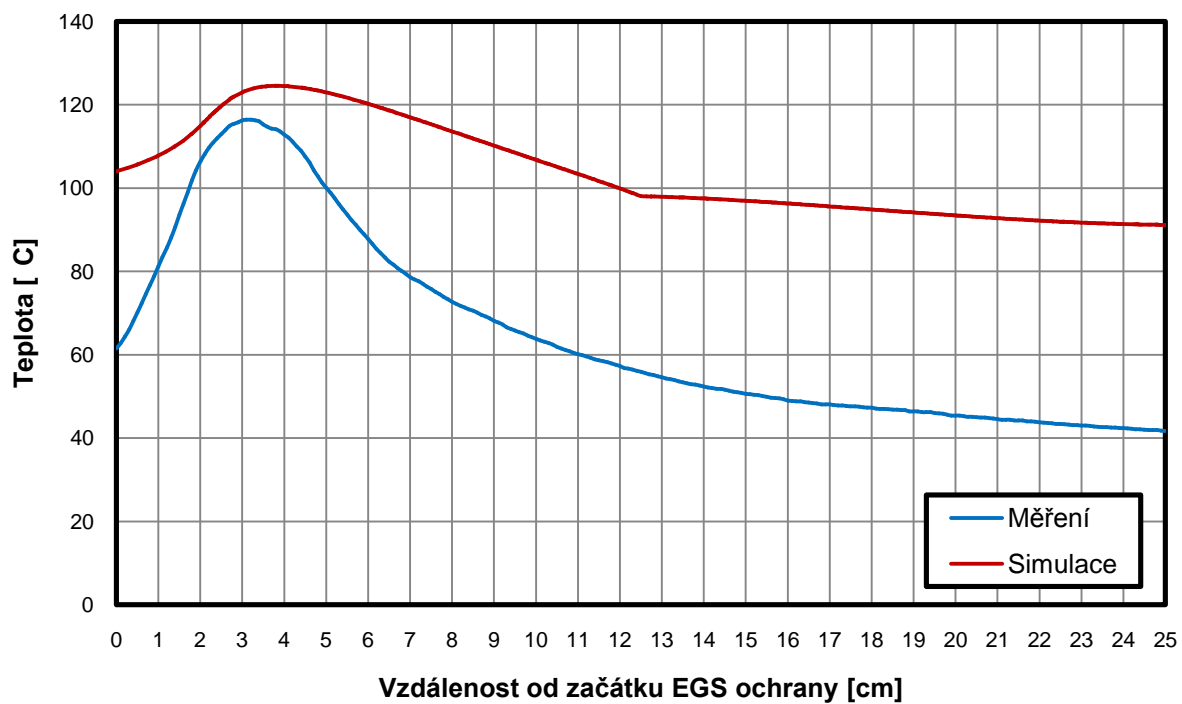
Obr. 8.9 Simulace a měření rozložení teploty podél EGS ochrany 217.02

### 8.3.1 Model rozložení teploty pro 2 vrstvou EGS ochranu

Pro simulaci rozložení teploty podél dvoustupňové ochrany 217.02 bylo použito geometrické uspořádání z Obr. 8.6. Parametry elektrické vodivosti byly ponechány tak, jak v případě simulace napětí u těžce dvoustupňové ochrany. Materiálové konstanty byly dosazeny podle Tab. 8.1. Simulace byla počítána opět pro hodnotu napětí 45 kV.

V grafu (Obr. 8.10) jsou zobrazeny průběhy simulace a měření podél dvoustupňové EGS ochrany.

Z grafů (Obr. 8.9 a Obr. 8.10) je vidět, že dvoustupňová EGS ochrana dosahuje vyšší hodnoty maximální teploty. Tento jev lze zdůvodnit tím, že nižší hodnota čtvercového odporu způsobuje, že místem poté protéká vyšší proud, který způsobuje vyšší ztráty a tedy oteplení podle rovnice (7.1).



Obr. 8.10 Simulace a měření rozložení teploty podél dvoustupňové EGS ochrany 217.02

## 9 Antikoronní ochrany na bázi organických polymerů

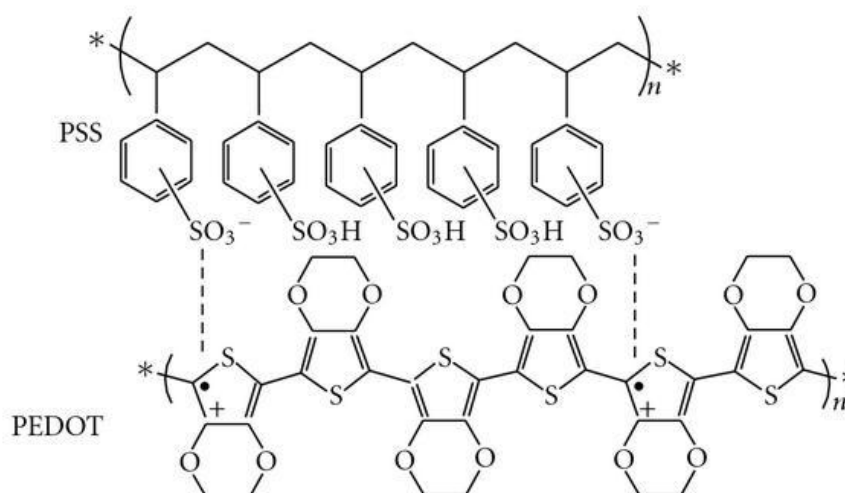
V současné době se pro EGS ochrany používají plniva hlavně na bázi SiC. Probíhají také výzkumy na použití plniv na základě mikrovaristorů, např. ZnO. Na Fakultě elektrotechnické ZČU v Plzni se v rámci projektu COPOMA zabývám možnostmi využití sloučenin na bázi organických materiálů PEDOT:PSS jako náhrady za konvenčně používané EGS ochrany založené na příměsích SiC.

### 9.1 PEDOT:PSS

PEDOT:PSS neboli poly (3,4-ethylenedioxythiophene) je polymerní směs dvou ionomerů patří do tzv. skupiny vnitřně vodivých polymerů. [44]

PSS značí složku polystyrenu sulfonátu sodného. Část skupiny sulfonilové se deprotonuje a nese záporný náboj. Druhá část PEDOT je konjugovaný polymer založený na polythiofenu a nese pozitivní náboj. Společně pak tyto dvě složky tvoří makromolekulární soli (*Obr. 9.1*). [45]

Tyto polymery vynikají svojí transparentností, dobrou vodivostí ( $90 - 5000 \Omega \cdot \text{cm}$ ) a minimální křehkostí. Uplatnění nachází v antistatických, elektrických a elektronických aplikacích. Používá se pro výrobu transparentních elektrod aplikovaných v dotykových obrazovkách nebo jako náhrada za oxid mangančitý jakožto katodový materiál v kondenzátorech. [46][47]



Obr. 9.1 Struktura PEDOT:PSS, převzato z [47]

V této práci byla zkoumána možnost použití PEDOT:PSS jako náhrady za konvenční materiály pro optimalizaci rozložení napětí podél statorové tyče, tzn. na místo materiálů na bázi karbidu křemíku. Měřeny byly V-A charakteristiky pro zjištění míry závislosti vodivosti na gradientu elektrického pole. Vzorky byly podrobeny strukturálním metodám - termogravimetrické analýze (TGA) a diferenční skenovací kalorimetrii (DSC), aby se zjistila teplotní odolnost zkoumaných materiálů.

## 9.2 Přehled zkoumaných vzorků organických polymerů PEDOT:PSS

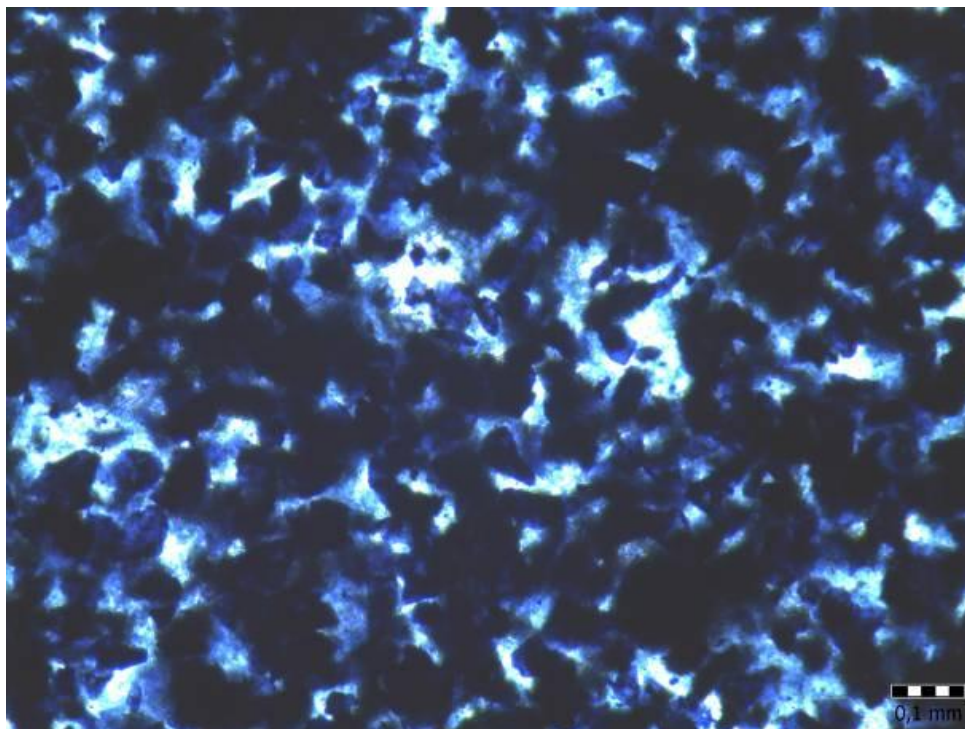
K testování bylo vybráno devět vzorků, které z prvotního měření povrchového odporu řádově splňovaly hodnoty odporů konvenčních ochran. V *Tab. 9.1* je uveden přehled vybraných vzorků s popisem aktivních látek. Komentář pod tabulkou vysvětluje složení aktivních látek. Poslední sloupce uvádí průměrnou tloušťku vrstev laku a jejich průřez, který je počítaný podle *rovnice (9.1)*. Zde je uveden pouze snímek vzorku 020813/2.

Silika PEDOT a silikagel PEDOT jsou nevodivá plniva (částičky oxidu křemičitého), které jsou opatřeny vodivou vrstvou na bázi PEDOT a rozmíchány v emulzi v uvedeném hm. poměru. Nivel je již ustálený obchodní název samonivelační hmoty. Např. vzorek 020813/2 je emulze tvořená 70 % suspenzí PEDOT:PSS ku 30 % pryskyřice, která byla smíchána v tvrdidlem typu 701 v poměru 100:35. Do této emulze bylo posléze přidáno plnivo silikagel PEDOT o hm. množství 10 %.

Tab. 9.1 Přehled zkoumaných vzorků organických polymerů PEDOT:PSS

Označení vzorku	Aktivní látka	Tloušťka [μm]	S [m <sup>2</sup> ]
300713/1	Emulze - 70/701/100:35 + bez nevodivého plniva	55,8	2,79·10 <sup>-6</sup>
300713/2	Emulze - 75/701/100:35 + silika PEDOT 5%	124,4	6,22·10 <sup>-6</sup>
300713/3	Emulze - 75/701 /100:35 + silika PEDOT 10%	125,6	6,28·10 <sup>-6</sup>
310713/1	Emulze - 75/701/100:35 + silikagel PEDOT 10%	191,4	9,57·10 <sup>-6</sup>
310713/2	Emulze - 75/701/100:35 + silikagel PEDOT 15%	220,2	1,10·10 <sup>-5</sup>
020813/2	Emulze - 70/701/100:35 + silikagel PEDOT 10%	187,8	9,39·10 <sup>-6</sup>
020813/3	Emulze - 70/701/100:35 + silikagel PEDOT 15%	251,4	1,26·10 <sup>-5</sup>
050813/1	Emulze - 75/AW100/100:38 + bez nevodivého plniva	60	3,00·10 <sup>-6</sup>
050813/3	Emulze - 75/701/100:35 + st PEDOT – Nivel 55%	959,2	4,80·10 <sup>-5</sup>

Emulze – poměr 1% suspenze PEDOT:PSS k pryskyřici/typ tvrdidla pryskyřice/poměr pryskyřice a tvrdidla + typ plniva s hm. množstvím v procentech



Obr. 9.2 Stereomikroskopický snímek vzorku 020813/2 v režimu procházejícího světla

### 9.3 Měření V-A charakteristik PEDOT:PSS

Jelikož se jednalo o první výzkum těchto laků, byly vzorky nanесeny na jiné geometrické uspořádání (skleněné destičky o rozměrech 100 x 150 mm, viz Obr. 9.3, nežli se měří dle normy SIB 14.07a, tzn. na sklotextitových trubkách [38]. Pro možnost porovnání byly zhotoveny vzorky s EGS laky P8001 a P8002 ve stejném geometrickém uspořádání. Následně byly tyto vzorky také změřeny a výsledky porovnány s daty získanými měřeními na sklotextitových trubkách, jak uvádí výše zmíněná norma. Toto měření bylo provedeno k ujištění, že geometrický tvar neovlivňuje velikost tekoucího proudu, posléze přepočteného na jednotkovou plochu aktivního průřezu vrstvy laku.

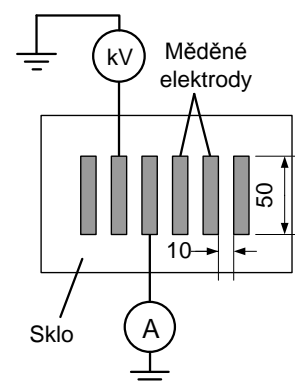
Vzorky PEDOT:PSS a vzorky laků P8001 a P8002 byly opatřeny samolepicími měděnými páskami s odstupem 10 mm a o délce 50 mm. Změřena byla jejich tloušťka na pěti místech a vypočten její aritmetický průměr.

Vzorky byly měřeny voltampérovou metodou ve stejnosměrném i střídavém poli. Schéma zapojení je uvedeno v Obr. 9.4, fotografie z měření je pak na Obr. 9.5. Na jednu elektrodu bylo přivedeno napětí 4,5 kV, které už bylo stanoveno pro měření konvenčních EGS ochran podle normy SIB 14.07a a posléze po ustálení proudu (pro jednotnost vždy po 3min intervalu) se snižovalo napětí a odečítal proud v napěťových krocích po 0,25 kV až do hodnoty 0,25 kV.

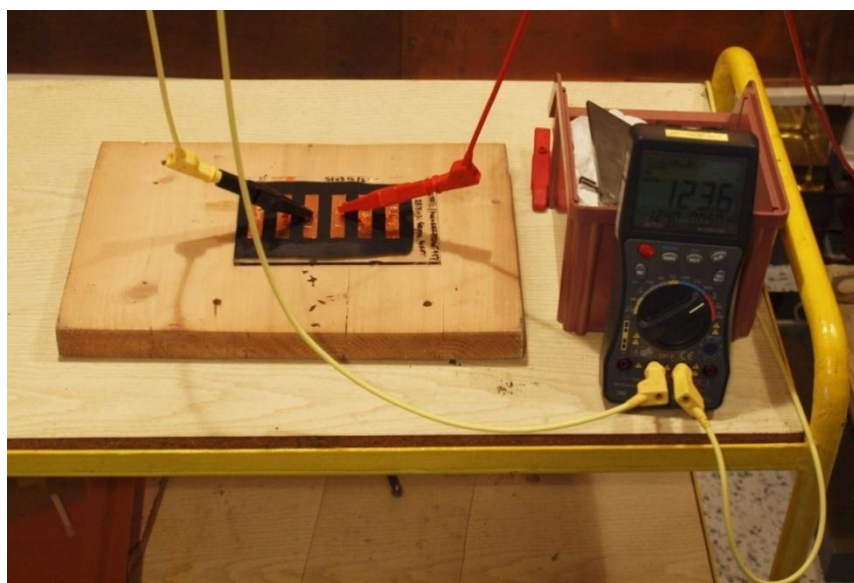




Obr. 9.3 Ukázka vzorku s nánosem PEDOT:PSS



Obr. 9.4 Schéma zapojení pro měření vzorků PEDOT:PSS V-A metodou



Obr. 9.5 Fotografie z měření vzorků PEDOT:PSS

### 9.3.1 Porovnání výsledků měření na obou variantách vzorků

Hodnoty V-A charakteristik laků P8001 a P8002 změřených na sklotextitových trubkách byly použity z kapitoly 6.2.2, kde byl rovněž přepočítány podle uvedených vzorců, aby se vyloučily délky elektrod a tloušťky vrstev laků a hodnoty se tak převedly na jednotkové hodnoty elektrické vodivosti. Hodnoty V-A charakteristiky laků změřených na skleněných destičkách zhotovených jako na Obr. 9.3 jsem přepočítal na měrné rezistivity podobně jako v kapitole 6.2.2. Aktivní průřez vrstvy, přes kterou tekl proud, se avšak spočítal pomocí rovnice (9.1):

$$S = d \cdot (t_2 - t_1), \quad (9.1)$$

kde	S	průřez, přes který tekł proud;
	d	délka elektrod (0,05 m);
	t <sub>1</sub>	tloušťka vzorku bez vrstvy laku;
	t <sub>2</sub>	tloušťka vzorku s vrstvou laku.

Výsledky měrných rezistivit laků změřených na sklotextitových trubkách a skleněných destičkách byly statisticky porovnány. Statistická významnost rozdílnosti uvažovaných modelů byla analyzována pomocí lineárního regresního modelu s umělými proměnnými. Umělé proměnné (z angl. dummy variable) mají přiřazenou pouze hodnotu 0 nebo 1 a poukazují na přítomnost nebo nepřítomnost určitého jevu. Hodnota 1 znamená příslušnost ke skupině A a hodnota 0 znamená příslušnost ke skupině B. Hladina významnosti  $\alpha$  byla v tomto případě uvažována 5 %. [48]

V Tab. 9.2 jsou uvedeny hodnoty lineárního regresního modulu a umělé proměnné (pomocné proměnné pro výpočet lineárního regresního modelu) pro EGS lak P8001, v Tab. 9.3 pro EGS lak P8002. Obr. 9.6 zobrazuje příklad průběhů rezistivit EGS laku P8001 s lineární regresí.

Tab. 9.2 Hodnoty lineárního regresního modelu s umělými proměnnými pro EGS lak P8001

<b>EGS lak P8001</b>				
	Alfa	5%		
<b>Regrese pro Trubku</b>				
	Nelinearita n	Úroveň K		
<b>Odhad parametru</b>	-1,779	16,535		
<b>Směr.odchylka</b>	0,069	0,128		
<b>Dolní mez</b>	-1,926	16,264		
<b>Horní mez</b>	-1,632	16,805		
<b>Regrese pro destičku</b>				
	Nelinearita n	Úroveň		
<b>Odhad parametru</b>	-1,962	16,834		
<b>Směr.odchylka</b>	0,109	0,201		
<b>Dolní mez</b>	-2,194	16,407		
<b>Horní mez</b>	-1,730	17,261		
<b>Regrese dohromady</b>				
	D	n*D	n	Úroveň K
<b>Odhad parametru</b>	-0,299	0,183	-1,962	16,834
<b>Směr.odchylka</b>	0,239	0,129	0,092	0,169
<b>Dolní mez</b>	-0,785	-0,081	-2,148	16,490
<b>Horní mez</b>	0,187	0,447	-1,775	17,178
<b>Rozdíl</b>	<b>NE</b>	<b>NE</b>		

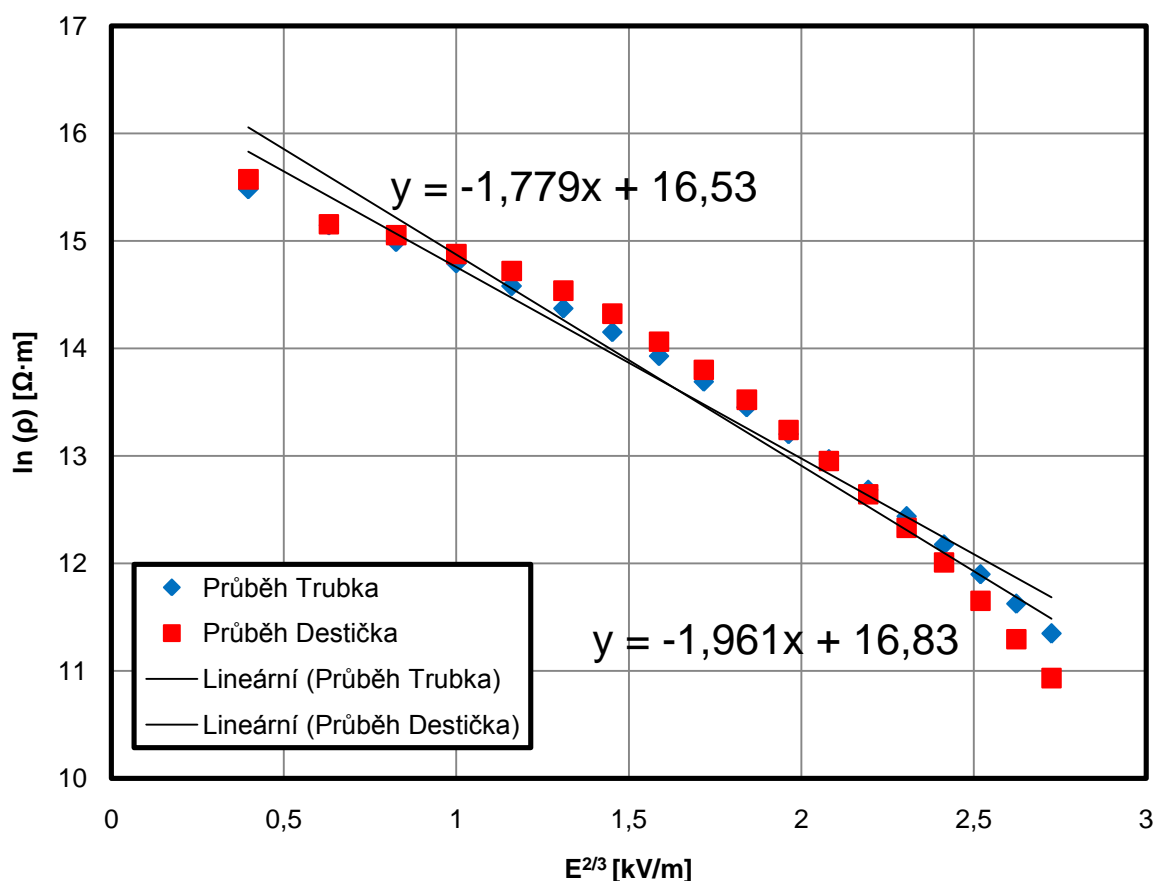


Tab. 9.3 Hodnoty lineárního regresního modelu s umělými proměnnými pro EGS lak P8002

<b>EGS lak P 8002</b>				
	Alfa	5%		
<b>Regrese pro Trubku</b>				
	Nelinearita n	Úroveň K		
<b>Odhad parametru</b>	-0,883	15,719		
<b>Směr. odchylka</b>	0,045	0,083		
<b>Dolní mez</b>	-0,978	15,543		
<b>Horní mez</b>	-0,787	15,895		
<b>Regrese pro destičku</b>				
	Nelinearita n	Úroveň K		
<b>Odhad parametru</b>	-0,766	15,893		
<b>Směr. odchylka</b>	0,054	0,100		
<b>Dolní mez</b>	-0,881	15,681		
<b>Horní mez</b>	-0,651	16,105		
<b>Regrese dohromady</b>				
	D	n*D	n	Úroveň K
<b>Odhad parametru</b>	-0,174	-0,117	-0,766	15,893
<b>Směr. odchylka</b>	0,130	0,071	0,050	0,092
<b>Dolní mez</b>	-0,439	-0,261	-0,867	15,706
<b>Horní mez</b>	0,091	0,027	-0,664	16,080
<b>Rozdíl</b>	<b>NE</b>	<b>NE</b>		

Ze získaných výsledků plyne, že rozdílné geometrické uspořádání vzorků po přepočtení na jednotkové hodnoty nemá výrazný vliv na jednotkové hodnoty elektrické vodivosti při daném přiloženém napětí. Tento závěr je patrný z lineárního regresního modelu s umělými proměnnými, jelikož součin horní a dolní meze je menší než jedna, řádek „Rozdíl“ vychází jako NE, jak je patrné v posledním řádku obou tabulek. Tento závěr platí jak pro nelinearity (směrnice), tak úroveň K.

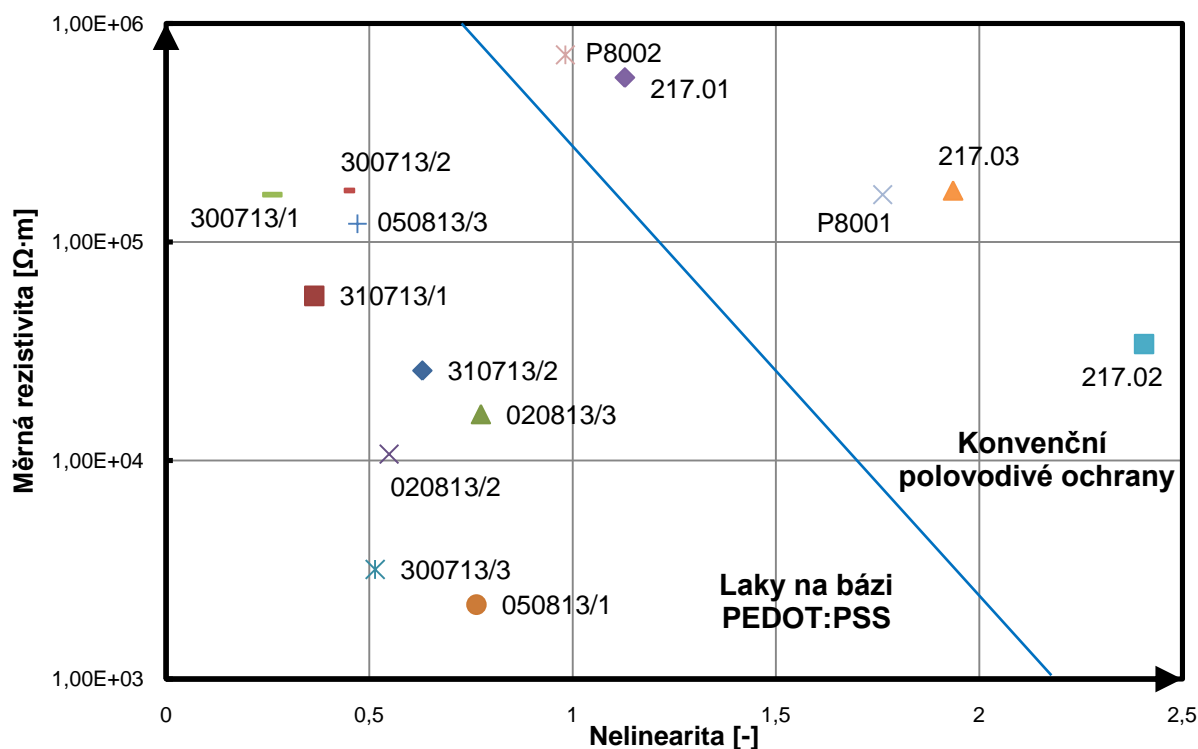
Lze tedy měřit laky PEDOT:PSS na skleněných destičkách a porovnávat je s konvenčními EGS ochranami, které se měřily na sklotextitových trubkách.



Obr. 9.6 Průběhy měření laků na sklotextitových trubkách a skleněných destičkách

### 9.3.2 Srovnání konvenčních EGS ochran s laky na bázi PEDOT:PSS

Závěry z kapitoly 9.3.1 dovolily použít geometrické uspořádání skleněných destiček pro měření antikoronních laků na bázi PEDOT:PSS. Změřené hodnoty V-A charakteristik postupem uvedeným v kapitole 9.3, byly přepočítány na závislost rezistivity na intenzitě elektrického pole podle vzorců a postupu uvedených v kapitole 6.2.2. Výsledné průběhy byly převedeny na hodnoty  $n$  a  $K$  jak je uvedeno v téže kapitole. Vzhledem k tomu, že u některých vzorků při připojení 4,5 kV docházelo k průrazu vrstvy laku z důvodu jeho velké vodivosti, byla pro lepší porovnatelnost zachována hodnota rezistivity vzorků při hodnotě připojeného napětí 3,75 kV. Tato hodnota tedy byla zvolena, jakožto nejvyšší možná, při které ještě nedošlo k průrazu vzorku. Graf v Obr. 9.7 zobrazuje porovnání konvenčních EGS laků se vzorky laků na bázi polymerních organických sloučenin PEDOT:PSS. Na vodorovné ose je vynesena nelinearita  $n$ , na svislé poté hodnoty rezistivity vzorků při připojení elektrického napětí o hodnotě 3,75 kV, tedy intenzitě elektrického pole  $3,75 \text{ kV}\cdot\text{cm}^{-1}$ .



Obr. 9.7 Srovnání konvenčních EGS ochran a vzorků na bázi PEDOT:PSS

Z grafu jsou patrné rozdíly mezi hodnotami měrných rezistivit konvenčních EGS ochran a hodnotami vzorků laků na bázi PEDOT:PSS. Zatímco hodnoty průmyslově používaných ochran se vyskytují v pravé horní části grafu, hodnoty nových testovaných vzorků se vyskytují spíše v dolní (nízká rezistivita) levé (nízká nelinearita) části grafu. Laky na bázi polymerních organických sloučenin z hlediska elektrických vlastností nemají srovnatelné parametry s používanými EGS ochranami založených na karbidu křemíku.

V následujících dvou kapitolách budou vzorky PEDOT:PSS zkoumány ještě metodami strukturální analýzy, konkrétně termogravimetrií a diferenční skenovací kalimetrií.

## 9.4 Strukturální metody

Strukturální metody se v elektrotechnické diagnostice využívají ke studiu složení a k analýze stárnutí materiálů. Tyto metody hodnotí okamžitý stav látky, které dodávají přímé informace týkající se reagujících složek a reakční energie.

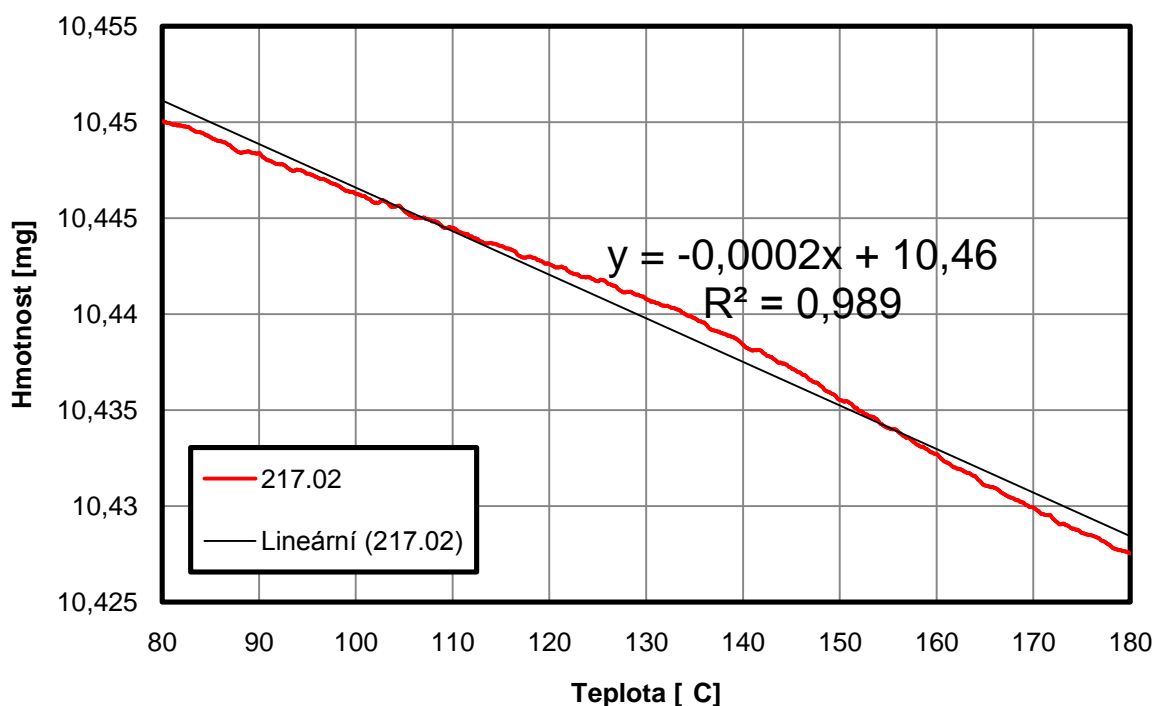
Strukturální analýzy patří k destruktivním metodám měření, avšak nejsou náročné na množství vzorku, které se pohybuje v řádech miligramů. Strukturální analýzy poskytují hodnoty s vysokou citlivostí a naměřená data mají výrazně menší rozptyl hodnot. Výsledné informace jsou poté výpovědischopnější. [49]

V této práci se ke zjištění teplotní odolnosti zkoumaných materiálů na bázi PEDOT:PSS použila termogravimetrie (TGA). Výsledky této analýzy nám pomohou určit, jak moc dojde k degradaci materiálů v závislosti na teplotě. Výsledky TGA těchto nových materiálů lze porovnat s konvenčně používanými a zjistit jejich vhodnost použití do stejné tepelné třídy F (155 °C). Lze zjistit, při jaké teplotě dochází k 3% relativnímu hmotnostnímu úbytku a tím pádem ke zničení vzorku.

Druhá metoda, diferenční skenovací kalorimetrie (DSC) nám může posloužit s určením, v jakých teplotách dochází u těchto materiálů k endotermním nebo exotermním reakcím.

#### 9.4.1 Vyhodnocení výsledků strukturálních metod a srovnání nových materiálů s konvenčními ochranami

Vyhodnocení výsledků probíhalo na základě směrnic, které se určovaly z poklesu hmotnosti vzorku. Směrnice (hodnota nelinearity) se vytvářely lineárním proložením hodnot v intervalu od 80 °C do 180 °C, podobně jako v kapitole 6.2.2. Ve vybraném intervalu teplot dochází jen k mírnému lineárnímu poklesu váhy vzorku. Navíc z výsledků TGA bylo zjištěno, že při do zvolené hodnoty 180 °C ještě nedochází k výraznému poklesu hmotnosti u žádného vzorku.



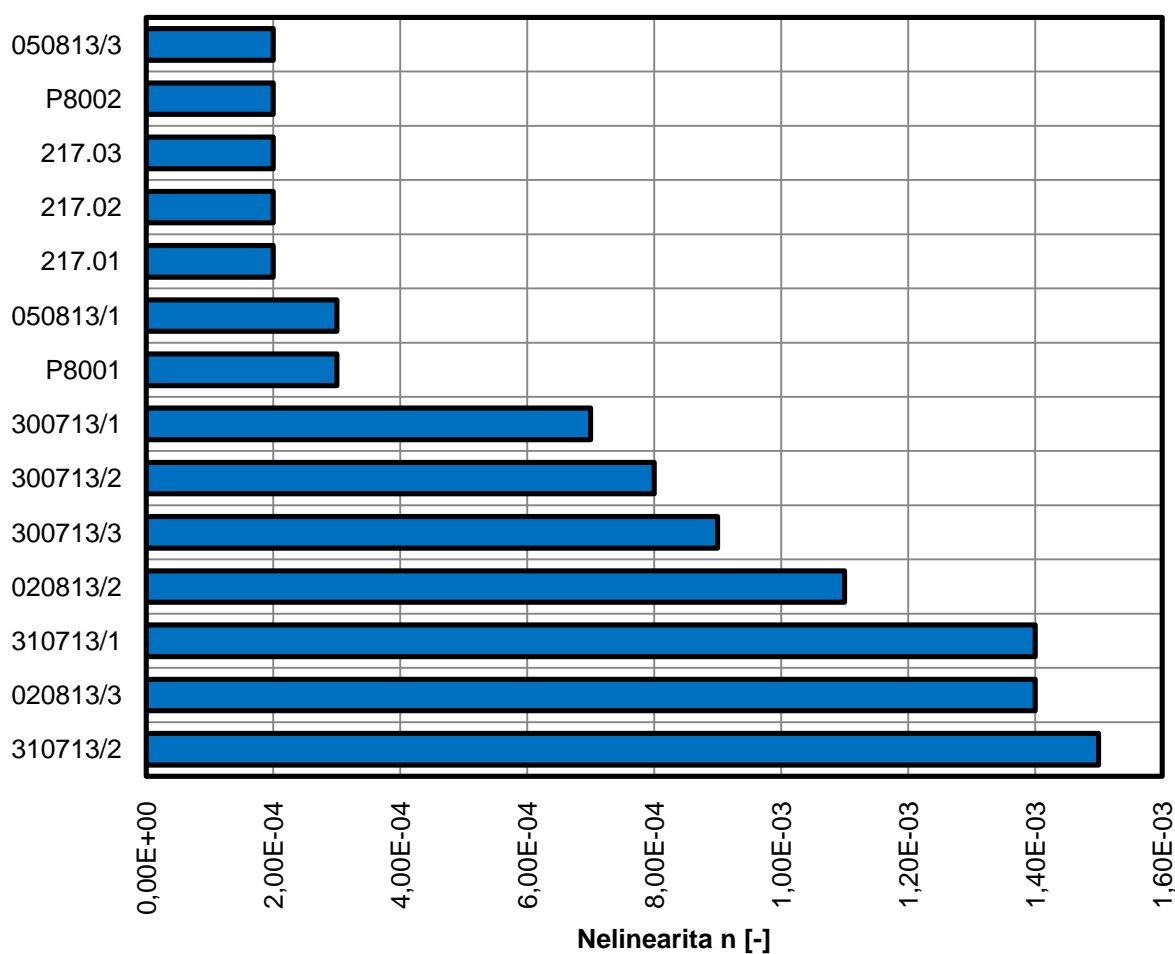
Obr. 9.8 Lineární proložení průběhu termogravimetrické analýzy

Na ose x (*Obr. 9.8*) je vynesena teplota tak, jak byl vzorek zahříván. Osa y zobrazuje pokles hmotnosti vzorku. Z rovnice zobrazené v grafu lze vyčíst směrnici (v tomto případě 0,0002), která představuje rychlost degradace vzorku v závislosti na teplotě. Ostatní nelinearity n vzorků jsou uvedeny v *Tab. 9.4*.

*Tab. 9.4 Nelinearity n získané z průběhů TGA*

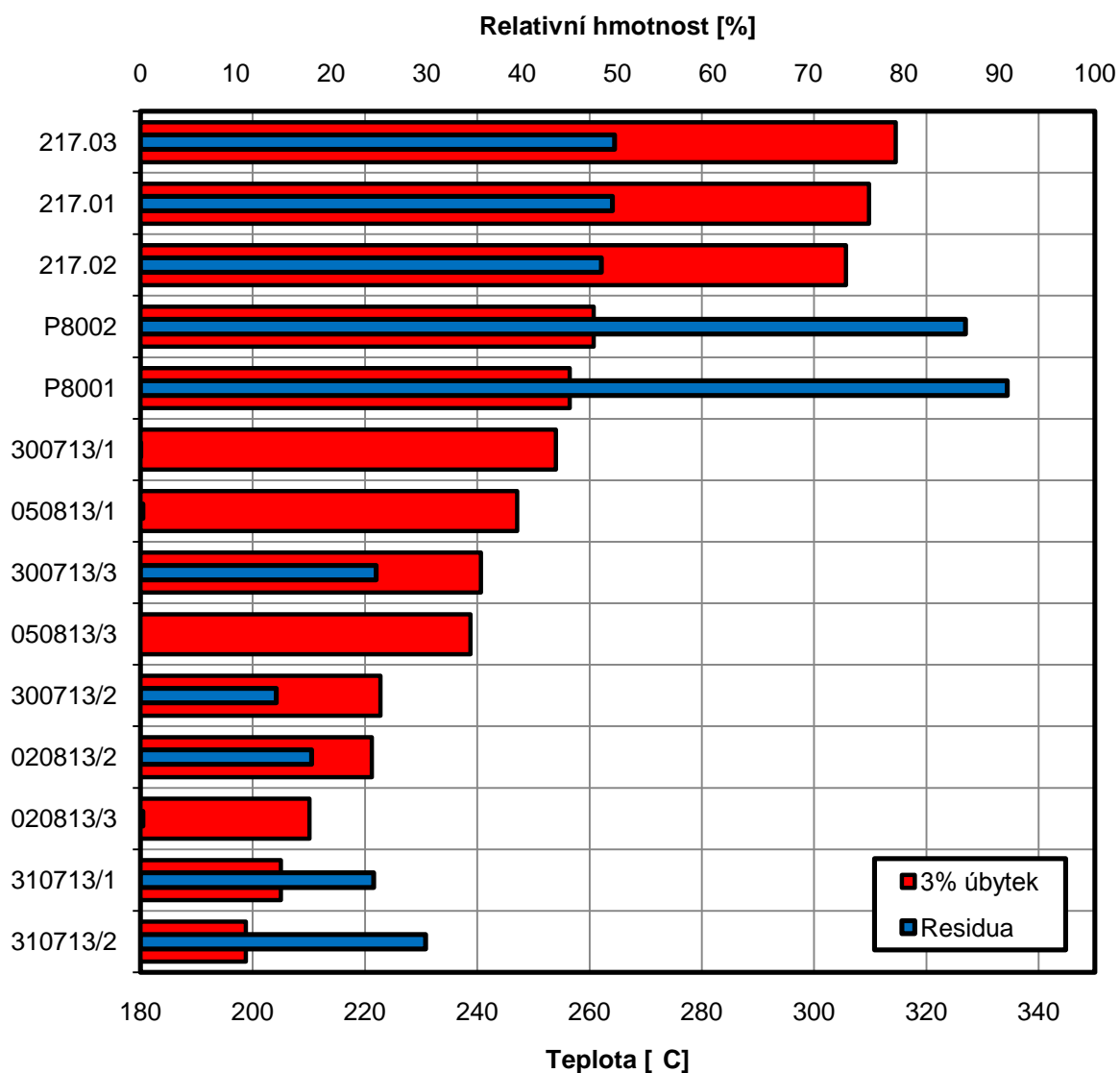
Označení vzorku	Nelinearita [-]	Označení vzorku	Nelinearita [-]
217.01	$2 \cdot 10^{-4}$	020813/2	$1,1 \cdot 10^{-5}$
217.02	$2 \cdot 10^{-4}$	020813/3	$1,4 \cdot 10^{-5}$
217.03	$2 \cdot 10^{-4}$	300713/1	$7 \cdot 10^{-4}$
P8001	$3 \cdot 10^{-4}$	300713/2	$8 \cdot 10^{-4}$
P8002	$2 \cdot 10^{-4}$	300713/3	$9 \cdot 10^{-4}$
050813/1	$3 \cdot 10^{-4}$	310713/1	$1,4 \cdot 10^{-5}$
050813/3	$2 \cdot 10^{-4}$	310713/2	$1,5 \cdot 10^{-5}$

Hodnoty směrnic získané z lineárního proložení se poté vynesli v grafu (*Obr. 9.9*).



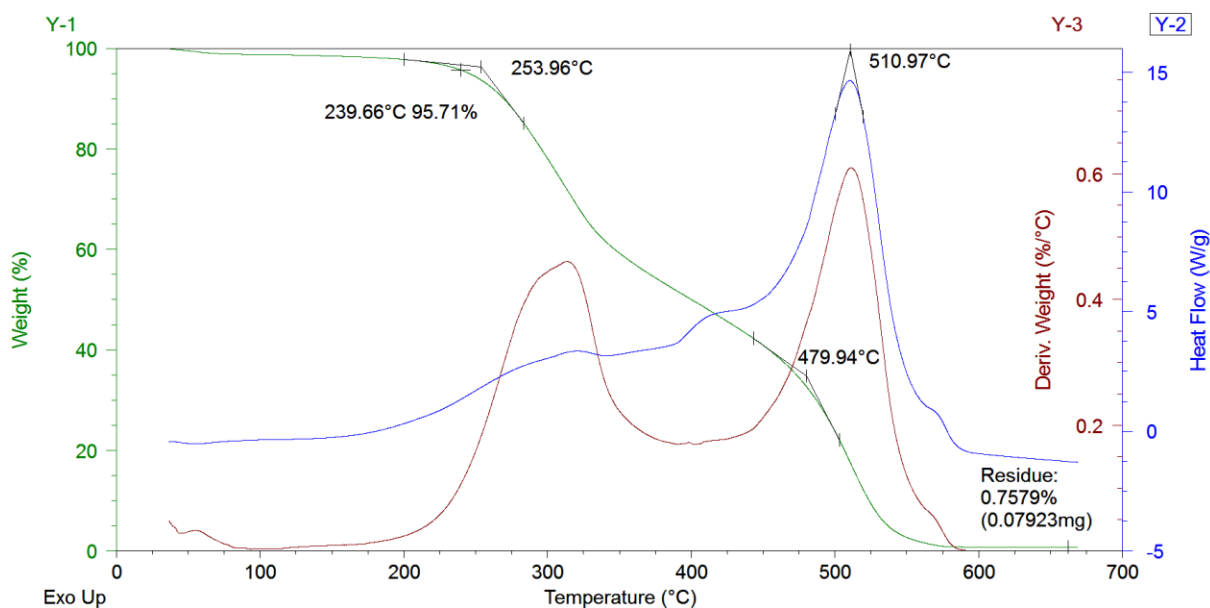
*Obr. 9.9 Grafické znázornění směrnic poklesů průběhů TGA*

Z grafu (*Obr. 9.9*) je patrné, že pouze dva vzorky na základě PEDOD:PSS (050813/1 a 050813/3) klesají podobnou strmostí jako konvenčně používané ochrany. Z toho je zřejmé, že ostatní laky na bázi PEDOT:PSS dosáhnou kritického 3% úbytku hmotnosti při nižší teplotě a tudíž dojde rychleji i k jejich destrukci. V následujícím grafu jsou uvedeny i hodnoty teplot, při kterých dojde k dosažení 3% úbytku.



*Obr. 9.10 Grafické znázornění hodnot residuí a teplot, při kterých dochází k 3% úbytkům hmotnosti*

Graf (*Obr. 9.11*) uvádí příklad průběhu TGA a DSC u vzorku 300713/1. Ostatní měření jsou uvedeny v příloze D.



Obr. 9.11 Průběhy STA a DSC u vzorku 300713/1

Do 100 °C dochází k hmotnostnímu úbytku, který je nejspíše způsoben navlhnutím materiálu, jelikož na křivce tepelného toku dochází v této oblasti k entalpickému poklesu, který je ustálen až po dosažení 100 °C. Vlhkost byla 1,29 % hmotnosti, tzn., že hodnota 3% úbytku byla v tomto případě až při 239,66 °C, tedy v 95,71 % hmotnosti vzorku. Začátek první reakce je při 253,96 °C a maximum hmotnostního úbytku dosahuje při 312 °C a k ustálení dojde při 340 °C. Poté začíná druhá reakce, která je složená ze dvou exotermních reakcí, kdy druhá reakce je doprovázena maximálním tepelným tokem i rychlostí hmotnostního úbytku. Hlavní izotermická reakce, která má maximum v 510,97°C, je podle průběhu tepelného toku jediná. Její začátek je při 479,94 °C. Zbytková hodnota relativní hmotnosti vzorku neboli residuum je 0,7579 %.

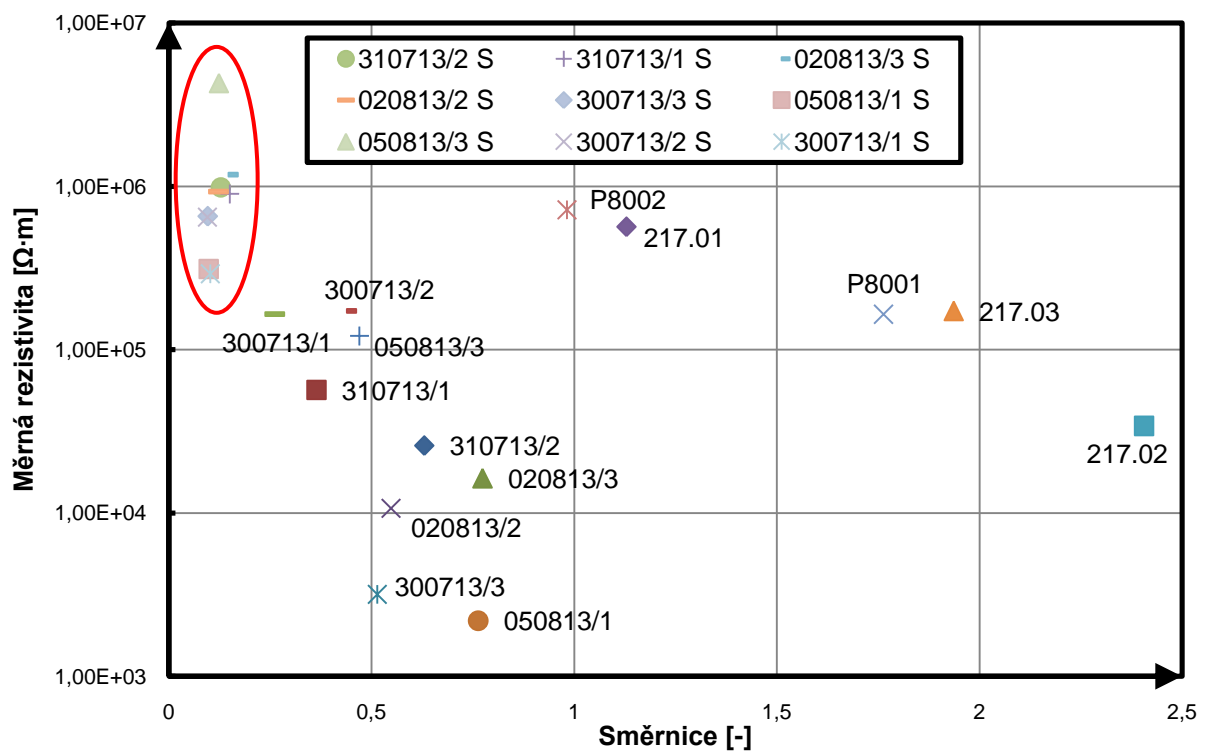
Výsledky získané strukturálními metodami již poukazují na patrné rozdíly v teplotní odolnosti materiálů na bázi organických polymerních sloučenin oproti konvenčním materiálům. Nicméně vzorky byly přesto podrobeny stárnutí v peci při 155 °C po dobu jednoho týdne, tak jako konvenční materiály. Výsledky jsou zobrazeny v grafu (Obr. 9.12). Z nich je patrný pokles nelinearity (snížení hodnot směrnice) a nárůst rezistivity. Z těchto závěrů lze tedy usoudit, že laky na bázi organických polymerů nejsou vhodné k použití u točivých strojů pro teplotní třídu F (155 °C).

Vzhledem k tepelné odolnosti zkoumaných vzorků lze materiály na bázi PEDOT použít v aplikacích, při kterých nevznikají velké tepelné ztráty (např. nízkonapěťová elektronika) nebo ve kterých nedochází k takovým ohřevům. Výhodou tohoto materiálu je

relativně snadná úprava jeho vodivosti metodami chemických syntéz nebo dodatečným dopováním.

V elektronice lze použít tyto materiály pro výrobu vodivých cest nebo funkčních vrstev, např. senzitivní vrstvy pro senzory vlhkosti nebo polovodičové vrstvy v tranzistorech.

PEDOT:PSS lze také využít ve stavebnictví jako polovodivý antistatický nátěr na podlahy, který zabraňuje elektrostatickým výbojům v průběhu produkce elektronických součástek.



Obr. 9.12 Srovnání konvenčních EGS ochran, vzorků na bázi PEDOT:PSS a stárnutých vzorků na bázi PEDOT:PSS



## 10 Přínosy disertační práce

EGS ochrany v synchronních generátorech slouží jako ochrany proti částečným výbojům a jejich správná funkce přispívá k jeho bezproblémovému provozu a prodloužení životnosti celého stroje. V průběhu mezioperačních zkoušek bývá zkušební napětí několikanásobně vyšší než jmenovité a EGS ochrany jsou taky vystaveny mnohem vyššímu namáhání. Aplikací vhodného typu a zvolením správného uspořádání ochrany lze optimalizovat průběh rozložení napětí podél cívky z výstupu vinutí z čel a omezit částečné výboje v těchto místech. Práce proto na úvod shrnuje všechny dostupné typy EGS ochran dodávaných od různých výrobců.

Pro zjištění chování EGS ochran po připojení napětí byly vyrobeny vzorky statorových tyčí (viz. kapitola 5), na kterých byly měřeny napěťové poměry při různých délkách a typech těchto EGS povlaků v rozsahu, které zatím nebylo publikováno. Celkem bylo změřeno 35 základních druhů ochran na napěťových hladinách od 5 kV do 45 kV (viz kapitola 7), posléze i různé kombinace dvou druhů EGS ochran, které jsou uvedeny v Příloze C. S tímto se pojil i třetí bod práce, ve kterém bylo měřeno rozložení teplot na stejném počtu vzorcích. Tato data posléze posloužila k vytvoření matematického modelu, který by byl porovnatelný s experimentálně naměřenými daty. Matematický model byl vytvořen v programu COMSOL Multiphysic pracující s metodou konečných prvků. Simulováno bylo rozložení elektrického napětí a teploty podél vzorků. Ze srovnání simulovaných a reálně naměřených výsledků lze vyvodit, že průběhy napětí jsou shodné do určité vzdálenosti od konce magnetického obvodu. Od této vzdálenosti se odchylka naměřených dat od simulovaných dat zvyšuje. To lze přičíst zvyšujícímu se vlivu impedance měřicího přístroje se zvyšujícím se napětím. Srovnání simulace a reálného měření v případě rozložení teploty vykazuje menší rozdíly. U rozložení teploty se nasimulovaná data přibližují reálným datům s mnohem menší odchylkou než v případě rozložení napětí. V Obr. 8.9 a v Obr. 8.10 jsou uvedeny nasimulované a reálně změřené průběhy u jednodušné EGS ochrany 217.02 a u dvoustupňové EGS ochrany 217.02. Z těchto grafů vyplývá, že při nejvyšší teplotě (tedy teplotě určující odolnost ochrany) dochází k odchylce do 8 %. Model navíc umožňuje relativně snadno měnit všechny parametry EGS ochran a přispět tak k zefektivnění jejich optimálního návrhu.

Práce se zabývala i novou možností použití koronové kamery. Dnes není nutné použít pouze termokameru ke zjištění správné funkce EGS ochrany. Kapitola 7.4 pojednává o

měření statorových vzorků koronovou kamerou, kdy se tak hledají přesná místa vzniku částečných výbojů. Vůbec poprvé bylo tedy publikováno, že optimální navrhnutí lze zkoumat koronovou kamerou a, že některé slyšitelné projevy korony nezpůsobuje špatně navržená EGS ochrana, nýbrž geometrické uspořádání vzorků a ostré hrany ocelových trnů.

V průběhu provozu stroje je EGS ochrana vystavena také tepelnému stárnutí. Bylo zjištěno, že u EGS pásek dochází již od prvního cyklu stárnutí (168 hodin) při 155 °C k poklesu vodivosti a nelinearity. K opačnému jevu dochází u EGS laků, kdy dojde ke zvýšení vodivosti i nelinearity. U těchto laků lze však v průběhu stárnutí pozorovat zvýšení křehkosti.

V současné době se pro omezení částečných výbojů používají pouze EGS ochrany s plnivý karbidy křemíku. Je prováděn výzkum také pro použití mikrovaristorů sintrovaných ze zrn ZnO. V této práci byl proveden výzkum možnosti použití nových laků na úplně nové bázi organických polymerů (PEDOT:PSS). Voltampérovou metodou byla měřena elektrická vodivost a poté i teplotní vlastností pomocí metod TGA a DSC. Ze závěrů vyplynulo, že ačkoli průběhy V-A charakteristik těchto ochran vykazují jistou nelinearitu a měrnou rezistivitu lze poměrně snadno přizpůsobit, tak teplotní stálost je stále relativně nižší než u konvenčně používaných EGS ochran. Zatím se tedy tyto laky v tomto stádiu vývoje pro teplotní třídy F (155 °C) použít nedají.

Za původní a přínosné lze v této práci považovat:

- Provedení komplexního proměření rozložení napětí podél vzorků statorových tyčí pro více než 40 různých kombinací EGS ochran.
- Vytvoření matematického modelu v 3D provedení pro výpočet napěťových a teplotních poměrů u výstupu vinutí z čel generátorů a porovnání hodnot získaných měření s výsledky získanými matematickým modelem. Rozšíření matematického modelu o výpočet rozložení napětí a teploty pro dvoustupňovou EGS ochranu. Model dvoustupňové EGS ochrany zatím dle mých informací nebyl dosud nikde publikován. Vypracovaný matematický model může být využíván v praxi pro návrh provedení EGS ochran.
- Na laboratorních vzorcích změření rozložení teploty bezkontaktní metodou pomocí dvou termokamer včetně vnesení hodnot do grafu a provedení porovnání získaných výsledků s výsledky matematického modelu.

- Poprvé použití koronové kamery pro lokalizaci povrchových výbojů podél statorových tyčí s možností pohotového určení místa výskytu výbojů.
- Ověření vlivu zvýšené teploty (155 °C) nastav EGS ochran, které jsou deklarovány pro teplotní třídu 155 se zjištěním změn elektrických vlastností.
- Ověření možnosti použití 9 nových materiálů na bázi organických polymerů typu PEDOT:PSS jako EGS ochran. Dosud nebyly zjišťovány vlastnosti těchto materiálů z hlediska uvedené aplikace.

## 11 Závěr

V průběhu provozu velkého točivého stroje může dojít při nesprávném návrhu EGS ochrany ke vzniku částečných výbojů u výstupu vinutí z čel. Tento fakt může vést až k odstávce stroje a k finančním ztrátám pro jeho provozovatele. Z tohoto hlediska je nutné, aby EGS ochrana byla optimálně navržena. Pro takový návrh je nutné znát chování EGS ochrany v průběhu provozu stroje, kdy je vystavena několika druhům namáhání - elektrickému, tepelnému a mechanickému. Toto chování se navíc mění při stárnutí použitého materiálu.

Ideálním případem pro výrobce velkých točivých strojů by byl stav, kdyby se za použití programu dala vypočítat konkrétní délka EGS ochrany a její typ pro dané geometrické uspořádání stroje a pro jeho jmenovité napětí. V této práci byl řešen postup, kdy zadáním parametrů EGS ochrany lze modelovat rozložení napětí a teploty podél její délky. Tento stav zatím není optimální, nicméně bylo zjištěno, že porovnáním naměřených a simulovaných dat se došlo k relativně srovnatelným výsledkům. To umožňuje zjednodušení návrhu EGS ochrany, kdy lze pomocí modelu zjistit, jestli ochrana bude za daných podmínek plnit svoji funkci a nedojde k její destrukci.

Správnou funkci EGS ochrany lze také určit pomocí koronové kamery. Tato nově použitá diagnostická metoda umožnila zjistit, že zvukový projev částečných výbojů nemusí být vždy způsoben špatně navrženou EGS ochranou, ale někdy samotným ocelovým trnem nebo nevhodným způsobem kontaktování vzorků.

Rozpracována byla také problematika použití EGS ochran nejen na bázi plniv karbidu křemíku, ale také organického polymeru na základě PEDOT:PSS. Závěry prvního výzkumu sice nevyznívají pro použití tohoto materiálu u velkých točivých strojů pozitivně, avšak z prvního pohledu lze vidět jisté podobnosti a existuje zde možnost pro další vývoj, který nakonec může vést k průmyslovému využití u točivých strojů.

## Literatura

- [1] MAYER, Daniel; ULRYCH, Bohuš. *Numerická analýza návrhu antikoronního nelineárního polovodiivého povlaku na povrchu vinutí vysokonapěťových elektrických strojů*. Elektrotechnický časopis. 1977, 4, s. 241-260.
- [2] ROBERTS, A. *Stress Grading for High Voltage Motor and Generator Coils*. IEEE. 1995, 1, s. 26-31.
- [3] KUČERA, Jaroslav; HAPL, Josef. *Vinutí elektrických strojů točivých*. Praha: Československé akademie věd, 1959. 900 s.
- [4] MAYER, Daniel; KROPIK, Petr. *Optimization of Antiflashover Semiconductive Coating in Winding of Synchronous Machines*. IGTE Symposium, Graz. 2006, 1, s. 245-249.
- [5] WEI, M, J SPECK a S GROSSMAN. *Computational Methods for Designing of End-winding Corona Protection*. ISH 2013, 18th International Symposium of High Voltage Engineering. 2013, 1023-1028, s. 6..
- [6] SCHMERLING, Rolf, Frank JENAU, Stefan KEMPEN a Friedhelm POHLMANN. *Evaluation and comparison of measurement methods for determining the electrical potential at surfaces by using the example of end corona protection configuration*. ISH 2011, 17th International Symposium on High Voltage Engineering. 2011, roč. 17.
- [7] KIUCHI, K., S. MATSUOKA, A. KUMADA, H. IKEDA, K. HIDAKA, Y. TSUBOI, K. USHIWATA, Y. ISHIKAWA, S. YAMADA a T. YOSHIMITSU. *The potential distribution measurement on the stress grading system of high-voltage rotating machines by using pockels effect*. 2012 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. 2012. DOI: 10.1109/ceidp.2012.6378755..
- [8] ČSN EN 50209. *Zkoušení izolace tyčí a cívek vysokonapěťových strojů*. Praha: Český normalizační institut, 1998.
- [9] ČSN EN 60034-1 ed 2. *Točivé elektrické stroje – Část 1: Jmenovité údaje a vlastnosti*. Praha: Český normalizační institut, 2011.
- [10] STAUBER, Jiří. *Funkční hodnocení izolačních systémů a cesty vedoucí k vyššímu využití*. Diagnostika '03. 2003, s. 278-281..
- [11] ALLISON, J.A. *Understanding the need for Anti-corona materials in High Voltage Rotating machines*. IEEE. 2000, 1, s. 860-863.

- [12] CHRISTEN, Thomas, Lise DONZEL a Felix GREUTER. *Nonlinear resistive electric field grading part 1: Theory and simulation*. IEEE Electrical Insulation Magazine. 2010, vol. 26, issue 6, s. 47-59. DOI: 10.1109/mei.2010.5599979..
- [13] SHARIFI, Emad, Shesha JAYARAM a Edward CHERNEY. *Temperature and electric field dependence of stress grading on form-wound motor coils*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2010, vol. 17, issue 1, s. 264-270. DOI: 10.1109/tdei.2010.5412026.
- [14] MENTLÍK, Václav, et al. *Diagnostika elektrických zařízení*. Praha: BEN, 2008. 440 s. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [15] ZÁLIŠ, Karel. *Částečné výboje v izolačních systémech elektrických strojů*. Praha: Academia, 2005. 135 s. ISBN 80-200-1358-X.
- [16] SCHULER, R.H. *Report on diagnosis and monitoring for evaluation the condition of windings of rotating electrical machines*. Electra. 1987, 112, s. 9-16.
- [17] BRUTSCH, Rudolf; HILLMER, Thomas. *Corona Protection in Rotating High Voltage Machines*. Inductica. 2006, 1, s. 1-6.
- [18] STONE, Greg C., et al. *Electrical Insulation for Rotating Machines : Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair*. Toronto: A JOHN WILEY & SONS, INC., 2004. 371 s. ISBN 0-471-44506-1.
- [19] VEVERKA, Antonín. *Technika vysokého napětí*. Praha: SNTL, 1978. 296 s
- [20] ŠMÍDA, Jan. -. Plzeň, 1976. 47 s. Diplomová práce. VŠSE - Fakulta elektrotechnická
- [21] HAFNER, B.; GSELLMANN, H.; MAREK, P. *Corona Resistant Conductive Materials*. Isovolta AG. -, 1, s. 1-6
- [22] VON ROLL. Data Sheet: *CoronaShield SC 217.21* [online]. [cit. 2014-10-17]. Dostupné z: [http://www.sibel.bg/upl\\_doc/CoronaShield%20SC%20217.21-EN.pdf](http://www.sibel.bg/upl_doc/CoronaShield%20SC%20217.21-EN.pdf)
- [23] WOHLRÁB, Robin. *Způsoby minimalizace částečných výbojů u vinutí točivých strojů*. Plzeň, 2013. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Ondřej Krpal.
- [24] MAYER, Daniel. *Potlačení vzniku korony ve statorovém vinutí synchronních strojů pomocí nelineárních polovodivých povlaků*. Diagnostika '05. 2005, 1, s. 354-357.
- [25] ERIKSSON, Goran, Helena GREIJER, Manoj PRADHAN a Mikael UNGE. *Stress dependent conductivity of field grading materials under time varying electrical fields*. 2012 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. 2012. DOI: 10.1109/ceidp.2012.6378747.

- [26] VLASOV, A. S. *Refractories and industrial ceramics*. New York: Springer Publishing, 1991.
- [27] HARRIS, Ed. by Gary L. *Properties of silicon carbide*. London [u.a.]: INSPEC, 1995. ISBN 08-529-6870-1..
- [28] TRUONG, Dinh Hung. *Moderní polovodičové součástky ve výkonové elektronice*. 2012. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Pavel Drábek.
- [29] CHEUNG, Rebecca. *Silicon carbide microelectromechanical systems for harsh environments*. Hackensack, NJ: Distributed by World Scientific Pub., c2006, x, 181 p. ISBN 18-609-4624-0.
- [30] MÅRTENSSON, E.; GÄFVERT, U.; ONNEBY, C. *Alternate current characteristic of SiC powders*. Journal of Applied Physics. 2001, 1, s. 2870-2878.
- [31] MÅTERSSON, Eva. *Modelling electrical properties of composite materials*. Stockholm, Sweden, 2003. Kungl Tekniska Högskolan. Department of Electrical Engineering.
- [32] MALAMUD, R.; CHEREMISOV, I. *Mechanism of Funcionality of Semiconductive Materials and Reliable Anti-Corona Protection Designs of High-Voltage Generator Windings*. IEEE. 2007, 1, s. 580-583
- [33] DONZEL, L., et al. *Silicone Composites for HV Applications based on Microvaristors*. IEEE. 2004, 1, s. 403 - 406
- [34] WHEELER, J.C.G., A.M. GULLY, A.E. BAKER a F.A. PERROT. *Thermal performance of stress grading systems for converter-fed motors*. IEEE Electrical Insulation Magazine. 2007, vol. 23, issue 2, s. 5-11. DOI: 10.1109/mei.2007.357804.
- [35] RIVENC, Jean P.; LEBEY, Thierry. *An Overview of Electrical Properties for Stress Grading Optimization*. IEEE. 1999, 6, s. 309-318
- [36] ČSN EN 60085 ed.2.. *Elektrické izolace – Tepelné hodnocení a značení*. Praha: Český normalizační institut, 2008
- [37] ČSN EN 60216-1 ed.2.. *Elektroizolační materiály – Vlastnosti tepelné odolnosti – Část 1: Proces stárnutí a vyhodnocení výsledků zkoušky*. Praha: Český normalizační institut, 2008
- [38] Halbleitende Glimmschutzbander : *Strom-Spannungsverlauf vom Glimmschutzbelag*. - : Isola, 1978. 3 s
- [39] TECHNOLOGIES AGILENT. *Microwave dielectric spectroscopy workshop*. 2000-2012.

- [40] FRYBERT, Jan. *Počítačové modelování a analýza dielektrických spekter*. Brno, 2010. Diplomová práce. Vysoké učení technické. Vedoucí práce Martin Frk.
- [41] MENTLÍK, Václav. *Dielektrické prvky a systémy*. Praha: BEN, 2006. 240 s. ISBN 80-7300-189-6.
- [42] MAYER, Daniel. *Criteria for the Suppression of Corona in Winding of AC Machines*. - , 1, s. 1-6
- [43] STAUBACH, C, S KEMPEN, F POHLMANN a F JENAU. *Electrical-thermal optimization of end corona protection on large rotating machines by use of numerical optimization algorithm based on FEM*. ISH 2011, International Symposium on High Voltage Engineering. 2011.
- [44] DZUGAN, Tomas, Tomas BLECHA, Ales HAMACEK, Michael KROUPA a Jan REBOUN. *Electrical properties of PEDOT*. 2009 32nd International Spring Seminar on Electronics Technology. 2009, s. 629-638. DOI: 10.1109/isse.2009.5207058.
- [45] GROENENDAAL, L., F. JONAS, D. FREITAG, H. PIELARTZIK a J. R. REYNOLDS. *Poly(3,4-ethylenedioxythiophene) and Its Derivatives: Past, Present, and Future*. Advanced Materials. 2000, vol. 12, issue 7, s. 481-494. DOI: 10.1002/(sici)1521-4095(200004)12:7<481::aid-adma481>3.0.co;2-c.
- [46] PRETL, Silvan, Aleš HAMÁČEK, Jan ŘEBOUN, Jiří ČENGERY, Tomáš DŽUGAN a Michael KROUPA. *Electrical characterization of PEDOT:PSS*. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=5642839>.
- [47] ODHIAMBO, Sheilla, Carla HERTLEER, Lieva VAN LANGENHOVE a Gilbert DE MEY. *Comparison of Commercial Brands of PEDOT:PSS in Electric "Capattery" Integrated in Textile Structure*. MIXDES 2013, 20th International Conference. 2013, s. 389-392. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6613380>.
- [48] ŠEDIVÁ, Blanka. Osobní konzultace: Statistik.
- [49] BABKOVÁ, Petra. *Využití strukturálních analýz při charakterizaci tepelného rozkladu elektroizolačních materiálů*. Plzeň, 2013. Dostupné z: [file:///C:/Documents%20and%20Settings/Administrator/Dokumenty/Downloads/E11N0001P-Petra\\_Babkova.pdf](file:///C:/Documents%20and%20Settings/Administrator/Dokumenty/Downloads/E11N0001P-Petra_Babkova.pdf). Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Radek Polanský.
- [50] TRNKA, Pavel. *Problematika ochranných vrstev vinutí elektrických točivých strojů při pulzním namáhání*. Electroscope. 2008.



- [51] MACKENZIE, R. C., Michael E. BROWN a R. C. MACKENZIE. *Misleading nomenclature. Journal of Thermal Analysis*. 1978, vol. 13, issue 1, s. 609-614. DOI: 10.1007/978-3-0348-7413-7\_54.
- [52] SPEYER, R. F. *Thermal analysis of materials*. New York: Marcel Dekker, Inc., 1994.
- [53] MENTLÍK, Václav a Radek POLANSKÝ. *Aspekty strukturální elektrotechnologické diagnostiky*. Časopis Elektro. 2008.
- [54] V.S. RAMACHANDRAN, Ralph M. PAROLI, James J. BEAUDOIN a Ana H. DELGADO. *Handbook of Thermal Analysis of Construction Materials*. ISBN 10.1016/b978-081551487-9.50005-0.
- [55] WENDLANDT, Wesley William. *Thermal analysis*. 3rd ed. New York: Wiley, c1986, xviii, 814 p. ISBN 04-718-8477-4.
- [56] INSTRUMENTS, TA. Q series thermal analyzers. 2006.
- [57] PETROV, G/N. *Elektrické stroje*. Praha: Academia, 1980. 388 s.
- [58] PETROV, G/N. *Elektrické stroje 2*. Praha: Academia, 1982. 732 s.
- [59] PETROVIČ KOPYLOV, Igor, et al. *Stavba elektrických strojů*. Praha: SNTL, 1988. 688 s.
- [60] CIGÁNEK, Ladislav. *Stavba elektrických strojů*. Praha: SNTL, 1958. 716 s.
- [61] HAVELKA, Jiří; DRESLER, Jaromír; JÍLEK, Vladimír. *Montáž, údržba a opravy elektrických strojů točivých*. Praha: STRO.M, 1995. 227 s.
- [62] ŠIMKOVIC, Fedor; KOSTELNÝ, Michal. *Stavba elektrických strojov I. : Vinutia točivých elektrických strojov*. Košice: VŠT, 1990. 168 s. ISBN 80-7099-056-2.
- [63] FITZGERALD, Arthur E.; KINGSLEY, Charles; UMANS, Stephen D. *Electric Machinery*. New York : McGraw-Hill, 2003. 688 s. ISBN 0-07-366009-4.
- [64] ONG, Chee-Mun. *Electric Machinery : Using Matlab/Simulink*. New Jersey : Prentice Hall PTR, 1998. 626 s. ISBN 0-13-723785-5.
- [65] DEL TORO, Vincent. *Basici electric machines*. New Jersey : Prentice Hall, 1990. 624 s. ISBN 0-13-060146-2.
- [66] SKÁLA, Maxmilián. *Transformátory: Na velmi vysoká napětí*. Praha : SNTL, 1957. 184 s.
- [67] POKORNÝ, Karel. *Stavba elektrických strojů I.*. Praha: SNTL, 1981. 186 s.
- [68] HRUŠKOVIC, Ladislav. *Elektrické stroje*. Bratislava: STU, 1999. 497 s. ISBN 80-227-1249-3.
- [67] KOGAN, Viktor, et al. *Surface corona suppression in high voltage stator winding end turns. IEEE*. 1995, 1, s. 411 - 415 . ISSN 0-941783-15-4.

- [68] KURIMSKÝ, Juraj; KOLCUNOVÁ, Iraida; CIMBALA, Roman. *Understanding surface partial discharges in HV coils and the role of semi-conductive protection*. IEEE. 2010, 1, s. 283-289.
- [69] MALAMUD, R.; CHEREMISOV, I. *Anti-corona Protection of the High Voltage Stator Windings and Semi-Conductive Materials for Its Realization*. IEEE. 2000, 1, s. 32-35.
- [70] UL HAQ, Saeed; OMRANIPOUR, Ramtin. *Comparative Evaluation of Various Grading Systems for Electric Machinery Stator Windings*. IEEE. 2010, 1, s. 1-4.
- [71] MALAMUD, R.; SCHUMOVSKAYA, G.; STEPANOVA, T. *The Development of Semiconducting Materials for Anti-Corona Protection Designs of Generator High Voltage Winding and their Testing at Cryogenic Temperatures*. IEEE. 2008, 1, s. 420-423.
- [72] WEIDA, Daniel; BOHMELT, Sebastian; CLEMENS, Markus. *Design of ZnO Microvaristor End Corona Protection for Electrical Machines*. IEEE. 2010, 1, s. 1-4.
- [73] OMRANIPOUR, R.; HAQ, S.U. *Evaluation of Grading System of Large Motors AC Stator Winding*. IEEE. 2008, 1, s. 158-161.
- [74] MALAMUD, R., et al. *The Development of Semiconducting Fiberglass Tapes LSP-O, their Properties, and their use for Anti-Corona Protection of High Voltage Windings*. IEEE. 2010, 1, s. 1-4.
- [75] ESPINO-CORTES, F.P.; JAYARAM, Shesha H.; CHERNEY, Edward A. *Effectiveness of Stress Control Coatings in Medium Voltage Form Wound Coil Ends under Fast Rise Time Pulses and Contamination*. IEEE. 2005, 1, s. 167-170.
- [76] EMERY, F. Tim. *The Application of Conductive and Stress Grading Tapes to Vacuum Pressure Impregnated, High Voltage Stator Coils*. IEEE. 1996, 4, s. 15-22.
- [77] CONLEY, D.J.; FROST, N. *Fundamentals of Semi-Conductive Systems for High Voltage Stress Grading*. IEEE. 2005, 1, s. 89-92.
- [78] TAYLOR, N. *Material properties of SiC stress-grading material*. -. 2008, 1, s. 1-28.
- [79] TAYLOR, N.; EDIN, H. *The dielectric response of stator end-winding stress grading*. Proceedings of the XIVth International Symposium of High Voltage Engineering. 2005, 1, s. 1-6.
- [80] TRNKA, Pavel. *Problematika ochranných vrstev vinutí elektrických točivých strojů při pulzním namáhání*. Electroscope. 2008, 1, s. 1-4.
- [81] TREMBLAY, Rémi; HUDON, Claude. *Improved Requirements for Stress-Grading Systems at Hydro-Québec*. IEEE. 2007, 1, s. 1-6.

- [82] DONZEL, L, F GREUTER a T CHRISTEN. *Nonlinear resistive electric field grading Part 2: Materials and applications*. IEEE Electrical Insulation Magazine. 2011, vol. 27, issue 2, s. 18-29. DOI: 10.1109/mei.2011.5739419.
- [83] VESELÝ, Jaroslav. *Elektrické stroje: Teorie a měření I*. 1. vyd. Brno: VUT, 1989, s. 148
- [84] HUDEC, Josef. *Elektrické stroje I*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1959, 198 s.
- [85] HUDEC, Josef. *Elektrické stroje II*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1959, 187 s.
- [86] WILSON, Pete, Constantina LEKAKOU a John WATTS. *Electrical, morphological and electronic properties of inkjet printed PEDOT: PSS*. 2012 12th IEEE International Conference on Nanotechnology (IEEE-NANO). 2012. DOI: 10.1109/nano.2012.6322210.
- [87] WOOD, J. W., R. T. HINDMARCH, T. G. PHEMISTER a W. K. HOGG. *Measurement of the voltage distribution along the endwinding stress control layer of a turbogenerator stator conductor bar*. Dielectric Materials, Measurements and Applications, 1988., Fifth International Conference on. 1988, roč. 5, s. 204-210. DOI: 0-85296-359-9. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9459>.
- [88] GULLY, A.M. *The performance of aged stress grading materials for use in electrical machines*. Eighth International Conference on Dielectric Materials, Measurements and Applications. 2000. DOI: 10.1049/cp:20000539.
- [89] BUSU, I., P. SVASTA, R. BUNEA a D. BONFERT. *DC and Thermal behavior of PEDOT:PSS thin films*. Design and Technology of Electronics Packages, (SIITME) 2009 15th International Symposium for. 2009, 81 - 86. DOI: 10.1109/SIITME.2009.5407398. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5407398>.
- [90] *Měření a charakter částečných výbojů (ČV) v točivých strojích* [online]. ElektroTrh.cz, 2012 [cit. 2014-10-21]. Dostupné z: <http://www.elektroprumysl.cz/merici-technika/mereni-a-charakter-castečných-vyboju-cv-v-tocivých-strojích-3>.

## Seznam příloh

<b>Příloha A</b>	<b>Rozložení napětí podél různých druhů a délek EGS ochran na různých hladinách napětí</b>
<b>Příloha B</b>	<b>Rozložení teploty podél různých druhů a délek EGS ochran na různých hladinách napětí</b>
<b>Příloha C</b>	<b>Rozložení napětí podél různých kombinací EGS pásek při 45 kV</b>
<b>Příloha D</b>	<b>Analýza vzorků konvenčních EGS ochran a laků na bázi PEDOT:PSS</b>
<b>Příloha E</b>	<b>Závislost elektrické kapacity a vodivosti EGS ochran na teplotě</b>

## Publikační činnost autora

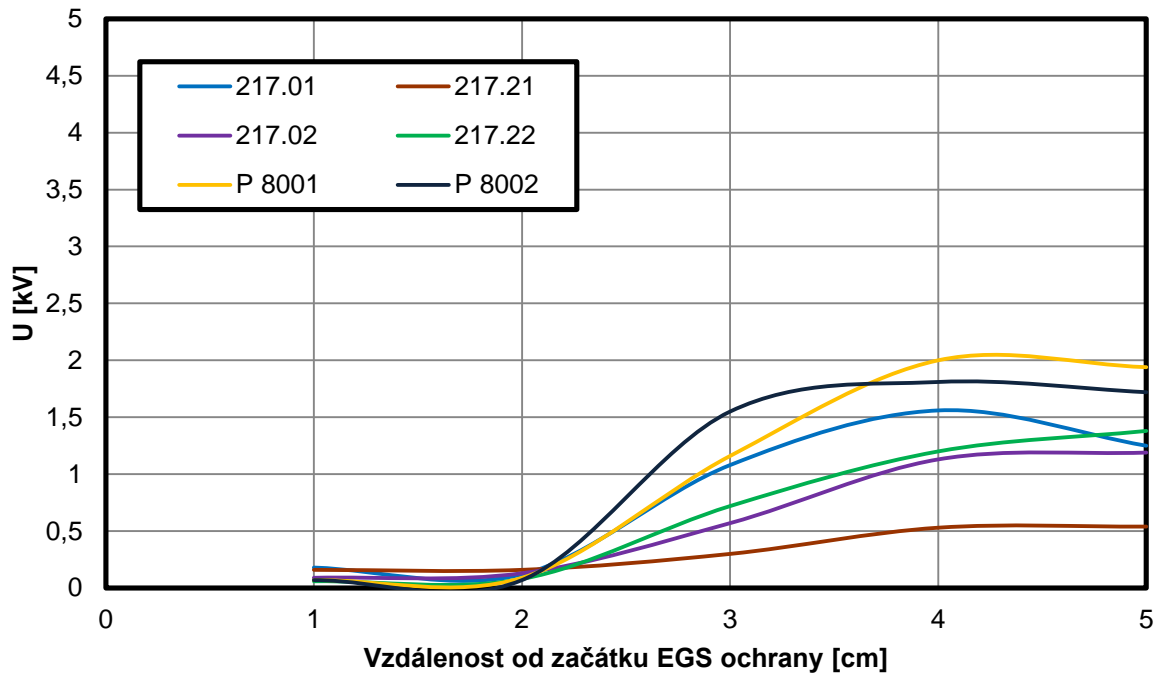
- [A 1] KRPAL, O. Ekonomická a energetická studie budoucnosti větrných elektráren v EU. Plzeň, 2010., ISBN: 978-80-7043-915-9.
- [A 2] KRPAL, O. Výbojová činnosti ve vinutí synchronního stroje a její eliminace. FEL, ZČU v Plzni, 2011, 77 s., ISBN: neuvedeno.
- [A 3] KRPAL, O. Polovodivé ochrany pro eliminaci výbojové činnosti ve vinutí synchronního stroje. In Elektrotechnika a Informatika 2011. Část 1., Elektrotechnika. Plzeň: Západočeská univerzita, 2011. s. 55-58. ISBN: 978-80-261-0016-4.
- [A 4] HROMADKA, K., HAMÁČEK, A., ŘEBOUN, J., DŽUGAN, T., KRPAL, O. Diagnostic of printed resin paste. In Diagnostika '11. Plzeň: Západočeská univerzita, 2011. s. 13-16. ISBN: 978-80-261-0020-1
- [A 5] KUČEROVÁ, E, MATĚJKA, F., ŠEBÍK, P., KRPAL, O. Insulating materials and cryogenic temperatures. In Diagnostika '11. Plzeň: Západočeská univerzita, 2011. s. 121-125. ISBN: 978-80-261-0020-1
- [A 6] KRPAL, O., BRŮCKL, O., RIEPL, M. Influence of wind and solar energy on the frequency of switching operations of On-Load Tap-Changers. In Proceedings of the 13th International Scientific Conference Electric Power Engineering 2012. Brno: Brno University of Technology, 2012. s. 719-722. ISBN: 978-80-214-4514-7.
- [A 7] TRNKA, P., TRNKOVÁ, M., ŠIRŮČEK, M., KRPAL, O. Moderní energetické zdroje a jejich vliv na transformátory. Elektrotechnický magazín, 2012, roč. 22, č. 4, s. 22-25. ISSN: 1210-5422.
- [A 8] KRPAL, O. Navržení polovodivé ochrany u výstupu statorové cívky z čel synchronního generátoru. In Elektrotechnika a informatika 2012, část první - Elektrotechnika. 2012. s. 61-62. ISBN: 978-80-261-0120-8.
- [A 9] KRPAL, O., MRÁZ, P., ŠIRŮČEK, M. Influence of Renewable Energy on Power Transformer Insulating System. In Annals of DAAAM for 2012 & Proceedings of the 23rd International DAAAM Symposium. Vídeň: DAAAM International, 2012. s. 569-574. ISBN: 978-3-901509-91-9 , ISSN: 1726-9679.
- [A 10] KRPAL, O., KUČEROVÁ, E. Měření ztrátového činitele a relativní permitivity na vzorcích sta-torových tyčí pro výzkum polovodivých ochran u výstupu vinutí z čel synchronních generátorů. In Proceedings of the 14th international scientific conference

- Electric power and engineering 2013. Ostrava: VSB - Technical University, 2013. s. 227-229. ISBN: 978-80-248-2988-3.
- [A 11] KRPAL, O. Rozložení napětí podél statorové cívky v závislosti na délce polovodiivé ochrany. In Elektrotechnika a informatika 2013 část první - Elektrotechnika. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2013. s. 73-76. ISBN: 978-80-261-0233-5.
- [A 12] KRPAL, O., KUČEROVÁ, E., GONOVÁ, I. Observing partial discharges along a stator bar by the corona camera. In ERIN 2013. Bratislava, Slovak Republic: STU - Publishing House of Slovak University of Technology in Bratislava, 2013. s. 1-4. ISBN: 978-80-227-3934-4.
- [A 13] KRPAL, O., KUČEROVÁ, E. Comparison of voltage distribution in end-winding of synchronous generator. In Proceedings of the 2014 15th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). Neuveden: IEEE, 2014. s. 575-578. ISBN: 978-1-4799-3806-3.
- [A 14] KRPAL, O., MRÁZ, P. V-A Characteristic Measuring of Stress Grading Tapes in the End-winding of Synchronous Generators. In Procedia Engineering. Vienna: Elsevier, 2014. s. 1523-1528. ISBN: neuvedeno, ISSN: 1877-7058.
- [A 15] KRPAL, O., KUČEROVÁ, E. Měření voltampérových charakteristik pásek a laků používaných jako ochrana před klouzavými výboji u výstupu vinutí čel synchronních generátorů. Electroscopie, 2014, roč. 2014, č. 1, s. 1-4. ISSN: 1802-4564.
- [A 16] KRPAL, O., KUČEROVÁ, E. Napěťové poměry izolace vinutí na výstupu z drážky vn točivého stroje. Elektro, 2014, č. 7, s. 12-15. ISSN: 1210-0889.
- [A 17] KACEROVSKÝ, J., KRPAL, O., MACH, F. Measured and Simulated Distributions of Voltage and Temperature along Stator Coils of Synchronous Generator. In CPEE 2014. Žilina: University of Žilina, Faculty of Electrical Engineering, 2014. s. 58. ISBN: 978-80-554-0910-8
- [A 18] KACEROVSKÝ, J., KRPAL, O., MACH, F. Simulation of Voltage and Temperature Distributions in End Part of Windings of Synchronous Generator. In Elektrotechnika a informatika 2014. (v tisku)
- [A 19] KRPAL, O., KUČEROVÁ, E., TRNKA, P., SVOBODA, M. Comparison of Temperature and Voltage Distribution along Stator Bar Samples. In ELEN 2014. (v tisku)

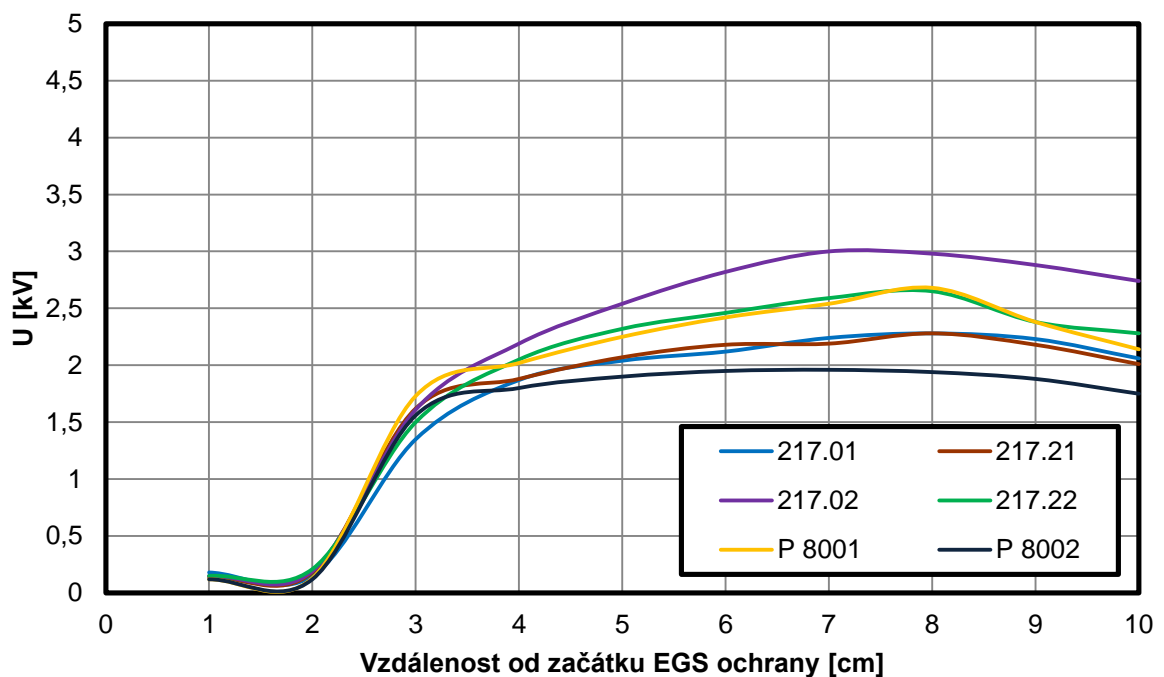
[A 20] SVOBODA, M., TRNKA, P., KUČEROVÁ, E., KRPAL, O. Partial discharges in electrical machines. In ELEN 2014. (v tisku)

## Příloha A

Rozložení napětí podél různých druhů a délek EGS ochran na různých hladinách napětí

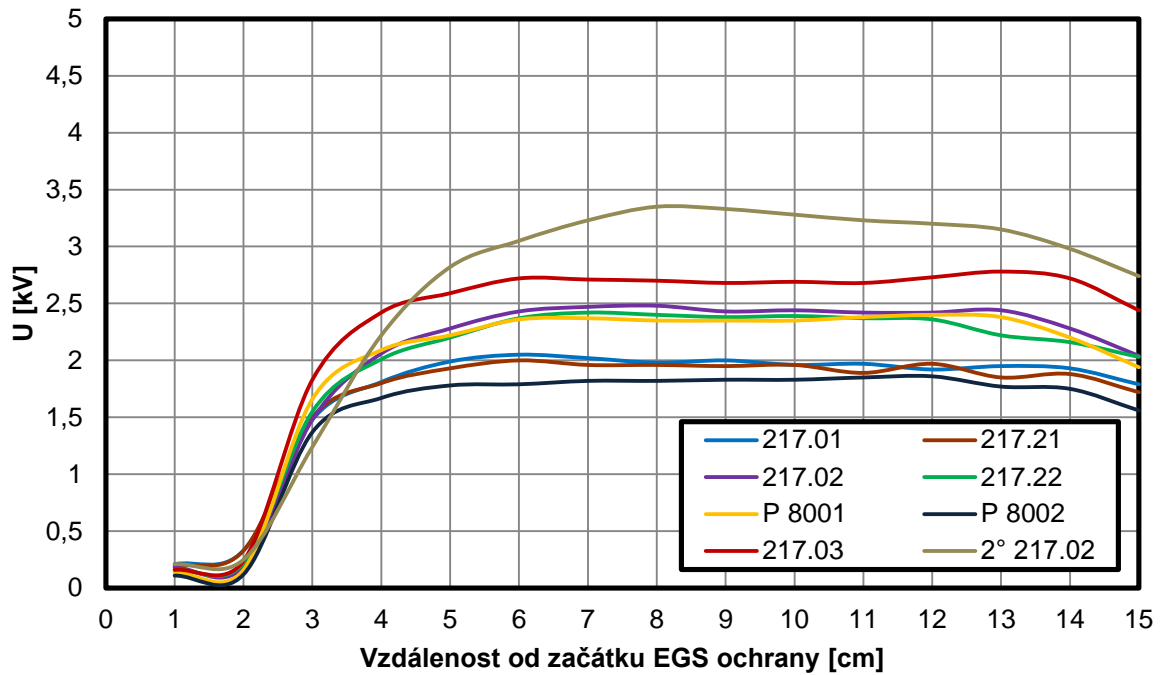


Obr. A.1 Rozložení napětí při připojeném napětí 5 kV – délka ochrany 5 cm

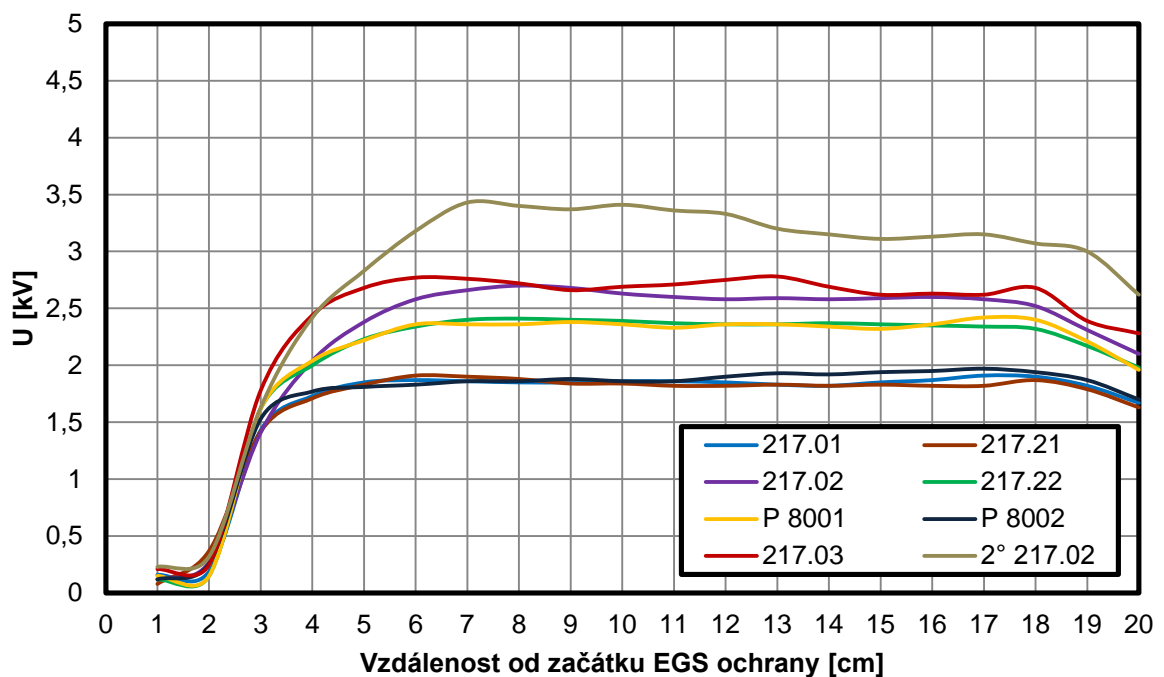


Obr. A.2 Rozložení napětí při připojeném napětí 5 kV – délka ochrany 10 cm

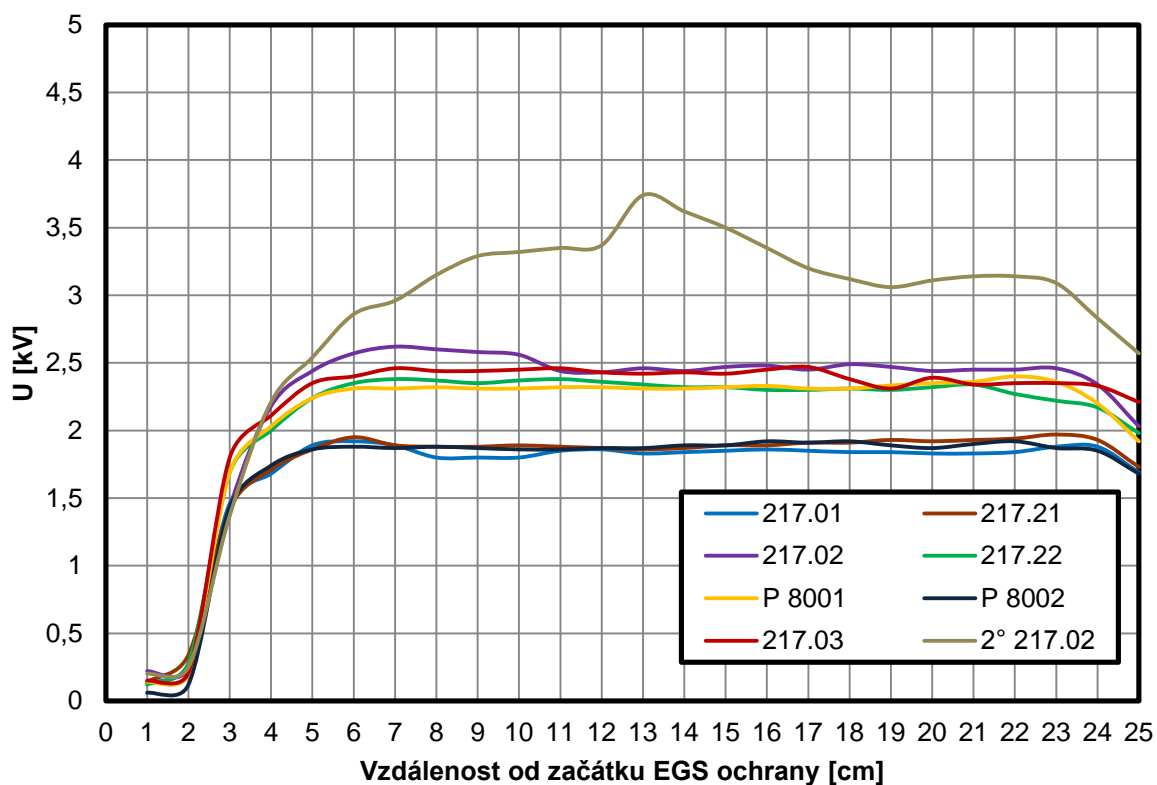




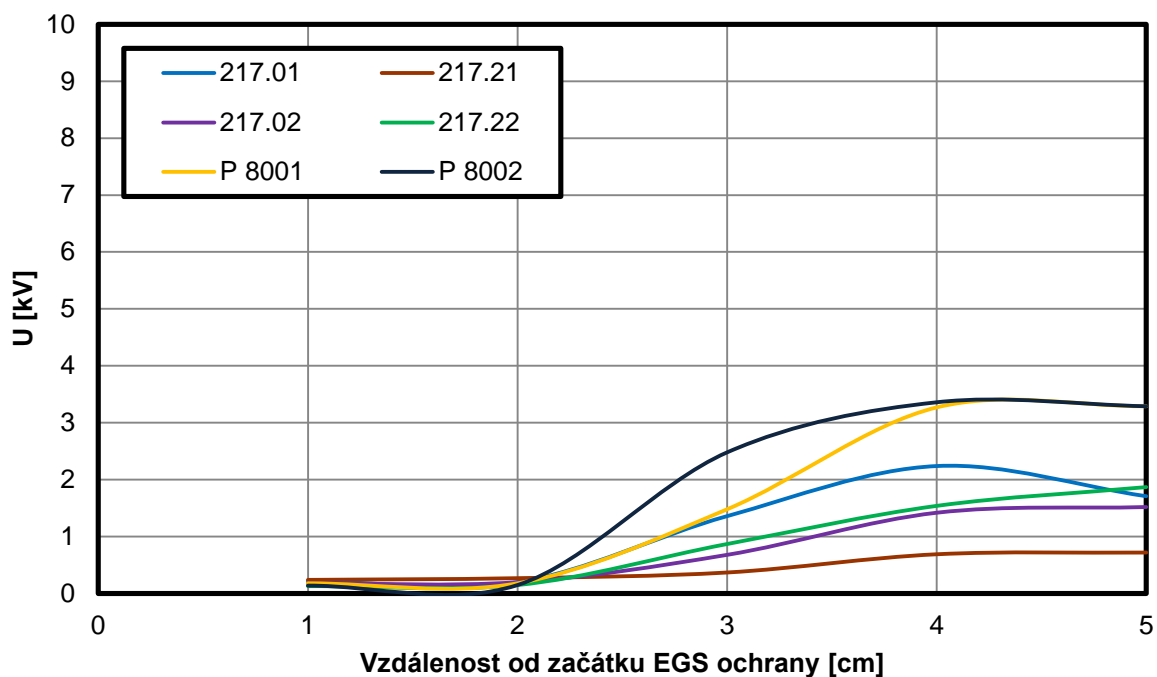
Obr. A.3 Rozložení napětí při připojeném napětí 5 kV – délka ochran 15 cm



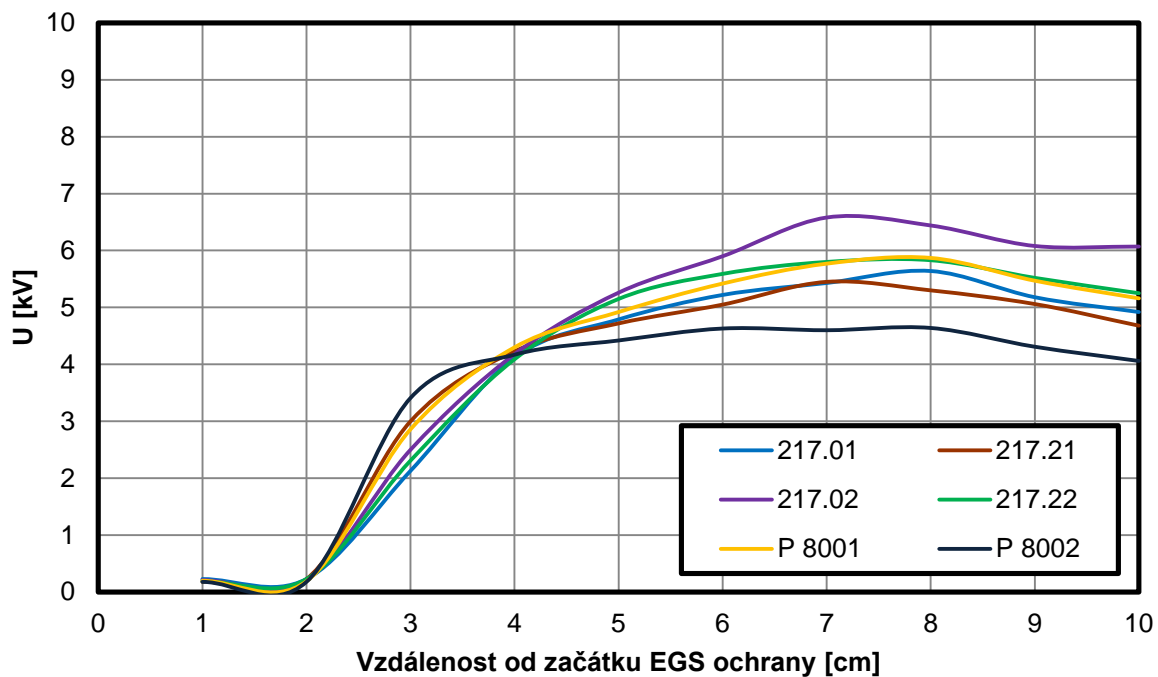
Obr. A.4 Rozložení napětí při připojeném napětí 5 kV – délka ochran 20 cm



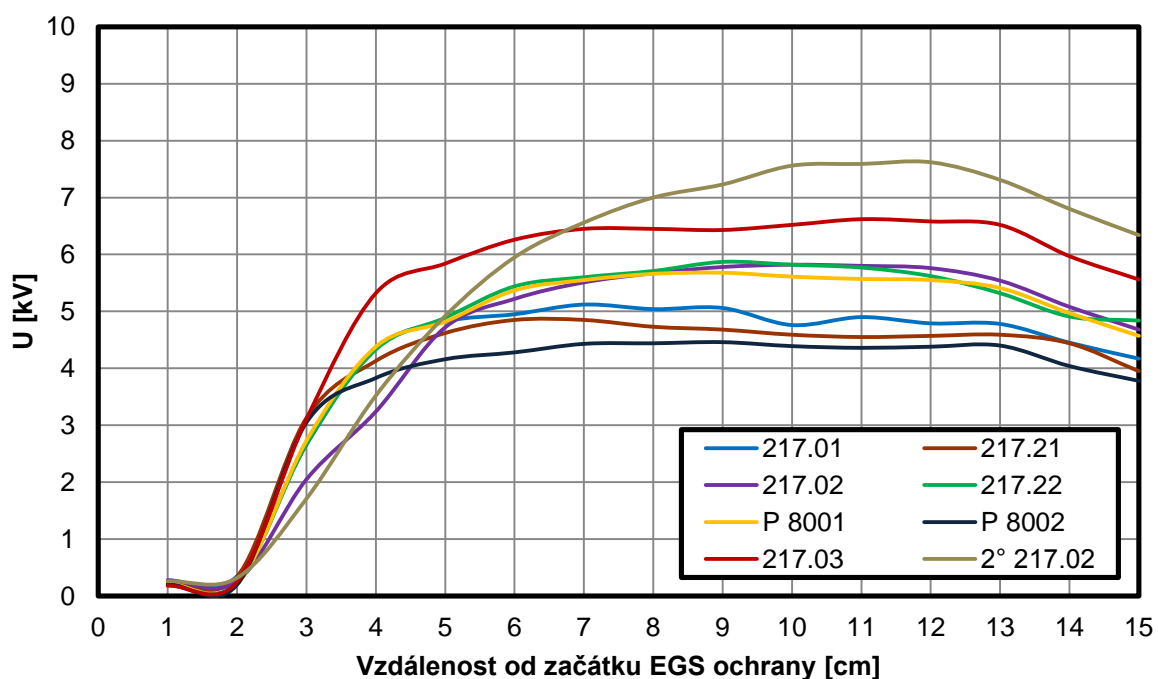
Obr. A.5 Rozložení napětí při připojeném napětí 5 kV – délka ochran 25 cm



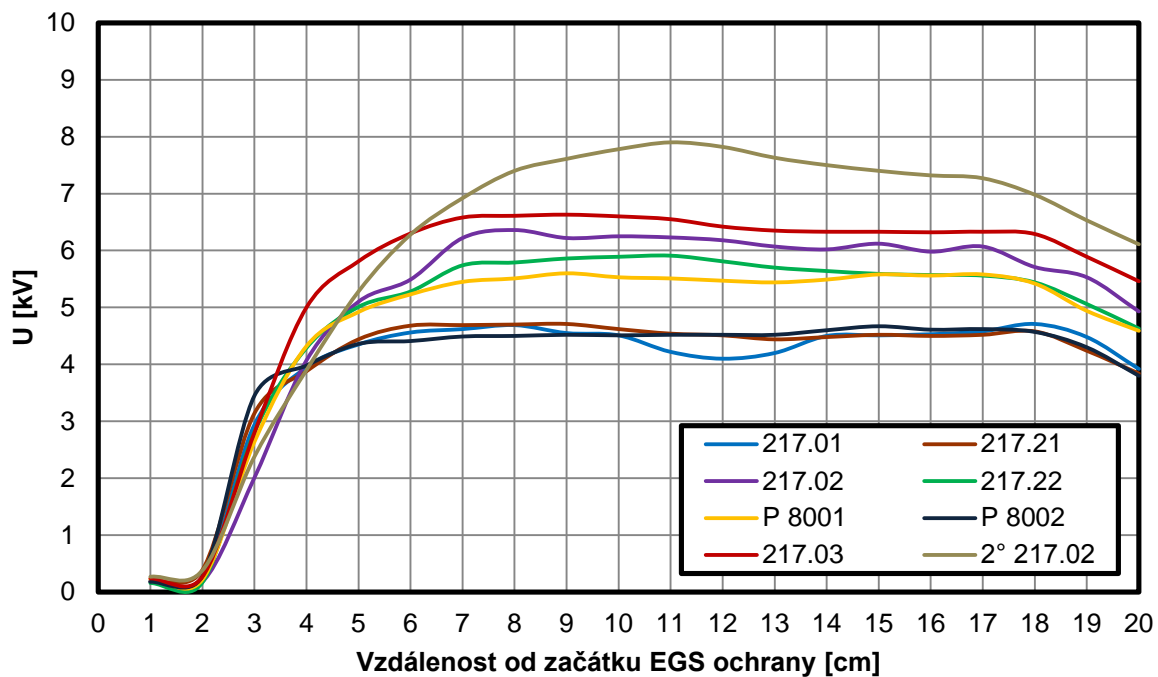
Obr. A.6 Rozložení napětí při připojeném napětí 10 kV – délka ochran 5 cm



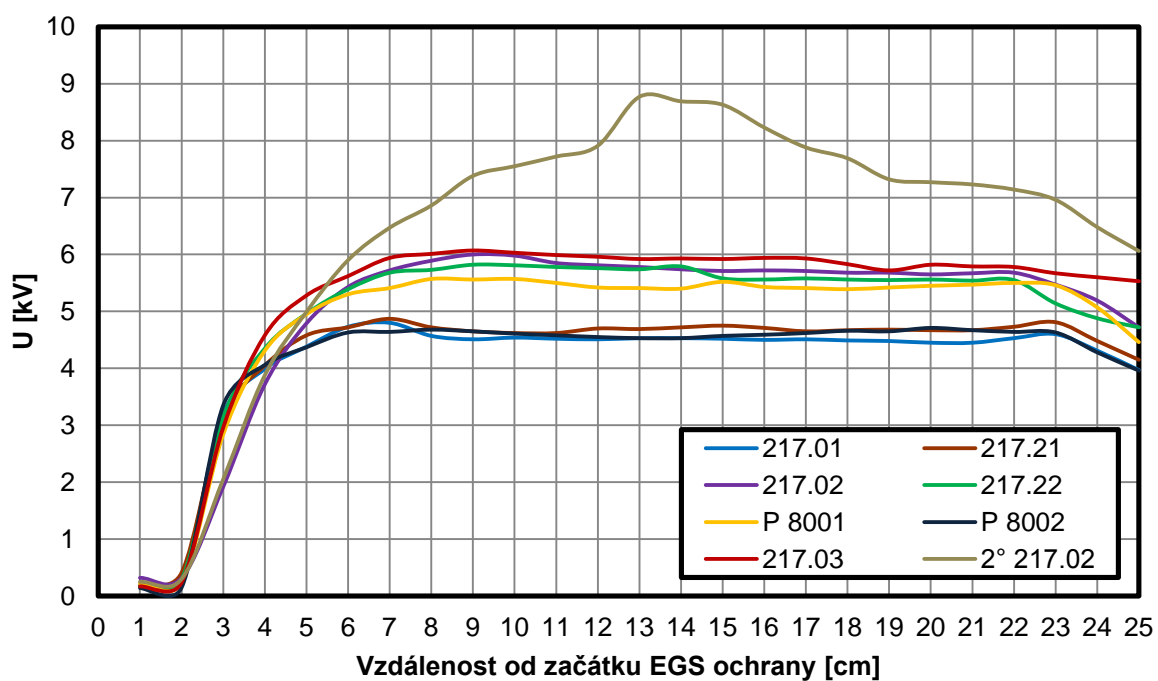
Obr. A.7 Rozložení napětí při připojeném napětí 10 kV – délka ochran 10 cm



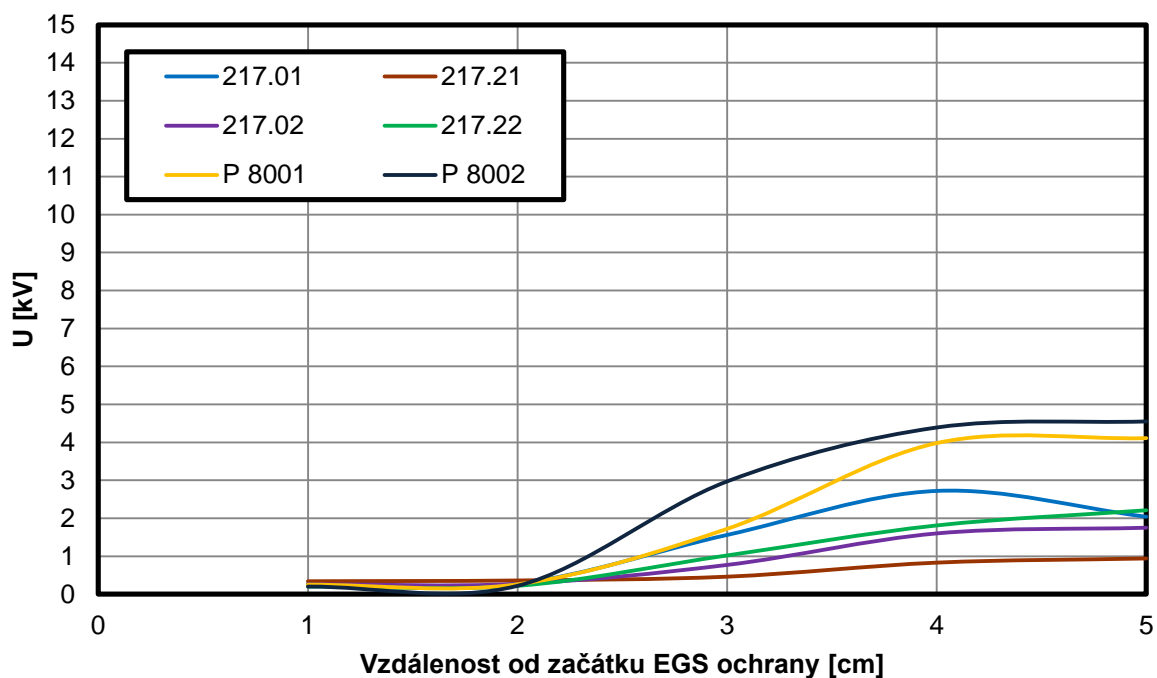
Obr. A.8 Rozložení napětí při připojeném napětí 10 kV – délka ochran 15 cm



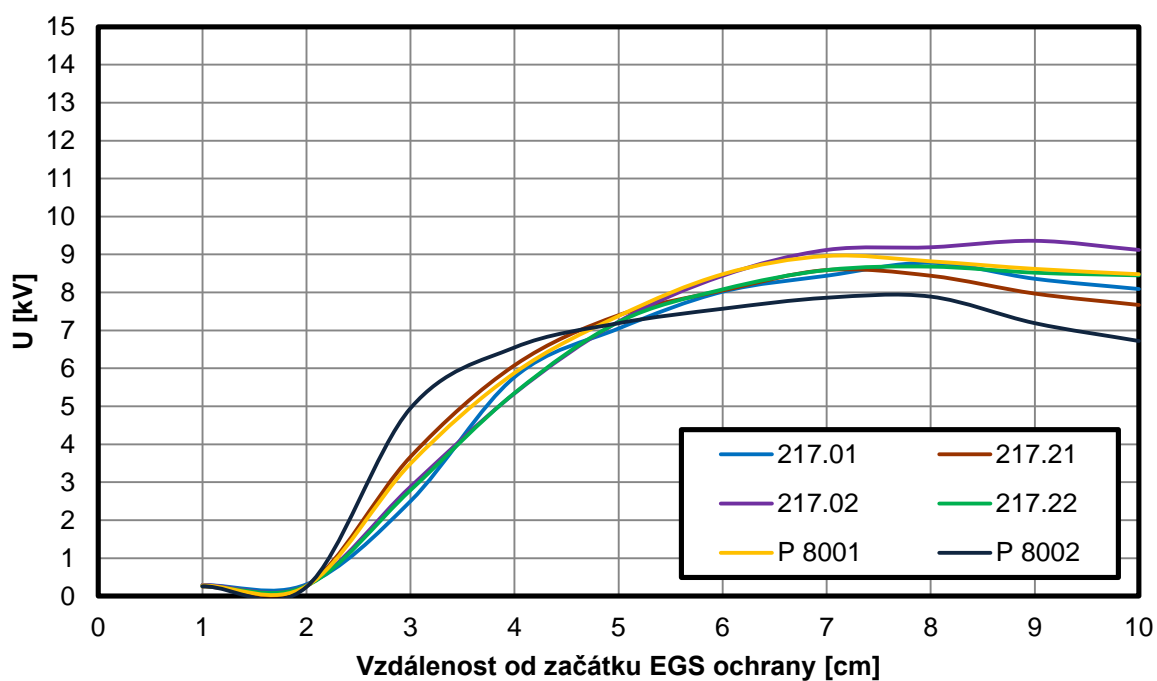
Obr. A.9 Rozložení napětí při připojeném napětí 10 kV – délka ochran 20 cm



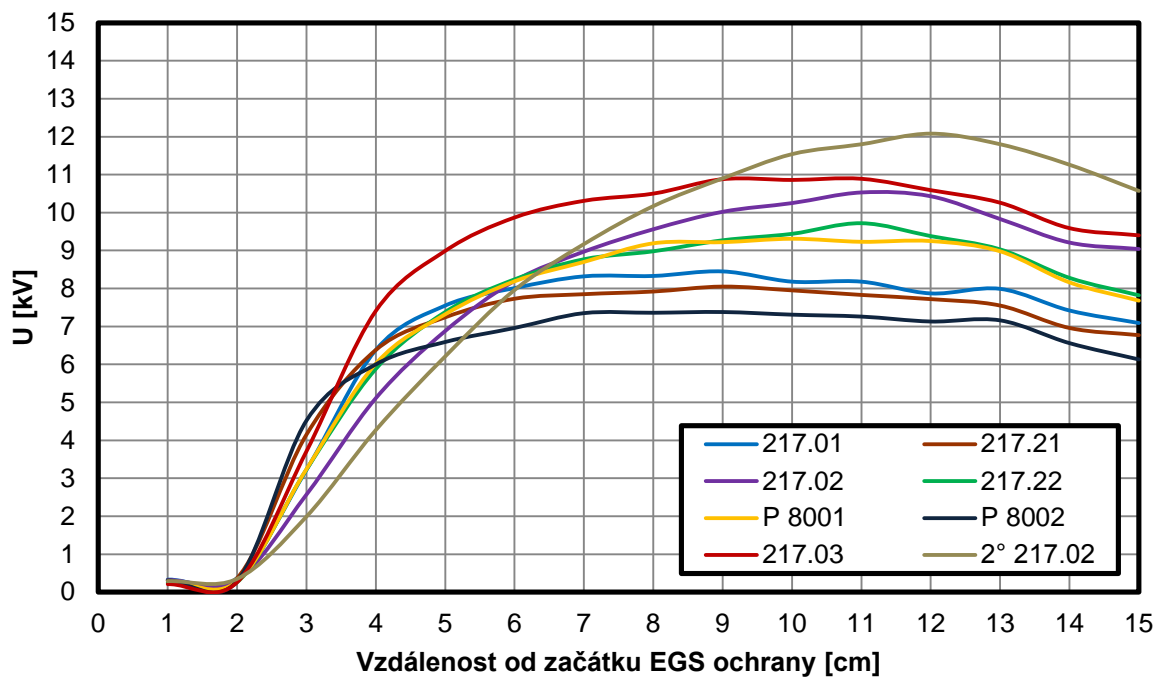
Obr. A.10 Rozložení napětí při připojeném napětí 10 kV – délka ochran 25 cm



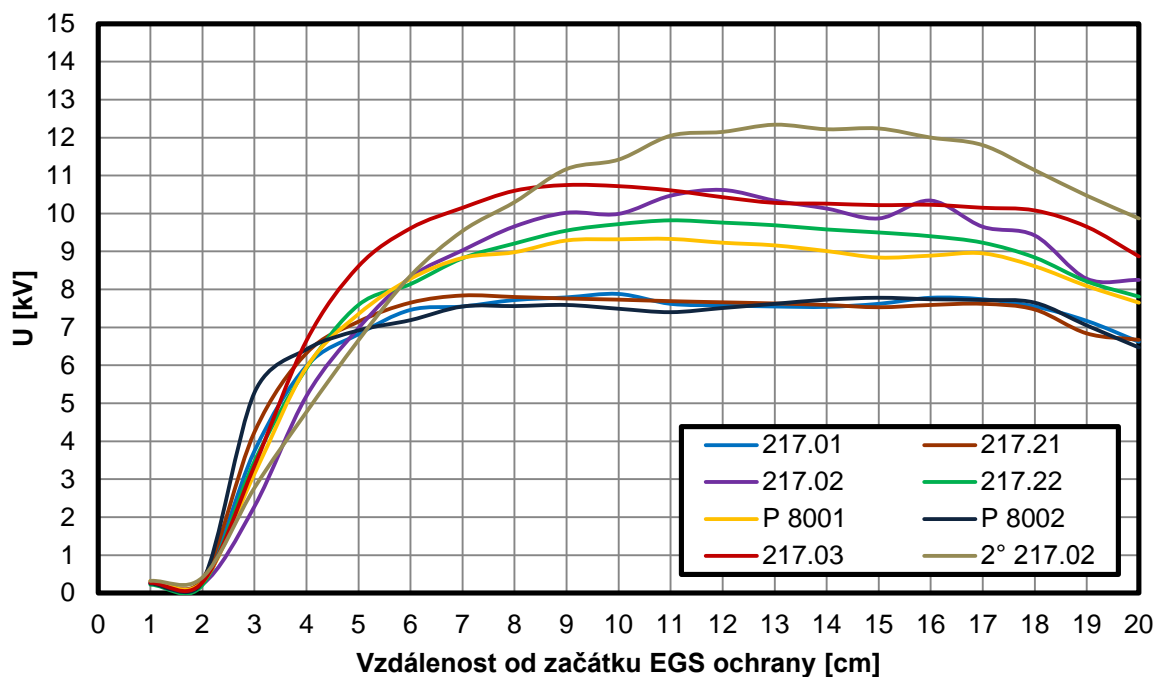
Obr. A.11 Rozložení napětí při připojeném napětí 15 kV – délka ochran 5 cm



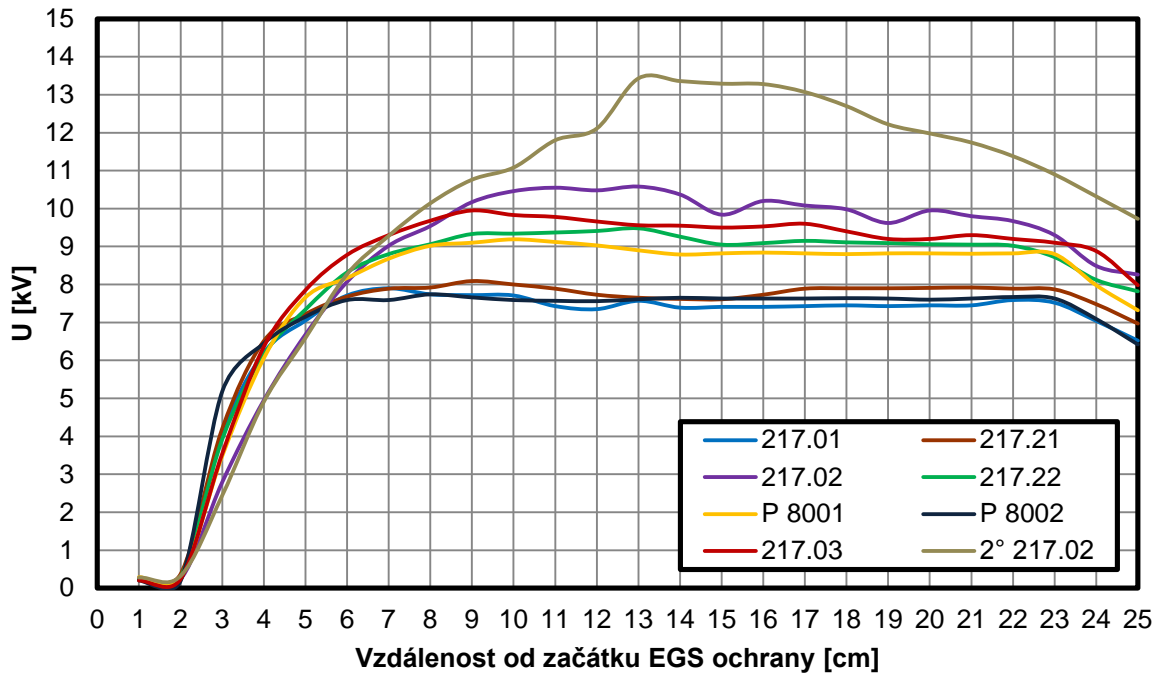
Obr. A.12 Rozložení napětí při připojeném napětí 15 kV – délka ochran 10 cm



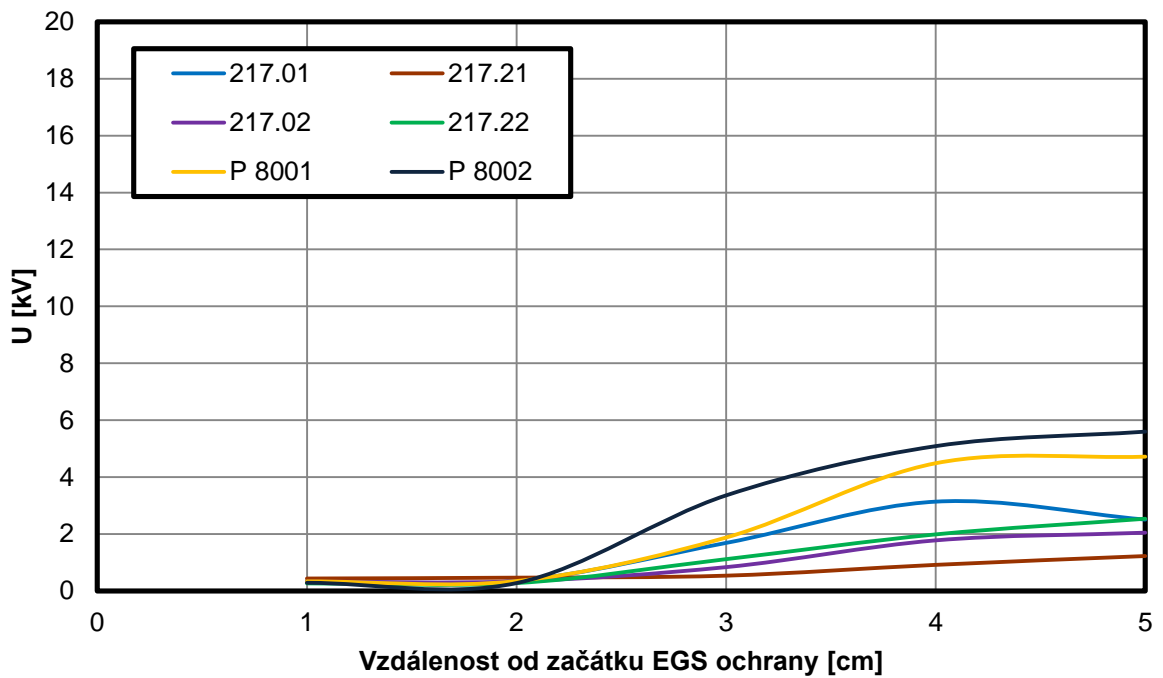
Obr. A.13 Rozložení napětí při připojeném napětí 15 kV – délka ochran 15 cm



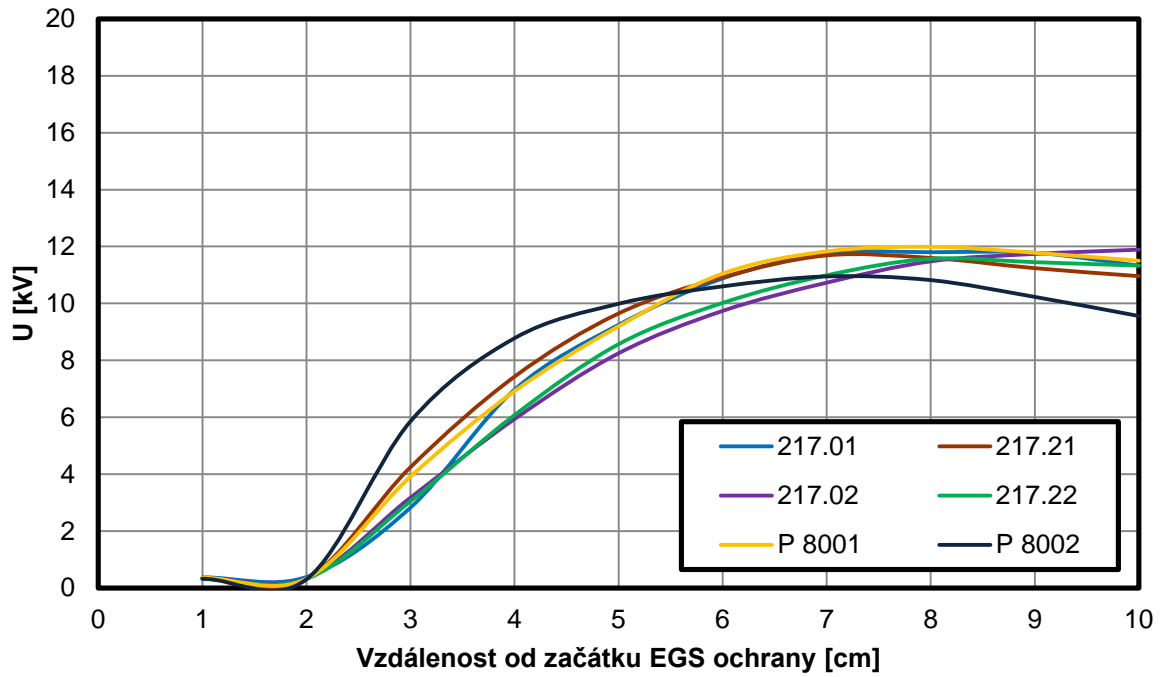
Obr. A.14 Rozložení napětí při připojeném napětí 15 kV – délka ochran 20 cm



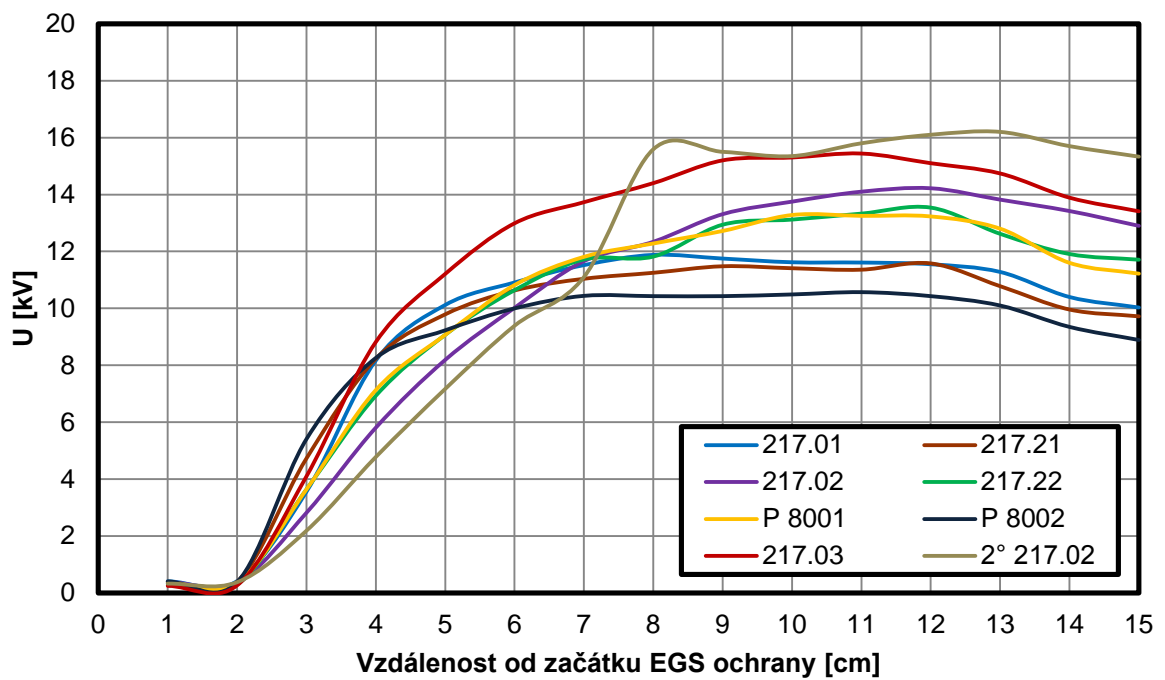
Obr. A.15 Rozložení napětí při připojeném napětí 15 kV – délka ochran 25 cm



Obr. A.16 Rozložení napětí při připojeném napětí 20 kV – délka ochran 5 cm

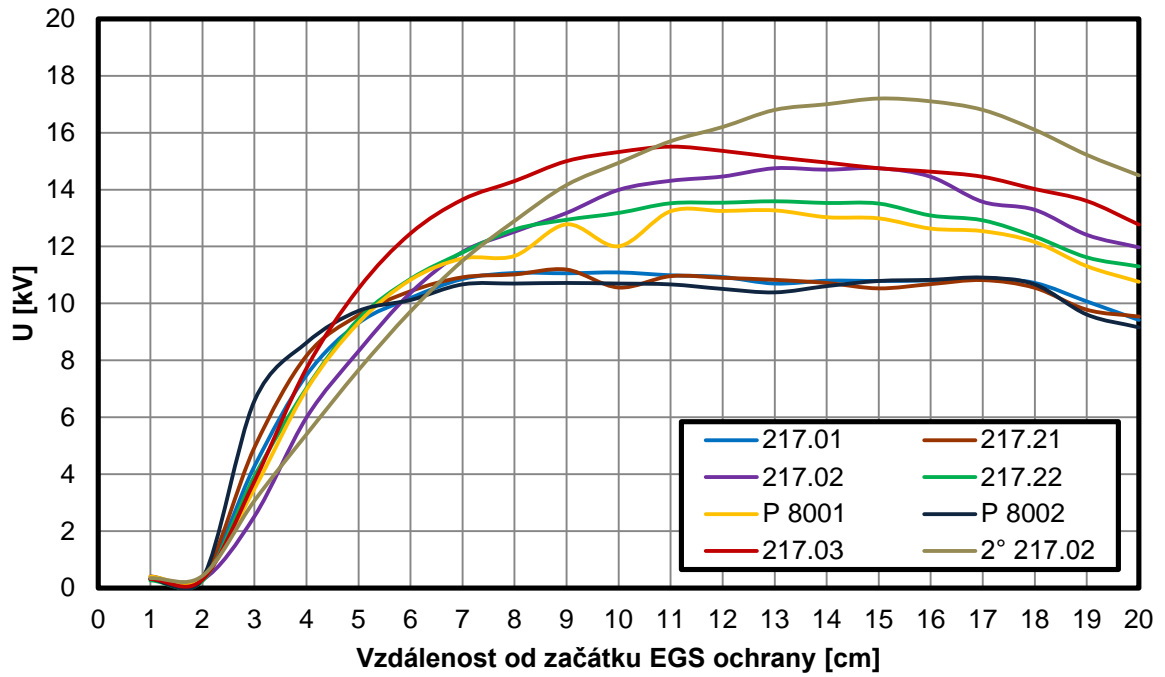


Obr. A.17 Rozložení napětí při připojeném napětí 20 kV – délka ochran 10 cm

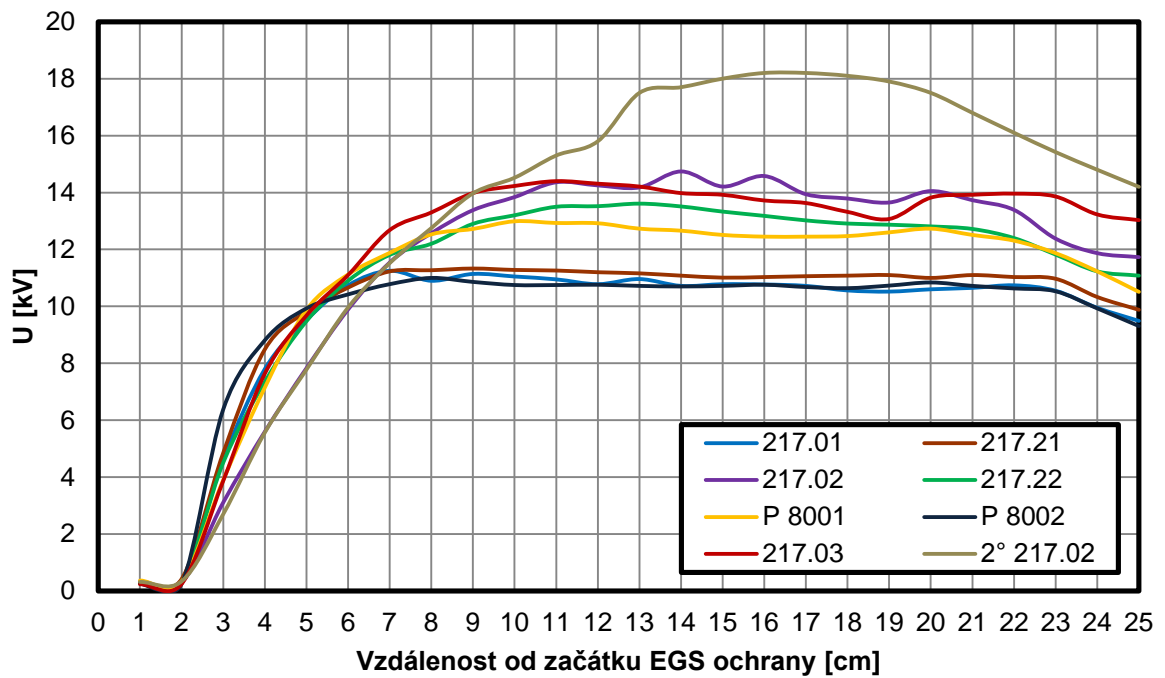


Obr. A.18 Rozložení napětí při připojeném napětí 20 kV – délka ochran 15 cm

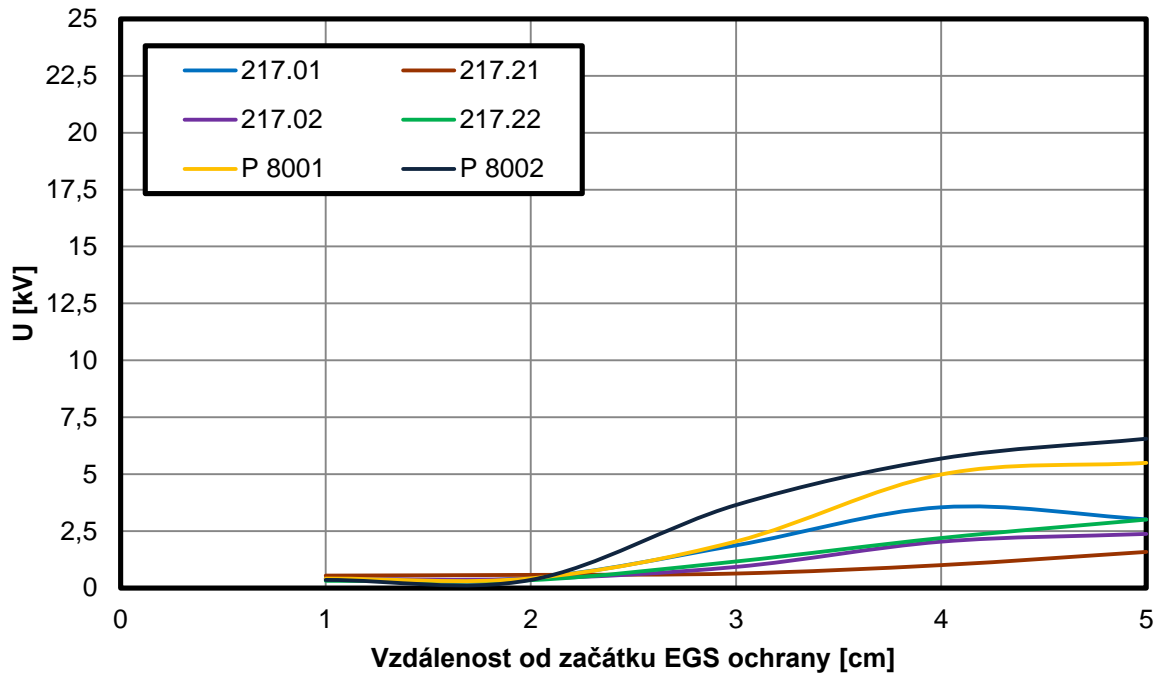




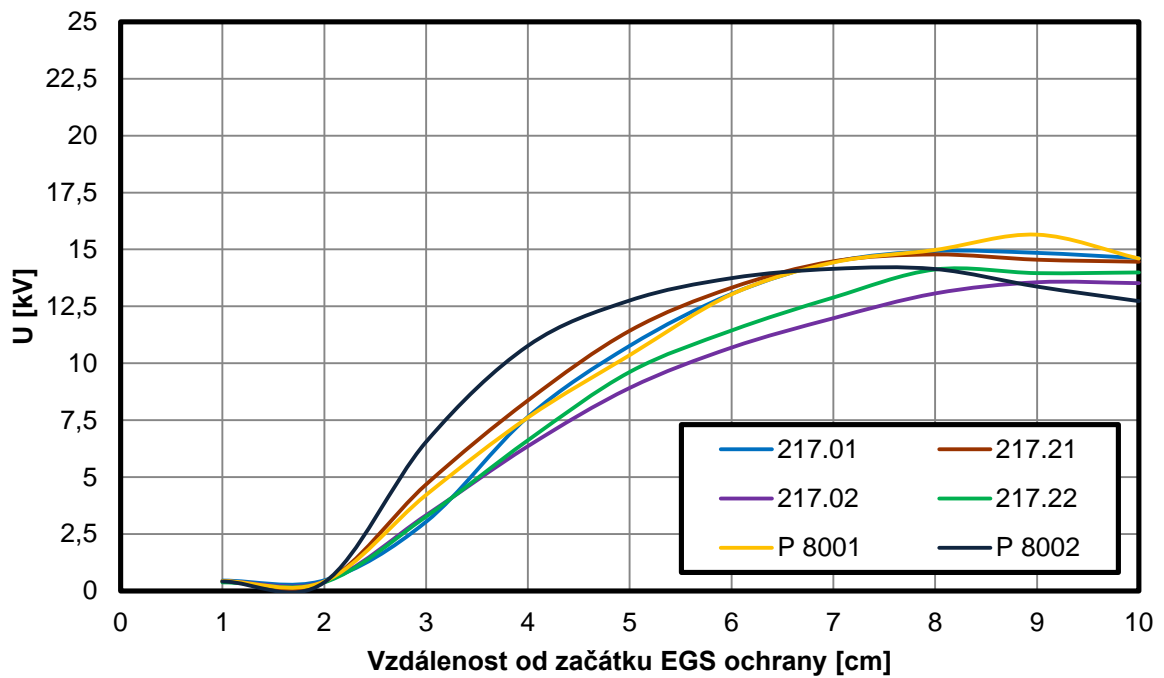
Obr. A.19 Rozložení napětí při připojeném napětí 20 kV – délka ochran 20 cm



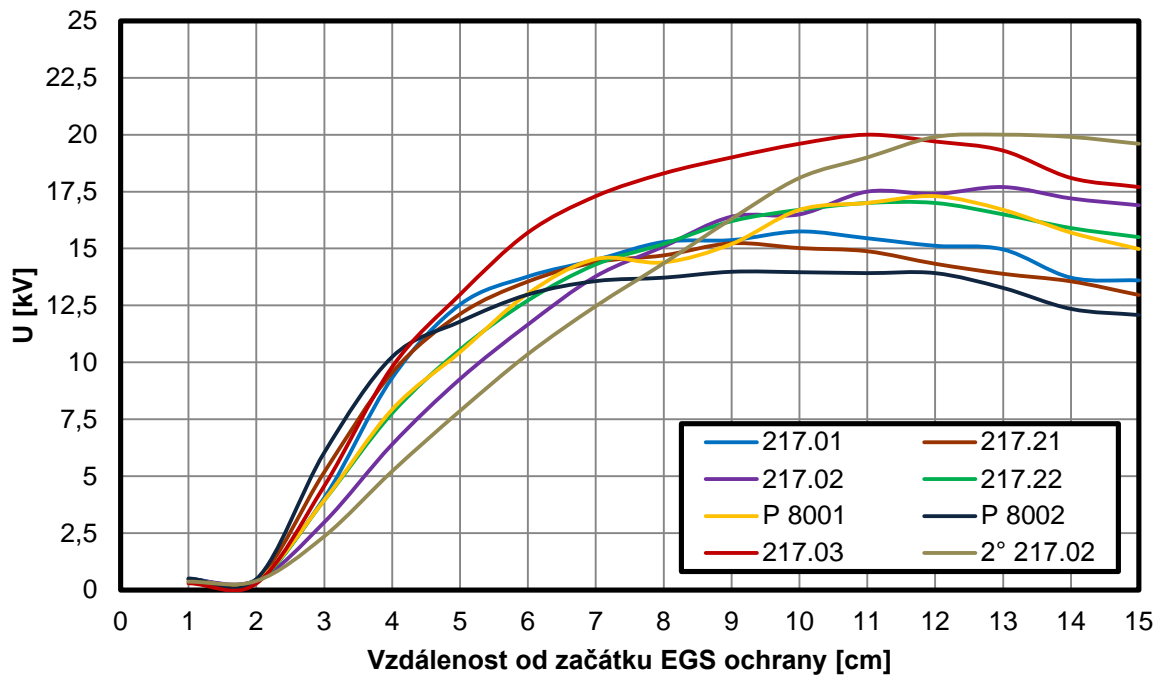
Obr. A.20 Rozložení napětí při připojeném napětí 20 kV – délka ochran 25 cm



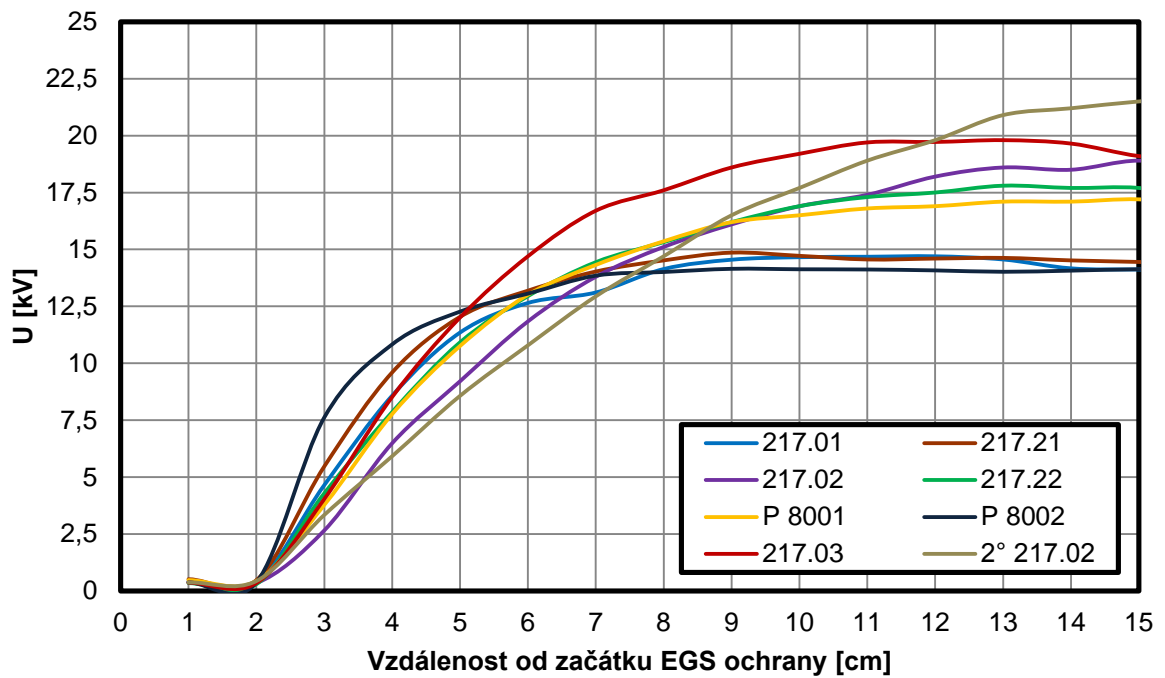
Obr. A.21 Rozložení napětí při připojeném napětí 25 kV – délka ochran 5 cm



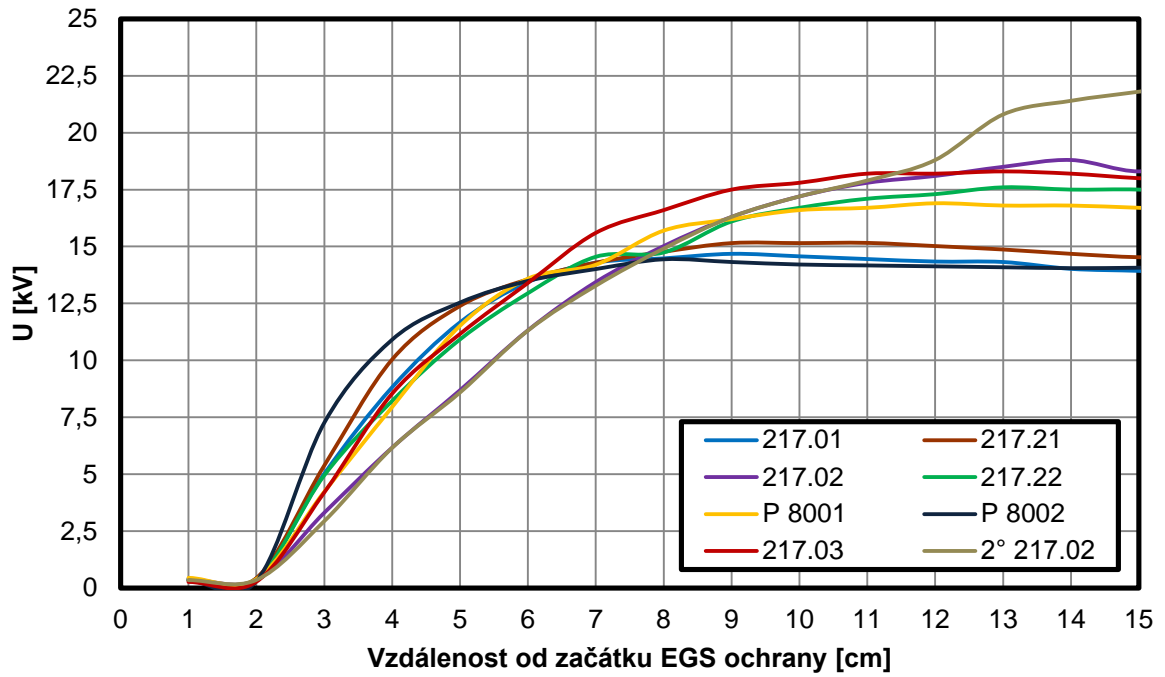
Obr. A.22 Rozložení napětí při připojeném napětí 25 kV – délka ochran 10 cm



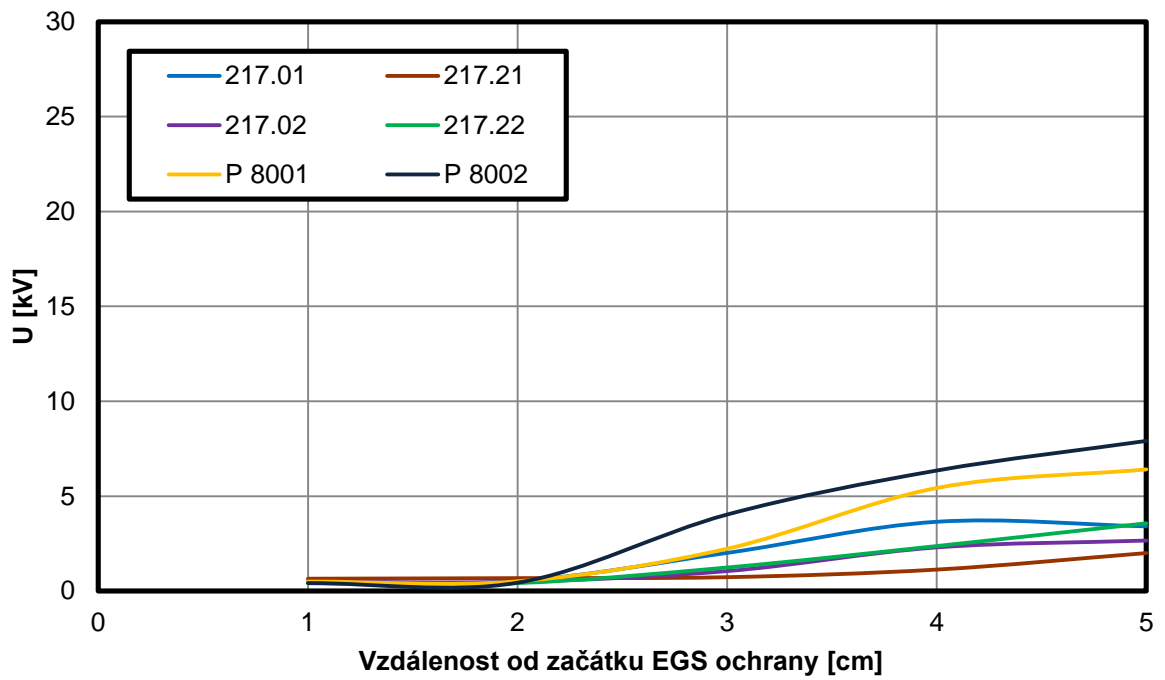
Obr. A.23 Rozložení napětí při připojeném napětí 25 kV – délka ochran 15 cm



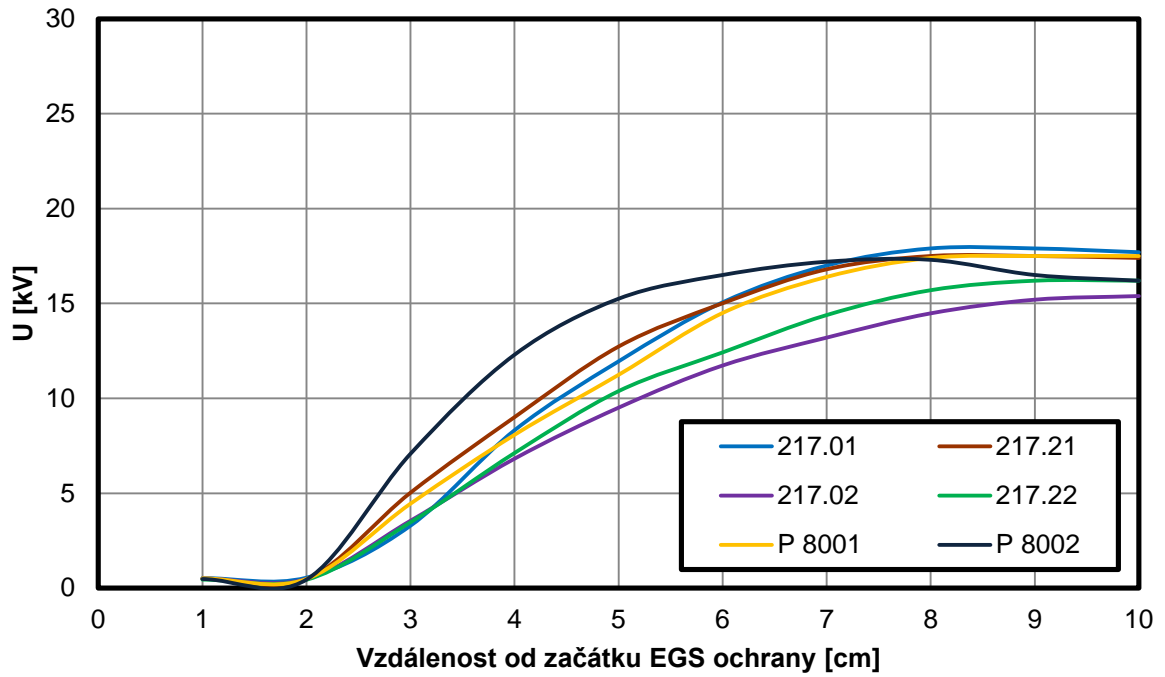
Obr. A.24 Rozložení napětí při připojeném napětí 25 kV – délka ochran 20 cm



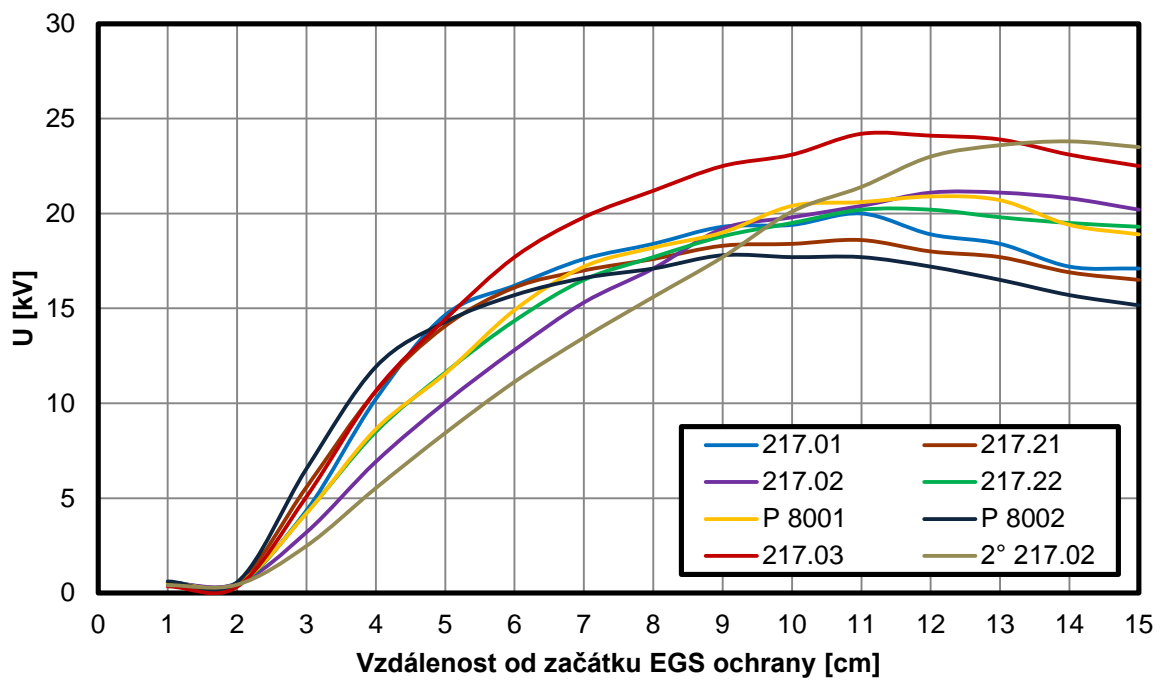
Obr. A.25 Rozložení napětí při připojeném napětí 25 kV – délka ochran 25 cm



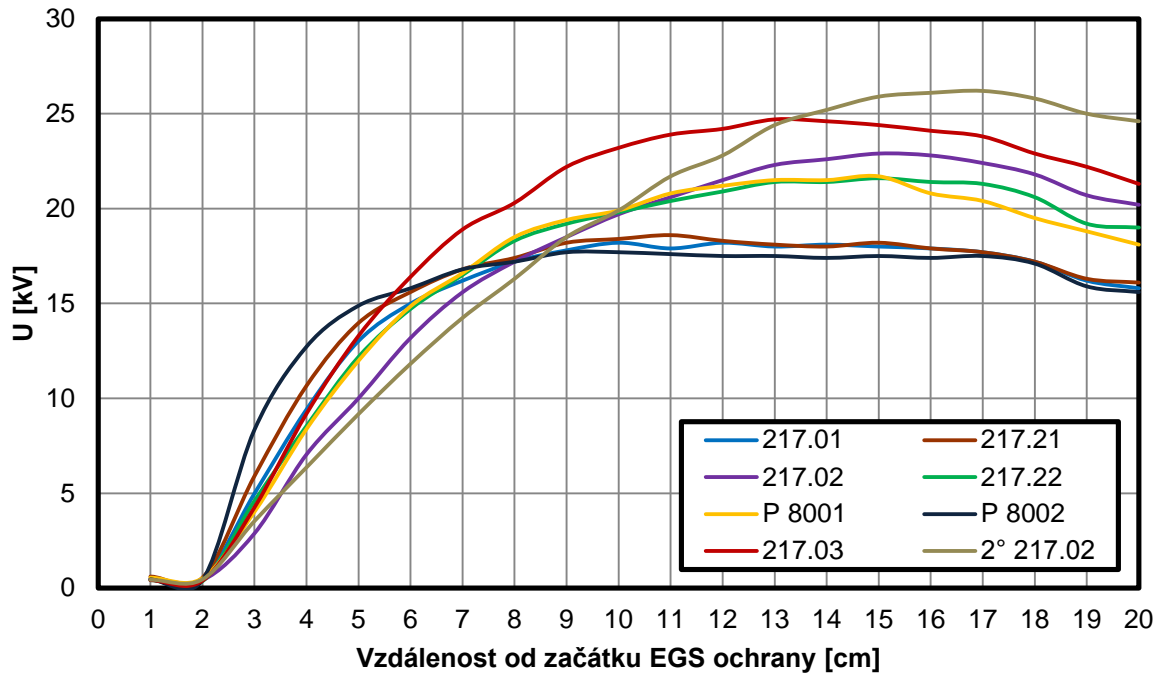
Obr. A.26 Rozložení napětí při připojeném napětí 30 kV – délka ochran 5 cm



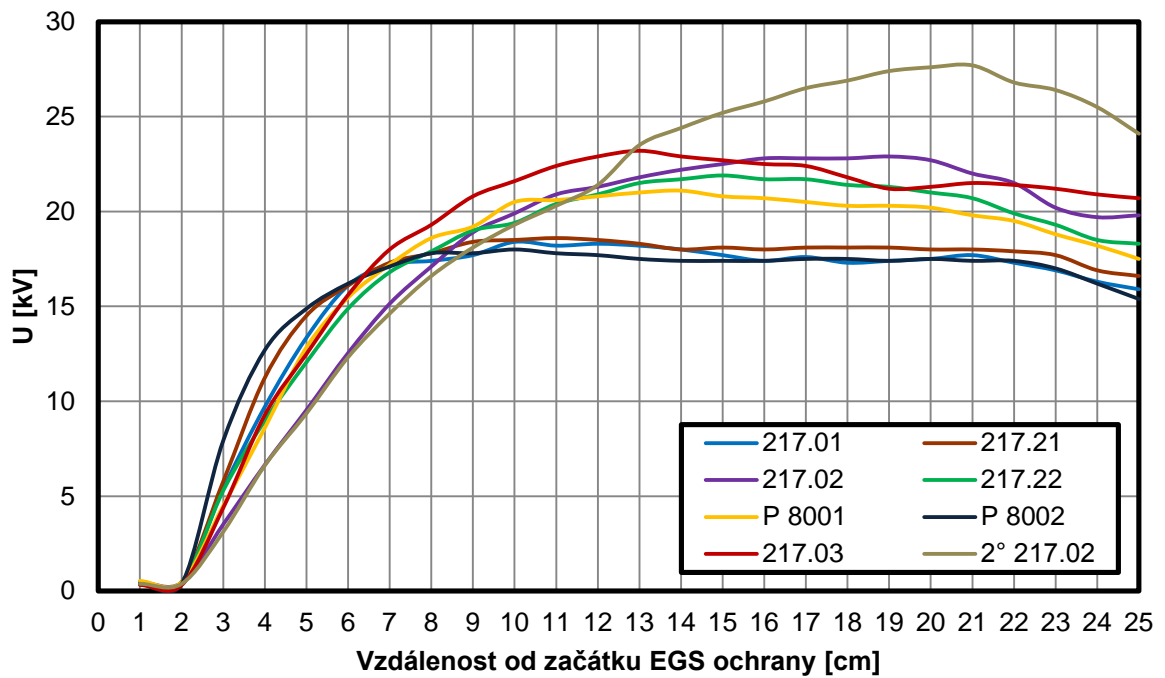
Obr. A.27 Rozložení napětí při připojeném napětí 30 kV – délka ochran 10 cm



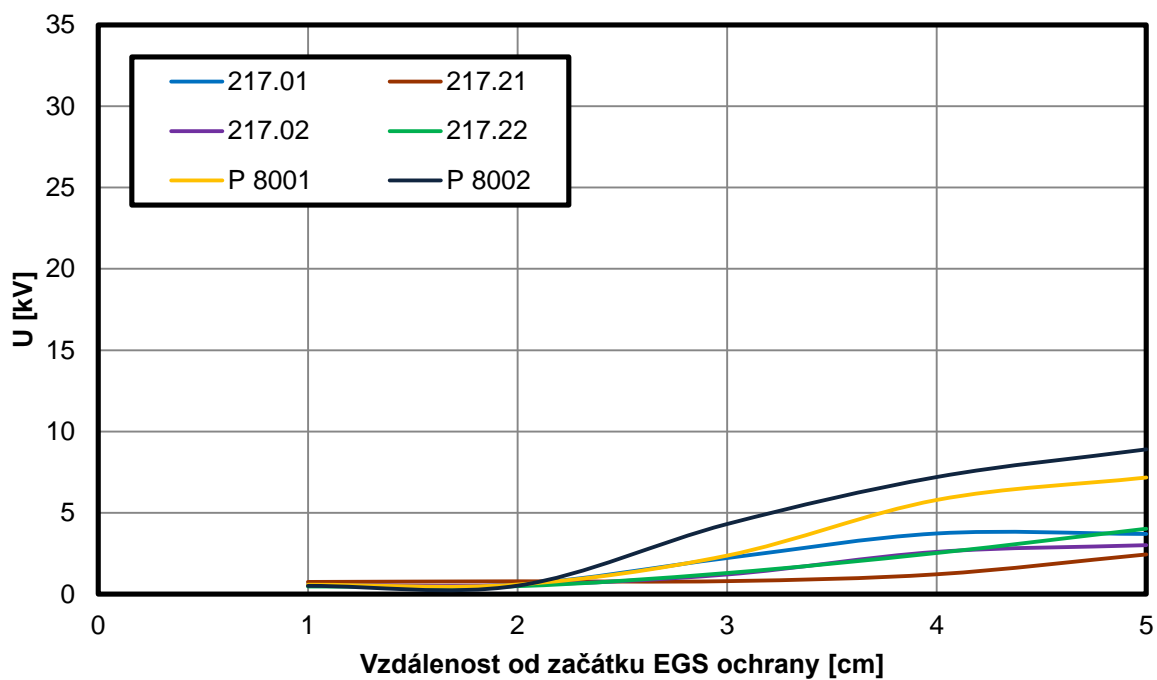
Obr. A.28 Rozložení napětí při připojeném napětí 30 kV – délka ochran 15 cm



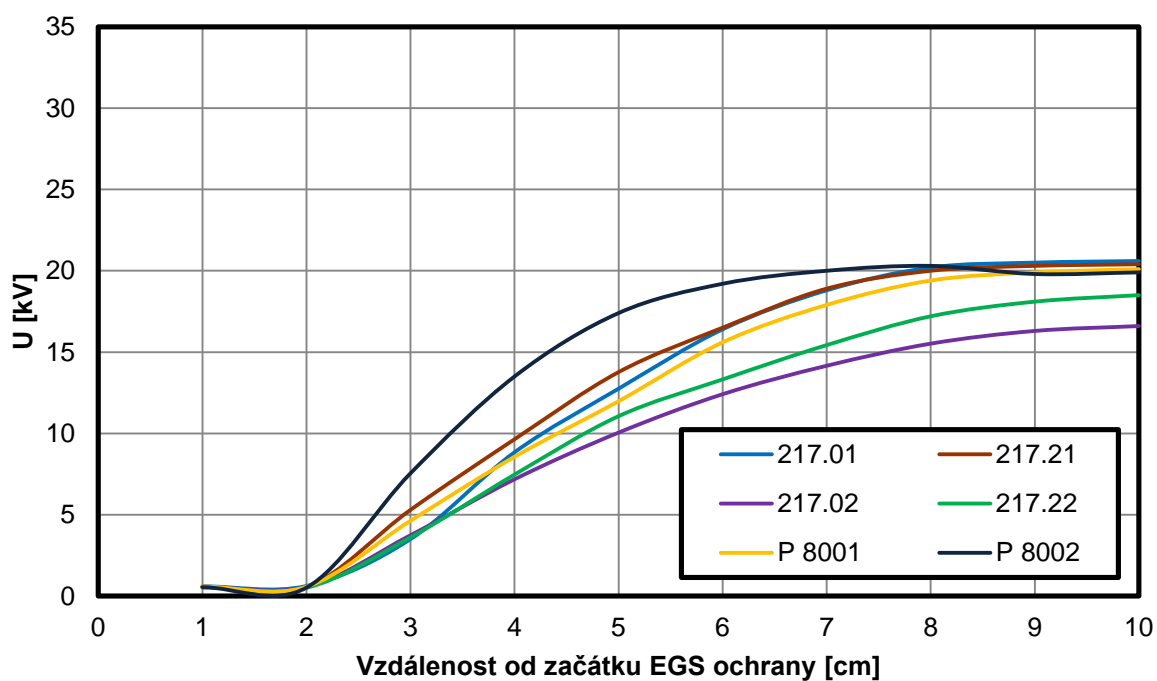
Obr. A.29 Rozložení napětí při připojeném napětí 30 kV – délka ochran 20 cm



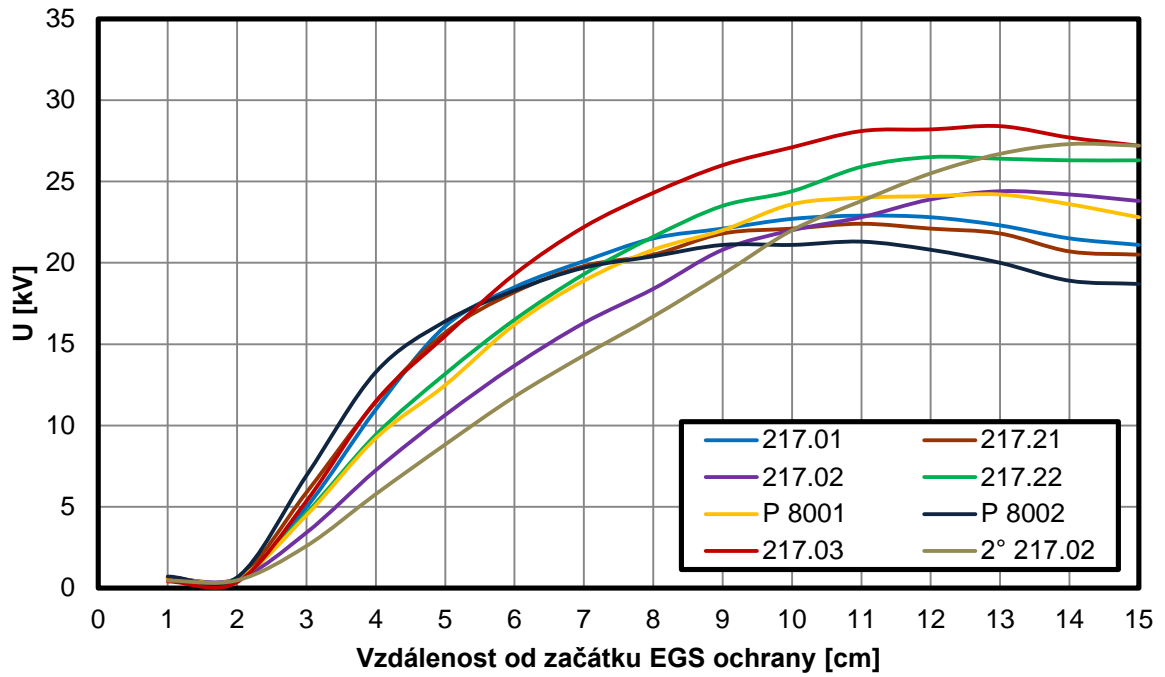
Obr. A.30 Rozložení napětí při připojeném napětí 30 kV – délka ochran 25 cm



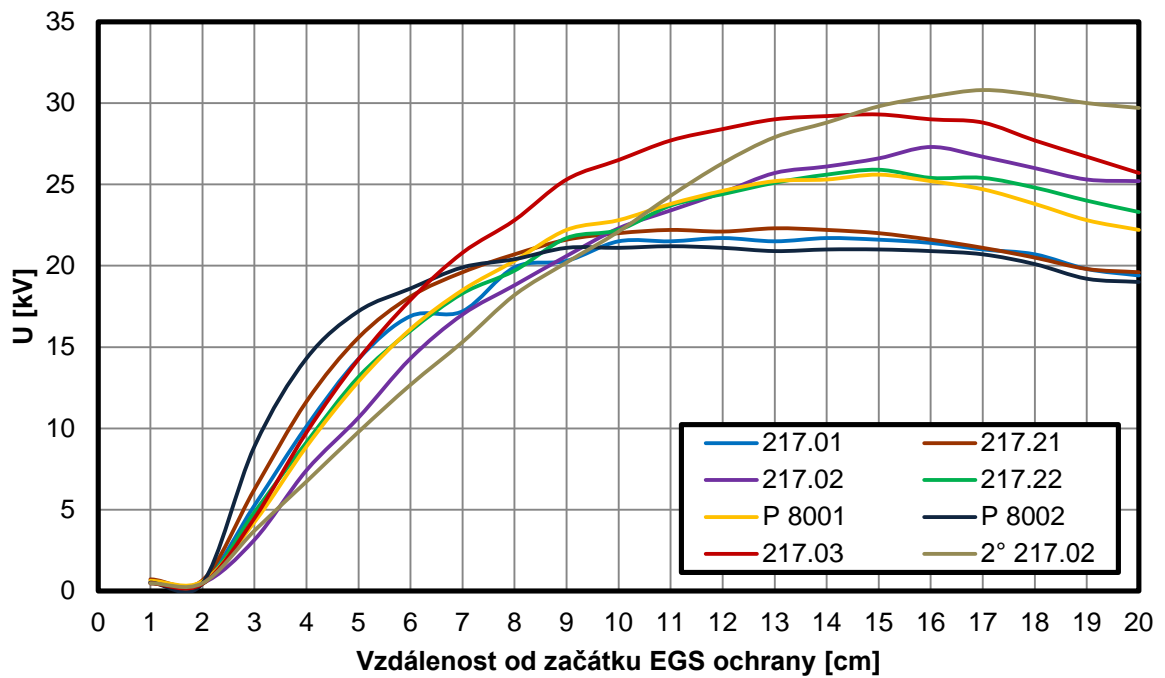
Obr. A.31 Rozložení napětí při připojeném napětí 35 kV – délka ochran 5 cm



Obr. A.32 Rozložení napětí při připojeném napětí 35 kV – délka ochran 10 cm

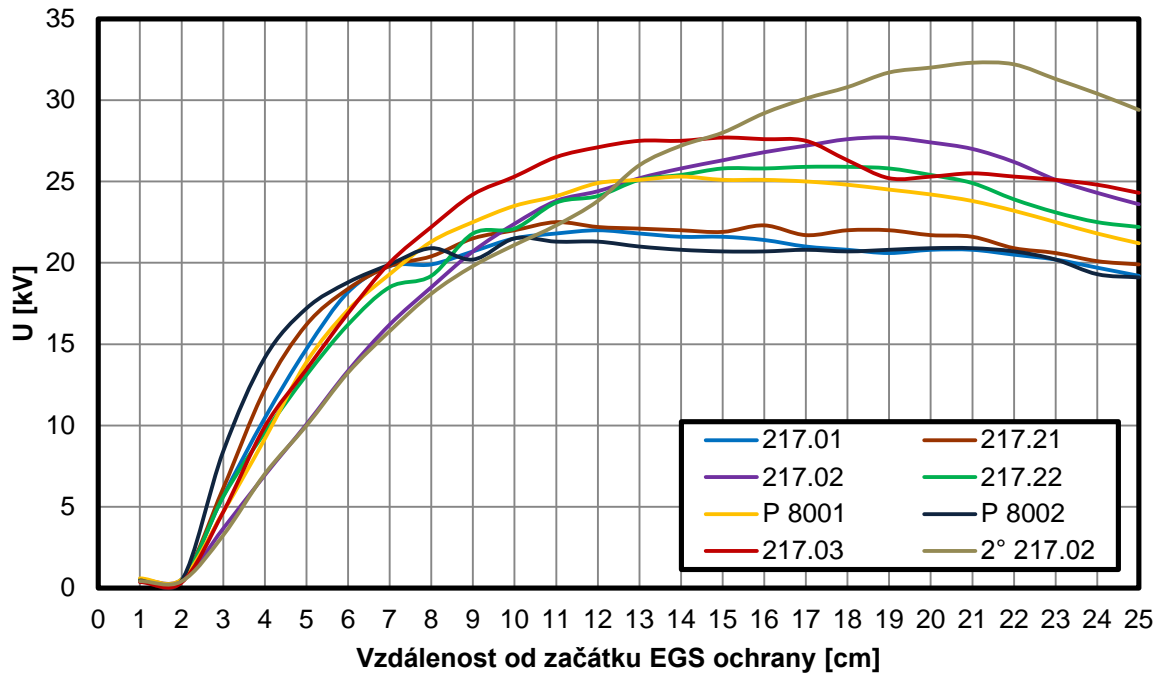


Obr. A.33 Rozložení napětí při připojeném napětí 35 kV – délka ochran 15 cm

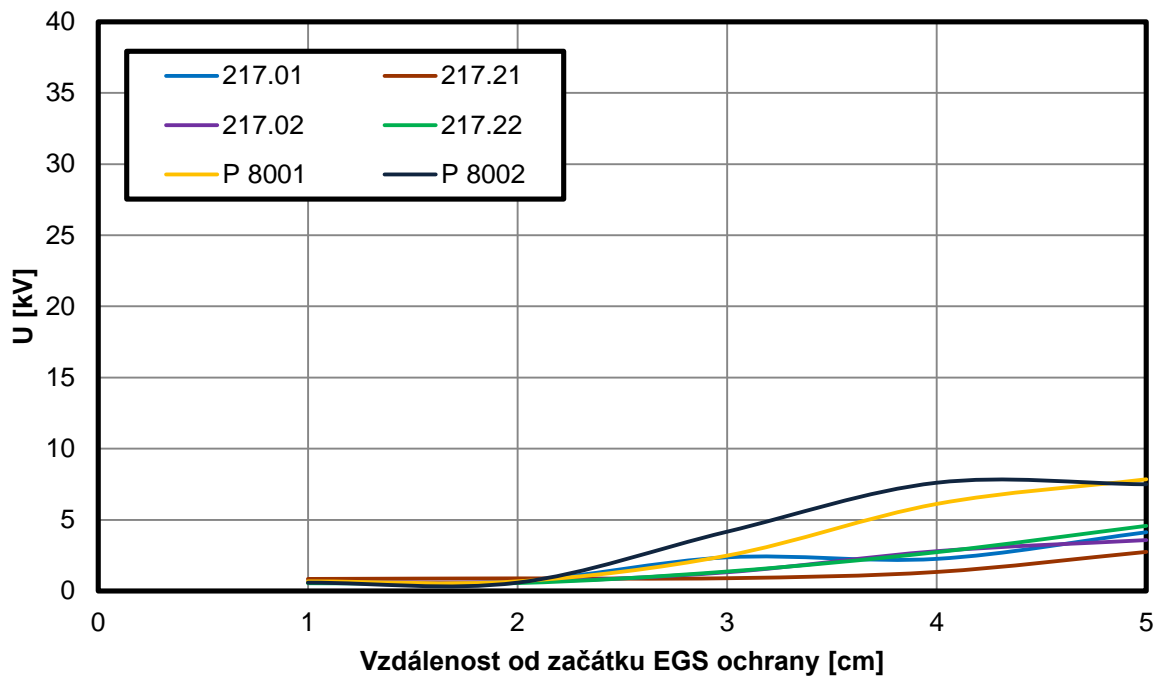


Obr. A.34 Rozložení napětí při připojeném napětí 35 kV – délka ochran 20 cm

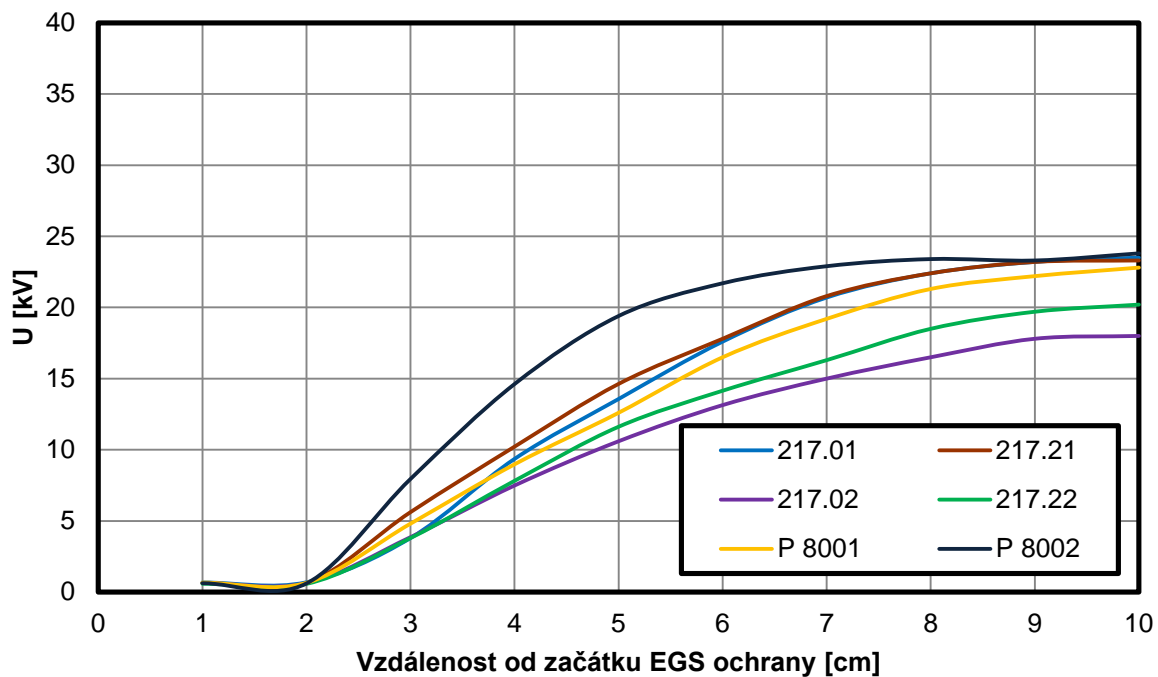




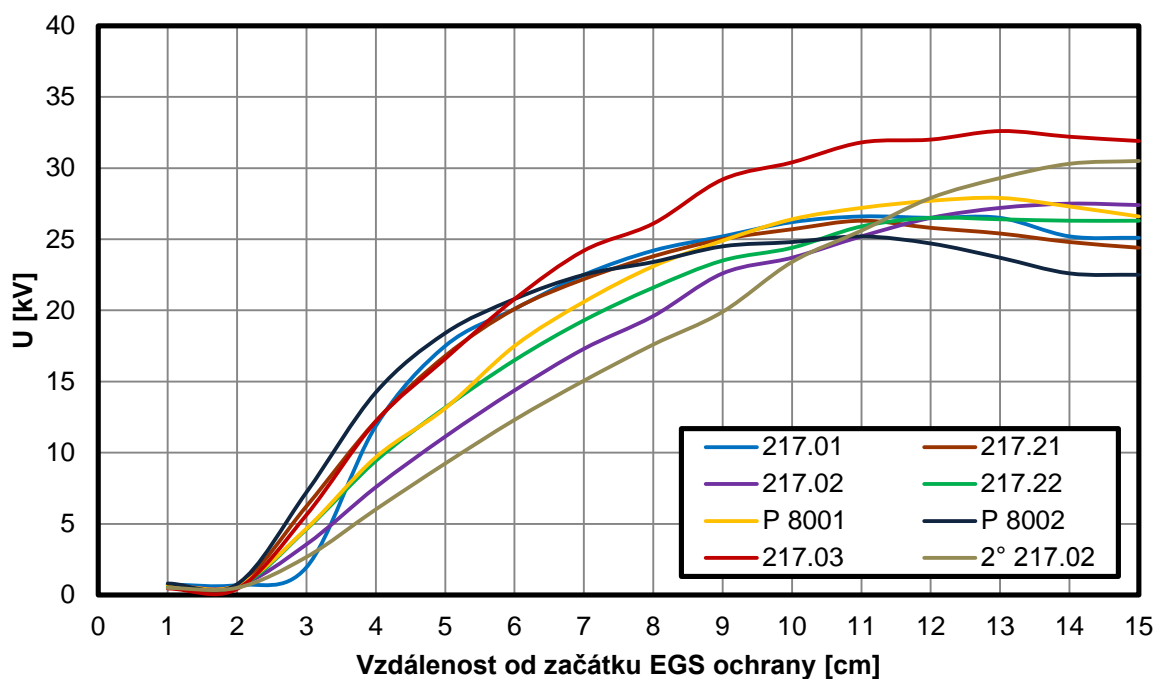
Obr. A.35 Rozložení napětí při připojeném napětí 35 kV – délka ochran 25 cm



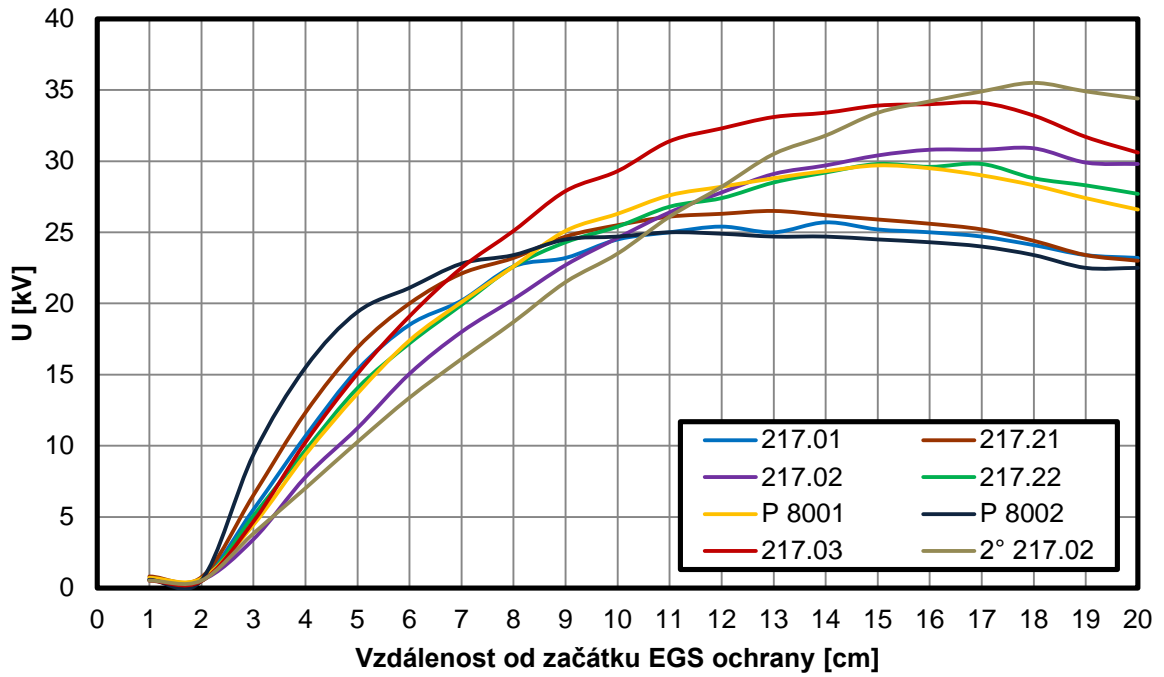
Obr. A.36 Rozložení napětí při připojeném napětí 40 kV – délka ochran 5 cm



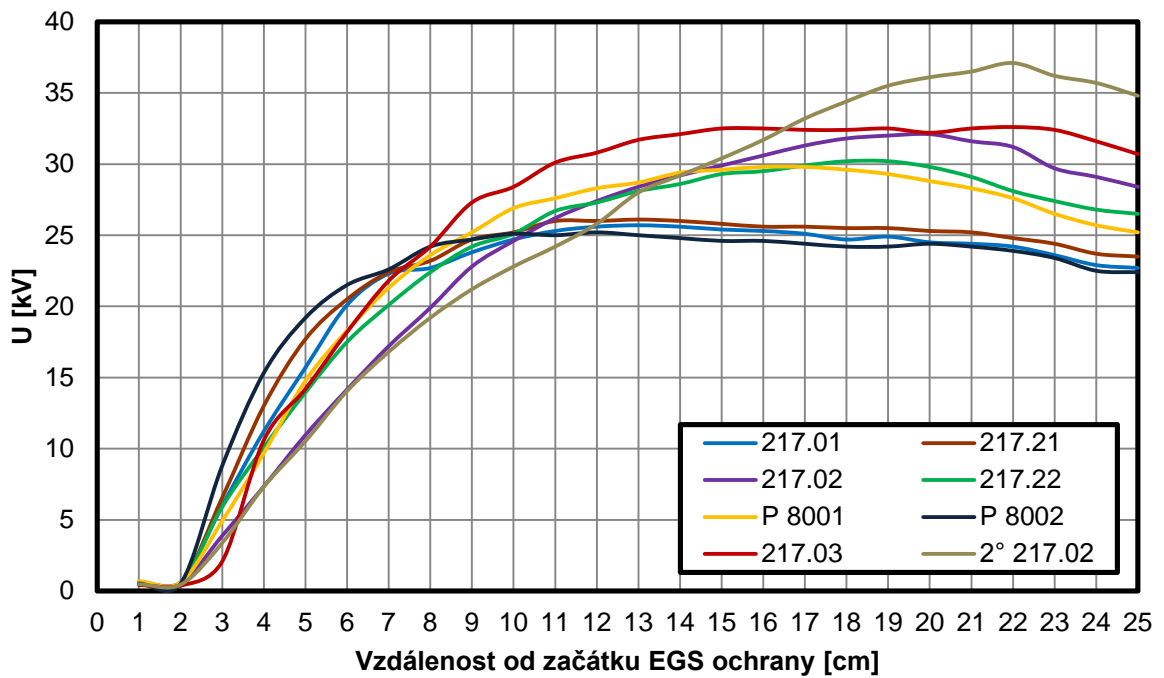
Obr. A.37 Rozložení napětí při připojeném napětí 40 kV – délka ochran 10 cm



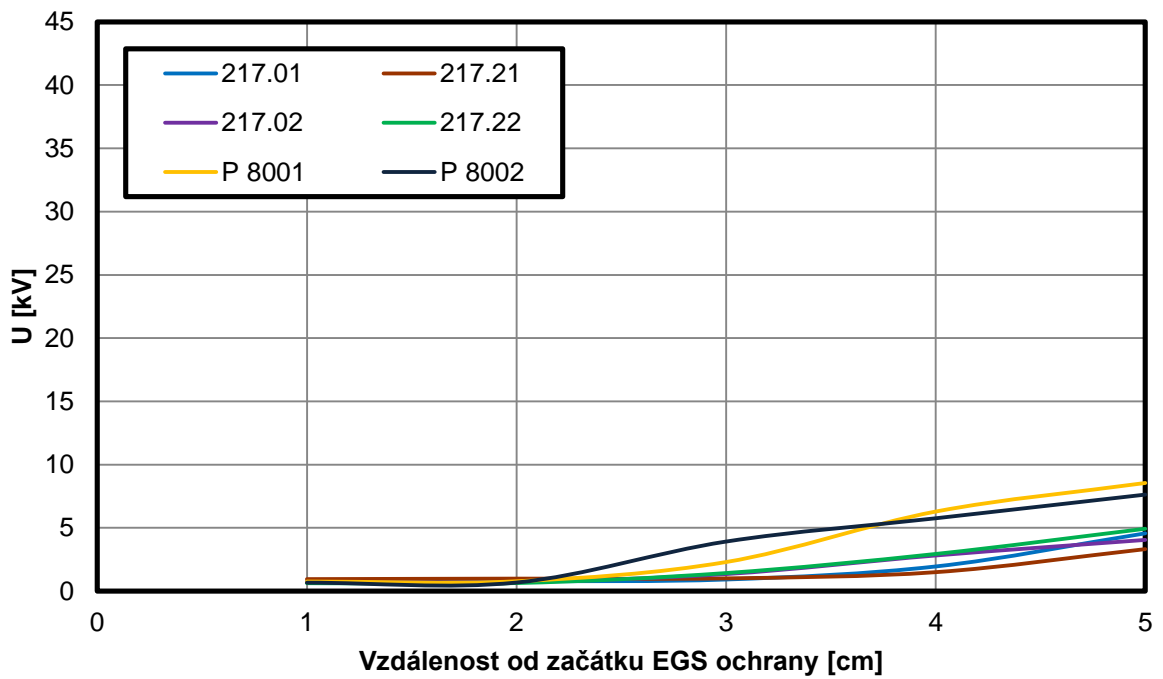
Obr. A.38 Rozložení napětí při připojeném napětí 40 kV – délka ochran 15 cm



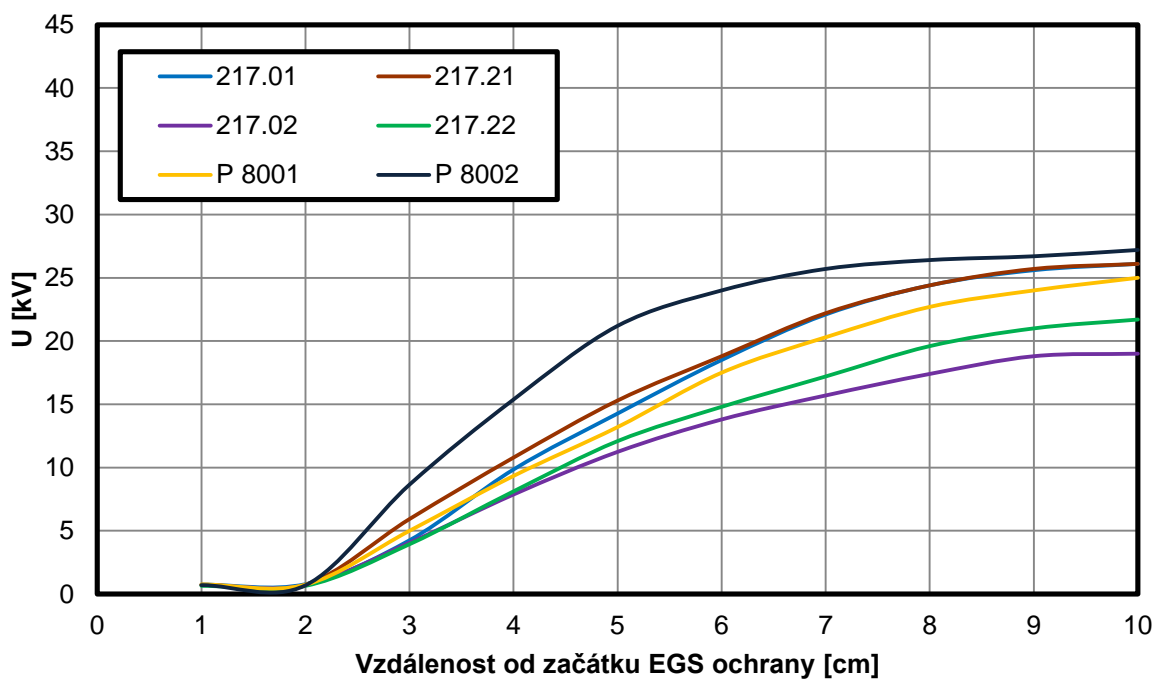
Obr. A.39 Rozložení napětí při připojeném napětí 40 kV – délka ochran 20 cm



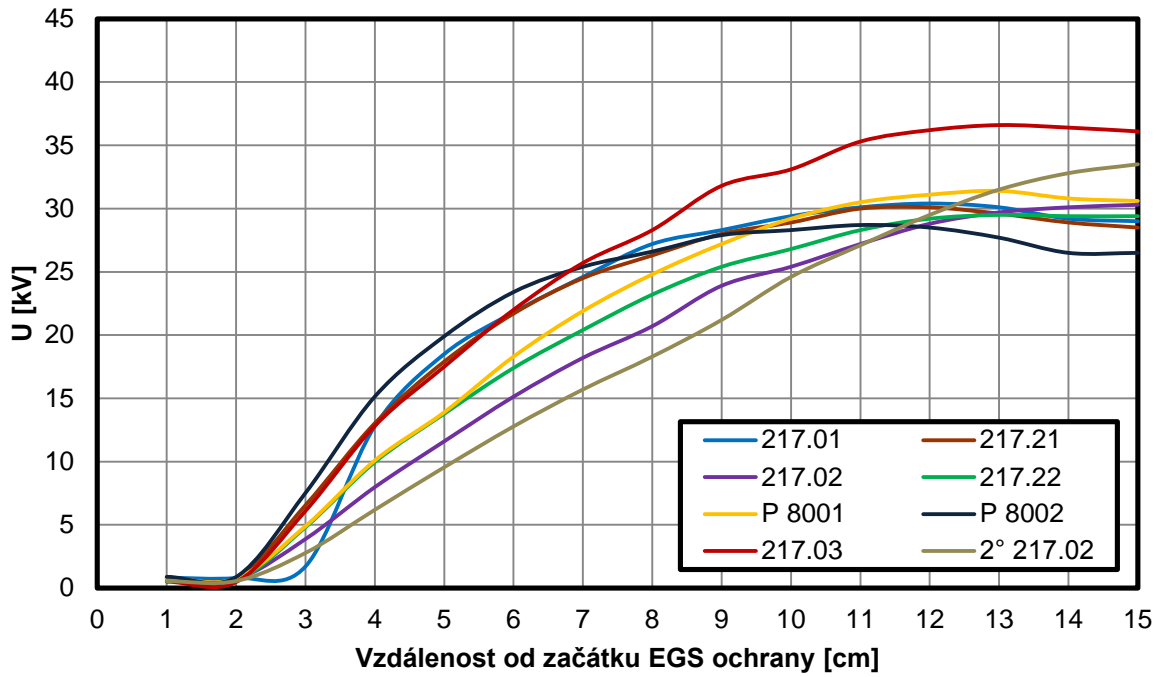
Obr. A.40 Rozložení napětí při připojeném napětí 40 kV – délka ochran 25 cm



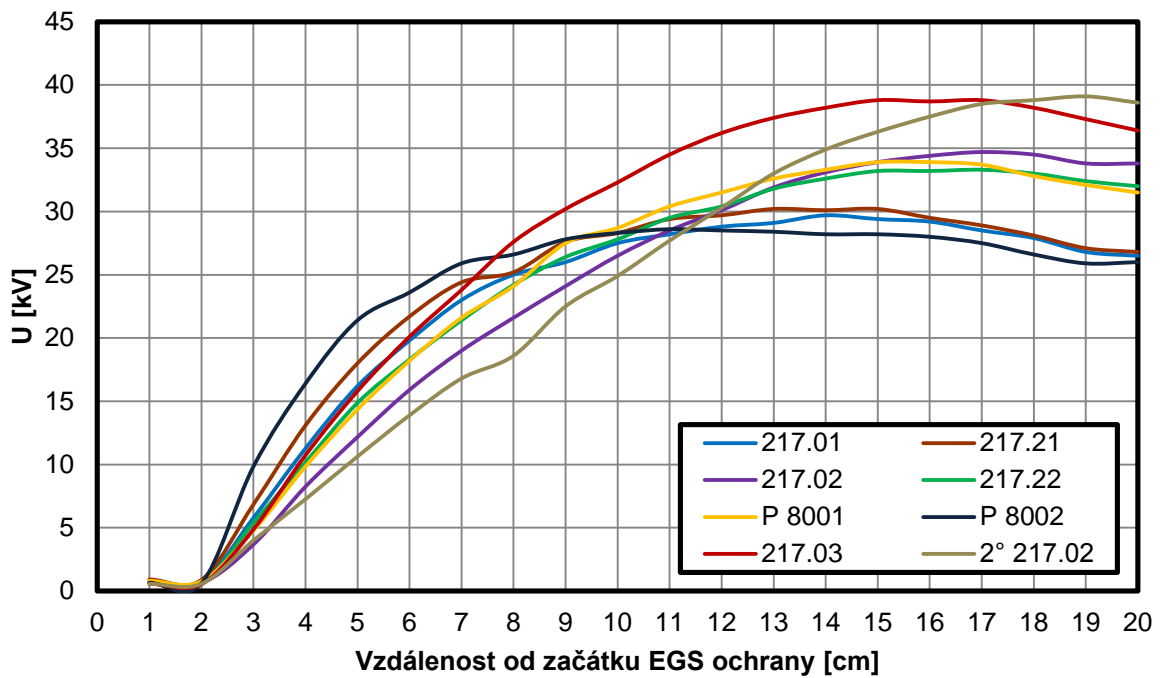
Obr. A.41 Rozložení napětí při připojeném napětí 45 kV – délka ochran 5 cm



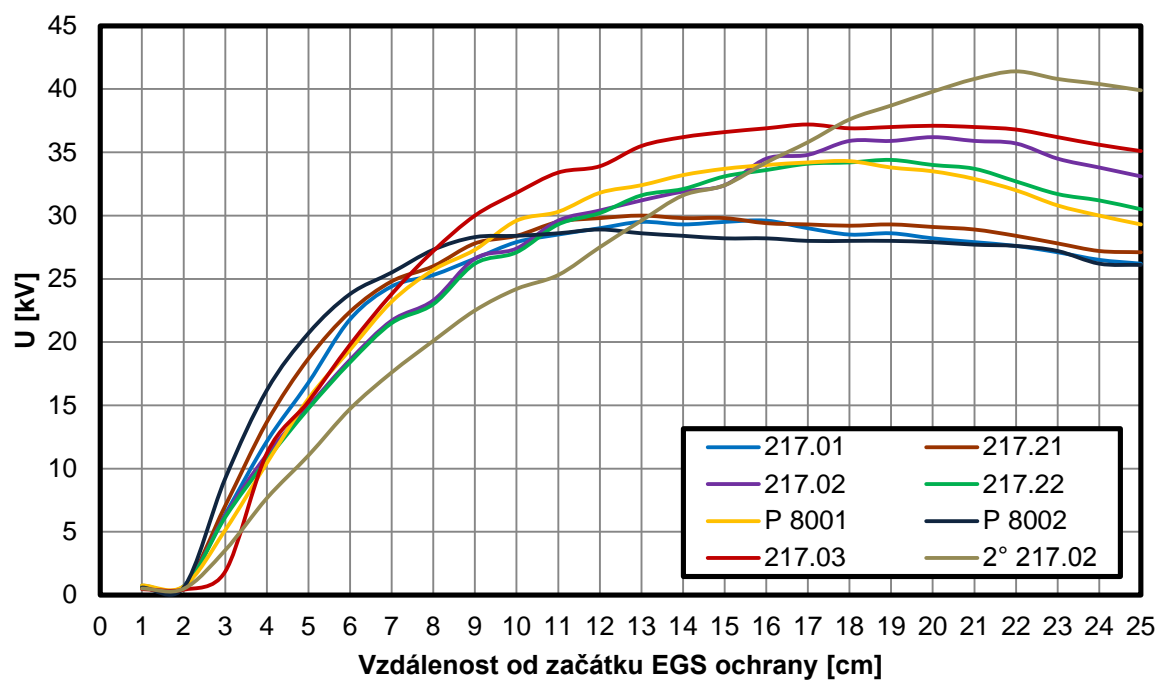
Obr. A.42 Rozložení napětí při připojeném napětí 45 kV – délka ochran 10 cm



Obr. A.43 Rozložení napětí při připojeném napětí 45 kV – délka ochran 15 cm



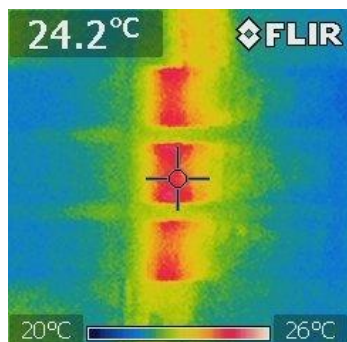
Obr. A.44 Rozložení napětí při připojeném napětí 45 kV – délka ochran 20 cm



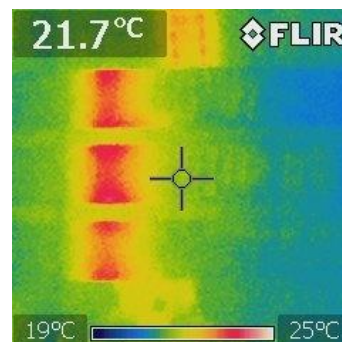
Obr. A.45 Rozložení napětí při připojeném napětí 45 kV – délka ochran 25 cm

## Příloha B

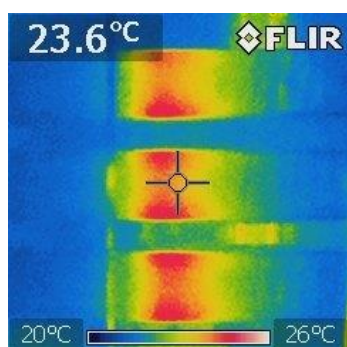
Rozložení teploty podél různých druhů a délek EGS ochran na různých hladinách napětí



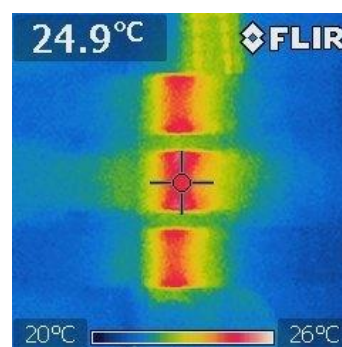
Obr. B.1 EGS ochrana 217.01 - 15 kV



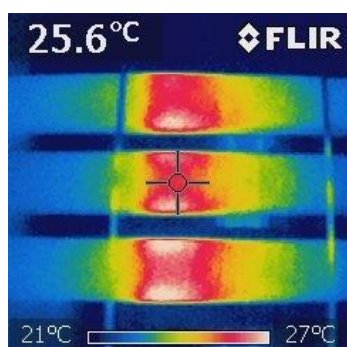
Obr. B.2 EGS ochrana 217.21 - 15 kV



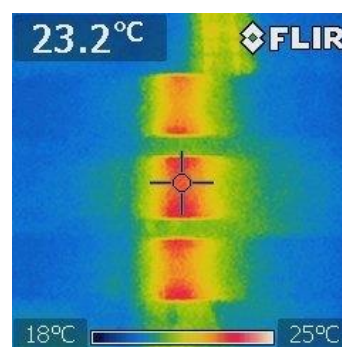
Obr. B.3 EGS ochrana 217.02 - 15 kV



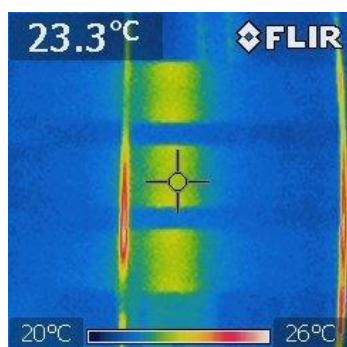
Obr. B.4 EGS ochrana 217.22 - 15 kV



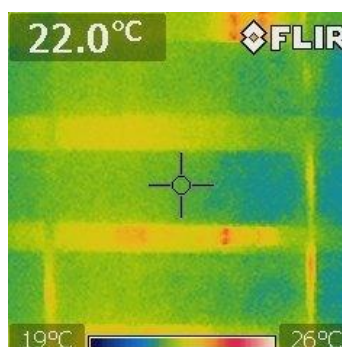
Obr. B.5 EGS ochrana 2°217.02 - 15 kV



Obr. B.6 EGS ochrana 217.03 - 15 kV

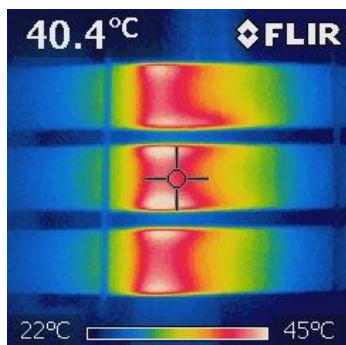


Obr. B.7 EGS ochrana P8001 - 15 kV

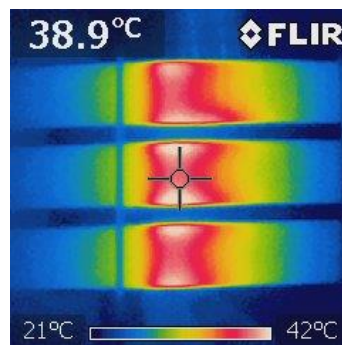


Obr. B.8 EGS ochrana P8002 - 15 kV

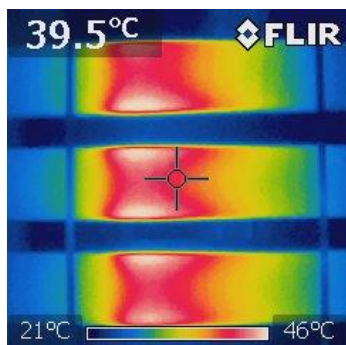




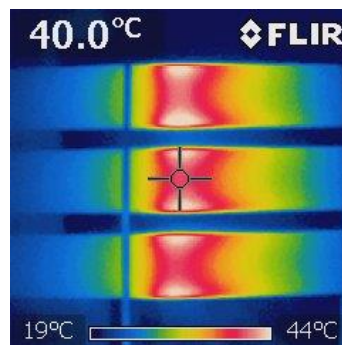
Obr. B.9 EGS ochrana 217.01 - 35 kV



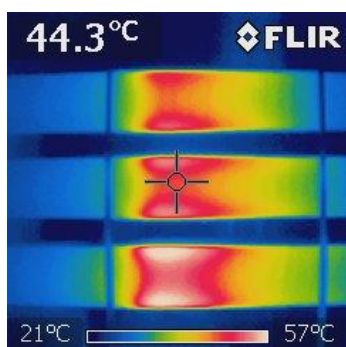
Obr. B.10 EGS ochrana 217.21 - 35 kV



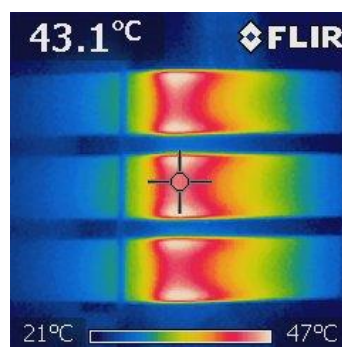
Obr. B.11 EGS ochrana 217.02 - 35 kV



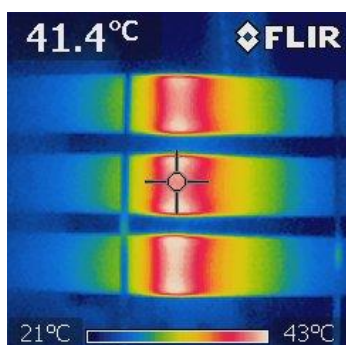
Obr. B.12 EGS ochrana 217.22 - 35 kV



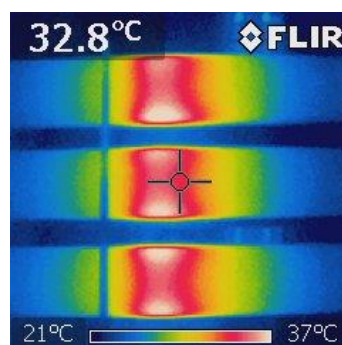
Obr. B.13 EGS ochrana 2°217.02 - 35 kV



Obr. B.14 EGS ochrana 217.03 - 35 kV

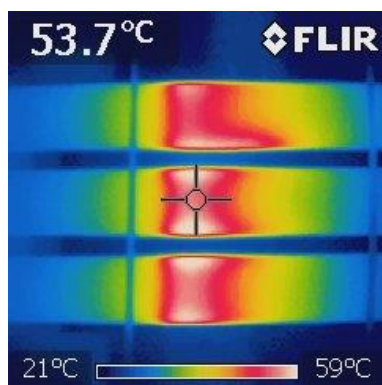


Obr. B.15 EGS ochrana P8001 - 35 kV

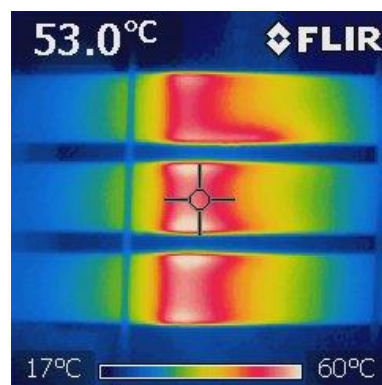


Obr. B.16 EGS ochrana P8002 - 35 kV

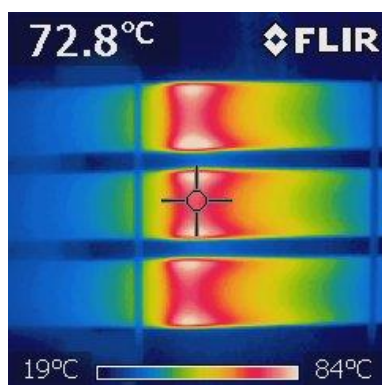




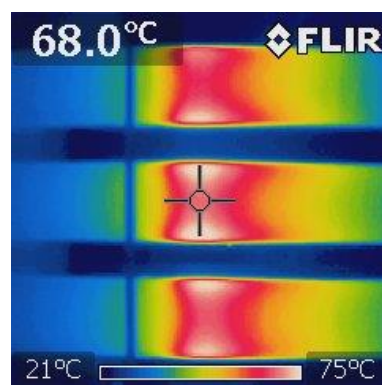
Obr. B.17 EGS ochrana 217.01 - 45 kV



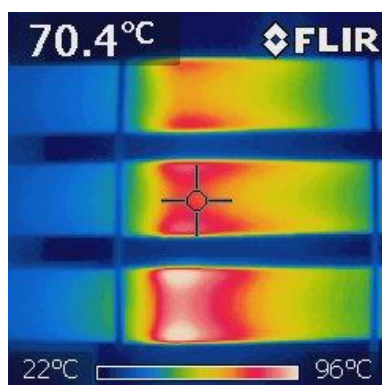
Obr. B.18 EGS ochrana 217.21 - 45 kV



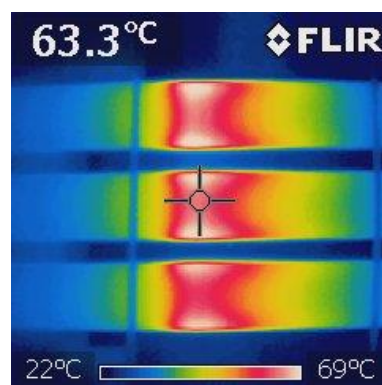
Obr. B.19 EGS ochrana 217.02 - 45 kV



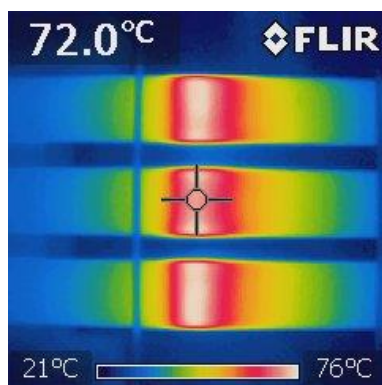
Obr. B.20 EGS ochrana 217.22 - 45 kV



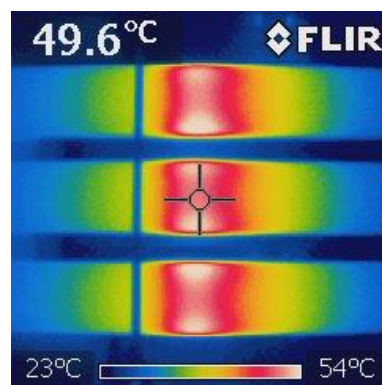
Obr. B.21 EGS ochrana 2°217.02 - 45 kV



Obr. B.22 EGS ochrana 217.03 - 45 kV



Obr. B.23 EGS ochrana P8001 - 45 kV

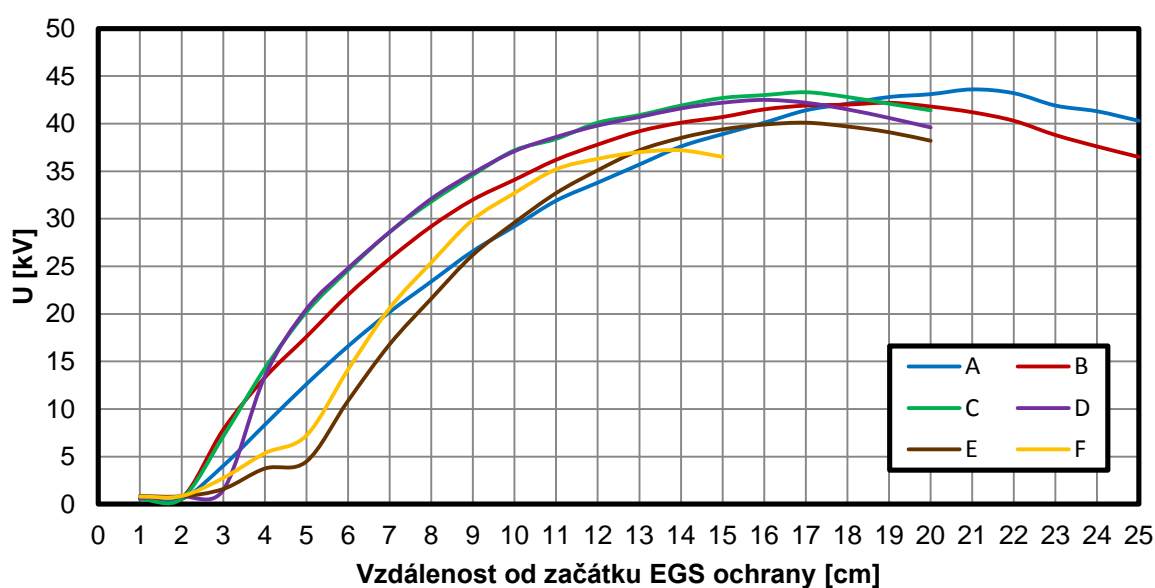


Obr. B.24 EGS ochrana P8002 - 45 kV

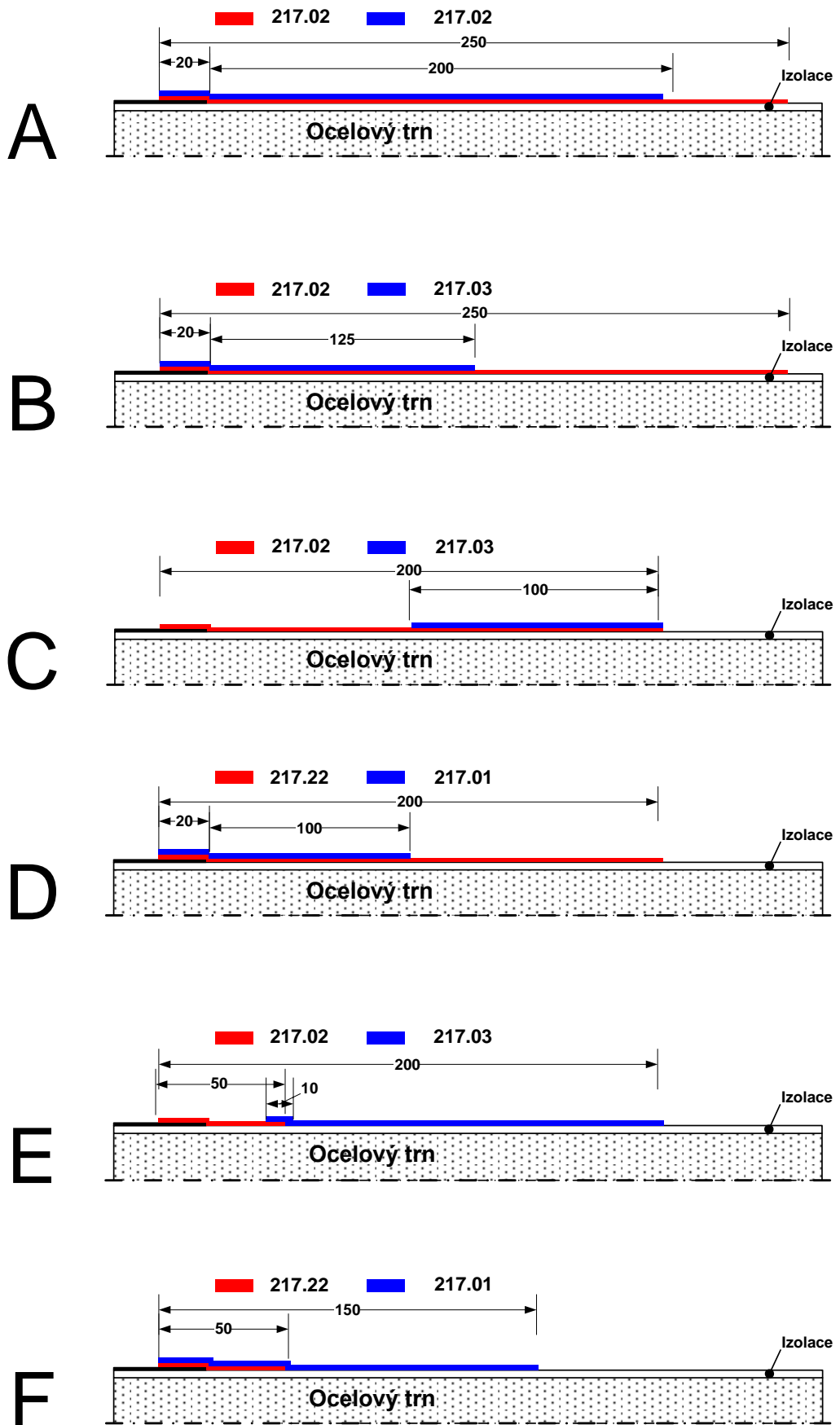
## Příloha C

### Rozložení teploty podél různých kombinací EGS pásek při 45 kV

Různé typy EGS ochran lze kombinovat tak, aby se docílilo co nejlineárnějšího průběhu napětí podél statorové tyče. V této kapitole jsou uvedeny výsledky měření napětí podél některých kombinací EGS ochran, které byly aplikovány podle *Obr. C.2*. Průběhy napětí jsou poté uvedeny v *Obr. C.1*.



*Obr. C.1* Průběh elektrického napětí na různých kombinací EGS ochran



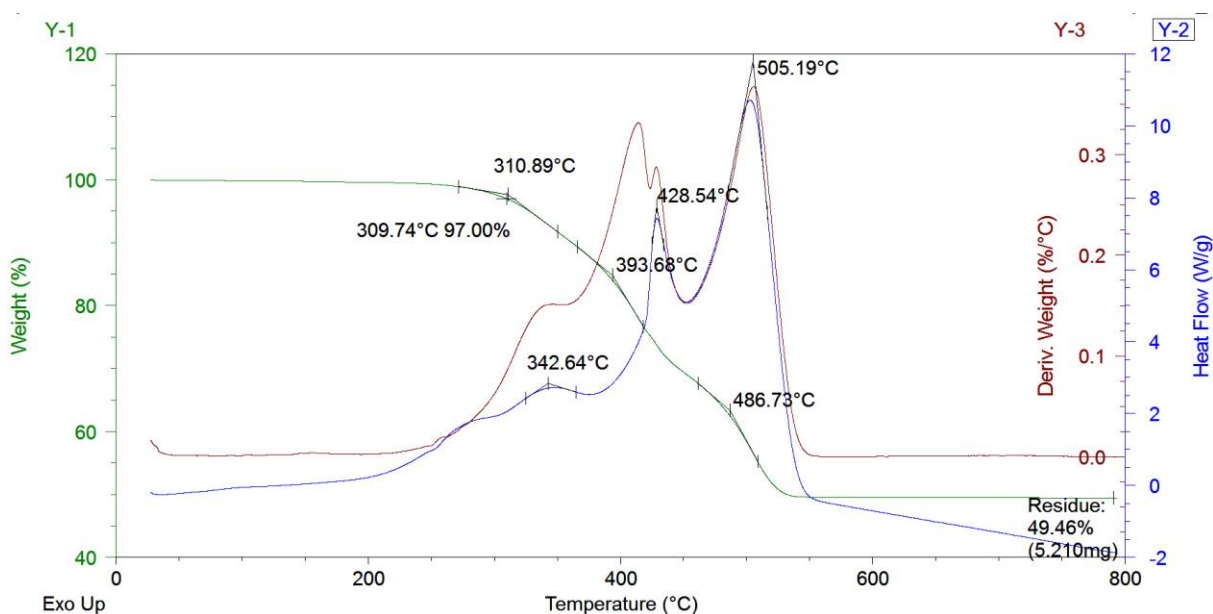
Obr. C.2 Kombinace EGS ochran

## Příloha D

### Analýza vzorků konvenčních EGS ochran a laků na bázi PEDOT:PSS

#### EGS páska 217.01

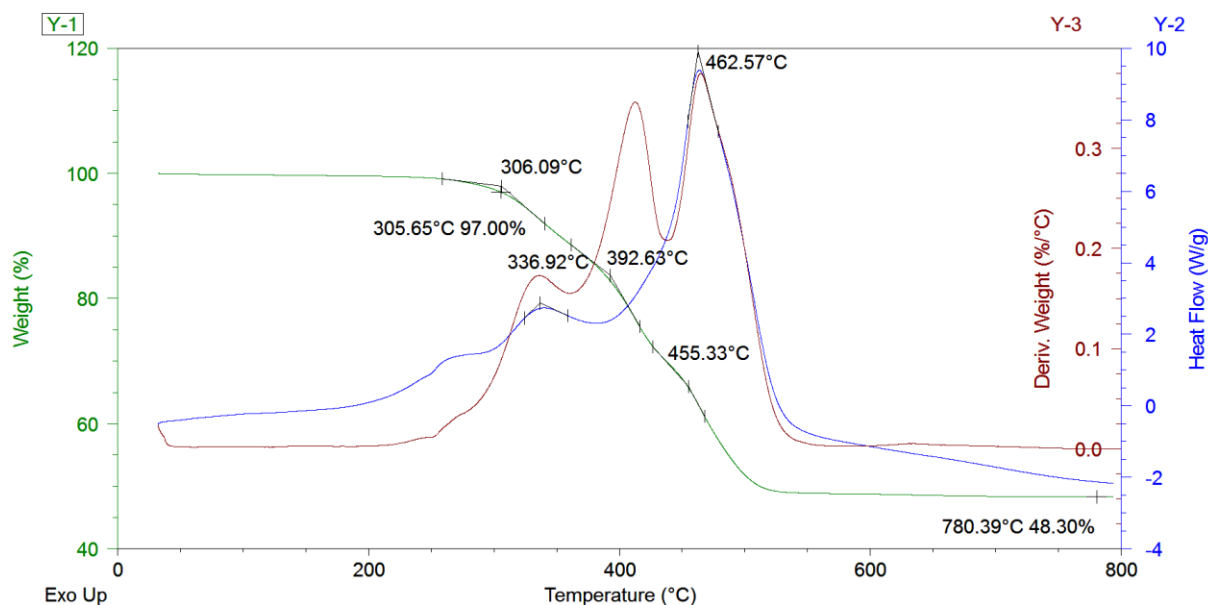
K 3% hmotnostnímu úbytku dojde při 309,74 °C. Začátek první exotermické reakce začíná při 310,89 °C a vrchol dosahuje při 342,64 °C. Druhé reakce, která je složená ze dvou reakcí začíná při 393,68 °C, teplotný tok narůstá až v druhé části reakce a vrcholí při teplotě 428,54 °C. Třetí reakce začíná na 486,73 °C a vrcholí v 505,19 °C. Residua je 49,76%.



Obr. D.1 Průběh TGA a DSC - vzorek 217.01

#### EGS páska 217.02

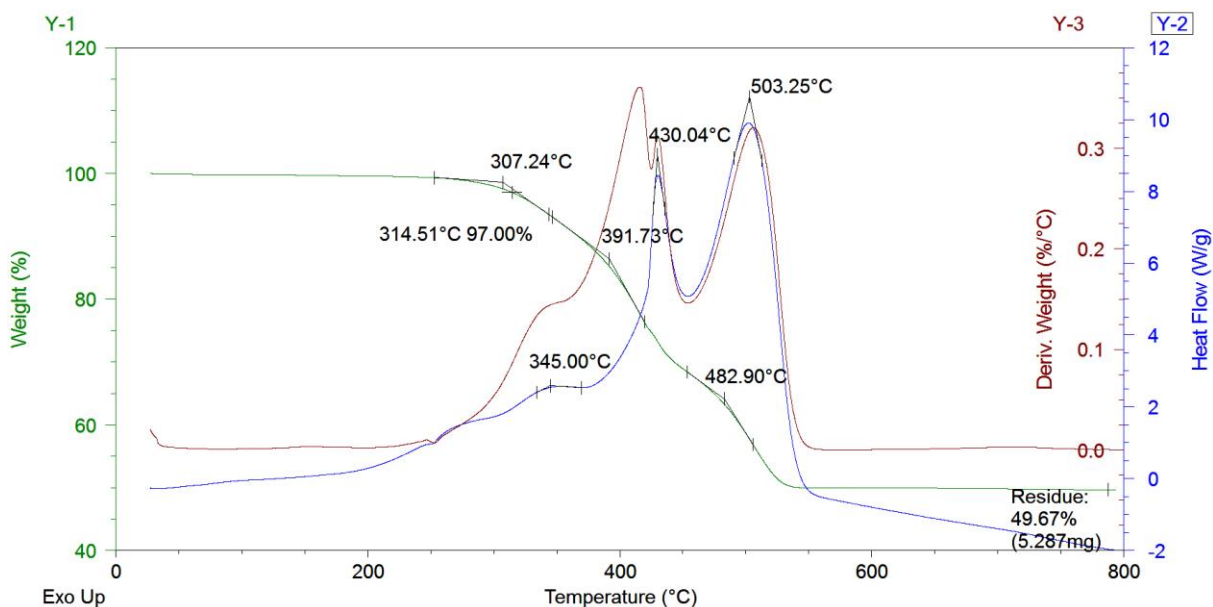
Ve vzorku dochází ke třem reakcím. Začátek první reakce je při 306,09 °C a vrchol má při 336,92 °C. Poslední reakce začíná při 455,33 °C a maxima dosahuje při 462,57 °C. Hmotnostní zbytek je 48,30 %.



Obr. D.2 Průběh TGA a DSC - vzorek 217.02

### EGS páska 217.03

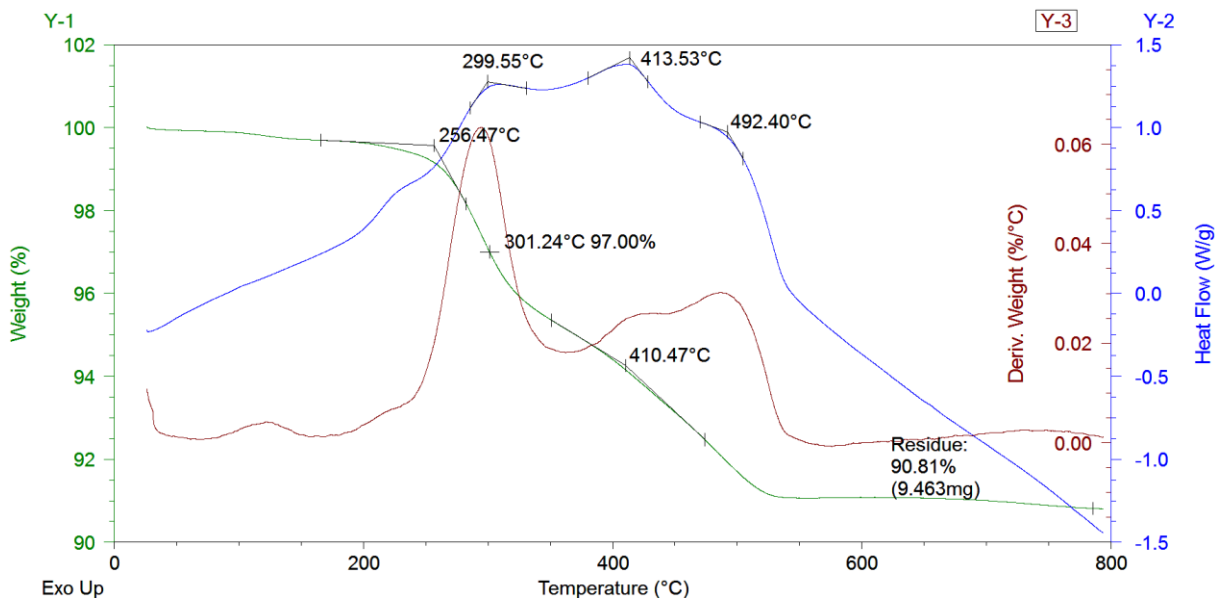
K 3% hmotnostnímu úbytku dojde při 314,51 °C. Začátek první reakce je v 307,24 °C a vrchol v 345 °C. Druhá reakce začíná při 391,73 °C, kdy první část této reakce má významný hmotnostní úbytek, který je zřejmý z první derivace průběhu hmotnosti. Maximum tepelného toku je při 430,04 °C, náběh následné reakce začíná při 482,90 °C a maximum dosahuje v 503,25 °C. Residua je 49,67 %.



Obr. D.3 Průběh TGA a DSC - vzorek 217.03

**EGS lak P8001**

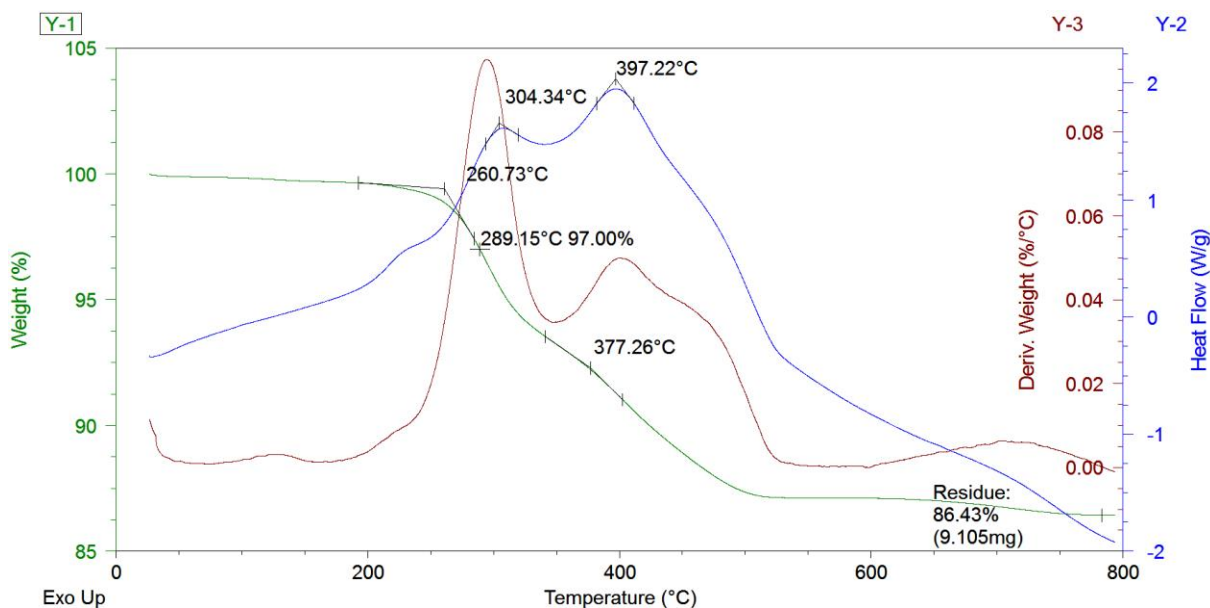
Mírná hodnota vlhkosti v počátku. Dochází k masivnímu úbytku hmotnosti při izotermě kolem teploty 300 °C, při ní je dosaženo 3% úbytku. K další reakci dochází při 410,47 °C, která dosahuje dvou vrcholů, prvního při 413,53 °C a druhého při 492,40 °C.



Obr. D.4 Průběh TGA a DSC - vzorek P8001

**EGS lak P8002**

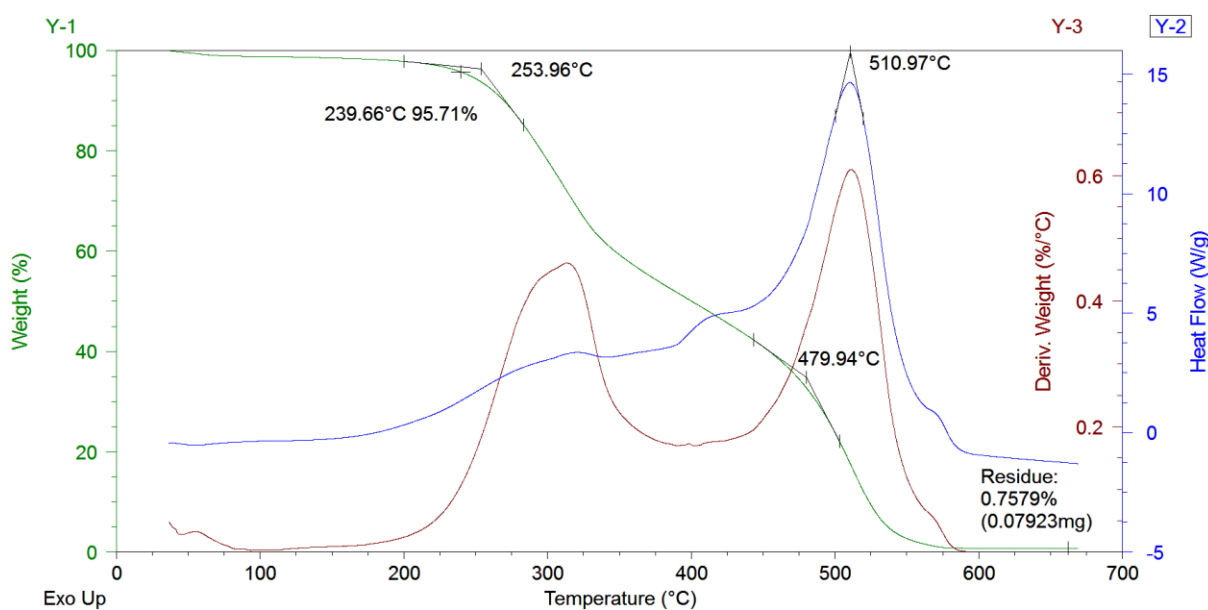
První reakce začíná při 260,73 °C, při které je poté dosaženo 3% úbytku při 289,15 °C. Druhá reakce startuje při teplotě 377,26 °C. Vrchol koresponduje s uvolňováním částic. Residua je 86,43 %.



Obr. D.5 Průběh TGA a DSC - P8002

**Vzorek laku na bázi PEDOT - 300713/1**

Do 100 °C dochází k hmotnostnímu úbytku, který je nejspíše způsobený navlhnutím materiálu, jelikož na křivce tepelného toku dochází v této oblasti k entalpickému poklesu, který je ustálen až po dosažení 100 °C. Vlhkost byla 1,29 % hmotnosti, tzn., že hodnota 3% úbytku byla v tomto případě až při 239,66 °C, tedy v 95,71 % hmotnosti vzorku. Začátek první reakce je při 253,96 °C a maximum hmotnostního úbytku dosahuje při 312 °C a k ustálení dojde při 340 °C. Poté začíná druhá reakce, která je složená ze dvou exotermních reakcí, kdy druhá reakce je doprovázena maximálním tepelným tokem i rychlostí hmotnostního úbytku. Hlavní izotermická reakce, která má maximum v 510,97°C, je podle průběhu tepelného toku jediná. Její začátek je při 479,94 °C. Residua je pouze 0,7579 %.

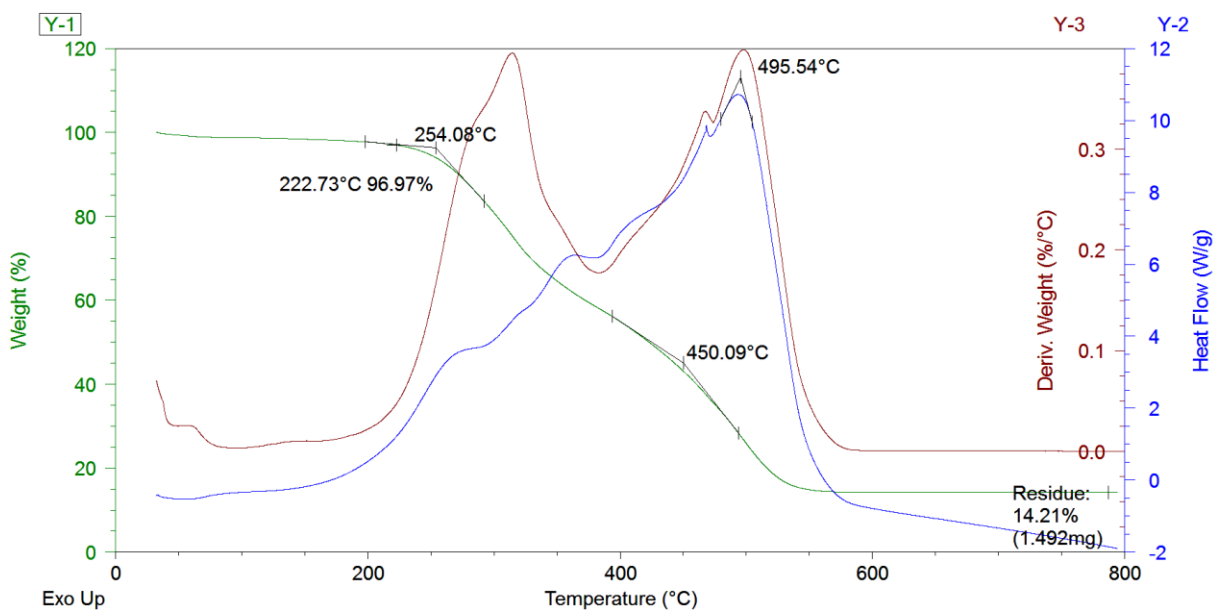


Obr. D.6 Průběh TGA a DSC - vzorek 300713/1

**Vzorek laku na bázi PEDOT - 300713/2**

K 3% hmotnostnímu úbytku dochází při teplotě 222,73 °C. U tohoto vzorku opět dochází k několika reakcím. První reakce je složená ze tří reakcí. Jejich náběh je při 254,08 °C, hlavní úbytek hmotnosti pak při 313,46 °C. Druhá hlavní exotermní reakce je opět složená ze tří reakcí, kdy k jejímu prvnímu náběhu dochází při 450,09 °C a reakce vrcholí při 495,54 °C. Průběh se od předchozí dosti liší, hlavně v teplotní oblasti mezi 320 – 450 °C. Residua je 14,21 %.

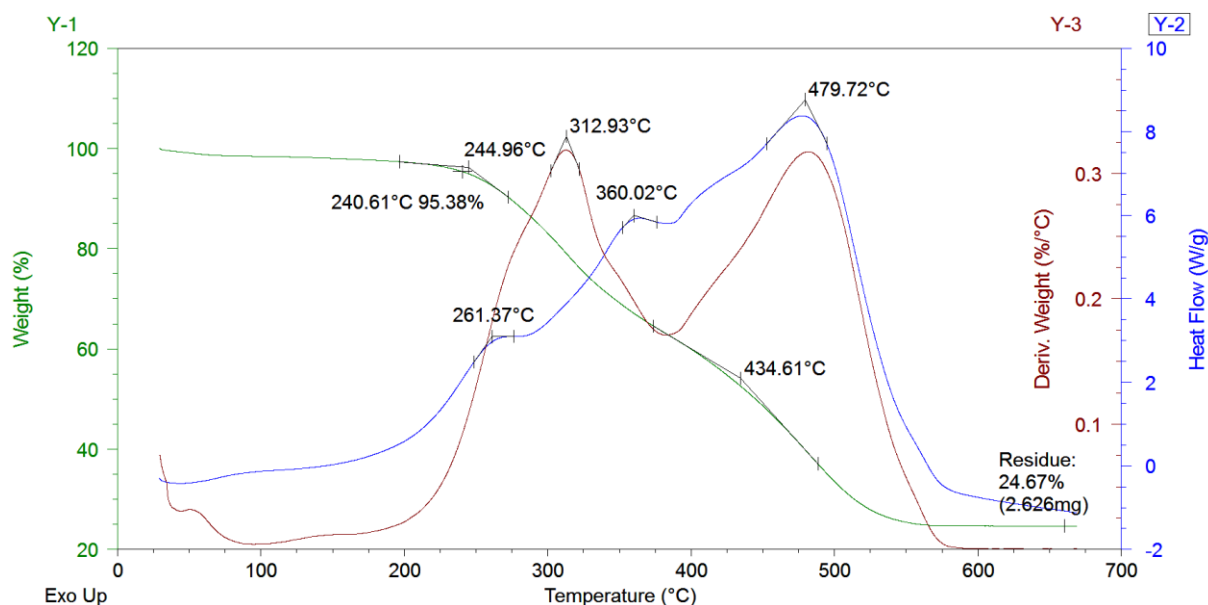




Obr. D.7 Průběh TGA a DSC - vzorek 300713/2

### Vzorek laku na bázi PEDOT - 300713/3

U tohoto vzorku dochází k třem reakcím. 3% hmotnostní úbytek je při teplotě 240,61 °C (kvůli počáteční hodnotě vlhkosti 1,6 %, hodnota realitní hmotnosti posunuta na 95,38 %). Počátek reakce je při 244,96 °C a maximální hmotnostní úbytek je při teplotě 312,93 °C. Vrchol první reakce je při 261,37 °C, druhé při 360,02 °C a třetí při 479,72 °C. Residua je 24,67 %.

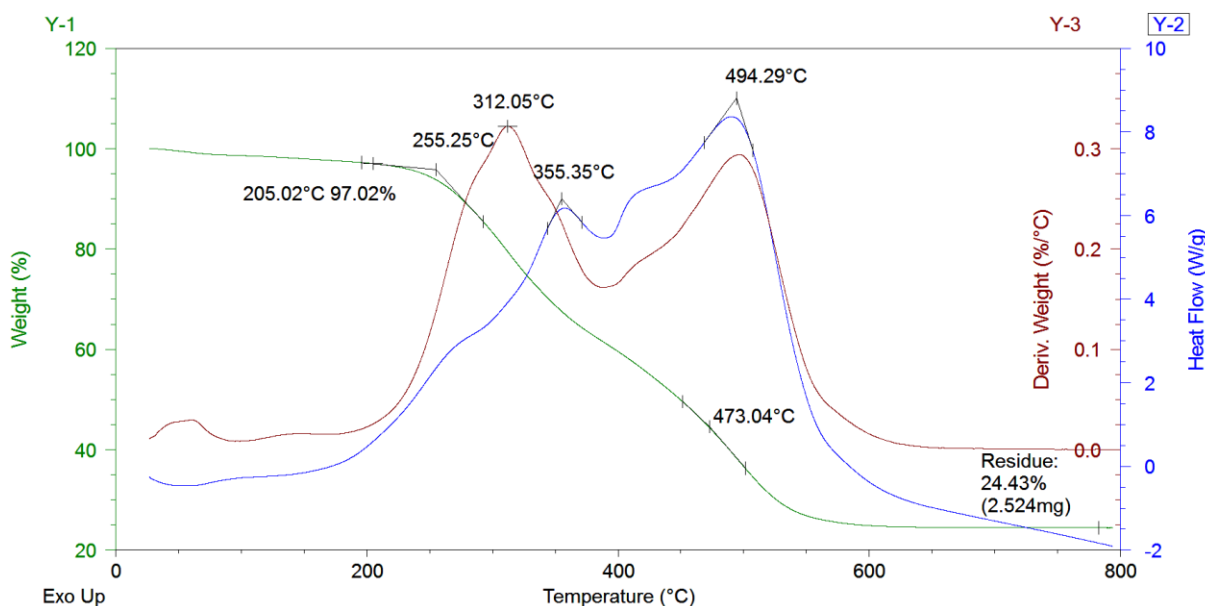


Obr. D.8 Průběh TGA a DSC - vzorek 300713/3



**Vzorek laku na bázi PEDOT - 310713/1**

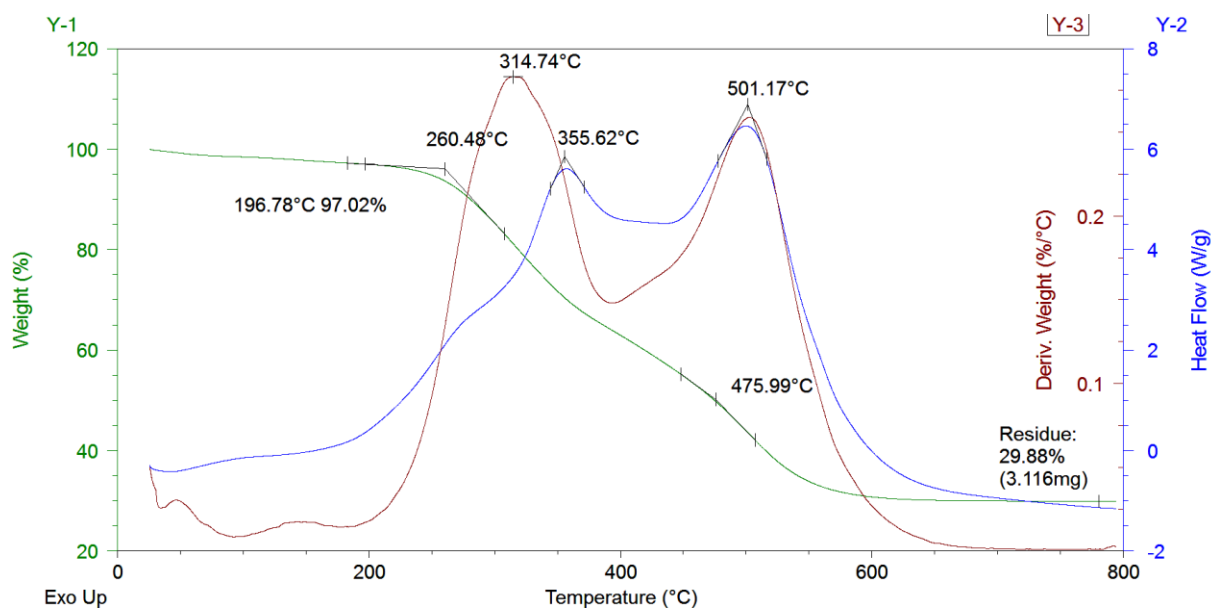
Tento vzorek prokazuje již v počátku nestálost. K 3% hmotnostnímu úbytku dochází při teplotě 205,02 °C. Náběh první reakce je při 255,25 °C. Tato reakce se skládá ze dvou reakcí, maximální ztráta hmotnosti je při 312,05 °C, k maximálnímu tepelnému toku u druhé reakce dochází při teplotě 355,35 °C. Poté následuje soustředění reakcí, které postupně narůstají do hlavní reakce, která má podle tepelného toku maximum v teplotě 494,29 °C. Residua je 24,43 %.



Obr. D.9 Průběh TGA a DSC - vzorek 310713/1

**Vzorek laku na bázi PEDOT - 310713/2**

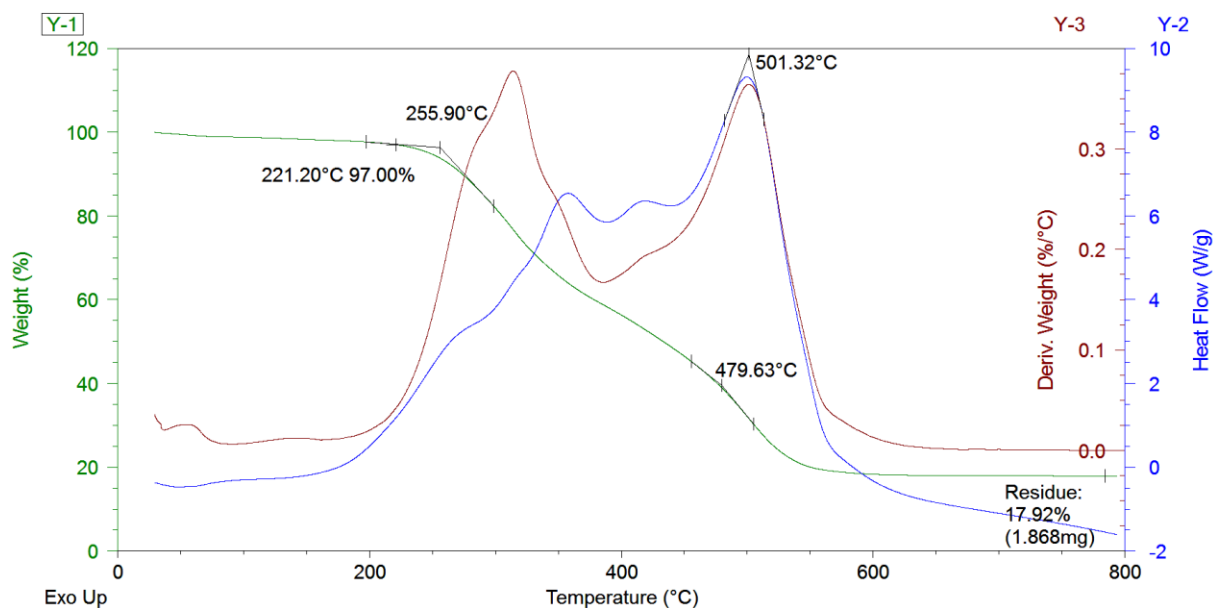
Tento vzorek vykazuje podobný průběh jako předešlý (310713/1), ale reakce probíhají v jiných rozsazích. K 3% hmotnostnímu úbytku dochází již při teplotě 198,78 °C. První hlavní reakce se skládá ze dvou reakcí a její počátek je při hodnotě teploty 260,48 °C, k nejvyššímu hmotnostnímu úbytku poté dochází při 314,74 °C a entalpicky při 355,62 °C. Druhá hlavní reakce není doprovázena jinými reakcemi, její počátek je při 475,99 °C a vrchol dosahuje při teplotě 501,17 °C. Residua je 29,88 %.



Obr. D.10 Průběh TGA a DSC - vzorek 310713/2

### Vzorek laku na bázi PEDOT - 020813/2

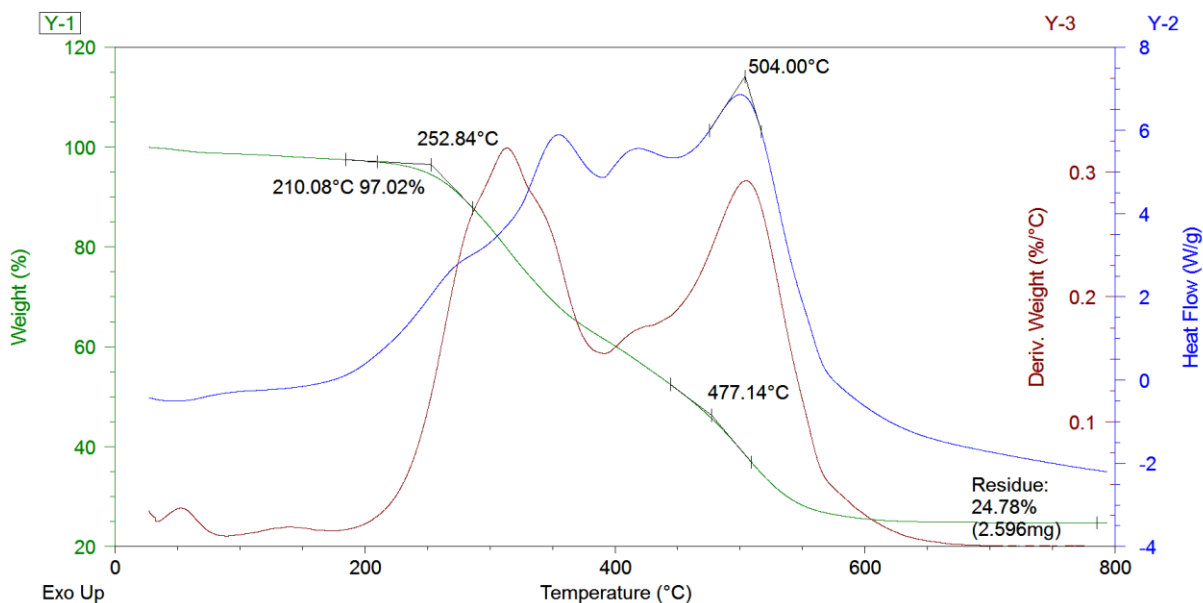
K 3% hmotnostnímu úbytku dojde při 221,20 °C. V začátku křivky hmotnosti dochází k jejímu rychlejšímu poklesu, tepelný tok je ustálený pouze do hodnoty 60 °C. U tohoto vzorku probíhá šest sousledných reakcí za sebou v rozmezí 300 – 600 °C. Nejsilnější hmotnostní úbytek je při 316,08 °C (podle křivky teleného toku lze soudit, že dochází k odpařování, jelikož nedochází v této oblasti k výraznému nárůstu křivky). Hlavní hoření je při 479,63 °C, vrchol pak při 501,32 °C. Residua je 17,92 %.



Obr. D.11 Průběh TGA a DSC - vzorek 020813/2

**Vzorek laku na bázi PEDOT - 020813/3**

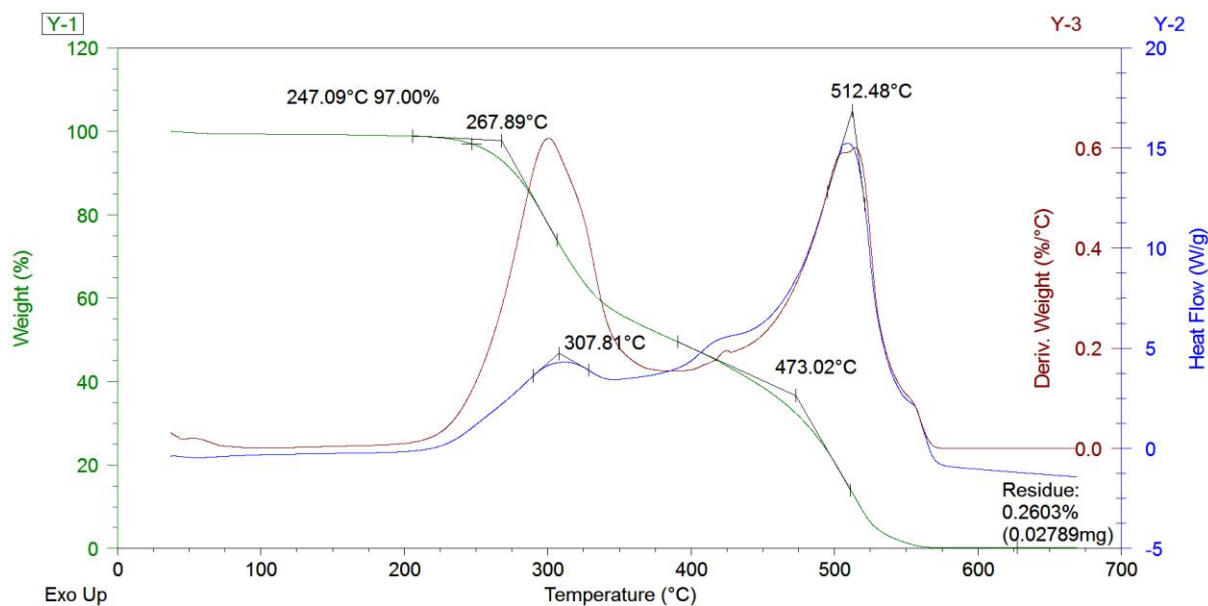
Průběh obdobný jako u předchozího vzorku 020813/2. K 3% hmotnostnímu úbytku dojde při 210,08 °C. Náběh první reakce je při 252,84 °C, maximum nelze identifikovat. K druhému náběhu dochází při 477,14 °C a maxima dosahuje při 504 °C. Residua je 24,78 %.



Obr. D.12 Průběh TGA a DSC - vzorek 020813/3

**Vzorek laku na bázi PEDOT - 050813/1**

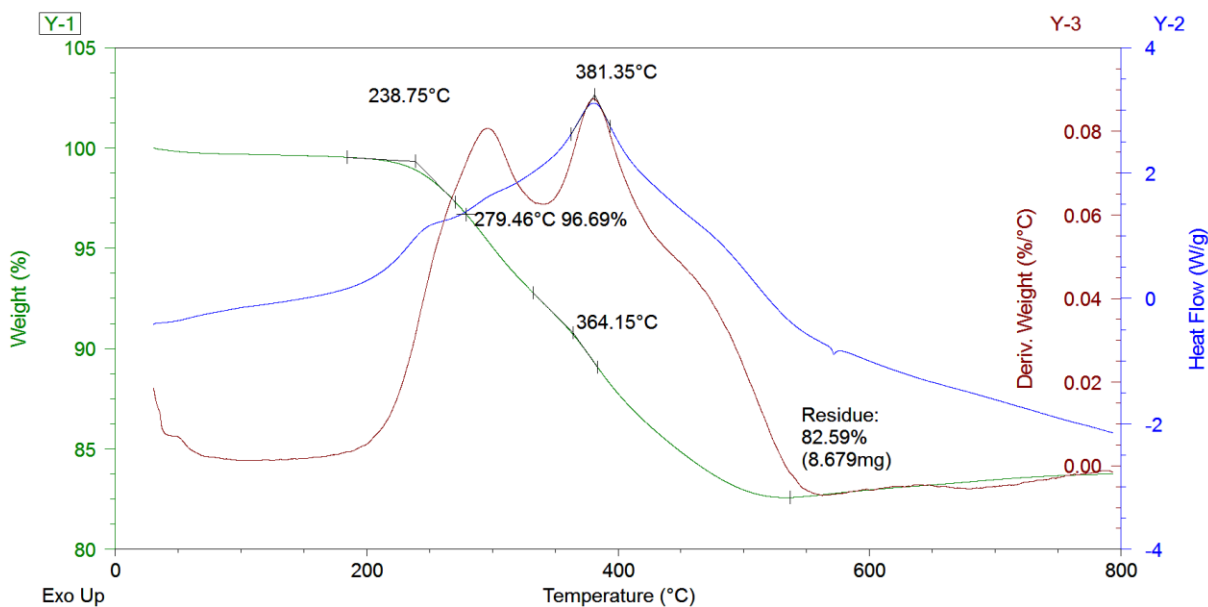
Začátek první reakce je při 267,89 °C a vrcholí při 307,81 °C. Náběh druhé exotermické reakce začíná při 473,02 °C a vrcholí při 512,48 °C. Residua po rozkladu je 0,2603 %.



Obr. D.13 Průběh TGA a DSC - vzorek 050813/1

**Vzorek laku na bázi PEDOT - 050813/3**

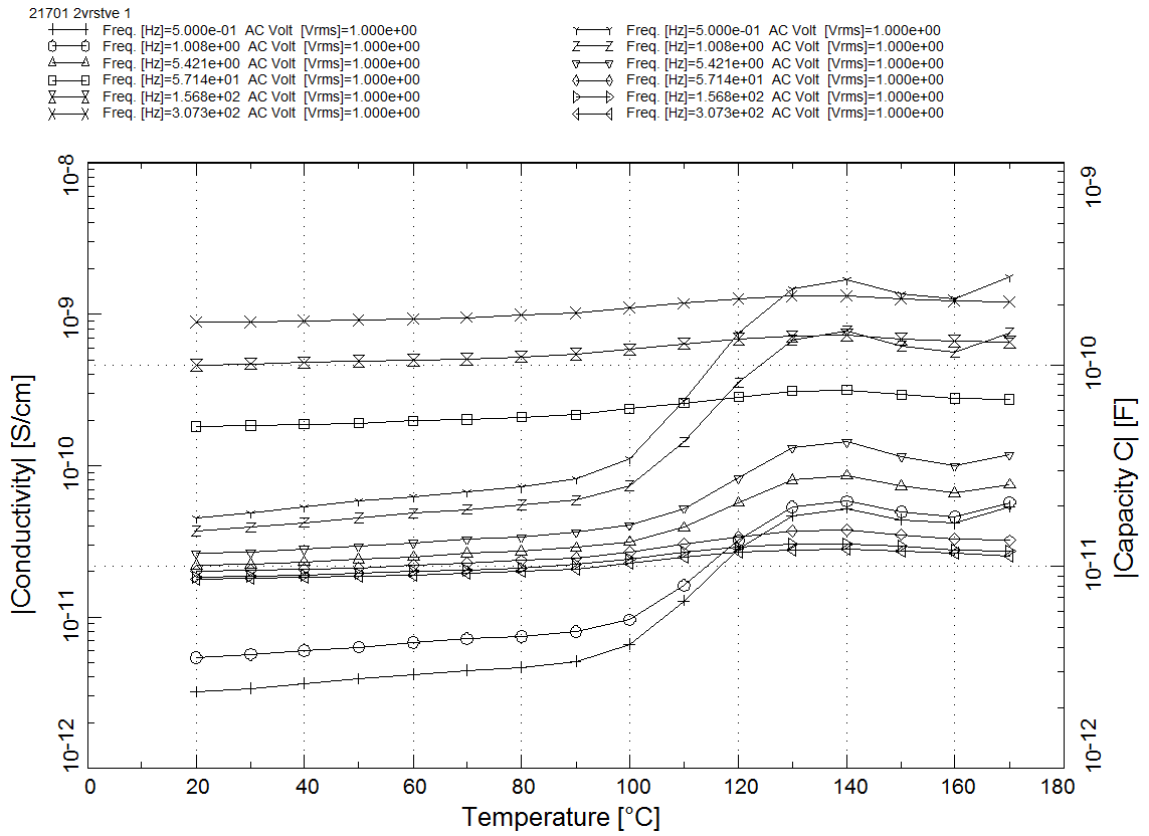
Vzorek obsahoval vodu v hmotnostním množství 0,32%. K 3% hmotnostnímu úbytku po odpaření vody dochází při teplotě 279,46 °C. Náběh první reakce je při teplotě 238,75 °C, druhá reakce začíná při 364,15 °C a entalpického maxima dosahuje při 381,35 °C. Od 500 °C se vzorek chová nestandardně v závislosti úbytku hmotnosti na teplotě.



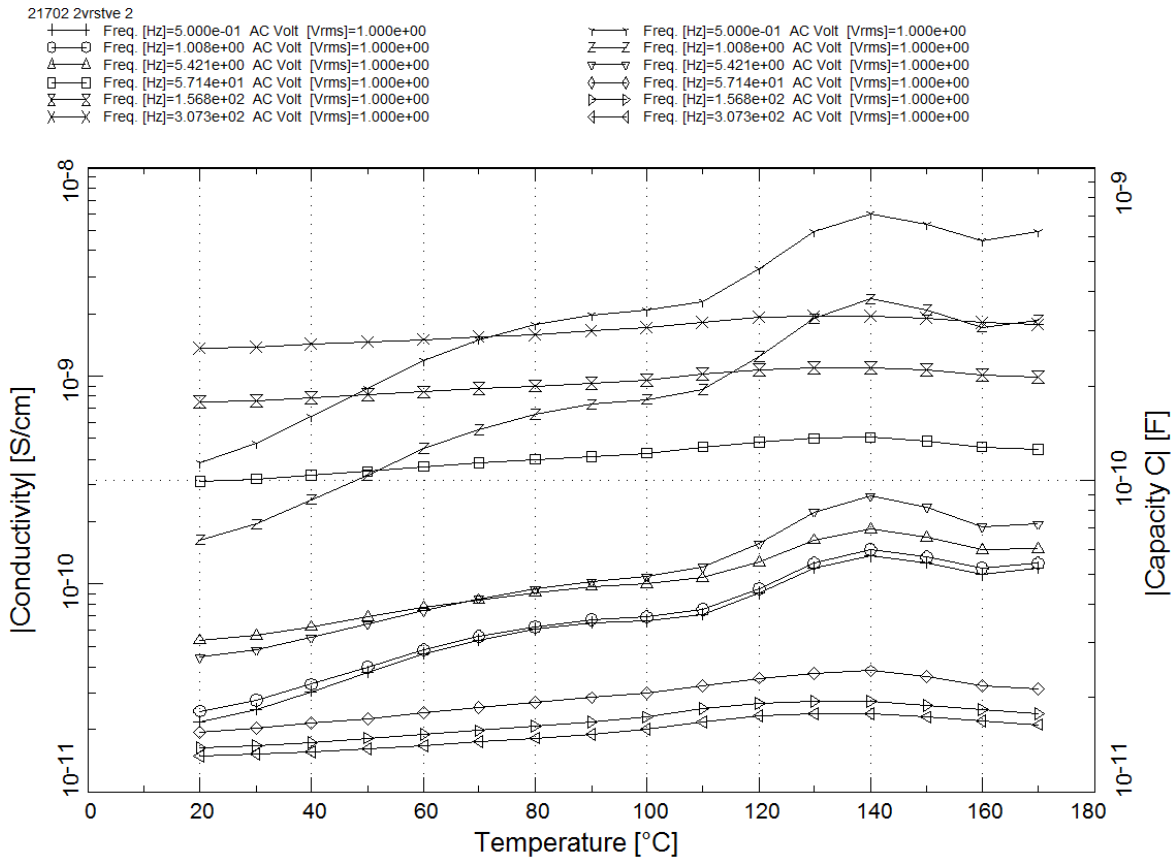
Obr. D.14 Příběh TGA a DSC - vzorek 050813/3

# Příloha E

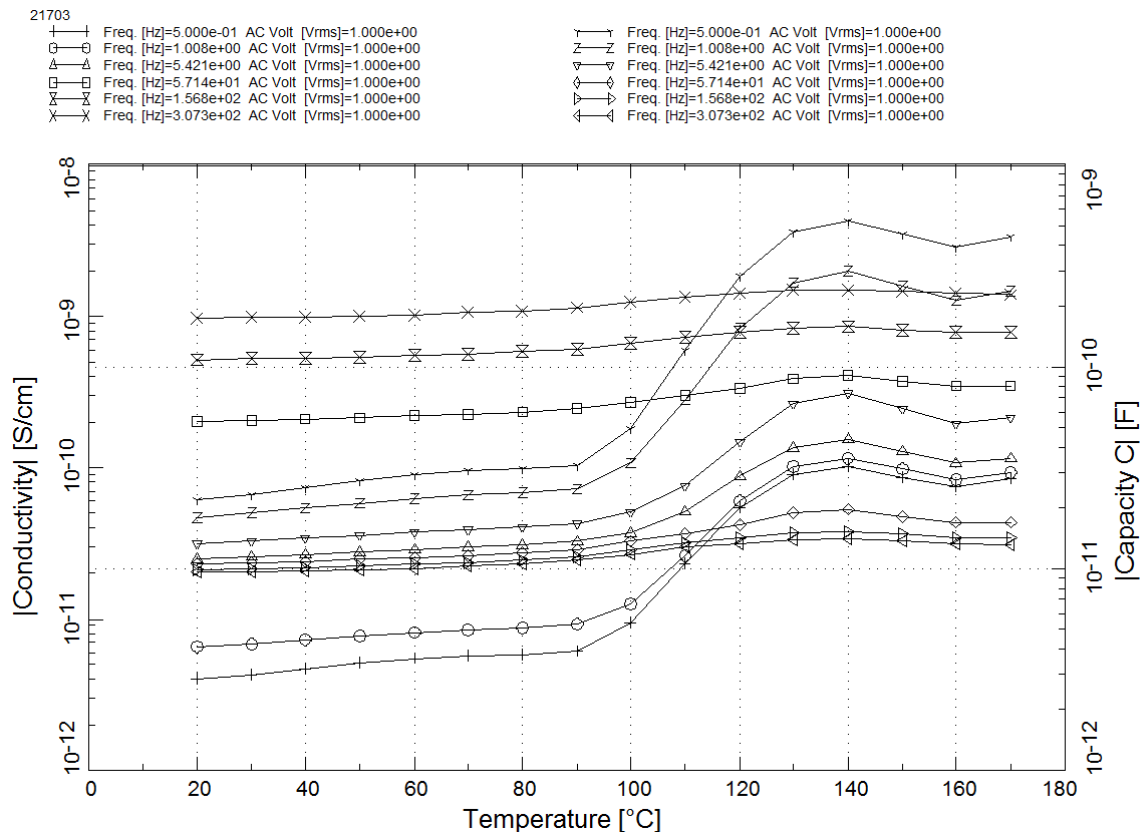
## Závislosti elektrické kapacity a vodivosti EGS pásek na teplotě



Obr. E.1 EGS páska 217.01



Obr. E.2 EGS páska 217.02



Obr. E.3 EGS páska 217.03