

# **Ověření návrhu prostorového uspořádání prvků rozvodny vn pomocí numerických metod**

Validation of the desing of the space layout of the MV  
substation elements using FEM

**Martin Mrva**

Diplomová práce

Ing. Petr Kačor, Ph.D.

Ostrava, 2022

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra elektroenergetiky

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Martin Mrva**  
Studijní program: N0713A060003 Elektroenergetika  
Téma: **Ověření návrhu prostorového uspořádání prvků rozvodny vn pomocí numerických metod**  
**Validation of the design of the space layout of the MV substation elements using FEM**  
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod
2. Základní popis, návrh rozvodny HARD, kritéria, funkčnost, členění prvků rozvodny
3. Sestavte numerický model rozvodny vn HARD dle výkresové dokumentace
4. Ověřte prostorové uspořádání prvků rozvodny s ohledem na rozložení elektrostatického pole
5. Proveďte kontrolu návrhu odpojovače vn pomocí numerických metod
6. Analyzujte výsledky provedených simulací
7. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

- HAVELKA, Otto. Elektrické přístroje, Praha, 1985, SNTL
- CIGÁNEK, Ladislav. Elektrické přístroje, Praha, 1956, SNTL
- VEVERKA, Antonín. Technika vysokých napětí, Praha, 1966, SNTL
- Katalogy a katalogové listy výrobců EP
- Odborné a technické [www stránky](#)
- Technické normy, ČSN EN 60060-1. Technika zkoušek vysokým napětím – Část 1: Obecné definice a požadavky na zkoušky. Praha: ÚNMZ, 2011. 68 s. Třídící znak 34 5640.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Kačor, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2021

Datum odevzdání: 30.04.2022

---

prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.  
*vedoucí katedry*

---

prof. Ing. Jan Platoš, Ph.D.  
*děkan fakulty*

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce se zabývá využitím modelování fyzikálních polí pomocí numerických metod v programu Ansys Maxwell k ověření návrhu prostorového uspořádání prvků rozvodny vn a celkového návrhu odpojovače vn. Teoretická část obsahuje několik kapitol s tématy, která jsou stěžejním základem pro návrh většiny elektrotechnických zařízení. Dále pojednává o rozvodnách a využití numerických metod v modelování fyzikálních polí. V praktické části je provedena statická elektrická analýza pro určení rozložení elektrického pole rozvodny. Nakonec autor pomocí statické elektrické, statické magnetické, harmonické a statické termální analýzy ověřil celkový návrh odpojovače vn.

## **Klíčová slova**

Rozvodna; odpojovač; vysoké napětí; numerické metody; metoda konečných prvků; Ansys Maxwell; elektrické pole; elektrodynamická síla; ustálené oteplení

## **Abstract**

This thesis deals with use of modeling physical fields using FEM in Ansys Maxwell program for validation of the design of the space layout of the MV substation elements and overall design of the MV disconnector. The theoretic part contains several chapters with topics, which are basics for design of most electrotechnical devices. Further it discusses about substations and use of modeling physical fields using FEM. In practical part electrostatic analyze is performed for determination of electric field layout in the substation. In the end author verified overal design of the MV disconnector using electrostatic, magnetostatic, eddy current and static thermal analyze.

## **Keywords**

Substation; disconnector; medium voltage; numerical methods; finite element method; Ansys Maxwell; electric field; electrodynamic force; steady warming

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu své diplomové práce Ing. Petru Kačorovi, Ph.D. za poskytnutí odborných rad a připomínek a také za čas, který mi věnoval při konzultacích. V neposlední řadě mu děkuji za zprostředkování možnosti provedení hlavní analýzy v programu Ansys Maxwell na velmi výkonném počítači.

# Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk .....	7
Seznam ilustrací a tabulek.....	9
Úvod .....	11
1 Teoretická část.....	12
1.1 Rozvodná zařízení.....	12
1.1.1 Dělení rozvodných zařízení podle napětí .....	12
1.2 Silové účinky elektrického proudu .....	15
1.2.1 Síly mezi dvěma rovnoběžnými proudovodnými dráhami.....	15
1.2.2 Síly při zakřivení proudové dráhy.....	16
1.2.3 Síly mezi kontakty.....	17
1.3 Tepelné účinky elektrického proudu.....	18
1.4 Elektrické pole .....	20
1.4.1 Elektrická pevnost vzduchu .....	21
1.5 Elektrické kontakty.....	22
1.6 Numerické metody výpočtu fyzikálních polí .....	24
1.6.1 Základní postup při analýze fyzikálního pole pomocí numerických metod v programu ANSYS Maxwell .....	24
2 Ověření prostorového uspořádání prvků rozvodny s ohledem na rozložení elektrického pole.....	25
2.1 Popis rozvodny HARD.....	25
2.2 3D model rozvodny HARD .....	27
2.3 Nastavení parametrů pro analýzu elektrického pole rozvodny HARD v programu Ansys Maxwell.....	29
2.4 Výsledky statické elektrické analýzy rozvodny HARD .....	31
2.4.1 Rozložení napětí v rovině hlavních přípojnic.....	32
2.4.2 Rozložení velikosti intenzity elektrického pole v rovině hlavních přípojnic.....	33
2.4.3 Nalezení nejkritičtějšího místa modelu rozvodny .....	35
2.4.4 Rozložení velikosti intenzity elektrického pole v rovině nožů odpojovačů QZ1 a QZ3.....	37
2.4.5 Rozložení napětí v blízkém okolí rozvodny .....	39
3 Kontrola návrhu odpojovače vn pomocí numerických metod .....	41
3.1 Kontrola odpojovače analýzou elektrického pole.....	41
3.1.1 Výsledky statické elektrické analýzy pro zapnutý stav odpojovače .....	43
3.1.2 Výsledky statické elektrické analýzy pro vypnutý stav odpojovače .....	48

3.2	Kontrola odpojovače z hlediska silových účinků zkratového proudu .....	52
3.2.1	Výsledné hodnoty elektrodynamických sil na nože odpojovače .....	54
3.3	Kontrola odpojovače z hlediska tepelných účinků při průchodu ustáleného jmenovitého proudu .....	55
3.4	Kontrola odpojovače z hlediska tepelných účinků při průchodu jmenovitého krátkodobého zkratového proudu .....	58
	Závěr.....	59
	Seznam použité literatury .....	60

## Seznam použitých symbolů a zkratek

symbol/zkratka	název	jednotka
2D	dvojměrný	
3D	trojměrný	
$A$	ochlazovací povrch úseku vodiče	(m <sup>2</sup> )
$B$	indukce magnetického pole	(T)
$D, d$	průměr	(m)
$E$	intenzita elektrického pole	(V·m <sup>-1</sup> )
$E$	modul pružnosti v tahu	(Pa)
EMC	elektromagnetická kompatibilita	
$F$	síla	(N)
$F(y)$	síla ve směru osy $y$	(N)
FEM	finite element method (metoda konečných prvků)	
$F_k$	přítlačná síla	(N)
$I; i$	elektrický proud	(A)
L1, L2, L3	označení fází elektrické sítě	
MKP	metoda konečných prvků	
PTN	přístrojový transformátor napětí	
PTP	přístrojový transformátor proudu	
$R$	elektrický odpor vodiče	( $\Omega$ )
RAM	random access memory (operační paměť počítače)	
$R_p$	přechodový odpor cizích vrstev	( $\Omega$ )
$R_s$	stykový odpor	( $\Omega$ )
$R_u$	úžinový odpor	( $\Omega$ )
SF <sub>6</sub>	fluorid sírový	
$t$	čas	(s)
$U, u$	napětí	(V)
$U_0$	počáteční napětí samostatných výbojů	(V)
$U_{breakdown}$	průrazné napětí	(V)
$U_{inception}$	počáteční napětí samostatných výbojů	(V)
$U_p$	průrazné napětí	(V)
$V$	objem úseku vodiče	m <sup>3</sup>
<i>Volage</i>	napětí	(V)
$\alpha$	parametrický úhel	(°)
$a$	vzdálenost mezi vodiči	(m)
atd.	a tak dále	
$c$	objemová tepelná kapacita uvažovaného úseku vodiče	(J·m <sup>3</sup> ·K)
$h$	délka	(m)
$k_d$	činitel uspořádání vodičů konečné délky	(-)
$l$	délka	(m)
např.	například	
nn	nízké napětí	

$p$	tlak	(Pa)
$q$	elektrický náboj	(C)
$r$	poloměr vodiče	(m)
$r_k$	poloměr koule	(m)
tzv.	takzvaně	
vn	vysoké napětí	
vvn	velmi vysoké napětí	
$\alpha_0$	součinitel přestupu tepla	(W·m <sup>-2</sup> ·K)
$\Delta P$	výkonové ztráty	(W)
$\Delta\theta$	okamžité oteplení tělesa oproti okolí	(K)
$\Delta\vartheta_\infty$	maximální (ustálené) oteplení	(K)
$\rho$	rezistivita	( $\Omega$ ·m)
$\tau$	časová konstanta	(s)
$\omega$	úhlová frekvence	(s <sup>-1</sup> )



## Seznam ilustrací a tabulek

Obr. 1 (Vakuový vypínače VD4 na rozvodně HARD) .....	13
Obr. 2 (Vysokonapěťový odpojovač).....	14
Obr. 3 (Síla mezi dvěma konečnými, stejně dlouhými proudovými vlákny) [1, s. 49] .....	16
Obr. 4 (Průběh síly působící na pravoúhlý proudový záhyb) [1, s. 57] .....	17
Obr. 5 (Odpudivá síla mezi kontakty) [1, s. 62].....	18
Obr. 6 (Oteplovací a ochlazovací křivka) [1, s. 70].....	19
Obr. 7 (Průběh normalizované rázové napěťové vlny 1,2/50) [4. s. 3] .....	20
Obr. 8 (Paschenova křivka) [4, s. 8] .....	21
Obr. 9 (Proudová úžina s eliptickým polem) [1, s. 175] .....	23
Obr. 10 (Fotografie rozvodny HARD před osazením přípojnicemi a popis jednotlivých elektrických strojů a přístrojů) .....	25
Obr. 11 (Jednopolové elektrické schéma zapojení rozvodny HARD).....	26
Obr. 12 (3D model rozvodny HARD v programu Solidworks).....	28
Obr. 13 (Model rozvodny včetně vzduchového okolí upravený v programu Ansys Maxwell).....	30
Obr. 14 (Rozložení napětí v rovině hlavních přípojníc pro případ maxima napětí ve fázi L1) .....	32
Obr. 15 (Rozložení napětí v rovině hlavních přípojníc pro případ nulového napětí ve fázi L1) .....	32
Obr. 16 (Rozložení velikosti intenzity elektrického pole v rovině hlavních přípojníc pro případ maxima napětí ve fázi L1).....	33
Obr. 17 (Přiblížení Obr. XA v oblasti začátku fází L1 a L2 zadní přípojnice B3) .....	34
Obr. 18 (Rozložení velikosti intenzity elektrického pole v rovině hlavních přípojníc pro případ nulového napětí ve fázi L1).....	34
Obr. 19 (Přiblížení Obr. XC v oblasti začátku fází L2 a L3 zadní přípojnice B3) .....	35
Obr. 20 (Stanovení nejkritičtějších míst z hlediska vzniku samostatných výbojů a průrazu izolačních vzdáleností pomocí numerických metod) .....	36
Obr. 21 (Rozložení velikosti intenzity elektrického pole v oblasti vodivého přívodu k odpojovači QZ7. Odpojovač je ve vypnuté poloze.) .....	37
Obr. 22 (Rozložení velikosti intenzity elektrického pole v rovině nožů odpojovače QZ1 pro případ nulového napětí ve fázi L1).....	38
Obr. 23 (Rozložení velikosti intenzity elektrického pole v rovině nožů odpojovače QZ3 pro případ nulového napětí ve fázi L1).....	38
Obr. 24 (Rozložení velikosti napětí v rozvodně a v její blízkosti ve vertikální rovině – řez zezadu dopředu, pohled zleva).....	40
Obr. 25 (3D model odpojovače QZ1 v zapnutém stavu v prostředí Ansys Maxwell včetně vzduchového okolí).....	42
Obr. 26 (Rozložení napětí na povrchu odpojovače QZ1 v zapnutém stavu při nulovém napětí ve fázi L1).44	
Obr. 27 (Rozložení napětí na povrchu odpojovače QZ1 v zapnutém stavu při maximálním napětí ve fázi L1).....	44
Obr. 28 (Rozložení velikosti intenzity elektrického pole v rovině nožů zapnutého odpojovače pro případ nulového napětí ve fázi L1).....	45
Obr. 29 (Rozložení velikosti intenzity elektrického pole v rovině nožů zapnutého odpojovače pro případ maxima napětí ve fázi L1).....	46
Obr. 30 (Stanovení nejkritičtějších míst v modelu zapnutého odpojovače z hlediska vzniku samostatných výbojů a průrazu izolačních vzdáleností pomocí numerických metod).....	47
Obr. 31 (3D model odpojovače QZ1 ve vypnutém stavu v prostředí Ansys Maxwell včetně vzduchového okolí).....	48
Obr. 32 (Rozložení napětí na povrchu odpojovače QZ1 ve vypnutém stavu při nulovém napětí ve fázi L1) .....	48

<i>Obr. 33 (Rozložení napětí na povrchu odpojovače QZ1 ve vypnutém stavu při maximálním napětí ve fázi L1).....</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 34 (Rozložení velikosti intenzity elektrického pole v rovině nožů vypnutého odpojovače pro případ nulového napětí ve fázi L1).....</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 35 (Rozložení velikosti intenzity elektrického pole v rovině nožů vypnutého odpojovače pro případ maxima napětí ve fázi L1).....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 36 (Rozložení velikosti intenzity elektrického pole v rovině spodních a horních svorek vypnutého odpojovače pro případ maxima napětí ve fázi L1).....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 37 (Stanovení nejkritičtějších míst v modelu vypnutého odpojovače z hlediska vzniku samostatných výbojů a průrazu izolačních vzdáleností pomocí numerických metod).....</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 38 (3D model odpojovače QZ1 pro analýzu silových účinků proudu v prostředí Ansys Maxwell).....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 39 (Rozložení teploty na povrchu odpojovače QZ1 při ustáleném oteplení).....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 40 (Časový průběh zkratového proudu jedné fáze odpojovače).....</i>	<i>58</i>

<i>Tab. 1 (Vypočtené počáteční napětí samostatných výbojů a průrazného napětí pro místa zobrazená na Obr. 20 pomocí numerických metod) .....</i>	<i>36</i>
<i>Tab. 2 (Katalogové a štítkové údaje odpojovače QZ1) .....</i>	<i>41</i>
<i>Tab. 3 (Vypočtené počáteční napětí samostatných výbojů a průrazného napětí pro místa zobrazená na Obr. 30 pomocí numerických metod) .....</i>	<i>47</i>
<i>Tab. 4 (Vypočtené počáteční napětí samostatných výbojů a průrazného napětí pro místa zobrazená na Obr. 37 pomocí numerických metod) .....</i>	<i>51</i>
<i>Tab. 5 (Výsledné hodnoty elektrodynamických sil na nože odpojovače).....</i>	<i>55</i>

# Úvod

Ještě před pár desítkami let bylo možné modelovat fyzikální pole pomocí numerických metod jen prostřednictvím superpočítačů. Nároky na výkon a paměť počítače jsou totiž velmi velké. V poslední době se vlivem neustálého zvyšování výkonosti počítačů dostala tato metoda do běžné elektrotechnické praxe. Výrobci různých zařízení ji používají již od etapy návrhu, čímž lze docílit výrazného navýšení funkčních vlastností výrobku a také úspory prostoru i finančních prostředků. Toto je možné zejména díky funkci optimalizace, kterou většina programů pro modelování fyzikálních polí disponuje. Pomocí různých analýz umí program stanovit vhodný materiál nebo ideální rozměry jednotlivých komponentů a vzdálenosti mezi nimi. Tato metoda se mimo jiné používá i pro ověření návrhu v již dokončených aplikacích nebo pro zajištění a kontrolu elektromagnetické kompatibility (EMC).

V této diplomové práci se budu věnovat využití modelování fyzikálních polí pomocí numerických metod pro ověření prostorového uspořádání prvků rozvodny vn a ověření celkového návrhu jednoho z odpojovačů vn s přihlédnutím na aktuální výkon běžně užívaných počítačů.

Rozvodny vn patří mezi nejkomplexnější elektrotechnické systémy, protože sdružují mnoho různých elektrických strojů a přístrojů (vypínače, odpojovače, přípojnice, izolátory, transformátory, elektromotory atd.). Jejich rozměry bývají značné. Proto analýza takto robustního systému pomocí numerických metod požaduje výkonný počítač s velkou pamětí. Je proto vhodné použít počítač o lepších parametrech, než kterými disponuje běžný kancelářský stroj.

V poslední době se díky vývoji a v neposlední řadě i zásluhou využití numerických metod již nestaví nové rozvodny vn v otevřeném, kobkovém provedení, ale nahradily je většinou skříňové rozváděče vn. Tímto se dá uspořít obrovský prostor, zvýšit bezpečnost provozu zařízení a zajistit lepší elektromagnetickou kompatibilitu.

V této práci budu pro jednotlivé analýzy pomocí numerických metod využívat program Ansys Electronics Desktop, konkrétně jeden z jeho modulů Ansys Maxwell ve verzi 2021R1 a 2022R1. Tento program provádí analýzy a výpočty metodou konečných prvků (MKP) a umožňuje modelování elektromagnetických a elektrických polí.

Teoretická část diplomové práce obsahuje několik kapitol s tématy, která jsou stěžejním základem pro návrh většiny elektrotechnických zařízení. Pojednává také o základech principu výpočtu fyzikálních polí pomocí numerických metod. V praktické části se nejprve zabývám sestavením modelu rozvodny vn v programech Solidworks a Ansys Maxwell a následnou analýzou elektrického pole v prostoru rozvodny za jejího běžného chodu. Poté je pro odpojovač vn provedeno několik typu analýz pro ověření jeho správného návrhu z hlediska izolačních vzdáleností a silových i tepelných účinků elektrického proudu.

# 1 Teoretická část

## 1.1 Rozvodná zařízení

Elektrické přístroje se zpravidla v rámci přenosové a distribuční sítě umísťují do souborů, kterým se říká rozvodná zařízení. Ta jsou vybavena spínacími přístroji, přípojnicemi a pomocnými přístroji pro měření, ovládání a řízení. Pokud je rozvodné zařízení umístěno na samostatném stavebním prostoru nebo v samostatné budově či místnosti, označujeme jej jako rozvodnu. Naopak rozváděč je samostatná konstrukční jednotka s vestavěnými přístroji a přípojnicemi a vyrábí se jako celek. [4, s. 169]

### 1.1.1 Dělení rozvodných zařízení podle napětí

#### 1.1.1.1 Rozvodná zařízení nízkého napětí

Na této napěťové úrovni, kde se jmenovité sdružené napětí pohybuje do 1000 V, mluvíme zásadně o rozváděčích, a to většinou ve skříňovém nebo pultovém provedení. Můžeme se s nimi setkat v rámci distribučních soustav za účelem rozvodu elektrické energie ke koncovým zákazníkům (např. domům, bytům, firmám) nebo v průmyslových sítích, kde mohou sloužit pro napájení nízkonapěťových výkonových spotřebičů (elektromotorů, tepelných zařízení atd.).

Osazení rozváděčů se poté liší dle jeho funkce. Na nízkonapěťové úrovni se jako jisticí a spínací přístroje používají jističe. Na jeho umístění zase záleží jeho stupeň krytí.

#### 1.1.1.2 Rozvodná zařízení vysokého napětí

U vysokého napětí se můžeme setkat jak s rozváděči, tak s rozvodnou, přičemž většina nově projektovaných rozvodných zařízení už jsou dnes rozváděče. Ty oproti vn rozvodnám zabírají mnohem méně místa, a navíc je výrobci dodávají jako kompaktní celek. Rozváděče vn se dnes většinou provádí jako kovově kryté, nebo pro aplikace s omezeným prostorem je možnost zapouzdřeného rozváděče (přetlakovaným vzduchem nebo plynem SF<sub>6</sub>).

Nachází se také buď v distribuční síti na napěťové hladině vn (zpravidla 22 kV nebo 35 kV), nebo v rámci průmyslových sítí pro napájení vn spotřebičů (elektromotorů, elektrických pecí atd.).

Prostor vn rozváděče i vn rozvodny se dělí na jednotlivá pole vývodů, přívodů, popřípadě jiných funkcí. Dále se zde nachází přípojnice, vypínače a odpojovače a nízkonapěťové pole sloužící pro účely měření, ovládání, jistění, signalizaci a blokování.

Rozdělujeme jednosystémovou přípojnicí, případně systém s dvojitými přípojnicemi. V takovém případě mohou být jednotlivé přívody a vývody podle potřeby připojeny k oběma přípojnicím.

Dnes se do vn rozvoden a rozváděčů instalují především vakuové vypínače, které jsou vhodné pro vypínání indukčních proudů. Toho se využívá při vypínání zatížených vn linek i vn motorů. Ve starších aplikacích se stále můžeme setkat s tlakovzdušnými nebo maloolejovými vypínači. Ty se dnes často provádí i v tzv. výsuvném provedení, což nahrazuje funkci odpojovače.

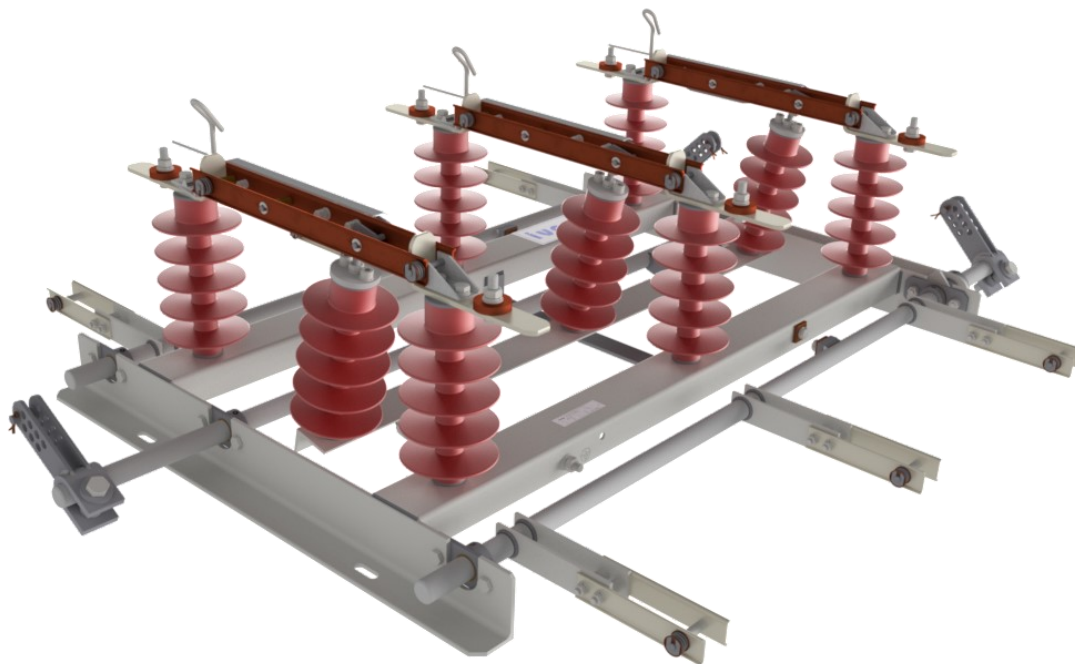


Obr. 1 (Vakuový vypínač VD4 na rozvodně HARD)

Odpojovače jsou oproti výkonovým vypínačům cenově mnohem méně nákladné, proto se jejich použitím snažíme omezit množství vypínačů v rozvodně (respektive rozváděči). Jejich počet záleží na konkrétním elektrickém zapojení, systému přípojníc a možnostech ovládání.

Odpojovače dělíme dle provedení na: [5]

- a) Trojsloupový – Má výhradně horizontální vedení nože, hodí se tedy do rozvoden a rozváděčů s omezeným místem
- b) Dvousloupový – Může mít horizontální i vertikální vedení nože
- c) Jednosloupový – Dnes nejužívanější typ (především v rozvodnách vvn a zvn). Má výhradně vertikální vedení nože.



Obr. 2 (Vysokonapěťový odpojovač)

### 1.1.1.3 Rozvodná zařízení velmi vysokého napětí a zvláště vysokého napětí

Tato rozvodná zařízení se provádí jen jako rozvodny. Můžeme je najít v přenosové soustavě na napěťové hladině 220 kV a 400 kV, nebo do nich vedou vývody velkých uhelných a jaderných elektráren. Podle funkce, velikosti (počtu vývodů a přívodů), umístění a důležitosti dané rozvodny mohou mít celou řadu různých prostorových uspořádání. Hlavními prvky vvn rozvodny jsou výkonové vypínače a odpojovače. Jejich množství závisí na velikosti rozvodny a také na schématu zapojení přípojnic. Pro tuto napěťovou hladinu jsou vhodné vypínače s fluoridem sírovým. Ve starších aplikacích, popřípadě tam, kde byla snaha ušetřit, se můžeme setkat i s tlakovzdušnými nebo olejovými vypínači.

Speciálním typem jsou zapouzdřené rozvodny plynem SF<sub>6</sub>, což díky vlastnostem tohoto plynu velmi snižuje jednotlivé izolační vzdálenosti a tím i celkové rozměry rozvodny. Avšak jedná se o velmi drahou a složitou záležitost, proto zatím nejsou zapouzdřené rozvodny moc rozšířené.

## 1.2 Silové účinky elektrického proudu

Jestliže protéká vodičem elektrický proud, vzniká v důsledku vzájemného působení magnetických polí síla. Velikost této síly závisí na velikosti protékaného proudu, délce vodiče a vlastnostech magnetického pole (respektive jeho magnetické indukci). Při ustáleném neporuchovém stavu elektrického obvodu, kdy jím protéká jmenovitý proud, vznikají pouze síly malé velikosti. Proto se silové účinky elektrického proudu zpravidla vyšetřují pouze pro případ zkratu, kdy obvodem protéká proud několikanásobně větší oproti jmenovitého proudu. [1, s. 46]

Pro sílu na proudové vlákno v magnetickém poli platí: [1, s. 46]

$$F = i \int_l d\mathbf{l} \times \mathbf{B}, \text{ kde:} \quad (1)$$

$F$ ..... síla působící na proudové vlákno (N)

$l$ ..... délka proudového vlákna (m)

$B$ ..... indukce magnetického pole (T)

V elektrických přístrojích dochází při průchodu elektrického proudu ke vzniku magnetických polí, která jsou příčinou vzniku elektrodynamických sil v těchto případech: [1, s. 46, 47]

- a) při více proudových drahách
- b) při zakřivení proudové dráhy
- c) u proudové dráhy nacházející se v blízkosti feromagnetického rozhraní
- d) při deformaci proudového pole v proudové dráze vyvolané změnou jejího průřezu
- e) při změně indukčnosti obvodu vyvolané činností elektrického přístroje
- f) při průtoku proudu proudovodnou dráhou

V následujících podkapitolách pouze uvedu výsledné vztahy pro výpočet sil pro určité případy, které budu potřebovat v praktické části práce při výpočtu sil na kontakty odpojovače. Odvození těchto vztahů není cílem této práce.

### 1.2.1 Síly mezi dvěma rovnoběžnými proudovodnými dráhami

Pro sílu mezi dvěma nekonečnými rovnoběžnými vodiči platí: [1, s. 48]

$$F = \frac{2 \cdot l}{a} \cdot i_1 \cdot i_2 \cdot 10^{-7} \quad (\text{N}) \quad (2)$$

$l$ ..... délka, na kterou síla působí (m)

$a$ ..... vzdálenost mezi vodiči (m)

$i_1, i_2$  ..... protékající proudy jednotlivými vodiči (A)

Síla mezi dvěma konečnými, stejně dlouhými proudovými vlákny: [1, s. 49]

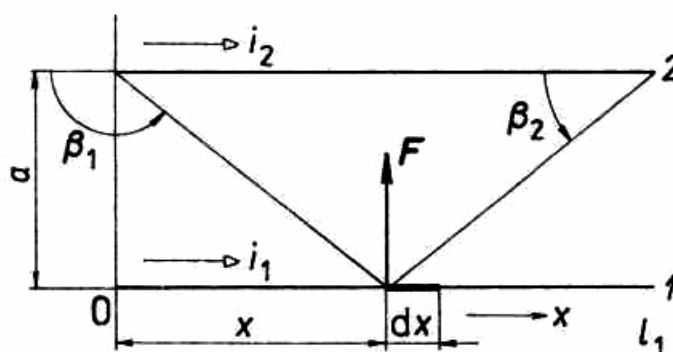
$$F = \frac{2 \cdot l_1 \cdot i_1 \cdot i_2}{a} \cdot \left[ \sqrt{\left(\frac{a}{l_1}\right)^2 + 1} - \frac{a}{l_1} \right] \cdot 10^{-7} \quad (\text{N}) \quad (3)$$

$l_1$ ..... délka vodičů (m)

$a$ ..... vzdálenost mezi vodiči (m)

$i_1, i_2$  ..... protékající proudy jednotlivými vodiči (A)

Člen v hranaté závorce se nazývá činitel uspořádání vodičů konečné délky ( $k_d$ ).



Obr. 3 (Síla mezi dvěma konečnými, stejně dlouhými proudovými vlákny) [1, s. 49]

Síla při souměrném uspořádání dvou nestejných proudových vláken: [1, s. 50]

$$F = \frac{2 \cdot l_1 \cdot i_1 \cdot i_2}{a} \cdot k_d \cdot 10^{-7} \quad (\text{N}) \quad (4)$$

$$k_d = \sqrt{1 - \frac{(l_1 + l_2)^2}{4a^2}} - \sqrt{1 + \frac{(l_1 - l_2)^2}{4a^2}} \quad (5)$$

$l_1$ ..... délka kratšího vodiče (m)

$l_2$ ..... délka delšího vodiče (m)

$a$ ..... vzdálenost mezi vodiči (m)

$i_1, i_2$  ..... protékající proudy jednotlivými vodiči (A)

### 1.2.2 Síly při zakřivení proudové dráhy

V případě jednoduchého pravouhlého záhybu bude vznikat síla ve směru takovém, že se bude snažit tento záhyb narovnat. Pro její velikost platí: [1, s. 57]

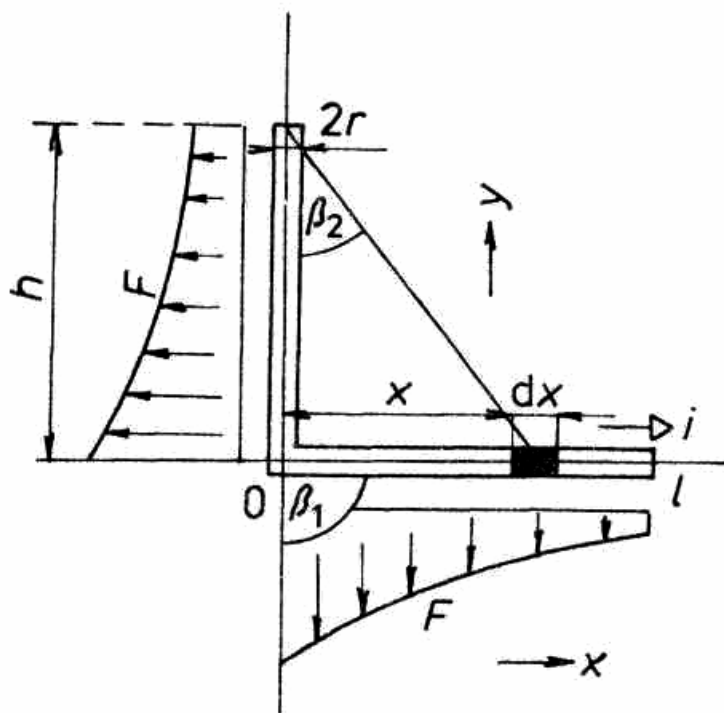


$$F = i^2 \cdot \ln \frac{l \cdot (h + \sqrt{h^2 + r^2})}{r \cdot (h + \sqrt{h^2 + l^2})} \cdot 10^{-7} \quad (\text{N}) \quad (6)$$

$l$ ..... délka vodiče před záhybem (m)

$h$ ..... délka vodiče za záhybem (m)

$r$ ..... poloměr vodiče (m)



Obr. 4 (Průběh síly působící na pravoúhlý proudový záhyb) [1, s. 57]

Maximální velikost síly na spodní úsek dvojitého pravoúhlého záhybu: [1, s. 58]

$$F_{max} = 2 \cdot I^2 \cdot \ln \frac{l \cdot (h + \sqrt{h^2 + r^2})}{r \cdot (h + \sqrt{h^2 + l^2})} \cdot 10^{-7} \quad (\text{N}) \quad (7)$$

$l$ ..... délka spodního úseku (m)

$h$ ..... délka vodiče před a za záhybem (m)

$r$ ..... poloměr vodiče (m)

### 1.2.3 Síly mezi kontakty

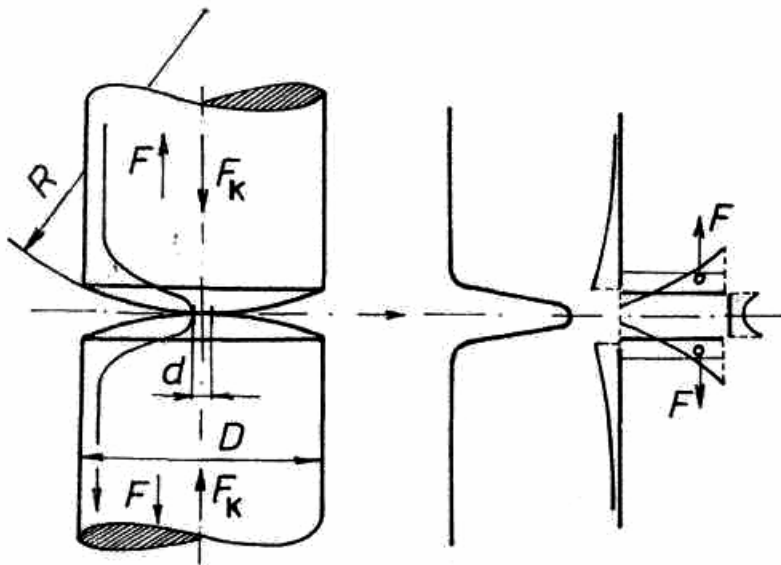
Při průchodu proudu kontaktním stykem vzniká síla, která se snaží kontakty od sebe oddálit. Působí tedy proti přitlačné síle. Výpočetní vztah vychází ze vztahu pro výpočet síly vyvolané

změnou průřezu vodiče. I vlivem vytvoření bodového kontaktního styku totiž dochází ke zúžení proudové dráhy (viz kapitola 1.5). [1, s. 62]

$$F = i^2 \cdot \ln \frac{D}{d} \cdot 10^{-7} \quad (\text{N}) \quad (8)$$

D..... průměr vodiče (m<sup>2</sup>)

d..... průměr kruhové stykové plošky (m<sup>2</sup>) – výpočet pro poloměr  $r_0$  v kapitole 1.5



Obr. 5 (Odpudivá síla mezi kontakty) [1, s. 62]

Maximální velikost odpudivé síly mezi kontakty při průchodu harmonického střídavého proudu: [1, s. 62]

$$F = 2 \cdot I^2 \cdot \ln \frac{D}{d} \cdot 10^{-7} \quad (\text{N}) \quad (9)$$

Při výpočtu elektrodynamických sil numerickými metodami výše uvedené vztahy není nutné znát, nicméně může být užitečné si s jejich pomocí výsledky porovnat a ověřit.

### 1.3 Tepelné účinky elektrického proudu

Jestliže protéká vodičem elektrický proud, vznikají v něm následkem jeho elektrického odporu v každém okamžiku tepelné ztráty. Vzniklé teplo se rozdělí na okamžité oteplení vodiče a teplo odvedené do okolí. Na rozdíl od silových účinků elektrického proudu se jeho tepelné účinky počítají jak pro ustálený stav, kdy elektrickým obvodem protéká jmenovitý proud, tak i pro případ zkratu. Zkratový proud zpravidla dosahuje několikanásobně vyšších hodnot, avšak

vodičem protéká jen velmi krátkou dobu (pouze, než dojde k vypnutí obvodu příslušným jisticím prvkem). Proto při tomto případě můžeme zanedbat odvod tepla do okolí a uvažovat, že veškeré vzniklé teplo se akumuluje ve vodiči, čímž dochází k nárustu jeho teploty. [1, s. 69–72]

Tepelná rovnice má tvar: [1, s. 69]

$$R \cdot I^2 \cdot dt = \alpha_0 \cdot A \cdot \Delta\vartheta \cdot dt + c \cdot V \cdot d\vartheta \quad (10)$$

$R$ ..... elektrický odpor vodiče ( $\Omega$ )

$I$ ..... elektrický proud protékající vodičem (A)

$\alpha_0$ ..... součinitel přestupu tepla ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}$ )

$A$ ..... ochlazovací povrch úseku vodiče ( $\text{m}^2$ )

$\Delta\vartheta$ ..... okamžité oteplení tělesa oproti okolí (K)

$c$ ..... objemová tepelná kapacita uvažovaného úseku vodiče ( $\text{J}\cdot\text{m}^3\cdot\text{K}$ )

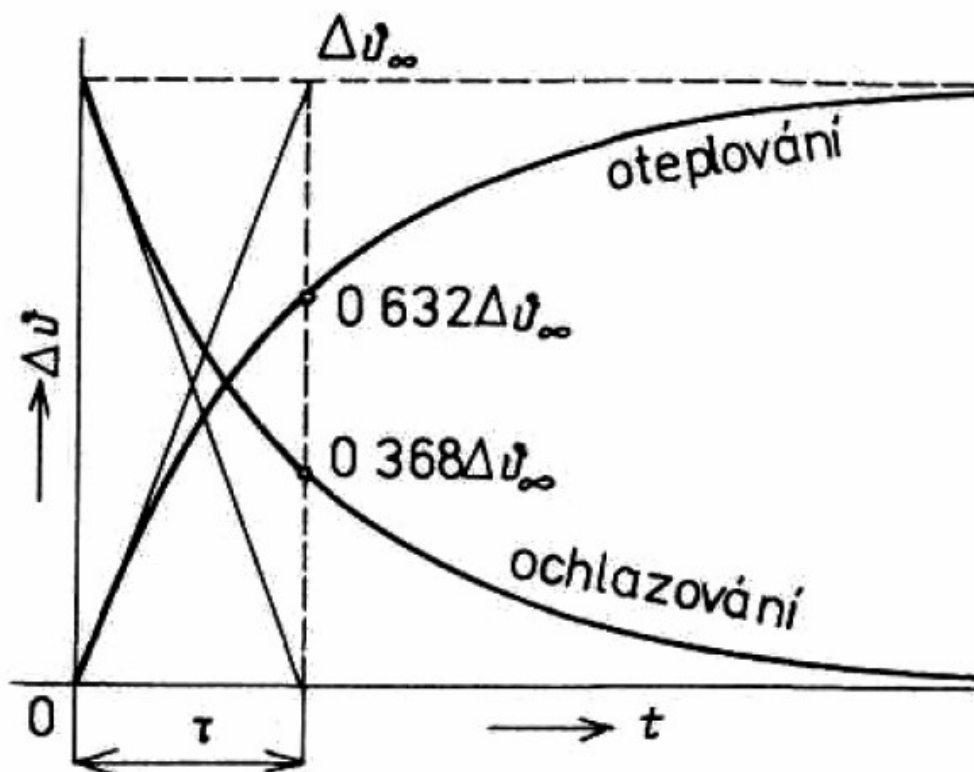
$V$ ..... objem úseku vodiče ( $\text{m}^3$ )

Po vyřešení této rovnice dostaneme vztah: [1, s. 69, 70]

$$\Delta\vartheta = \frac{R \cdot I^2}{\alpha_0 \cdot A} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\alpha_0 \cdot A \cdot t}{c \cdot V}}\right) = \Delta\vartheta_\infty \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (11)$$

$\Delta\vartheta_\infty$ ..... maximální (ustálené) oteplení (K)

$\tau$ ..... časová konstanta (s)



Obr. 6 (Oteplovací a ochlazovací křivka) [1, s. 70]

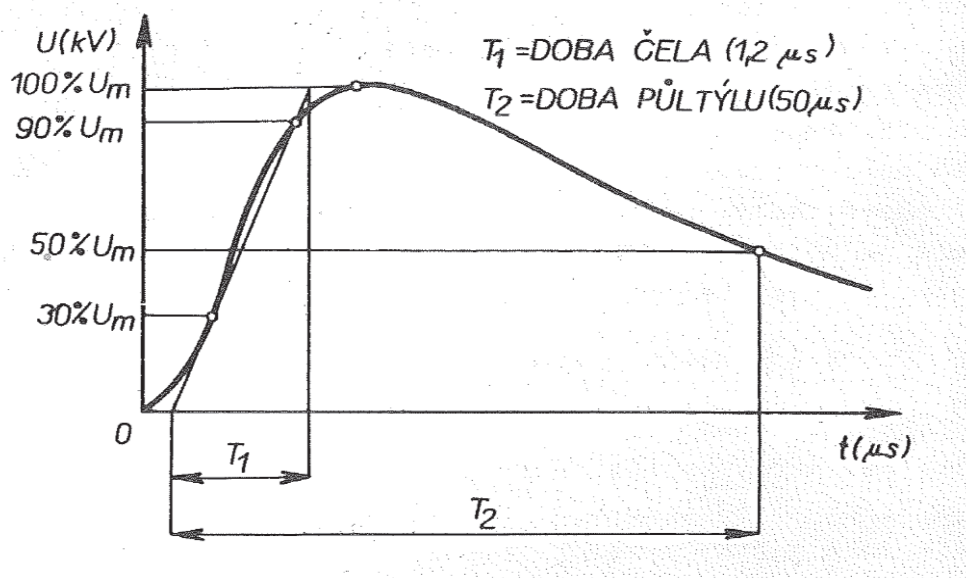
Ustálené teploty vodič dosáhne, až nastane situace, ve které se veškeré vzniklé teplo ve vodiči odvede ochlazením do okolí. Při tomto stavu je za daných podmínek teplota vodiče maximální a zůstává konstantní (až do změny některé z veličin ve výše uvedených vztazích).

## 1.4 Elektrické pole

Při návrhu elektrických strojů a přístrojů, stejně jako dalších zařízení s proudovou dráhou, používáme výpočet rozložení elektrického pole k určení izolačních vzdáleností.

Elektrická zařízení se navrhují tak, aby výsledný produkt prošel dvěma typy elektrických zkoušek: [4, s. 3]

- Střídavou zkouškou – jednominutová zkouška střídavým napětím o frekvenci 50 Hz; efektivní hodnota napětí je dána normou
- Rázovou zkouškou – zkouška normalizovanou rázovou napěťovou vlnou 1,2/50; velikost vrcholu napěťové vlny je dána normou



Obr. 7 (Průběh normalizované rázové napěťové vlny 1,2/50) [4. s. 3]

Druhy elektrických polí: [7]

- nestacionární – časově proměnné elektrické pole
- stacionární – časově neproměnné elektrické pole

Elektrostatické pole představuje speciální případ stacionárního elektrického pole, v němž netečou žádné proudy. I tak se jeho zákony částečně řídí pomalu proměnné elektrické pole při síťové frekvenci 50 Hz.

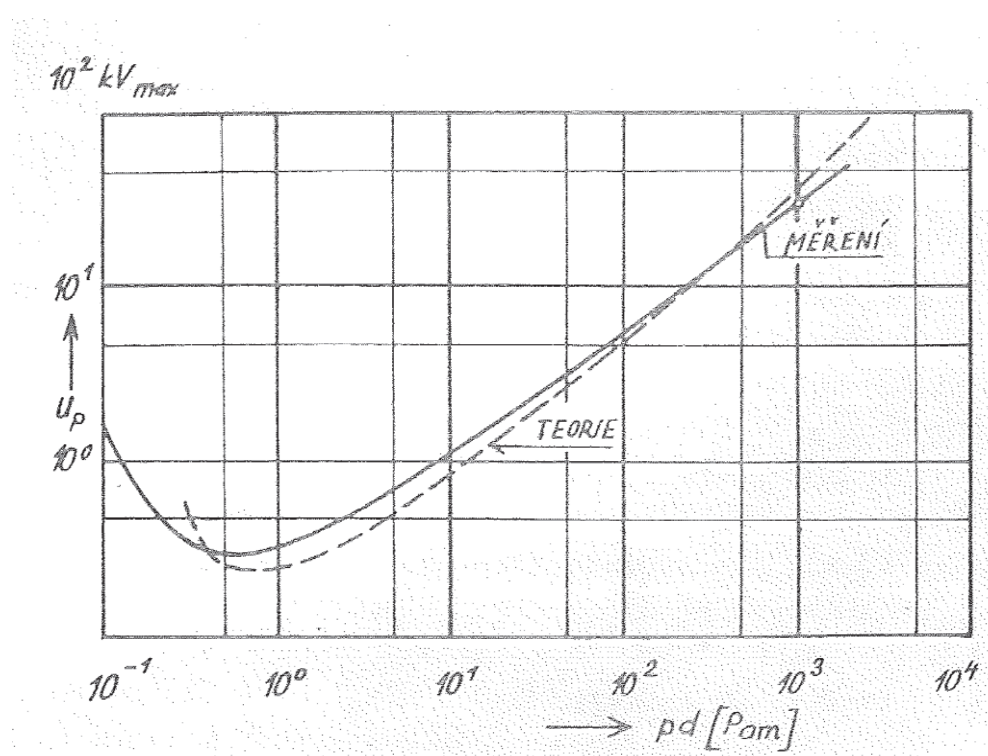
Elektrické pole popisuje vektorová fyzikální veličina intenzita elektrického pole  $E$  (V/m). [7]

$$E = \frac{F}{q} \quad (12)$$

$F$ ..... elektrická síla (N) – výpočet podle Coulombova zákona

$q$ ..... elektrický náboj (C)

### 1.4.1 Elektrická pevnost vzduchu



Obr. 8 (Paschenova křivka) [4, s. 8]

Podle Paschenovy křivky se pro normální tlak stanovila průrazná pevnost vzduchu na 3 kV/mm. Toto platí jen v homogenním prostředí. Naopak pro silně nehomogenní prostředí existují k určení průrazné pevnosti vzduchu pouze empirické vzorce pro pár základních uspořádání a tvarů elektrod (například pro dva hroty nebo hrot proti rovině atd.). Pro výpočet numerickými metodami není nutné tyto vztahy znát, protože elektrická pevnost vyjde z kompletního řešení rozložení elektrického pole. Uvádí se, že pro nehomogenní prostředí se hodnota elektrické pevnosti vzduchu pohybuje okolo 1 kV/mm (záleží na stupni nehomogenity prostředí). [4]

*„Výskyt silně nehomogenního pole b přístrojích je nežádoucí, neboť při překročení určité hodnoty intenzity elektrického pole vzniká korónový výboj, který izolační prostředí degraduje a vytváří podmínky pro vznik průrazu.“* [6, s. 11]

Po dosažení mezní hodnoty intenzity elektrického pole vzniknou samostatné výboje. Jejich typ závisí na okolnostech (např. tvaru a uspořádání elektrod, velikosti napětí): [7]

- a) Koróna – Jedná se o neúplný samostatný výboj, který vzniká u značně zakřivených elektrod (hlavně ostré hrany, hroty atd.). Způsobuje přídavné ztráty, protože elektrody se obalí svítící vrstvou a jev je doprovázen charakteristickým šuměním.
- b) Trsový výboj – Má tvar krátkých svítících větévek.
- c) Jiskra – Jedná se o krátkodobý výboj.
- d) Obloukový výboj – Jasně svítící dráha mezi elektrodami.

V homogenním elektrickém poli mají počáteční napětí samostatných výbojů ( $U_0$ ) a průrazné napětí ( $U_p$ ) stejnou hodnotu, zatímco v nehomogenním poli platí:  $U_0 < U_p$ . Čím větší bude nehomogenita prostředí, tím více rozdílné budou tyto dvě hodnoty. [7]

## 1.5 Elektrické kontakty

Elektrické kontakty se nachází ve spínacích přístrojích a slouží k vodivému spojení, respektive rozpojení dvou oddělovaných částí proudovodné dráhy. Když na sebe určitou silou přitlačíme dva kovové materiály, vznikne tzv. kontaktní styk. Podle velikosti přitlačné síly a tvaru kontaktů rozeznáváme tyto druhy kontaktního styku: [1, s. 173–176]

- a) Bodový styk

Jedná se o jediný typ styku, který lze alespoň částečně vypočítat analyticky. U rovinných kontaktů nedochází ke styku na celé jejich vzájemné ploše, ale jen v určitém počtu mikroskopických ploch, jejichž počet je náhodný. Průměr vytvořeného styku závisí na přitlačné síle, tvaru a materiálu kontaktů.

- b) Přímkový styk
- c) Plošný styk

Dále budu uvažovat pouze bodový kontaktní styk. U něj vlivem zúžení proudovodné dráhy dochází k navýšení elektrického odporu v místě styku. Tento tzv. úžinový odpor může být navíc navýšen o odpor cizích vrstev, které se často tvoří na kontaktech. Po sečtení těchto dvou odporů dostaneme tzv. stykový odpor, který mimo jiné způsobuje nadměrný vznik tepla při průchodu proudu kontaktním stykem. [1, s. 173–176]

Při uvažování vzniku pouze jednoho bodového kontaktního styku na celé ploše kontaktů v kruhové plošce o poloměru  $r_0$  platí: [1, s. 176]

- Pro uspořádání kontaktů koule proti rovině ze stejného materiálu:

$$r_0 = 1,11 \cdot \sqrt[3]{\frac{F_K \cdot r_K}{E}} \quad (13)$$

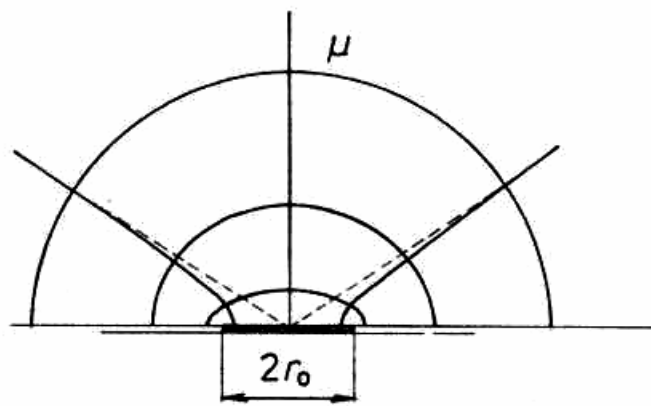
$F_K$ ..... přítláčná síla (N)

$r_K$ ..... poloměr koule (m)

$E$ ..... modul pružnosti v tahu (Pa)

- Pro uspořádání kontaktů koule proti kouli ze stejného materiálu:

$$r_0 = 0,9 \cdot \sqrt[3]{\frac{F_K \cdot r_K}{E}} \quad (14)$$



Obr. 9 (Proudová úžina s eliptickým polem) [1, s. 175]

Pro celkový úžinový odpor kontaktního styku s eliptickým polem, které se více přibližuje skutečnému poli,  $R_u$  poté platí: [1, s. 175]

$$R_u = \frac{\rho}{2 \cdot r_0} \quad (15)$$

$\rho$ ..... rezistivita materiálu kontaktů ( $\Omega \cdot m$ )

Skutečný odpor bude větší než vypočítaný těmito vztahy z důvodu různých zjednodušení pro snadnější výpočet. Dále je třeba ještě přičíst přechodový odpor cizích vrstev  $R_p$ .

## 1.6 Numerické metody výpočtu fyzikálních polí

V dnešní době je nejen v oblasti elektrotechniky hojně využíváný výpočet numerickými metodami pomocí metody konečných prvků. Princip této metody spočívá v diskretizaci spojité úlohy do konečného počtu prvků. Díky tomu lze touto metodou řešit i nestacionární nebo nelineární fyzikální jevy, pro které většinou neexistují jednoduché analytické vztahy. Uplatnění našla v mnoha oborech, v rámci řešení elektrických přístrojů a rozveden ji můžeme využít k výpočtům elektrického a elektromagnetického pole, ze kterého vychází i výpočty elektrodynamických sil, dále i k tepelným výpočtům. [2, s. 177]

Numerické výpočty jsou prováděny pomocí počítače. Výsledky jsou tedy při rychlosti dnešních počítačů a velikosti jejich pamětí rychlejší a komplexnější než u analytických výpočtů. To záleží zejména na diskretizaci prvků a vhodnému rozložení výpočetní sítě. K dalším výhodám této metody patří zobrazení výsledků graficky a možnost tvarové a materiálové optimalizace řešené úlohy. [3]

Existuje celá řada softwarových programů, které umožňují výpočty numerickými metodami. V této práci budu používat program ANSYS Maxwell. Jedná se o komerční software přizpůsobený k numerickému řešení fyzikálních polí (zejména elektromagnetických a elektrických) v oblasti elektrotechniky.

### 1.6.1 Základní postup při analýze fyzikálního pole pomocí numerických metod v programu ANSYS Maxwell

Tento postup můžeme rozdělit do tří fází: [3]

- Tvorba modelu

Vytvoření základní geometrie modelu, přiřazení materiálových vlastností a zatížení (proud, napětí, síla atd.). Důležité je okolo modelu vytvořit (vzduchové) okolí a jeho hranicím přiřadit okrajové podmínky.

- Výpočet

Volba typu analýzy (statická, transientní, harmonická), nastavení přesnosti, frekvence, způsobu ukládání dat a samotný výpočet analýzy.

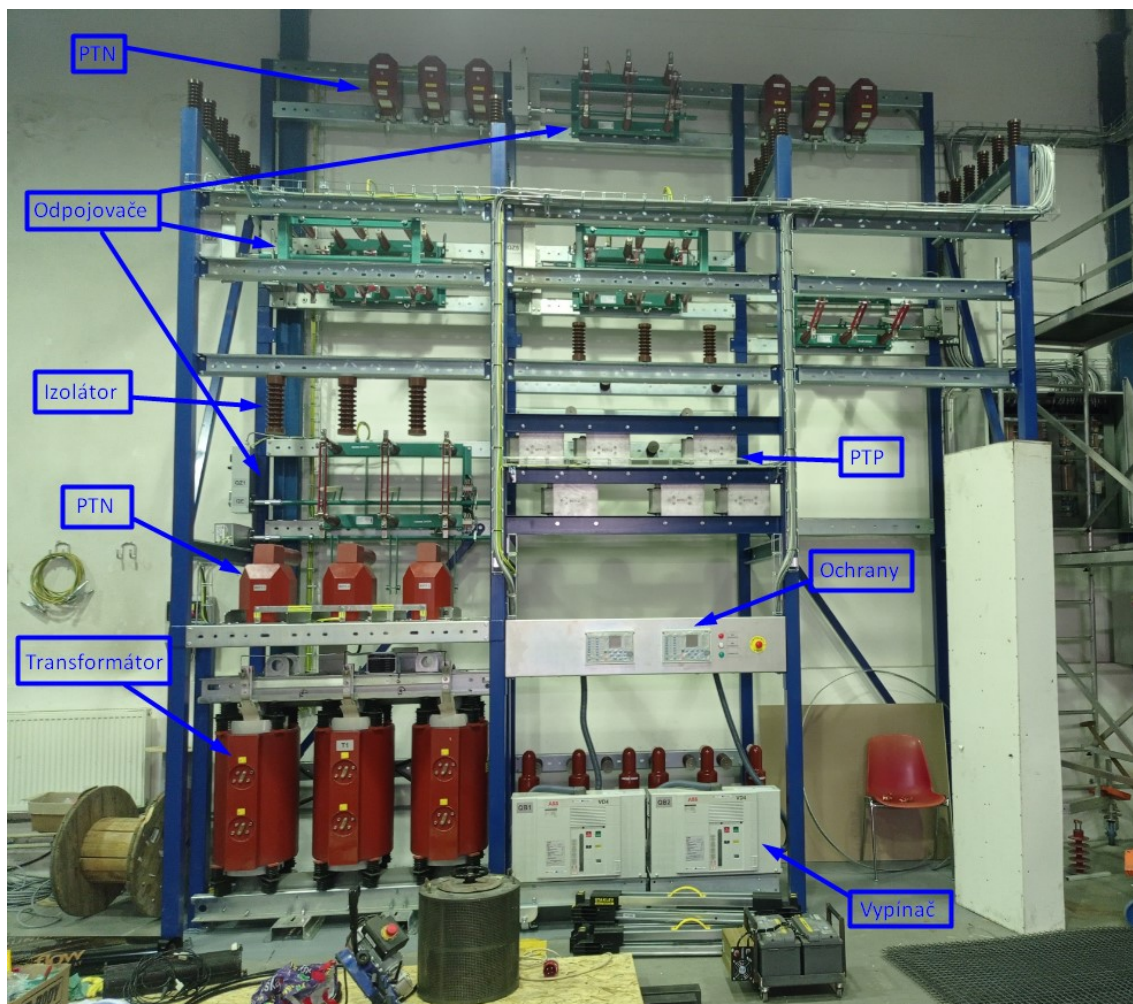
- Zhodnocení výsledků

Výsledky je možno zobrazit v grafické podobě, u elektromagnetických výpočtů například jako rozložení magnetické indukce v celém modelu.



## 2 Ověření prostorového uspořádání prvků rozvodny s ohledem na rozložení elektrického pole

### 2.1 Popis rozvodny HARD



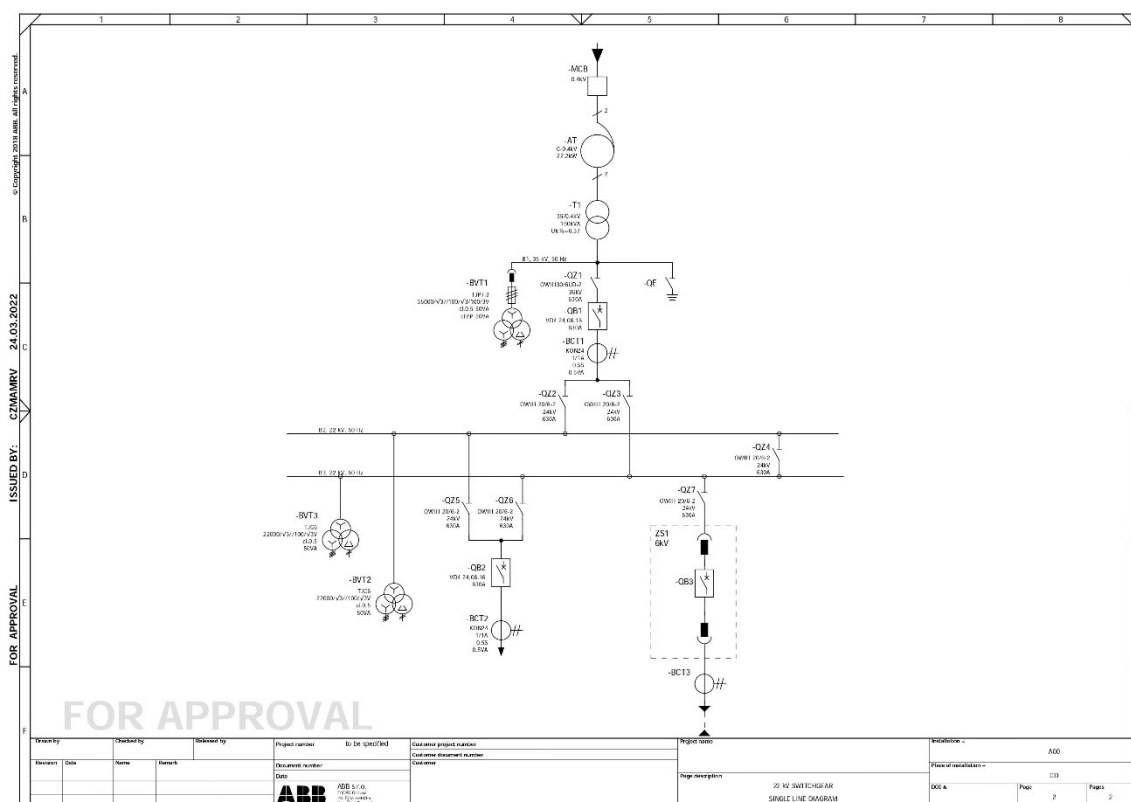
Obr. 10 (Fotografie rozvodny HARD před osazením přípojnici a popis jednotlivých elektrických strojů a přístrojů)

Vysokonapěťová rozvodna nacházející se v areálu VŠB–TUO, konkrétně v laboratoři L01 v budově HARD, je napájena jediným přívodem přes výkonový transformátor 35/0,4 kV o výkonu 160 kVA ze sítě nn. Z nízkonapěťové strany je připojen přes nn jistič a autotransformátor 0–0,4 kV o výkonu 22,2 kW. Tím může být regulováno výstupní napětí i na straně vysokonapěťové rozvodny. V rozvodně je použit dvojitý systém hlavních přípojnici. Ty leží na napěťové hladině 22 kV. Třetí přípojnice je pomocná a slouží jen pro účely připojení přístrojového transformátoru napětí a uzemnění. Ta má jmenovité napětí 35 kV. Všechny přípojnice jsou měděné s obdélníkovým průřezem 250 mm<sup>2</sup>.

Rozvodna je naprojektována na dva výkonové vývody. První z nich může být připojen k oběma přípojnicím. Druhý vývod představuje vn skříňový rozváděč ZS1 od firmy ABB, který je možno připojit pouze k přípojnici B3. Ten zatím není k rozvodně připojen.

Tato rozvodna dále disponuje dvěma výkonovými vakuovými vypínači typu VD4 od firmy ABB (a další výkonový vypínač je součástí rozváděče ZS1), sedmi odpojovači a jedním uzemňovačem. Odpojovače mají různé funkce. QZ2, QZ3, QZ5, QZ6 a QZ7 slouží k připojení vývodů, respektive přívodu, k příslušné přípojnici. QZ4 je příčný spínač přípojnic. Tyto odpojovače a vypínače pracují s jmenovitým napětím 24 kV. Jediný odpojovač QZ1 je dimenzovaný na napětí 36 kV a nachází se u přívodu elektrické energie z výkonového transformátoru do rozvodny. Nicméně ikdyž je výstupní napětí transformátoru nastaveno na 35 kV, nemůžeme toto napětí přivést na hlavní přípojnice, protože ty jsou dimenzované pouze na napětí 22 kV. To platí i o vypínači QB1, který se nachází v přívodu k hlavním přípojnicím.

Měření je zajištěno třemi přístrojovými transformátory proudu a stejným počtem přístrojových transformátorů napětí. Ty jsou vhodně zapojeny tak, aby měřily proud a napětí v potřebných místech.



Obr. 11 (Jednopolové elektrické schéma zapojení rozvodny HARD)

Z výkonu napájecího autotransformátoru na straně nn (22,2 kW) je patrné, že tato rozvodna neslouží k účelu přenosu elektrické energie na delší vzdálenost nebo k napájení vn spotřebičů.

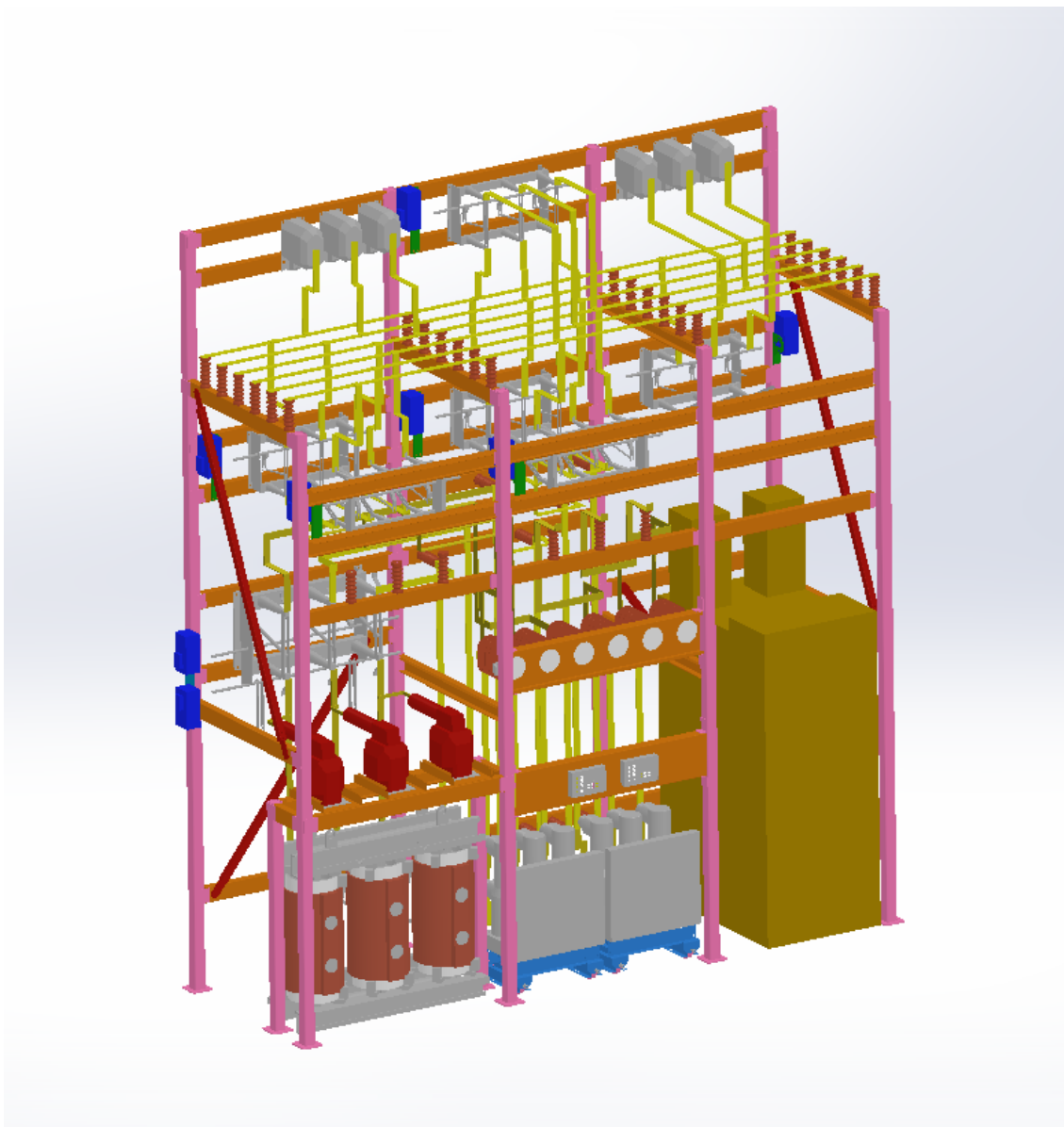
Takto malý výkon můžeme přenášet i vedením na hladině nízkého napětí, aniž by docházelo k neúměrným ztrátám. A například vysokonapěťové elektromotory, které patří mezi hlavní spotřebiče na úrovni vn, se vyrábějí až od výkonů mnohem vyšších než zmíněných 22,2 kW. Takto výkonný elektromotor by byl zcela jistě vyroben pro připojení na síť nízkého napětí. Rozvodna HARD tedy byla postavena především pro studijní a vědecké účely. Rozvodna může být provozována s plným napětím 22 kV, ale přípojnicemi poteče pouze velmi malý proud. Proudová hustota přípojnice s průřezem 250 mm<sup>2</sup> bude taktéž velice malá. Při tomto stavu lze vyhodnocovat elektrostatické pole v různých místech rozvodny a izolační vzdálenosti. Nebo můžeme k přípojnicím připojit externí proudový zdroj a poté lze měřit například jejich oteplení nebo silové účinky proudu. Studenti si například mohou vyzkoušet základní manipulace s přístroji a ovládání rozvodny, do kterého jsou pomocí digitálních ochranných zakomponovány i blokovací podmínky, kterými se zajišťuje bezpečný provoz rozvodny.

## 2.2 3D model rozvodny HARD

Dokumentace k rozvodně obsahuje i její 3D model vytvořený v programu Solidworks, který mám k dispozici. Pro analýzu elektrostatického pole rozvodny jako celku jsem si vybral jedno z možných zapojení, které odpovídá blokovacím podmínkám. Výstupní napětí napájecího transformátoru je 22 kV. Přes zapnutý vypínač QB1 a zapnuté odpojovače QZ1 a QZ3 je napájena hlavní přípojnice B3. Odpojovač QZ4 pro příčné spínání přípojnic se nachází v zapnutém stavu, napětí se tedy dostane i na hlavní přípojnici B2. Přípojnice B3 napájí přes zapnutý odpojovač QZ6 a vypínač QB2 výkonový vývod. Protože rozváděč ZS1 ještě není v rozvodně umístěn, druhý výkonový vývod zůstává neaktivní. Odpojovač QZ7 se tedy nachází ve vypnutém stavu.

Existuje celá řada dalších možností zapojení rozvodny. Tuto jsem vybral, protože představuje reálný funkční stav zapojení rozvodny s jedním aktivním přívodem a jedním zapojeným vývodem. Navíc jsou napájeny obě hlavní přípojnice, což zajišťuje horší podmínky pro elektrické namáhání, na které chci rozvodnu zkontrolovat.

Další možnosti zapojení nemusí vyhovovat blokovacím podmínkám. Základní podmínka spočívá v tom, že s odpojovačem nesmí být manipulováno, pokud je na jeho kontaktech při vypnutém stavu rozdílný potenciál, nebo při zapnutém stavu odpojovač přenáší proud. Konkrétně pro rozvodnu HARD jsou doplněny další blokovací podmínky, které vycházejí z rozložení jednotlivých prvků a z jmenovitých hodnot jednotlivých přístrojů. Výstupní napětí napájecího transformátoru může dosahovat hodnoty větší než 22 kV pouze v případě, že se odpojovač QZ1 nachází ve vypnutém stavu. Všechny přístroje a přípojnice za ním už jsou dimenzovány na napětí 22 kV, respektive 24 kV. Dále z důvodu jejich blízkosti nesmí být odpojovače QZ2 a QZ3, nebo odpojovače QZ5 a QZ6 zároveň ve vypnutém stavu, pokud je k nim zároveň alespoň z jedné strany přivedeno napětí. Nože těchto odpojovačů ve vypnutém stavu by se nacházely příliš blízko sebe a při napětí 22 kV by téměř jistě došlo k překročení elektrické pevnosti vzduchu a následnému průrazu, což by byl poruchový stav.



*Obr. 12 (3D model rozvodny HARD v programu Solidworks)*

V 3D modelu jsem musel provést potřebné úpravy, aby model odpovídal tomuto zapojení. Jednalo se především o natočení nožů vypnutých odpojovačů do vypnuté polohy. Dále bylo třeba vodičů propojit vstup a výstup dvou zapnutých vypínačů a všech přístrojových transformátorů proudu (PTP). Tyto přístroje byly vymodelovány pouze jako černé skříňky bez vnitřního zapojení elektrického obvodu. Kostry těchto přístrojů bylo možné smazat. V neposlední řadě jsem zkontroloval správnost rozložení jednotlivých přípojníc a vodičů a také všech vodičových spojů. Při nalezení nepřesností jsem model upravil tak, aby co nejméně kopíroval skutečnou rozvodnu. Vzhledem k velikosti rozvodny a množství částí jejího modelu byla tato činnost velmi časově náročná.

## 2.3 Nastavení parametrů pro analýzu elektrického pole rozvodny HARD v programu Ansys Maxwell

Podle výsledného rozložení napětí a intenzity elektrického pole lze určit, zda jsou dodrženy izolační vzdálenosti mezi fázemi a mezi fází a nulovým potenciálem, a také místa, která by mohla být náchylná na vznik samostatných výbojů.

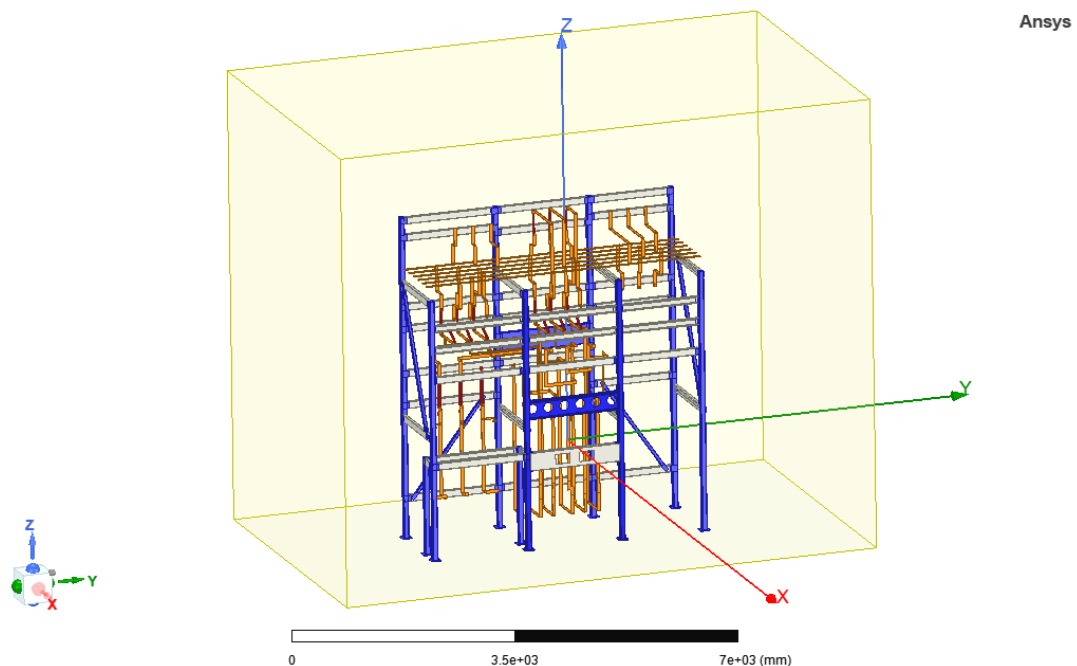
Proto jsem v této elektrostatické analýze vyšetřoval hlavně tyto dva stavy:

- Napětí v jedné fázi je nulové a rozdíl potenciálů druhé a třetí fáze je roven maximální hodnotě sdruženého napětí.
- V jedné fázi se nachází maximum napětí, zatímco ve zbývajících dvou fázích má napětí hodnotu poloviny maxima a opačné znaménko oproti první fázi.

Upravený 3D model rozvodny jsem z programu Solidworks importoval do programu Ansys Maxwell. Zvolil jsem elektrostatický typ analýzy (*Electrostatic*). Spojitý sinusový průběh napětí jsem zdiskretizoval do několika bodů, ve kterých již použiji statickou analýzu. V tomto prostředí jsem model dále upravoval. Vzhledem k velikosti rozvodny a množství jejích částí bylo třeba model co nejvíce zjednodušit. Nakonec jsem v modelu zanechal pouze proudovodnou dráhu a uzemněnou ocelovou konstrukci. Ostatní části, jako například rámy a izolátory odpojovačů, vnější obaly vypínačů, PTP, PTN a jednotlivé izolátory pro uchopení přípojníc, jsem z modelu odebral. Z výkonového transformátoru, který napájí celou rozvodnu, jsem zanechal pouze jeho výstupní svorky, na které jsem zadal vstupní napětí. Tato zjednodušení jsem si mohl dovolit, protože vyšetřuji návrh rozložení elektrického obvodu rozvodny, a tedy na výsledky to bude mít pouze malý vliv. Zároveň uvažuji s tím, že jednotlivé přístroje, kterými je rozvodna osazena (výkonové vypínače VD4, PTN, PTP) jsou navrženy správně a již se nezabývám kontrolou jejich vnitřního uspořádání a zapojení. Navíc tato zjednodušení vedou k alespoň částečnému zjednodušení extrémně složitěho modelu rozvodny.

Další rozdíl mezi počítačovým modelem a realitou spočívá v zaoblení hran. Ve skutečnosti hrany nelze vyrobit dokonale ostré a vždy mají určité zaoblení, zatímco v modelu používám ve většině případů hrany naprosto ostré (například u přípojníc, vodičů a nožů odpojovačů). Hrany lze samozřejmě zaoblit i v 3D modelu, znamenalo by to však obrovský nárůst elementů výpočetní sítě už tak složitěho modelu. Na druhou stranu se může stát, že se ve výsledcích bude právě na těchto ostrých hranách vyskytovat větší intenzita elektrického pole, než jaká tam je ve skutečnosti. S tímto je třeba v interpretaci výsledků počítat.

Dále jsem jednotlivým částem modelu rozvodny přiřadil materiály. Celá proudovodná dráha je z mědi a pro ocelovou konstrukci rozvodny jsem vybral materiál *steel\_1008* ze systémové knihovny. Poté jsem kolem modelu vytvořil vzduchové okolí, které je pro tento případ vzhledem ke složitosti a rozměrům modelu poněkud menší. Ale podle níže vyobrazených výsledků analýzy můžeme říct, že bylo zvoleno dostatečně velké, aby výsledky nebyly výrazně ovlivněny.



Obr. 13 (Model rozvodny včetně vzduchového okolí upravený v programu Ansys Maxwell)

V tomto modelu uvažuji napájení rozvodny souměrným trojfázovým střídavým napětím ze sítě 22 kV. V této síti je dovolená odchylka napětí +10 %. Pro kontrolu návrhu zařízení je třeba uvažovat s maximální možnou hodnotou, která se v dané síti může vyskytnout. Jednotlivá fázová napětí, která představují napěťový vstup do rozvodny, jsem zadal přes sekci *Excitations* takto:

$$u_{L1} = \sqrt{2} \cdot \frac{1,1 \cdot 22000}{\sqrt{3}} \cdot \sin(\alpha)$$

$$u_{L2} = \sqrt{2} \cdot \frac{1,1 \cdot 22000}{\sqrt{3}} \cdot \sin\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$u_{L3} = \sqrt{2} \cdot \frac{1,1 \cdot 22000}{\sqrt{3}} \cdot \sin\left(\alpha - \frac{4\pi}{3}\right)$$

Jedná se o statický typ analýzy, parametrem  $\alpha$  tedy můžeme nastavit, v jaké části sinusového průběhu napětí se budou jednotlivé fáze nacházet. Systém jsem zastavil v čase  $t = 0$  s. Aby byly hodnoty napětí jednotlivých fází postupně maximální, nastavil jsem pomocí funkce *Optimetrics – Parametric* pro parametr  $\alpha$  hodnoty  $90^\circ$ ,  $210^\circ$  a  $330^\circ$ . Pro nulové hodnoty napětí v jednotlivých fázích jsem ještě přidal hodnoty  $0^\circ$ ,  $120^\circ$  a  $240^\circ$ . Proběhne tedy 6 samostatných výpočtů.

Ocelová konstrukce je uzemněná, proto jsem na ní zesponu modelu zadal napětí 0 V. To modeluje uzemněnou podlahu místnosti, na které celá rozvodna stojí.

Nakonec je nutno nastavit *Analysis Setup*, kde se nechají všechny původní hodnoty.

Poté už je možno spustit analýzu. Program si automaticky vytvoří výpočetní síť, která pro model rozvodny obsahuje přes 15 miliónů elementů, a provede elektrostatický výpočet. Provedení výpočtu takto robustního modelu je velmi náročné na výkon a paměť počítače. Na mém běžném osobním počítači s pamětí RAM 8 GB nebylo možné analýzu provést. Proto jsem přes svého vedoucího diplomové práce a univerzitu získal přístup k provedení této analýzy na velmi výkonném počítači se dvěma procesory Intel® Xeon® E5-2640 v3 (8C/16T) a pamětí RAM 256 GB, který je k tomuto účelu určený. I přesto výpočet trval v řádech několika dní. Výsledky zabírají pro jeden parametrický výpočet přibližně 10 GB. Toto dokazuje extrémní náročnost pro provedení této analýzy.

## 2.4 Výsledky statické elektrické analýzy rozvodny HARD

Výsledky (grafy rozložení napětí a intenzity elektrického pole, určení průrazného napětí atd.) jsem již prováděl na běžném osobním počítači. Vzhledem k množství dat bylo i zobrazování již vypočtených výsledků náročné na výkon a paměť počítače, a tím i časově zdlouhavé.

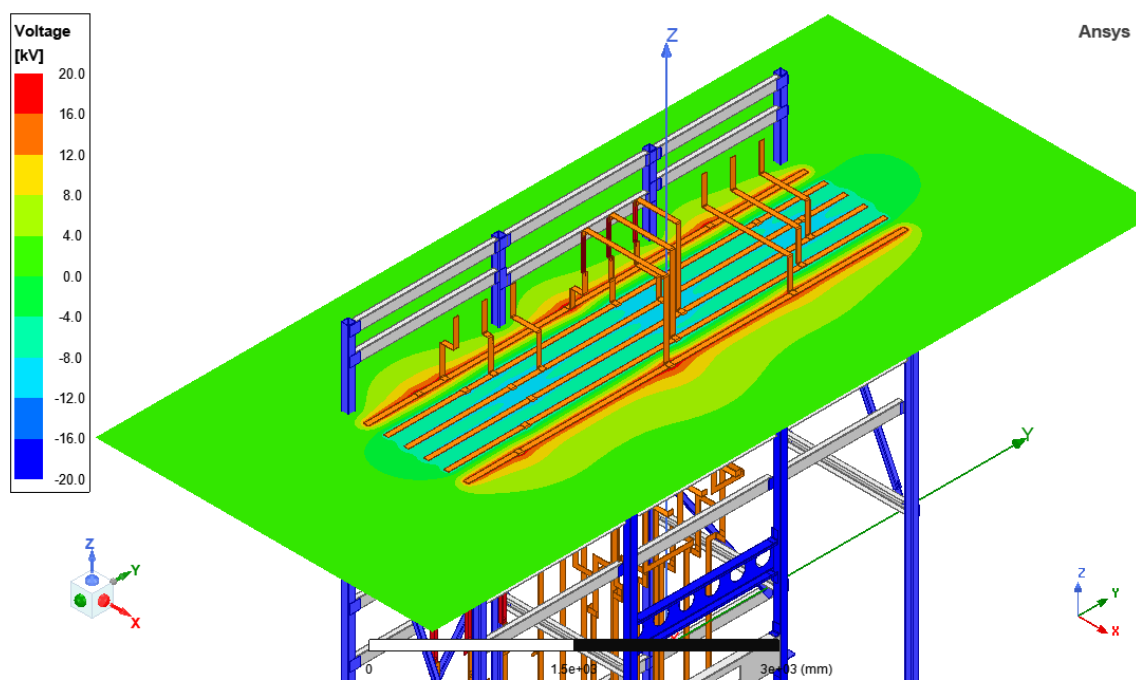
Pro popis výsledných jevů jsem se rozhodl vybrat především prostor hlavních přípojníc, které jsou vedeny rovnoběžně a nachází se v horní části rozvodny. Izolační vzdálenosti mezi jednotlivými fázemi jsou zde 16 cm, takže jde o místo s nejbližší umístěnými fázemi vůči sobě. Ve zbytku rozvodny jsou tyto vzdálenosti buď stejné nebo větší. To však neznamená, že v místě hlavních přípojníc se nachází nejkritičtější místo s ohledem na případný průraz nebo vznik samostatných výbojů. Je třeba zkontrolovat všechny části vodivých drah a všechny izolační vzdálenosti, protože systém vedení přípojníc je značně nerovnoměrný. Navíc dochází k ovlivňování jednotlivých vodivých cest mezi sebou.

Rozvodna disponuje dvojitým systémem přípojníc, to při třech fázích znamená, že na Obr. 14 a dalších vidíme šest rovnoběžných hlavních přípojníc. V přední části se nachází přípojnice B2 (zepředu postupně fáze L1, L2, L3), na kterou navazují postupně (zepředu) fáze L3, L2 a L1 přípojnice B3. V tomto stavu jsou obě přípojnice vodivě spojeny přes příčný spínač přípojníc (odpojovač QZ4).

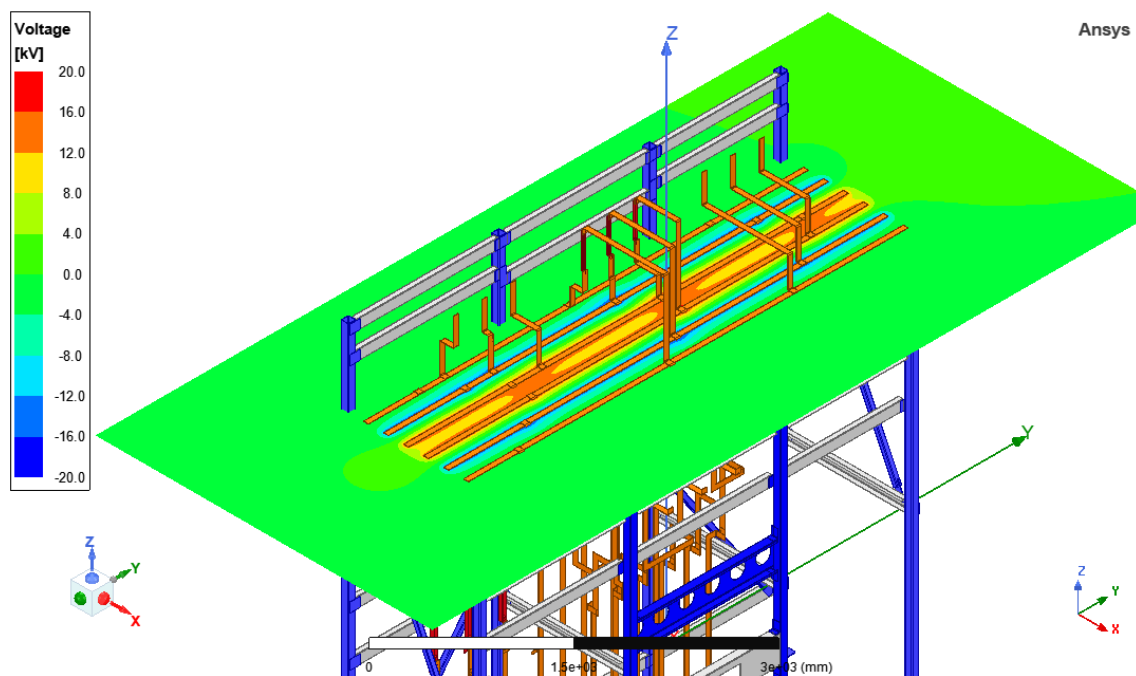
Pro zobrazení výsledků jsem nakonec vybral dva diskrétní stavy, a to s nulovým (Obr. 15) a maximálním (Obr. 14) napětím ve fázi L1. Maximální fázové napětí má hodnotu 19760 V. Protože jsem k analýze vybral zapojení rozvodny s vodivým spojením vstupu a hlavních přípojníc, objeví se toto napětí i zde. Kdybychom na výkonový vývod zapojili zátěž, vodivou cestou by začal protékat i elektrický proud.



## 2.4.1 Rozložení napětí v rovině hlavních přípojníc



Obr. 14 (Rozložení napětí v rovině hlavních přípojníc pro případ maxima napětí ve fázi L1)

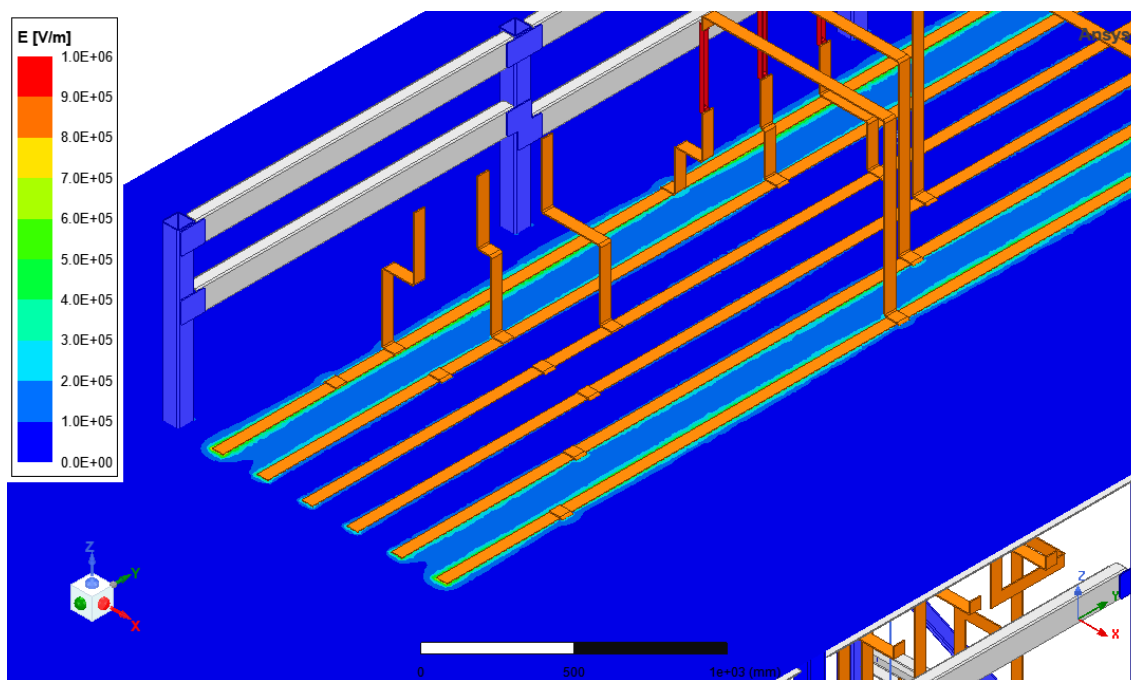


Obr. 15 (Rozložení napětí v rovině hlavních přípojníc pro případ nulového napětí ve fázi L1)

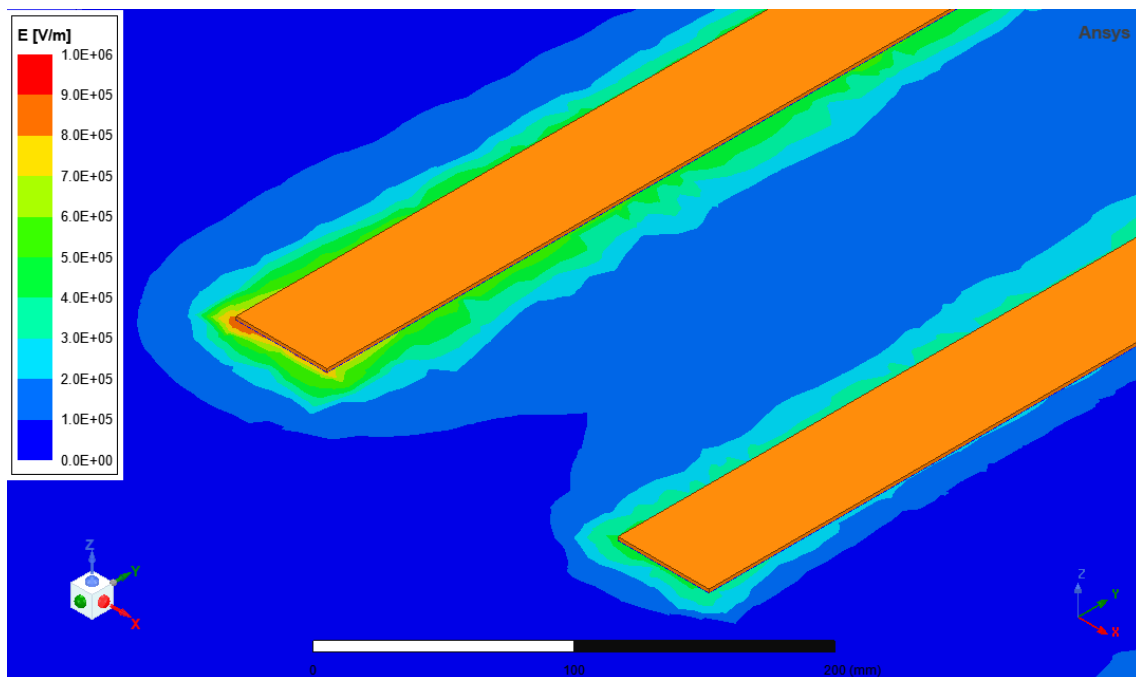


## 2.4.2 Rozložení velikosti intenzity elektrického pole v rovině hlavních přípojníc

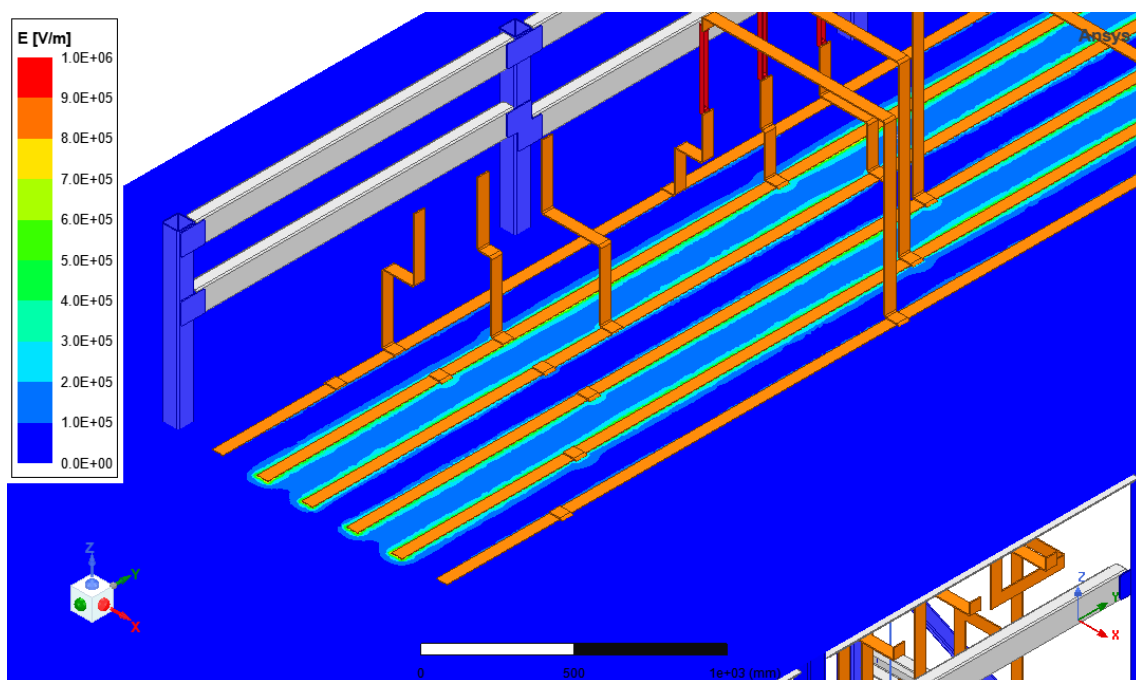
Dále jsem si pomocí funkce *Field Overlays* zobrazil rozložení velikosti intenzity elektrického pole ( $Mag\_E$ ) v rovině hlavních přípojníc pro jednotlivé případy a také v dalších kritických místech rozvodny.



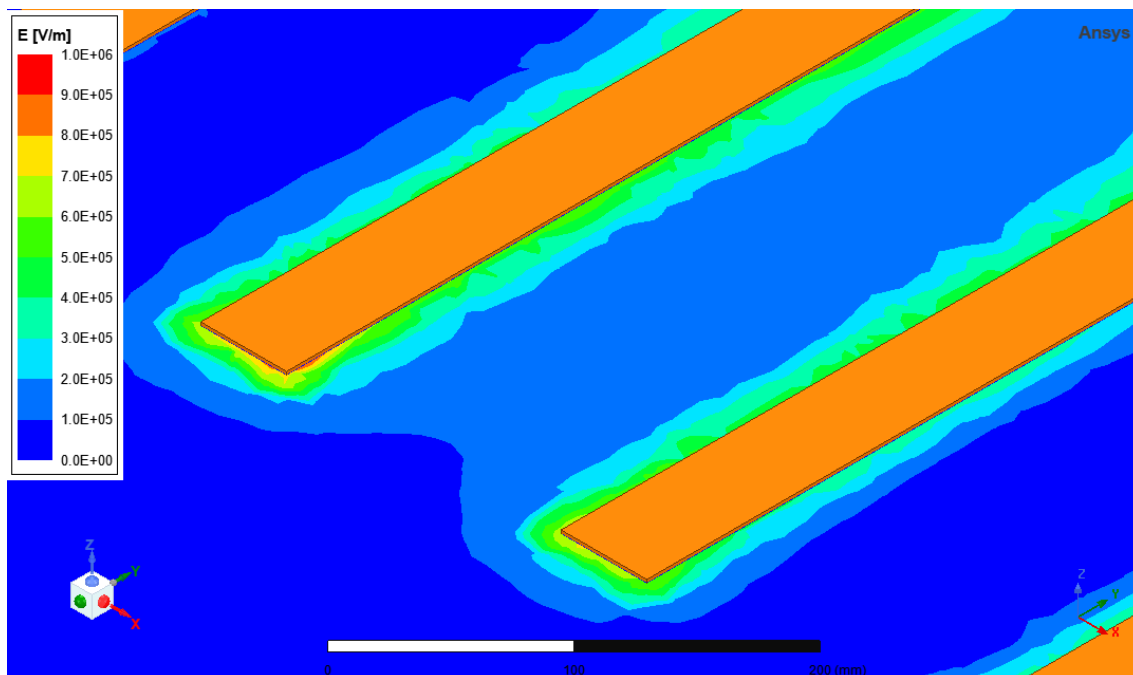
Obr. 16 (Rozložení velikosti intenzity elektrického pole v rovině hlavních přípojníc pro případ maxima napětí ve fázi L1)



Obr. 17 (Přiblížení Obr. XA v oblasti začátků fází L1 a L2 zadní přípojnice B3)



Obr. 18 (Rozložení velikosti intenzity elektrického pole v rovině hlavních přípojníc pro případ nulového napětí ve fázi L1)



Obr. 19 (Přiblížení Obr. XC v oblasti začátků fází L2 a L3 zadní přípojnice B3)

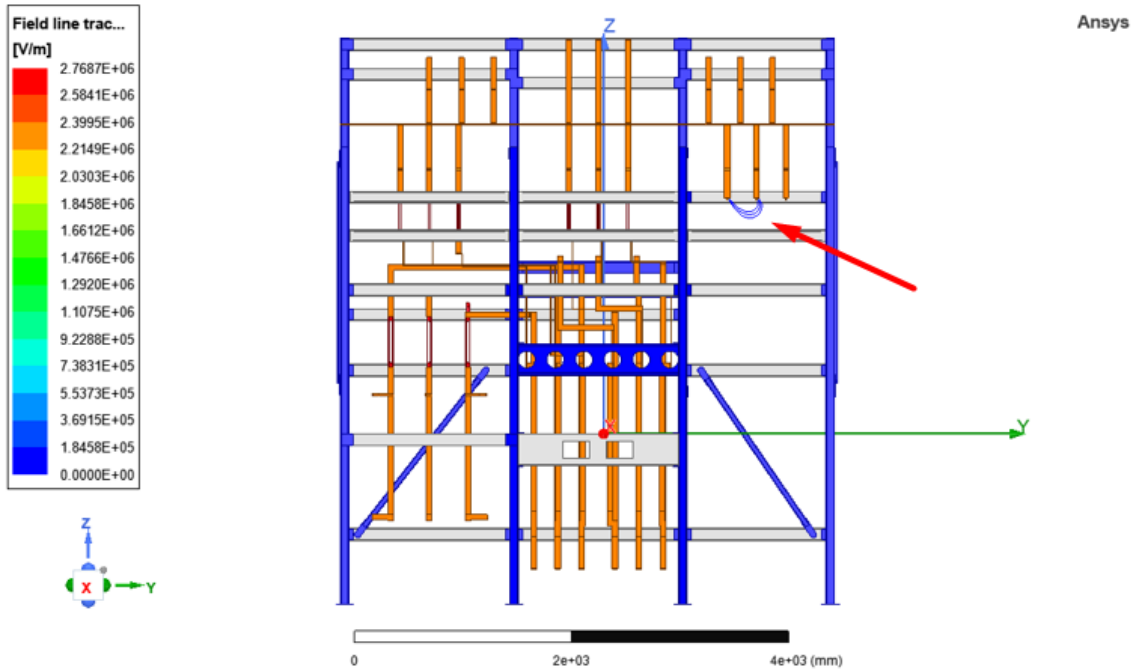
Na Obr. 16 vidíme, že nejvyšší hodnota intenzity elektrického pole se vyskytuje kolem hran krajních fází L1 obou přípojníc. Na těchto přípojnicích se totiž nachází maximální okamžitá hodnota napětí. Ve zbylých dvou fázích L2 a L3 má napětí poloviční hodnotu a opačný směr. Okolo fází L3 obou přípojníc, které jsou obklopeny jen fázemi se stejnou hodnotou napětí, se nevyskytují vysoké hodnoty intenzity elektrického pole. U fáze L2 se intenzita elektrického pole soustřeďuje k hraně směrem k fázi L1, která leží na rozdílném potenciálu, nedosahuje však vysokých hodnot. Po přiblížení (Obr. 17) si můžeme všimnout, že nejvyšší hodnota intenzity elektrického pole dosahuje přibližně 0,9 kV/mm na vnějším rohu fáze L1.

V druhém případě, který vyobrazuje Obr. 18, má fáze L1 nulové napětí, tudíž rozdíl potenciálů fází L2 a L3 dosahuje největší možné hodnoty. Naměřili bychom mezi nimi maximální sdružené napětí. Z toho vyplývá, že se jedná o podmínku nejméně příznivou pro případný průraz. Po přiblížení na Obr. 19 však vidíme, že maximální hodnoty intenzity elektrického pole, které se nacházejí na hranách přípojníc mezi fázemi L2 a L3, opět nepřesahují hodnotu 0,9 kV/mm.

### 2.4.3 Nalezení nejkritičtějšího místa modelu rozvodny

Elektrická pevnost vzduchu v homogenním prostředí je 3 kV/mm. Pro nehomogenní prostředí, která se vyskytují téměř ve všech technických aplikacích, není určení elektrické pevnosti vzduchu tak jednoduché. Existují empirické vztahy pro její určení, ale pouze pro pár základních tvarů a uspořádání elektrod. Navíc hodnota počátečního napětí samostatných částečných výbojů není shodná s průrazným napětím. Od letošního roku, tedy od verze 2022R1, program Ansys Maxwell disponuje funkcí pro stanovení těchto hodnot numerickými metodami. K funkci se dostaneme

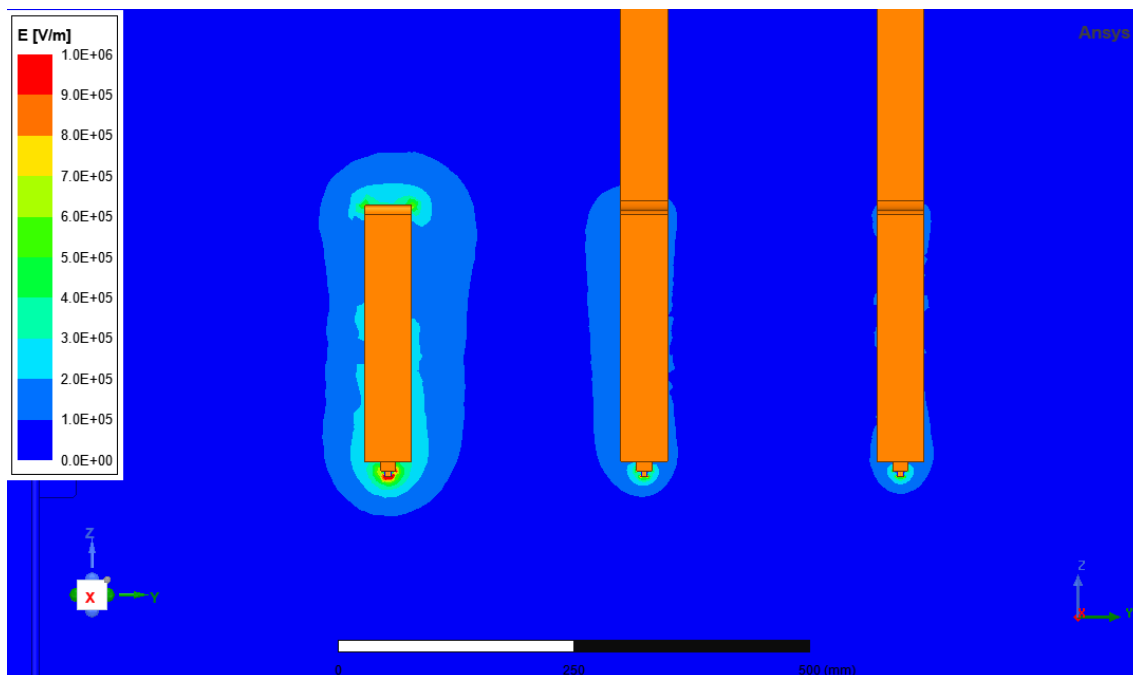
pomocí *Field Overlays – Field Line Trace*, kterou jsem nechal zobrazit na celém vzduchovém okolí. Program určil nejkritičtější místo z hlediska vzniku samostatných výbojů a průrazu izolační vzdálenost fází L1 a L2 u přívodu k odpojovači QZ7 (pro případ maxima napětí ve fázi L1).



Obr. 20 (Stanovení nejkritičtějších míst z hlediska vzniku samostatných výbojů a průrazu izolačních vzdáleností pomocí numerických metod)

Tab. 1 (Vypočtené počáteční napětí samostatných výbojů a průrazného napětí pro místa zobrazená na Obr. 20 pomocí numerických metod)

Line Number	Seeding Position (mm)	Seed Mag E (kV/mm)	Total Length (mm)	Critical Length (mm)	U Inception (kV)	U Breakdown (kV)
1	(440 , 3663, 37...	2.769	576.4	1.778	55.04	631.4
2	(440 , 3663, 37...	2.386	510	1.629	65.13	575.1
3	(440 , 3663, 37...	1.611	440.9	3.3	81.87	522.8



Obr. 21 (Rozložení velikosti intenzity elektrického pole v oblasti vodivého přívodu k odpojovači QZ7. Odpojovač je ve vypnuté poloze.)

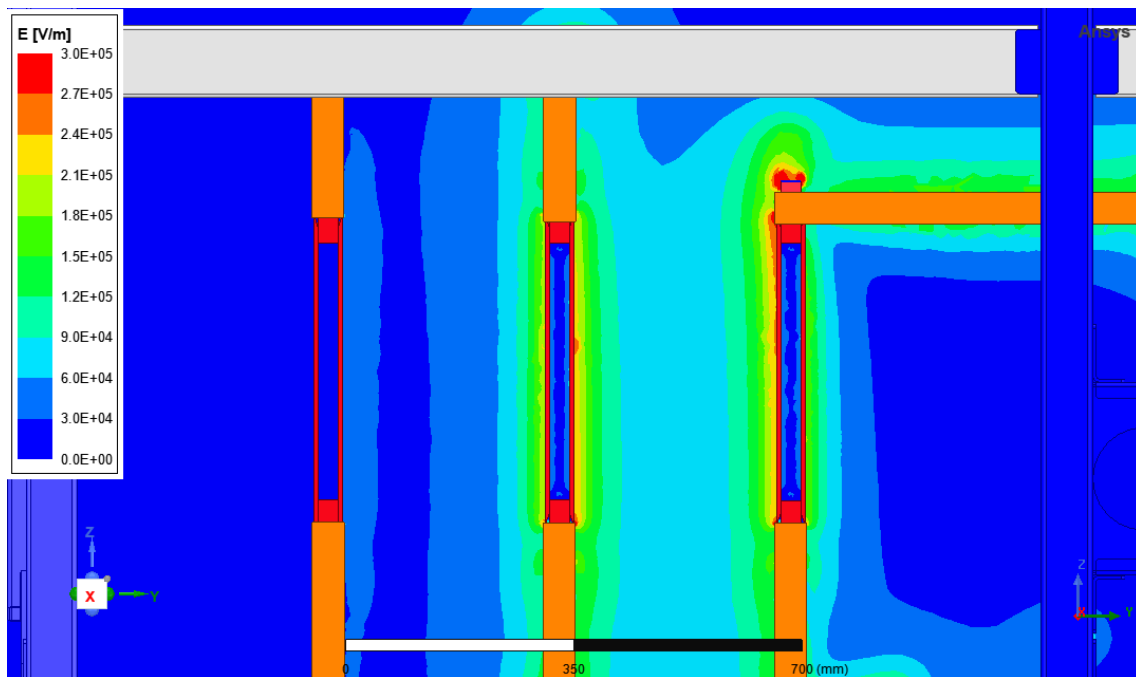
Podle Obr. 21 se nachází na zakončení fáze L1 skutečně zvýšená hodnota intenzity elektrického pole dosahující hodnoty 1,5 kV/mm, což je nejvyšší hodnota v celém modelu pro všechny parametrické výpočty. Podle mého názoru ale může být hodnota v tomto místě velmi zkreslená z důvodu absence modelu odpojovače QZ7. Ve skutečnosti se i zde bude vyskytovat menší hodnota intenzity elektrického pole.

Nicméně i při velikosti intenzity elektrického pole 1,5 kV/mm a tomto uspořádání elektrod program Ansys Maxwell vypočítal pomocí numerických metod nejmenší počáteční napětí pro vznik samostatných výbojů 55 kV. Aby došlo k průrazu, musela by být rozvodna napájena dokonce 552,8 kV. Z rozdílu těchto hodnot lze usoudit velmi velkou nesymetrii elektrického pole v tomto místě rozvodny. Takových hodnot napětí se však za provozního chodu rozvodny nemůže dosáhnout. A vzhledem k tomu, že ani v nekritičtějších místech modelu nevzniknou samostatné výboje ani průraz, kontrola návrhu prostorového uspořádání prvků rozvodny vn pomocí numerických metod proběhla úspěšně. Navíc jak už jsem zmínil výše, výsledné hodnoty budou spíše vyšší než hodnoty skutečné z důvodu nerespektování mírného zaoblení všech hran (včetně hran přípojnic) v 3D modelu rozvodny.

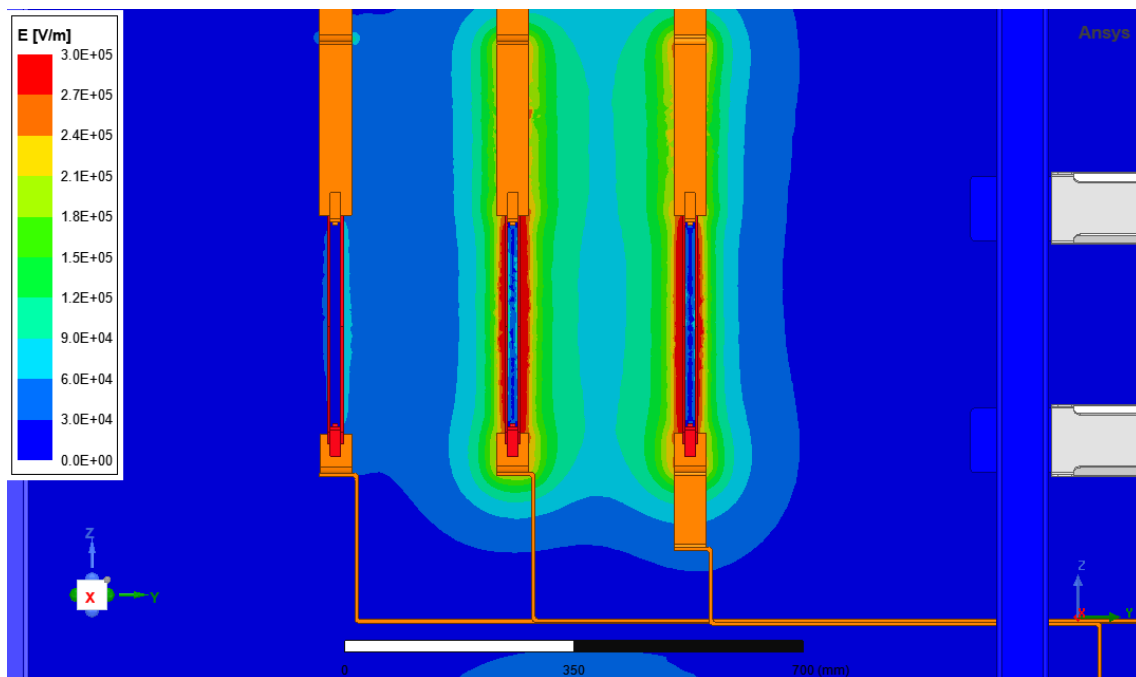
#### 2.4.4 Rozložení velikosti intenzity elektrického pole v rovině nožů odpojovačů QZ1 a QZ3

Dále jsem si pro možnost následného porovnání zobrazil rozložení velikosti intenzity elektrického pole v rovině nožů zapnutých odpojovačů QZ1 se jmenovitým napětím 36 kV

(Obr. 22) a QZ3 se jmenovitým napětím 24 kV (Obr. 23). Pro tyto případy se větší hodnoty intenzity elektrického pole vyskytují ve variantě s nulovým napětím ve fázi L1.



Obr. 22 (Rozložení velikosti intenzity elektrického pole v rovině nožů odpojovače QZ1 pro případ nulového napětí ve fázi L1)

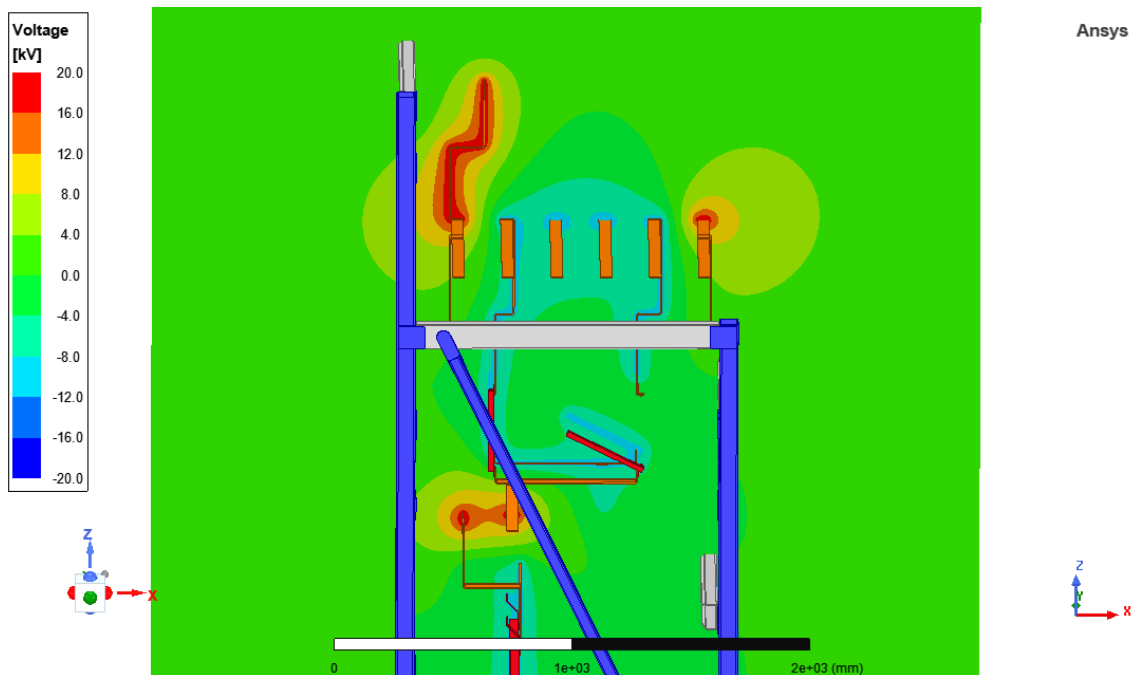


Obr. 23 (Rozložení velikosti intenzity elektrického pole v rovině nožů odpojovače QZ3 pro případ nulového napětí ve fázi L1)

Odpojovač dimenzovaný na větší jmenovité napětí má i větší izolační vzdálenosti. Jednotlivé fáze jsou u odpojovače QZ1 (36 kV) vzdáleny 31 cm, zatímco u odpojovače QZ3 (24 kV) je tomu jen 22,5 cm. Vzduchová mezera mezi vstupní a výstupní svorkou při vypnutém stavu činí u QZ1 40 cm, u QZ3 31,8 cm. Odpojovač QZ1 rovněž disponuje většími izolátory, které oddělují vodivé části s uzemněným rámem. Když tedy oba odpojovače budeme napájet stejným napětím (24 kV), je patrné, že větší hodnoty intenzity elektrického pole bude dosaženo u odpojovače na nižší napětí, tedy QZ3. To dokazuje porovnání Obr. 22 a Obr. 23, kde se maximální velikost intenzity elektrického pole vyskytuje na hranách nožů fáze L2 a L3. Pro odpojovač QZ3 tato hodnota činí přibližně 0,5 kV/mm, zatímco hodnota pro odpojovač QZ1 je nižší, přibližně 0,35 kV/mm. Obě tyto hodnoty jsou poměrně malé, a proto v této oblasti modelu nehrozí vznik samostatných výbojů nebo dokonce elektrický průraz.

#### **2.4.5 Rozložení napětí v blízkém okolí rozvodny**

Když si zobrazíme rozložení napětí v blízkém okolí rozvodny (Obr. 24), tak zjistíme, že se napětí ve větších výškách šíří i mimo rozvodnu. Zejména doleva při čelním pohledu a také před rozvodnu. Přibližně 1 m před rozvodnou se vyskytuje ve vzduchu ve výškové úrovni hlavních přípojníc napětí 1,2 kV a přibližně 1,5 m od rozvodny vlevo je ve stejném místě napětí asi 2,5 kV. Z toho vyplývá, že do těchto oblastí není vhodné umísťovat další elektrická zařízení, která by mohla vyskytující se elektrické pole ovlivňovat. V takovém případě by nebyla zajištěna EMC. Může se jednat například o požární hlásič nebo různé další senzory atd. V případě nutnosti umístění nějakého přístroje do těchto míst by měl disponovat schopností odstínit přítomné elektrické pole.



Obr. 24 (Rozložení velikosti napětí v rozvodně a v její blízkosti ve vertikální rovině – řez zezadu dopředu, pohled zleva)

V oblasti do 2 m výšky nejsou hodnoty tohoto napětí velké, protože se počítá s uzemněnou podlahou. Navíc do této výšky je rozvodna obklopena kovovou uzemněnou mříží kvůli bezpečnosti, která je schopna šíření napětí mimo rozvodnu částečně odstínit a eliminovat. Pro kolemjdoucí lidi by tedy chod rozvodny neměl být nebezpečný.



### 3 Kontrola návrhu odpojovače vn pomocí numerických metod

Pro kontrolu návrhu jsem si vybral odpojovač QZ1, jehož katalogové a štítkové údaje ukazuje Tab. 2.

Tab. 2 (Katalogové a štítkové údaje odpojovače QZ1)

Sériové číslo:	1YMP020OW300584
Typ:	OWIII30/6UD-2
Výrobce:	ABB
Jmenovité napětí:	36 kV
Jmenovitá frekvence:	50 Hz
Jmenovitý proud:	630 A
Jmenovitý špičkový výdržný proud:	50 kA
Jmenovitý krátkodobý výdržný proud	20 kA
Doba trvání jmenovitého krátkodobého výdržného proudu:	1 s

Standartní návrh odpojovače vn spočívá v: [6]

- návrhu izolačních vzdáleností mezi fázemi a mezi fází a nulovým potenciálem (zemí)
- kontrole silových účinků elektrického proudu při zkratu
- kontrole maximálního ustáleného oteplení při průchodu jmenovitého proudu
- kontrole maximálního oteplení při průchodu jmenovitého krátkodobého výdržného proudu

3D model odpojovače QZ1 jsem vyjmul z modelu celé rozvodny a dále jsem jednotlivé jeho části upravil tak, aby co nejvíce odpovídaly realitě.

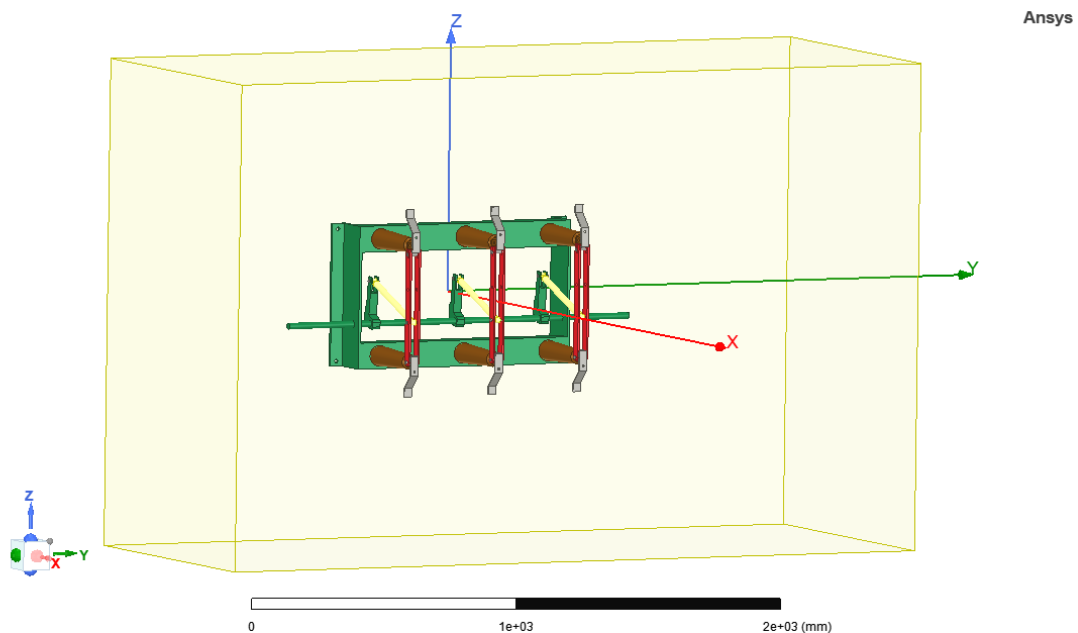
#### 3.1 Kontrola odpojovače analýzou elektrického pole

Touto metodou ověřím, zda jsou dodrženy izolační vzdálenosti mezi fázemi a mezi fází a nulovým potenciálem při zapnutém i vypnutém stavu odpojovače. A dále jestli na nějaké části nevznikají samostatné výboje. Nebezpečná místa pro vznik tohoto děje se nachází hlavně na ostrých hranách a na přechodech materiálů s rozdílnou permitivitou, hlavně mezi elektrickým vodičem a izolantem.

Pro vypnutý stav odpojovače jsem jeho kontaktní nože natočil již v programu Solidworks.

Poté jsem 3D model odpojovače importoval do programu Ansys Maxwell. Pro tento případ jsem použil statický elektrický typ analýzy (*Electrostatic*). Princip použití statické analýzy

pro dynamický systém, který je napájen trojfázovým střídavým napětím, je shodný jako v případě analýzy elektrického pole celé rozvodny HARD v předešlé kapitole. V jeho prostředí jsem jednotlivým částem modelu nastavil jejich reálné materiály a barvy. Kontaktní nože a svorky, na které se upevňují přípojnice, jsou měděné. Rám odpojovače je společně s ovládací tyčí z oceli (materiál *steel\_1008* ze systémové knihovny). Z nevodivého materiálu jsou vyrobeny izolátory, na kterých drží jednotlivé nože a také mechanický spoj ovládací tyče s noži odpojovače (materiál *PVC plastic*). Okolo modelu je nutné nastavit vzduchové okolí. Čím větší bude, tím budou výsledky analýzy méně zkreslené, ale na druhou stranu bude výpočet trvat delší dobu a zabere více výpočetní paměti. Proto jsem zvolil kompromis. Při čelním pohledu na odpojovač se fáze L1 nachází vlevo, fáze L2 uprostřed a fáze L3 vpravo.



Obr. 25 (3D model odpojovače QZ1 v zapnutém stavu v prostředí Ansys Maxwell včetně vzduchového okolí)

Uvažuji s tím, že odpojovač je napájený souměrným trojfázovým napětím o jmenovité sdružené hodnotě 36 kV. Jedná se o statickou analýzu, velikosti napětí jsem určil pro čas  $t = 0$ , a aby byl ve výpočtech obsažen celý sinusový průběh napětí v každé fázi, zvolil jsem v argumentu funkce sinus proměnnou  $\alpha$ . Pomocí funkce *Excitations* jsem dolním svorkám jednotlivých fází přiřadil následující napětí:

$$u_{L1} = \sqrt{2} \cdot \frac{36000}{\sqrt{3}} \cdot \sin(\alpha)$$

$$u_{L2} = \sqrt{2} \cdot \frac{36000}{\sqrt{3}} \cdot \sin\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$u_{L3} = \sqrt{2} \cdot \frac{36000}{\sqrt{3}} \cdot \sin\left(\alpha - \frac{4\pi}{3}\right)$$

Funkcí *Optimetrics – Parametric* jsem pro proměnnou  $\alpha$  nastavil 12 hodnot, a to od  $0^\circ$  do  $360^\circ$  s lineárním krokem  $30^\circ$ . Proběhne tedy 12 jednotlivých výpočtů.

Rám odpojovače je uzemněný, proto jsem na něj zadal napětí 0 V.

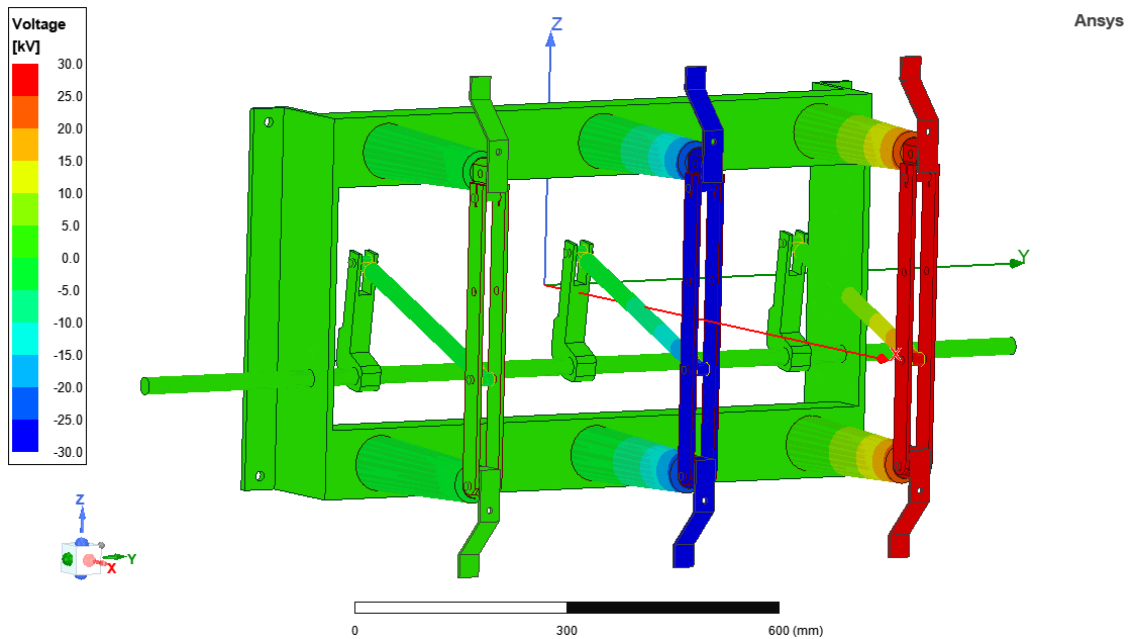
Nakonec je nutno nastavit *Anylysis Setup*, kde se nechají všechny původní hodnoty.

Poté už je možno spustit analýzu. Program si automaticky vytvoří výpočetní síť, která pro tyto modely obsahuje téměř milión elementů, a provede elektrostatický výpočet. I v tomto případě je výpočet značně složitý a na běžném počítači trval několik hodin.

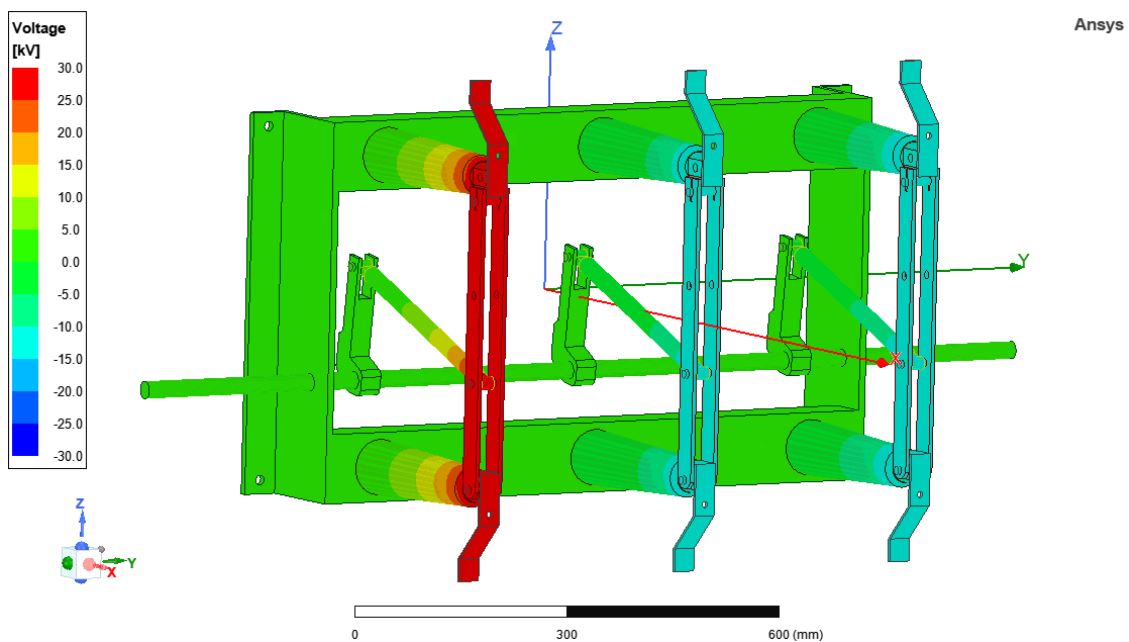
### 3.1.1 Výsledky statické elektrické analýzy pro zapnutý stav odpojovače

U ověřování izolačních vzdáleností a případného vzniku samostatných výbojů jsou nejdůležitější tyto dva momenty:

- Napětí v jedné fázi je nulové a rozdíl potenciálů druhé a třetí fáze je roven maximální hodnotě sdruženého napětí (Obr. 26) – platí pro parametr  $\alpha = 0^\circ$  (krajní fáze L1 má nulové napětí).
- V jedné fázi se nachází maximum napětí (29400 V), zatímco ve zbývajících dvou fázích má napětí hodnotu poloviny maxima a opačné znaménko oproti první fázi (Obr. 27) – platí pro parametr  $\alpha = 90^\circ$  (krajní fáze L1 má maximální napětí).



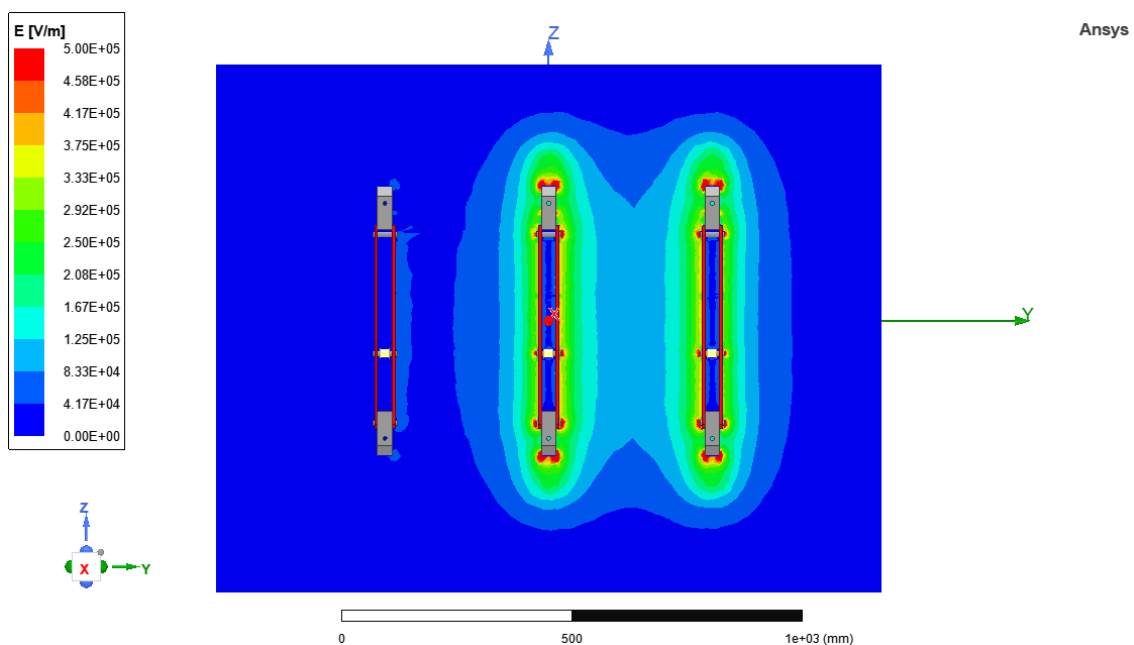
Obr. 26 (Rozložení napětí na povrchu odpojovače QZ1 v zapnutém stavu při nulovém napětí ve fázi L1)



Obr. 27 (Rozložení napětí na povrchu odpojovače QZ1 v zapnutém stavu při maximálním napětí ve fázi L1)

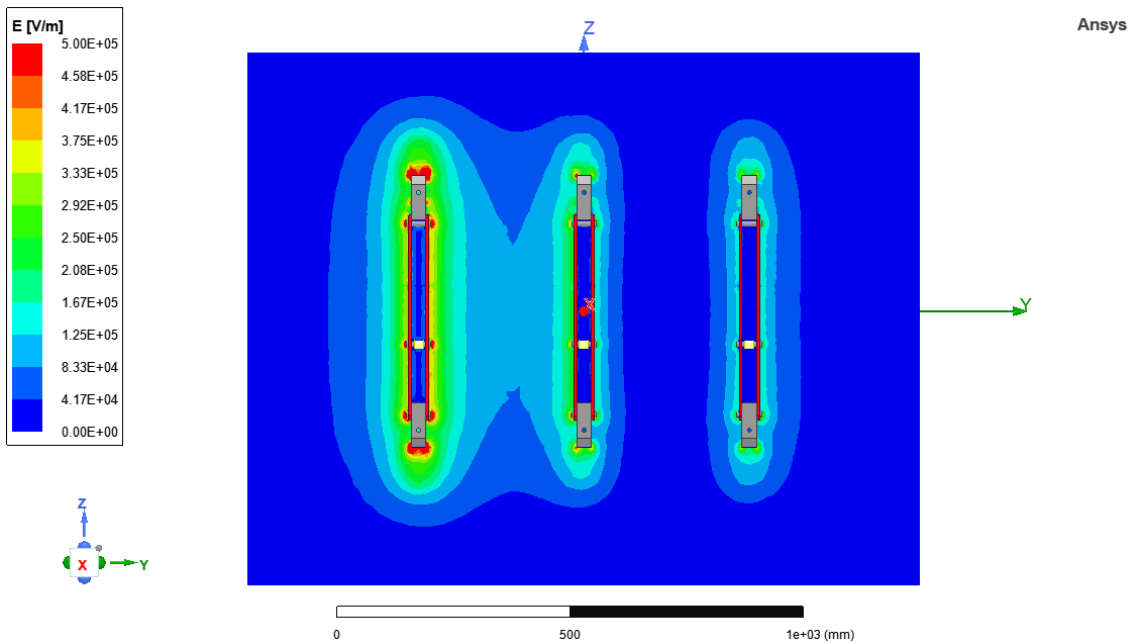
Na Obr. 27 si můžeme všimnout, že i pro maximální napětí (v levé fázi L1) plní izolátory z nevodivého materiálu (PVC) svou funkci a nepropustí napětí na uzemněný kovový rám. Je jasně vidět, jak po délce izolátoru postupně klesá napětí z maximální hodnoty až do nuly. Na přechodu

mezi izolantem a vodivými materiály se mohou vyskytovat místa s lokálně zvýšenou intenzitou elektrického pole.



Obr. 28 (Rozložení velikosti intenzity elektrického pole v rovině nožů zapnutého odpojovače pro případ nulového napětí ve fázi L1)

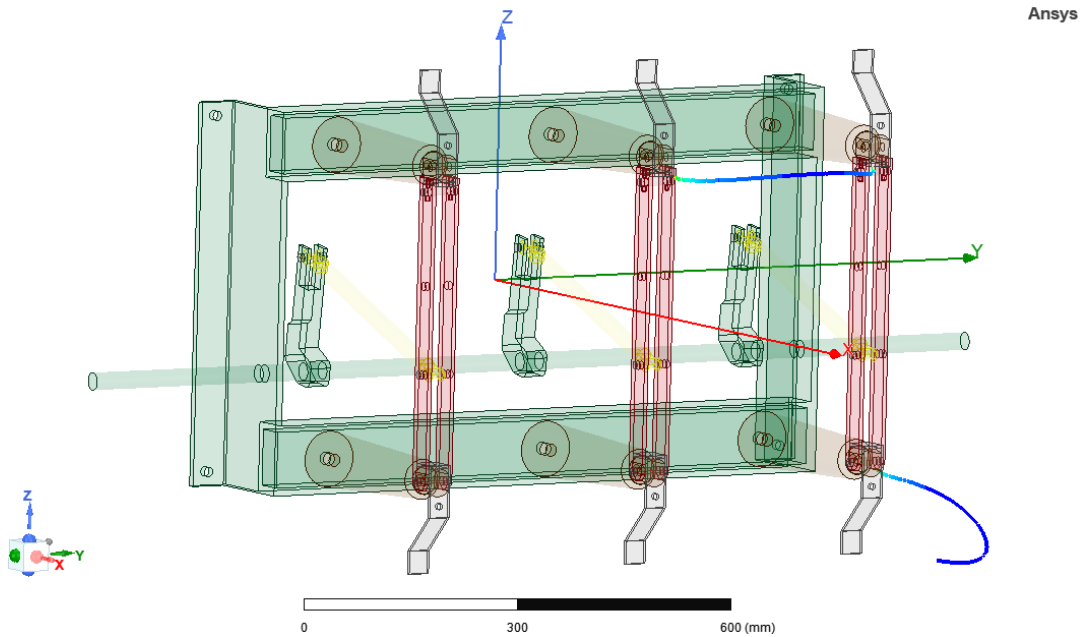
V momentě, kdy je mezi fázemi L2 a L3 maximální (sdružené) napětí, se mezi těmito fázemi vyskytuje velmi nehomogenní elektrické pole. Téměř veškerá intenzita elektrického pole se koncentruje u ostrých hran nožů odpojovače. Její největší hodnoty lze nalézt na rozích nožů a svorek, a také v oblasti výskytu ocelových kolíků, které se v zde nacházejí z mechanických důvodů. Maximální nalezená hodnota činí 1 kV/mm.



Obr. 29 (Rozložení velikosti intenzity elektrického pole v rovině nožů zapnutého odpojovače pro případ maxima napětí ve fázi L1)

Pro případ maxima napětí v krajní fázi L1 jsem našel maximální hodnotu intenzity elektrického pole také 1 kV/mm. Ta se vyskytuje opět na ostrých hranách nožů odpojovače a svorek této fáze a na přechodech materiálů s rozdílnou permitivitou, tedy v oblasti mechanických ocelových kolíků. Kolem nožů prostřední fáze L2 si můžeme všimnout nesymetrie v rozložení elektrického pole. Toto pole je silnější na levé části, protože tímto směrem se nachází fáze L1 s rozdílným potenciálem, zatímco napravo leží fáze L3, která je na stejném potenciálu jako fáze L2.

Zjistil jsem tedy, že nejvyšší intenzita elektrického pole v celém modelu pro všechny parametrické výpočty činí lehce přes 1 kV/mm. Jak už jsem se zmínil v přecházející kapitole, je velmi obtížné určit elektrickou průraznou pevnost vzduchu v takto nehomogenním poli. Proto jsem opět pomocí funkce *Field Line Trace* v programu Ansys Maxwell určil nejmenší hodnotu počátečního napětí samostatných výbojů a průrazné napětí. Podle Obr. 30 program určil jako nejkritičtější místa z tohoto pohledu izolační vzdálenost mezi horními svorkami fází L2 a L3 a mezi spodní svorkou fáze L3 a nulovým potenciálem. Obojí pro případ nulového napětí ve fázi L1.



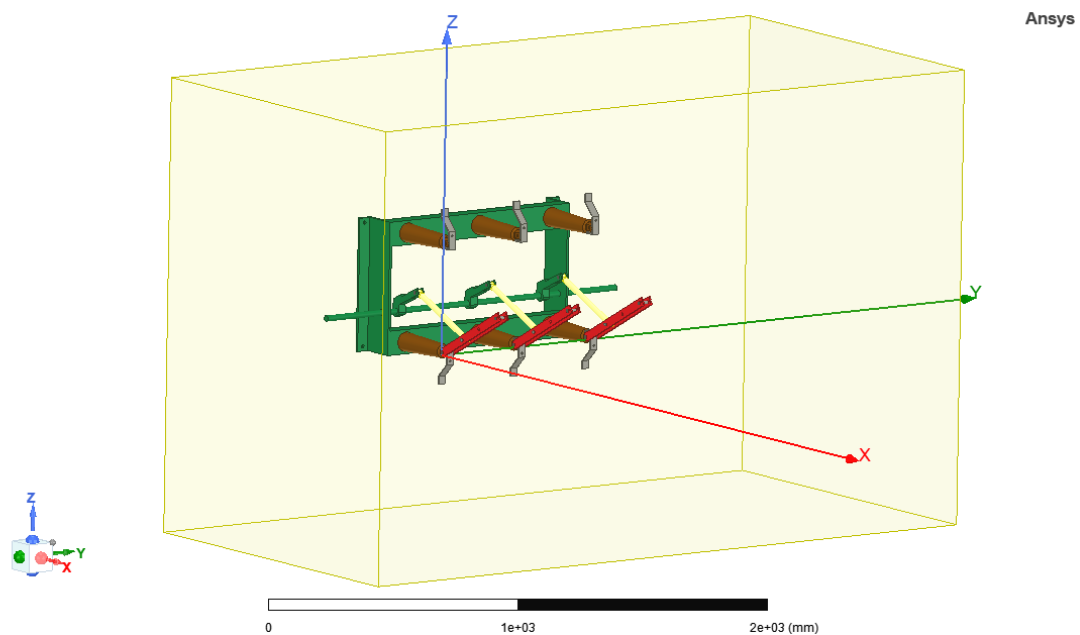
Obr. 30 (Stanovení nejkritičtějších míst v modelu zapnutého odpojovače z hlediska vzniku samostatných výbojů a průrazu izolačních vzdáleností pomocí numerických metod)

Tab. 3 (Vypočtené počáteční napětí samostatných výbojů a průrazného napětí pro místa zobrazená na Obr. 30 pomocí numerických metod)

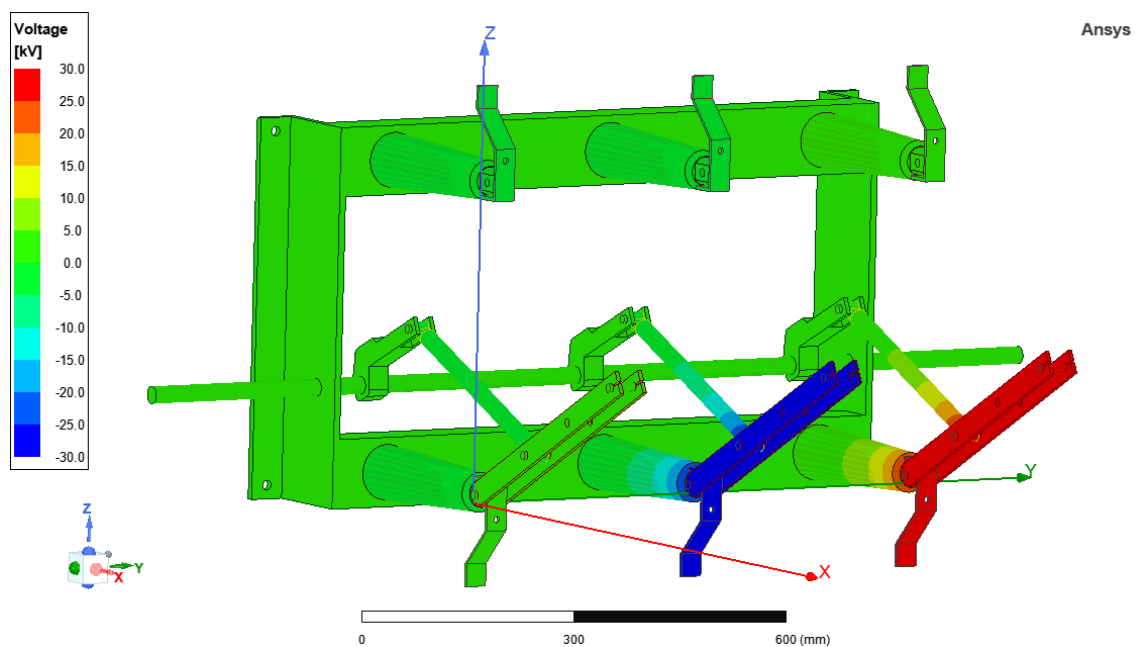
Line Number	Seeding Position (mm)	Seed Mag E (kV/mm)	Total Length (mm)	Critical Length (mm)	U Inception (kV)	U Breakdown (kV)
1	(427.3 , 382, -236...	0.7117	652.2	4.075	293.6	945.8
2	(457.5 , 344, 200)	0.6627	428.3	6.093	245.6	673.8

Podle Tab. 3 je počáteční napětí samostatných výbojů v nejkritičtějších místě modelu odpojovače 245,6 kV, průrazné napětí má ještě několikanásobně větší hodnotu. Z toho vyplývá, že všechny izolační vzdálenosti byly navrženy správně.

### 3.1.2 Výsledky statické elektrické analýzy pro vypnutý stav odpojovače

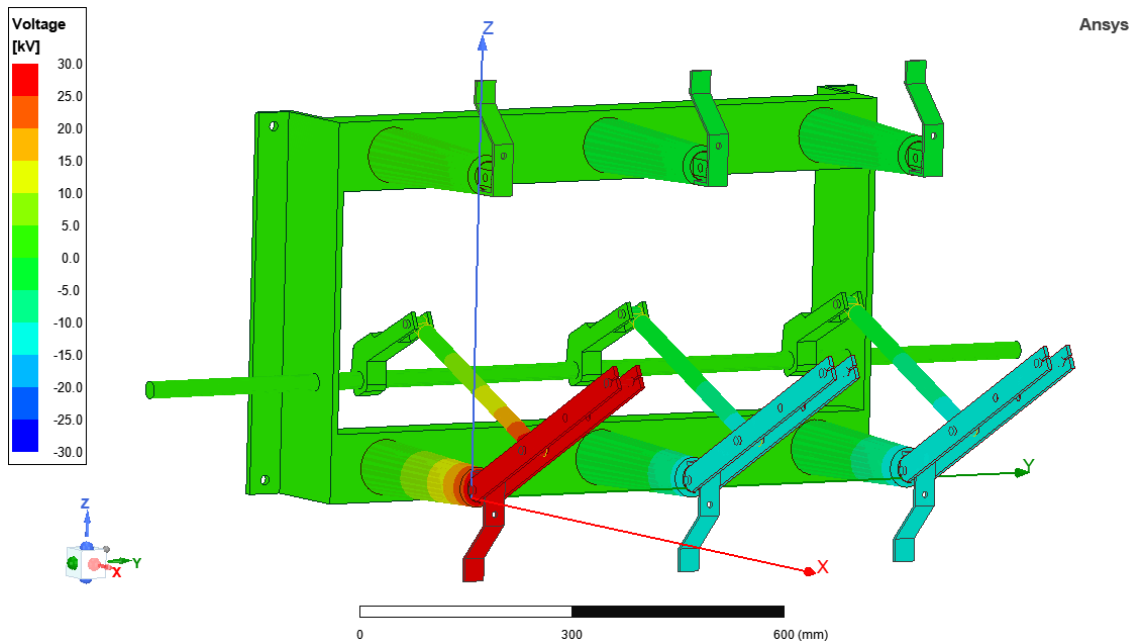


Obr. 31 (3D model odpojovače QB1 ve vypnutém stavu v prostředí Ansys Maxwell včetně vzduchového okolí)



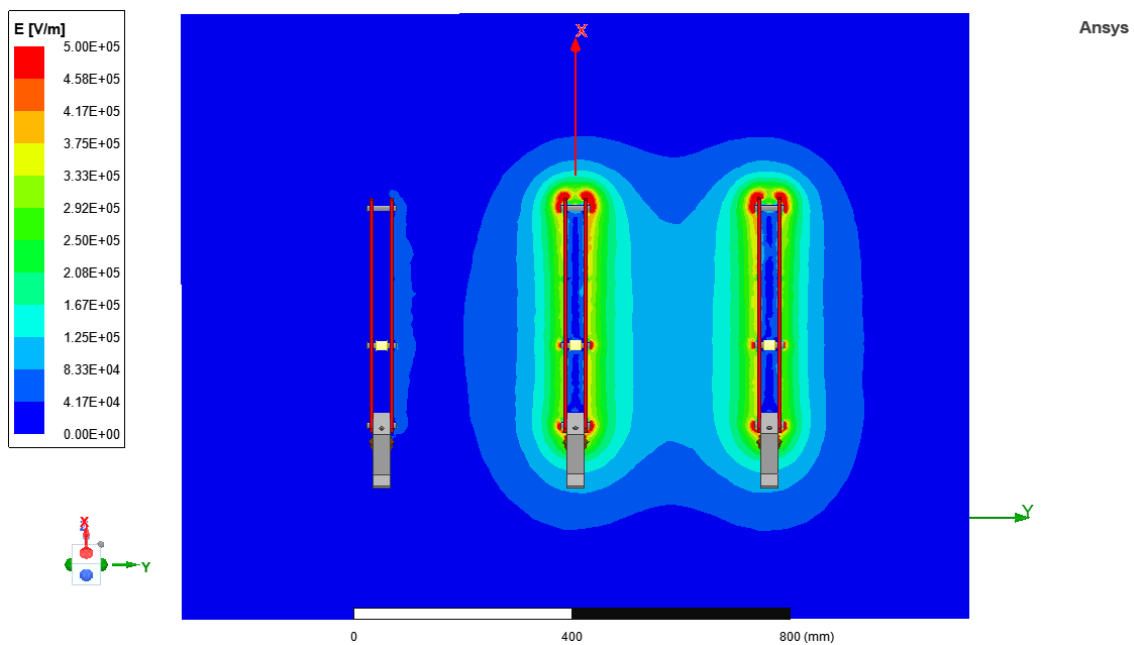
Obr. 32 (Rozložení napětí na povrchu odpojovače QB1 ve vypnutém stavu při nulovém napětí ve fázi L1)



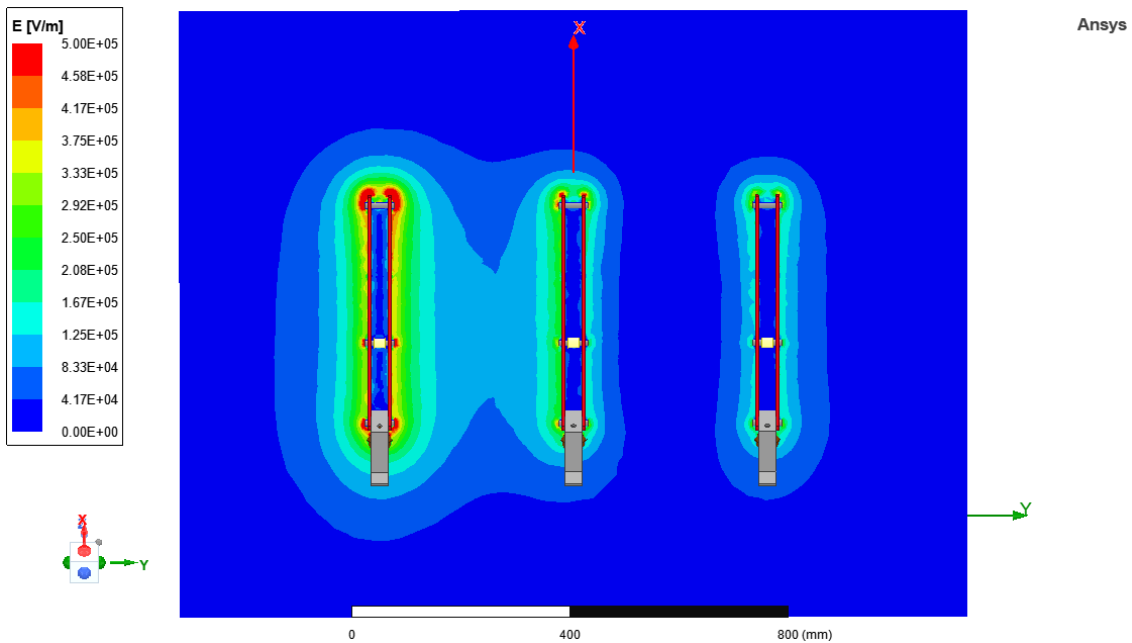


Obr. 33 (Rozložení napětí na povrchu odpojovače QZ1 ve vypnutém stavu při maximálním napětí ve fázi L1)

Pro vypnutý stav odpojovače jsem si pro vykreslení rozložení intenzity elektrického pole vybral rovinu vypnutých nožů odpojovače a dále horizontální rovinu, která protíná spodní i horní svorky odpojovače. Pomocí ní bude snazší zhodnotit izolační vzdálenost rozpojené dráhy odpojovače.

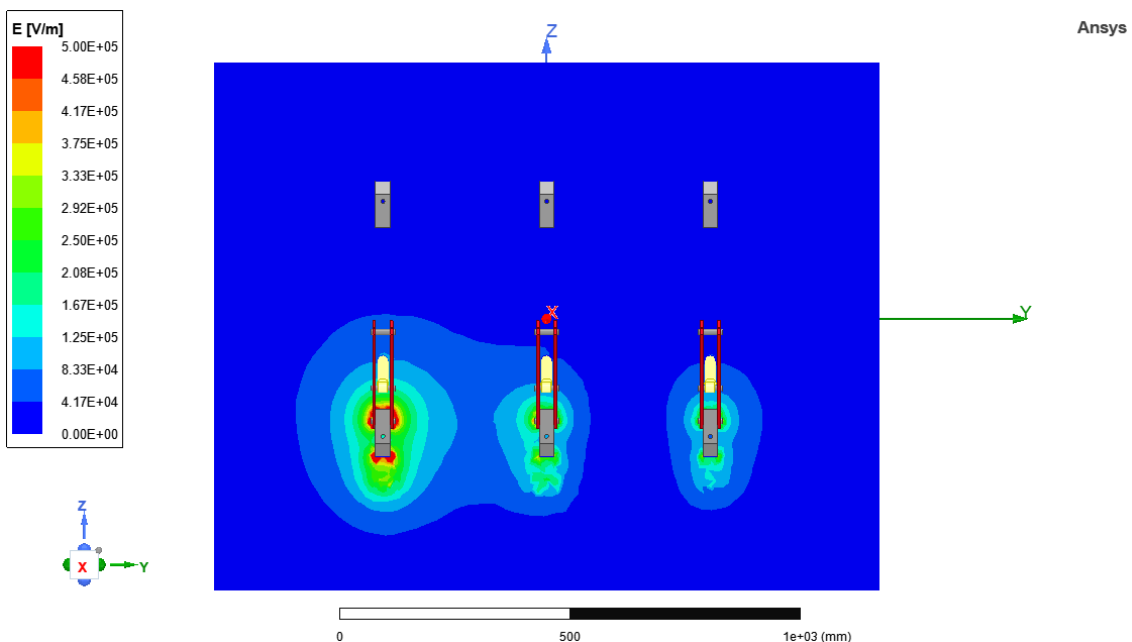


Obr. 34 (Rozložení velikosti intenzity elektrického pole v rovině nožů vypnutého odpojovače pro případ nulového napětí ve fázi L1)



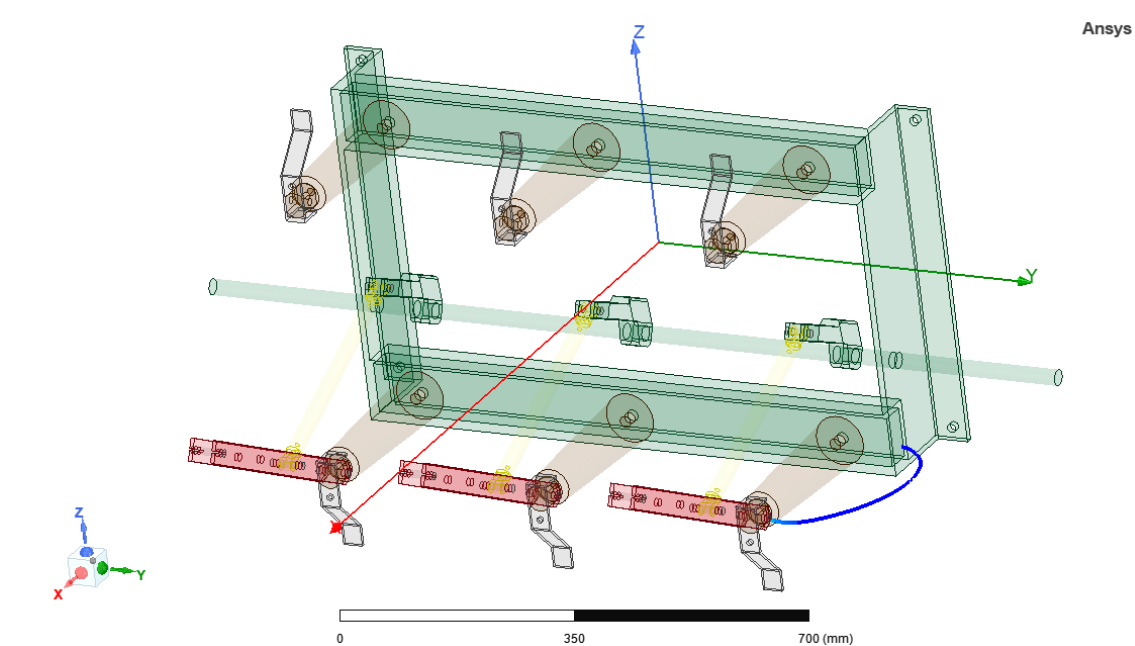
Obr. 35 (Rozložení velikosti intenzity elektrického pole v rovině nožů vypnutého odpojovače pro případ maxima napětí ve fázi L1)

V rovině nožů odpojovače můžeme pozorovat podobné děje jako u zapnutého stavu odpojovače. Maximální intenzita elektrického pole dosahuje o něco málo vyšších hodnot než u zapnutého stavu odpojovače, konkrétně 1,2 kV/mm v oblasti ostrých hran na konci nožů pro případ maxima napětí ve fázi L1.



Obr. 36 (Rozložení velikosti intenzity elektrického pole v rovině spodních a horních svorek vypnutého odpojovače pro případ maxima napětí ve fázi L1)

V horizontální rovině na Obr. 36 vidíme, že hodnoty intenzity v oblasti spodních svorek dosahují hodnoty maximálně 0,9 kV/mm. Důležitější však je, způsob šíření elektrického pole směrem k horní svorce. Je patrné, že již v polovině izolační vzdálenosti mezi svorkami všech tří fází klesla intenzita elektrického pole téměř na nulovou hodnotu. Kolem horních svorek odpojovače se již žádná intenzita elektrického pole nevyskytuje. Tato izolační vzdálenost odpojovače se jmenovitým napětím 36 kV ve vypnutém stavu, která činí 40 cm, byla tedy nadimenzována dostatečně dlouhá i s rezervou. To dokazuje i rozložení napětí (Obr. 32 a 33), kde se do horních svorek neindukuje vůbec žádné napětí.



Obr. 37 (Stanovení nejkritičtějších míst v modelu vypnutého odpojovače z hlediska vzniku samostatných výbojů a průrazu izolačních vzdáleností pomocí numerických metod)

Tab. 4 (Vypočtené počáteční napětí samostatných výbojů a průrazného napětí pro místa zobrazená na Obr. 37 pomocí numerických metod)

Line Number	Seeding Position (mm)	Seed Mag E (kV/mm)	Total Length (mm)	Critical Length (mm)	U Inception (kV)	U Breakdown (kV)
1	(415 , 376, -2...	2.198	371	0.7042	162.6	533.6

Pomocí funkce *Field Trace Line* jsem ještě ověřil, že počáteční napětí samostatných výbojů pro toto uspořádání v nejkritičtější oblasti, kterou vidíme na Obr. 37, dosahuje mnohem vyšší hodnoty (162,6 kV), než jakým je odpojovač napájen. Toto potvrzuje dodržení všech izolačních vzdáleností odpojovače.

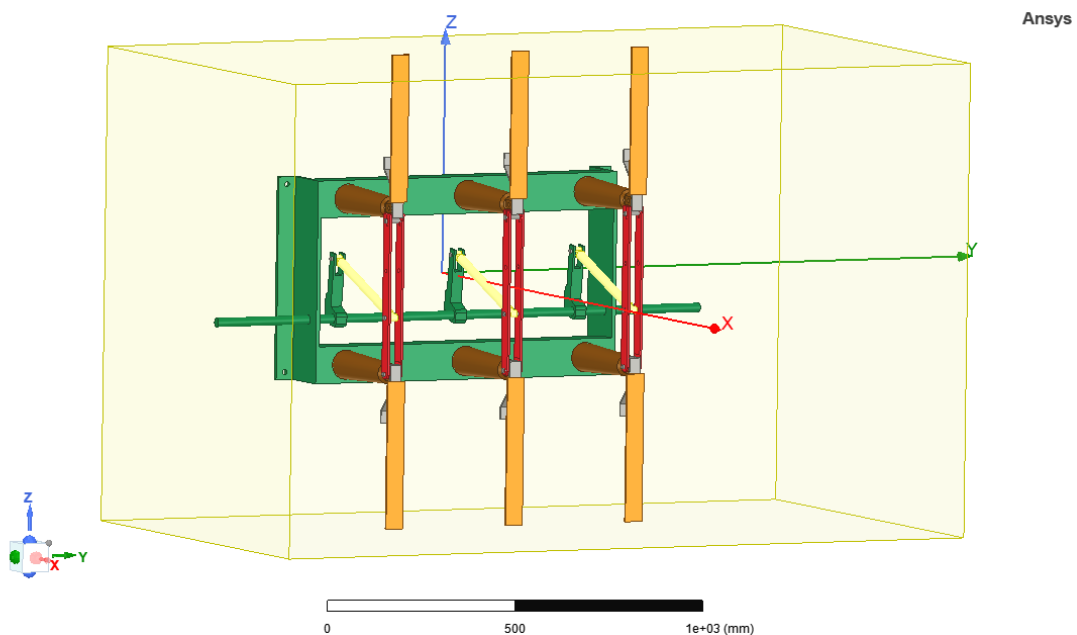
## 3.2 Kontrola odpojovače z hlediska silových účinků zkratového proudu

Při průchodu elektrického proudu jednou fází odpojovače se proudovodná dráha skládá z:

- spodní přípojnice
- spodní svorky (obsahuje pravoúhlý záhyb)
- dvou paralelních nožů (obsahuje dva kontaktní styky s dolní svorkou a další dva pravoúhlé záhyby)
- horní svorky (obsahuje dva kontaktní styky s noži odpojovače a další tři pravoúhlé záhyby)
- horní přípojnice

Vzhledem ke složitosti této proudovodné dráhy a množství záhybů ve všech třech rovinách by byl analytický výpočet působících elektrodynamických sil podle teoretických vztahů velmi náročný, až téměř nemožný. Proto použijí numerický způsob výpočtu.

Z teoretických poznatků lze akorát odvodit směry působících sil na nože odpojovače. Největší podíl na výsledné síle bude mít pravděpodobně vliv paralelního vedení dvou nožů stejné fáze. Jelikož směr proudu v nich bude stejný, budou se navzájem přitahovat. Síly na jednotlivé nože budou působit ve směru, respektive proti směru, osy  $y$ . Ve stejné ose, ale opačným směrem, budou působit síly vlivem zúžení proudovodné dráhy v místě kontaktního styku mezi svorkami a noži odpojovače. Dojde ke vzniku elektrodynamických sil i vlivem pravoúhlých a dvojitých záhybů, ale vzhledem k jejich počtu není možné jednoduše určit výsledný směr těchto sil. Ovlivňovat se budou i proudy v jednotlivých fázích navzájem. Z teorie dále vyplývá, že při tomto uspořádání vodičů ve trojfázovém systému jsou nejvíce silově namáhány vnitřní vodiče krajních fází.



Obr. 38 (3D model odpojovače QZ1 pro analýzu silových účinků proudu v prostředí Ansys Maxwell)

Pro kontrolu z hlediska silových účinků proudu se vždy uvažuje nejvyšší hodnota předpokládaného zkratového proudu. Podle Tab. 2 má jmenovitý špičkový výdržný proud hodnotu 50 kA.

Pro analýzu silových účinků jsem v 3D modelu odpojovače musel udělat pár změn. Na rozhraní svorek a jednotlivých nožů odpojovače jsem namodeloval bodový kontaktní styk odebráním části nože a přidáním vodivého válce pro přenos proudu. Rozměry tohoto válce vycházejí z přítlaču kontaktní pružiny, která však není v 3D modelu odpojovače vyobrazena. Další změnou je přidání měděných přípojnic pro přívod a odvod proudu z důvodu možnosti tento proud vygenerovat v prostředí Ansys Maxwell.

V tomto případě jsem zvolil magnetický a statický typ analýzy (*Magnetostatic*). Silové účinky totiž stačí vyšetřit pouze v časech, kdy budou proudy jednotlivých fází procházet svým maximem. Materiály jednotlivých částí odpojovače jsou shodné s předchozí analýzou. Velikost vzduchového okolí jsem zvolil tak, aby končilo přesně s koncem jednotlivých přípojnic.

Proudy jsem v sekci *Excitations* zadával na spodní přípojnice:

$$i_{L1} = 50000 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot time)$$

$$i_{L2} = 50000 \cdot \sin\left(2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot time - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$i_{L3} = 50000 \cdot \sin\left(2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot time - \frac{4\pi}{3}\right)$$

Proměnnou *time* jsem pomocí funkce *Optimetrics – Parametric* jsem zadal tak, aby byla v každé fázi postupně maximální hodnota proudu, tedy 5 s, 11,67 s a 18,33 s. Proběhnou tedy tři samostatné výpočty. Dále jsem zadal požadavek na výpočet sil na jednotlivé nože odpojovače (*Parameters – Assign – Force*).

Nakonec je nutno nastavit *Anylysis Setup*, kde se nechají všechny původní hodnoty.

Poté už je možno spustit analýzu. Program si automaticky vytvoří výpočetní síť, která pro tento model obsahuje téměř 300 tisíc elementů, a provede magnetostatický výpočet. Nejprve vypočte rozložení elektromagnetického pole v celém objemu modelu, na jehož základě vyčíslí síly působící na jednotlivé části. I v tomto případě je výpočet značně složitý a na běžném počítači trval několik hodin.

### **3.2.1 Výsledné hodnoty elektrodynamických sil na nože odpojovače**

Síly v ose *y* vyšly suverénně největší velikosti a na celkové síle se podílejí téměř veškerou částí. Navíc pro kontrolu případného odskočení kontaktů jsou důležité síly v této ose. Proto v následující tabulce uvádím pouze síly v tomto směru. Jednotlivé síly v ose *x* mají velikost okolo 100 N a síly v ose *z* mají velmi rozdílné hodnoty, ale nepřekračují nižší jednotky stovek N.

Tab. 5 (Výsledné hodnoty elektrodynamických sil na nože odpojovače)

Nůž odpojovače (fáze, strana)	$F (y) (N)$
L1, levý	999
L1, pravý	-1330
L2, levý	1152
L2, pravý	-1111
L3, levý	1286
L3, pravý	-911

Z hodnot výsledných sil v Tab. 5 vyplývá, že při průtoku zkratového proudu odpojovačem budou na jeho nože působit síly, které budou mít směr do místa kontaktního styku a budou tedy podporovat kontaktní pružinu. Nestane se, že by při zkratu kontakty odskočily od sebe, což by byl velmi nepříznivý děj. Proto při návrhu tohoto odpojovače byla použita varianta s dvěma paralelně vedenými noži, což kompenzuje vzniklé elektrodynamické síly kontaktního styku a proudových záhybů, které působí směrem od místa styku.

Maximální síla působí na pravý z nožů ve krajní fázi L1, konkrétně 1,33 kN proti směru osy  $y$ , tedy do místa kontaktního styku.

Měděný nůž odpojovače tedy musí být schopen toto silové namáhání vydržet. Je tedy ještě potřebné provést kontrolu mechanického namáhání a kontrolu průhybu nožů analytickým výpočtem. Aby se paralelně vedené nože jedné fáze příliš neprohýbaly, je mezi ně vloženo několik mechanických vložek, které jsou částečně schopny vzniklé síly zachytit.

Dále je patrné, že síly na jednotlivé nože nejsou zcela osově souměrné, i když geometrie odpojovače i napájecí trojfázový proud souměrný je. Důvodem může být to, že bodový kontaktní styk nevznikne vždy na totožném místě. Od toho se odvíjí i velikost vzniklé síly, která má opačný směr od hlavní síly vzniklé paralelním vedením nožů jedné fáze, a tedy výslednou sílu na nože zmenšuje. Podle dalších proběhlých analýz (například při nenasimulování bodového kontaktního styku) lze odhadnout, že velikost těchto sil se pohybuje okolo 300 N.

### 3.3 Kontrola odpojovače z hlediska tepelných účinků při průchodu ustáleného jmenovitého proudu

Při průchodu ustáleného jmenovitého proudu odpojovačem dojde po odeznění přechodného děje k situaci, kdy veškeré vygenerované teplo odchází jeho povrchem do okolí. Mluvíme o ustáleném oteplení. Při uvažování teploty okolí 30 °C nesmí teplota jednotlivých částí odpojovače přesáhnout 80 °C (platí pro holé měděné vodiče). Podle Tab. 2 má odpojovač jmenovitý proud 630 A. [8]

Výpočet pomocí numerických metod je v tomto případě složitější, protože je v programu Ansys nutné provést dva typy analýz. Pro vyčíslení výkonových ztrát ve formě tepla se nejprve využije harmonická analýza (*Eddy current*). Tyto ztráty slouží jako vstupní hodnoty pro tepelnou analýzu (*Thermal*) v prostředí Ansys Mechanical. Pro obě analýzy jsem použil totožný 3D model jako u analýzy silových účinků.

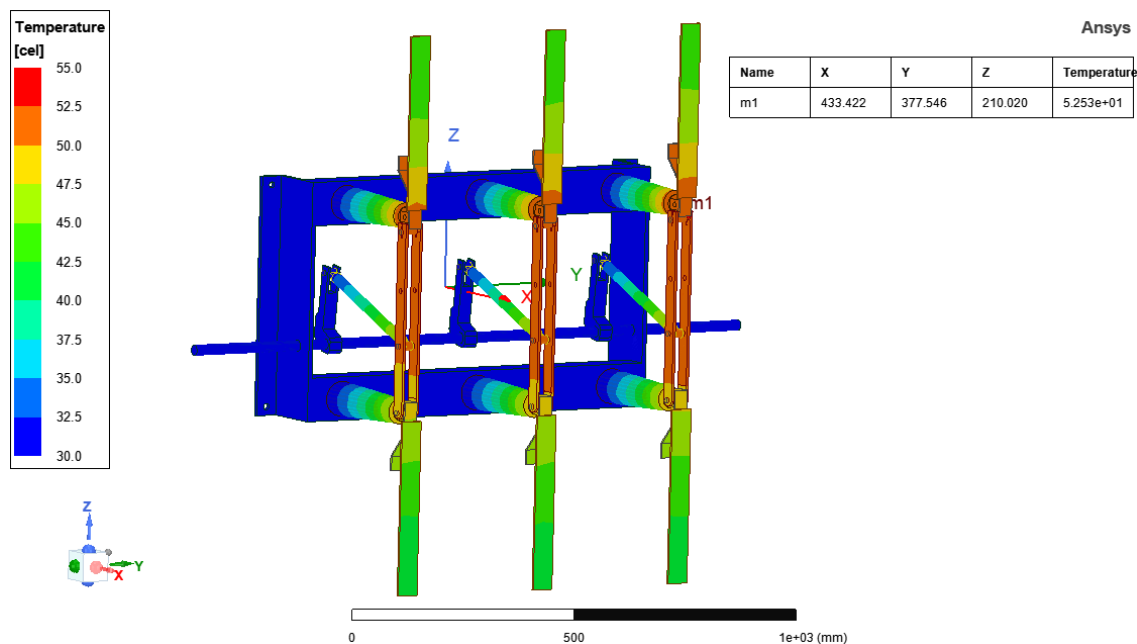
U harmonické analýzy (*Eddy current*) se zadávají pouze maximální hodnoty proudů, jejich fázové posuny, a v nastavení analýzy se zvolí frekvence 50 Hz. Pro trojfázový souměrný proud o efektivní hodnotě 630 A tedy platí, že amplitudy proudů jsou rovny hodnotě  $\sqrt{2} \cdot 630$  A a fázový posun je 0° pro fázi L1, 120° pro fázi L2 a 240° pro fázi L3.

Po provedení výpočtu, který trval přibližně 2 hodiny, je třeba v sekci *Field Overlays – Calculator* provést výpočty ohmických ztrát pro jednotlivé části proudovodné dráhy odpojovače. Vycházel jsem ze základního vztahu:

$$\Delta P = \int_0^V \Delta dp \cdot dV \quad (16)$$

V tepelné analýze (*Thermal*) je třeba v sekci *Excitations – Heat Generation* vložit k jednotlivým částem odpojovače příslušné ohmické ztráty. Přestup tepla do okolí modeluje *Boundaries – Convection*, kde jsem zvolil součinitel přestupu tepla prouděním  $\alpha = 6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$  pro plochy přípojníc, nožů a svorek odpojovače. Toto je spíše nižší hodnota pro klidný vzduch a přirozenou konvekci, reálné teploty tedy budou o něco menší, a systém tedy bude naddimenzovaný. Také platí, že součinitel přestupu tepla  $\alpha$  není pro různé teploty konstantní, ale se zvyšujícím se rozdílem teplot v porovnání s okolím jeho hodnota roste. Toto bohužel nejde v prostředí Ansys Mechanical zohlednit. Přípojnice v tomto případě představují tzv. tepelně dlouhou tyč, tzn. že na jejich konci by se měla vyskytnout teplota okolí. Pomocí funkce *Boundaries – Temperature* jsem nastavil na základnu odpojovače teplotu okolí 30 °C. Tepelná analýza již netrvá tak dlouho a je hotová během několika minut.





Obr. 39 (Rozložení teploty na povrchu odpojovače QZ1 při ustáleném oteplení)

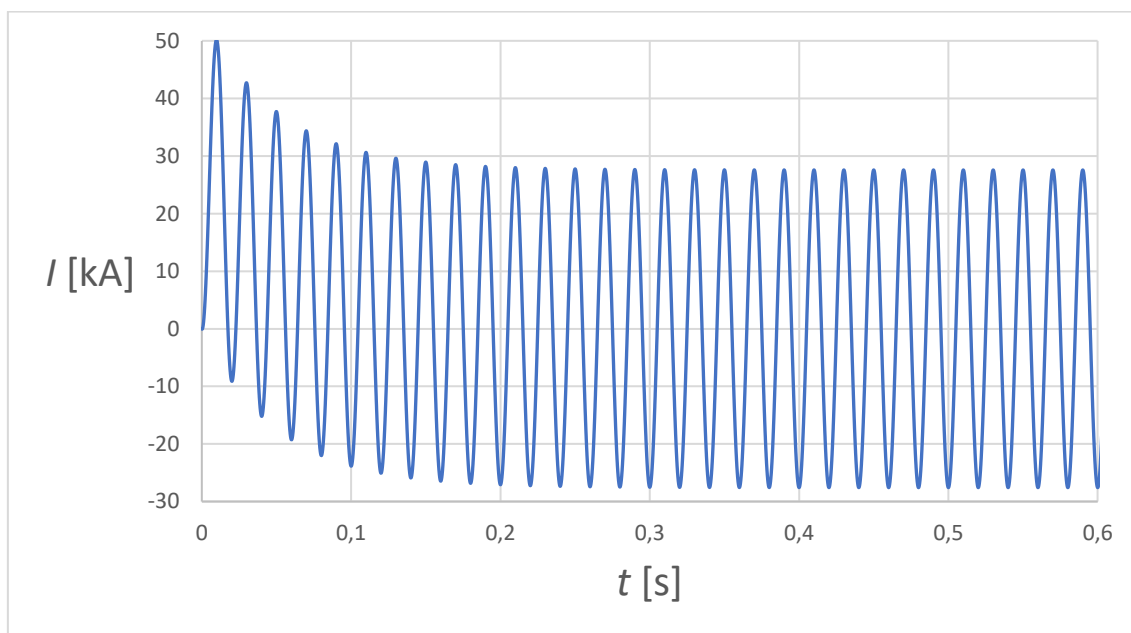
Na Obr. 39 vidíme, že nejvyšší teplota vyskytující se na částech odpojovače je 52,5 °C, konkrétně na vnějším noži krajní fáze L3. Tato hodnota nepřevyšuje maximální přípustnou teplotu, kontrola odpojovače z hlediska tepelných účinků ustáleného jmenovitého proudu tedy proběhla úspěšně. Dále si můžeme všimnout, že plastové izolátory představují velmi dobrý tepelný izolant, protože v nich strmě klesá teplota, a na rámu odpojovače lze změřit už jen teplotu okolí 30 °C. Dále je patrné, že teplota u horního kontaktního styku je přibližně o 3 °C vyšší než u dolního kontaktního styku. Důvodem pravděpodobně je rozdělení nožů na jejich horním konci a tím snížení účinného průřezu k přenosu proudu, a také fakt, že v horní části odpojovače se nacházejí dva kontaktní styky generující zvýšené teplo, oproti dolní části, kde je umístěn pouze jeden bodový kontaktní styk. Je také vidět, že s rostoucí vzdáleností přípojnic od svorek odpojovače klesá jejich teplota. V reálném zapojení odpojovače v rozvodně je délka přípojnic mnohem větší než v tomto modelu a na jejím konci se teplota bude blížit teplotě okolí. Přípojnice tedy představují tzv. tepelně dlouhou tyč.

Je nutno poznamenat, že tento model není zcela přesný, protože v něm není uvažováno s vlivem proudění vzduchu. V reálném systému například probíhá jev, kdy již oteplený vzduch stoupá nahoru. Proto se mohou vrchní části odpojovače více zahřívat. Teplotní rozdíl mezi spodní a horní částí by se pravděpodobně ještě navýšil. Tuto funkci program Ansys nemá. Numerický výpočet by musel proběhnout kombinací složitých analýz v několika dalších programech náročných na obsluhu. Já jsem použil pouze metodu zvolení součinitele přestupu tepla bez uvažování vlivu proudění. I přesto by měly být výsledky poměrně přesné.

### 3.4 Kontrola odpojovače z hlediska tepelných účinků při průchodu jmenovitého krátkodobého zkratového proudu

Zkratový proud má podle Tab. 2 efektivní hodnotu 20 kA a trvá 1 s. Na počátku vzniku zkratu se nachází přechodný děj. Pro kontrolu odpojovače zvolíme nejhorší možný stav, kdy zkratový obvod má ryze induktivní charakter a hodnota časové konstanty je extrémně dlouhá (50 ms). Průběh zkratového proudu je znázorněn na Obr. 40 a následující rovnicí:

$$i(t) = 20000 \cdot [\cos(\omega t) - e^{-20 \cdot t}]$$



Obr. 40 (Časový průběh zkratového proudu jedné fáze odpojovače)

Na Obr. 40 vidíme, že přechodný děj trvá přibližně 0,2 s a poté už protéká ustálený zkratový proud až do času 1 s, kdy je obvod nejpozději vypnut příslušným výkonovým vypínačem.

Takový průběh proudu lze řešit v programu Ansys Maxwell pomocí magnetické časově závislé analýzy (*Transient*). Avšak transientní tepelná analýza v prostředí Ansys Mechanical není k dispozici. Program disponuje pouze statickým typem analýzy. Ani v jiných programech využívajících numerické metody výpočtu fyzikálních polí se mi nepodařilo najít způsob, jakým by šlo oteplení jednosekundovým zkratovým proudem vyřešit. V současné době tedy pravděpodobně neexistuje způsob, jakým tento technický problém vyřešit pomocí numerických metod. Avšak tento obor stále prochází dynamickým rozvojem a je pravděpodobné, že v příštích několika letech již bude na trhu program, který si poradí i s tímto.

## Závěr

První závěr této diplomové práce spočívá v posouzení schopnosti dnešních počítačů provádět analýzy pomocí numerických metod. Jednoduché 2D úlohy, popřípadě středně složité 3D úlohy (jakou je například analýza jednotlivého elektrického přístroje – odpojovače) lze provádět i prostřednictvím běžných osobních počítačů. Výpočty však, zvláště u složitějších analýz, trvají velmi dlouho (řekněme v řádech hodin). Pro analýzy prostorově velkých a komplexních systémů, jakými jsou například rozvodny, je potřeba výkonnějších počítačů s velkou pamětí RAM. Proto bych firmám a vědeckým pracovníkům, kteří by chtěli začít s využíváním numerických metod výpočtu fyzikálních polí k materiálové a tvarové optimalizaci svých výrobků, doporučil pořízení výkonné výpočetní techniky. Vysoká pořizovací cena bude mít v tomto případě relativně krátkou návratnost, protože díky využití numerických metod při návrhu výrobku jsou firmy schopny ušetřit velké množství finančních prostředků například na materiál.

V praktické části této diplomové práce jsem pomocí statické elektrické analýzy v programu Ansys Maxwell úspěšně ověřil všechny izolační vzdálenosti mezi vodivými materiály v rozvodně HARD. Nejvyšší hodnota intenzity elektrického pole v prostoru rozvodny dosáhla 1,5 kV/mm. I pro toto místo je počáteční napětí samostatných výbojů 55 kV. Rozvodna je napájena ze sítě 22 kV, nejvyšší hodnota napětí, které se může vyskytnout na fázové přípojnici, je tedy 19760 V.

Dále jsem pomocí různých typů analýz ověřil celkový návrh odpojovače se jmenovitým napětím 36 kV. Pro ověření izolačních vzdáleností a potencionálního vzniku částečných výbojů jsem opět použil statickou elektrickou analýzu. Izolační vzdálenosti byly navrženy s velkou rezervou, což dokazuje fakt, že žádná nalezená hodnota počátečního napětí samostatných výbojů neklesla pod 150 kV.

Poté jsem využil statickou elektromagnetickou analýzu, díky níž jsem určil největší silové namáhání při průchodu zkratového proudu odpojovačem. Nejvyšší hodnota elektrodynamické síly působí na vnitřní nůž levé fáze L1. Její velikost činí 1,33 kN a působí, stejně jako všechny ostatní vzniklé síly, do místa kontaktního styku.

Nakonec jsem kombinací dvou analýz ověřil oteplení jednotlivých částí odpojovače při průchodu jmenovitého proudu. Vypočtené výkonové ztráty v jednotlivých částech modelu odpojovače pomocí harmonické elektromagnetické analýzy jsem použil jako vstupy k provedení tepelné mechanické analýzy, podle které se maximální teplota objevuje na horní svorce pravé fáze L3, konkrétně 52,5 °C. To je mnohem menší hodnota oproti maximální dovolené teplotě, která činí 80 °C. Je nutno podotknout, že jsem při výpočtu ustáleného oteplení neuvažoval vliv proudění vzduchu. I tak považuji kontrolu na maximální oteplení za dostatečnou. Způsob, jakým by se dalo pomocí numerických metod vypočítat oteplení při jednosekundovém zkratovém proudu, se mi nepodařilo nalézt. Program Ansys Maxwell totiž nedisponuje dynamickou tepelnou analýzou. Na tuto funkci si pravděpodobně budeme muset ještě pár let počkat.

Kontrola celkového návrhu odpojovače vn tedy byla podle očekávání úspěšně provedena.

## Seznam použité literatury

- [1] HAVELKA, Otto a kolektiv. *Elektrické přístroje*. Praha: SNTL, 1985.
- [2] KEPPERT, Svetozar. *Elektrické přístroje*. Ústřední knihovna VŠB-TU Ostrava. Ostrava: SNTL, 1990. ISBN 80-7078-010-x.
- [3] KAČOR, Petr. *Metoda konečných prvků v elektrotechnické praxi*. *Elektrorevue* [online]. 2003, 2003/04 [cit. 2021-12-29]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/03024/index.html>
- [4] HAVELKA, Otto. *Stavba elektrických přístrojů I*. Brno: Ediční středisko VUT Brno, 1984.
- [5] VÁVRA, Zdeněk a Vladimír NOVOTNÝ. *Stavba elektrických přístrojů II*. Brno: Ediční středisko VUT Brno.
- [6] HAVELKA, Otto a Zdeněk VÁVRA. *Podklady a příklady pro navrhování elektrických přístrojů I*. Brno: Ediční středisko VUT Brno, 1985.
- [7] ANTONÍN, Veverka. *Technika vysokých napětí*. Praha: SNTL, 1978.
- [8] *Dimenzování vodičů a kabelů* [online]. [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/260/03.html>