



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY

A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

SIMULACE ELEKTRICKÉHO POLE V PROSTORU PŘÍPOJNIC VN ROZVADĚČE

SIMULATION OF ELECTRIC FIELD IN THE AREA OF SWITCHGEAR BUSBARS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Michal Müller

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Bohuslav Bušov, CSc.

BRNO 2016

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Bc. Michal Müller

ID: 147633

Ročník: 2

Akademický rok: 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Simulace elektrického pole v prostoru přípojnic vn rozvaděče

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Nastudujte dokumentaci k rozváděči UniGear ZS1.
2. Osvojte způsob práce v simulačním prostředí ANSYS MAXWELL.
3. Simulujte intenzitu el. pole v prostoru přípojnic s odpojovačem.
4. Navrhněte opatření snižující elektrické namáhání prostředí v prostoru přípojnic uvnitř rozvaděče.

Termín zadání: 21.9.2015

Termín odevzdání: 24.5.2016

Vedoucí práce: doc. Ing. Bohuslav Bušov, CSc.

Konzultant diplomové práce:

Ing. Ondřej Víttek, Ph.D., *předseda oborové rady*

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Cílem této práce je simulace elektrického pole v prostoru přípojníc vn rozvaděče. Přesněji je cílem nalezení místa s nejkritičtější hodnotou velikosti intenzity elektrického pole a následný návrh opatření snižující velikost pole v tomto místě. Simulace byla provedena pomocí programu využívajícího metodu konečných prvků. Simulace ukázala na nejkritičtější místo. Pomocí fyzikálních principů bylo navrženo řešení. Toto řešení dvakrát snížilo velikost intenzity elektrického pole v tomto místě.

Abstract

The aim of this work is to simulate the electric field in the space of busbar HV switchgear. More precisely, the aim is to find a place with the most critical value of the electric field, the design of measures to reduce the size of the field at this point. The simulation was performed using the finite element method program. The simulation found the most critical area. Using the basic physical principles it has been proposed solution. This solution reduced twice the magnitude the electric field in this area.

Klíčová slova

Elektrické pole; rozvaděč; přípojnice; výboj; metoda konečných prvků

Keywords

Electric field; switchgear; busbar; charge; finite element method

Bibliografická citace

MÜLLER, M. *Simulace elektrického pole v prostoru přípojnic vn rozvaděče*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 65 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Bohuslav Bušov, CSc..

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma *Simulace elektrického pole v prostoru přípojníc vn rozvaděče* jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne

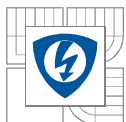
Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Bohuslavovi Bušovovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

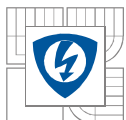
V Brně dne

Podpis autora

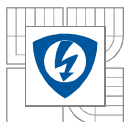


OBSAH

1 ÚVOD	13
2 TEORIE	14
2.1 OBECNÉ POLE A JEHO POPIS	14
2.2 ELEKTRICKÉ POLE	14
2.2.1 ODVOZENÍ CELKOVÉHO TOKU ELEKTRICKÉ INTENZITY	16
2.2.2 ELEKTRICKÉ POLE UVNITŘ DUTINY VODIČE	18
2.2.3 NEHOMOGENNĚ ROZLOŽENÝ NÁBOJ UVNITŘ DUTINY VODIČE A NÁSLEDNÉ VNĚJŠÍ ELEKTRICKÉ POLE DUTINY.....	18
2.3 VÝBOJE V PLYNECH	19
2.3.1 SAMOSTATNÝ A NESAMOSTATNÝ VÝBOJ.....	19
2.3.2 VÝBOJE PODSTATNÉ PRO TUTO PRÁCI	20
2.3.3 POHYB NABITÉ ČÁSTICE V ELEKTRICKÉM POLI – VZNIK ELEKTRONOVÉ LAVINY	20
2.3.4 KORÓNA.....	20
2.3.5 ELEKTRICKÝ OBLOUK	21
2.4 DOSKOKOVÉ VZDÁLENOSTI V TECHNICKÉ PRAXI	22
2.5 ELEKTRICKÁ PEVNOST VZDUCHU	22
3 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ	23
4 POPIS ROZVADĚČE	25
4.1 PŘÍSTROJE A ZAŘÍZENÍ	25
4.2 PROVOZNÍ PODMÍNKY	25
4.3 STANDARDY	26
4.4 STUPNĚ KRYTÍ	26
4.5 ELEKTRICKÉ CHARAKTERISTIKY	27
4.6 PROSTOROVÉ ROZDĚLENÍ ROZVADĚČE	27
4.6.1 PROSTOR HLAVNÍCH PŘIPOJNIC	28
4.6.2 PROSTOR SILOVÝCH KABELŮ.....	28
4.6.3 PROSTOR UZEMŇOVAČE	28
4.6.4 UZEMŇOVACÍ SBĚRNA	29
4.6.5 IZOLAČNÍ PRŮCHODKY A UZAVÍRACÍ CLONY	29
4.6.6 KABELY	29
4.6.7 KANÁL PRO ODVOD HORKÝCH PLYNŮ.....	29
4.7 TYPOVÉ ZKOUŠKY	29
4.7.1 KRÁTKODOBÝ A DYNAMICKÝ (RÁZOVÝ) ZKUŠEBNÍ PROUD.....	30
4.7.2 OTEPLENÍ	30
4.7.3 ODOLNOST PROTI VNITŘNÍMU OBLOUKOVÉMU ZKRATU	30
4.7.4 IZOLAČNÍ ZKOUŠKY	30
4.7.5 SPÍNACÍ A VYPÍNACÍ SCHOPNOST VYPÍNAČE	30
4.7.6 SPÍNACÍ SCHOPNOST UZEMŇOVAČE.....	31

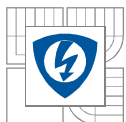


4.7.7 MECHANICKÉ MANIPULACE.....	31
4.7.8 STUPEŇ KRYTÍ (IP XX)	31
4.8 PROSTOR PŘÍPOJNIC	31
4.8.1 PŘÍPOJNICE.....	31
5 MODEL.....	32
5.1 MATERIÁLY POUŽITÉ V MODELU.....	33
5.2 ZJEDNODUŠENÍ MODELU USNADŇUJÍCÍ VÝPOČET	33
5.2.1 ODSTRANĚNÍ SYSTÉMU PŘÍPOJNIC B	34
5.2.2 ODSTRANĚNÍ ŠROUBŮ SPOJUJÍCÍCH PŘÍPOJNICE	34
5.2.3 ODSTRANĚNÍ ZÁVITOVÝCH VLOŽEK.....	35
5.2.4 ODSTRANĚNÍ MATKY A ŠROUBU V TYČI ODPOJOVAČE.....	35
5.2.5 ODSTRANĚNÍ POLYAMIDOVÝCH ŠROUBŮ A JINÝCH SOUČÁSTEK.....	36
5.2.6 ODSTRANĚNÍ KONTAKTNÍCH KROUŽKŮ	36
5.2.7 ÚPRAVA PRŮCHODKY	37
5.2.8 ÚPRAVA IZOLÁTORU	37
5.2.9 ÚPRAVA ŠROUBŮ	38
5.2.10 ÚPRAVA DĚLÍCÍ PLECHOVÉ STĚNY.....	38
5.3 OBLAST SIMULACE – OKRAJOVÁ PODMÍNKA	39
6 SIMULACE ELEKTRICKÉHO POLE	40
6.1 NASTAVENÍ SIMULACE.....	40
6.2 GRAFICKÉ ZNÁZORNĚNÍ VIEP (VELIKOSTI INTENZITY ELEKTRICKÉHO POLE)	41
6.2.1 ELEKTRICKÉ POLE PŘÍPOJNIC V OBLASTI PRŮCHODEK	41
6.3 ELEKTRICKÉ POLE PŘÍPOJNIC – VÝZNAM TEPEM SMRŠTITELNÉ TRUBICE	43
6.4 ELEKTRICKÉ POLE TYČÍ ODPOJOVAČE	46
6.5 NEJKRITICHTĚJŠÍ MÍSTO MODELU – ŠROUB SPOJUJÍCÍ PŘÍPOJNICE.....	48
7 OPATŘENÍ SNIŽUJÍCÍ PRAVDĚPODOBNOST SELHÁNÍ	54
7.1 PŘÍČINNĚ NÁSLEDKOVÝ ŘETĚZEC	54
7.2 MOŽNÉ PŘÍSTUPY ŘEŠENÍ.....	56
7.3 SNIŽENÍ VIEP NEJKRITICHTĚJŠÍHO MÍSTA	56
7.3.1 SIMULACE VIEP NEKRYTÝCH ŠROUBŮ	57
7.3.2 SIMULACE VIEP KRYTÝCH ŠROUBŮ.....	60
8 ZÁVĚR.....	63
LITERATURA	64
PŘÍLOHY	65

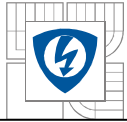


SEZNAM OBRÁZKŮ

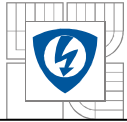
<i>Obr. 2-1</i>	<i>Příklad zřídlového pole (1 str. 10)</i>	<i>14</i>
<i>Obr. 2-2</i>	<i>Příklad vírového pole (1 str. 10)</i>	<i>14</i>
<i>Obr. 2-3</i>	<i>Odvození celkového toku uzavřenou plochou (3 str. 618)</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 2-4</i>	<i>Toky v závislosti na úhlu (3 str. 620)</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 2-5</i>	<i>Nehomogenně rozložený náboj uvnitř vodivé koule (3 str. 626)</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 2-6</i>	<i>Unipolární koróna (5 str. 73)</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 2-7</i>	<i>Grafické vyjádření Paschenova zákona (7 str. 19)</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 3-1</i>	<i>Sít' konečných prvků a jejich uzly (1 str. 30)</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 3-2</i>	<i>Rovinné elementární prvky (1 str. 30)</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 3-3</i>	<i>Prostorové elementární prvky (1 str. 30)</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 4-1</i>	<i>Prostory jednotky rozvaděče (9 str. 11)</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 5-1</i>	<i>Zjednodušený model prostoru přípojníc</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 5-2</i>	<i>Zjednodušený model – odstraněný systém přípojníc B</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 5-3</i>	<i>Zjednodušení modelu – odstranění šroubů spojujících přípojnice</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 5-4</i>	<i>Zjednodušení modelu – odstranění závitových vložek</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 5-5</i>	<i>Zjednodušení modelu – odstranění šroubu a matky na jedné tyči odpojovače</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 5-6</i>	<i>Zjednodušení modelu – odstranění polyamidových šroubů A,B,C,D,E,F</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 5-7</i>	<i>Význam a provedení odpojovače</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 5-8</i>	<i>Detail provedení kontaktního místa – kontaktní kroužky, které jsou v konečném modelu odstraněny</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 5-9</i>	<i>Rozdíl mezi původní a zjednodušenou průchodkou</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 5-10</i>	<i>Zjednodušení modelu – původní a upravený izolátor</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 5-11</i>	<i>Rozdíl mezi původní a zjednodušenou dělicí stěnou</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 5-12</i>	<i>Problém s příliš hrubou sítí v okolním vzduchu</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 5-13</i>	<i>Region s hraniční podmínkou (červený kvádr) a vzduchové oblasti okolo exponovaných částí (modré kvádry)</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 6-1</i>	<i>Barevná škála a příslušné hodnoty velikosti intenzity elektrického pole</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 6-2</i>	<i>Umístění roviny (modrá osa nesouvisí s modelem)</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 6-3</i>	<i>Rozložení VIEP v příčném řezu přípojníc v oblasti průchodek, škála viz Obr. 6-1 (zelená přímka je osa!)</i>	<i>42</i>



<i>Obr. 6-4 Detail rozložení VIEP okolo prostřední přípojnice škála viz Obr. 6-1 (zelená přímka je osa!)</i>	42
<i>Obr. 6-5 Umístění roviny a vyznačení přímek škála viz Obr. 6-1 (zelená a modrá přímka jsou osy!)</i> 43	
<i>Obr. 6-6 Rozložení velikosti intenzity elektrického pole okolo izolované přípojnice škála viz Obr. 6-1 (zelená přímka je osa!)</i>	43
<i>Obr. 6-7 Průběh velikosti intenzity elektrického pole podle přímky A (Obr. 6-5)</i>	44
<i>Obr. 6-8 Průběh velikosti intenzity elektrického pole podle přímky B (Obr. 6-5)</i>	45
<i>Obr. 6-9 Umístění roviny</i>	46
<i>Obr. 6-10 Rozložení VIEP v příčném řezu vedeném tyčí odpojovače škála viz Obr. 6-1 (zelená přímka je osa!)</i>	47
<i>Obr. 6-11 Detail rozložení VIEP okolo tyče odpojovače prostřední přípojnice škála viz Obr. 6-1</i> 1 48	
<i>Obr. 6-12 Umístění roviny</i>	48
<i>Obr. 6-13 Rozložení VIEP v rovině jdoucí středem šroubu spojovacího přípojnice škála viz Obr. 6-1</i> 6-1 49	
<i>Obr. 6-14 Detail rozložení VIEP okolo hlavy šroubu prostřední přípojnice škála viz Obr. 6-1</i> 49	
<i>Obr. 6-15 Přímka, na které je vynesena průběh VIEP (červená čárkovaná přímka mezi šrouby) škála viz Obr. 6-1</i>	50
<i>Obr. 6-16 Průběh VIEP podél přímky z Obr. 6-15 – přímka na povrchu šroubu</i>	51
<i>Obr. 6-17 Průběh VIEP podél přímky 0,1 mm vnořené do materiálu šroubu (jinak identické s přímkou z Obr. 6-15)</i>	52
<i>Obr. 6-18 Rozložení VIEP ve vodorovné rovině 0,1 mm pod povrchem hlavy šroubu škála viz Obr. 6-1</i>	53
<i>Obr. 6-19 Detail rozložení VIEP v rovině 0,1 mm pod povrchem hlavy šroubu škála viz Obr. 6-1</i> 6-1 53	
<i>Obr. 7-1 Šroub s krytkou (vlevo) a šroub bez krytky (vpravo)</i>	56
<i>Obr. 7-2 Zredukovaný model</i>	57
<i>Obr. 7-3 Rozložení VIEP zredukovaného modelu a přímka definovaná pro detailní průběh, škála viz Obr. 7-3</i>	58
<i>Obr. 7-4 Barevná škála a příslušné hodnoty velikosti intenzity elektrického pole k obrázkům z kapitoly 7.3.1</i>	58
<i>Obr. 7-5 Průběh VIEP nekrytého šroubu podél přímky z Obr. 7-2</i>	59
<i>Obr. 7-6 Rozložení VIEP šroubů s krytkami, škála viz Obr. 7-7</i>	60

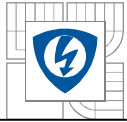


<i>Obr. 7-7</i>	<i>Detail rozložení VIEP krytky šroubu, škála viz Obr. 7-7.....</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 7-8</i>	<i>Barevná škála a příslušné hodnoty velikosti intenzity elektrického pole k obrázkům této kapitoly.....</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 7-9</i>	<i>Oblouk (červeně), na kterém je vynesena průběh VIEP</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 7-10</i>	<i>Průběh VIEP na povrchu krytky po oblouku z Obr. 7-8.....</i>	<i>62</i>



SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 4-1 Elektrické charakteristiky rozvaděče UniGear ZS1 - dvojitý systém přípojníc 17,5 kV Převzato z (10 str. 4)</i>	<i>27</i>
<i>Tab. 5-1 Použité izolační materiály, jejich permitivity, zdroje informací</i>	<i>33</i>



SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

- **VI**EP - velikost intenzity elektrického pole
- **I**EP - intenzita elektrického pole
- **MKP** - metoda konečných prvků
- **v_n** - vysoké napětí
- ϵ_0 - permitivita vakua [F/m]
- ϵ_r - relativní permitivita [-]
- ϕ_E - celkový tok intenzity elektrického pole [Vm]
- **E** - intenzita elektrického pole [V/m], [N/C]
- **D** - elektrická indukce [C/m²]



1 ÚVOD

Cílem této práce je simulace elektrického pole v prostoru přípojníc s odpojovačem vn rozvaděče. Přesněji je cílem nalezení místa s nejkritičtější hodnotou velikosti intenzity elektrického pole a následný návrh opatření snižující velikost pole v tomto místě. Pro popis elektrického pole je použita velikost intenzity elektrického pole (dále používána zkratka VIEP). Přítomnost elektrického pole ve vzduchu způsobuje pohyb nabitých částic (elektronů). Při určité hodnotě VIEP v daném místě, může elektron získat dostatečnou energii k ionizaci neutrálních molekul vzduchu. Tím dojde ke vzniku dalších nabitých částic (elektronů). Tak může docházet k nežádoucím výbojům (koróna, oblouk) uvnitř rozvaděče. A v případě oblouku i k následné destrukci celého rozvaděče. To je důvod, proč je požadována co nejnižší možná hodnota VIEP uvnitř rozvaděče.

2 TEORIE

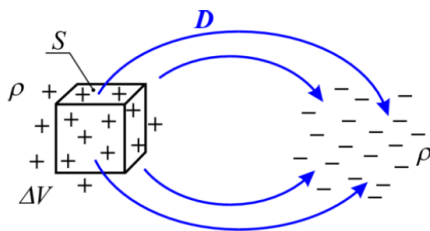
2.1 Obecné pole a jeho popis

Pole rozlišujeme na skalární a vektorová pole. Vektorová pole zobrazujeme obecně pomocí siločar případně pomocí vektorů vyznačených ve vybraných bodech prostoru (1 str. 7). „Siločára daného vektoru je křivka, jejíž tečný vektor je v každém bodě oblasti s daným vektorem rovnoběžný. Siločára vektoru A je popsána diferenciální rovnicí:“ (1 str. 7)

$$\frac{dx}{A_x(x, y, z, t)} = \frac{dy}{A_y(x, y, z, t)} = \frac{dz}{A_z(x, y, z, t)}$$

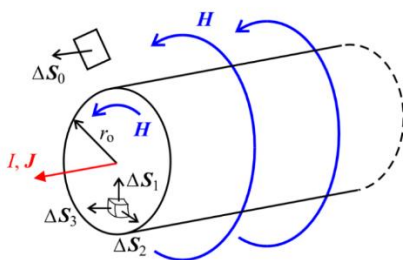
Popisujeme-li 3D pole, tak zobrazení provádíme v rovině. Pole se pak zobrazí řezy v navzájem kolmých rovinách. (1 str. 7)

V závislosti na tvaru siločar rozlišujeme vektorová pole na pole zřídlová a pole vírová. Příklad zřídlového pole je elektrostatické pole okolo stacionárního náboje **Obr. 2-1**. (1 str. 10)



Obr. 2-1 **Příklad zřídlového pole** (1 str. 10)

Příklad vírového pole je magnetické pole okolo vodiče protékaného proudem, viz **Obr. 2-2**. (1 str. 10)

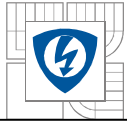


Obr. 2-2 **Příklad vírového pole** (1 str. 10)

2.2 Elektrické pole

Elektrické pole popisujeme pomocí elektrické intenzity případně pomocí elektrické indukce. Pole elektrické intenzity i pole elektrické indukce jsou vektorová pole. S ohledem na předchozí článek, je elektrostatické pole vektorovým polem zřídlovým.

Nyní uvažujme osamocené elektrický náboj ve vakuu. Tento elektrický náboj vytváří okolo sebe elektrické pole, které v daném bodě popisujeme pomocí intenzity elektrického pole (\mathbf{E}). Chápejme to tak, že v obecném případě se vektor intenzity elektrického pole mění od místa



k místu. Tento přístup nám nedovoluje souhrnně popsat elektrické pole daného náboje, protože vždy známe jen vektor intenzity elektrického pole v nějakém konkrétním místě. Abychom byli schopni dosáhnout uceleného popisu, tak podle Feynmana (2 str. 72) přejdeme k abstrakci, kdy budeme předpokládat, že elektrické pole je tok něčeho, z čeho je vytvořeno elektrické pole (ještě jednou upozornuji, že se jedná o abstrakci). Pomocí této abstrakce zavádíme veličinu tok intenzity elektrického pole ϕ_E (jedná se o skalární veličinu). Znamená to, že libovolnou plochou obklopující daný náboj „teče“ daný tok intenzity elektrického pole. Tento tok je identický pro všechny různé plochy obklopující tento náboj, tj.: nezávisí na velikosti ani tvaru těchto ploch. A když říkáme plochy obklopující, tak samozřejmě myslíme plochy uzavřené. Co jsme tímto přístupem získali? Zatím co intenzita elektrického pole je závislá na místě, kde ji určujeme, tak celkový tok elektrické intenzity tekoucí uzavřenou plochou obklopující daný náboj není vztažen k žádnému konkrétnímu místu v prostoru ani žádné konkrétní ploše obklopující tento náboj.

Nyní nás zajímá vztah mezi nábojem a celkovým tokem elektrické intenzity uzavřenou plochou obklopující tento náboj. Tento vztah vyjadřuje Gaussův zákon elektrostatiky (GZE). Jedná se o vztah mezi celkovým tokem intenzity elektrického pole ϕ_E uzavřenou Gaussovou plochou a celkovým nábojem Q obklopeným touto plochou.

$$\varepsilon_0 \phi_E = Q \quad (1)$$

Kde

ε_0 je permitivita vakua ($\varepsilon_0 = (1/4\pi) \cdot 10^{-12}$ F/m)

Q je náboj obklopený Gaussovou plochou

ϕ_E je celkový tok intenzity elektrického pole

Při vyjádření toku

$$\phi_E = \frac{Q}{\varepsilon_0} \quad (2)$$

vidíme, že z náboje o určité velikosti teče vždy stejný celkový tok. Tyto vztahy platí pro náboje ve vakuu. Ovšem máme-li náboj umístění v jakémkoliv dielektrickém prostředí, tak musíme zohlednit vliv tohoto prostředí. Obecný vztah získáme odstraněním permitivity vakua ze vztahu (1):

$$\varepsilon \phi_E = Q \quad (3)$$

Kde

$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ (F/m)

ε_r je materiálová konstanta, pro vakuum je $\varepsilon_r = 1$ a pro jakékoliv dielektrikum platí $\varepsilon_r > 1$.

Pak pro celkový tok elektrické intenzity platí:

$$\phi_E = \frac{Q}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} \quad (4)$$

Ze vztahu vidíme, že z konkrétního náboje teče největší tok elektrické intenzity, pokud je náboj umístěn ve vakuu. Umístění náboje v dielektriku má za následek zmenšení toku. Tato znalost

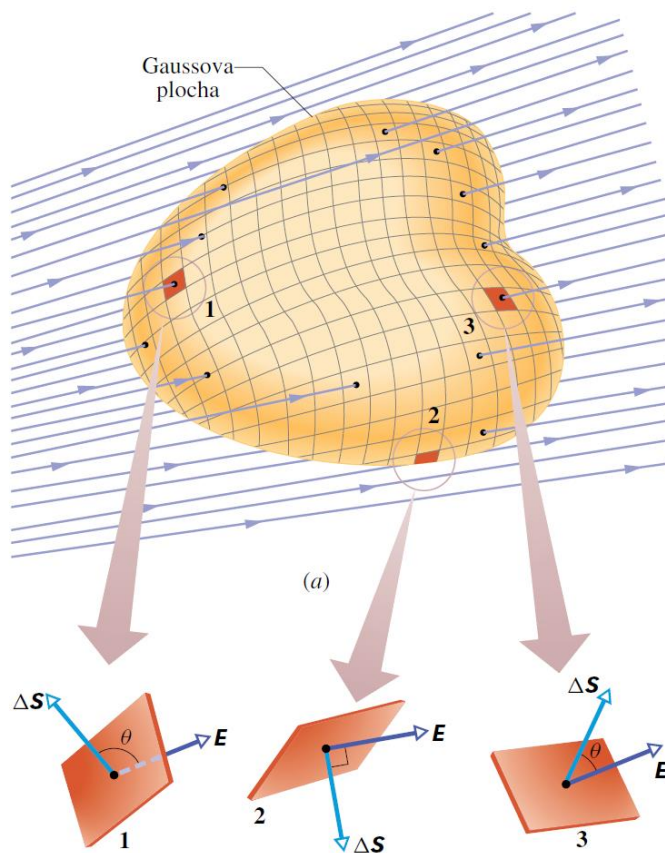
společně se znalostí toho, že pro dielektrika platí $\epsilon_r > 1$, nám pomůže si tento vztah bezpečně zapamatovat. Je přirozené předpokládat, že čím větší velikost náboje, tím větší tok elektrické intenzity a víme, že konkrétní náboj má největší tok, pokud je umístěn ve vakuu – to nám napoví, že člen $\epsilon_0 \epsilon_r$ je umístěn ve jmenovateli.

2.2.1 Odvození celkového toku elektrické intenzity

Podle (3 str. 620) k odvození celkového toku elektrické intenzity uvažujme uzavřenou plochu libovolného tvaru a nehomogenní elektrické pole. Uzavřenou plochu rozdělíme na malé elementy tvaru čtverečku, na tak malé, abychom mohli zanedbat jejich zakřivení a považovat je za rovinné. Každý čtvereček je definovaný normálovým vektorem $\Delta \mathbf{S}$. Protože jsou čtverečky velmi malé, můžeme na nich předpokládat konstantní elektrické pole \mathbf{E} . Je evidentní, že vektory $\Delta \mathbf{S}$ a \mathbf{E} budou na různých čtverečcích svírat různé úhly. Tyto úhly označíme θ . Tok každým čtverečkem je definován jako

$$\Delta \phi_E = \Delta \mathbf{S} \cdot \mathbf{E} \quad (5)$$

Jedná se o skalární součet, tj. vliv různých úhlů je ve vztahu již uvažován. Celou situaci shrnuje **Obr. 2-3**.



Obr. 2-3 **Odvození celkového toku uzavřenou plochou** (3 str. 618)

Každým elementem uzavřené plochy teče $\Delta \phi_E$. Je zřejmé, že pokud sečteme toky všech elementů, tak získáme celkový tok uzavřenou plochou



$$\phi_E = \sum \Delta\phi_E = \sum \Delta\mathbf{S} \cdot \mathbf{E} \quad (6)$$

Tato rovnice nám říká, že je třeba vzít každý čtvereček na Gaussově ploše, pro něj vyjádřit skalární součin obou vektorů \mathbf{E} $\Delta\mathbf{S}$ a algebraicky sečíst (s patřičnými znaménky) příspěvky od všech čtverečků, které tvoří Gaussovu plochu. Znaménko každého skalárního součinu určuje, zda je tok daným čtverečkem kladný, záporný, nebo nulový. Z **Obr. 2-4** plyne, že v případech typu 1, v nichž \mathbf{E} směřuje dovnitř plochy, je příspěvek k celkovému součtu vyjádřenému rov. (6) záporný. V případech typu 2, kdy \mathbf{E} leží v rovině čtverečku, je příspěvek nulový a v případech typu 3, kdy \mathbf{E} směřuje ven z plochy, je příspěvek kladný. (3 str. 620)

Č.	θ	SMĚR \mathbf{E}	SOUČIN $\mathbf{E} \cdot \Delta\mathbf{S}$
1	$> 90^\circ$	dovnitř plochy	záporný
2	$= 90^\circ$	rovnoběžně s plochou	nulový
3	$< 90^\circ$	ven z plochy	kladný

Obr. 2-4 Toky v závislosti na úhlu (3 str. 620)

Pokud velikosti elementárních plošek $\Delta\mathbf{S}$ stále zmenšujeme, tak $\Delta\mathbf{S}$ přejde v limitě na $d\mathbf{S}$. Tím suma v rovnici 6 přechází na plošný integrál. Pak tok elektrické intenzity přechází na tvar

$$\phi_E = \oint_{\varphi} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} \quad (7)$$

Tato rovnice vyjadřuje celkový tok ϕ_E uzavřenou Gaussovou plochou φ .

Nyní uvidíme, proč bylo tak přínosné zavést veličinu tok intenzity elektrického pole ϕ_E . Tok intenzity elektrického pole ϕ_E jsme vyjádřili nejdříve v závislosti na náboji Q vztah (2) a poté v závislosti na tvaru a velikosti Gaussovy plochy a intenzitě elektrického pole \mathbf{E} vztah (7). Ještě upozorníme, že stále mluvíme o celkovém toku intenzity elektrického pole. Pokud tyto dva přístupy spojíme a toky z obou odvození dáme do rovnosti, tak se nám podaří dát do společného vztahu intenzitu elektrického pole \mathbf{E} a náboj Q , který elektrické pole vytváří. Vidíme, že tok dále nepřenašíme a využili jsme ho pouze k odvození.

Spojíme-li tedy vztahy (2) a (7) získáme:

$$\phi_E = \oint_{\varphi} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \frac{Q}{\epsilon_0} \quad (8)$$

Z toho:

$$Q = \epsilon_0 \oint_{\varphi} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} \quad (9)$$

Pokud je náboj obklopen dielektrikem, tak ve všech vztazích musíme místo ϵ_0 uvažovat $\epsilon_0 \epsilon_r$ pak:

$$Q = \epsilon_0 \epsilon_r \oint_{\varphi} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \oint_{\varphi} \epsilon_0 \epsilon_r \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} \quad (10)$$

Kde

$\epsilon_0 \epsilon_r \mathbf{E}$ je elektrická indukce \mathbf{D} , pak

$$Q = \oint_{\varphi} \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} \quad (11)$$

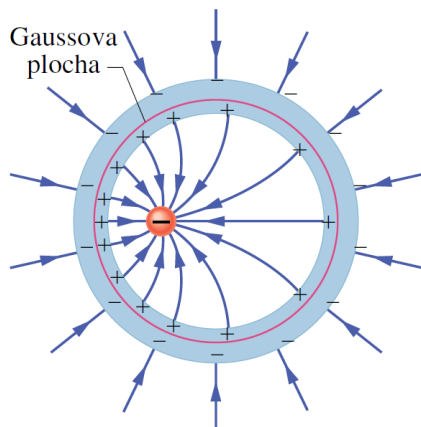
2.2.2 Elektrické pole uvnitř dutiny vodiče

Je obecně známým faktem, že elektrické pole uvnitř kovové dutiny je vždy nulové. Ať už je kovová dutina ve vnějším elektrickém poli, nebo má svůj vlastní náboj, tak uvnitř dutiny je elektrické pole nulové. Tato problematika je rozvedena například v (4 str. 91). Podle (4 str. 91) se ve spojitosti s tímto jevem nepřesně hovoří o „stínícím účinku vodičů“. Pole však není v pravém slova smyslu odstíněno, ale vykompenzováno polem povrchových nábojů.

Uvažujme dutou vodivou kouli. Tedy kouli, která obsahuje volné elektrony. Umístíme tuto kouli do vnějšího elektrického pole. Vnější elektrické pole bude ne volné elektrony působit silou. Ty se vlivem síly začnou přemisťovat. Původně byly elektrony ve vodivé kouli rovnoměrně rozmístěny po povrchu koule. Nyní se však elektrony zhušťují na jedné straně koule a svým společným nábojem vytvářejí elektrické pole, které má opačnou orientaci ale stejnou velikost jako pole vnější. Tím je vnější pole v místě vstupu do koule vykompenzováno.

2.2.3 Nehomogenně rozložený náboj uvnitř dutiny vodiče a následné vnější elektrické pole dutiny

Uvažujme nehomogenně rozložený náboj uvnitř vodivé koule. Může se jednat například o nějaký nabitý hrot. Nebo obecně náboj umístěný mimo střed koule. Jak pak vypadá vnější elektrické pole? V souladu s (3 str. 626) uvažujme Gaussovu plochu uvnitř materiálu vodivé koule. Tuto Gaussovu plochu uvažujme tak, že kouli rozděluje na dvě slupky, viz **Obr. 2-5**. Koule je vodivá, proto je uvnitř jejího materiálu nulové elektrické pole a proto je celkový tok elektrické intenzity Gaussovou plochou roven nule. To znamená, že celkový náboj, který objímá Gaussova plocha, je také nulový. Náboj vnitřní slupky je nerovnoměrně rozložený. Respektuje rozložení náboje uvnitř dutiny.



Obr. 2-5 *Nehomogenně rozložený náboj uvnitř vodivé koule (3 str. 626)*



Nyní nás zajímá vnější část Gaussovy plochy, tedy vnější slupky. Jak už bylo řečeno, Gaussovou plochou neteče žádný tok elektrické intenzity (protože Gaussova plocha je uvnitř vodiče), pak rozložení náboje na vnější slupce nemůže být ničím ovlivněno. To znamená, že náboj na vnější slupce je rozložen rovnoměrně. A to znamená, že elektrické pole okolo koule je zcela homogenní. Takže ať už je uvnitř dutiny vodiče rozložení náboje jakkoliv nehomogenní, tak rozložení náboje na vnější ploše tohoto dutého vodiče je stále stejné a ničím neovlivněné.

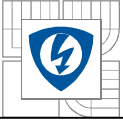
Vnější elektrické pole dutého vodiče není naprosto vůbec ovlivněno jakoukoliv nehomogenitou uvnitř této dutiny. Rozložení náboje uvnitř dutiny může být jakékoliv, ale tvar vnějšího elektrického pole to neovlivní.

2.3 Výboje v plynech

Uvažujme 2 elektrody v plynném prostředí v určité vzdálenosti od sebe. Na elektrody je přiloženo napětí (jinak řečeno – elektrody jsou nabitě – jedna kladně, druhá záporně – společně vytváří určité elektrické pole v každém místě charakterizované vektorem elektrické intenzity – na každou elektricky nabitou částici v okolí elektrod bude elektrické pole působit silou – tato síla vyvolá pohyb těchto částic – tato síla je závislá na náboji volných nabitých částic a na vektoru intenzity elektrického pole v místě výskytu částice). Obecně, aby nastal výboj v plynu mezi 2 elektrodami, tak je nutné, aby v prostoru mezi elektrodami byla přítomna volná nabitá částice. Mezi elektrodami uvažujme oblast vzduchu. Většina molekul vzduchu je za normálních podmínek elektricky neutrální. Ve skutečnosti je však ve vzduchu vždy přítomen nějaký počet nabitých částic. Nabitě částice mohou vzniknout přímo v uvažovaném objemu vzduchu (fotoionizace, kosmické záření, jiné záření). Nebo se mohou do objemu uvažovaného vzduchu dostat z vnějšího prostoru (uvolnění elektronu z povrchu elektrody, ...). Důkazem toho, že ve vzduchu je množství nabitých částic, je například Wilsonova mlžná komora. Pokud je zajištěna přítomnost nabitě částice mezi elektrodami, tak je splněna základní podmínka pro vznik výboje. Je třeba si uvědomit, že nabitá částice se začne pohybovat k jedné nebo druhé elektrodě a na této elektrodě „zanikne“. Aby mohlo dojít k výboji, tak musí být zajištěn vznik a nebo přísun dalších nabitých částic. A to buď z vnějšku, nějakým externím působením nebo prvotní nabitá částice a následně vzniklé částice svým pohybem a energií musí způsobit ionizaci dalších částic v prostoru mezi elektrodami.

2.3.1 Samostatný a nesamostatný výboj

Podle toho, jestli si výboj sám je schopen zajišťovat přísun nabitých částic, tak rozdělujeme výboje na samostatné a nesamostatné. Nesamostatný výboj potřebuje k tvoření nabitých částic vnější (ionizační) činidlo. A platí, že pokud toto ionizační činidlo přestane působit, tak výboj zanikne. Ionizačním činidlem může být např.: proud elektronů ze žhavené katody (záporná elektroda), ozařování výbojového prostoru rentgenovým nebo jiným zářením. Pokud si výboj sám v dostatečném množství vytváří další nabitě částice, tak ke svému trvání nepotřebuje žádný externí zásah a nazýváme ho výbojem samostatným. (5 str. 44)



2.3.2 Výboje podstatné pro tuto práci

Účelem této práce je uvažovat elektrické pole a případný výboj mezi přípojnicemi rozvaděče. V takovém případě nás zajímají především následující 3 výboje, které spolu souvisí (přechází jeden k druhému) a to: koróna, jiskra a hlavně oblouk.

2.3.3 Pohyb nabité částice v elektrickém poli – vznik elektronové laviny

Vraťme se k úvaze nabité částice mezi elektrodami. Jak bylo uvedeno, na nabitou částici v elektrickém poli působí elektrická síla. Na kladně nabitou částici působí elektrická síla ve směru vektoru intenzity elektrického pole a na záporně nabitou částici působí elektrická síla proti směru vektoru intenzity elektrického pole.

V dalším uvažujme jako nabitou částici elektron, protože elektrony mají ve výbojích dominantní roli a to především kvůli své nízké hmotnosti a tedy velké pohyblivosti. Elektrická síla působící na elektron způsobuje jeho urychlování. Pokud elektron získá dostatečnou rychlost (tj.: dostatečnou energii) může způsobit ionizaci neutrálního atomu, tak se uvolní další elektron, který je opět urychlován elektrickou silou. Tento elektron způsobí další ionizaci a proces se opakuje stále dokola.

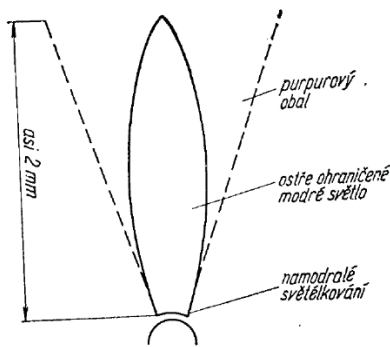
Podle (5 str. 45) první teorie, která popisovala poměry ve výboji byla *teorie lavin elektronů* od Townsenda. Tato teorie je aplikovatelná u výbojů, kde unášivý pohyb elektronů převažuje nad jejich tepelným neuspořádaným pohybem. Townsend zavedl 3 koeficienty:

- Koeficient α – udává kolikrát jeden elektron ionizuje neutrální atomy při uběhnutí jednotkové délky.
- Koeficient β – vyjadřuje ionizace způsobenou ionty
- Koeficient γ – vyjadřuje počet vyražených elektronů ze záporné elektrody (katody) při dopadu kladných iontů.

Složitější a komplexnější popis poměrů ve výbojové dráze přináší teorie streamrů popsaná v (5 str. 78). Tato teorie uvažuje i tepelný pohyb částic ve výbojové dráze, hromadění prostorového náboje kladných iontů u záporné elektrody (ionty pochopitelně nemůžou do elektrody vstoupit, jako elektrony) a elektrony vzniklé fotoionizací, které způsobují další elektronové laviny daleko před čelem prvotních lavin. Detailní popis vodivého spojení přípojníc vn vzduchem izolovaného rozvaděče tak nejvíce odpovídá právě teorii streamrů.

2.3.4 Koróna

Korónový výboj vzniká při atmosférickém tlaku. Podmínkou vzniku koróny je nehomogenní elektrické pole, tj. koróna vzniká na elektrodách o malém poloměru křivosti. Koróna může existovat i pouze na jedné elektrodě, čímž se odlišuje od ostatních výbojů. Takovou korónu ukazuje **Obr. 2-6** a nazývá se unipolární koróna. (5 str. 73)



Obr. 2-6 **Unipolární koróna** (5 str. 73)

Plazma korónového výboje se nachází pouze v tenké vrstvě na povrchu elektrody o malé křivosti. Koróna nepotřebuje ke své existenci žádný externí zdroj nosičů náboje, je to tedy samostatný výboj. Uvažujme konkrétní dvojici elektrod, jedna elektroda o velkém poloměru křivosti a druhá o velmi malém poloměru křivosti. Při takovém konkrétním rozložení elektrod koróna vznikne při určitém napětí, které nazýváme počáteční napětí. (5 str. 73)

Nyní si vysvětlíme vznik koróny na fyzikálně fundamentálnější úrovni. Uvažujme pouze jednu elektrodu. Tato elektroda má velice malý poloměr křivosti. Uvažujme, že elektroda je nabitá. Náboj se v elektrodě rozmístí tak, aby jednotlivé náboje byly od sebe co nejdále, tj. rozmístí se co nejvíce na povrchu. Malý poloměr křivosti povrchu elektrody způsobí vysokou hustotu náboje. Vysoká hustota náboje způsobí elektrické pole o velké intenzitě. Nyní uvažujme volný elektron v těsné blízkosti povrchu elektrody a uvažujme záporný náboj elektrody. Elektron se nachází v silném elektrickém poli. Silné elektrické pole urychlí elektron v krátké době na vysokou rychlost – elektron získá dostatečnou kinetickou energii k tomu, aby mohl ionizovat neutrální atom nějaké molekuly vzduchu. Elektron se samozřejmě od elektrody vzdaluje. Ionizací vznikají další elektrony, ale jsou čím dál tím více vzdáleny, tj. nové elektrony se nachází v oblasti o nižší intenzitě elektrického pole, tj. získají za stejnou dobu nižší rychlost a tím menší energii než původní elektron. Tak se snižuje pravděpodobnost ionizace. V určité vzdálenosti od elektrody již k ionizaci ani nedojde. Proto se koróna projevuje pouze v blízkosti elektrody.

2.3.5 Elektrický oblouk

Elektrický oblouk je samostatný výboj vznikající při atmosférickém tlaku. Je to výboj, který se používá i k technickým aplikacím, ale ve smyslu této práce se jedná o silně nežádoucí efekt, protože vznik oblouku uvnitř rozvaděče má destruktivní účinky. Podle (5 str. 55) hlavními znaky obloukového výboje jsou:

- Velký proud protékající výbojovou dráhou
- Vysoká teplota obloukového plazmatu
- Intenzivní vyzařování oblouku

Se vznikem oblouku rovněž souvisí mohutný vznik horkých plynů a tím vysoký tlak. Vysoký tlak plynů spolu s jejich vysokou teplotou má hlavní destruktivní účinek oblouku.

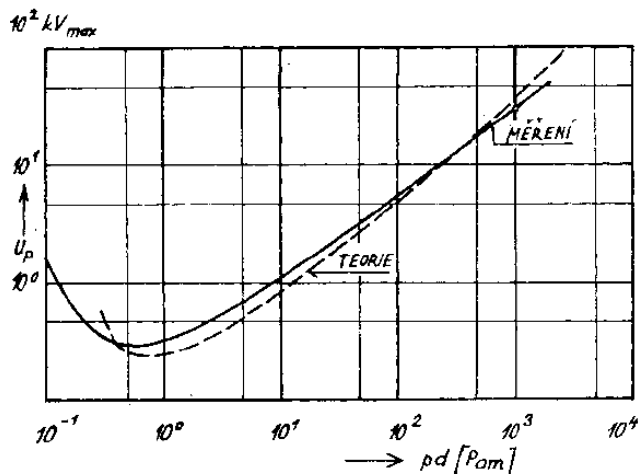
2.4 Doskovové vzdálenosti v technické praxi

Spolehlivost elektrického přístroje je mimo jiné dána vhodnou konstrukcí, která minimalizuje pravděpodobnost elektrického přeskočení mezi jednotlivými fázemi a mezi fází a kostrou. V dnes nejrozšířenějším typu rozvaděče je izolace realizována pomocí pevných izolantů a plynného izolantu - vzduchu.

Pro konstrukci rozvaděčů vysokého napětí neudává současná norma žádné konkrétní izolační vzdálenosti. Prvotní návrh konstrukce je na výrobcích rozvaděčů. Rozvaděče pak musejí vydržet normou předepsanou jednominutovou zkoušku a zkoušku rázovou vlnou (6 str. 31).

2.5 Elektrická pevnost vzduchu

Elektrickou pevnost vzduchu v homogenním elektrickém poli popisuje Paschenova teorie. Elektrickou pevnost vzduchu chápeme jako napětí (značíme U_p), při kterém právě dojde k přeskočení. Předpokládá se homogenní elektrické pole. Při tomto předpokladu závisí elektrická pevnost na vzdálenosti elektrod d a na tlaku vzduchu p tj.: $U_p = f(p,d)$. Tuto závislost graficky ukazuje **Obr. 2-7**, zde vidíme slušnou shodu teorie a měření. (7 str. 19)



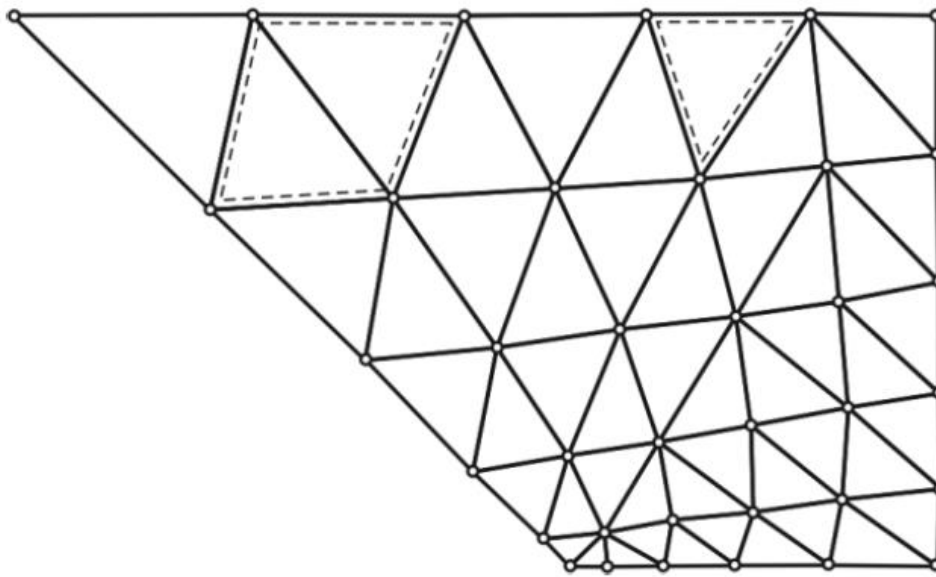
Obr. 2-7 Grafické vyjádření Paschenova zákona (7 str. 19)

Vzduch má ve skutečnosti řadu parametrů (rychlost a směr proudění, teplota, tlak, vlhkost, ...). To znamená, že vzduch mezi elektrodami je velice složitý a dynamicky se měnící systém, proto, to jestli dojde k přeskočení při dané konfiguraci elektrod je spíše pravděpodobnostní záležitost.

Paschenova teorie platí dobře v určitém intervalu hodnot součinu pd . Avšak při malých a velkých hodnotách součinu pd se měření s teorií rozcházejí.

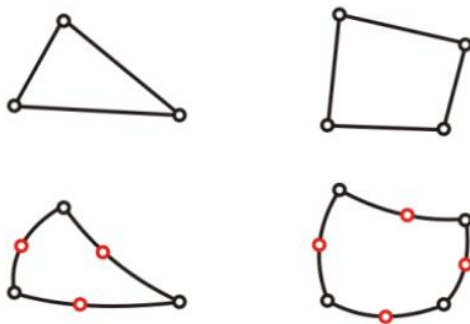
3 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ

Metoda konečných prvků (MKP) je účinná metoda k řešení problémů popsaných diferenciálními rovnicemi. Oblast, kde dochází k výpočtu, je rozdělena na množství elementárních útvarů (tyto již nejsou dále nijak děleny), které nazýváme konečné prvky. Tyto konečné prvky spolu s uzly (společné vrcholy sousedních konečných prvků) tvoří síť konečných prvků, viz **Obr. 3-1**. K výpočtu dochází v uzlech. Tam, kde se předpokládá prudká změna počítané veličiny, je třeba zvolit hustší síť. Tj. více konečných prvků a tím i více uzlů, kde k výpočtu dochází (znamená to, že na určité ploše vznikne více bodů, kde dochází k výpočtu (1 str. 30).

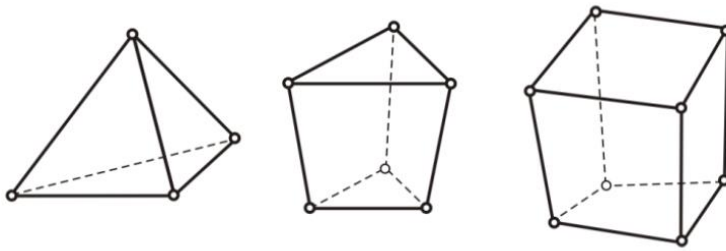


Obr. 3-1 Síť konečných prvků a jejich uzly (1 str. 30)

Při výpočtu dvojrozměrných problémů se používá konečných prvků ve tvaru lineárního a parabolického trojúhelníku a čtyřúhelníku viz **Obr. 3-2**. Při výpočtu 3D problémů se používá konečných prvků ve tvaru čtyřstěnu, pětistěnu a šestistěnu viz **Obr. 3-2** (1 str. 30).



Obr. 3-2 Rovinné elementární prvky (1 str. 30)



Obr. 3-3 Prostorové elementární prvky (1 str. 30)

Každé dva elementární prvky vyplňující oblast, kde dochází k výpočtu, mají právě jednu vzájemnou následující polohu:

- Jsou disjunkttní – nemají žádný společný bod
- Mají společný pouze jeden vrchol
- Mají společnou celou jednu stranu
- Mají společnou celou jednu stěnu

Pokud počítaná oblast obsahuje různá prostředí, tak se zavádí doplňující podmínka: Žádný z elementárních prvků nesmí být protínán rozhraním (8 str. 408).

Postup při aplikaci MKP sestává z těchto kroků (1 str. 32):

- Generace sítě prvků s uzly.
- Aproximace potenciálu na jednotlivých prvcích z uzlových hodnot.
- Sestavení soustavy rovnic pro neznámé uzlové hodnoty.
- Vyřešení soustavy.
- Zpracování dodatečných požadavků - výpočet dalších veličin a zobrazení výsledků.



4 POPIS ROZVADĚČE

Předmětem zájmu této práce je dvojsystémový rozvaděč UniGear ZS1 od firmy ABB. Konkrétně konfigurace:

- Jmenovité napětí $U_N = 17,5 \text{ kV}$
- Jmenovitý proud hlavní přípojnice $I_N = 1250 \text{ A}$
- Jmenovitý krátkodobý výdržný proud $I = 31,5 \text{ kA}$ (3 s)

UniGear ZS1 je kovově krytý rozvaděč vysokého napětí vhodný pro vnitřní instalace. Jednotlivé prostory jsou navzájem odděleny kovovými přepážkami a živé části jsou izolovány vzduchem. Vysoce modulární koncept rozvaděče umožňuje jednoduchou volbu komponentů požadovaných jakoukoli aplikací. Funkční jednotky rozvaděče zaručují odolnost proti obloukovému zkratu v souladu se standardem IEC 62271-200, přílohou AA, s třídou A přístupnosti k zařízení a s kritérii 1 až 5 tohoto standardu. Veškeré operace uvedení do provozu, údržby a obsluhy se mohou provádět z přední strany. Spínací prvky a uzemňovače jsou ovládány z přední strany a při zavřených dveřích. Rozvaděč je možné instalovat zadní stranou ke zdi. Převzato z (9 str. 6)

4.1 Přístroje a zařízení

Rozvaděč UniGear disponuje nejkompletnějším přístrojovým vybavením, které zahrnuje:

- Výsuvné vakuové vypínače s mechanickými nebo magnetickými akčními členy
- Výsuvné vypínače izolované plynem
- Výsuvné vakuové stykače s pojistkami
- Pevné verze odpínačů

Toto vybavení umožňuje nabídnout uživateli rozvaděč s jednotným rozhraním a se stejnými postupy při jeho provozu i údržbě. Rozvaděč může být vybaven přístrojovými transformátory proudu a napětí, případně senzory, které jsou určeny pro potřeby měření i chránění, a současně i jakýmkoli typem jednotky pro chránění a ovládání. Převzato z (9 str. 6)

4.2 Provozní podmínky

Jmenovité parametry a charakteristické vlastnosti rozvaděče jsou zaručeny při následujících podmínkách pracovního prostředí:

- Minimální okolní teplota vzduchu: -5 °C
- Maximální okolní teplota vzduchu: $+40 \text{ °C}$
- Relativní vlhkost okolního vzduchu:
 - Maximální relativní vlhkost za dobu 24 hodin nesmí překročit hodnotu 95 %
 - Maximální tlak vodních par za dobu 24 hodin nesmí překročit hodnotu 2,2 kPa
 - Maximální relativní vlhkost za dobu jednoho měsíce nesmí překročit hodnotu 90 %
 - Maximální tlak vodních par za dobu jednoho měsíce nesmí překročit hodnotu 1,8 kPa



- Normální provozní nadmořská výška je do 1000 m nad hladinou moře.
- Předpokladem je normální, nekorozivní a neznečištěná atmosféra v místě instalace rozváděče. Převzato z (9 str. 6)

4.3 Standardy

Rozváděč i hlavní komponenty a přístroje v něm obsažené splňují následující standardy:

- IEC 62271-1 pro všeobecné aplikace a účely
- IEC/EN 62271-200 pro rozváděč
- IEC 62271-102 pro uzemňovače
- IEC 62271-100 pro vypínače
- IEC 60071-2 pro koordinaci izolace
- IEC 60470 pro stykače
- IEC 60265-1 pro odpínače
- IEC 60529 pro třídy krytí

Převzato z (9 str. 7)

4.4 Stupně krytí

Třídy krytí rozváděče jsou v souladu se standardy IEC 60529. Rozváděč UniGear je obvykle dodáván s následujícími standardními třídami krytí:

- IP4X pro zapouzdření / opláštění
- IP2X pro oddělení mezi prostory

Na požadavek je možné vnější plášť rozváděče dodat s vyšším stupněm krytí. Při jiných pracovních podmínkách, než jsou podmínky popsané v předcházející části, a také v případě použití vyššího stupně krytí, se mohou elektrické charakteristiky rozváděče lišit od níže uvedených charakteristik. Převzato z (9 str. 7)



4.5 Elektrické charakteristiky

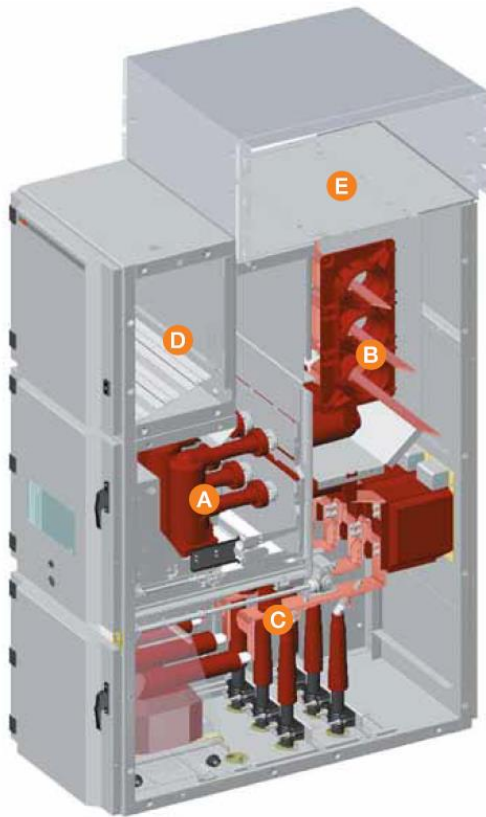
Elektrické charakteristiky pro daný rozvaděč:

Tab. 4-1 *Elektrické charakteristiky rozvaděče UniGear ZS1 - dvojitý systém přípojnic 17,5 kV Převzato z (10 str. 4)*

Jmenovité napětí	kV	17,5
Jmenovité izolační napětí	kV	17,5
Jmenovité krátkodobé výdržné střídavé napětí	kV (1 min)	38
Jmenovité výdržné napětí při atmosférickém impulsu	kV	95
Jmenovitý kmitočet	Hz	50/60
Jmenovitý krátkodobý výdržný proud	kA (3 s)	31,5
Jmenovitý dynamický proud	kA	80
Výdržný proud při vnitřním obloukovém zkratu	kA (1 s)	31,5
Jmenovitý proud hlavní přípojnice	A	1250

4.6 Prostorové rozdělení rozvaděče

Každá jednotka rozvaděče obsahuje tři silové prostory: Prostor vypínače [A], prostor přípojnic [B] a prostor kabelů [C]. Každá jednotka je vybavena nízkonapěťovým prostorem [D] (NN částí), kde jsou umístěny pomocné přístroje a zařízení. Rozvaděč odolný proti vnitřním obloukovým zkratům je obvykle vybaven odfukovým kanálem [E] určeným pro odvod spalin, které se vytvářejí při hoření elektrického oblouku. Pro odvod spalin jsou k dispozici různé typy kanálů. Uspořádání částí jednotky rozvaděče ukazuje **Obr. 4-1**. Všechny prostory jsou přístupné z přední strany a manipulace při provozu i údržbě rozvaděče je možné řádně provádět i v případě, že je rozvaděč namontován ke zdi. Prostory jsou navzájem odděleny kovovými přepážkami. Převzato z (9 str. 11)



Obr. 4-1 *Prostory jednotky rozvaděče (9 str. 11)*

4.6.1 Prostor hlavních přípojnic

Prostor přípojnic obsahuje hlavní systém přípojnic, který je k horním izolačním kontaktům vypínače připojen prostřednictvím přípojnicových odboček. Hlavní přípojnice jsou vyrobeny z elektrolytické mědi. Pro jmenovité zatížení přípojnic až do 2500 A se používají ploché přípojnice, zatímco pro proudy mezi 3500 A a 4000 A je použit speciální typ přípojnic s “D“ profilem. Přípojnice jsou kryty izolačním materiálem. U rozváděčů s proudy až do 31,5 kA je po celé délce rozváděče vytvořen jeden přípojnicový prostor, který je možné na požadavek a jako volitelné vybavení rozdělit do několika prostorů. U rozváděčů s proudy 40/50 kA je toto rozdělení na prostory vybavené průchodkami standardním řešením. Převzato z (9 str. 10)

4.6.2 Prostor silových kabelů

Prostor kabelů obsahuje systém rozbočení (plochých sběrnic), který je určen pro připojení silových kabelů k spodním kontaktům vypínače. Ploché sběrnice určené pro připojení kabelů vývodu jsou vyrobeny z elektrolytické mědi a pokrývají celý rozsah proudů. U rozváděčů s napětím 17,5 kV a 24 kV jsou tyto odbočky kryty izolačním materiálem. Převzato z (9 str. 10)

4.6.3 Prostor uzemňovače

Prostor kabelů je možné vybavit uzemňovačem pro uzemnění kabelů vývodu. Stejně zařízení může být také použito pro uzemnění systému přípojnic (u jednotky měření a jednotky spínače přípojnic). Uzemňovač lze také instalovat přímo na hlavní systém přípojnic ve vyhrazeném prostoru (v přípojnicové aplikaci). Uzemňovač má zkratovou zapínací schopnost. Uzemňovač je



ovládán ručně prováděnými manipulacemi z přední strany rozváděče, případně je uzemňovač možné ovládat motorovým pohonem, který je k dispozici jako volitelné vybavení. Poloha (stav) uzemňovače je zobrazena mechanickým indikátorem spojeným s uzemňovačem, který je viditelný z přední strany rozváděče. Převzato z (9 str. 10)

4.6.4 Uzemňovací sběrna

Uzemňovací sběrna je vyrobena z elektrolytické mědi a probíhá podél celého rozváděče. Tímto uspořádáním je zajištěna maximální bezpečnost jak osob, tak i vlastní instalace rozváděče. Převzato z (9 str. 10)

4.6.5 Izolační průchodky a uzavírací clony

Izolační průchodky v prostoru vypínače jsou sestaveny z kontaktů, které propojují vypínač s prostorem přípojníc, případně s prostorem kabelů. Jedná se o typ jednopólové izolační průchodky z epoxidové pryskyřice. Kovové uzavírací clony se při pohybu vypínače z vysunuté do pracovní polohy aktivují automaticky, a totéž platí i při pohybu vypínače z pracovní do vysunuté polohy. Převzato z (9 str. 10)

4.6.6 Kabely

V závislosti na použitém jmenovitém napětí, jednotkovém rozměru a průřezu kabelu, mohou být v rozváděči použity jednožilové i třížilové kabely až do maximálního počtu dvanácti kabelů na jednu fázi. Rozváděč je možné instalovat ke zdi, protože kabely jsou snadno přístupné z přední strany. Převzato z (9 str. 10)

4.6.7 Kanál pro odvod horkých plynů

Kanál pro odvod plynů je umístěn nad rozváděčem a probíhá po celé délce rozváděče. Každý silový prostor je v jeho horní části vybaven klapkou. Tlak vyvolaný poruchou tuto klapku otevře a umožní únik spalin do kanálu. Horké plyny i žhavé částice vyprodukované vnitřním obloukovým zkratem musí být obvykle odvedeny mimo místnost rozváděče. Rozváděč UniGear ZS1 je možné vybavit kompletní sestavou řešení, která splňují všechny požadavky na odvod plynů. To platí pro případ, kdy se jedná o přímý odvod kanálem na konci rozváděče, nebo o případ, kdy je požadováno řešení s odvodem plynů v přední nebo v zadní části rozváděče. U některých instalací, jako jsou například námořní a lodní aplikace, není povolené odvést plyny mimo místnost rozváděče. Z těchto důvodů bylo vyvinuto jednocelové řešení, které zajišťuje bezpečnost obsluhy a je ve shodě se standardy. Jedná se například o podélné komíny pro odvod horkých plynů. Převzato z (9 str. 11)

4.7 Typové zkoušky

Rozváděč UniGear ZS1 byl podroben všem zkouškám, které požadují mezinárodní standardy (IEC) i standardy vydávané místní organizací (například čínský standard GB/DL a ruský standard GOST). Kromě toho byly provedeny i zkoušky požadované hlavními plavebními rejstříky (Shipping Registers - LR, DNV, RINA, BV a GL) pro použití rozváděče v lodních a námořních instalacích. Jak je uvedeno v těchto standardech, byly příslušné zkoušky provedeny na



rozdávěčových jednotkách, které jsou z hlediska účinků zkoušek považovány za nejcitlivější, a proto byly výsledky zkoušek rozšířeny na celý rozsah jednotek. U každé rozváděčové jednotky je ve výrobním závodu před jejím dodáním zákazníkovi provedena kusová zkouška. Touto zkouškou je provedena funkční kontrola rozváděče s ohledem na specifické parametry a charakteristické vlastnosti příslušné instalace. Převzato z (9 str. 12)

4.7.1 Krátkodobý a dynamický (rázový) zkušební proud

Touto zkouškou je prokázáno, že hlavní silové a uzemňovací obvody odolají bez jakéhokoliv poškození namáhání, které je vyvoláno průtokem zkratového proudu. Je nutné si uvědomit, že předmětem této zkoušky je jak systém uzemnění výsuvného vypínače, tak i uzemňovací sběrna rozváděče. Mechanické a elektrické vlastnosti hlavního systému přípojníc a horních i spodních přípojovacích odboček z přípojníc zůstávají nezměněny i v případě zkratu. Převzato z (9 str. 12)

4.7.2 Oteplení

Zkouška oteplení se provádí při hodnotě jmenovitého proudu jednotky rozváděče a zkouškou je ověřeno, že v jakékoli části není nadměrná teplota. Během zkoušky je kontrolován vlastní rozváděč a současně jsou kontrolovány i spínací prvky, které mohou být v rozváděči osazeny, tj. vypínač nebo stykač. Převzato z (9 str. 12)

4.7.3 Odolnost proti vnitřnímu obloukovému zkratu

Metody provedení testu i kritéria, které musí rozváděč splňovat, jsou definovány standardem IEC 62271-200.

Testem odolnosti rozváděče proti vnitřnímu obloukovému zkratu je ověřeno, že dveře prostorů zůstanou uzavřeny, žádný z komponentů se od rozváděče neoddelí ani při působení velmi vysokých tlaků a plameny nebo žhavé plyny z rozváděče neunikají. Zkouškou je potvrzena bezpečnost zaměstnanců, kteří pracují v blízkosti rozváděče. Převzato z (9 str. 14)

4.7.4 Izolační zkoušky

Těmito zkouškami se ověří, že rozváděč má dostatečnou odolnost proti zkušebnímu napětí atmosférického impulsu a zkušebnímu napětí síťového kmitočtu. Zkouška zkušebním napětím síťového kmitočtu je provedena stejným způsobem jako zkouška typová, ale zkouška kusová je prováděna na každé vyrobené rozváděčové jednotce. Převzato z (9 str. 12)

4.7.5 Spínací a vypínací schopnost vypínače

Vypínač nebo stykač jsou předmětem zkoušek jmenovitým i zkratovým proudem. Tyto spínací prvky jsou kromě jiného také zkoušeny i z hlediska spínání a vypínání kapacitních a induktivních zátěží, jako jsou například kondenzátorové baterie a/nebo kabelová vedení. Převzato z (9 str. 13)



4.7.6 Spínací schopnost uzemňovače

Uzemňovač rozváděče UniGear je možné zapnout do zkratu (tj. uzemnit vedení / přípojnice pod napětím). Aby se obdobné manipulace vyloučily, je uzemňovač v době, kdy jsou silové obvody pod napětím blokován. Převzato z (9 str. 13)

4.7.7 Mechanické manipulace

Zkouškami mechanické odolnosti všech ovládacích prvků a částí je prokázána spolehlivost přístrojů / zařízení. Všeobecná zkušenost v sektoru elektrotechnického průmyslu ukazuje, že mechanické poruchy jsou jednou z nejběžnějších příčin poruch v dané instalaci. Vypínač je zkoušen provedením vysokého počtu manipulací vyššího, než je počet manipulací obvykle prováděný při provozu v místě instalace. Komponenty rozváděče jsou kromě toho součástí systému řízení kvality a jejich vzorky jsou pravidelně odebírány z výrobních linek a jsou vystaveny zkouškám mechanické životnosti (odolnosti), kterými je ověřeno, že kvalita těchto komponentů je stejná, jako kvalita komponentů, na kterých byly provedeny typové zkoušky. Převzato z (9 str. 13)

4.7.8 Stupeň krytí (IP xx)

Stupeň krytí IP nabízený rozváděči UniGer ZS1 vyjadřuje ochranu (odolnost) proti vniknutí cizích těles / předmětů nebo kapalin do rozváděče. Stupeň této ochrany je indikován kódem IP, za kterým následují dva znaky / číslice (například IP4X). První číslice definuje stupeň ochrany proti vniknutí cizích těles (předmětů) a druhá číslice se týká ochrany proti vniknutí vody (kapalin). Převzato z (9 str. 13)

4.8 Prostor přípojnic

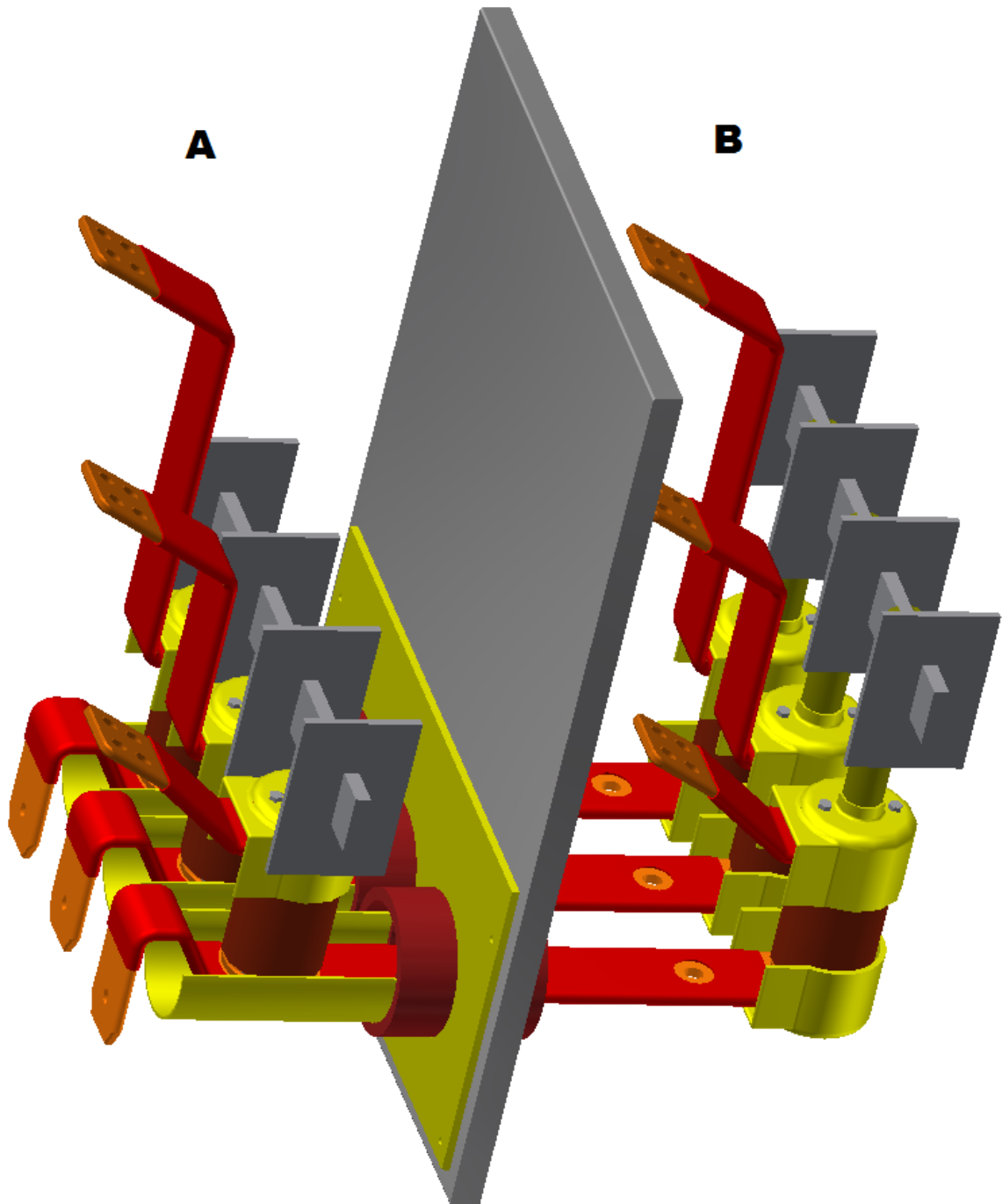
V této práci se zabýváme prostorem přípojnic. Prostor přípojnic je znázorněn na **Obr. 5-1**. Rozváděč může být napájený ze dvou různých systémů průběžných přípojnic. Pro účely práce jsem označil jeden systém průběžných přípojnic jako A a druhý systém jako B. V rámci prostoru přípojnic jsou od sebe systémy odděleny plechovou stěnou. Spojení systému A a B je realizováno pomocí průchodky skrz plechovou stěnu. V části systému B je kabelový vývod. Každý systém je vybaven tyčovými suvnými odpojovači.

4.8.1 Přípojnice

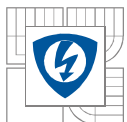
Vzhledem k tomu, že v práci je řešeno elektrické pole, tak velká pozornost patří přípojnicím. Jedná se o měděné přípojnice 70 x 10 mm. Podélné boky mají půlkruhový průřez. Konce přípojnic (jako například místo připojení kabelu u přípojnice P_K **Obr. 5-1**) mají hrany zbroušeny do tvaru víceúhelníku. Přípojnice jsou potaženy 2 mm silnou teplem smršťovací trubicí.

5 MODEL

Model dodaný z ABB byl upraven pro účely simulačního prostředí ANSYS Maxwell. Úpravy byly provedeny v programu Autodesk Inventor. Následně byl model v Inventoru uložen ve formátu SAT a importován do prostředí Maxwell. Zjednodušený model je na **Obr. 5-1**.



Obr. 5-1 Zjednodušený model prostoru přípojníc



5.1 Materiály použité v modelu

V prostoru přípojnic rozvaděče je použita řada materiálů. Pro simulaci elektrického pole je nezbytné znát především relativní permitivity použitých izolačních materiálů. Permitivita použitých materiálů byla v materiálových listech uváděna velice zřídka. V některých případech se bylo potřeba na hodnotu permitivity dotazovat přímo u výrobce materiálu. Některé materiály jsou přímo specifikovány v knihovně Ansys Maxwell. Pokud selhaly všechny dříve zmiňované postupy, tak hodnota permitivity byla nalezena k podobným materiálům na webu. Použité materiály shrnuje následující tabulka.

Tab. 5-1 *Použité izolační materiály, jejich permitivity, zdroje informací*

součást	materiál	rel. permitivita	zdroj informace
průchodka	epoxidová pryskyřice	4	materiálový list
izolátor odpojovače	epoxidová pryskyřice	4	materiálový list
teplem smrštitelná trubice	bezhalogenní polymer	5	informace od výrobce
žluté kryty	ABS plast	3	materiálový list k ABS z webu
přepážky mezi tyčemi odpojovače	sklotextit	5,5	materiálový list ke sklotextitu z webu

5.2 Zjednodušení modelu usnadňující výpočet

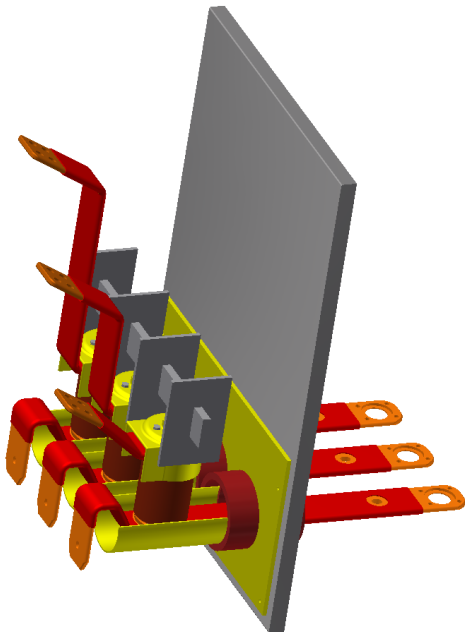
Existuje řada zjednodušení, která jen zanedbatelně ovlivní výsledek simulace elektrického pole, ale sníží nároky na výpočetní čas a výkon. Tyto zjednodušení bych rozdělil do dvou kategorií:

- Úplné odstranění některých částí modelu
- Tvarová úprava některých součástí modelu

Každá součástka, výstupek, oblina, zkosení, drážka, ... přináší zvýšený nárok na výpočetní čas a výkon. Proto jsem v modelu provedl řadu zjednodušení.

5.2.1 Odstranění systému přípojníc B

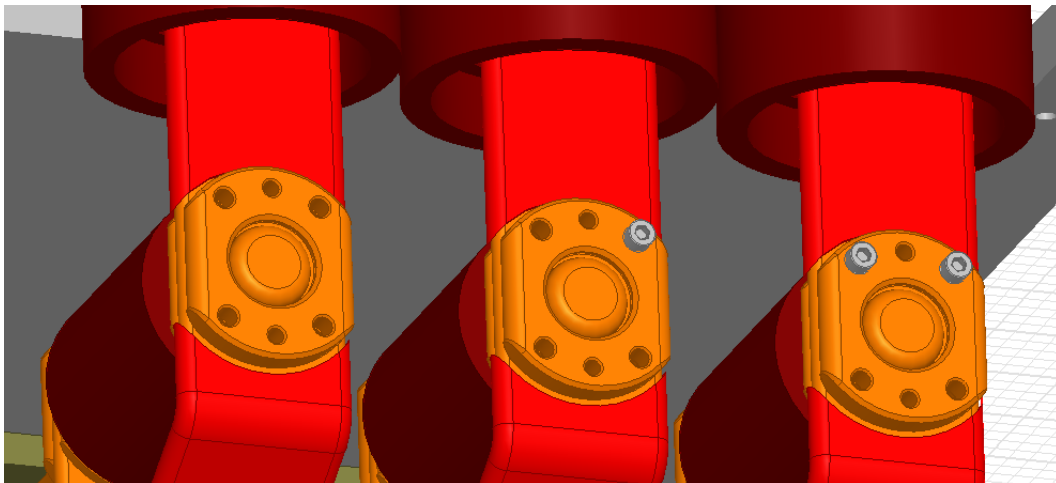
Postavení systému přípojníc A a systému přípojníc B je téměř identické. Vzájemné ovlivňování těchto systémů je minimální. Z těchto důvodů je odůvodnitelné provádění simulace jen s jedním systémem. Tato úprava je velice významná a šetří mnoho výpočetního času a výkonu.



Obr. 5-2 Zjednodušený model – odstraněný systém přípojníc B

5.2.2 Odstranění šroubů spojujících přípojnice

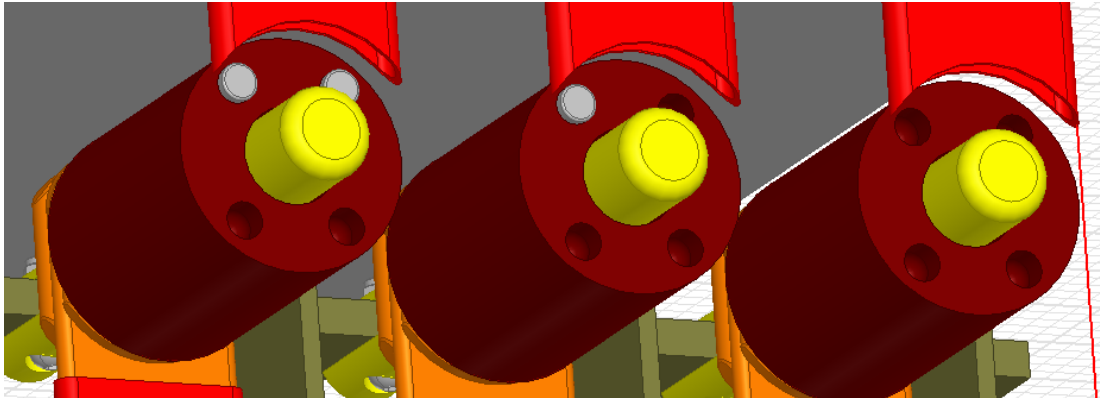
Přípojnice jsou spojeny šrouby. Tento případ je na vrchní i spodní straně izolátoru odpojovače identický. Proto jedna sada šroubů (na vrchní straně izolátoru) byla odstraněna. Vzhledem k tomu, že simulace probíhá v okamžiku, kdy na prostřední přípojnici je napětí v maximu, tak situace napravo i nalevo od prostřední přípojnice je identická. Z toho vyplývá další zjednodušení – odstranění šroubů na jedné straně od středu prostřední přípojnice. Zjednodušení ilustruje **Obr. 5-3**.



Obr. 5-3 Zjednodušení modelu – odstranění šroubů spojujících přípojnice

5.2.3 Odstranění závitových vložek

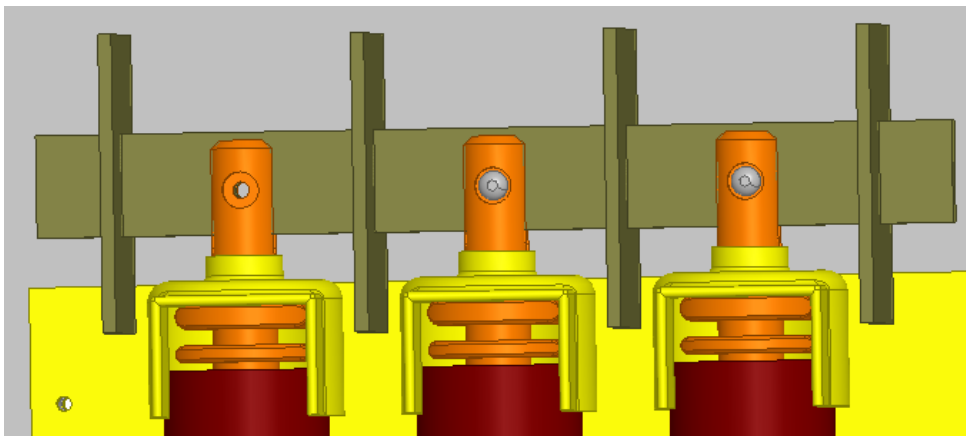
V izolátorech odpojovačů jsou ocelové závitové vložky sloužící k upevnění k přípojnicím. Tyto závitové vložky jsou na spodní i vrchní straně izolátoru. V rámci zjednodušování modelu byly vrchní závitové vložky odstraněny. Vzhledem k tomu, že simulace probíhá v okamžiku, kdy na prostřední přípojnici je napětí v maximu, tak situace napravo i nalevo od prostřední přípojnice je identická. Z toho vyplývá další zjednodušení – odstranění závitových vložek na jednom z krajních izolátorů.



Obr. 5-4 Zjednodušení modelu – odstranění závitových vložek

5.2.4 Odstranění matky a šroubu v tyči odpojovače

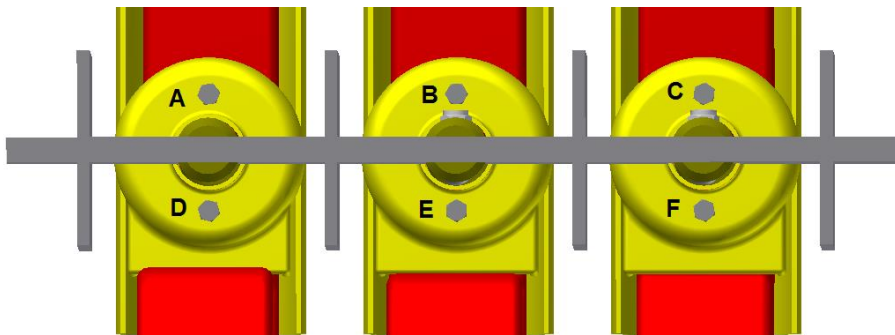
V každé tyči odpojovače je matka a šroub spojující tyč odpojovače a sklotextitové prepážky mezi tyčemi jednotlivých pólů. Vzhledem k tomu, že simulace probíhá v okamžiku, kdy na prostřední přípojnici je napětí v maximu, tak situace napravo i nalevo od prostřední přípojnice je identická. Proto šroub a matka na jedné krajní tyči odpojovače je odstraněna.



Obr. 5-5 Zjednodušení modelu – odstranění šroubu a matky na jedné tyči odpojovače

5.2.5 Odstranění polyamidových šroubů a jiných součástek

Šrouby a jiné součástky, které jsou v přímém kontaktu s plastem, nejsou z oceli (jak by se mohlo z obrázků modelu zdát), ale jsou z polyamidu. Tyto polyamidové součástky jsou z hlediska tvaru a velikosti elektrického pole v modelu bezvýznamné. Proto došlo k odstranění veškerých těchto součástek. Polyamidové šrouby drží veškeré kryty z ABS plastu. Situace je na následujícím obrázku.

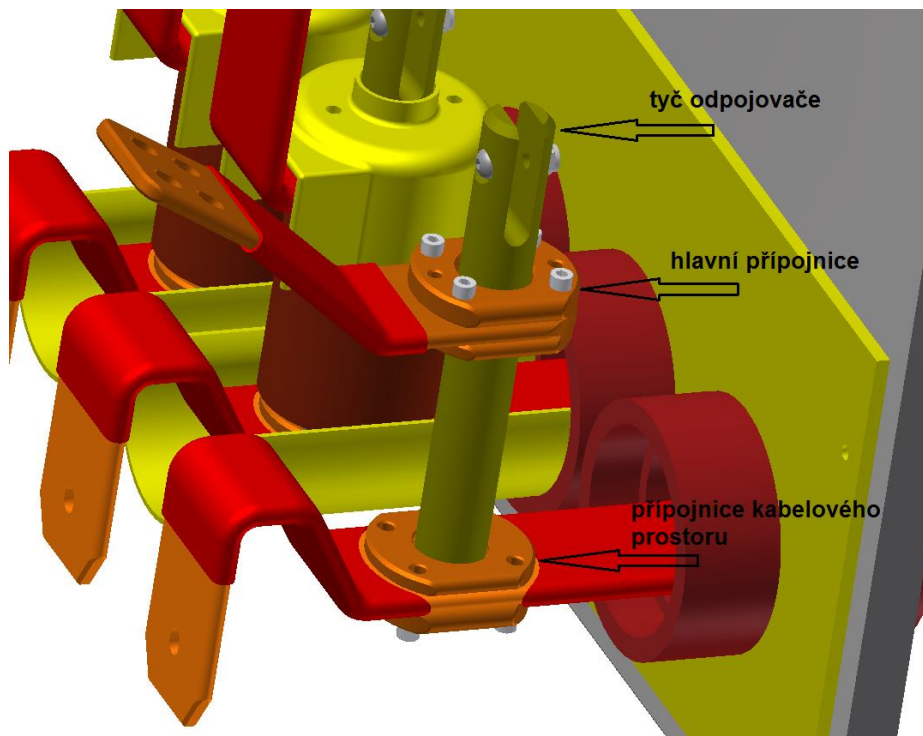


Obr. 5-6 Zjednodušení modelu – odstranění polyamidových šroubů A,B,C,D,E,F

Stejný případ je i na spodní straně přípojníc, kde kryt z ABS plastu drží polyamidové šrouby a matky. I tyto polyamidové součástky byly odstraněny.

5.2.6 Odstranění kontaktních kroužků

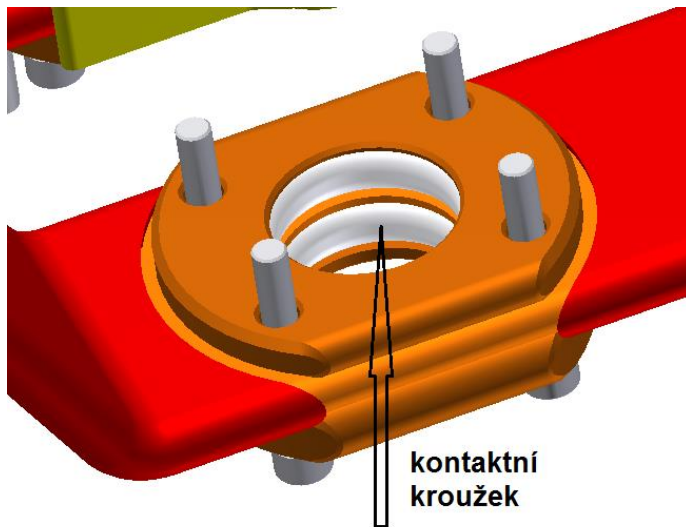
Tyče odpojovače spojují hlavní přípojnice s přípojnícemi, které vedou do kabelové části.



Obr. 5-7 Význam a provedení odpojovače

Kontakt mezi tyčí odpojovače a přípojnícemi není realizován přímo, ale pomocí kontaktních kroužků, které jsou umístěny mezi přípojnícemi. Vzhledem k tomu, že tyto kontaktní kroužky jsou

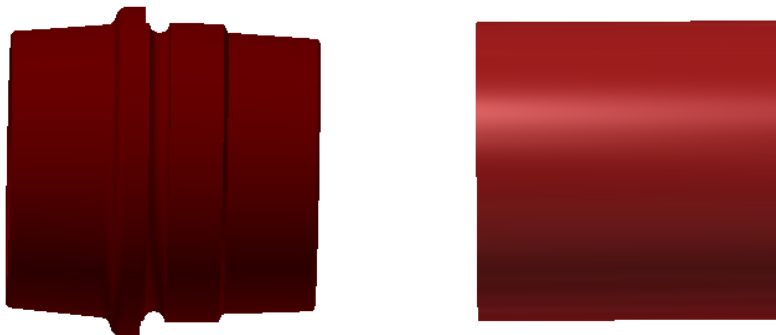
celé obklopeny materiálem přípojníc, tak neovlivňují tvar ani velikost vnějšího pole. Z tohoto důvodu byly tyto kontaktní kroužky z modelu odstraněny.



Obr. 5-8 Detail provedení kontaktního místa – kontaktní kroužky, které jsou v konečném modelu odstraněny

5.2.7 Úprava průchodky

Originální průchodka je značně členitá. Vzhledem k tomu, že průchodka je z izolačního materiálu, tak její tvar neovlivňuje tvar elektrického pole. Proto můžeme tvar průchodky zjednodušit. Zachováváme její základní tvar, její délku, průměr a její tloušťku v místě nejkratší vzdálenosti mezi přípojníc a plechovou stěnou.

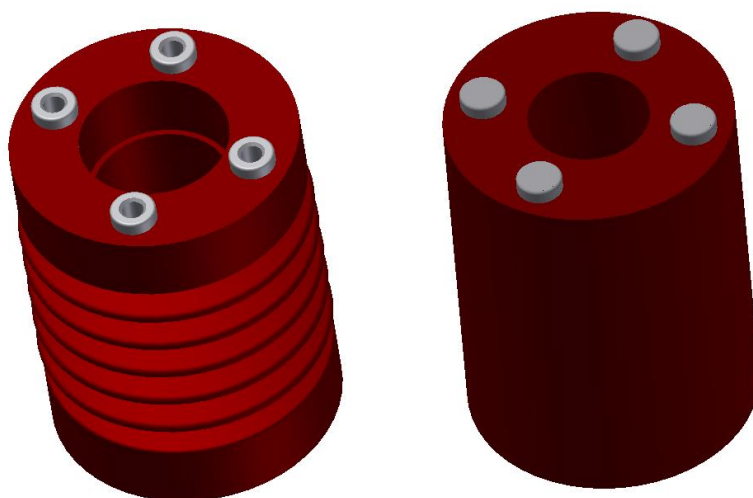


Obr. 5-9 Rozdíl mezi původní a zjednodušenou průchodkou

5.2.8 Úprava izolátoru

Původní izolátor je značně členitý. Stejně jako průchodka je z izolačního materiálu, proto jeho tvar má minimální vliv na tvar a velikost elektrického pole. Při úpravě byly zachovány hlavní rozměry izolátoru. Došlo jen k značnému zjednodušení jeho tvaru a ke zmenšení průměru středového otvoru tak, aby průměr tyče odpojovače byl stejný jako průměr otvoru v izolátoru. Tím se ušetří 2 přechody materiál – vzduch. To ušetří síť meshe a tím výpočetní čas.

Dále byly upraveny ocelové závitové vložky, které jsou vloženy v izolátoru. Zjednodušení spočívalo v odstranění vnitřního závitu a otvoru.



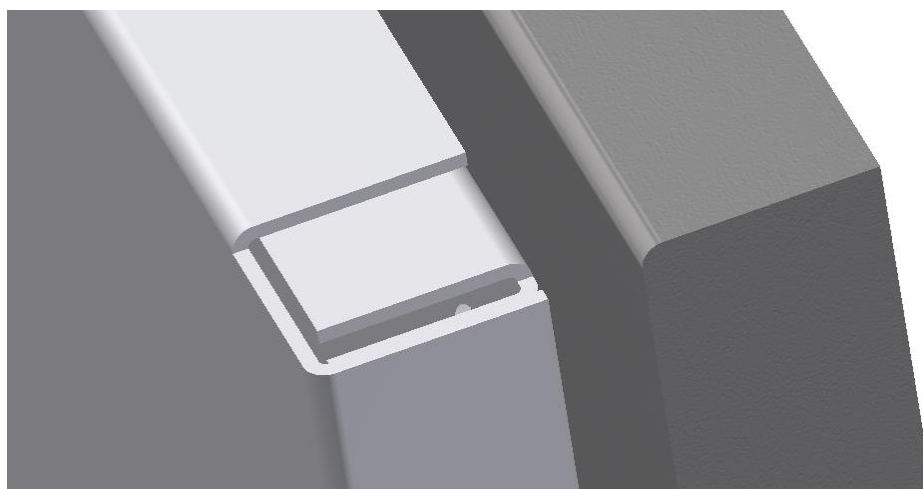
Obr. 5-10 Zjednodušení modelu – původní a upravený izolátor

5.2.9 Úprava šroubů

Šrouby, jejichž závitová část je obklopena jiným kovovým materiálem, byly nahrazeny jen hlavou šroubu. Část šroubu uvnitř jiného kovového materiálu o stejném napětí má minimální vliv na tvar a velikost vnějšího elektrického pole.

5.2.10 Úprava dělicí plechové stěny

Oba systémy hlavních přípojníc odděluje plechová stěna. Stěna je vytvořena z ohýbaného plechu – to je pro výpočet nadměrná zátěž (několik přechodů mezi materiály, tenké stěny, ...). Pro účely výpočtu elektrického pole nás zajímá pouze vnější tvar stěny, proto ve zjednodušeném modelu byla stěna vytvořena z celistvého materiálu. Vnější tvar byl zachován, tj. stejné hrany a stejné poloměry oblouků.

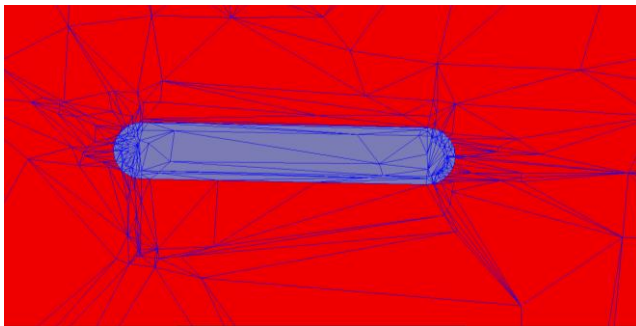


Obr. 5-11 Rozdíl mezi původní a zjednodušenou dělicí stěnou

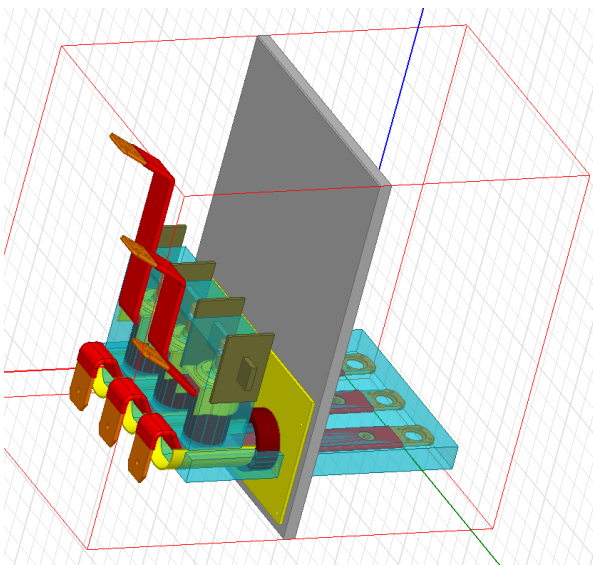
5.3 Oblast simulace – okrajová podmínka

Oblast, kde má dojít k výpočtu elektrického pole, je ohraničena pomocí funkce region. Pomocí této funkce je vytvořen kvádr, na jehož plochách je zadána hraniční podmínka napětí 0 V. Toto odpovídá reálné situaci, kdy je prostor přípojnic uzavřený v plechové skříni, která má potenciál země. Vytvořený region je zobrazen na **Obr. 5-13**.

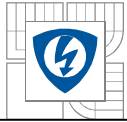
Při zkušební simulaci se ukázalo, že síť meshe ve vzduchu v okolí modelu je příliš hrubá. To je způsobeno tím, že výpočet přechází z relativně malých oblastí (jako je například izolační trubice na přípojnicích) do obrovské oblasti okolního vzduchu. Automatika programu způsobí, že síť v okolním vzduchu je relativně k velikosti oblasti stejně hustá jako v předchozím materiálu. Ale vzhledem k velkému objemu okolního vzduchu, je absolutní hustota sítě mnohem nižší. Situaci ilustruje **Obr. 5-12**. Situaci lze vyřešit tak, že určíme největší možnou velikost elementu sítě, a tím její hustotu. Problém je, že hustá síť ve vzduchu je potřeba jen v blízkosti modelu. Zhuštění celé sítě ve vzduchu by bylo zbytečné protáhnutí času výpočtu a zbytečný nárok na výpočetní výkon. Proto byly v modelu vytvořeny dvě vzduchové oblasti ve tvaru kvádrů, viz **Obr. 5-13**. V těchto oblastech byla ručně nastavena maximální velikost elementu na hodnotu dvacetkrát nižší, než nastavovala automatika.



Obr. 5-12 Příliš hrubá síť v okolním vzduchu



Obr. 5-13 Region s hraniční podmínkou (červený kvádr) a vzduchové oblasti okolo exponovaných částí (modré kvádry)



6 SIMULACE ELEKTRICKÉHO POLE

Simulace elektrického pole je provedena pomocí programu ANSYS Maxwell. Výpočet v Maxwellu je založen na metodě konečných prvků (MKP). Prvotně byla provedena komplexní simulace celého zjednodušeného modelu. Následně byly vytvořeny roviny v místech, kde se předpokládá velká intenzita elektrického pole. V těchto rovinách je intenzita elektrického pole graficky znázorněna pomocí barevné škály. V nejkritičtějších oblastech je velikost intenzity zobrazena na vybrané přímce.

6.1 Nastavení simulace

V první fázi byla provedena komplexní simulace celého zjednodušeného modelu. Vzhledem k tomu, že napětí v jednotlivých fázích je časově závislé (průběh napětí v čase má tvar sinusovky), tak musel být vybrán časový okamžik, ve kterém byla simulace provedena. Za časový okamžik simulace byl vybrán čas, kdy na prostřední přípojnicí je napětí v maximu. Tomu odpovídá napětí na krajních přípojnicích poloviční a opačné polarity. Vzhledem k tomu, že jmenovité napětí rozvaděče $U_n = 17.5 \text{ kV}$, tak amplituda takového napětí je:

$$U_m = \sqrt{2}U_n = \sqrt{2} \cdot 17\,500 = 24\,750 \text{ V}$$

Pak poloviční napětí opačné polarity je:

$$U = \frac{-U_m}{2} = -\frac{24\,750}{2} = -12\,375 \text{ V}$$

Nastavená napětí v modelu:

- Napětí prostřední přípojnice: 24 750 V
- Napětí krajních přípojnic: -12 375 V

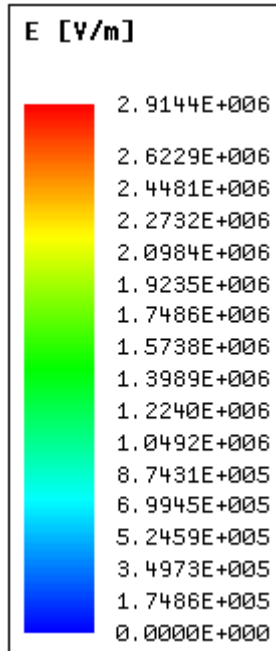
Tato napětí mají i všechny ostatní vodivé materiály vodivě spojené s přípojnici (tyče odpojovače, šrouby, matky, ...).

Plechová stěna a ohraničení modelu (region) jsou na potenciálu země. Mají tedy nastaveno napětí 0 V.

Je třeba si uvědomit, že vzhledem k povaze úlohy (primárně hledání míst s relativně největší hodnotou velikosti intenzity elektrického pole) není tolik důležité, při jakém napětí model simulujeme. Ale nastavené napětí dává přehled o přibližných hodnotách VIEP při provozu rozvaděče za jmenovitých podmínek.

6.2 Grafické znázornění VIEP (velikosti intenzity elektrického pole)

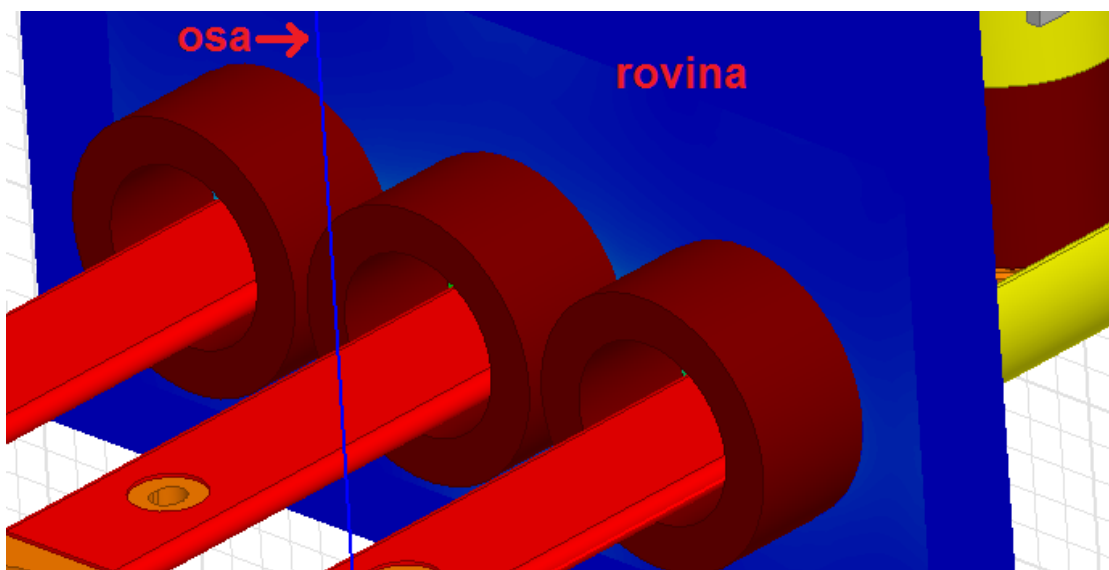
Výstupem simulace elektrického pole je vyjádření VIEP (velikost intenzity elektrického pole) pomocí barevné škály. Pro všechny obrázky rozložení VIEP v této kapitole platí barevná škála na **Obr. 6-1**. Pomocí této škály lze přiřadit jednotlivým barvám hodnotu VIEP.



Obr. 6-1 Barevná škála a příslušné hodnoty velikosti intenzity elektrického pole

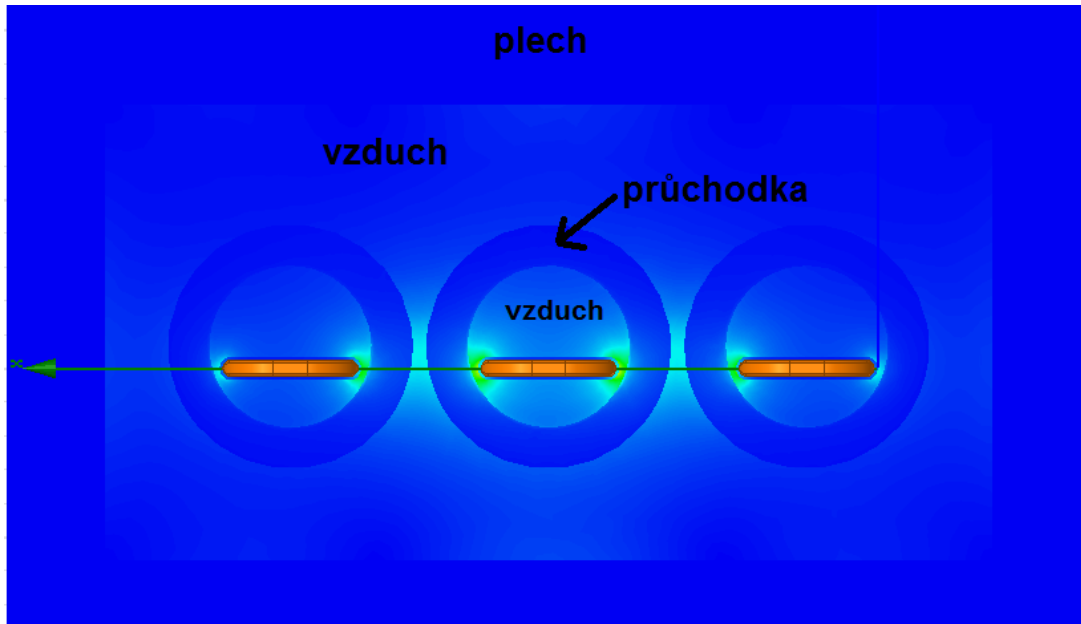
6.2.1 Elektrické pole přípojnic v oblasti průchodek

Přípojnice prochází ze systému A do systému B skrz plechovou stěnu, která tyto dva systémy odděluje. Průchodky zajišťují dostatečné oddělení přípojnic od plechové stěny, která je na potenciálu země. Umístění roviny, ve které je pole zobrazeno ukazuje **Obr. 6-2**.



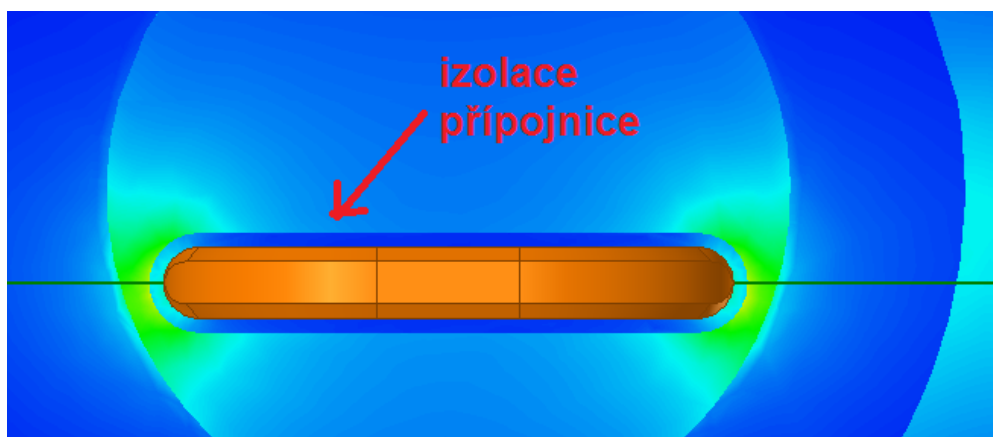
Obr. 6-2 Umístění roviny (modrá osa nesouvisí s modelem)

Na **Obr. 6-3** je zobrazeno rozložení VIEP (velikost intenzity elektrického pole) v příčném řezu přípojnic v oblasti, kde přípojnice procházejí průchodkami. Barevná škála viz **Obr. 6-1**. Nejsilnější pole je okolo prostřední přípojnice (nejvyšší napětí) v oblastech zakulacených hran (malý poloměr křivosti). VIEP uvnitř materiálu průchodek je zeslabeno vlivem vyšší relativní permitivity epoxidu ($\epsilon_r = 4$) než vzduchu. Vnitřní (tj. světlejší) obdélník je vzduchová oblast. Vnější (tmavě modrý obdélník) je materiál plechové stěny tj. nulové elektrické pole ve vodivém materiálu.



Obr. 6-3 Rozložení VIEP v příčném řezu přípojnic v oblasti průchodek, škála viz Obr. 6-1 (zelená přímka je osa!)

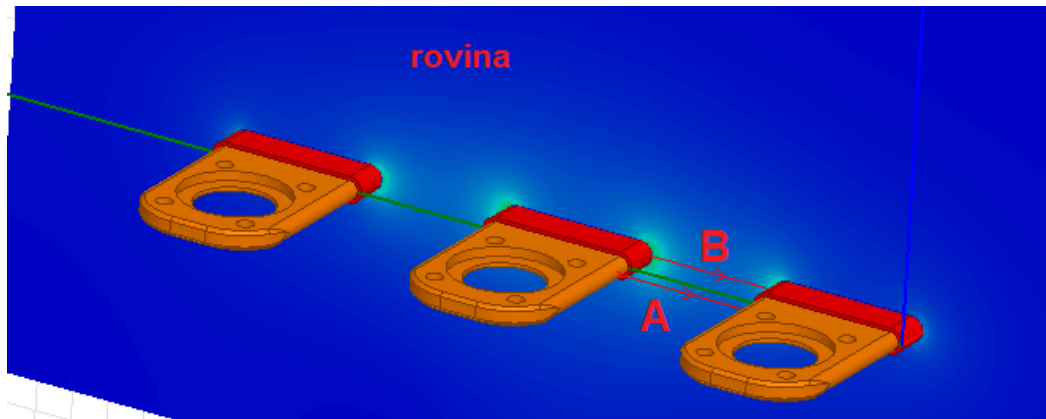
Detail rozložení VIEP okolo prostřední přípojnice ukazuje **Obr. 6-4**. VIEP vně průchodku má hodnotu okolo 0,7 MV/m.



Obr. 6-4 Detail rozložení VIEP okolo prostřední přípojnice škála viz Obr. 6-1 (zelená přímka je osa!)

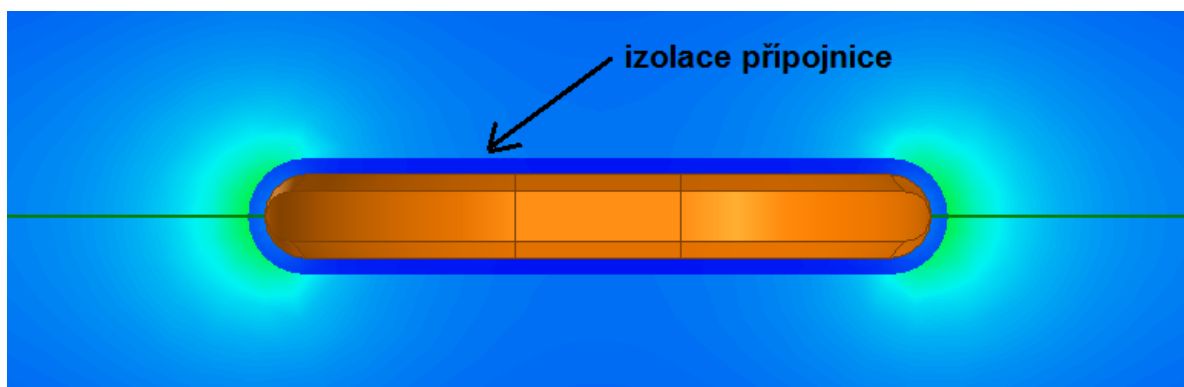
6.3 Elektrické pole přípojnic – význam teplem smrštitelné trubice

Nejjednodušší možná simulace elektrického pole v daném modelu je simulace elektrického pole v příčném řezu přípojnic. Navíc se na této simulaci dá ukázat význam teplem smrštitelné trubice, která izoluje část povrchu přípojnic. Umístění roviny, ve které je zobrazeno rozložení pole, ukazuje **Obr. 6-5**.



Obr. 6-5 Umístění roviny a vyznačení přímek škála viz Obr. 6-1 (zelená a modrá přímka jsou osy!)

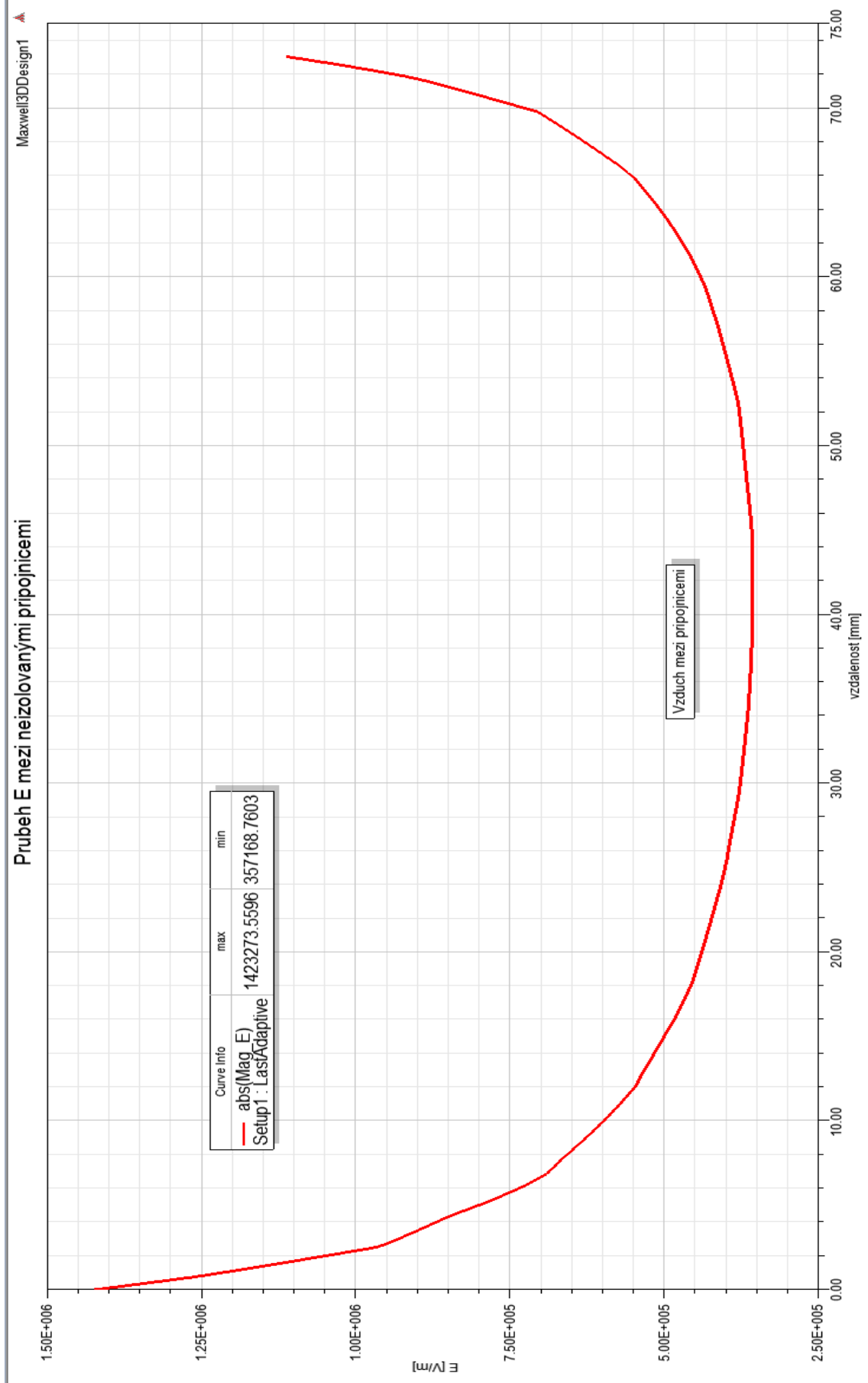
Rovina na **Obr. 6-5** má označení PR0. Rovina protínající přípojnice v neizolované části má označení PR00 (není na obrázku). Detail rozložení velikosti intenzity elektrického pole okolo izolované přípojnice je na **Obr. 6-6**. Modrá tenká oblast okolo měděné přípojnice je daná izolací. Z **Obr. 6-6** lze vidět, že maximální velikost intenzity elektrického pole je až na povrchu izolantu a ne na povrchu mědi. To je způsobeno větší permitivitou izolantu ($\epsilon_r = 3$) než vzduchu.



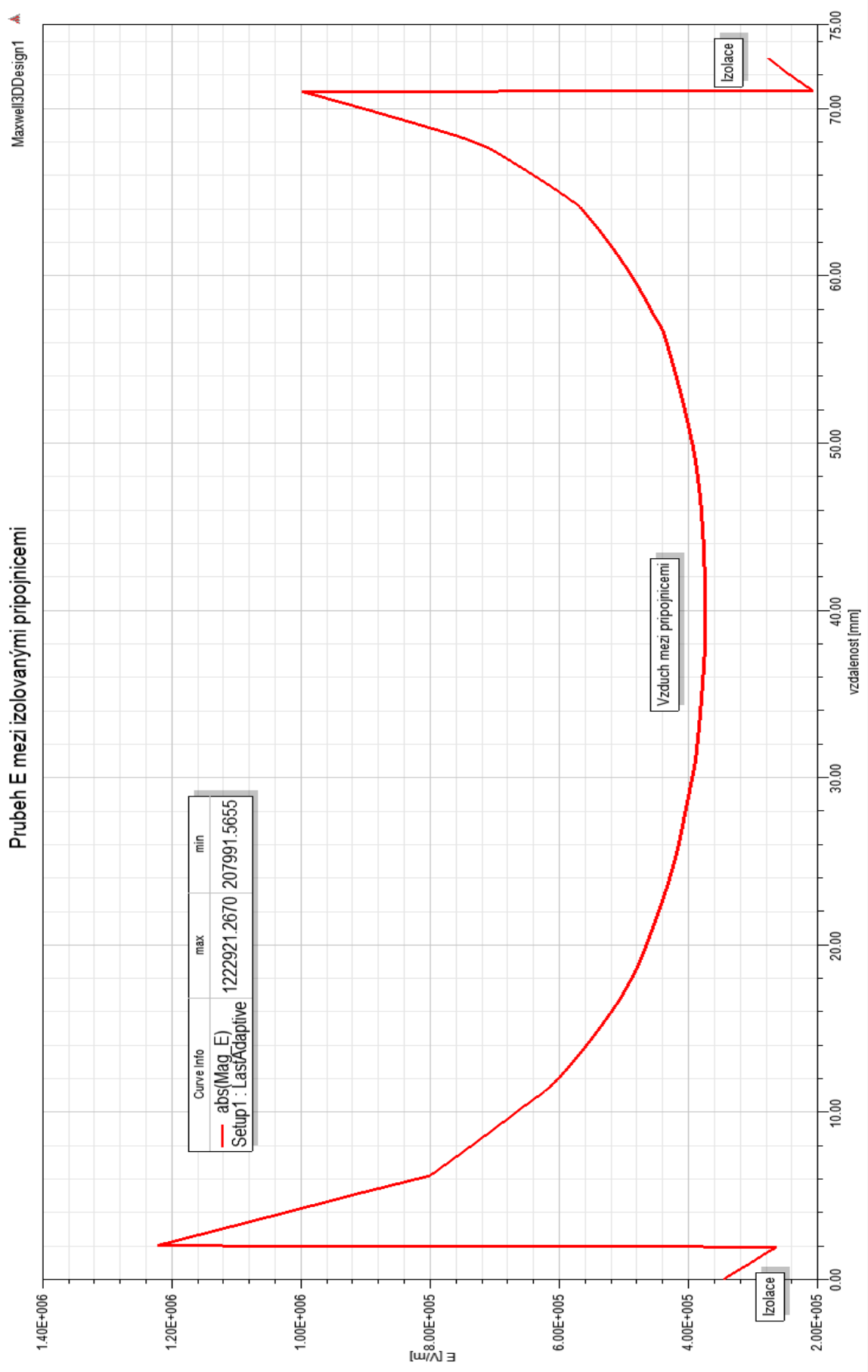
Obr. 6-6 Rozložení velikosti intenzity elektrického pole okolo izolované přípojnice škála viz Obr. 6-1 (zelená přímka je osa!)

Obr. 6-5 ukazuje přímky A a B. Tyto přímky vedou z povrchu prostřední přípojnice na povrch krajní přípojnice. To znamená, že přímka B prochází i izolací přípojnice a nejen vzduchem. Přímka A vede mezi neizolovanými přípojnicemi. Přímka B vede mezi izolovanými přípojnicemi.

Průběh velikosti intenzity elektrického pole mezi holými přípojnicemi po přímce A ukazuje **Obr. 6-7**. Maximální velikost intenzity elektrického pole tohoto průběhu je 1,4 MV/m. Toto maximum leží u povrchu prostřední přípojnice. Podle (3 str. 1248) je dielektrická pevnost vzduchu 3 MV/m. V této oblasti by tedy nemělo docházet k elektrickým průrazům vzduchu.



Obr. 6-7 *Průběh velikosti intenzity elektrického pole podle přímky A (Obr. 6-5)*



Obr. 6-8

Průběh velikosti intenzity elektrického pole podle přímky B (Obr. 6-5)

Průběh velikosti intenzity elektrického pole mezi izolovanými přípojniciemi po přímce B ukazuje **Obr. 6-8**. Maximální velikost intenzity elektrického pole tohoto průběhu je 1,2 MV/m. Toto maximum leží u povrchu izolace prostřední přípojnice. Srovnání průběhů velikosti intenzity elektrického pole v prostoru mezi přípojniciemi ukazuje, že v případě izolované přípojnice je velikost intenzity ve vzduchu nižší (o 0,2 MV/m) než v případě holých přípojníc.

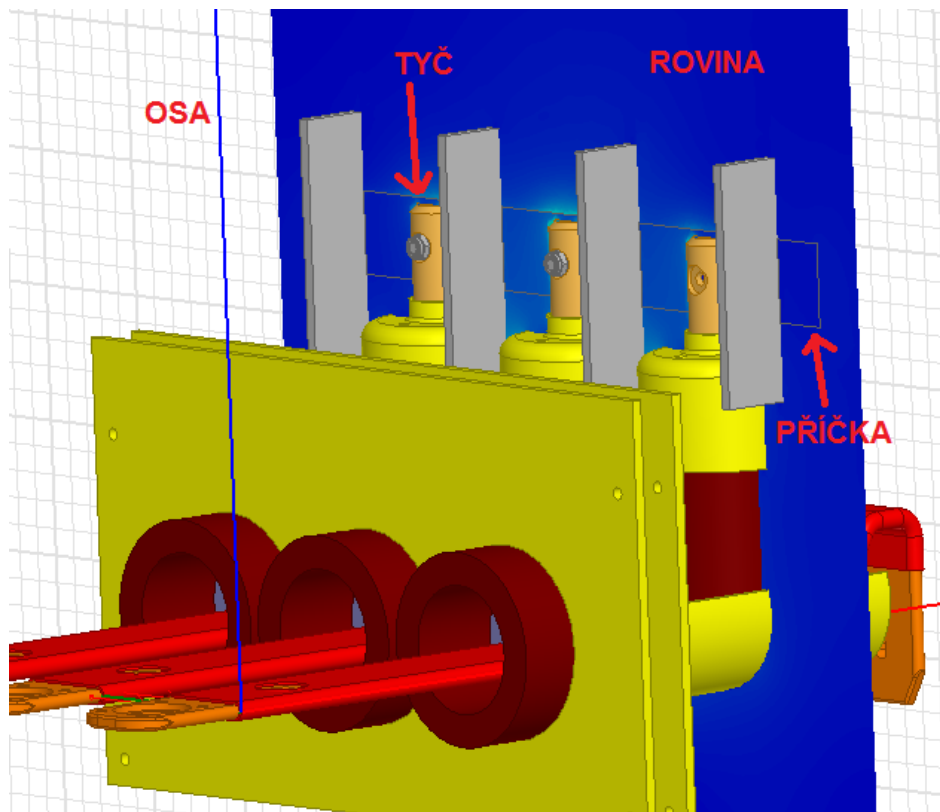
Aby bylo dosaženo ještě nižší hodnoty VIEP ve vzduchu mezi přípojniciemi, tak v úvahu připadají tato opatření a jejich kombinace:

- Použití tlustší izolace na přípojnících
- Použití materiálu izolace s vyšší permitivitou
- Zvětšení vzdálenosti mezi přípojniciemi
- Změna tvaru přípojnice – menší poloměry křivosti

Ale vzhledem k tomu, že v prostoru mezi přípojniciemi se nenachází nejkritičtější místo (místo s největší hodnotou VIEP), tak na tuto oblast nebyla zaměřena pozornost.

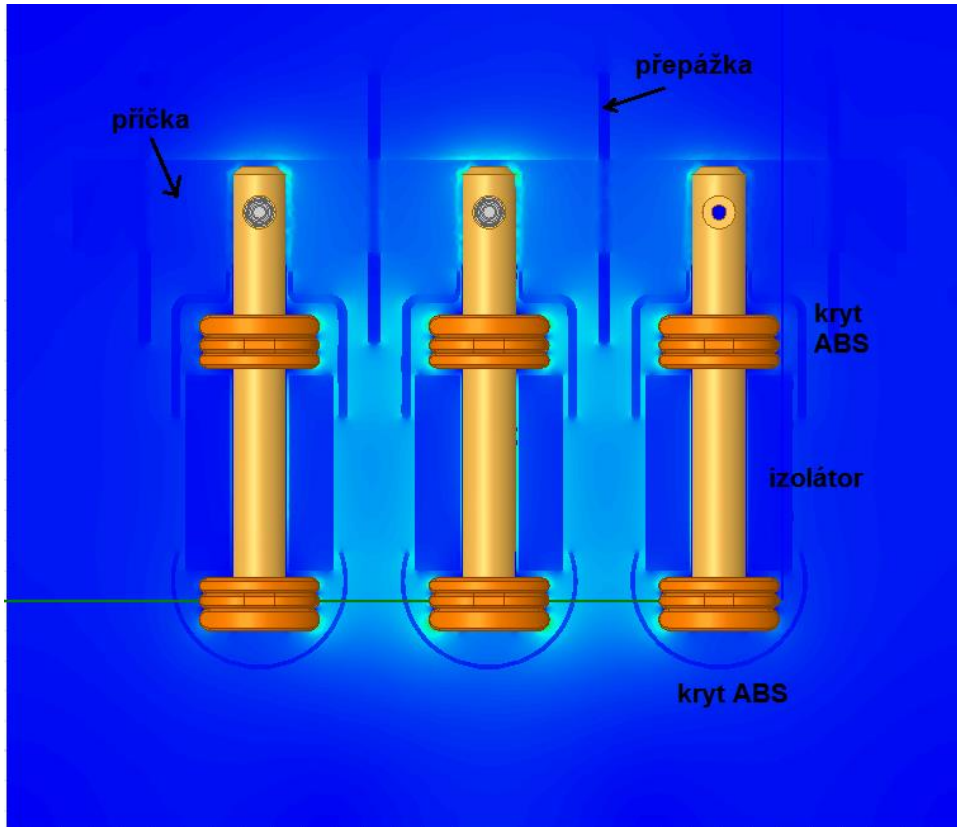
6.4 Elektrické pole tyčí odpojovače

Umístění roviny, kde je zobrazeno elektrické pole ukazuje **Obr. 6-9**. Jedná se o místo, kde začíná zářez v tyči odpojovače, ve kterém je umístěna sklotextitová příčka. Rovina leží ve vzduchu těsně vedle sklotextitové příčky. Podle informací od výrobce je odpojovač zdrojem problémů z hlediska elektrického pole a možných elektrických průrazů.

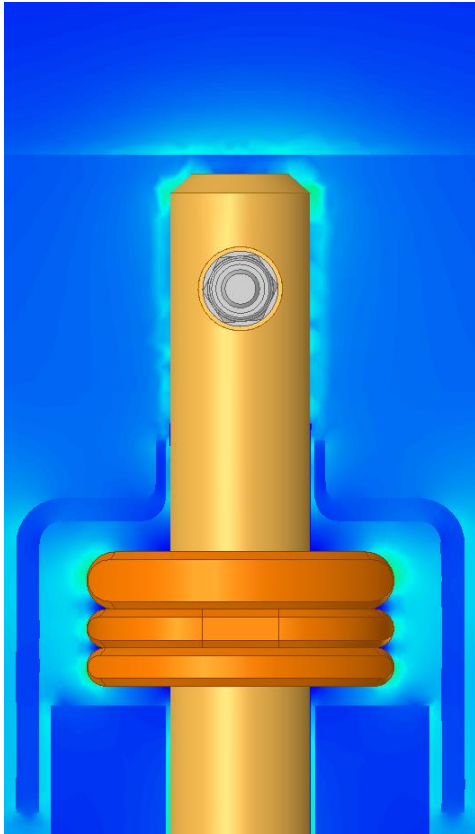


Obr. 6-9 Umístění roviny

Rozložení VIEP v příčném řezu tyčí odpojovačů ukazuje **Obr. 6-10**. V této rovině lze vidět díky odlišné permitivitě izolačních materiálů řezy těmito materiály. Lze tak vidět řez plastovými kryty z ABS, izolátorem z epoxidu a přepážkami ze sklotextitu. Díky tomu, že rovina leží těsně na sklotextitové příčce, tak lze v obrázku tušit i její přítomnost. **Obr. 6-11** ukazuje detail rozložení VIEP okolo tyče odpojovače prostřední přípojnice (nejvyšší napětí). Nejkritičtějším místem této roviny se zdá být hrana na vrchní části tyče odpojovače. Při porovnání barvy pole okolo této hrany s barevnou škálou (**Obr. 6-1**) se však hodnota VIEP přibližuje maximálně 1,4 MV/m, což je v porovnání s dielektrickou pevností vzduchu (3 MV/m) stále zanedbatelné.



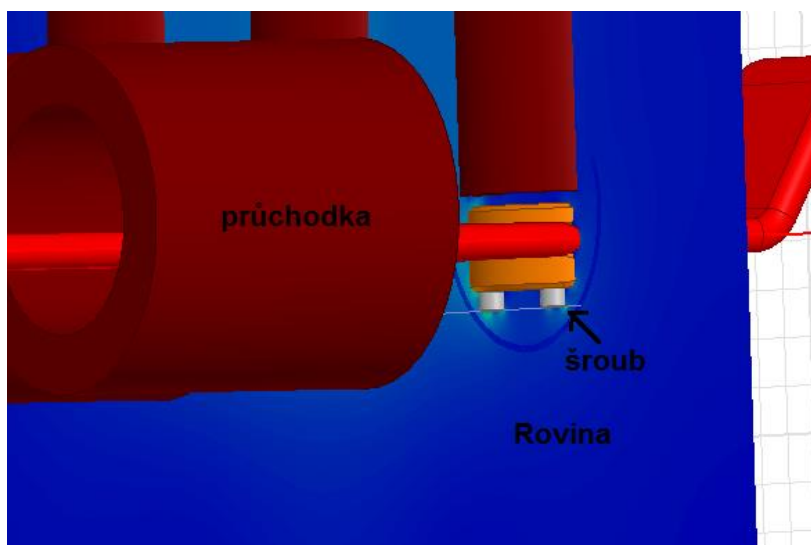
Obr. 6-10 Rozložení VIEP v příčném řezu vedeném tyčí odpojovače škála viz Obr. 6-1 (zelená přímka je osa!)



Obr. 6-11 Detail rozložení VIEP okolo tyče odpojovače prostřední přípojnice škála viz Obr. 6-1

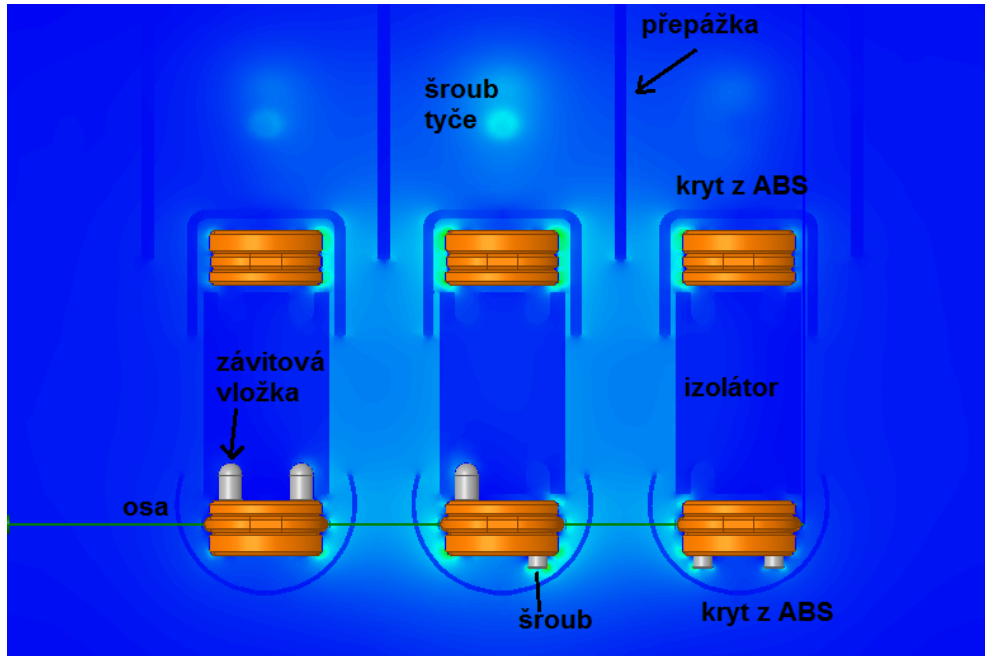
6.5 Nejkritičtější místo modelu – šroub spojující přípojnice

Na základě vyhodnocení řady řezů modelu a na základě předpokladu bylo nalezeno nejkritičtější místo – místo s největší hodnotou VIEP (velikost intenzity elektrického pole). Tímto místem je hrana hlavy šroubu, který spojuje přípojnice v místě, kde je tvořen kontaktní styk přípojnic a tyče odpojovače. Místo vedení roviny ukazuje Obr. 6-12.

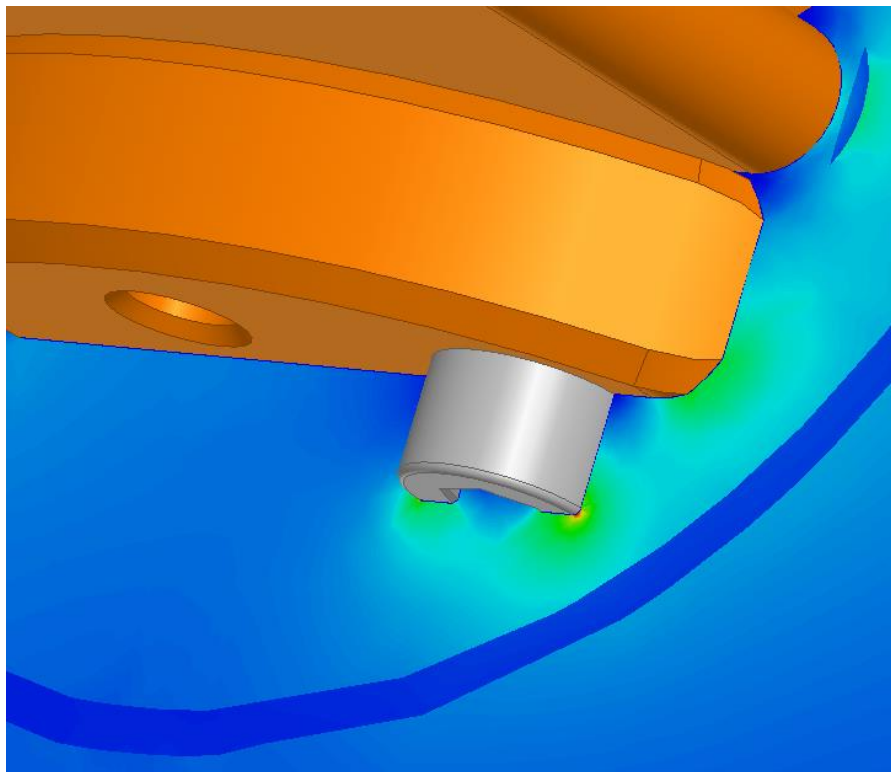


Obr. 6-12 Umístění roviny

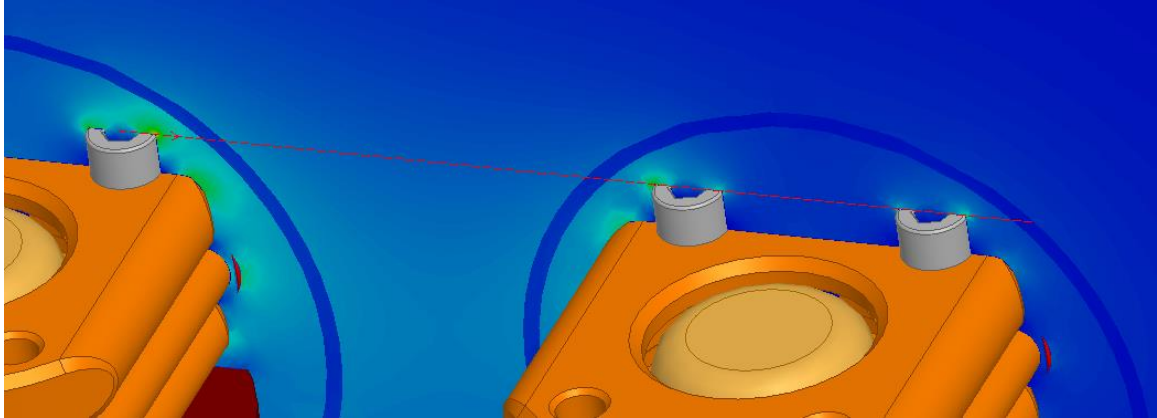
Hlava šroubu má hranu sice zakulacenou, ale i přesto vykazuje relativně malý poloměr křivosti. Právě z těchto důvodů existoval předpoklad výskytu silného elektrického pole. Rozložení VIEP v rovině jdoucí středem šroubu spojujícího přípojnice ukazuje **Obr. 6-13**. Pro stupnici barevné škály opět platí **Obr. 6-1**.



Obr. 6-13 Rozložení VIEP v rovině jdoucí středem šroubu spojujícího přípojnice škála viz Obr. 6-1

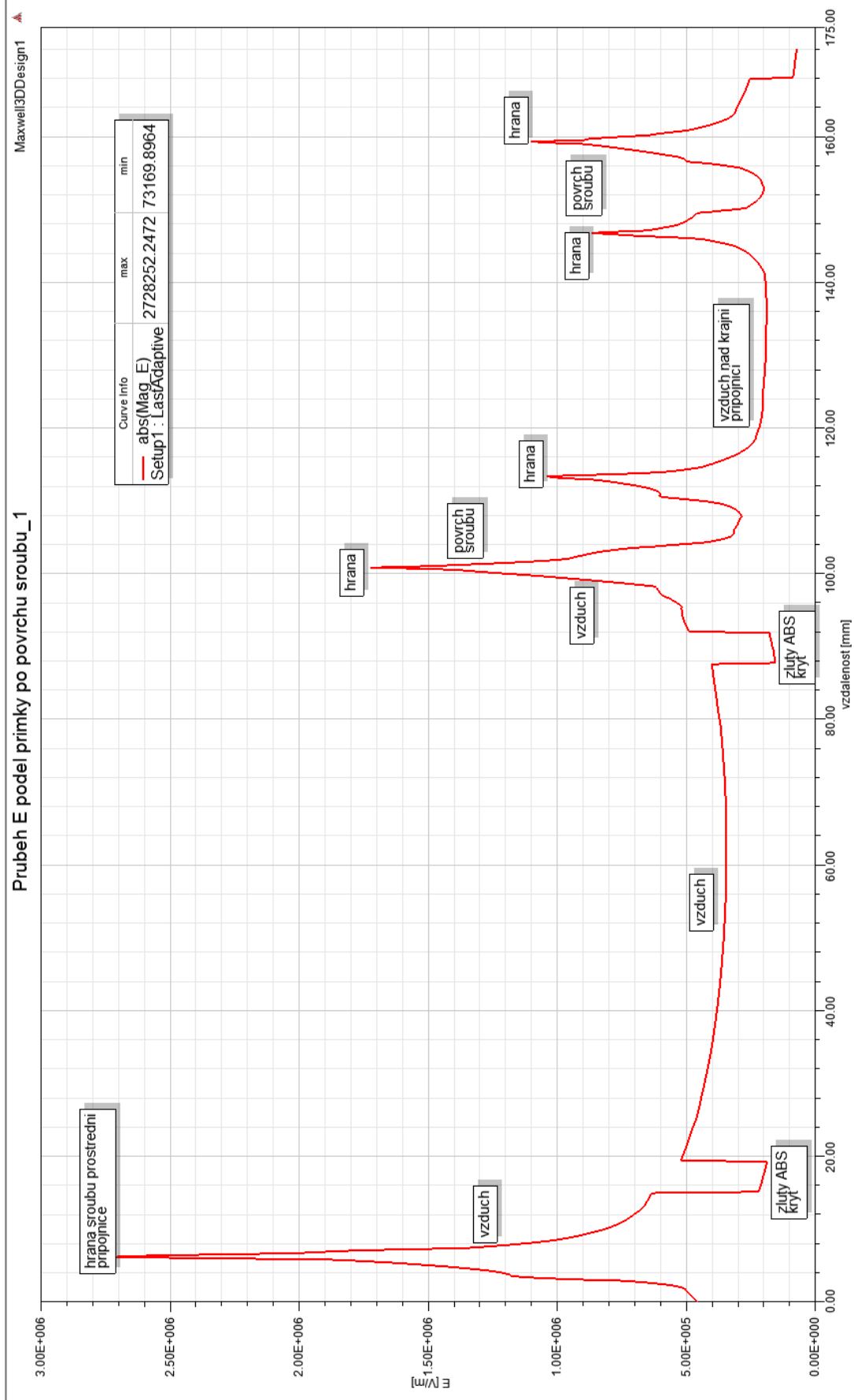


Obr. 6-14 Detail rozložení VIEP okolo hlavy šroubu prostřední přípojnice škála viz Obr. 6-1

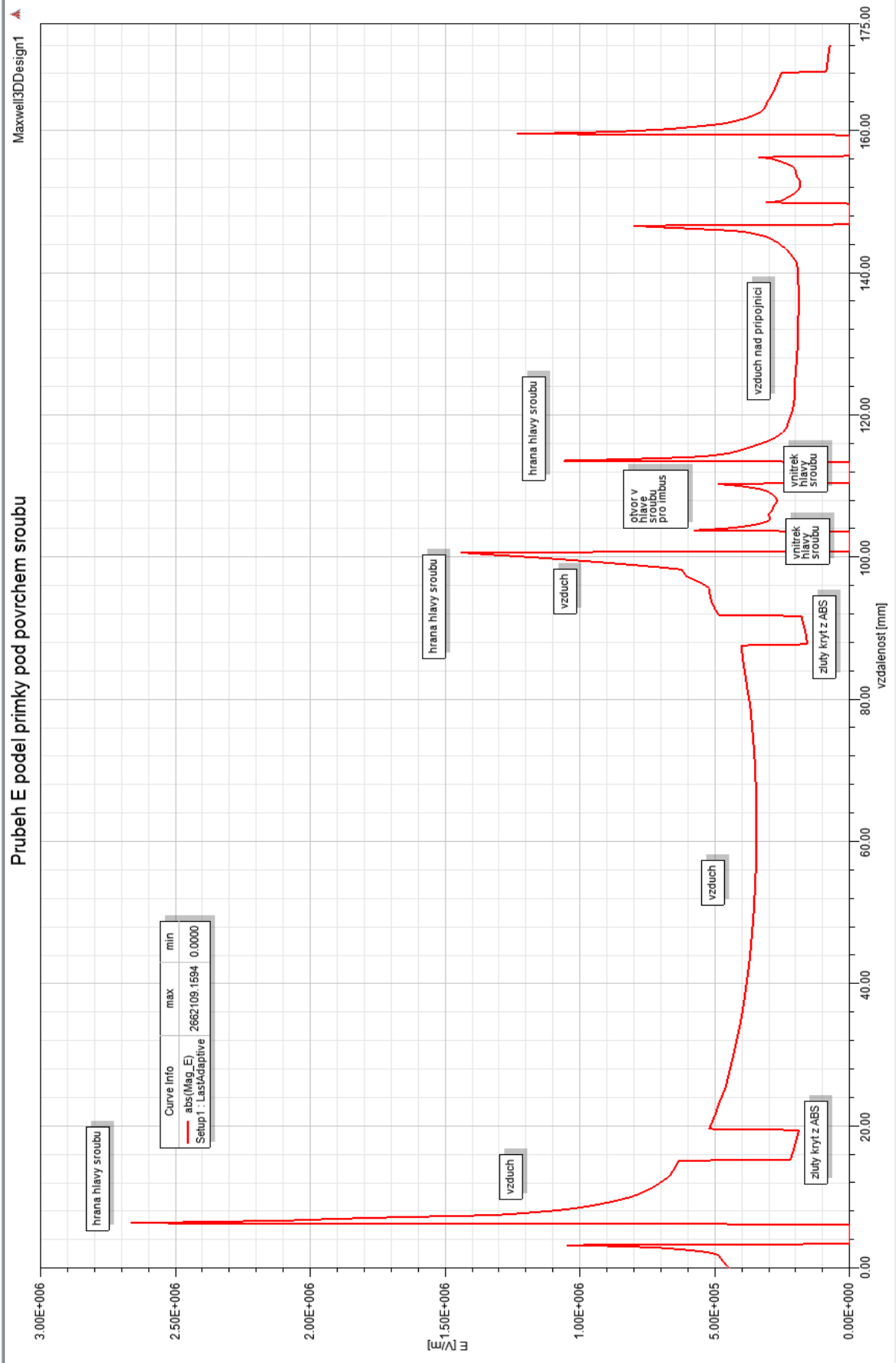


Obr. 6-15 **Přímka, na které je vynesena průběh VIEP (červená čárkovaná přímka mezi šrouby) škála viz Obr. 6-1**

Detail rozložení VIEP ukazuje **Obr. 6-14**. Na tomto obrázku lze vidět místo s největší hodnotou VIEP (červený bod u hrany šroubu). Jedná se o šroub na prostřední přípojnici. Na **Obr. 6-15** je vyznačena přímka. Tato přímka prochází po povrchu šroubu. Na této přímce je vynesena VIEP viz **Obr. 6-16**. Průběh na **Obr. 6-17** ukazuje obdobnou situaci, ale přímka je 0,25 mm pod povrchem šroubu. Průběh na **Obr. 6-16** ukazuje průběh VIEP na povrchu hlavy šroubu. Největší hodnota VIEP je na hraně hlavy šroubu a dosahuje hodnoty 2,7 MV/m. Hodnota VIEP pak ve vzduchu strmě klesá a dále skokově klesá v oblasti přechodu do krytu z ABS plastu. Poté následuje průběh VIEP ve vzduchu mezi kryty prostřední a krajní přípojnice. Opět přechod do krytu z ABS. Tenká vrstva vzduchu a opět hrana hlavy šroubu. Průběh VIEP na **Obr. 6-17** se liší především průchodem vodivým materiálem a tedy nulovou hodnotou VIEP (viz popisek „vnitrek hlavy šroubu“).

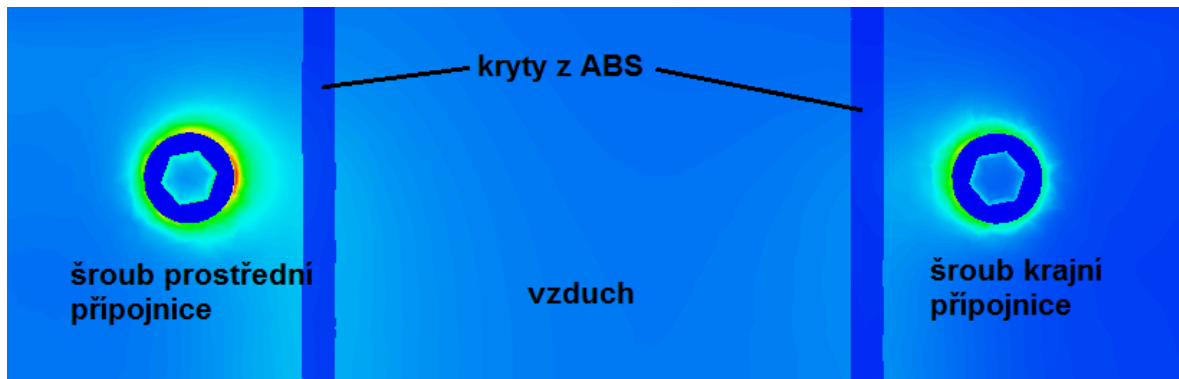


Obr. 6-16 Průběh VIEP podél přímky z Obr. 6-15 – přímka na povrchu šroubu

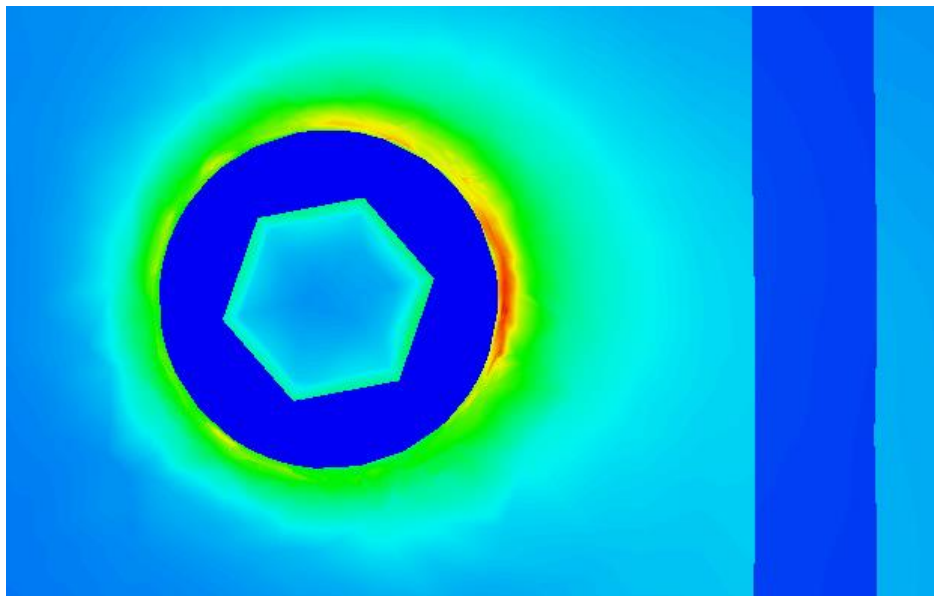


Obr. 6-17 Průběh VIEP podél přímky 0,1 mm vnořené do materiálu šroubu (jinak identické s přímkou z Obr. 6-15)

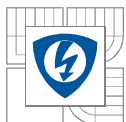
Celou situaci dokresluje pohled na vodorovnou rovinu procházející těsně pod povrchem hlavy šroubu. Rozložení VIEP v této rovině ukazuje **Obr. 6-18** a **Obr. 6-19**.



Obr. 6-18 Rozložení VIEP ve vodorovné rovině 0,1 mm pod povrchem hlavy šroubu škála viz Obr. 6-1



Obr. 6-19 Detail rozložení VIEP v rovině 0,1 mm pod povrchem hlavy šroubu škála viz Obr. 6-1

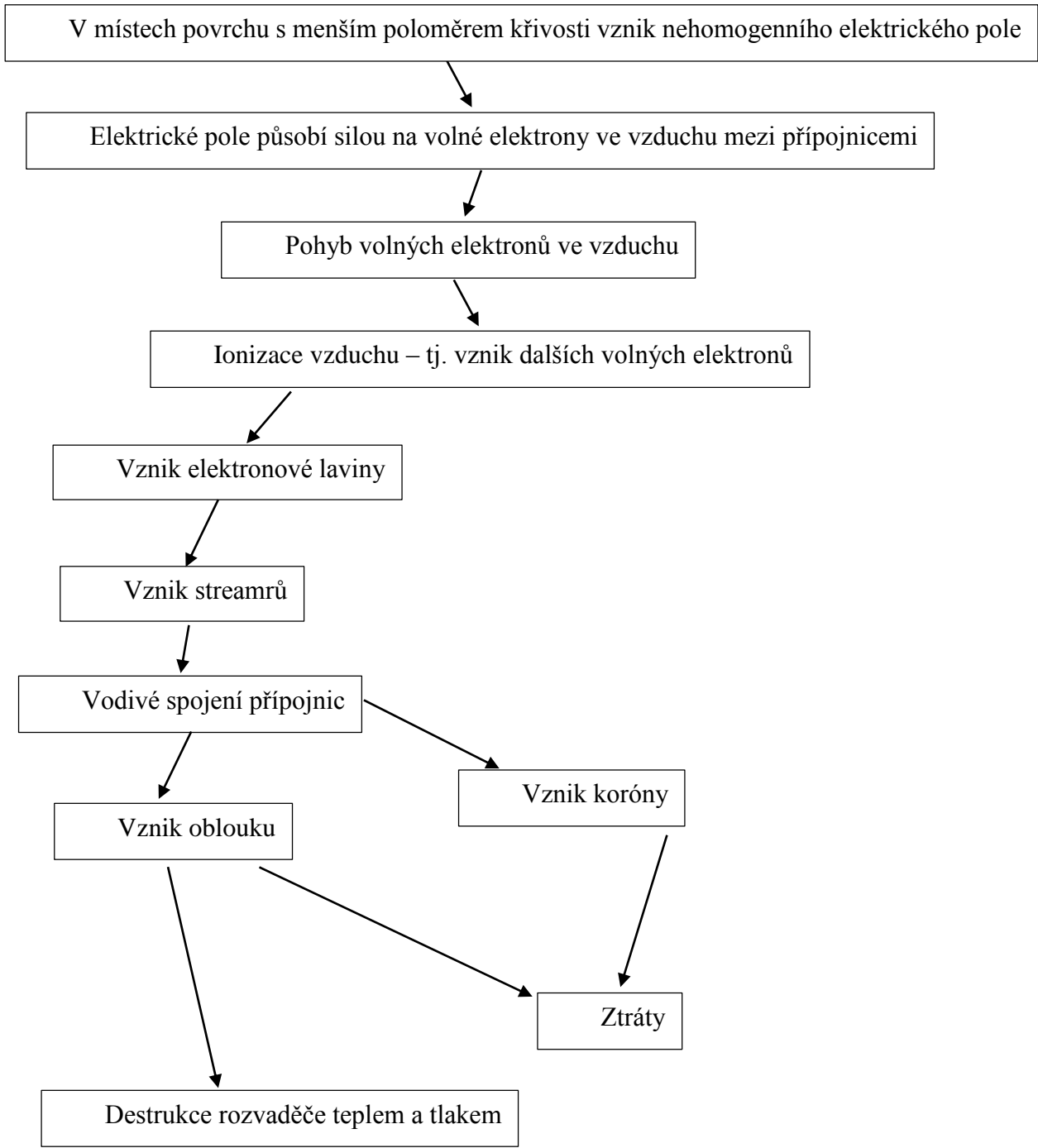


7 OPATŘENÍ SNIŽUJÍCÍ PRAVDĚPODOBNOST SELHÁNÍ

Obecně v rozvaděči může nastat celá řada selhání: porucha řídicí elektroniky vlivem rušení od silových částí, nežádoucí tepelné účinky proudu, nežádoucí silové účinky proudu, porušení izolace vlivem elektrického pole, vznik výbojů v plynném izolantu rozvaděče a celá řada dalších možných problémů a selhání. S ohledem na zaměření práce (simulace elektrického pole) se zaměříme na selhání rozvaděče, která mohou vzniknout vlivem elektrického pole. Elektrické pole v prostoru přípojnic simulujeme proto, abychom odhalili místa s největší intenzitou elektrického pole. V této části se zamyslíme nad tím, jak intenzitu elektrického pole v těchto místech snížit. Především je třeba si uvědomit, z jakého důvodu požadujeme snížení intenzity elektrického pole. Vysoká intenzita elektrického pole způsobuje velké zrychlování volných elektronů. Vysoká rychlost volných elektronů znamená jejich velkou kinetickou energii. Energetické elektrony mají velkou ionizační schopnost, to vede ke vzniku dalších volných elektronů, elektronovým lavinám, streamům, a v nejhorším případě ke vzniku elektrického oblouku. Snížení maximálních hodnot intenzity elektrického pole v kritických místech může výrazně přispět ke spolehlivosti celého rozvaděče.

7.1 Příčinně následkový řetězec

Příčinně následkový řetězec nám pomůže pochopit, co je následkem čeho. V našem případě řetězec ukazuje, jak vzniká nežádoucí efekt v podobě silného elektrického pole ve vzduchu okolo přípojnic a následný pohyb volných elektronů ve vzduchu. Pohyb elektronů ve vzduchu má za následek ionizaci vzduchu, tj. vznik dalších elektronů a vývoj elektronové laviny až vznik koróny nebo v horším případě elektrického oblouku. Svým grafickým vzhledem přispívá příčinně následkový řetězec k rychlé orientaci v problematice.



7.2 Možné přístupy řešení

Z výše uvedeného vyplývá, že pokud chceme zabránit vodivému spojení dvou přípojníc různých potenciálů (vznik oblouku), tak musíme zabránit ionizaci vzduchu. Ionizaci vzduchu zabráníme snížením intenzity elektrického pole. Intenzitu elektrického pole můžeme snížit snížením napětí nebo vhodnou úpravou tvaru všech vodivých částí pod napětím. Velikost napětí je vnější požadavek, který musí být zachován. Zbývá tedy úprava tvaru veškerých částí pod napětím (přípojnice, šrouby spojující přípojnice, kolík odpojovače, ...). Pokud již k ionizaci dojde, tak je nutné nabitým částicím ve vzduchu zabránit, aby se dostali k jiné části jiného napětí.

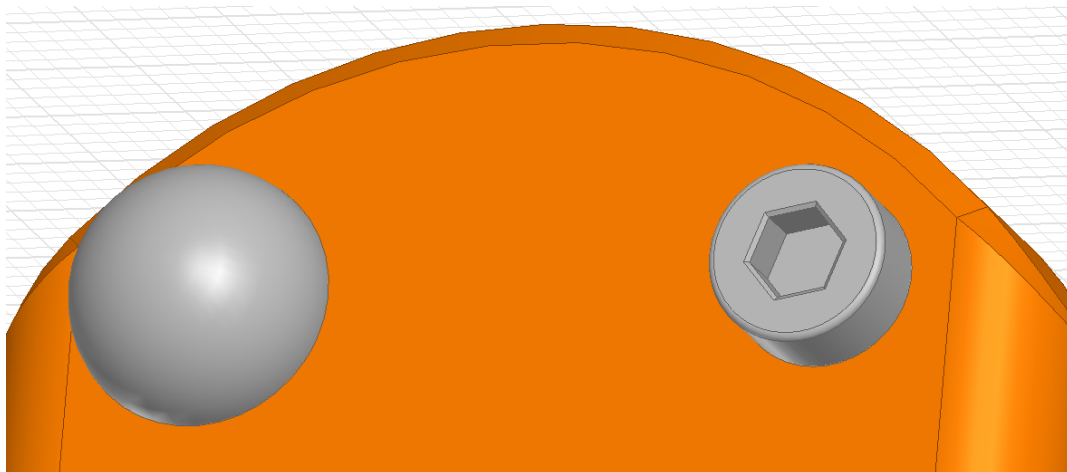
Možné přístupy řešení jsou tedy dva:

1. Zabránit ionizaci vzduchu
2. V případě, že k ionizaci dojde, tak zabránit nabitým částicím v cestě k částem jiných potenciálů (zabránit elektronům vodivé spojení dvou přípojníc různých potenciálů)

7.3 Snížení VIEP nejkritičtějšího místa

V článku 6.5 bylo ukázáno, že nejkritičtějším místem modelu z hlediska VIEP (velikost intenzity elektrického pole) je hlava šroubu. Snížení VIEP tohoto nejkritičtějšího místa je neefektivnější opatření, které za aktuálních okolností může být uděláno. Kritickým místem hlavy šroubu je obvodová hrana. Tato hrana je sice zakulacena, ale i přesto je poloměr křivosti hrany zdrojem silného nehomogenního elektrického pole.

Řešení využívá jevu uvedeného v teoretickém úvodu v článku 2.2.3 – nehomogenně rozložený náboj uvnitř vodivé dutiny neovlivňuje tvar elektrického pole vně této dutiny. Nejideálnější rozložení elektrického pole má těleso tvaru koule. Z těchto důvodů byla navržena půlkulová krytka, která se nacvakne do imbusové díry v hlavě šroubu. Krytka těsně doléhá na plochu přípojnice viz **Obr. 7-1**. Tím je vytvořena dutina uvnitř vodiče. Hrana šroubu s malým poloměrem křivosti je tak uzavřena uvnitř dutiny vodiče. Pak nepříznivý vliv malého poloměru hrany šroubu vůbec neovlivňuje velikost a tvar elektrického pole ve vzduchu okolo krytky. Tvar a velikost intenzity elektrického pole ve vzduchu okolo krytky je dána jen tvarem krytky. A tvar krytky je nejideálnější možný.

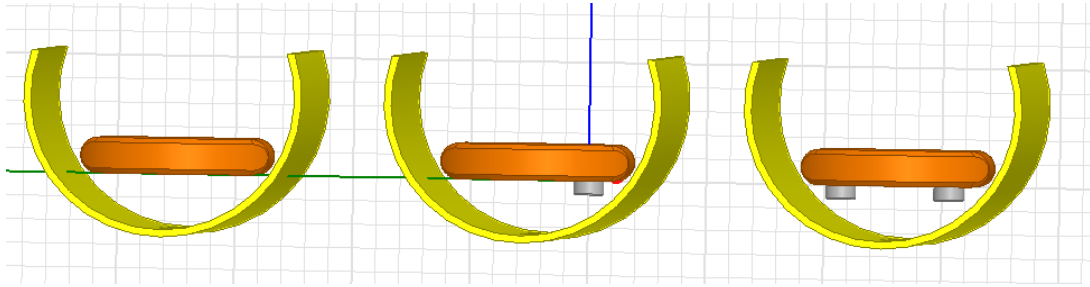


Obr. 7-1 Šroub s krytkou (vlevo) a šroub bez krytky (vpravo)

Pro další simulace byl použit zredukovaný model. Nejprve byla provedena simulace modelu s původními nezakrytými šrouby. Následně byla provedena simulace modelu s použitými krytkami.

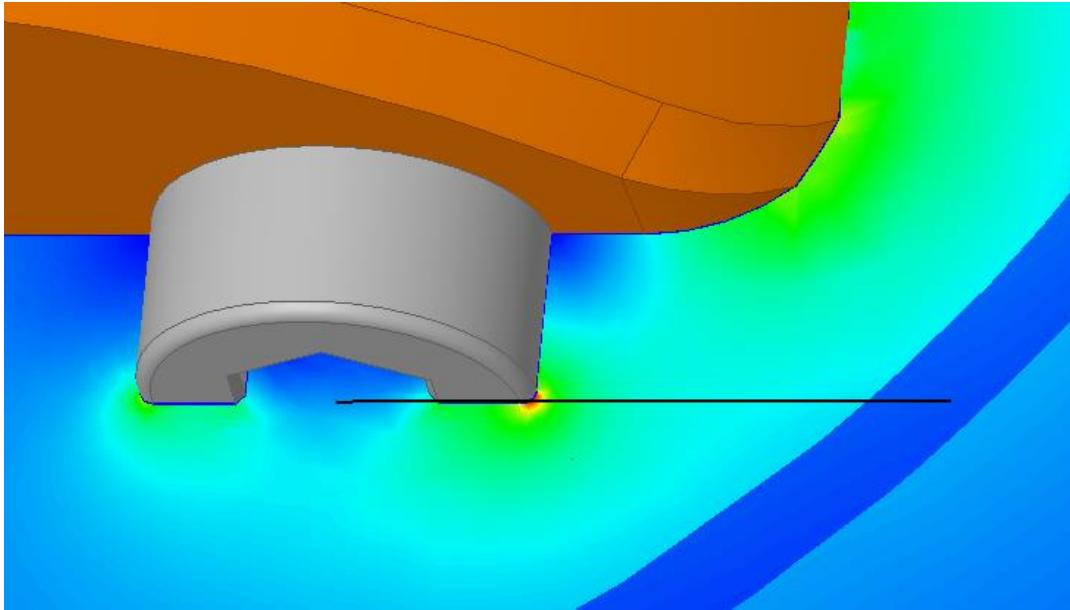
7.3.1 Simulace VIEP nekrytých šroubů

Aby byl dokázán příznivý vliv krytky šroubu na tvar a velikost IEP (intenzity elektrického pole), tak byl vytvořen zredukovaný model obsahující pouze část přípojnic, šroubů a krytů z ABS plastu. Zredukovaný model byl použit z důvodu zkrácení doby výpočtu.

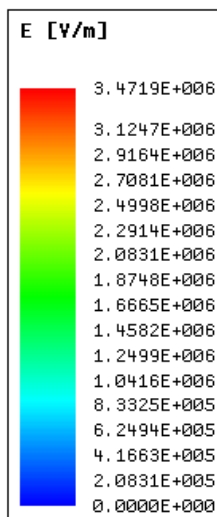


Obr. 7-2 Zredukovaný model

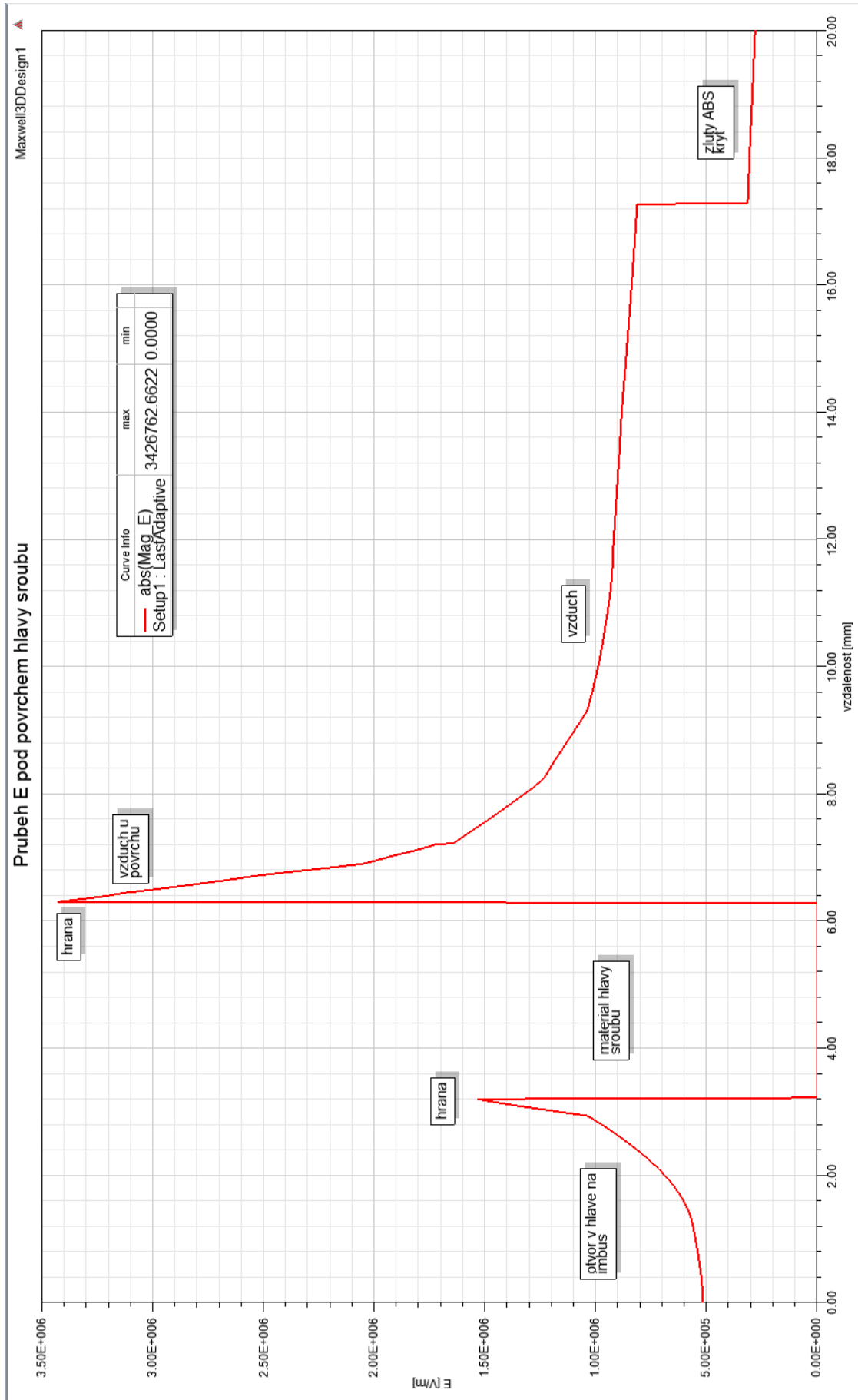
Rozložení VIEP zredukovaného modelu a přímku definovanou pro detailní průběh VIEP ukazuje **Obr. 7-3**. Barevná škála viz **Obr. 7-4**. Tato škála platí jen pro obrázky v této kapitole. Podél přímky je vynesena VIEP v grafu na **Obr. 7-5**. Tato přímka vede 0,1 mm pod povrchem hlavy šroubu. Průběh VIEP na **Obr. 7-5** má maximum, v oblasti výstupu přímky z hlavy šroubu do vzduchu. Toto maximum má hodnotu přibližně 3,4 MV/m. Při simulace celého modelu byla hodnota VIEP ve stejném místě přibližně 2,7 MV/m tj. o 0,7 MV/m nižší. Obdobný rozdíl se vyskytoval i při opakovaných simulacích. Rozdíl hodnot je patrně způsoben vlivem nepřítomnosti zbytku modelu. Vzhledem k povaze úlohy tento rozdíl výrazně nevádí, protože v úloze jde spíše o rozložení VIEP než o konkrétní hodnoty VIEP.



Obr. 7-3 Rozložení VIEP zredukovaného modelu a přímka definovaná pro detailní průběh, škála viz Obr. 7-4



Obr. 7-4 Barevná škála a příslušné hodnoty velikosti intenzity elektrického pole k obrázkům z kapitoly 7.3.1

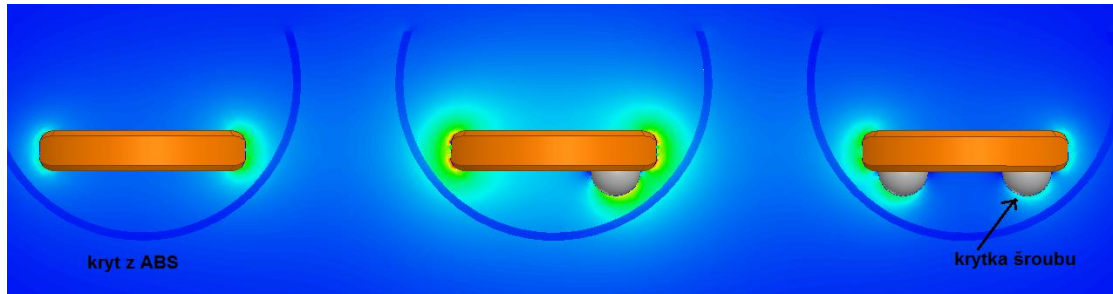


Obr. 7-5

Průběh VIEP nekrytého šroubu podél přímky z Obr. 7-3

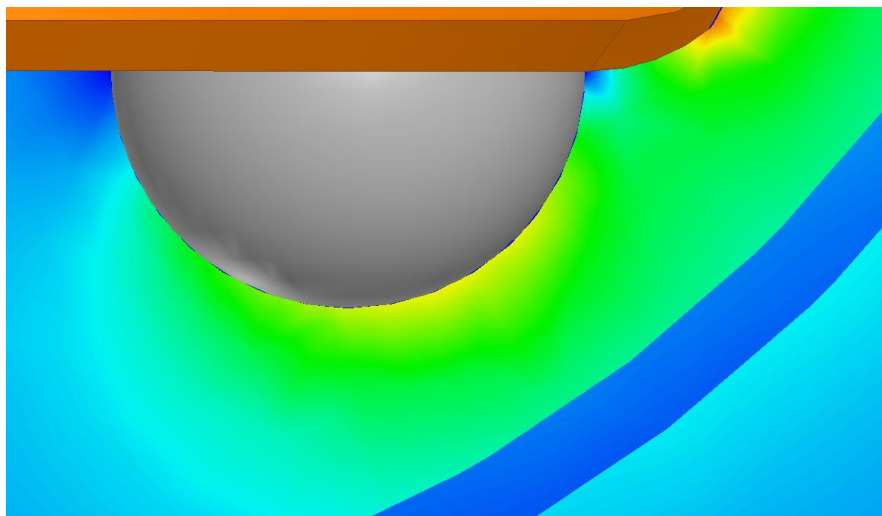
7.3.2 Simulace VIEP krytých šroubů

Simulace VIEP krytých šroubů byla provedena na stejném modelu (**Obr. 7-2**) jako simulace VIEP nekrytých šroubů. Samozřejmě s tím rozdílem, že v modelu na hlavy šroubů byly přidány krytky. Rozložení VIEP šroubů s krytkami ukazuje **Obr. 7-6**.



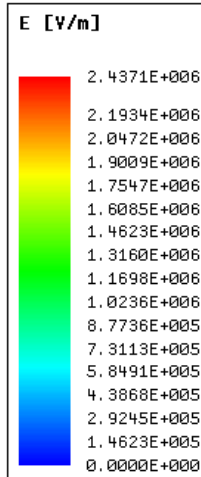
Obr. 7-6 Rozložení VIEP šroubů s krytkami, škála viz Obr. 7-8

Detail rozložení VIEP krytky šroubu ukazuje **Obr. 7-7**. Už toto přehledové rozložení VIEP napovídá, že se kritickou hodnotu VIEP okolo hlavy šroubu podařilo odstranit. Zároveň je s tímto obrázkem spojena ještě jedna zajímavost. V místě, kde krytka přiléhá k povrchu přípojnice je VIEP ve vzduchu mnohem nižší než v okolním prostoru. Jev je pravděpodobně způsoben silovým působením mezi elektrony rozmístěnými po povrchu. Prakticky se jedná o opak „hrotu“, který je naopak doprovázen silným elektrickým polem.



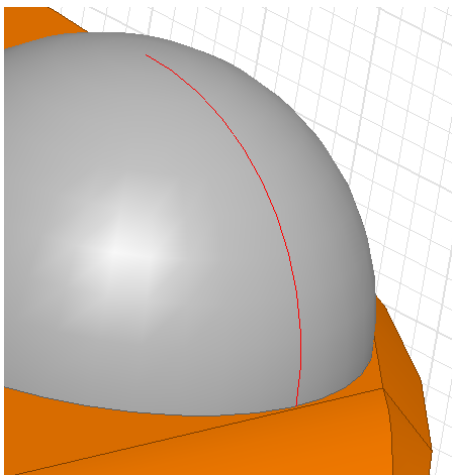
Obr. 7-7 Detail rozložení VIEP krytky šroubu, škála viz Obr. 7-8

Pro rozložení VIEP na obrázcích v této kapitole platí barevná škála z **Obr. 7-8**.

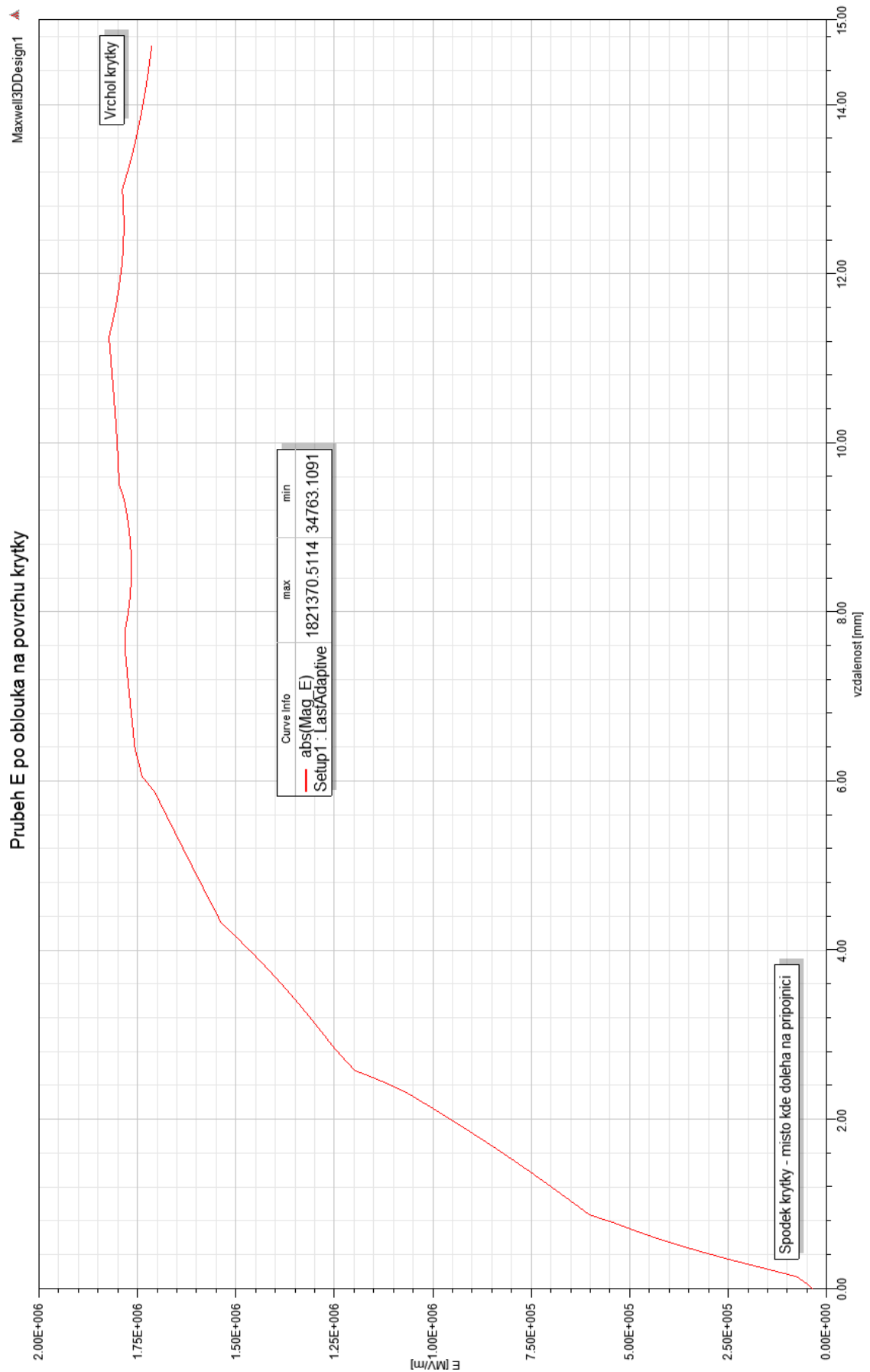


Obr. 7-8 Barevná škála a příslušné hodnoty velikosti intenzity elektrického pole k obrázkům této kapitoly

V případě krytky by průběh na přímce neměl příliš velkou vypovídací hodnotu. V tomto případě by byl spíše zajímavý průběh hodnoty VIEP na povrchu krytky. Na povrchu krytky byl proto vytvořen oblouk od místa, kde krytka přiléhá k přípojnici, k vrcholu krytky **Obr. 7-9**. Maximální hodnota průběhu VIEP po oblouku je zhruba 1,8 MV/m. Hodnota VIEP s krytkami je přibližně dvakrát nižší než hodnota VIEP šroubů bez krytek. Podařilo se tak snížit VIEP v nejkritičtějších místech celého prostoru přípojníc rozvaděče.



Obr. 7-9 Oblouk (červeně), na kterém je vynesena průběh VIEP



Obr. 7-10 Průběh VIEP na povrchu krytky po oblouku z Obr. 7-9



8 ZÁVĚR

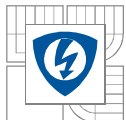
V první kapitole diplomové práce byla probrána teorie elektrického pole a teorie elektrických výbojů. Druhá kapitola představila základy metody konečných prvků, kterou používá výpočetní program. V další kapitole byla nastudována technická dokumentace k vn rozvaděči UniGear ZS1.

V rámci diplomové práce došlo k seznámení se simulačním prostředím ANSYS MAXWELL. Model prostoru přípojníc rozvaděče byl upraven pro účely tohoto simulačního prostředí. Úpravou a nastavením modelu se zabývá kapitola pět. Upravený model byl importován do simulačního programu ANSYS Maxwell a byla provedena simulace.

Po dokončení simulace bylo rozložení elektrického pole graficky znázorněno. Tato zobrazení dala přehled o rozložení VIEP (velikost intenzity elektrického pole) v celém modelu. Těchto grafických zobrazení VIEP byla udělána celá řada. Výsledky simulace jsou shrnuty v kapitole šest. Všechna zobrazení jsou v příloze. Pomocí těchto zobrazení bylo nalezeno z pohledu elektrického pole nejkritičtější místo – hlava šroubu spojující přípojnice. V oblasti kritického místa byl průběh VIEP vyneseno do grafů.

Možným opatřením snižujícím VIEP se zabývá poslední kapitola. Jako opatření pro snížení VIEP v kritickém místě byla navržena kovová krytka hlavy šroubu. Řešení využívá jevu uvedeného v teoretickém úvodu v článku 2.2.3 – nehomogenně rozložený náboj uvnitř vodivé dutiny neovlivňuje tvar elektrického pole vně této dutiny. Tato krytka zajistí, že malý poloměr hrany hlavy šroubu nemá vliv na vnější elektrické pole. Následně byl vytvořen zredukovaný model nejkritičtější oblasti (šroub spojující přípojnice a jeho okolí). Tento model obsahuje pouze šrouby, části přípojníc a kryty z ABS plastu. Zredukovaný model byl použit z důvodu zkrácení výpočetního času. Při simulaci zredukovaného modelu byla hodnota VIEP v nejkritičtějších místech přibližně 3,4 MV/m. Při simulaci zredukovaného modelu, kde byly použity krytky šroubů, byla maximální hodnota VIEP na povrchu krytky přibližně 1,8 MV/m. Jedná se o přibližně dvojnásobné snížení hodnoty VIEP nejkritičtějšího místa. Použití krytek pomůže snížit VIEP nejkritičtějšího místa a zvýší se tak spolehlivost celého rozvaděče.

V tomto tématu by se dalo pokračovat v mnoha dalších směrech. Mohlo by dojít k dalším zjednodušením nevodivých součástek, aby se urychlil výpočet a zvětšil prostor pro variace. Je tu možnost: transientní analýzy, elektrostatické simulace v jiných místech průběhu napětí, simulace při přepětí, simulace při rázové vlně a mnoho dalších možných simulací.



LITERATURA

1. **Dědková, Jarmila.** *Modelování elektromagnetických polí.* Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2012. ISBN 978-80-214-4401-0.
2. **Feynman, Richard P.** *Feynmanovy přednášky z fyziky 2/3.* Praha : Fragment, 2001.
3. **Halliday, David, Resnick, Robert a Jearl, Walker.** *FYZIKA.* Brno : VUTIUM, 2000. ISBN 80-214-1868-0.
4. **Sedlák, Bedřich a Štoll, Ivan.** *Elektrina a magnetismus.* Praha : ACADEMIA, 2002. ISBN 80-200-1004-1.
5. **Aubrecht, Vladimír.** *Fyzika a diagnostika plazmatu.* Brno : VUT.
6. **ČSN EN 62271-200 ed.2.** Vysokonapěťová spínací a řídicí zařízení - Část 200: Kovově kryté rozvaděče na střídavý proud pro jmenovitá napětí nad 1 kV do 52 kV včetně. Praha : unzm, 2012.
7. **Havelka, Oto.** *Stavba elektrických přístrojů I.* 2015.
8. **Mayer, Daniel a Polák, Josef.** *Metody řešení elektrických a magnetických polí.* Praha : SNTL, 1983.
9. **ABB.** *Technický katalog UniGear ZS1 rev. F.* Brno : autor neznámý, 2013.
10. **ABB.** *UniGear ZS1 - Double busbar system - I&O&M manual.* Brno : autor neznámý, 2014.



PŘÍLOHY

Všechna zobrazení elektrického pole a všechny průběhy velikosti intenzity elektrického pole jsou na přiloženém DVD.