



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

## ANALÝZA MECHANICKÉHO NAMÁHÁNÍ PŘI ZKRATU VE VZDUCHEM IZOLOVANÉM ROZVÁDĚČI VN

ANALYSIS OF MECHANICAL STRESS DURING SHORT CIRCUIT IN AN AIR-INSULATED MV  
SWITCHGEAR

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jan Bártů

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jaroslava Orságová, Ph.D.

BRNO 2017



# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektroenergetika**  
Ústav elektroenergetiky

**Student:** Bc. Jan Bártů

**ID:** 154676

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2016/17

**NÁZEV TÉMATU:**

## **Analýza mechanického namáhání při zkratu ve vzduchem izolovaném rozváděči vn**

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

1. Analyzujte silové účinky magnetického pole zkratového proudu v rozváděči vn se zaměřením na paže a kontaktní systém vypínače.
2. Vytvořte model v prostředí programu ANSYS a proveďte jeho zjednodušení.
3. Analýzu proveďte pro jednu nebo více geometrických konfigurací kontaktního systému.
4. Zhodnoťte dosažené výsledky (působící síly, deformace materiálu) s ohledem na mechanické vlastnosti konstrukce.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

podle pokynů vedoucího práce

**Termín zadání:** 6.2.2017

**Termín odevzdání:** 22.5.2017

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Jaroslava Orságová, Ph.D.

**Konzultant:**

**doc. Ing. Petr Toman, 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.

Bibliografická citace práce:

BÁRTŮ, J. *Analýza mechanického namáhání při zkratu ve vzduchem izolovaném rozváděči vn*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 93 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jaroslava Orságová, Ph.D.

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma *Analýza mechanického namáhání při zkratu ve vzduchem izolovaném rozváděči vn* 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 části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.“

V Brně dne: 15. 05. 2017

.....

## ABSTRAKT

Tato diplomová práce je zaměřena na problematiku silových účinků magnetického pole zkratového proudu.

V první části práce bylo úkolem provést analýzu vzájemného silového působení tří fázových přípojnic během třípólového zkratu. Analýza byla provedena v programu Ansys Maxwell. Následně jsem správnost této analýzy ověřil numerickým výpočtem.

Hlavním úkolem praktické části práce zadané firmou ABB s.r.o, bylo zanalyzovat silové účinky zkratového proudu v rozvaděči vn se zaměřením na paže a kontaktní systém vypínače. Přesněji byly simulovány 3 konfigurace zjednodušeného vypínače VD4, dva typy kontaktního systému vypínače VD4 a model lineární konfigurace vypínače. Úkolem bylo vypočítat působící síly vzniklé při třífázovém zkratu na proudovodnou dráhu paží a kontaktního systému vypínače VD4 a nasimulovat působení sil na tyto proudové části.

Pro jednotlivé modelování sestav, výpočty a simulace byly použity následující výpočetní programy: SolidWorks 2014, Ansys Maxwell 16.0, Ansys Workbench 14.5.

Pomocí 3D CAD softwaru SolidWorks 2014 byly vymodelovány zjednodušené sestavy vypínačů a kontaktních systémů, které byly importovány do softwarového prostředí Ansys Maxwell, ve kterém byly vypočítány silové účinky magnetického pole zkratového proudu. Za pomoci programu Ansys Workbench bylo nasimulováno působení sil na proudovodné části vypínačů a vykresleny vzniklé deformace materiálů s ohledem na mechanické vlastnosti konstrukce.

Analýza silových účinků magnetického pole byla prováděna pro zadanou statickou hodnotu zkratového proudu.

**KLÍČOVÁ SLOVA:** Mechanické účinky zkratového proudu; analýza mechanického namáhání při zkratu; vypínač; vypínač VD4; rozvaděč; třífázový zkrat; deformace; statická analýza; ekvivalentní napětí; MKP; Ansys Maxwell 16.0; Ansys Workbench 14.5; Solid Works 2014; ABB s.r.o.

## **ABSTRACT**

This Master thesis is based on problems of force effects of the magnetic field of short-circuit current.

Firstly, I analysed the force action of the three phase busbars during the three-pole short circuit. The analysis was performed in the Ansys Maxwell program and I verified the correctness of the analysis by numerical calculation.

The second practical part was executed for ABB company. The main task was to analyse the force effects of the short-circuit current in the HV switchgear with focusing on the arms and contact system of the circuit breaker. The simulations of the following configurations were performed in more details: three configurations of the simplified VD4 circuit breaker, two types of VD4 circuit-breaker contact systems and a linear circuit breaker configuration model. The objective was to calculate the forces acting on the current path of the arms and contact system of the VD4 circuit breaker during the three-phase short-circuit and to simulate the effects of forces on these current parts.

For modelling of individual assemblies, calculations and simulations I used: SolidWorks 2014, Ansys Maxwell 16.0 and Ansys Workbench 14.5 programs.

With SolidWorks 2014 3D CAD software were modelled simplified assemblies of circuit breakers and contact systems. These systems were imported into the Ansys Maxwell software, where the force effects of the magnetic field of the short-circuit current were calculated. In Ansys Workbench programme was simulated the effect of forces on the current circuit breakers. Moreover, the final deformations of the materials (with respect to the mechanical properties of the structure) were plotted.

The analysis of force effects of the magnetic field was performed for the specified static short - circuit current value.

### **KEY WORDS:**

Mechanical effects of short circuit current; analysis of mechanical stress during short circuit; circuit breaker; circuit breaker VD4; switchgear; three-phase short circuit; deformation; static analysis; equivalent stress; FEM; Ansys Maxwell 16.0; Ansys Workbench 14.5; Solid Works 2014; ABB s.r.o.

## **Poděkování**

Děkuji vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jaroslavě Orságové, Ph.D. za podnětné návrhy k práci, účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc během vypracovávání diplomové práce.

Dále děkuji Ing. Emilu Kalinovi z firmy ABB za odborné konzultace a cenné rady v průběhu zpracování praktických analýz diplomové práce.

V Brně dne .....

Podpis autora.....

**OBSAH**

<b>SEZNAM OBRÁZKŮ.....</b>	<b>9</b>
<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>12</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>13</b>
<b>1 ÚVOD .....</b>	<b>15</b>
<b>2 ÚČINKY ZKRATOVÝCH PROUDŮ.....</b>	<b>16</b>
<b>2.1 TEPELNÉ ÚČINKY .....</b>	<b>16</b>
<b>2.2 MECHANICKÉ ÚČINKY.....</b>	<b>16</b>
<b>3 MECHANICKÉ ÚČINKY ELEKTRICKÉHO PROUDU .....</b>	<b>17</b>
<b>3.1 VZNIK ELEKTRODYNAMICKÝCH SIL.....</b>	<b>17</b>
3.1.1 MOŽNOSTI VZNIKU ELEKTRODYNAMICKÝCH SIL .....	17
<b>3.2 ČASOVÝ PRŮBĚH PROUDŮ PŘI TROJPÓLOVÉM ZKRATU:.....</b>	<b>21</b>
<b>4 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ (MKP) .....</b>	<b>22</b>
<b>4.1 POSTUP PŘI APLIKACI MKP .....</b>	<b>22</b>
<b>5 MODELOVÁNÍ SILOVÝCH ÚČINKŮ MAGNETICKÉHO POLE.....</b>	<b>25</b>
<b>5.1 MODEL TŘÍFÁZOVÝCH PŘÍPOJNIC .....</b>	<b>25</b>
<b>5.2 STATICKÁ ANALÝZA .....</b>	<b>26</b>
<b>5.3 DYNAMICKÁ ANALÝZA .....</b>	<b>28</b>
<b>5.4 ZAHRNUTÍ VLIVU IZOLÁTORŮ A ROZPĚREK NA SÍLY MEZI PŘÍPOJNICEMI.....</b>	<b>29</b>
5.4.1 STATICKÁ ANALÝZA .....	29
5.4.2 DYNAMICKÁ ANALÝZA.....	30
<b>6 VERIFIKACE MODELU POMOCÍ VÝPOČTU .....</b>	<b>31</b>
<b>6.1 ODVOZENÍ SÍLY PŮSOBÍCÍ NA PROSTŘEDNÍ VODIČ .....</b>	<b>31</b>
<b>6.2 VÝPOČET PŮSOBÍCÍCH SIL.....</b>	<b>33</b>
6.2.1 SÍLA PŮSOBÍCÍ NA PROSTŘEDNÍ VODIČ .....	33
6.2.2 SÍLY PŮSOBÍCÍ NA KRAJNÍ VODIČE.....	33
<b>7 ROZVÁDĚČE VN.....</b>	<b>35</b>
<b>7.1 ROZDĚLENÍ PROSTORU ROZVÁDĚČE VN.....</b>	<b>35</b>
7.1.1 PROSTOR VYPÍNAČE.....	36
7.1.2 PROSTOR PŘÍPOJNIC .....	36
7.1.3 PROSTOR KABELŮ .....	36
7.1.4 NÍZKONAPĚŤOVÝ PROSTOR .....	37
7.1.5 KOMPAKTNÍ KANÁL PRO ODVOD HORKÝCH PLYNŮ .....	37
<b>7.2 VAKUOVÝ VYPÍNAČ VD4.....</b>	<b>37</b>
<b>8 POŽADAVKY ZADAVATELE NA ANALÝZU A TYPY ZKOUMANÝCH ZAŘÍZENÍ .....</b>	<b>40</b>
<b>8.1 POŽADOVANÉ ANALÝZY .....</b>	<b>40</b>
<b>8.2 ZADANÉ PARAMETRY PRO SIMULACI OD ZADAVATELE .....</b>	<b>40</b>

---

8.2.1 NASTAVENÍ PROUDU PRO ANALÝZU: .....	41
8.2.2 NASTAVENÍ ZKRATOVÉHO PROUDU V ANALYZOVANÝCH MODELECH .....	42
<b>8.3 MODEL Y V PROSTŘEDÍ ANSYS A JEHO ZJEDNODUŠENÍ .....</b>	<b>44</b>
8.3.1 ZJEDNODUŠENÉ MODEL Y VYPÍNAČŮ VD4 .....	44
8.3.2 MODEL Y V PROSTŘEDÍ ANSYS MAXWELL .....	48
8.3.3 MODEL Y V PROSTŘEDÍ ANSYS WORKBENCH .....	50
<b>9 ANALÝZA SILOVÝCH ÚČINKŮ MAGNETICKÉHO POLE NA VYPÍNAČ .....</b>	<b>52</b>
<b>9.1 MODEL Y VYPÍNAČE SE ZAMĚŘENÍM NA PAŽE A PÓLY .....</b>	<b>52</b>
9.1.1 VYPÍNAČ VD4/P12 P.150 .....	52
9.1.2 VYPÍNAČ VD4/ P12 P.210 .....	55
9.1.3 VYPÍNAČ VD4/P24 P.210 .....	58
9.1.4 ZHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ .....	61
<b>9.2 MODEL Y VYPÍNAČE SE ZAMĚŘENÍM NA KONTAKTNÍ SYSTÉMY (RŮŽICE) .....</b>	<b>63</b>
9.2.1 KONTAKTNÍ SYSTÉM VYPÍNAČE 12 KV - 1250 A - 32 KA .....	63
9.2.2 KONTAKTNÍ SYSTÉM VYPÍNAČE 12 KV - 2000 A - 50 KV .....	73
<b>9.3 MODEL LINEÁRNÍ KONFIGURACE VYPÍNAČE .....</b>	<b>83</b>
9.3.1 SIMULACE SILOVÝCH ÚČINKŮ ZKRATOVÝCH PROUDŮ .....	83
9.3.2 ZHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ .....	86
<b>10 ZÁVĚR .....</b>	<b>87</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA .....</b>	<b>89</b>
<b>11 PŘÍLOHA A .....</b>	<b>90</b>



## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 3-1: Síla působící na proudové vlákno [3].</i>	17
<i>Obr. 3-2: Síla působící mezi dvěma ideálními vodiči.</i>	18
<i>Obr. 3-3: Průběh síly působící na pravoúhlý proudový záhyb [3].</i>	18
<i>Obr. 3-4: Superpozice výsledné síly působící na spodní úsek dvojitého pravoúhlého záhybu [3].</i>	19
<i>Obr. 3-5: Síla vznikající při změně průřezu proudové dráhy [3].</i>	19
<i>Obr. 3-6: Přitažlivá síla mezi proudovodičem a feromagnetickým rozhraním [3].</i>	20
<i>Obr. 3-7: Průběh proudů a působících sil na jednotlivé fáze při třífázovém zkratovém proudu.</i>	21
<i>Obr. 4-1: Základní rovinné prvky [3].</i>	22
<i>Obr. 4-2: Prostorové elementární prvky [3].</i>	23
<i>Obr. 5-1: Výkres přípojnicového systému.</i>	25
<i>Obr. 5-2: Přípojnicový model v prostředí Ansys Maxwell.</i>	26
<i>Obr. 5-3: Průběhy proudů v prostředí Ansys Maxwell funkcí Magnetic Transient.</i>	28
<i>Obr. 5-4: Výsledné průběhy sil v ose x v prostředí Ansys Maxwell funkcí Magnetic Transient.</i>	28
<i>Obr. 5-5: Výsledné průběhy sil v ose x při zahrnutí vlivu materiálu izolátorů a rozpěrek.</i>	30
<i>Obr. 6-1: Graf pro určení koeficientu tvaru[5].</i>	32
<i>Obr. 7-1: Rozdělení prostoru vypínače vn (typ UniGear ZS1)[9].</i>	35
<i>Obr. 7-2: Vypínač typu VD4 pro vn [10].</i>	37
<i>Obr. 7-3: Vakuové zhášedlo [9].</i>	38
<i>Obr. 7-4: Vakuové zhášedlo zalité v pólu z pryskyřice [10].</i>	38
<i>Obr. 7-5: Kontakty zhášedla[10].</i>	38
<i>Obr. 7-6: Průběh proudu a napětí během jednofázového vypínání ve vakuu[10].</i>	38
<i>Obr. 8-1: Analyzované vypínače - zleva: VD4/P12 p.150, VD4/P12 p.210, VD4/P24 p.210.</i>	41
<i>Obr. 8-2: Průběh zkratového proudu dle normy ČSN EN 62271-100[11].</i>	41
<i>Obr. 8-4: Nastavení hodnoty a směru zkratového proudu při simulacích kontaktních systémů.</i>	42
<i>Obr. 8-3: Popis fází přípojnic a nastavované směry proudu.</i>	42
<i>Obr. 8-5: Popis fází přípojnic a nastavované směry proudu u lineární konfigurace vypínače.</i>	43
<i>Obr. 8-6: Popis modelu vypínače, typ: VD4/P12 p.150.</i>	44
<i>Obr. 8-7: Výkres modelů použitých pro analýzu v programu ANSYS.</i>	45
<i>Obr. 8-8: Model kontaktního systému, pro vypínač typu VD4/12 p.210.</i>	46
<i>Obr. 8-9: Výkres simulovaných modelů kontaktních systémů použitých pro analýzu v programu Ansys.</i>	46
<i>Obr. 8-10: Výkres lineární konfigurace vypínače.</i>	47

<i>Obr. 8-11: Ohraničená oblast regionu, ve kterém probíhal výpočet působících sil.</i>	49
<i>Obr. 8-12: Uchycení modelů vypínačů VD4 a kontaktních systémů pomocí funkce Fixed Support.</i>	51
<i>Obr. 8-13: Uchycení lineární konfigurace vypínače.</i>	51
<i>Obr. 9-1: Vypínač VD4/P12 p.150 s vyznačenými směry zkratového proudu.</i>	52
<i>Obr. 9-2: Velikosti a směr působících sil na proudovodnou dráhu vypínače VD4/P12 p.150.</i>	53
<i>Obr. 9-4: Ekvivalentní napětí na proudové části vypínače VD4/P12 p.150.</i>	54
<i>Obr. 9-3: Simulovaná deformace proudové dráhy vypínače VD4/P12 p.150. Měřítko 63:1.</i>	54
<i>Obr. 9-5: Vypínač VD4/P12 p.210 s vyznačenými směry zkratového proudu.</i>	55
<i>Obr. 9-6: Velikosti a směr působících sil na proudovodnou dráhu vypínače VD4/P12 p.210.</i>	56
<i>Obr. 9-7: Simulovaná deformace proudové dráhy vypínače VD4/P12 p.210. Měřítko 66:1.</i>	56
<i>Obr. 9-9: Ekvivalentní napětí na proudovodné části vypínače VD4/P12 p.210. Měřítko 66:1.</i>	57
<i>Obr. 9-8: Ekvivalentní napětí na pravouhlé záhyby vypínače VD4/P12 p.210. Měřítko 66:1.</i>	57
<i>Obr. 9-10: Vypínač VD4/P24 p.210 s vyznačenými směry zkratového proudu.</i>	58
<i>Obr. 9-11: Velikosti a směr působících sil na proudovodnou dráhu vypínače VD4/P24 p.210.</i>	59
<i>Obr. 9-12: Simulovaná deformace proudové dráhy vypínače VD4/P24 p.210. Měřítko 38:1.</i>	59
<i>Obr. 9-13: Ekvivalentní napětí na proudovodné části vypínače VD4/P24 p.210. Měřítko 38:1.</i>	60
<i>Obr. 9-14: Nastavení směru a velikosti proudu v analýze pro L1 ruzice 12kV-1250A-32kV.</i>	63
<i>Obr. 9-15: Největší síly působící na prsty horní ruzice 12kV-1250A-32kV, <math>I_{p1} = 40kA</math>.</i>	64
<i>Obr. 9-16: Nejmenší síly působící na prsty horní ruzice 12kV-1250A-32kV, <math>I_{p1} = 40kA</math>.</i>	64
<i>Obr. 9-17: Největší síly působící na prsty dolní ruzice 12kV-1250A-32kV, <math>I_{p1} = 40kA</math>.</i>	65
<i>Obr. 9-18: Nejmenší síly působící na prsty dolní ruzice 12kV-1250A-32kV, <math>I_{p1} = 40kA</math>.</i>	65
<i>Obr. 9-19: Deformace fáze L1 ruzice 12kV-1250A-32kV, <math>I_{p1} = 40kA</math>. Měřítko 33000:1.</i>	66
<i>Obr. 9-20: Ekvivalentní napětí horní ruzice 12kV-1250A-32kV, <math>I_{p1} = 40kA</math>.</i>	66
<i>Obr. 9-21: Ekvivalentní napětí dolní ruzice 12kV-1250A-32kV, <math>I_{p1} = 40kA</math>.</i>	67
<i>Obr. 9-22: Nastavení směru a velikosti proudu v analýze pro L2 ruzice 12kV-1250A-32kA.</i>	68
<i>Obr. 9-24: Nejmenší síly působící na prsty horní ruzice 12kV-1250A-32kV, <math>I_{p2} = -80kA</math>.</i>	69
<i>Obr. 9-23: Největší síly působící na prsty horní ruzice 12kV-1250A-32kV, <math>I_{p2} = -80kA</math>.</i>	69
<i>Obr. 9-25: Největší síly působící na prsty dolní ruzice 12kV-1250A-32kV, <math>I_{p2} = -80kA</math>.</i>	70
<i>Obr. 9-26: Nejmenší síly působící na prsty dolní ruzice 12kV-1250A-32kV, <math>I_{p2} = -80kA</math>.</i>	70
<i>Obr. 9-27: Deformace působící na ruzice 12kV-1250A-32kV, <math>I_{p2} = -80kA</math>.</i>	71
<i>Obr. 9-28: Ekvivalentní napětí horní ruzice 12kV-1250A-32kV, <math>I_{p2} = -80kA</math>.</i>	71
<i>Obr. 9-29: Ekvivalentní napětí dolní ruzice 12kV-1250A-32kV, <math>I_{p2} = -80kA</math>.</i>	72
<i>Obr. 9-30: Nastavení proudu v analýze pro L1 ruzice 12kV-2000A-50kV.</i>	73

---

<i>Obr. 9-31: Největší síly působící na prsty horní růžice 12kV-2000A-50kV, <math>I_{p1} = 62,5\text{kA}</math>.</i>	74
<i>Obr. 9-32: Nejmenší síly působící na prsty horní růžice 12kV-2000A-50kV, <math>I_{p1} = 62,5\text{kA}</math>.</i>	74
<i>Obr. 9-33: Největší síly působící na prsty dolní růžice 12kV-2000A-50kV, <math>I_{p1} = 62,5\text{kA}</math>.</i>	75
<i>Obr. 9-34: Nejmenší síly působící na prsty dolní růžice 12kV-2000A-50kV, <math>I_{p1} = 62,5\text{kA}</math>.</i>	75
<i>Obr. 9-36: Ekvivalentní napětí horní růžice 12kV-2000A-50kV, <math>I_{p1} = 62,5\text{kA}</math>.</i>	76
<i>Obr. 9-35: Deformace působící na růžice 12kV-2000A-50kV, <math>I_{p1} = 62,5\text{kA}</math>.</i>	76
<i>Obr. 9-37: Ekvivalentní napětí spodní růžice 12kV-2000A-50kV, <math>I_{p1} = 62,5\text{kA}</math>.</i>	77
<i>Obr. 9-38: Nastavení proudu v analýze pro L2 růžice 12kV-2000A-50kV.</i>	78
<i>Obr. 9-39: Největší síly působící na prsty horní růžice 12kV-2000A-50kV, <math>I_{p2} = -125\text{kA}</math>.</i>	79
<i>Obr. 9-40: Nejmenší síly působící na prsty horní růžice 12kV-2000A-50kV, <math>I_{p2} = -125\text{kA}</math>.</i>	79
<i>Obr. 9-41: Největší síly působící na prsty spodní růžice 12kV-2000A-50kV, <math>I_{p2} = -125\text{kA}</math>.</i>	80
<i>Obr. 9-42: Nejmenší síly působící na prsty spodní růžice 12kV-2000A-50kV, <math>I_{p2} = -125\text{kA}</math>.</i>	80
<i>Obr. 9-44: Ekvivalentní napětí horní růžice 12kV-2000A-50kV, <math>I_{p2} = -125\text{kA}</math>.</i>	81
<i>Obr. 9-43: Deformace působící na růžice 12kV-2000A-50kV, <math>I_{p2} = -125\text{kA}</math>.</i>	81
<i>Obr. 9-45: Ekvivalentní napětí spodní růžice 12kV-2000A-50kV, <math>I_{p2} = -125\text{kA}</math>.</i>	82
<i>Obr. 9-46: Lineární konfigurace vypínače s vyznačenými směry zkratového proudu.</i>	83
<i>Obr. 9-47: Velikosti a směr působících sil na proudovodnou dráhu lin. konfigurace vypínače.</i>	84
<i>Obr. 9-48: Simulovaná deformace proudové dráhy lin. konfigurace vypínače. Měřítko 38:1.</i>	84
<i>Obr. 9-49: Ekvivalentní napětí na lin. konfiguraci vypínače. Měřítko 38:1.</i>	85
<i>Obr. 9-50: Detail vykreslení hustoty sil v prostřední fázi lin. konfigurace vypínače.</i>	85

## SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 5-1: Vypočítané proudy pro časový okamžik <math>t = 0,01s</math>.</i>	27
<i>Tab. 5-2: Výsledky výpočtu pomocí funkce Magnetic Magnetostatic:</i>	27
<i>Tab. 5-3: Srovnání vypočítaných sil při uvažování vlivu izolátorů a rozpěrek.</i>	29
<i>Tab. 6-1: Verifikace modelu numerickým výpočtem.</i>	34
<i>Tab. 8-1: Všeobecné charakteristiky analyzovaných vypínačů VD4.</i>	40
<i>Tab. 8-2: Přehled materiálů použitých v analýze:</i>	49
<i>Tab. 8-3: Tabulka použitých materiálů v Ansys Workbench.</i>	50
<i>Tab. 9-1: Výsledky výpočtu sil pro vypínač- VD4/P12 p.150- na proudovodné dráhy paží a pólů.</i>	53
<i>Tab. 9-2: Výsledky výpočtu sil pro vypínač- VD4/P12 p.210- na proudové dráhy paží a pólů.</i>	55
<i>Tab. 9-3: Výsledky výpočtu sil pro vypínač- VD4/P24 p.210- na proudové dráhy paží a pólů.</i>	58
<i>Tab. 9-4: Srovnání velikostí sil působících na póly analyzovaných vypínačů VD4.</i>	61
<i>Tab. 9-5: Porovnání maximálních hodnot sil při nastavovaných zkratových proudech.</i>	68
<i>Tab. 9-6: Porovnání maximálních hodnot sil při nastavovaných zkratových proudech.</i>	78
<i>Tab. 9-7: Působící síly na póly lineární konfiguraci vypínače.</i>	83
<i>Tab. 11-1: Výsledky působících sil na prsty růžice 12kV-1250A-32kV, pro <math>I_{p1} = 40</math> kA.</i>	90
<i>Tab. 11-2: Výsledky působících sil na prsty růžice 12kV-1250A-32kV, pro <math>I_{p2} = -80</math> kA.</i>	90
<i>Tab. 11-3: Výsledky působících sil na prsty růžice 12kV-2000A-50kV, pro <math>I_{p1} = 62,5</math> kA.</i>	91
<i>Tab. 11-4: Výsledky působících sil na prsty růžice 12kV-2000A-50kV, pro <math>I_{p2} = -125</math> kA.</i>	92

## SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

$a$ [m]	Vzdálenost vodičů
$a_{m1}$ [m]	Účinná vzdálenost mezi přípojnici
$B$ [T]	Magnetická indukce
$c$ [J/cm <sup>3</sup> /°C]	Specifické teplo vodiče při 0°C
$E$ [Pa]	Youngův modul pružnosti
$F$ [N]	Síla
$H$ [A/m]	Intenzita
$i$ [A]	Proud
$I_r$ [A]	Jmenovitý proud
$I_k$ [kA]	Jmenovitý krátkodobý výdržný proud
$I_p$ [kA]	Jmenovitý dynamický výdržný proud
$I_{pi}$ [kA]	Jmenovitý dynamický výdržný proud nastavovaný v $i$ -fázích
$I_{sc}$ [kA]	Jmenovitý zkratový vypínací proud
$k_{1m}$ [-]	Koeficient tvaru pro první a $m$ -tou přípojnici, kde $m=2,3$
$I_k''$ [A]	Počáteční souměrný rázový zkratový proud
$l$ [m]	Délka vodičů
$N_j^{(e)}$ [-]	Tvarová funkce elementu $e$ a $j$ -tého uzlu
$S$ [m <sup>2</sup> ]	Průřez vodiče
$t$ [s]	Doba trvání zkratu
$T_a$ [-]	Časová konstanta
$U_r$ [kV]	Jmenovité napětí
$\alpha$ [rad/s]	Fázový posun
$\phi_\alpha$ [-]	Uzlové hodnoty potenciálu
$\phi_j$ [-]	Hodnota potenciálu $j$ -tého uzly
$\mu_0$ [H/m]	Permeabilita vakua
$\delta_x$ [%]	relativní chyba
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Objemová hmotnost (hustota)
$\rho_r$ [ $\Omega$ mm <sup>2</sup> /m]	Měrný odpor
$\rho_r(\theta)$ [ $\Omega$ m; °C]	rezistivita vodiče, která je funkcí teploty
$\nu$ [-]	Poissonova konstanta
$\omega$ [rad/s]	Úhlová frekvence

<i>CAD</i>	<i>Computer - aided design</i>
<i>FEM</i>	<i>Finite Element Method</i>
<i>MKP</i>	<i>Metoda konečných prvků</i>

# 1 ÚVOD

Diplomová práce se zabývá analýzou elektromechanických poměrů při zkratu ve vzduchem izolovaném rozvaděči vn. Zkraty patří k poruchám, které zatěžují rozvaděče mechanickými a tepelnými účinky. V této práci jsou analyzovány pouze mechanické účinky zkratového proudu.

Typicky jsou rozvaděče konstruované na jmenovitou velikost zkratového proudu v řádu desítek kiloampér, při zkratu ovšem může špičková hodnota zkratového proudu převyšovat i 100 kA. Při těchto proudech už v rozvodných zařízeních vn vznikají zásadní mechanické účinky, které je nutné při návrhu zařízení zohlednit. Vzhledem k vysokým nákladům na empirické ověřování je proto výhodné použít výpočetní analytické ověření.

K výpočtu silových účinků magnetického pole zkratového proudu bylo využíváno softwarové prostředí Ansys. Výpočet sil byl proveden v rámci programu Ansys Maxwell. Modelování mechanického působení těchto sil bylo řešeno v programu Ansys Workbench. Modely použité v této diplomové práci byly konstruovány v 3D modelovacím programu SolidWorks 2014.

Vypracovaná práce je strukturována do dvou hlavních oddílů. Hlavním cílem první části práce bylo naučit se pracovat s obsáhlými funkcemi programu Ansys Maxwell. V rámci této části práce bylo úkolem zanalyzovat vzájemné silové působení tří fázových přípojníc během třípólového zkratu v programu Ansys Maxwell a následně správnost této analýzy verifikovat numerickým výpočtem. Toto numerické ověření je vypracováno v souladu s platnou normou ČSN 60865-1 ed. 2 Zkratové proudy a s pomocí výpočetního postupu uvedeného v [7].

Druhá část práce byla již zadána zadavatelem diplomové práce - firmou ABB s.r.o. V rámci této části bylo úkolem analyzovat silové účinky magnetického pole zkratového proudu v rozvaděči vn se zaměřením na paže a kontaktní systém vypínače VD4. Analýza byla provedena pro 3 geometrické konfigurace paží a pólů proudové dráhy používaných vypínačů a dvou geometrických konfigurací kontaktního systému vypínače. Na závěr práce je ověřována lineární konfigurace vypínače a porovnává velikost vypočítaných sil a deformační namáhání vzhledem k analyzovaným vypínačům VD4.

## 2 ÚČINKY ZKRATOVÝCH PROUDŮ

Zkraty zatěžují vodiče tepelnými a mechanickými účinky.

### 2.1 Tepelné účinky

Průchodem zkratového proudu se vodiče rychle zahřívají. Z důvodu krátké doby trvání zkratového proudu způsobí zkrat pouze oteplení vlastního jádra vodičů. Veškeré teplo vyvinuté zkratovým proudem se akumuluje a tento děj považujeme za adiabatický:

Přivedená elektrická energie se rovná pouze energii použité na ohřev vodiče:

$$Ri^2(t)dt = c \cdot V \cdot d\vartheta \quad (2.1.1)$$

$$\rho_r \cdot \frac{l}{S} \cdot i^2(t)dt = c \cdot S \cdot l \cdot d\vartheta \quad (2.1.2)$$

$$i^2(t)dt = \frac{c \cdot S^2}{\rho_r(\vartheta)} d\vartheta \quad (2.1.3)$$

kde:  $l$ ... délka vodiče

$S$ ... průřez vodiče

$V$ ... objem jádra vodiče

$i$ ... časově proměnný zkratový proud

$c$ ... specifické teplo vodiče při 0°C (viz. v tab.19 v [1])

$\rho_r(\vartheta)$ ... rezistivita vodiče, která je funkcí teploty

### 2.2 Mechanické účinky

Mezi vodiči, které jsou protékány zkratovým proudem, vzniká elektrodynamický ráz, způsobovaný nárazovým zkratovým proudem. V důsledku toho mohou vzniknout mezi souběžnými vodiči velké mechanické síly, které se podle okamžitého směru proudu snaží vodiče buď navzájem odpudit nebo přitáhnout[2].

V dalším pokračování práce jsou analyzovány pouze mechanické účinky zkratového proudu.



## 3 MECHANICKÉ ÚČINKY ELEKTRICKÉHO PROUDU

### 3.1 Vznik elektrodynamických sil

Protéká-li proudovou dráhou elektrického zařízení proud, vytvoří se ve vzdálenosti  $a$  od vodivých částí magnetické pole o určité intenzitě  $H$ :

$$H = \frac{i}{2 \cdot \pi \cdot a} \quad (3.1.1)$$

V případě interakce více magnetických polí vznikají síly, které způsobují mechanické namáhání.

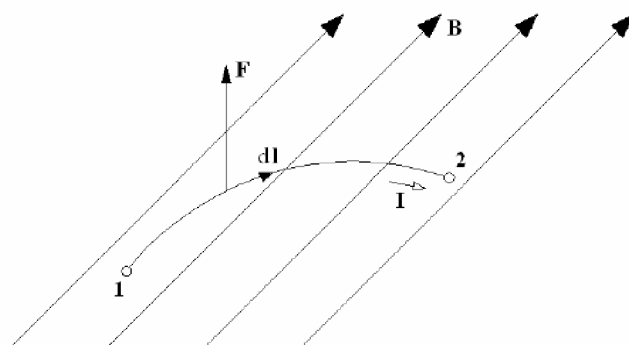
#### 3.1.1 Možnosti vzniku elektrodynamických sil

Elektrodynamické síly v magnetických polích elektrických přístrojů vznikají v těchto základních případech[2]:

##### a) při průtoku proudu proudovodnou dráhou

Vektorově lze sílu vyjádřit jako síla působící v magnetickém poli na element proudového vlákna  $d\vec{l}$  s proudem  $i$ :

$$d\vec{F} = i(d\vec{l} \times \vec{B}) \quad (3.1.2)$$



Obr. 3-1: Síla působící na proudové vlákno [3].

##### b) při více proudových drahách

Uvažujeme-li dva rovnoběžné, nekonečně dlouhé vodiče uložené ve vzduchu ( $\mu_r = 1$ ) se zanedbatelným průřezem, budou na sebe navzájem působit silou o velikosti (viz. Obr. 3-2):

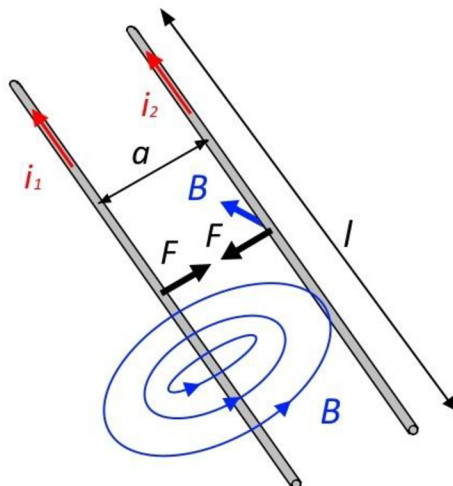
$$F = B \cdot i_1 \cdot l \quad (3.1.3)$$

kde:  $B$  je velikost magnetické indukce ve vzdálenosti  $a$  od vodiče:

$$B = \mu_0 \cdot H \quad (3.1.4)$$

Po dosazení vzorce (3.1.3) do (3.1.4) a upravení je celková působící síla mezi dvěma vodiči [1]:

$$F = \frac{2 \cdot i_1 \cdot i_2}{a} \cdot 10^{-7} \cdot l \quad (3.1.5)$$



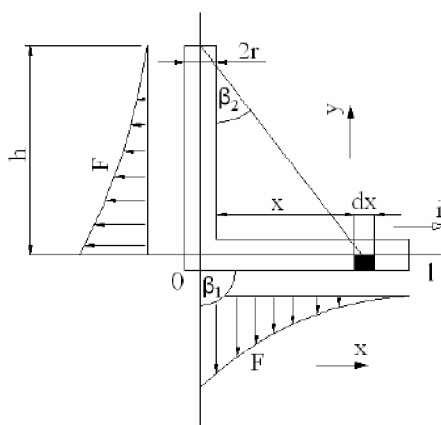
Obr. 3-2: Síla působící mezi dvěma ideálními vodiči.

### c) při zakřivení proudové dráhy

Předpokládáme-li zakřivenou proudovodnou dráhu s procházejícím proudem, budou vlivem působení magnetického pole vznikat elektrodynamické síly působící na vlastní proudovou dráhu.

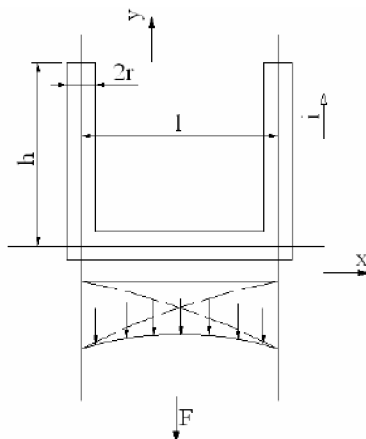
- Pravoúhlý proudový záhyb je souvisle zatěžován celou délkou  $l$  podle Obr. 3-3. Síla působící na rameno  $l$ :

$$F = i^2 \cdot \ln \frac{l(h + \sqrt{h^2 + r^2})}{r(h + \sqrt{h^2 + l^2})} \cdot 10^{-7} \quad (3.1.6)$$



Obr. 3-3: Průběh síly působící na pravoúhlý proudový záhyb [3].

- Dvojitý pravoúhlý záhyb se s výhodou používá i spínacích přístrojů nízkého i vysokého napětí. V případě, že platí  $l \gg 2r$  je celková síla působící na spodní úsek  $l$  tvořena superpozicí dvou průběhů, podle obr. Obr. 3-4.



Obr. 3-4: Superpozice výsledné síly působící na spodní úsek dvojitého pravoúhlého záhybu [3].

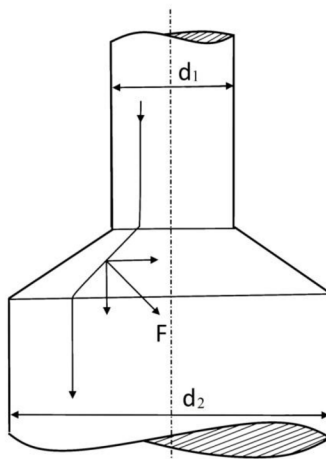
Maximální velikost síly působící na spodní úsek délky  $l$ :

$$F = 2I^2 \cdot \ln \frac{l(h + \sqrt{h^2 + r^2})}{r(h + \sqrt{h^2 + l^2})} \cdot 10^{-7} \quad (3.1.7)$$

#### d) při změně průřezu proudové dráhy

Při změně kruhového průřezu vzniká síla podle vztahu:

$$F = i^2 \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} \cdot 10^{-7} \quad (3.1.8)$$



Obr. 3-5: Síla vznikající při změně průřezu proudové dráhy [3].

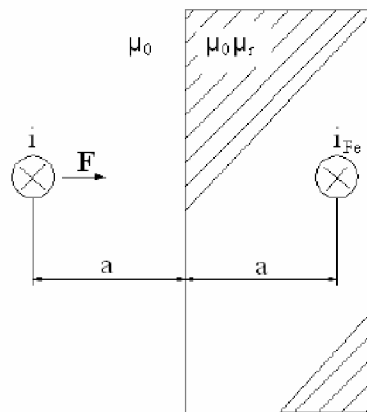
#### e) při změně indukčnosti obvodu vyvolané činností elektrického přístroje

Pokud při činnosti elektrického přístroje dochází ke změně energie magnetického obvodu, pak tato změna vyvolá sílu. V praxi dochází k tomuto jevu nejčastěji při vypínání během oddalování kontaktů. Mezi kontakty hoří oblouk, který zvětšuje své geometrické rozměry obvodu a tím i mění indukčnosti.

**f) u proudové dráhy, která se nachází v blízkosti feromagnetického rozhraní**

Pokud proud protéká vodičem v blízkosti feromagnetického rozhraní (ocelové konstrukce, desky atd.), tak na vodič působí síla, jejíž velikost lze stanovit pomocí zrcadlového obrazu vodiče (Obr. 3-6). Vodičem protéká proud o velikosti:

$$i_{Fe} = i \frac{\mu_r - 1}{\mu_r + 1} \quad (3.1.9)$$



Obr. 3-6: Přitažlivá síla mezi proudovodičem a feromagnetickým rozhraním [3].

Při uvažování případu dvou rovnoběžných a nekonečně dlouhých vodičů se pro výpočet síly použije rovnice:

$$F = \frac{2l}{2a} ii_{Fe} \cdot 10^{-7} \quad (3.1.10)$$

### 3.2 Časový průběh proudů při trojpólovém zkratu:

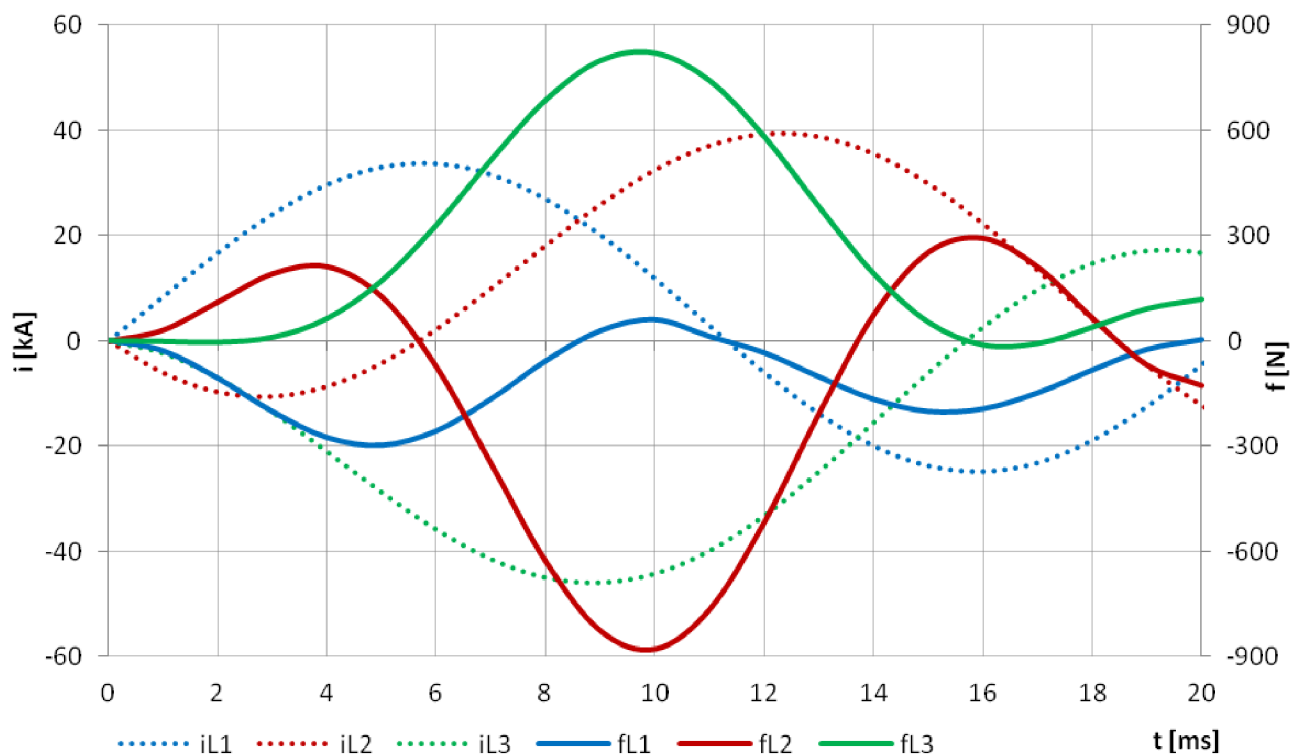
V trojfázové soustavě působí síly při trojpólovém (třífázovém) zkratu na jednotlivé proudové dráhy rozdílně. Pro určení velikostí jednotlivých sil je nutné znát velikosti procházejících proudů v každé fázi.

Rovnice pro časový průběh zkratových proudů a sil jednotlivými fázemi při třífázovém zkratu[7]:

$$i_{L1}(t) = I_k'' \cdot \sqrt{2} \cdot \left[ e^{-\frac{t}{T_a}} \cdot \sin \alpha + \sin(\omega t - \alpha) \right] \quad (3.2.1)$$

$$i_{L2}(t) = I_k'' \cdot \sqrt{2} \cdot \left[ e^{-\frac{t}{T_a}} \cdot \sin \left( \alpha + \frac{2\pi}{3} \right) + \sin \left( \omega t - \alpha - \frac{2\pi}{3} \right) \right] \quad (3.2.2)$$

$$i_{L3}(t) = I_k'' \cdot \sqrt{2} \cdot \left[ e^{-\frac{t}{T_a}} \cdot \sin \left( \alpha - \frac{2\pi}{3} \right) + \sin \left( \omega t - \alpha + \frac{2\pi}{3} \right) \right] \quad (3.2.3)$$



Obr. 3-7: Průběh proudů a působících sil na jednotlivé fáze při třífázovém zkratovém proudu.

## 4 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ (MKP)

Metoda konečných prvků je numerická metoda, která slouží k účinnému řešení okrajových úloh inženýrské praxe na vytvořeném fyzikálním modelu. Vznik metody spadá do konce padesátých let minulého století, kdy vznikla spolu s nástupem digitálních počítačů. Ze začátku byla používána hlavně pro řešení úloh z pružnosti a pevnosti v leteckém průmyslu, postupným vývojem však byla zaváděna i do ostatních oblastí techniky- do strojírenství, stavebnictví a elektrotechniky[3].

Princip metody spočívá v rozdělení řešené spojité oblasti na určité konečné elementární části. V rámci těchto elementů se zavádějí jednotlivé uzly a uzlové potenciály. Souhrnně lze celou síť uzlů elementů chápat jako systém prvků, které na sebe navzájem působí. Rozložení uzlů v celé oblasti může být rovnoměrné i nerovnoměrné, kdy se uzly přizpůsobují tvarům hraničních ploch. Hlavním úkolem MKP je zjistit hledané parametry v uzlových bodech vytvořené sítě.

### 4.1 Postup při aplikaci MKP

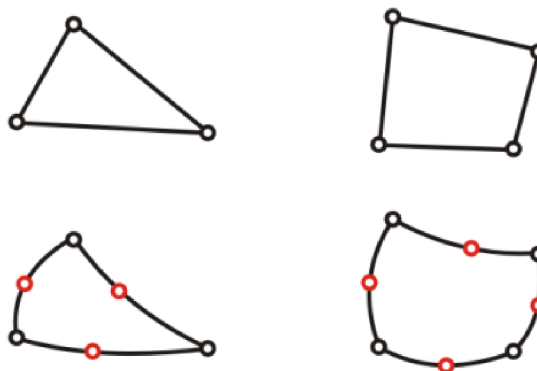
Postup při aplikaci metody konečných prvků se skládá z několika kroků[3]:

- a) Generace sítě prvků s uzly.
- b) Aproximace potenciálu na jednotlivých prvcích z uzlových hodnot.
- c) Sestavení soustavy rovnic pro neznámé uzlové hodnoty.
- d) Vyřešení soustavy.
- e) Zpracování dodatečných požadavků – postprocessing.

Podrobnější popis jednotlivých bodů výpočtu:

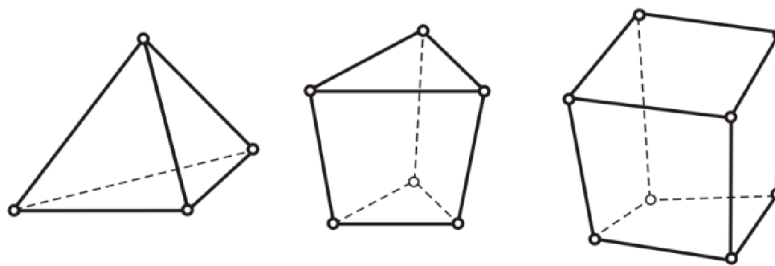
- a) Generace sítě prvků s uzly

Vytvářením sítě prvků se zabývá část programu nazývaná generátor sítě. Tento generátor sítě diskretizuje spojité simulovaného objektu na konečný počet elementárních oblastí. Tvar oblastí záleží na typu řešené úlohy. Pro řešení rovinných úloh se používají lineární či parabolické trojúhelníky a čtyřúhelníky (viz. Obr. 4-1). Pro prostorově řešené úlohy se užívá prostorových elementů, jež mohou mít tvar čtyřstěnu, pětistěnu nebo šestistěnu (viz. Obr. 4-2).



Obr. 4-1: Základní rovinné prvky [3].

Parabolické prvky mají oproti lineárním prvkům na hraně další uzly, vymežující tvar jednotlivých hran.



Obr. 4-2: Prostorové elementární prvky [3].

Obecně se při řešení zavádí větší hustota sítě v místech, kde se čeká prudší změna pole. V principu však není nejvhodnější volit nejjemnější síť po celém modelu. Výpočet simulace se tím neúměrně prodlouží a zbytečně se zatíží vnitřní výpočtová paměť programu. Zjemňování sítě může probíhat dvěma způsoby. Buď interaktivně, kdy si uživatel sám volí oblasti, kde chce získat lepší aproximaci řešení. Nebo adaptivně, kdy se uživatel procesu zjemňování sítě neúčastní, ale nastaví pouze maximální velikost chyby na jednotlivých prvcích. Generátor sítě vyhodnocuje chyby na jednotlivých prvcích a podle toho rozděluje dále prvky v jednotlivých iteračních cyklech[5].

#### b) Aproximace potenciálu na jednotlivých prvcích z uzlových hodnot

Metoda konečných prvků používá neobvyklý, ale jednoduchý princip aproximace hledané funkce. Metoda je založena na myšlence najít co nejnižší stupeň aproximačního polynomu. Respektive nalézt takový stupeň, který bude po dosazení do příslušné diferenciální rovnice představovat netriviální řešení.

MKP využívá na malých intervalech lineární nebo nanejvýš kvadratické aproximace oproti využívání aproximací vyšších řádů na dlouhém intervalu. Kubické a vyšší stupně aproximací se nepoužívají, mají tendenci oscilovat a chyba měření se prudce zvyšuje[3].

#### Aproximace potenciálu ve 3D úloze

V našem sestrojeném modelu se využívá aproximace potenciálu ve 3D prostoru. Z prostorových prvků (viz. Obr. 4-2) je pro odvození rozdělena oblast nejjednodušším prostorovým prvkem - lineárními čtyřstěny.

Lineární čtyřstěn má čtyři vrcholy, na nichž lze čtyřmi konstantami zavést lineární tvarovou funkci.

$$N_j^{(e)} = ax + by + cz + d$$

kde:	e...	prvek (element)
	j...	označení vrcholu elementu, pro uvažovaný případ lineárního čtyřstěnu j=1,2,3,4
	a, b, c, d...	konstanty
	x, y, z...	souřadnice souřadného systému

Uvažujeme-li tvarovou funkci  $N_1^{(e)}$  daného elementu rovnu v tomto vrcholu 1 a ve zbývajících třech uzlech nule, pak konstanty  $a, b, c, d$  jsou řešením soustavy rovnic ([3]):

$$ax_1 + by_1 + cz_1 + d = 1$$

$$ax_2 + by_2 + cz_2 + d = 0$$

$$ax_3 + by_3 + cz_3 + d = 0$$

$$ax_4 + by_4 + cz_4 + d = 0$$

Další tvarové funkce  $N_2^{(e)}$  až  $N_4^{(e)}$  dostaneme cyklickou záměnou indexů.

Výsledný potenciál celé oblasti se vyjádří aproximací součinnu sumy všech tvarových funkcí a uzlových hodnot potenciálů, které mají společný bod daný vrcholem  $j$ [3]:

$$\phi_a = \sum \phi_j \cdot N_j(x, y, z)$$

c) Sestavení soustavy rovnic pro neznámé uzlové hodnoty

Podle typu řešení se sestaví soustavy rovnic z jednotlivých získaných potenciálů v předešlém bodě. Hlavním cílem těchto rovnic je nalézt hledané neznámé veličiny. Pro řešení úloh elektromagnetismu je využíváno Maxwellových rovnic. Analytické řešení těchto rovnic se provádí obtížně, a proto se řešení provádí pouze pomocí výpočetní techniky[5][8].

d) Vyřešení soustavy

K řešení se používají nejčastěji iterační metody, jejich výhodou je uchovávání nenulových koeficientů pole. Nejpoužívanější metodou je metoda konjugovaných gradientů a její varianty, která dokáže efektivně a přesně řešit i několik milionů rovnic[3].

e) Výpočet dalších veličin - postprocessing

Řešením metody konečných prvků není pouze jedna hodnota fyzikální veličiny, ale celkové rozložení elektromagnetického pole na celé oblasti modelu. Díky tomu je možnost v následném zpracování zjistit nejenom hodnotu počítané veličiny, ale i zobrazit různá pole (H, B, J), délku výpočtů nebo třeba vytvářet potřebné grafy[8].



## 5 MODELOVÁNÍ SILOVÝCH ÚČINKŮ MAGNETICKÉHO POLE

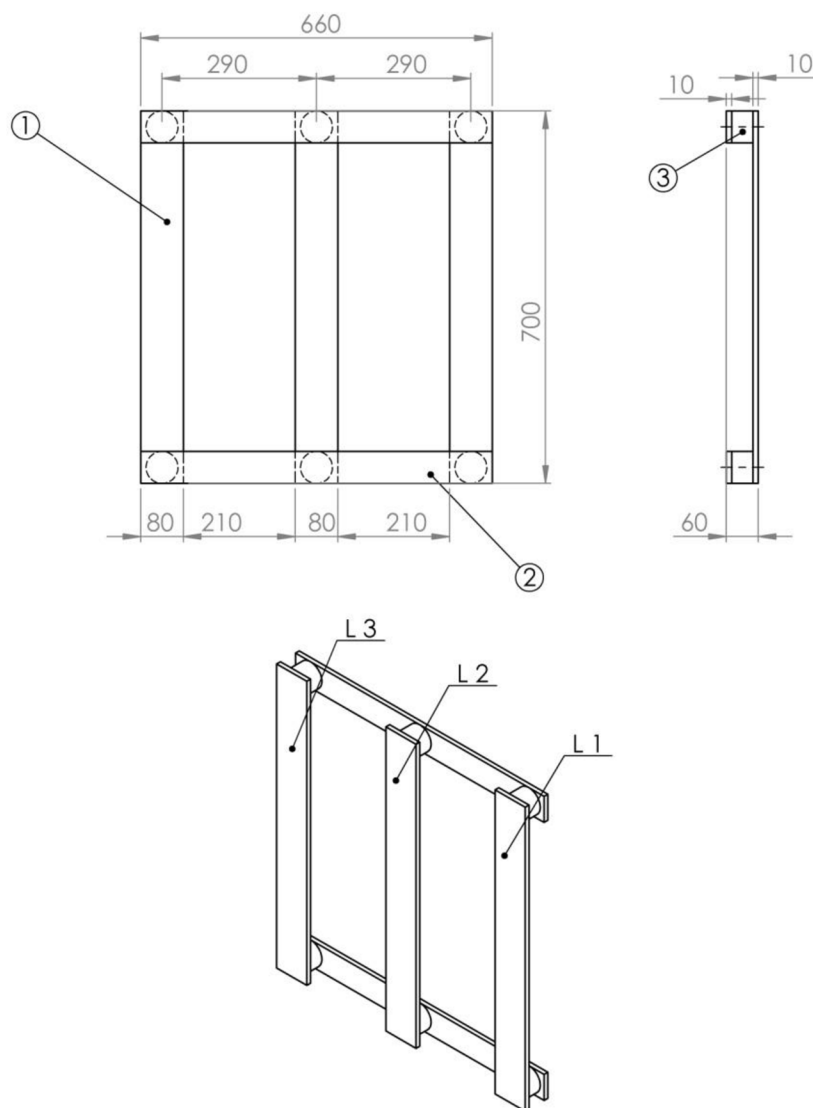
Analýza vybraného typu přípojnic je provedena v analyzačním programu Ansys Maxwell. Jmenovaný program používá pro řešení zadané analýzy metodu konečných prvků (MKP) popsanou podrobněji v kap. 4.

### 5.1 Model třífázových přípojnic

Ke zkoumání je vybrán třífázový (třípólový) zkrat pro určení mechanického namáhání tří fázových přípojnic.

#### Charakteristika přípojnicového systému:

Rozměry modelu vytvořené v programu SolidWorks 2014.



Obr. 5-1: Výkres přípojnicového systému.

Poz: 1- fázové přípojnice, 2- rozpěrky, 3- izolátory; značení přípojnic L1, L2 a L3.

### Parametry přípojnicového systému pro výpočet:

- počáteční souměrný rázový zkratový proud  $I_k'' = 20 \text{ kA}$
- časová konstanta:  $T_a = 0,021$

Na základě odvození (viz. kap. 6.1) je pro výpočet maximální síly působící na prostřední vodič počítáno s následujícími hodnotami:

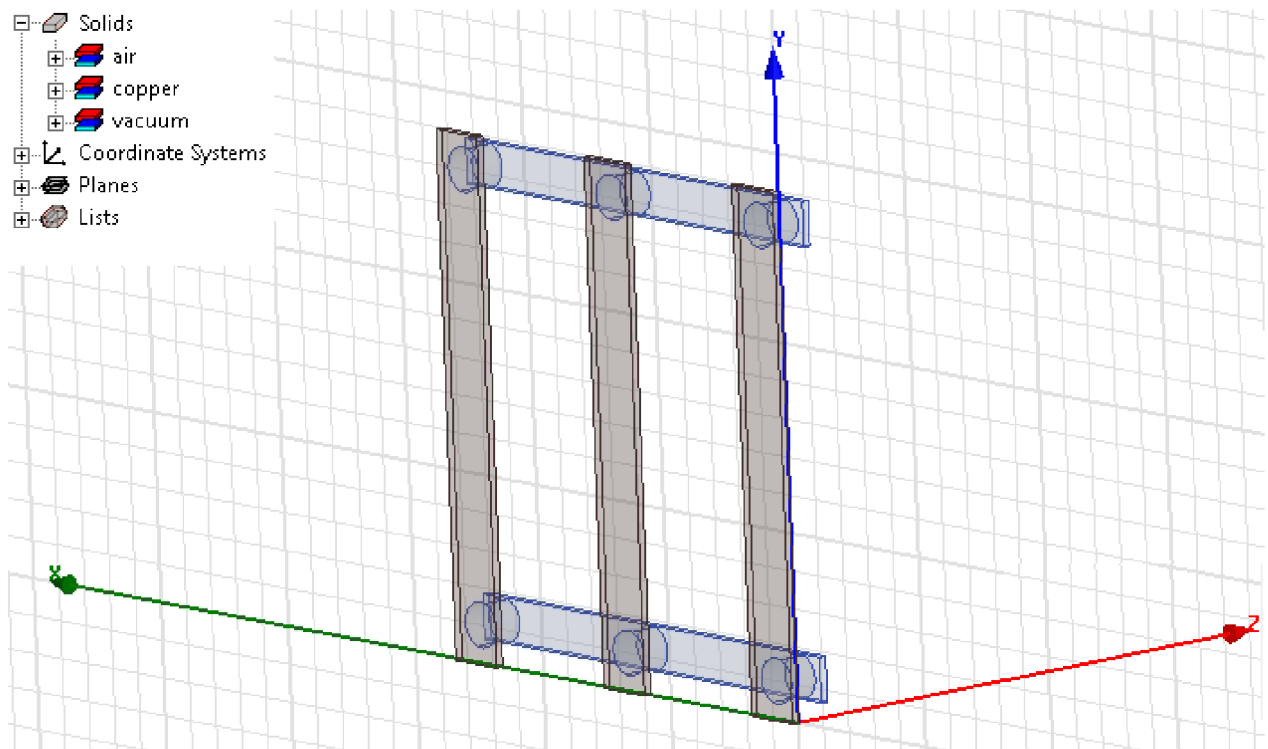
- fázový posuv:  $\alpha = \frac{\pi}{12}$
- čas:  $t = 0,01 \text{ s}$

## 5.2 Statická analýza

Pro potřeby simulace byl vytvořen model přípojnic v programu SolidWorks s rozměry uvedenými na výkresu z Obr. 5-1. Následně byl model přenesen do simulačního prostředí Ansys Maxwell, kde byla zjišťována síla působící na jednotlivé přípojnice ve směru působení osy x (viz. souřadný systém na Obr. 5-2).

Statické vyhodnocení působení elektrodynamických sil bylo vyřešeno pomocí funkce Magnetic Magnetostatic. Tato analýza zjišťuje síly působící mezi jednotlivými přípojnicemi pro jeden konkrétní časový okamžik.

Z důvodu reálného porovnání s numerickým výpočtem uvedeným v kap. 6 byl přípojnicím přiřazen reálný materiál mědi. Izolátory a rozpěrky byly definovány jako vzduch, aby nemohly ovlivnit působení magnetického pole. Okolní prostředí je pro správnou funkci simulace vyplněno vakuem.



Obr. 5-2: Přípojnicový model v prostředí Ansys Maxwell.

V jednotlivých fázích byly nastaveny hodnoty procházejících proudů podle Tab. 5-1. Proudů v jednotlivých fázích byly získány dosazením do rovnic (3.2.1-3) a s uvažováním parametrů v kap. 5.1.

Tab. 5-1: Vypočítané proudy pro časový okamžik  $t = 0,01s$ .

$i_{L1}(0,01)$ [kA]	$i_{L2}(0,01)$ [kA]	$i_{L3}(0,01)$ [kA]
11,87	32,42	-44,29

Dané rozložení proudů v časový okamžik  $t = 10$  ms odpovídá maximální síle působící v tento moment na prostřední vodič ve směru souřadné osy x.

### Výsledné síly působící mezi přípojnými

Výpočtem pomocí funkce Magnetic Magnetostatic vyšly síly zaznačené v Tab. 5-2

Tab. 5-2: Výsledky výpočtu pomocí funkce Magnetic Magnetostatic:

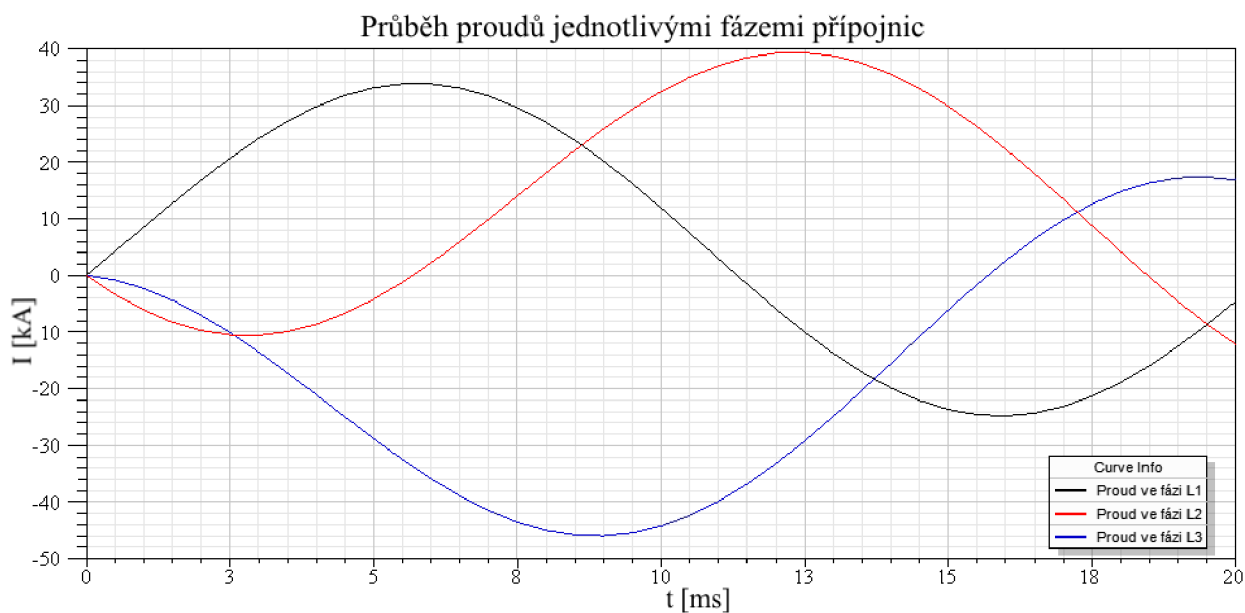
Fáze:	L1	L2	L3
Síla [N]	61,08	-854,5	806,4

### 5.3 Dynamická analýza

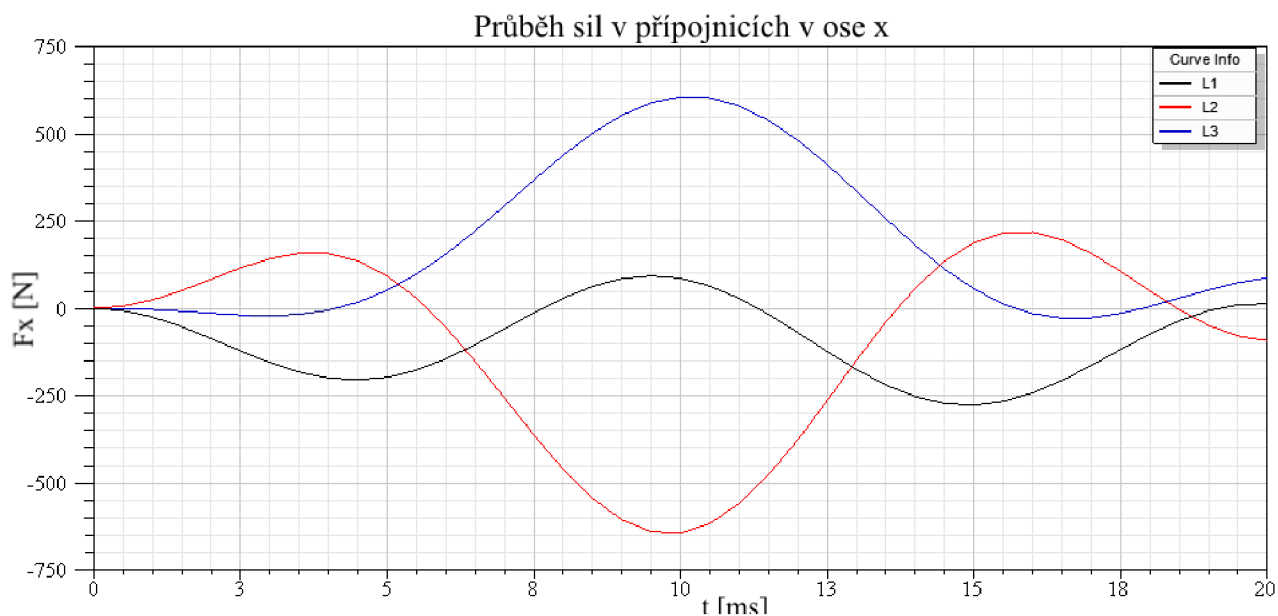
Dynamická simulace byla vytvořena z modelu, který byl použit pro statickou analýzu. Z tohoto modelu byla vzata i výpočetní síť modelu.

Elektrodynamické síly jsou řešeny v této dynamické simulaci za pomoci funkce Magnetic Transient. Tato funkce počítá dynamické síly ze zadaných průběhů jednotlivých proudů. V jednotlivých fázích byly nastaveny dynamické proudy podle časových průběhů proudů (viz. rov. 3.2.1-3) pro časový interval 0 – 20 ms.

Výsledkem analýzy jsou vypočítané průběhy proudů (Obr. 5-3) a z nich odvislé průběhy působení dynamických sil na proudovodné dráhy (Obr. 5-4).



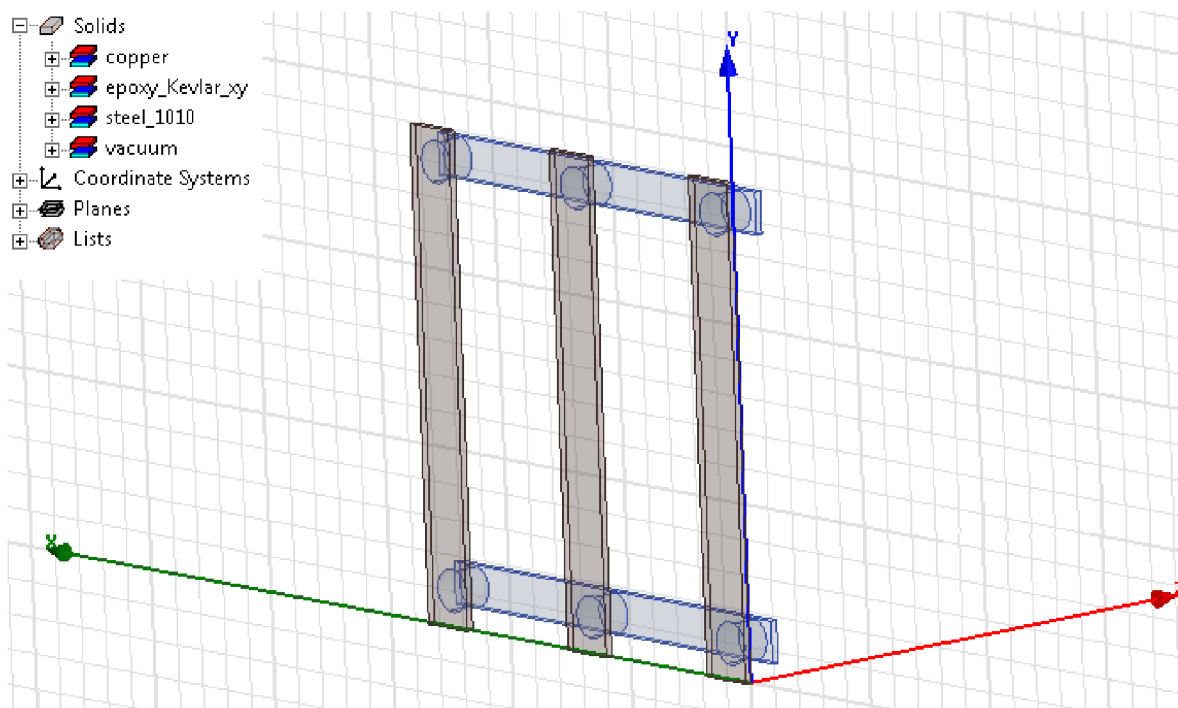
Obr. 5-3: Průběhy proudů v prostředí Ansys Maxwell funkcí Magnetic Transient.



Obr. 5-4: Výsledné průběhy sil v ose x v prostředí Ansys Maxwell funkcí Magnetic Transient.

## 5.4 Zahnutí vlivu izolátorů a rozpěrek na síly mezi přípojnici

V následující simulaci byl reprezentován vliv železa a epoxidu na výsledky chování sil mezi přípojnici. Nastavení simulace zůstalo totožné s analýzou v kap 5.2 a 5.3 s tím rozdílem, že oproti zmíněným simulacím byly zahrnuty reálné materiály pro izolátory a rozpěrky.



### 5.4.1 Statická analýza

Statické vyhodnocení působení elektrodynamických sil bylo vyřešeno pomocí funkce Magnetic Magnetostatic. Nastavené hodnoty procházejících proudů byly nastaveny podle Tab. 5-1, kdy toto nastavení proudů odpovídá maximální síle působící v časový moment 10 ms na prostřední vodič ve směru souřadné osy x. Materiálově byly přípojnice modelovány z mědi, rozpěrky ze železa a izolátory z epoxidu.

### Výsledné síly působící mezi přípojnici

Pro možnost srovnání vypočítaných výsledků sil byly jednotlivé síly porovnány se silami vzniklými při uvažování pouze přípojníc (viz. kap. 5.2):

Tab. 5-3: Srovnání vypočítaných sil při uvažování vlivu izolátorů a rozpěrek.

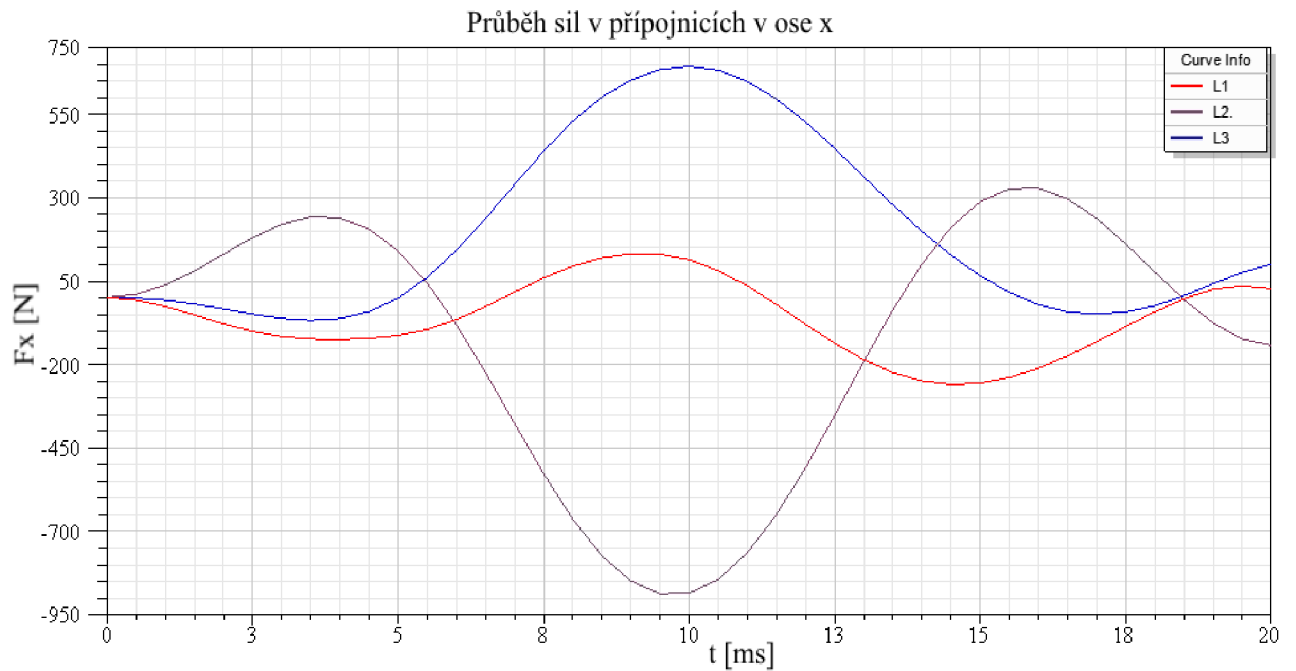
Fáze:	L1	L2	L3
Síla působící při uvažování pouze přípojníc [N]	61,08	-854,5	806,4
Síla působící při uvažování přípojníc, izolátorů a rozpěrek [N]	130,96	-921,62	594,04
Procentní nárůst sil oproti síle bez uvažování rozpěrek a izolátorů [%]	214,4	107,9	73,7

### 5.4.2 Dynamická analýza

Elektrodynamické síly jsou řešeny v této dynamické simulaci za pomoci funkce Magnetic Transient.

V jednotlivých fázích byly nastaveny dynamické proudy opět podle časových průběhů uvedených rov. 3.2.1-3. Průběhy vypočítaných proudů jsou v této simulaci stejné jako v dynamické analýze při uvažování pouze přípojnic (Obr. 5-3).

Vypočítané průběhy sil na jednotlivé přípojnice jsou na Obr. 5-5.



Obr. 5-5: Výsledné průběhy sil v ose x při zahrnutí vlivu materiálu izolátorů a rozpěrek.

## 6 VERIFIKACE MODELU POMOCÍ VÝPOČTU

Maximální síla při třípólovém zkratu působí na prostřední vodič, pro který je vypracován numerický ověřovací výpočet.

### 6.1 Odvození síly působící na prostřední vodič

Pro působení sil mezi vodiči platí pro střední vodič:

$$f_{3L2}(t) = f_{3L1-2}(t) - f_{3L2-3}(t) = -2 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{i_{L1} \cdot i_{L2}}{a_m} + 2 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{i_{L2} \cdot i_{L3}}{a_m} \quad (6.1.1)$$

Po úpravě:

$$f_{3L2}(t) = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{i_{L2}}{a_m} \cdot (i_{L3} - i_{L1}) \quad (6.1.2)$$

Po dosazení za jednotlivé proudy z rov. 3.2.1 - 3:

$$\begin{aligned} f_{3L2}(t) = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{(I_k'' \cdot \sqrt{2})^2}{a_m} \\ \cdot \left\{ \left( e^{-\frac{t}{T_a}} \cdot \sin \alpha + \sin(\omega t - \alpha) \right) \right. \\ \cdot \left[ e^{-\frac{t}{T_a}} \cdot \sin \left( \alpha - \frac{2\pi}{3} \right) \right. \\ \left. \left. + \sin \left( \omega t - \alpha + \frac{2\pi}{3} \right) - e^{-\frac{t}{T_a}} \cdot \sin \alpha - \sin(\omega t - \alpha) \right] \right\} \end{aligned} \quad (6.1.3)$$

Po úpravě rovnice a použití goniometrických funkcí:

$$\begin{aligned} f_{3L2}(t) = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{(I_k'' \cdot \sqrt{2})^2}{a_m} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \left[ e^{-\frac{t}{T_a}} \cdot \sin \left( \alpha + \frac{2\pi}{3} \right) + \sin \left( \omega t - \alpha - \frac{2\pi}{3} \right) \right] \cdot \\ \left[ -e^{-\frac{t}{T_a}} \cdot 2 \cdot \cos \left( \alpha - \frac{\pi}{3} \right) + 2 \cdot \cos \left( \omega t - \alpha + \frac{\pi}{3} \right) \right] \end{aligned} \quad (6.1.4)$$

Roznásobením součinitelů a použitím goniometrických funkcí:

$$\begin{aligned} f_{3L2}(t) = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{(I_k'')^2}{a_m} \cdot \sqrt{3} \\ \cdot \left[ -e^{-2\frac{t}{T_a}} \cdot \sin \left( 2\alpha + \frac{\pi}{3} \right) - e^{-\frac{t}{T_a}} \cdot 2 \cdot \sin \left( \omega t - 2 \cdot \alpha - \frac{\pi}{3} \right) \right. \\ \left. + \sin \left( 2 \cdot \omega t - 2 \cdot \alpha - \frac{\pi}{3} \right) \right] \end{aligned} \quad (6.1.5)$$

Výsledný průběh síly působící na střední vodič během třífázového zkratu má tři složky:

$$f_{3L2}(t) = f_{3ss}(t) + f_{3st50}(t) + f_{3st100}(t) \quad (6.1.6)$$

Střídavá složka s frekvencí 50 Hz:

$$f_{3st50}(t) = -2 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{(I_k'')^2}{a_m} \cdot \sqrt{3} \cdot \left( 2 \cdot e^{-\frac{t}{T_a}} \cdot \sin\left(\omega t - 2 \cdot \alpha - \frac{\pi}{3}\right) \right) \quad (6.1.7)$$

Střídavá složka s frekvencí 100 Hz:

$$f_{3st100}(t) = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{(I_k'')^2}{a_m} \cdot \sqrt{3} \cdot \left( \sin\left(2 \cdot \omega t - 2 \cdot \alpha - \frac{\pi}{3}\right) \right) \quad (6.1.8)$$

Stejnoseměrná složka:

$$f_{3ss}(t) = -2 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{(I_k'')^2}{a_m} \cdot \sqrt{3} \cdot \left( e^{-2 \cdot \frac{t}{T_a}} \cdot \sin\left(2\alpha + \frac{\pi}{3}\right) \right) \quad (6.1.9)$$

Z podmínky pro maximální hodnotu stejnosměrné složky lze určit úhel  $\alpha$ , při kterém bude hodnota síly působící na prostřední vodič maximální:

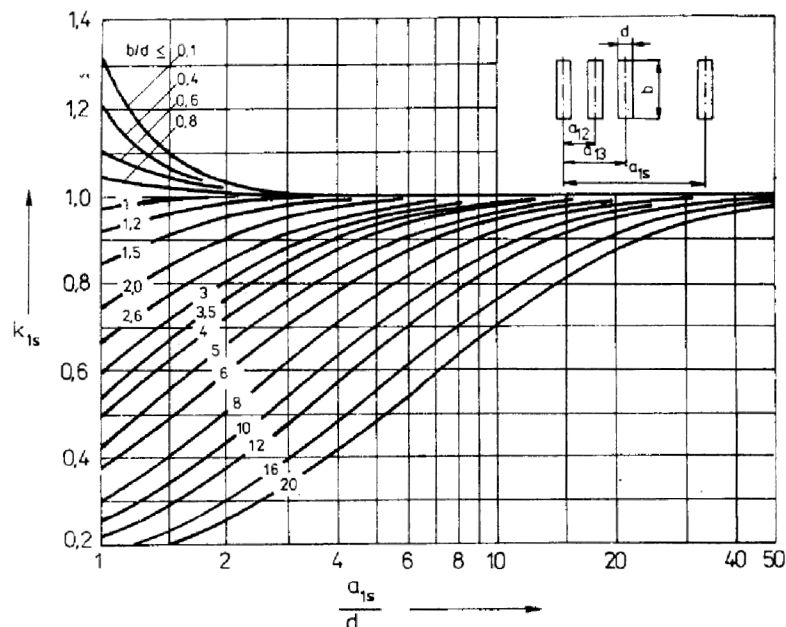
$$\sin\left(2\alpha + \frac{\pi}{3}\right) = 1$$

Po úpravě je fázový posun  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{\pi}{12} + \frac{k\pi}{12}$$

## Účinná vzdálenost mezi vodiči

Pro výpočet celkové hodnoty síly je třeba znát účinnou vzdálenost  $a_m$  mezi vodiči. Tento parametr se dle normy ČSN 60865 zavádí z důvodu respektování geometrického tvaru a velikosti průřezu vodiče pomocí grafu na Obr. 6-1.



Obr. 6-1: Graf pro určení koeficientu tvaru[5].



Na základě rozměrů přípojníc uvedených v odst. 5.1 a pomocí grafu na Obr. 6-1 byl určen koeficient tvaru:

$$k_{12} = k_{13} = 1$$

Tento koeficient respektuje deformaci magnetického pole kolem obdélníkových vodičů použitých v této práci. Indexy koeficientů značí příslušnost k jednotlivým přípojnícím.

Účinné vzdálenosti mezi jednotlivými přípojnícemi:

- mezi přípojnícemi L1 a L2 nebo L2 a L3:

$$a_{m1} = \frac{a_{12}}{k_{12}} = \frac{a_{23}}{k_{12}} = \frac{0,29}{1} = 0,29$$

- mezi přípojnícemi L1 a L3:

$$a_{m2} = \frac{a_{13}}{k_{13}} = \frac{0,58}{1} = 0,58$$

## 6.2 Výpočet působících sil

Během statické analýzy v odst. 5.2 bylo vypočítáno silové namáhání v čase  $t = 0,01s$ . V tento časový okamžik dojde k největšímu možnému mechanickému namáhání na prostřední vodič.

### 6.2.1 Síla působící na prostřední vodič

Odvození maximální síly působící na prostřední vodič je blíže uvedeno v odst. 6.1.

Po dosazení zadaných hodnot do rov. 6.1.5 je velikost síly působící na prostřední vodič:

$$\begin{aligned} f_{3L2}(0,01) &= 2 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{(20000)^2}{0,29} \cdot \sqrt{3} \\ &\cdot \left( -e^{-2 \cdot \frac{0,01}{0,021}} \cdot \sin\left(2 \cdot \frac{\pi}{12} + \frac{\pi}{3}\right) - e^{-\frac{0,01}{0,021}} \cdot 2 \right. \\ &\cdot \sin\left(2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,01 - 2 \cdot \frac{\pi}{12} - \frac{\pi}{3}\right) + \sin\left(2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,01 - 2 \cdot \frac{\pi}{12} - \frac{\pi}{3}\right) \left. \right) \\ &= -1255,73 \frac{\text{N}}{\text{m}} \end{aligned}$$

Délka přípojníc je  $l = 0,7\text{m}$ . Celková působící síla na střední vodič:

$$F(0,01) = f_{3L2}(0,01) \cdot l = -1255,73 \cdot 0,7 = -879,01 \text{ N}$$

### 6.2.2 Síly působící na krajní vodiče

Síly působící na dané vodiče byly počítány pro stejný časový okamžik jako síla působící na prostřední vodič. V krajních vodičích v tento časový okamžik působí následující síly:

- o pro fázi L1:

$$f_{3L1}(t) = -f_{3L1-2}(t) - f_{3L1-3}(t) = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{i_{L1} \cdot i_{L2}}{a_m} + 2 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{i_{L1} \cdot i_{L3}}{a_m}$$

Po úpravě a dosazení:

$$\begin{aligned} f_{3L1}(0,01) &= 2 \cdot 10^{-7} \cdot i_{L1} \cdot \left( \frac{i_{L2}}{a_{m1}} + \frac{i_{L3}}{a_{m2}} \right) \\ &= 2 \cdot 10^{-7} \cdot 11,868 \cdot 10^3 \cdot \left( \frac{32,423 \cdot 10^3}{0,29} + \frac{(-44,291 \cdot 10^3)}{0,58} \right) = 84,12 \text{ N/m} \end{aligned}$$

Celková působící síla pro zvolenou délku přípojníc:

$$F_{3L1}(0,01) = f_{3L1}(0,01) \cdot l = 84,12 \cdot 0,7 = 58,88 \text{ N}$$

○ **pro fázi L3:**

$$f_{3L3}(t) = f_{3L1-3}(t) + f_{3L2-3}(t) = -2 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{i_{L1} \cdot i_{L2}}{a_m} - 2 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{i_{L1} \cdot i_{L3}}{a_m}$$

Po úpravě a dosazení:

$$\begin{aligned} f_{3L3}(0,01) &= -2 \cdot 10^{-7} \cdot i_{L3} \cdot \left( \frac{i_{L1}}{a_{m1}} + \frac{i_{L2}}{a_{m2}} \right) \\ &= 2 \cdot 10^{-7} \cdot (-44,291 \cdot 10^3) \cdot \left( \frac{11,868 \cdot 10^3}{0,58} + \frac{32,423 \cdot 10^3}{0,29} \right) = 1171,61 \text{ N/m} \end{aligned}$$

Celková působící síla pro zvolenou délku přípojníc:

$$F_{3L3}(0,01) = f_{3L3}(0,01) \cdot l = 1171,61 \cdot 0,7 = 820,13 \text{ N}$$

Tab. 6-1: Verifikace modelu numerickým výpočtem.

Fáze:	L1	L2	L3
Síla působící na přípojnici vypočtená statickou analýzou v Ansys Maxwell	61,08 N	-854,5 N	806,4 N
Síla působící na přípojnici vypočtená numericky	58,88 N	-879,01 N	820,13 N
Relativní chyba ve výpočtu: $\delta_x$ [%]	3,7	2,8	1,7

## 7 ROZVÁDĚČE VN

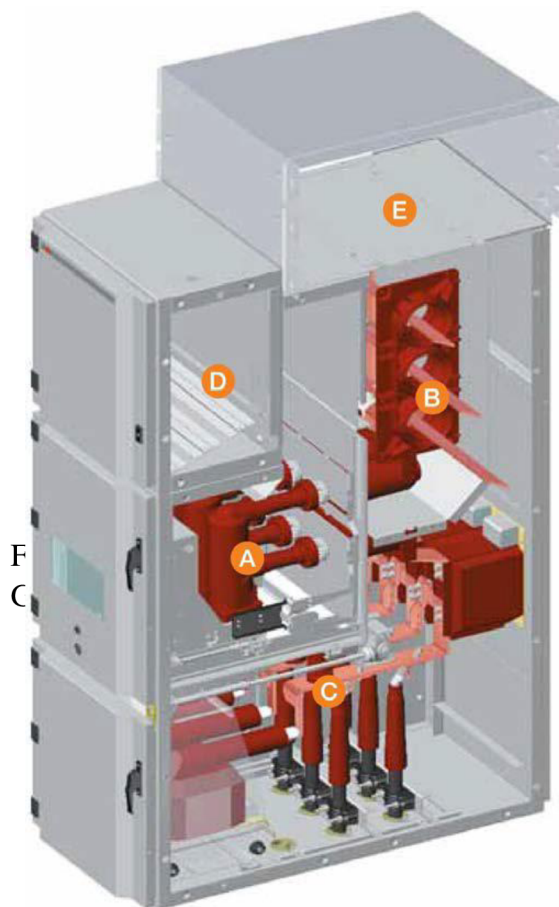
Rozváděče jsou elektrické rozvodné zařízení, u kterých přístroje a nosné konstrukce tvoří jeden celek. Ten může být propojen a sestaven výrobcem nebo je dodáván po jednotlivých stavebních dílech. Vnitřní náplně rozváděče tvoří soubory řídicích, spínacích, signalizačních, regulačních a měřicích zařízení.

Skříňové typy rozváděčů vznikly z kobkových rozvodných zařízení vn z důvodu úspory místa a zvýšení bezpečnosti obsluhy. Díky dnešnímu použití uzemněných koster rozváděčů z ocelových profilů s povrchovou úpravou AL-Zn a rozdělení rozváděčů na jednotlivé prostory kovově uzemněnými přepážkami umožňuje skříňové uspořádání:

- chránit obsluhu před nebezpečným dotykem živých částí- dovolená obsluha zařízení pracovníkem bez vyšší elektrotechnické kvalifikace
- zajistit bezpečnou práci na rozváděčích i pod napětím
- dlouhodobou stabilitu ve všech pracovních prostředích- může být umístěn i do prostorů nečistých, minimalizují náklady spojené se stavebními úpravami

### 7.1 Rozdělení prostoru rozváděče vn

Konstrukce dnešních rozváděčů umožňuje nejvyšší možný stupeň separace jednotlivých funkčních prvků. Tato oddělení zajišťují nejen větší bezpečnost obsluhy, ale i větší odolnost proti zkratům v rozváděči.



Jednotka rozváděče může obsahovat tyto jednotky:

- A. Prostor vypínače
- B. Prostor přípojnic
- C. Prostor kabelů
- D. Nízkonapěťový prostor
- E. Kompaktní kanál pro odvod horkých plynů

Prostor vypínače (A), prostor přípojnic (B) a prostor kabelů (C) je souhrnně nazýván jako silový prostor.

Obr. 7-1: Rozdělení prostoru vypínače vn (typ UniGear ZS1)[9].

### 7.1.1 Prostor vypínače

Prostor vypínače je tvořen izolačními průchodkami, uzavíracími clonami a vypínačem. Izolační průchodky v tomto prostoru slouží k izolačnímu propojení kontaktů vypínače s prostorem kabelů a s prostorem přípojníc. Průchodky jsou vyhotoveny z epoxidové pryskyřice a navazují na ně uzavírací clony z kovu. Mechanismus clonek je zautomatizovaný tak, že při pohybu vypínače do pracovní polohy se clony automaticky aktivují a při pohybu vypínače do vysunuté polohy se naopak automaticky zasunují. Zbylý prostor vypínače je oddělený kovovými přepážkami ze všech stran. Nejdůležitější pozici v tomto prostoru zaujímá vypínač. Typ vypínače může být vakuový nebo plynem izolovaný. Zastoupení typu vypínače v tomto prostoru se volí na základě jmenovitých proudů a vypínací schopnosti vypínače.

Diplomová práce je zaměřena na zkoumání silových účinků magnetického pole na paže a kontaktní systém vakuového vypínače VD4 ve vypínacovém prostoru. Jeho podrobnější popis je v kap. 8.

V určitých konfiguracích rozváděčů mohou být v tomto prostoru místo vypínače vakuové stykače s pojistkami vysokého napětí nebo napěťové transformátory.

### 7.1.2 Prostor přípojníc

V prostoru přípojníc se nachází hlavní přípojnícový systém, který je pomocí přípojnícových odboček napojený k horním izolačním připojovacím kontaktům vypínače. Hlavní přípojnice jsou vyhotoveny z elektrolytické mědi a podle velikosti jmenovité zatížitelnosti přípojníc jsou použité ploché přípojnice (do 2500 A) nebo přípojnice s profilem ve tvaru „D“ (pro jmenovité proudy mezi 3500 - 4000A). Jednotlivé přípojnice jsou kryty izolačním materiálem. Přípojnícový prostor nemusí být pouze jeden, ale je možné volit rozváděč s rozdělením přípojníc do několika prostorů (zpravidla u rozváděčů s proudy 40/50 kA), kdy jsou jednotlivé přípojnícové prostory propojeny průchodkami.

### 7.1.3 Prostor kabelů

V prostoru kabelů se nachází ploché sběrnice, které slouží k propojení spodních kontaktů vypínače a vývodních kabelů. Ploché sběrnice jsou vyrobeny z elektrolytické mědi a u rozváděčů s napětím 17,5 a 24 kV jsou kryty izolačním materiálem. Součástí kabelového prostoru může být uzemňovač pro uzemnění systému přípojníc a uzemňovač pro uzemnění kabelů vývodu. Uzemňovač má zkratovou zapínací schopnost a může být ovládán ručně ze přední strany rozváděče, případně i motorovým pohonem. Podél celého rozváděče ve spodní části kabelového prostoru prochází uzemňovací sběrna, která umožňuje maximální bezpečnost jak vnitřní instalace rozváděče, tak i bezpečnost osob.

Součástí kabelového prostoru jsou i přístrojové transformátory, jejichž úkolem je poskytnout vstupní hodnoty pro systémy jištění a energii k napájení ochranných a měřících přístrojů. Proudové a napěťové transformátory se v rozváděči vyskytují ve formě zalité pryskyřicí. Napěťové transformátory mohou být v rozváděčích instalované jako pevná sestava nebo pro montáž jako vyjímatelné s podvozkem a ochrannými pojistkami. Transformátory napětí jsou buď jednopólové, nebo dvoupólové. Proudové transformátory jsou instalovány jako pevné a jsou navrženy jako jednopólové, dvoupólové nebo třípólové.

### 7.1.4 Nízkonapěťový prostor

Nízkonapěťový prostor je tvořen přístrojovou skříní, ve které jsou umístěny pomocné přístroje a zařízení. Zařízení, umístěné v tomto prostoru, se využívá na ovládání a nastavování rozváděče.

### 7.1.5 Kompaktní kanál pro odvod horkých plynů

Kanál pro odvod horkých plynů se nachází nad rozváděčem a vede po téměř celé délce rozváděče, nevede pouze nad NN skříní. Silové prostory rozváděče jsou v jejich horních částech vybaveny klapkou. Při vnitřním obloukovém zkratu dochází k uvolňování horkých plynů, žhavých částic a vzniku tlaku. Tlak působí při poruše na klapku, která se otevře a umožní vývin vyprodukovaných plynů a žhavých částic mimo místnost rozváděče. Existuje několik typů odfukových kanálů, jejichž použití se liší na základě místa použití a požadavku na bezpečnost [9].

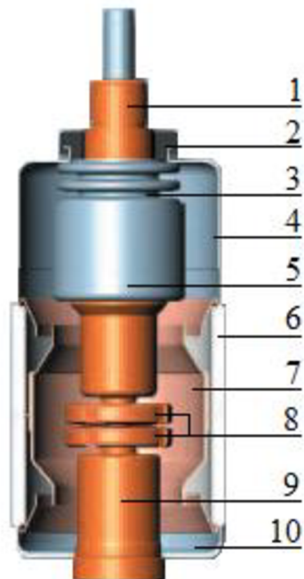
## 7.2 Vakuový vypínač VD4

Vypínač VD4 je typ vypínače pro vysoké napětí, využívající ke zhašení elektrického oblouku vakuová zhašedla, zalitá v pólech z pryskyřice. Vypínače používají vakuum pro jeho dobré vlastnosti i jako izolační médium. Velkou výhodou tohoto typu vypínače je, že přeruší proud bez rozdělení oblouku na více částí a po přerušení oblouku dojde k obnovení dielektrických vlastností vakua. Zalití pólů v pryskyřici umožňuje jednak zvýšení pevnosti pólů vypínače, ale také chrání zhašedlo proti usazování vlhkosti, prachu a proti působení rázů.



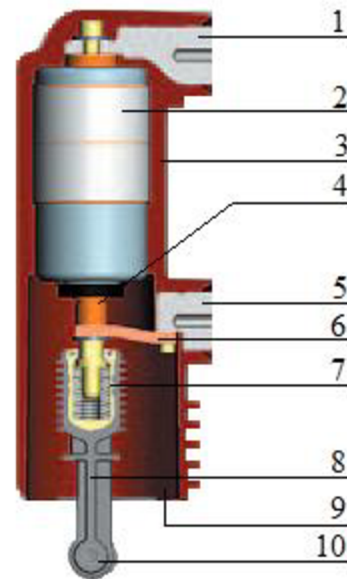
Obr. 7-2: Vypínač typu VD4 pro vn [10].

Důležitou součástí vypínače je vakuové zhašedlo (viz. Obr. 7-3, Obr. 7-4). Jeho hlavní struktura je tvořena keramickými izolátory, jejichž konce jsou uzavřené ocelovými kryty. Uvnitř izolátorů je stínění s pevnými a pohyblivými kontakty. Kontakty jsou vyrobeny z čisté mědi a spěkaného chromu. Na kontakty zhašedla navazují měděné vývody a kovový vlnovec, který umožňuje pohyb kontaktu a vývodu.



Obr. 7-3: Vakuové zhášedlo [9].

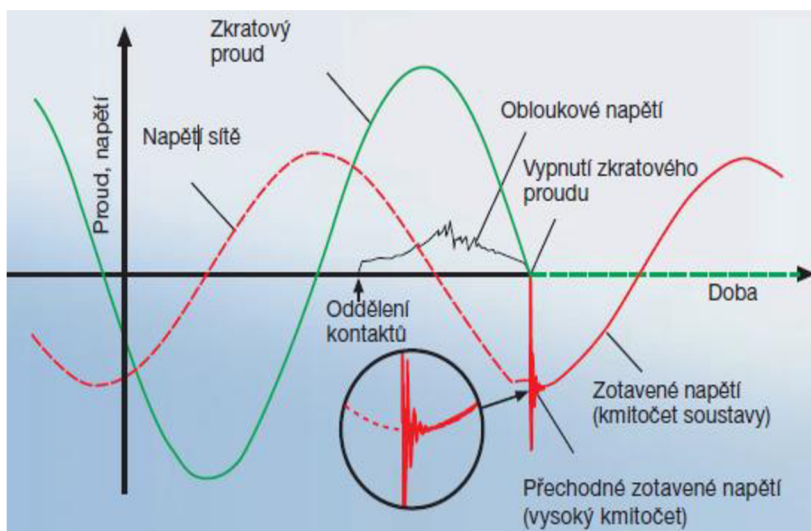
1- Roubík/vývod, 2- Vedení, 3- Vlnovec, 4- Kryt zhášedla, 5- Stínění, 6- Keramický izolátor, 7- Stínění, 8- Kontakty, 9- Vývod, 10-Kryt zhášedla



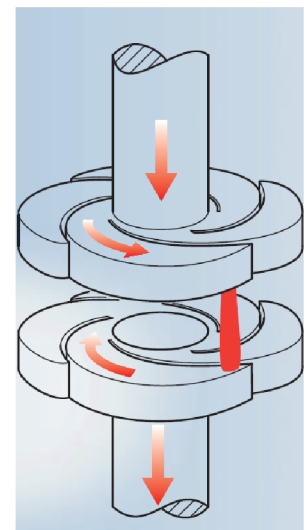
Obr. 7-4: Vakuové zhášedlo zalité v pólu z pryskyřice [10].

1- Horní vývod, 2- Vakuové zhášedlo, 3- Pouzdro z epoxidu, 4- Roubík pohyblivého kontaktu, 5- Spodní vývod, 6- Flexibilní připojení, 7- Odpružená vidlice táhla, 8- Táhlo, 9- Upevnění pólu,

Při odpojení kontaktů se vlivem roztavených a odpařených materiálů vytváří elektrický oblouk. Kovové stínění během tohoto děje zachytí páry plynů a dále pomáhá řídit elektrické pole. Díky specifickému tvaru kontaktu se vytváří magnetické pole, mající za příčinu rotaci oblouku, díky kterému se zvětší plocha kontaktů oproti přímému kontaktnímu oblouku. Toto opatření umožňuje eliminovat tepelné namáhání a zprostředkovává přerušeni oblouku při velmi vysokých zkratových proudech. Elektrický oblouk se přeruší při průchodu proudu přirozenou nulou, kdy dojde ke snížení hustoty zatížení a rychlá kondenzace kovových par vede k rychlému obnovení dielektrických vlastností a izolační schopnost vakuového zhášedla se naplno obnoví.



Obr. 7-6: Průběh proudu a napětí během jednofázového vypínání ve vakuu [10].



Obr. 7-5: Kontakty zhášedla [10].

Výsuvný vakuový vypínač VD4 se z důvodu vzájemného propojení vypínače a skříně rozváděče skládá z několika částí: modul vypínače typu VD4, podvozek vakuového vypínače, izolované ramena s kontaktním systémem a ovládací mechanismus.

**Podvozek vakuového vypínače** zajišťuje mechanické spojení mezi vypínačem a skříní rozváděče. Modul vypínače včetně pólů je upevněn ke kovovému podpěrnému rámu a společně s ním je připojen k manipulačnímu vozíku. Vozík je vybaven systémem koleček a pohyb mezi dvěma polohami (zkušební a pracovní) je umožněn i při zavřených vypínačových dveřích. Pohyb celého vypínače je prováděn pomocí vozíku buď ručně, nebo motorem pomocí šroubového mechanismu.

**Izolované ramena s kontaktním systémem** jsou montovaná na pólech vypínače. Kontaktní růžice (systém) vytváří elektrické propojení s přívodními a vývodními odbočkami, pokud je vypínač v pracovní poloze. Ramena jsou konstruována s měděnou proudovodnou dráhou obalenou epoxidem. Součástí praktické části této práce je konstrukce proudové dráhy ramen a kontaktních systémů (tzv. růžic).

**Ovládací mechanismus vypínače VD4** umožňuje provádět vypínací a zapínací manipulace pomocí nastřádaného pohonu v pružině. Ovládání tohoto mechanismu je prostřednictvím tlačítek na ovládacím panelu, případně elektrickými spouštěmi (zapínací, vypínací a podpěťová spoušť). Přední část vypínače je vybavena příslušenstvím pro ovládání operátorem: tlačítka ON/OFF, signalizační kontrolky, zařízení pro ruční nastřádání mechanismu natažené pružiny, počítadlo spínaných cyklů a ovládání podpěťové spouště[10].

## 8 POŽADAVKY ZADAVATELE NA ANALÝZU A TYPY ZKOUMANÝCH ZAŘÍZENÍ

Od zadavatele diplomové práce, firmy ABB, byl ke zkoumání zadán jeden z možných poruchových stavů, třífázový zkrat. V této souvislosti je úkolem práce zanalyzovat silové účinky magnetického pole během třífázového zkratu (průběh zkratového proudu viz. kap. 3.2). Zadavatele zajímají v rámci zhodnocení působící síly a účinky těchto sil na deformaci proudovodných částí vypínačů, přesněji hlavně na vypínače VD4 a na lineární konfiguraci vypínače.

### 8.1 Požadované analýzy

Vypracované analýzy jsou v diplomové práci řešeny ve třech bodech.

V rámci prvního bodu byly analyzovány silové účinky zkratového proudu na proudovodnou dráhu paží a pólů tří vypínačů s různými parametry uvedenými v Tab. 8-1. Zadavatel práce si přál vyhodnotit velikost a směr působících sil na proudovodné dráhy jednotlivých paží a pólů vypínače. Z těchto vypočítaných sil bylo následně požadováno nasimulovat deformaci materiálů s ohledem na mechanické vlastnosti konstrukce jednotlivých typů vypínačů VD4.

V druhém bodě práce byly analyzovány silové účinky zkratového proudu na kontaktní systém vypínače VD4. Konkrétněji bylo zadáním požadováno zhodnotit velikost silových účinků magnetického pole na jednotlivé prsty růžice. Následně z těchto hodnot vypočítat a zhodnotit možnou deformaci kontaktního systému. Ke zhodnocení byly zadány kontaktní systémy vypínačů VD4/P 12 p.150 a VD4/P 12 p.210 (viz. Tab. 8-1).

V posledním bodu zadání bylo požadováno ověřit účinky zkratového proudu na lineární konfiguraci vypínače a zhodnotit možnou deformaci materiálu vzhledem k působícím silám.

### 8.2 Zadané parametry pro simulaci od zadavatele

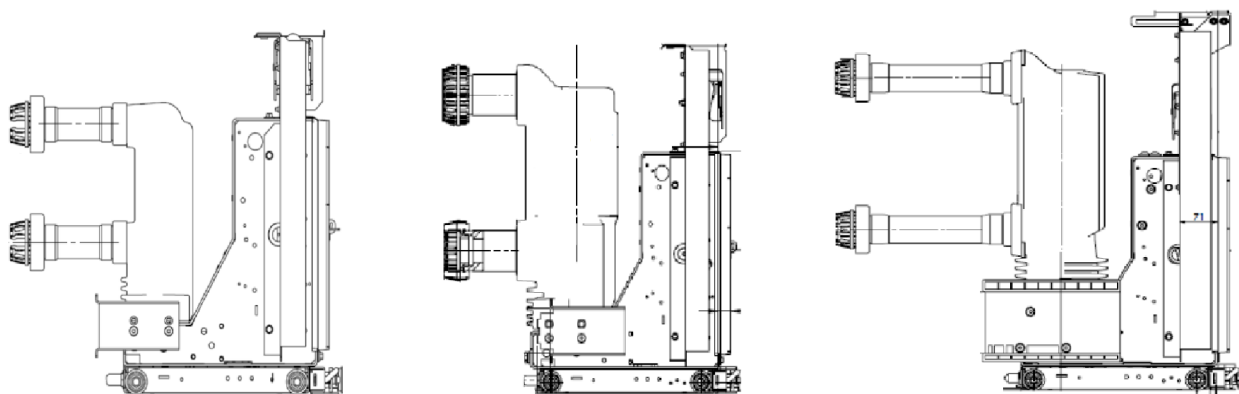
Pro analýzu byly zadány tři konfigurace vnitřního vakuového vypínače VD4:

Tab. 8-1: Všeobecné charakteristiky analyzovaných vypínačů VD4.

Typ vypínače	VD4/P 12 p.150	VD4/P 12 p.210	VD4/P 24 p.210
$U_r$ [kV]	12	12	24
$I_n$ [A]	1250	2000	1250
$I_{sc}$ [kA]	31,5	50	31,5
$I_k$ [kA]	31,5	50	31,5
$I_p$ [kA]	80	125	80
Pólové rozteče [mm]	150	210	210
Použité označení pro vypínač v DP	12 kV - 1250 A - 32 kA	12 kV - 2000 A - 50 kA	24 kV - 1250 A - 32 kA



Na Obr. 8-1 jsou zobrazeny reálné modely analyzovaných vypínačů VD4.

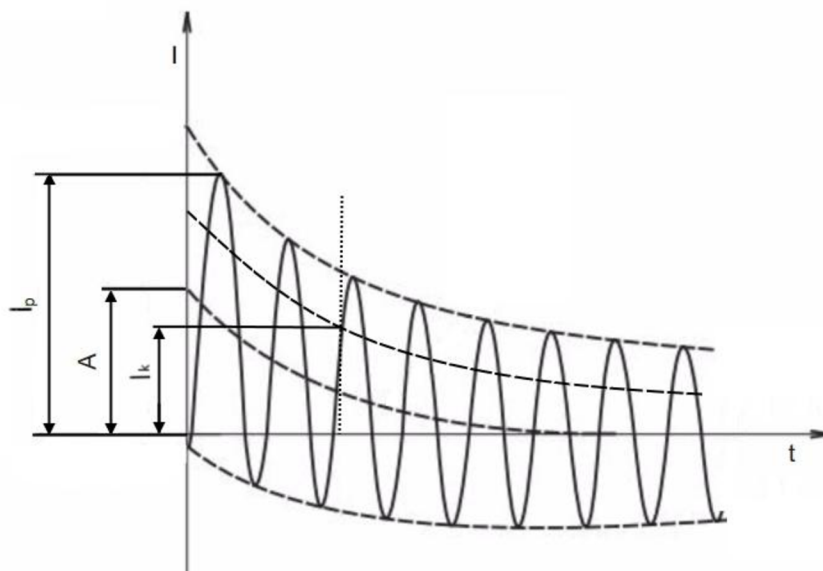


Obr. 8-1: Analyzované vypínače - zleva: VD4/P12 p.150, VD4/P12 p.210, VD4/P24 p.210.

### 8.2.1 Nastavení proudu pro analýzu:

Při výpočtových analýzách se nastavovaly hodnoty jmenovitého dynamického výdržného proudu  $I_p$ , viz. Tab. 8-1. Nastavované hodnoty odpovídají požadavkům normy EN 62271-100 na typové zkoušky krátkodobým a dynamickým výdržným proudem.

Hodnota jmenovitého dynamického výdržného proudu je určena normou EN 62271-100 na hodnotu 2,5 násobku jmenovitého krátkodobého výdržného proudu. Norma předpokládá, že při zkratu se může vlivem přechodného děje dosáhnout této maximální hodnoty.



Obr. 8-2: Průběh zkratového proudu dle normy ČSN EN 62271-100[11].

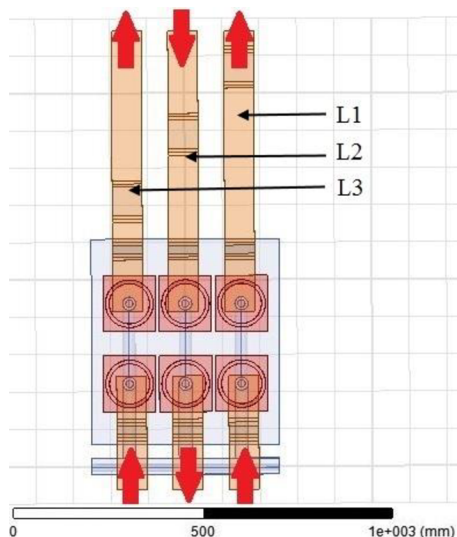
**Jmenovitý krátkodobý výdržný proud  $I_k$**  je efektivní hodnota proudu, kterou spínací a řídicí zařízení může vést v zapnuté poloze po stanovenou hodnotu 3s za předepsaných podmínek provozu a užití.

**Jmenovitý dynamický výdržný proud  $I_p$**  je hodnota proudu, která se dle normy EN 62271-100 rovná 2,5 násobku jmenovitého krátkodobého výdržného proudu. Hodnota násobku je vztažena k odpovídajícímu jmenovitému napětí, kmitočtu (50Hz) a pro normalizovanou časovou konstantu  $\tau = 45\text{ms}$  [11].

## 8.2.2 Nastavení zkratového proudu v analyzovaných modelech

### a) Modely vypínače se zaměřením na paže a póly

Směry proudu, procházející v modelu přívodními a vývodními odbočkami přes proudovodnou dráhu vypínače, byly během analýzy nastaveny podle požadavku zadavatele práce následovně:



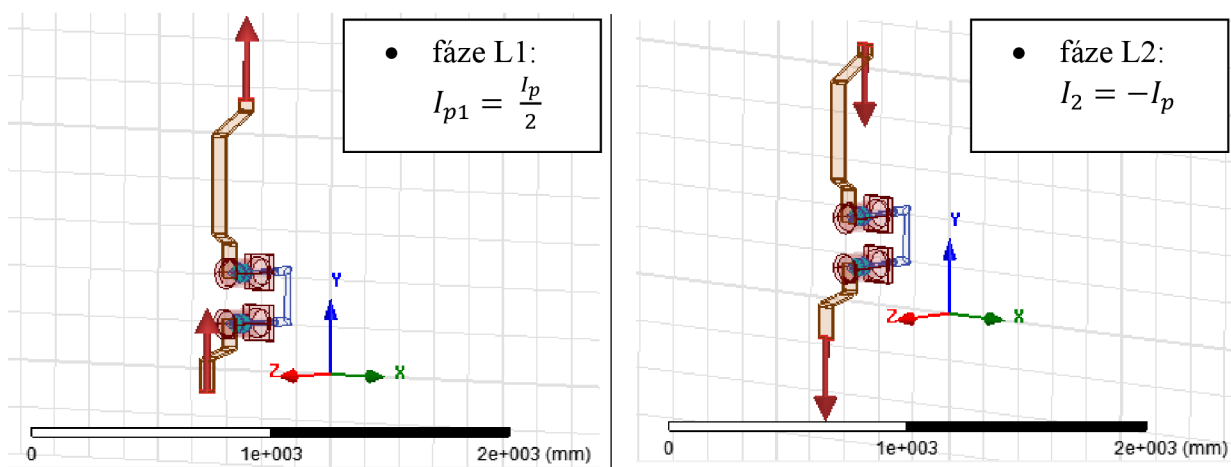
- fáze L1:  $I_{p1} = \frac{I_p}{2}$
- fáze L2:  $I_{p2} = -I_p$
- fáze L3:  $I_{p3} = \frac{I_p}{2}$

Obr. 8-3: Popis fází přípojnic a nastavované směry proudu.

### b) Modely vypínače se zaměřením na kontaktní systémy

Vzhledem k rozměrovým diferencím velkých sestav vypínačů a malých detailů kontaktních růžic, na které se analyzovaly účinky magnetického pole zkratového proudu, musel být model vypínače pro zvládnutelnost softwarovým výpočtovým prostředím zjednodušen na jednu fázi.

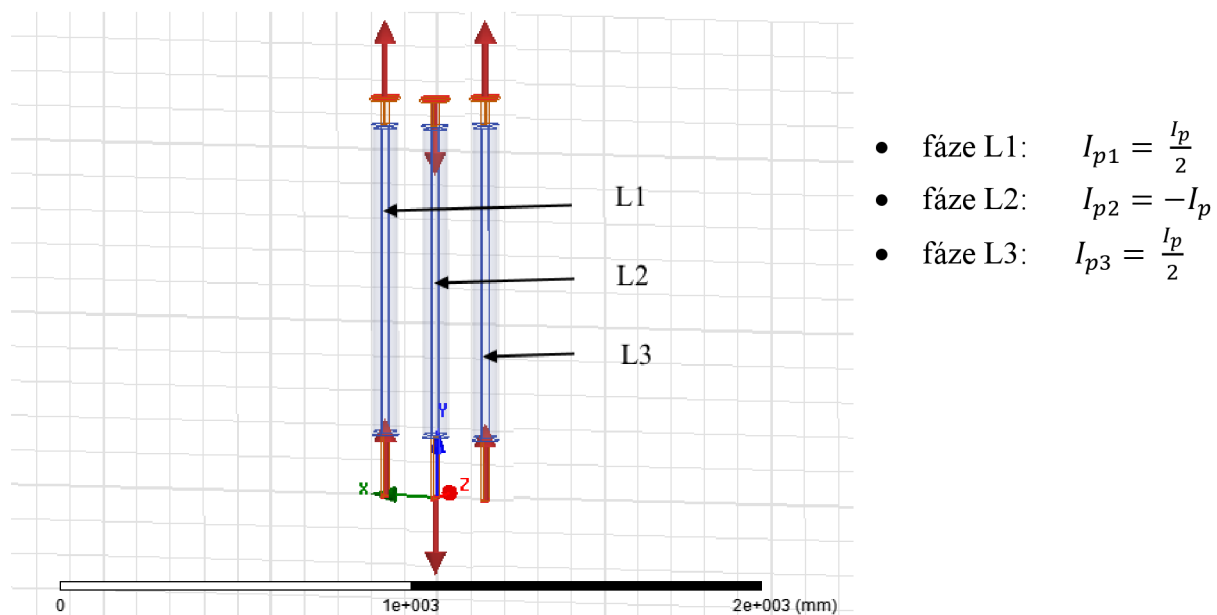
Pro každý typ kontaktního systému byly nastavovány dva směry a velikosti zkratového proudu pro dvě fáze podle Obr. 8-4. Dvěma oddělenými simulacemi jsou nasimulovány účinky, které na kontaktní růžice působí při zkratu v rozváděči:



Obr. 8-4: Nastavení hodnoty a směru zkratového proudu při simulacích kontaktních systémů.

## c) Model pro ověření lineární konfigurace vypínače

Směry a velikosti proudů byly u lineární konfigurace vypínače nastaveny ve stejném smyslu jako u vypínačů VD4:



Obr. 8-5: Popis fází přípojnic a nastavované směry proudu u lineární konfigurace vypínače.

## 8.3 Modely v prostředí Ansys a jeho zjednodušení

K provedení analýz byly použity následující softwarové prostředí:

- SolidWorks 2014
- Ansys Maxwell
- Ansys Workbench

### 8.3.1 Zjednodušené modely vypínačů VD4

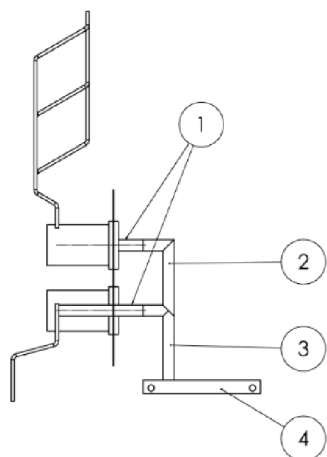
V rámci praktické části diplomové práce byly vytvořeny v 3D CAD programu SolidWorks 2014 tři geometrické konfigurace vypínačů VD4, dvě konfigurace kontaktních systémů vypínačů VD4 a lineární konfigurace vypínače. Sestavy byly vytvořeny na základě dostupných výkresových dokumentací k jednotlivým vypínačům, případné chybějící rozměry byly zjištěny praktickým měřením na reálných modelech.

Zjednodušené modely podle typů simulovaných oblastí vypínačů:

#### a) Modely vypínače se zaměřením na paže a póly

Zjednodušené modelované sestavy se zaměřením na paže a póly jsou sestaveny z těchto základních částí:

- přívodní přípojnicové odbočky rozváděče a část vývodních kabelových odboček vyvádějících proudy z komor
- zhášecí komory tvořené: izolačními průchodkami a krycím plechem
- vypínače VD4, který je složen z následujících částí na Obr. 8-6:

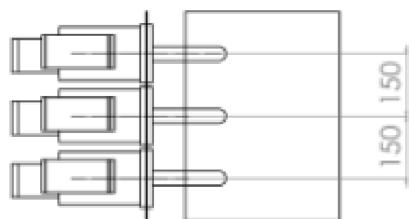
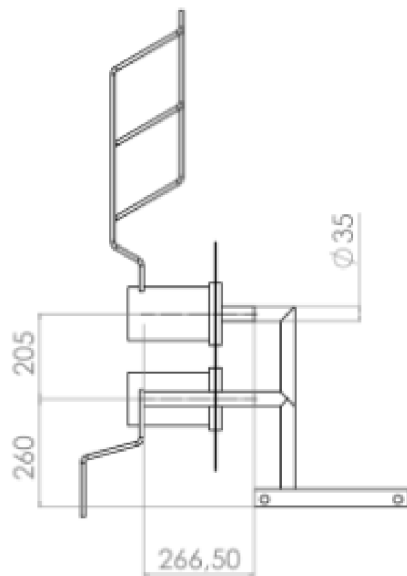


- poz.1: Paže vypínače
- poz.2: Póly vypínače
- poz.3: Zjednodušené izolační tělo
- poz.4: Podvozek

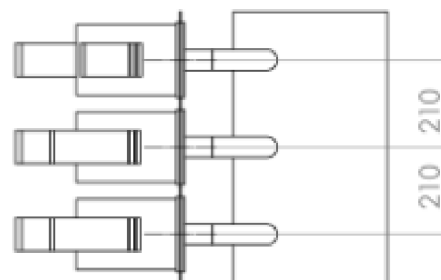
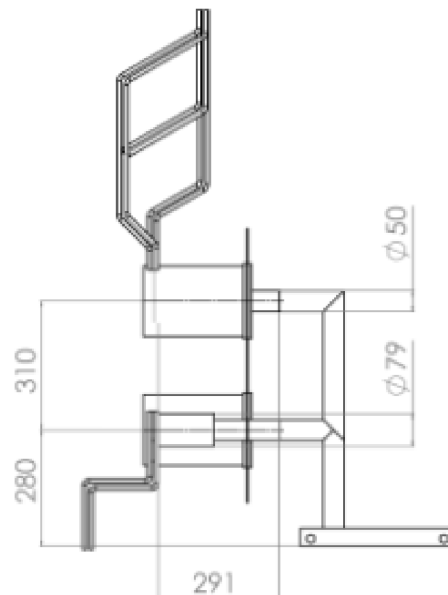
Obr. 8-6: Popis modelu vypínače, typ: VD4/P12 p.150.

Na Obr. 8-7 jsou výkresy všech třech sestavených typů vypínače. Výkresy obsahují kóty základních rozměrů, ve kterých se jednotlivé vypínače liší.

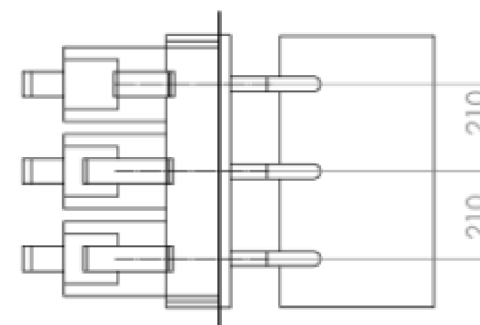
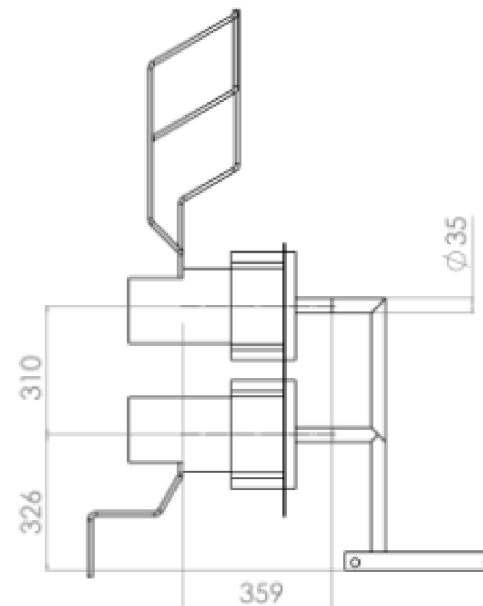
VD4/P12 p.150  
12 kV - 1250 A - 32 kA



VD4/P12 p.210  
12 kV - 2000 A - 50 kA



VD4/P24 p.210  
24 kV - 1250 A - 32 kA

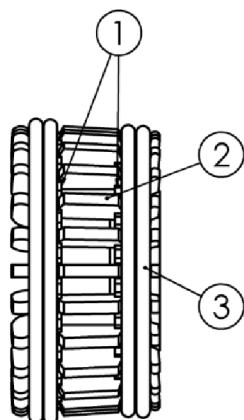


Obr. 8-7: Výkres modelů použitých pro analýzu v programu ANSYS.

### b) Modely vypínače se zaměřením na kontaktní systémy

Modelované sestavy se zaměřením na kontaktní systémy byly vzhledem ke složitosti výpočtové sítě a softwarovým simulačním hranicím výpočtu zjednodušeny pouze na jednu fázi. Jednotlivé modely jsou sestaveny z těchto základních částí:

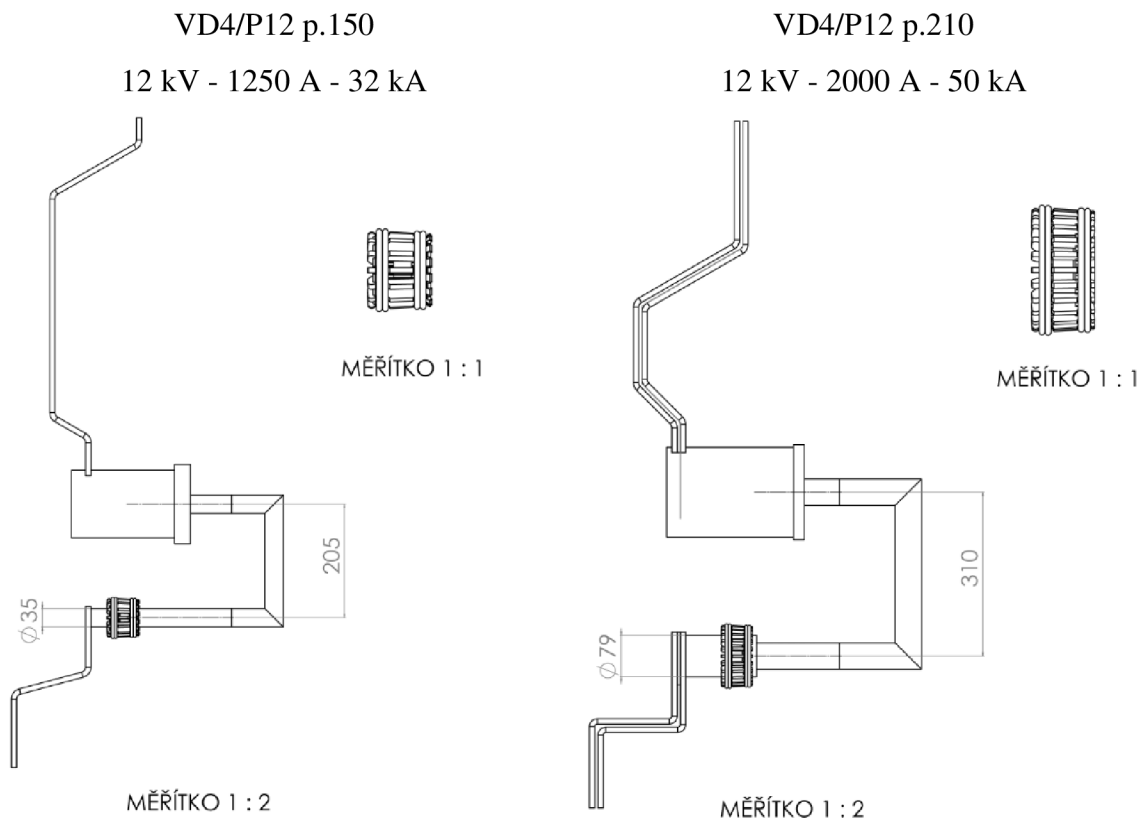
- přívodní přípojnicové odbočky rozváděče a část vývodních kabelových odboček
- izolační průchodky
- částí proudovodné dráhy vypínače tvořené pažemi a pólem vypínače pro 1 fázi
- kontaktním systémem, který je složen podle Obr. 8-8 z:



- poz.1: Držák prstů
- poz.2: Kontaktní elementy (dále prsty)
- poz.3: Pružiny

Obr. 8-8: Model kontaktního systému, pro vypínač typu VD4/12 p.210

Na Obr. 8-9 jsou výkresy obou analyzovaných typů kontaktních systémů vypínačů VD4.



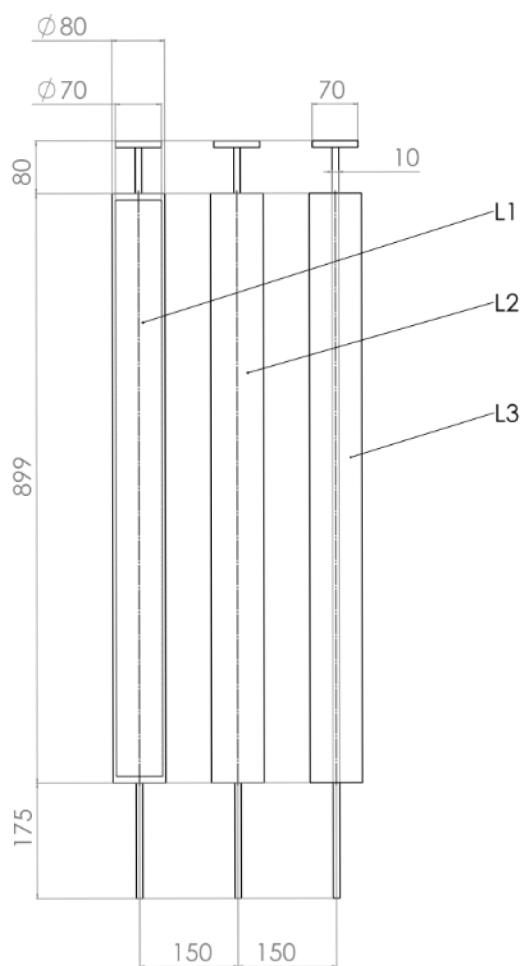
Obr. 8-9: Výkres simulovaných modelů kontaktních systémů použitých pro analýzu v programu Ansys.

**c) Model pro ověření lineární konfigurace vypínače**

Modelovaná sestava pro lineární konfiguraci vypínače je sestrojena ve třech fázích a je sestrojena z následujících částí:

- přívodní a vývodní odbočky
- válcové moduly lineárních pólů

Vypínač byl analyzovaný na jmenovitý dynamický výdržný proud  $I_p = 80 \text{ kA}$ .



Obr. 8-10: Výkres lineární konfigurace vypínače.

### 8.3.1.1 Zjednodušení využívaná ve všech modelech sestav

Pro maximální omezení výpočtového času u sestrojených modelů byla při konstrukci jednotlivých modelů provedena následující zjednodušení, která ale nemají vliv na správnost analýz:

- přípojnice byly modelovány bez zaoblených okrajů
- z důvodu ohraničení regionu výpočtu bylo nutné prodloužit přívodní systém přípojníc na jednotnou délku, tak aby bylo možné navolit vstup proudů do regionu v programu Ansys Maxwell
- žádný z dílců neobsahuje otvory ani spojovací materiál, propojení jednotlivých dílců je provedeno pevným kontaktem
- objemné dílce neobsahují malé detaily, které by zbytečně zatěžovaly výpočetní síť a které zároveň neovlivňují analyzované části
- póly vypínače jsou nahrazeny válcovým tvarem proudovodné dráty, protože simulace zhášedla v pólu vypínače není součástí této práce
- konstrukce ovládacích mechanismů vypínače, které nemají vliv na proudovodnou dráhu, byly nahrazeny válcem z nevodivého izolantu, který podpírá póly vypínače v odpovídajících vzdálenostech vzhledem k reálným vypínačům VD4

Jednotlivé modely vytvořené v modelovacím prostředí SolidWorks 2014 (přehled vytvořených konfigurací na (Obr. 8-7, Obr. 8-9, Obr. 8-10) byly následně importovány do prostředí Ansys Maxwell, ve kterém byly analyzovány silové účinky magnetického pole.

### 8.3.2 Modely v prostředí Ansys Maxwell

Do simulačního prostředí Ansys Maxwell byly modely vytvořené v programu SolidWorks 2014, z důvodu nekompatibility SolidWorks souborů s Ansys softwarem, přeneseny pomocí překladače ACIS™ ve formátu \*.sat. V příloze diplomové práce jsou z tohoto důvodu přiložené soubory ve formátu \*.sat.

Výpočet silových účinků magnetického pole byl v Ansys Maxwell proveden za pomoci funkce Magnetic Magnetostatic, která umožňuje počítat síly působící na proudovodnou dráhu v jeden konkrétní nastavený časový okamžik se statickou hodnotou nastaveného proudu.

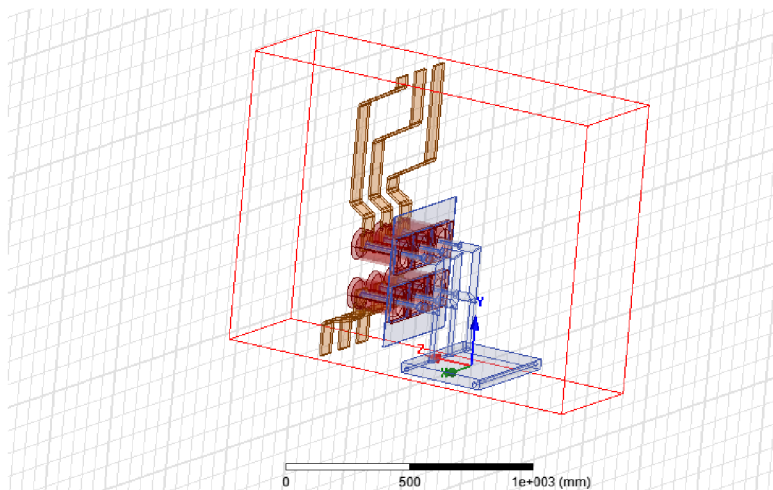
Jednotlivým dílcům importované geometrie byly přiřazeny materiály (seznam materiálů viz. Tab. 8-2). Pro proudovodnou dráhu vypínače a přípojníc je použita elektrovedná měď, pro izolační průchodky je zvolen materiál epoxidu a pro krycí plech a vozík je přiřazena ocel. Všechny tyto materiály byly vybrány z knihovny materiálů v programu Maxwell. Pro konstrukci izolačního válce byl v prostředí Maxwell knihovny vytvořen izolační materiál, kladoucí velký odpor průchodu elektrického proudu tak, aby se nasimulovalo nevodivé prostředí ovládacích mechanismů vypínače.



Tab. 8-2: Přehled materiálů použitých v analýze:

Vlastnost materiálu:	Objemová vodivost [S/m]	Hustota [kg/m <sup>3</sup> ]
Elektrovodná měď	$5,8 \cdot 10^7$	8920
epoxid	0	450
ocel	$2 \cdot 10^6$	7800
izolační materiál	$1 \cdot 10^{-7}$	1300

Důležitou součástí analýz bylo nastavení počítačícího regionu. Tento prostor, ve kterém se v Ansys Maxwell počítají síly, byl nastaven na velikosti, které přibližně odpovídají reálným rozměrům v rozváděči vn. Příklad vytvořené oblasti regionu pro vypínač VD4/P12 p.150 na Obr. 8-11).



Obr. 8-11: Ohraničená oblast regionu, ve kterém probíhal výpočet působících sil.

Nastavení výpočetní sítě bylo z větší části řešeno tzv. adaptivní metodou, kdy se nastavuje a počítá výpočetní síť automaticky na všech prvcích modelu až do dosažení nastavené minimální hodnoty chyby při konvergenci. Ve všech počítaných modelech se uvažovalo s maximální chybou výpočtu mezi dvěma po sobě jdoucími iteracemi 1%.

Vzhledem ke skutečnosti, že v práci je v dalším bodě za úkol zhodnotit deformační účinky na proudovodnou dráhu vypínače, bylo žádoucí mít na zkoumaných prvcích síť jemnější. Proto síť byla na analyzovaných detailech vypínače ještě zjemněna interaktivně a to pomocí funkce, která umožňuje navolit největší možnou délku hrany zjednodušujících elementů. To znamená, že při dosažení maximální povolené chyby při adaptivní iteraci program vyhodnotí délku jednotlivých elementů a v případě, že velikost hran jednotlivých elementů neodpovídá nastavené hodnotě, program síť nadále zjemňuje. Přidáním tohoto prvku do výpočtu bylo dosaženo prodloužení výpočtového času, ale zároveň přesnější vyhodnocení působících sil v Maxwellu.

### 8.3.3 Modely v prostředí Ansys Workbench

Z důvodu, že simulační prostředí Ansys Maxwell neumožňuje deformační vykreslení působících sil na vytvořený model, byl k vypracování druhé části úkolu použit další program v prostředí Ansys Workbench. Tento program umožňuje sdružit jednotlivé spouštěné moduly do jedné komplexní úlohy. Díky tomuto uživatelskému rozhraní lze do nastavení Workbenche importovat modul z Maxwellu. Tímto způsobem byla v Ansys Workbench sdílena geometrie modelu, včetně jednotlivých pevných spojení, vytvořená výpočtová síť a vypočtené síly.

Výpočet mechanických účinků na simulované modely byl řešen pomocí statické analýzy Static Structural. Program Ansys Workbench pracuje v tomto typu, ale i v ostatních typech analýz, se základním řešičem Mechanical. V tomto řešiči probíhalo bližší nastavení výpočtu komplexních úloh:

#### Materiálové nastavení

Důležitou součástí nastavení modelů při řešení mechanických úloh je nastavení materiálových vlastností. Ty byly vybrány z knihovny materiálů programu Ansys Workbench a doplněny hodnotami ze zdrojů [12], [13]. Mechanické deformace a napětí materiálů jsou v simulacích definovány pomocí Youngova modulu pružnosti a Poissonovy konstanty (nastavení jednotlivých hodnot viz. Tab. 8-3).

Tab. 8-3: Tabulka použitých materiálů v Ansys Workbench.

Vlastnost materiálu:	Youngův model pružnosti E [Pa]	Poissonova konstanta $\nu$ [-]	Hustota [kg/m <sup>3</sup> ]
Elektrovodná měď	$1,3 \cdot 10^{11}$	0,34	8920
epoxid	$8 \cdot 10^9$	0,3	450
ocel	$2 \cdot 10^{11}$	0,3	7800
izolační materiál	$1,7 \cdot 10^{10}$	0,3	1300

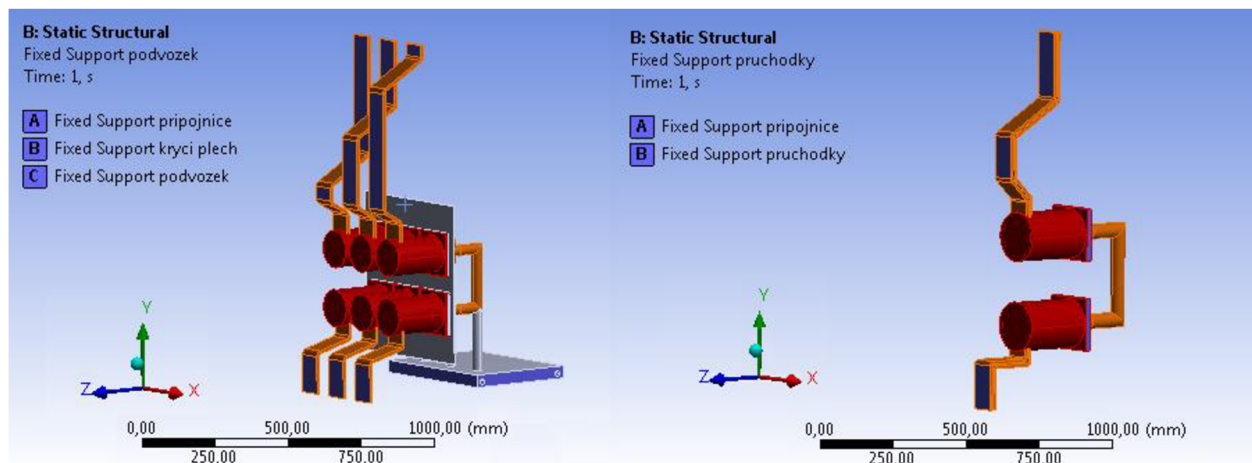
#### Mechanické upevnění modelu

Nezbytnou součástí všech mechanických úloh, je zvolení správného uchycení modelu. Řešič Mechanical umožňuje uchycení modelů pomocí funkce fixed support. Vybráním jednotlivých pevných hran a zvolením této funkce byl model zafixován. Model byl mechanicky připevněn pomocí hran dílců tak, aby výsledné uchycení odpovídalo skutečnému uchycení v rozváděči.

Modely byly pro jednotlivé analýzy upevněny podle Obr. 8-12 a Obr. 8-13 následovně:

### a) Modely vypínače se zaměřením na paže a póly

Za mechanicky pevné části jsou ve všech modelech považovány přívodní a vývodní přípojnice. Zjednodušená zhašecí komora tvořená krycím plechem a izolačními průchodkami je ukotvena za vnější hrany krycího plechu. Podvozek vypínače byl uchycen za vnější hrany zjednodušeného podvozku (viz. Obr. 8-12).



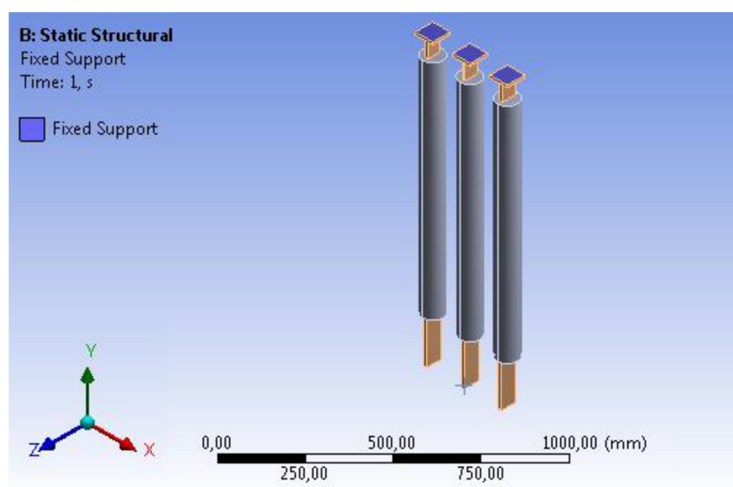
Obr. 8-12: Uchycení modelů vypínačů VD4 a kontaktních systémů pomocí funkce Fixed Support.

### b) Modely vypínače se zaměřením na kontaktní systémy

Modely se zaměřením na kontaktní systém mají mechanicky pevné přívodní a vývodní přípojnice, podobně jako u modelů se zaměřením na paže a póly vypínače. Jelikož model jedné fáze neobsahuje krycí plech ani podvozek vypínače, jsou u modelu se zaměřením na kontaktní systémy uchyceny obě průchodky za hrany v místech, kde jsou obvykle zafixovány s krycím plechem (viz. Obr. 8-12).

### c) Model lineární konfigurace vypínače

Model lineární konfigurace byl upevněn pouze za horní a spodní hranu přívodních a vývodní odboček.



Obr. 8-13: Uchycení lineární konfigurace vypínače.

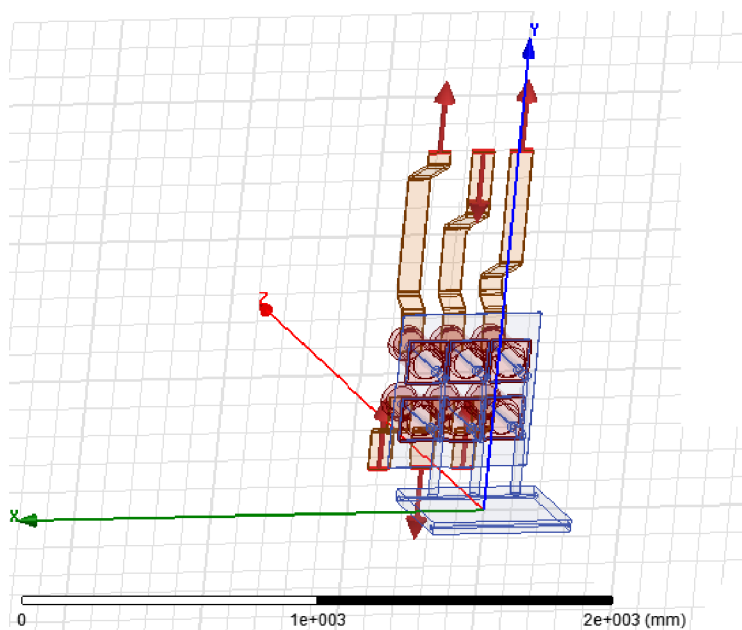
## 9 ANALÝZA SILOVÝCH ÚČINKŮ MAGNETICKÉHO POLE NA VYPÍNAČ

Teorie, využívaná k vypracování praktické části této práce, je uvedena v kap. 7 v popisu základních částí rozváděče vn a vakuového vypínače VD4. Zadané analyzované typy a části vypínačů, požadavky zadavatele práce spolu s hodnotami nastavovaných proudů a postup nastavovaných analýz v jednotlivých výpočtových prostředí programu Ansys jsou uvedeny v předchozí kap.8.

### 9.1 Modely vypínače se zaměřením na paže a póly

#### 9.1.1 Vypínač VD4/P12 p.150

Obr. 9-1 zobrazuje model vypínače vytvořeného pro simulaci v prostředí Ansys Maxwell. Orientace souřadného systému odpovídá směřům složek výsledných sil, fáze L1 se nachází nalevo od střední fáze v kladném směru osy  $x$  (Obr. 9-1). Proudů v jednotlivých fázích byly nastaveny na základě kap. 8.2.2 na následující hodnoty:



- L1: +40 kA
- L2: -80 kA
- L3: +40 kA

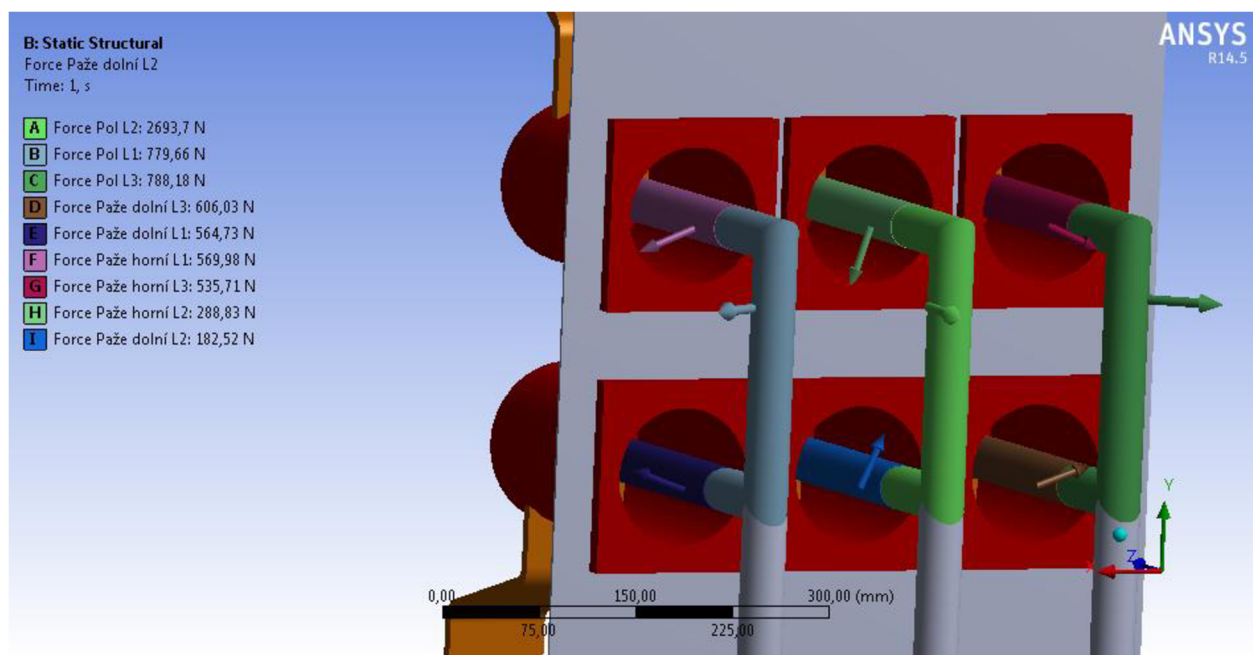
Obr. 9-1: Vypínač VD4/P12 p.150 s vyznačenými směry zkratového proudu.

V Tab. 9-1 jsou výsledky výpočtu jednotlivých působících sil spočítané v prostředí Ansys Maxwell. Vypočítané síly jsou rozloženy do jednotlivých směřů -  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .

Tab. 9-1: Výsledky výpočtu sil pro vypínač- VD4/P12 p.150- na proudovodné dráhy paží a pólů.

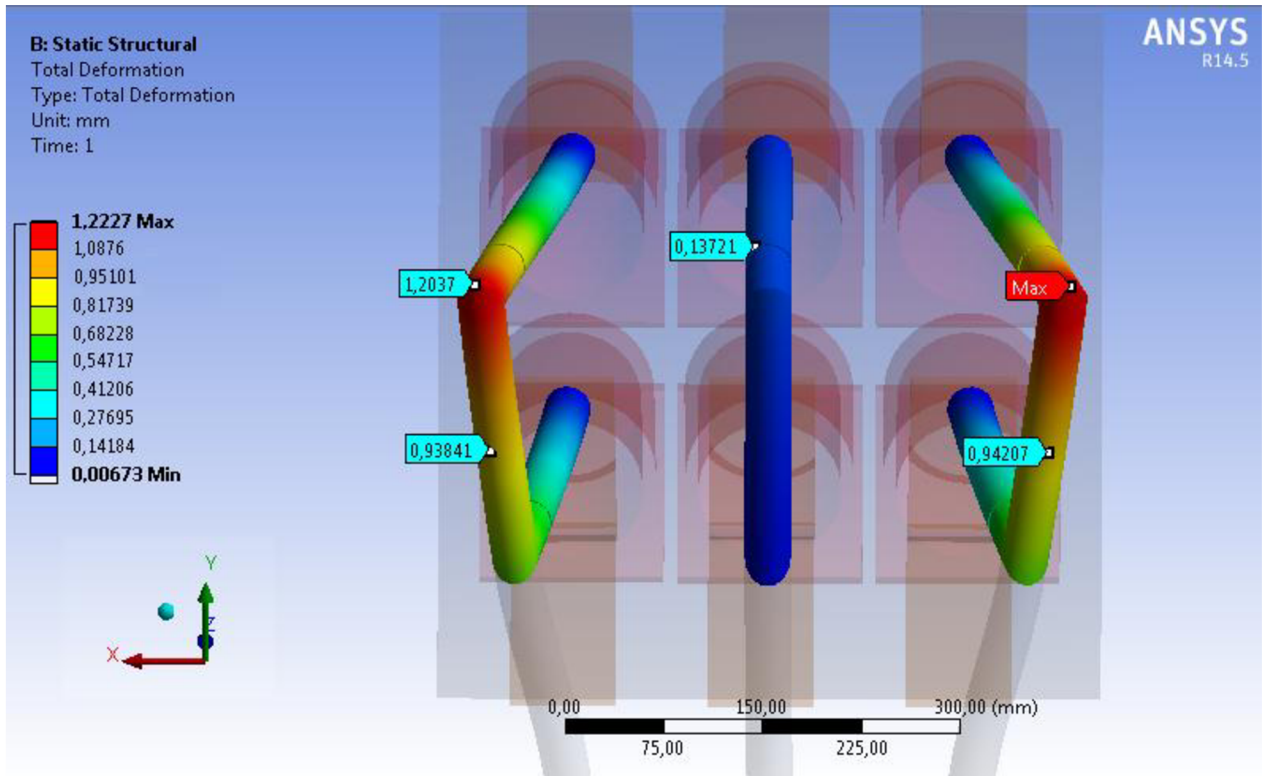
Objekt: VD4/P12 p.150 12 kV- 1250 A- 32 kA	Síla ve směru osy x [N]	Síla ve směru osy y [N]	Síla ve směru osy z [N]
Paže horní L1	529,86	-210,01	7,45
Paže horní L2	76,56	-277,43	24,33
Paže horní L3	-491,32	-213,39	7,03
Paže dolní L1	530,83	192,65	5,51
Paže dolní L2	-82,68	160,95	23,93
Paže dolní L3	-571,88	200,45	7,03
Pól L1	583,55	3,31	-531,04
Pól L2	-0,25	-13,40	-2647,74
Pól L3	-583,08	3,71	-530,31

Převedením vypočítaných sil do prostředí pro mechanické výpočty, do programu Ansys Workbench, bylo dosaženo grafického vykreslení směrů působících sil a byly vypočítány absolutní hodnoty velikosti sil působících ve směru udávajícím směry šipek (viz. Obr. 9-2).



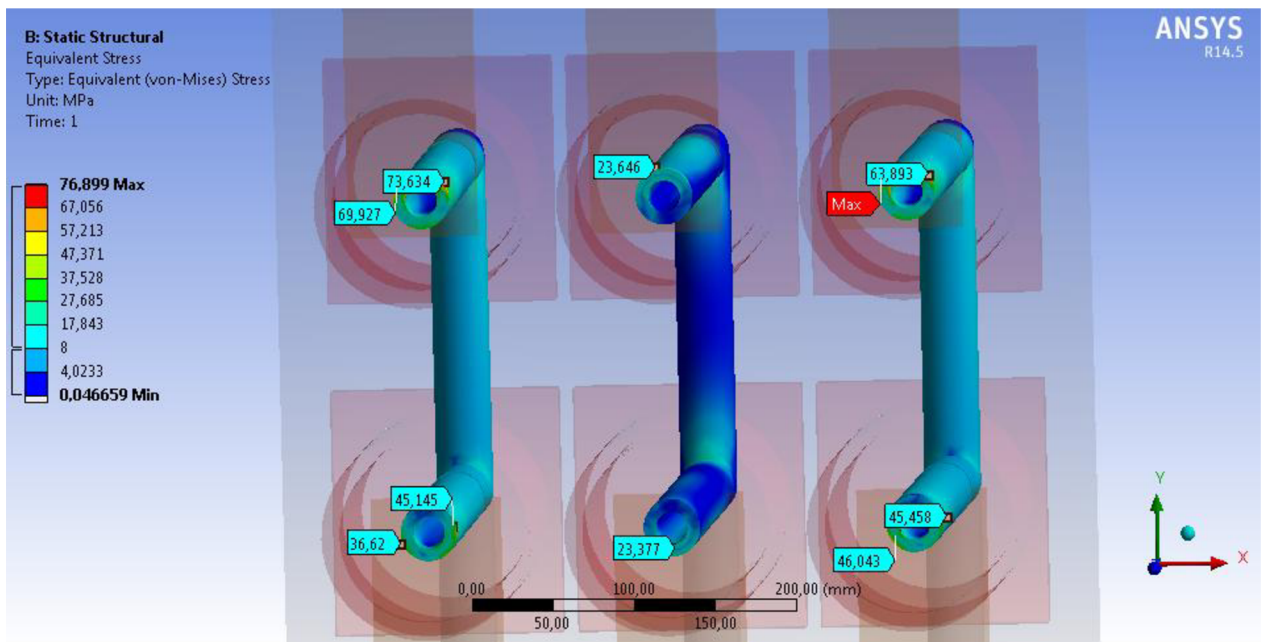
Obr. 9-2: Velikosti a směr působících sil na proudovodnou dráhu vypínače VD4/P12 p.150.

Z vypočítaných působících sil byla nasimulována a vykreslena deformace proudovodné dráhy. Obr. 9-3 zobrazuje konečnou deformaci proudové dráhy po průchodu zkratového proudu. Pro dostatečnou vizuální názornost vzniklé deformace je deformační účinek na paže a póly vypínače zobrazen v měřítku 63:1. Tedy deformace je vykreslena 63 násobně větší, než ve skutečnosti na vypínači nastane.



Obr. 9-3: Simulovaná deformace proudové dráhy vypínače VD4/P12 p.150. Měřítko 63:1.

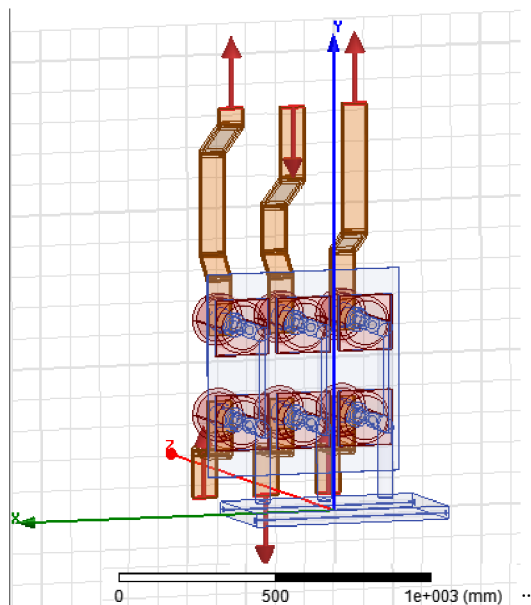
Obr. 9-4 ukazuje ekvivalentní napětí na paže a póly vypínače s detaily na místa připojení s přívodními přípojnícemi, kde je dosaženo největších hodnot mechanického namáhání. K maximálnímu mechanickému namáhání dochází v místě spojení s přívodními přípojnícemi ve fázi L1. Velikost mechanického namáhání v ostatních fázích zobrazují na Obr. 9-4 měřící sondy.



Obr. 9-4: Ekvivalentní napětí na proudové části vypínače VD4/P12 p.150.

### 9.1.2 Vypínač VD4/ P12 p.210

Vypínač VD4/P12 p.210 se liší od předešlého vypínače v parametrech uvedených v Tab. 8-1 a rozměrech na výkrese na Obr. 8-7. Orientace souřadného systému odpovídá směřům složek výsledných sil, které jsou uvedeny v Tab. 9-2. Fáze L1 se stejně jako u předešlého modelu nachází nalevo od prostřední fáze v kladném směru osy  $x$  na Obr. 9-5. Proudů v jednotlivých fázích byly nastaveny v tomto simulovaném zkratu na základě kap. 8.2.2 na následující hodnoty:



- L1: +62,5 kA
- L2: -125 kA
- L3: +62,5 kA

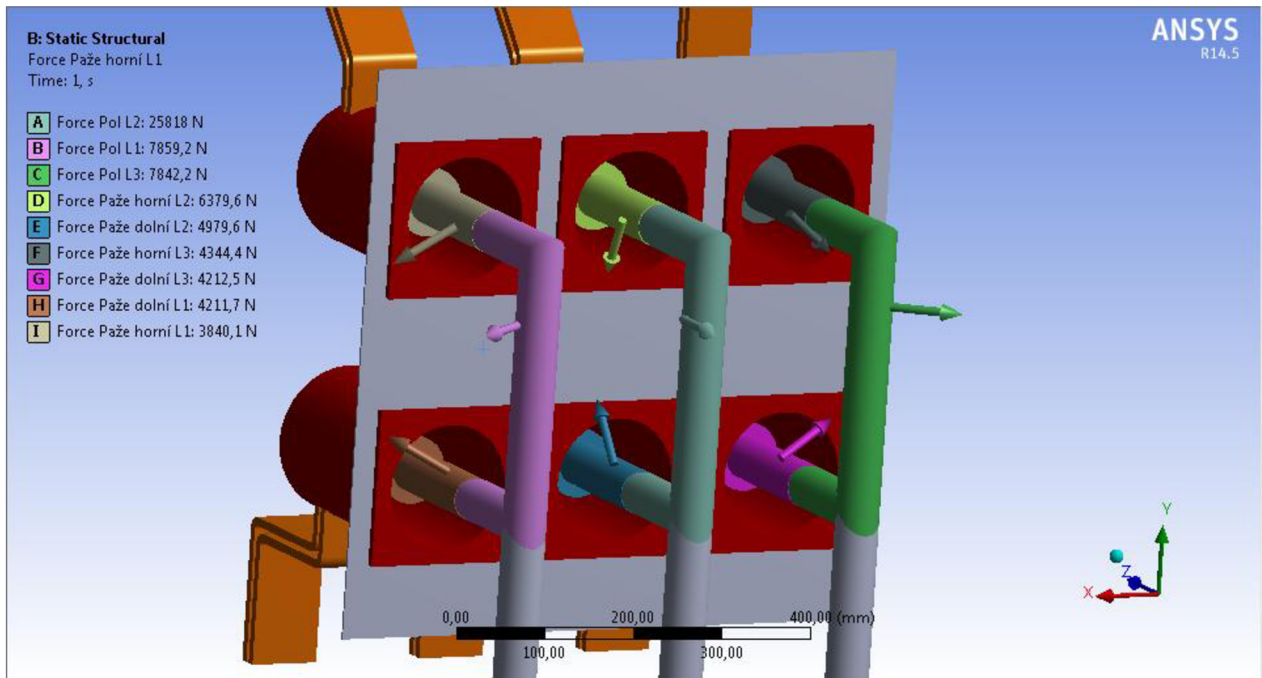
Obr. 9-5: Vypínač VD4/P12 p.210 s vyznačenými směry zkratového proudu.

Tab. 9-2 uvádí síly na proudové dráhy paží a pólů každé fáze vypínače. Síly jsou rozloženy do jednotlivých směřů-  $x$ ,  $y$  a  $z$ .

Tab. 9-2: Výsledky výpočtu sil pro vypínač- VD4/P12 p.210- na proudové dráhy paží a pólů.

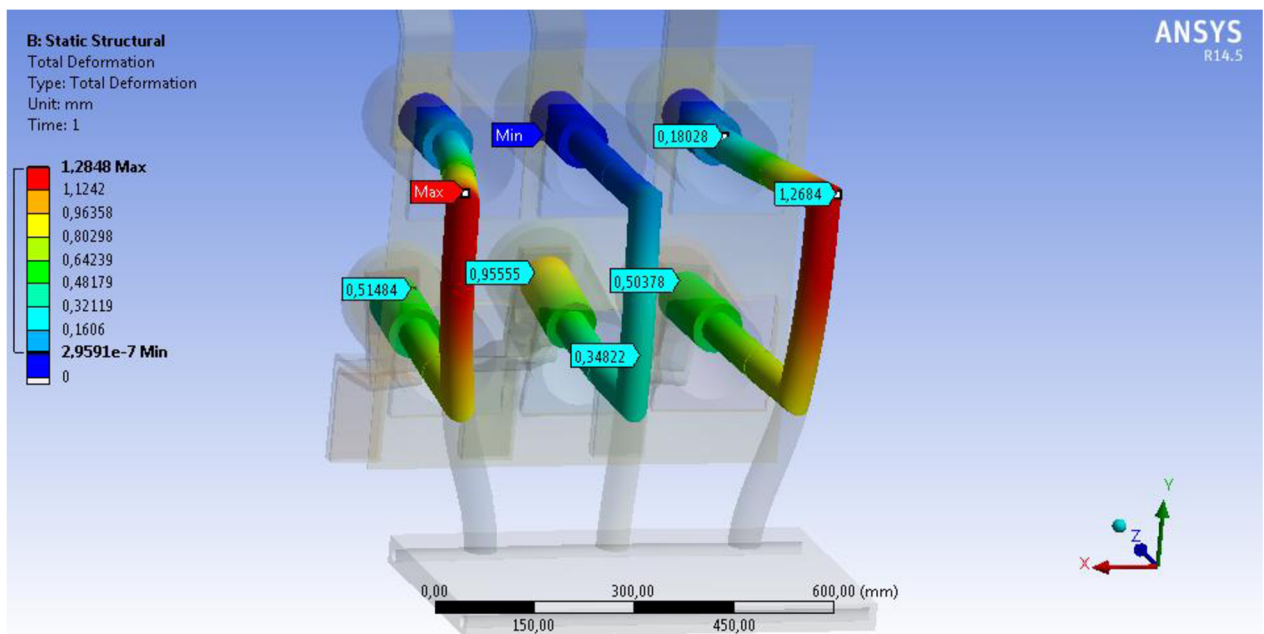
Objekt: VD4/P12 p.210 12 kV- 2000 A- 50 kA	Síla ve směru osy $x$ [N]	Síla ve směru osy $y$ [N]	Síla ve směru osy $z$ [N]
Paže horní L1	3112,29	-2085,23	843,81
Paže horní L2	-507,08	-5441,91	3290,58
Paže horní L3	-3321,34	-2660,54	874,05
Paže dolní L1	3600,17	2026,16	819,54
Paže dolní L2	29,91	3854,40	3152,58
Paže dolní L3	-3588,41	2049,69	816,62
Pól L1	6093,08	87,04	-4963,32
Pól L2	-17,46	-335,73	-25816,00
Pól L3	-6098,88	31,04	-4929,77

Převedením vypočítaných sil do prostředí pro mechanické výpočty byly vykresleny směry působících sil a byly vypočítány absolutní hodnoty velikosti sil působících ve směru šipek (viz. Obr. 9-6).



Obr. 9-6: Velikosti a směr působících sil na proudovodnou dráhu vypínače VD4/P12 p.210.

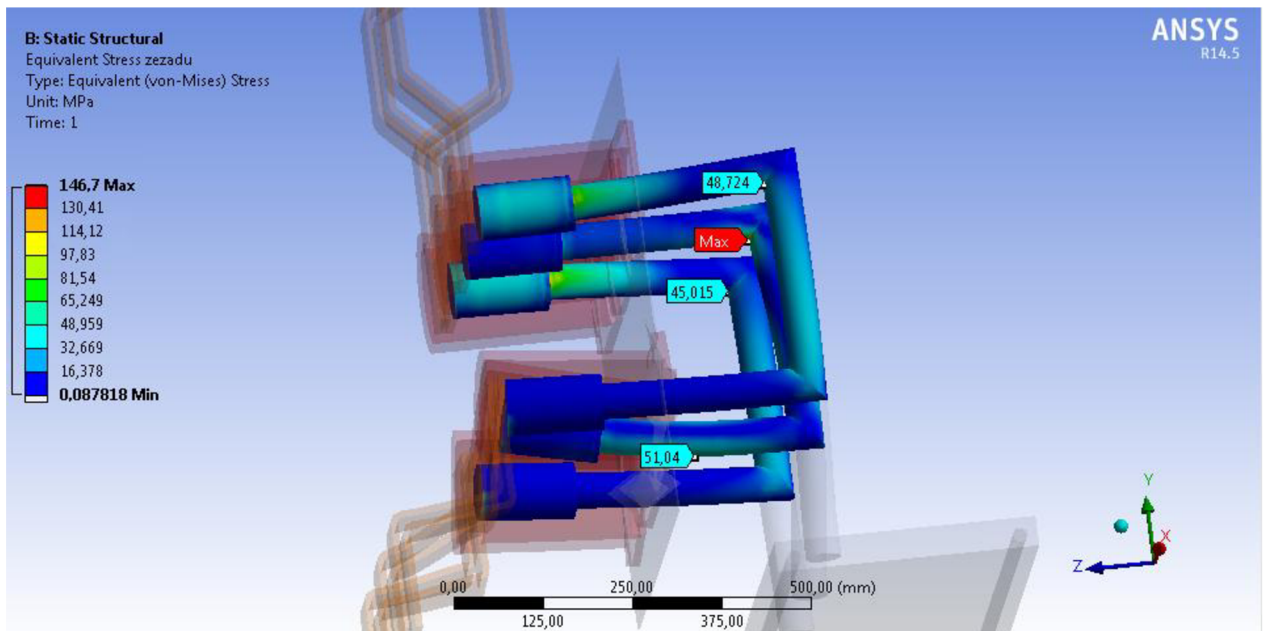
Z vypočítaných působících sil byla nasimulována a vykreslena deformace proudové dráhy. Obr. 9-7 zobrazuje konečnou deformaci proudové dráhy po průchodu zkratového proudu. Pro dostatečnou vizuální názornost vzniklé deformace je deformační účinek na paže a póly vypínače zobrazen v měřítku 66:1- deformace je vykreslena 66 násobně větší, než ve skutečnosti na proudové dráze vypínače nastane.



Obr. 9-7: Simulovaná deformace proudové dráhy vypínače VD4/P12 p.210. Měřítko 66:1.

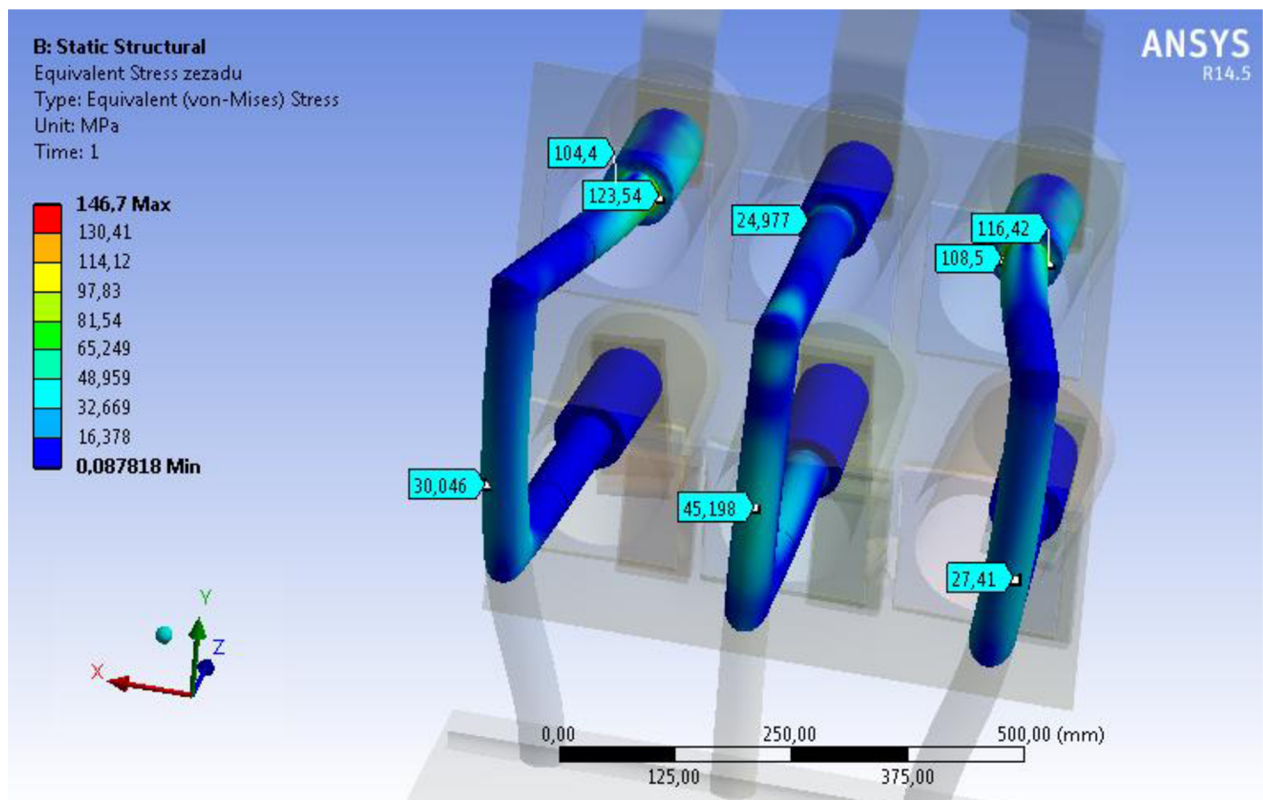


Obr. 9-8 ukazuje maximální ekvivalentní napětí, ke kterému dochází v horním pravoúhlém záhybu pólu prostřední fáze. Velikost mechanického namáhání v ostatních fázích záhybů již není tak významná.



Obr. 9-8: Ekvivalentní napětí na pravoúhlé záhyby vypínače VD4/P12 p.210. Měřítko 66:1

Obr. 9-9 ukazuje ekvivalentní napětí na paže a póly vypínače s měřicími sondami v vybraných místech s větším napětím.

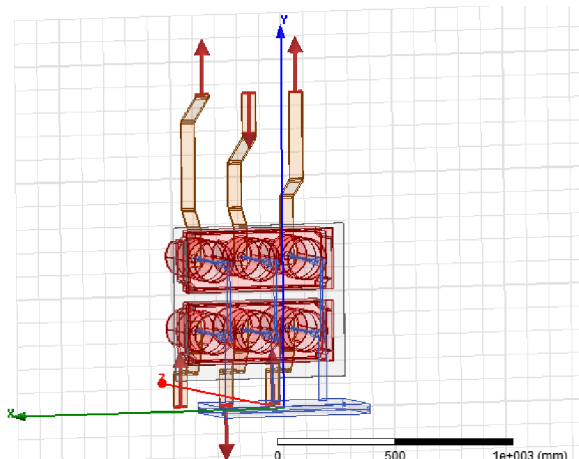


Obr. 9-9: Ekvivalentní napětí na proudovodné části vypínače VD4/P12 p.210. Měřítko 66:1.

### 9.1.3 Vypínač VD4/P24 p.210

Vypínač VD4/ P24 p.210 se liší od předešlých vypínačů v parametrech uvedených v Tab. 8-1 a rozměrech na výkrese na Obr. 8-7. Orientace použitého souřadného systému odpovídá směrům složek výsledných sil, které jsou uvedeny v Tab. 9-3. Fáze L1 se stejně jako u předešlých modelů nachází nalevo od prostřední fáze v kladném směru osy  $x$  vzhledem k vypínači na Obr. 9-10.

Hodnoty zkratových proudů v jednotlivých fázích byly nastaveny v tomto simulovaném modelu na základě kap. 8.2.2 na následující hodnoty:



- L1: +40 kA
- L2: -80 kA
- L3: +40 kA

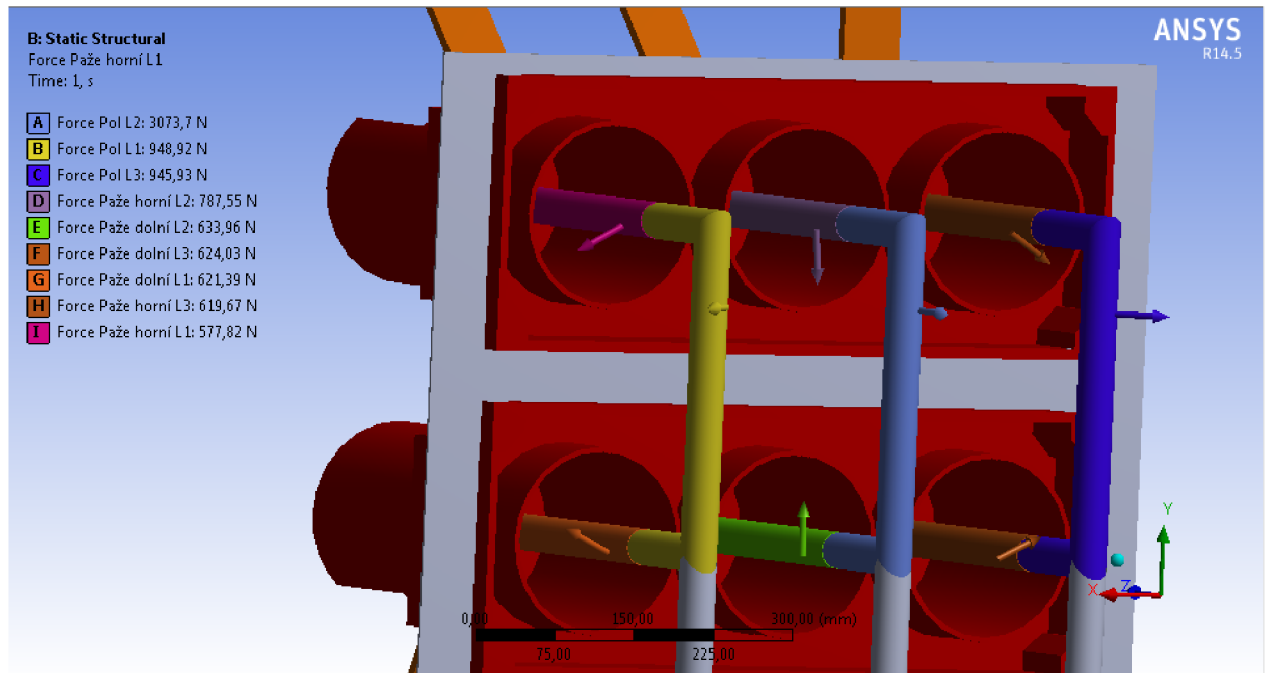
Obr. 9-10: Vypínač VD4/P24 p.210 s vyznačenými směry zkratového proudu.

Tab. 9-3 uvádí síly na proudové dráhy paží a pólů každé fáze vypínače. Síly jsou rozloženy do jednotlivých směrů -  $x$ ,  $y$  a  $z$ .

Tab. 9-3: Výsledky výpočtu sil pro vypínač- VD4/P24 p.210- na proudové dráhy paží a pólů.

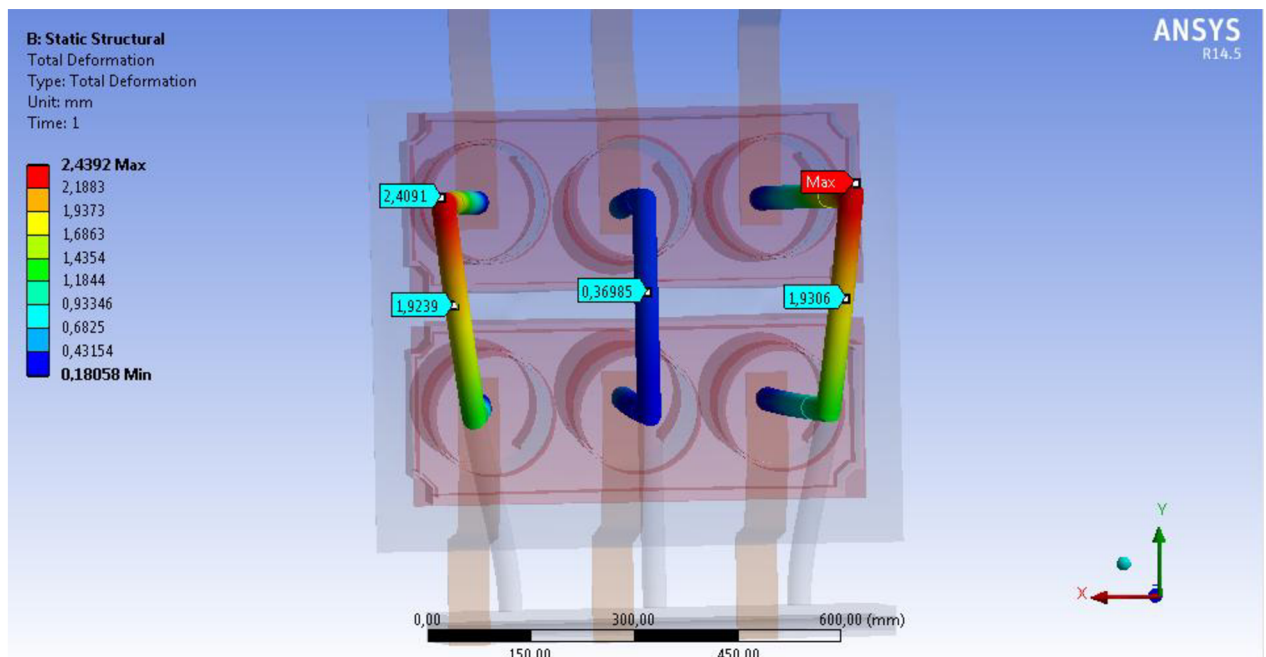
Objekt: VD4/P24 p.210 24 kV- 1250 A- 32 kA	Síla ve směru osy $x$ [N]	Síla ve směru osy $y$ [N]	Síla ve směru osy $z$ [N]
Paže horní L1	511,23	-269,27	3,04
Paže horní L2	-64,76	-784,84	8,04
Paže horní L3	-518,87	-338,73	4,88
Paže dolní L1	562,37	264,295	2,94
Paže dolní L2	4,13	633,85	10,89
Paže dolní L3	-562,46	270,27	3,46
Pól L1	679,53	4,94	-662,32
Pól L2	-1,12	-19,87	-3073,67
Pól L3	-681,09	0,55	-656,43

Převedením vypočítaných sil do prostředí pro mechanické výpočty byly vykresleny směry působících sil a byly vypočítány absolutní hodnoty velikosti sil působících ve směru šipek (viz. Obr. 9-11).



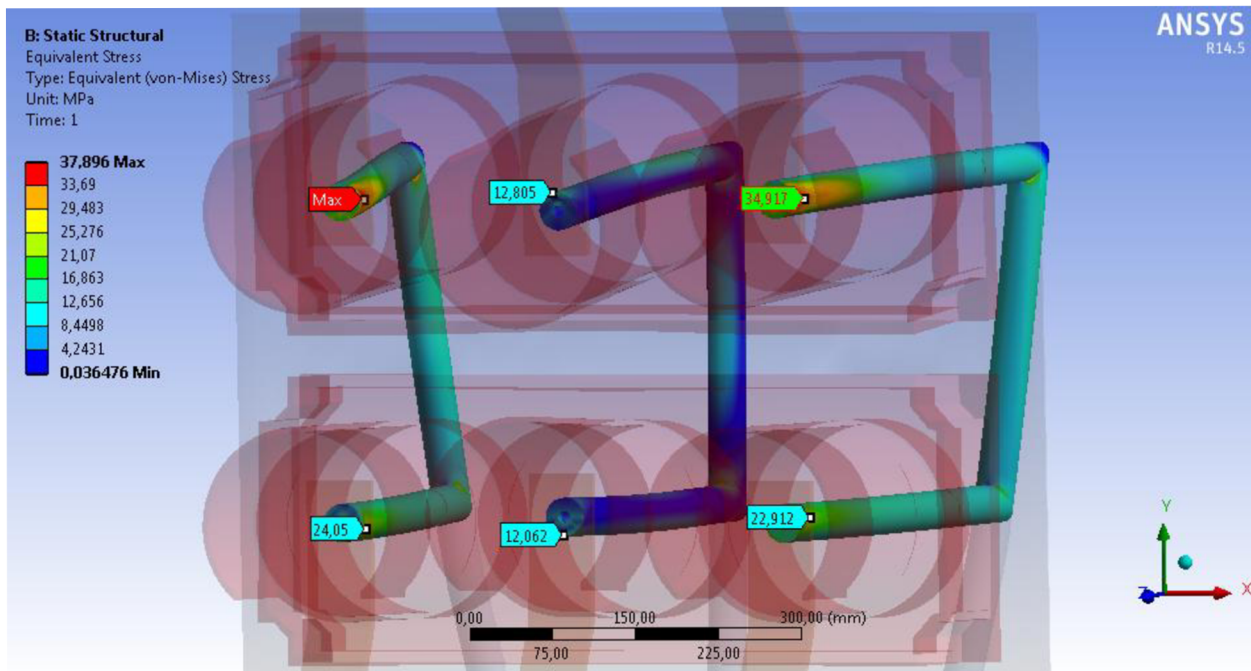
Obr. 9-11: Velikosti a směr působících sil na proudovodnou dráhu vypínače VD4/P24 p.210.

Z vypočítaných působících sil byla nasimulována a vykreslena deformace proudové dráhy. Obr. 9-12 zobrazuje konečnou deformaci proudovodné dráhy po průchodu zkratového proudu. Pro dostatečnou vizuální názornost vzniklé deformace je deformační účinek na paže a póly vypínače zobrazen v měřítku 38:1- deformace je vykreslena 38 násobně větší, než ve skutečnosti na proudové dráze vypínače nastane.



Obr. 9-12: Simulovaná deformace proudové dráhy vypínače VD4/P24 p.210. Měřítko 38:1.

Obr. 9-13 ukazuje ekvivalentní napětí na paže a póly vypínače s měřícími sondami na vybraných místech s největším napětím.



Obr. 9-13: Ekvivalentní napětí na proudovodné části vypínače VD4/P24 p.210. Měřítko 38:1.

### 9.1.4 Zhodnocení dosažených výsledků

Z výsledků směrů a velikostí jednotlivých sil vypočítaných u všech třech konfigurací vypínačů VD4 je patrné, že ve všech modelech dochází ke stejným fyzikálním principům působení magnetického pole, vzniklého vlivem průchodu zadaných proudů jednotlivými fázemi.

Z grafického vykreslení působišť a směrů jednotlivých sil je patrná izolační funkce průchodek. Na část paží, které jsou kryté izolačními průchodkami, nepůsobí síly vzniklé interakcí magnetických polí sousedních fází. Majoritně na tyto izolované části paží vypínače působí především síly vznikající průtokem proudu zakřivenou pravoúhlou proudovou dráhou. Pravoúhlý záhyb je tvořen přívodními/vývodními přípojnícemi a pažemi vypínače. Působící síly napřimují pravoúhlý záhyb a na paže vypínače v tomto záhybu permanentně působí směrem dolů u horních paží vypínače a směrem nahoru u dolních paží vypínače. Ve výsledném působení jsou tak paže vypínače namáhány silou, která stlačuje paže vypínače směrem k sobě.

V části paží a pólů vypínačů, kde již nejsou izolační průchodky, působí dynamické síly, jejichž synergie je důsledkem působení dvou hlavních skupin sil.

První skupinou sil jsou síly vzniklé průchodem proudu jednotlivými úseky téhož vodiče. V případě pólu a paží jedné fáze, je to účinek sil, které se opět snaží napřimit tvar tentokrát pravoúhlé U smyčky do přímé polohy. Jak je i patrné z teoretické kapitoly 3.1.1, největší síla působí na spojnicí (pól vypínače) pravoúhlé U - smyčky. Síla působící na tuto spojnicí je, u stejně dlouhých paží, na spojovací úsek dvojnásobná oproti jednoduchému pravoúhlému záhybu. Tato skupina sil je tedy důvodem, proč největší síly vznikající na proudovodnou část vypínačů VD4 působí na póly ve směru záporné osy z (vzhledem k orientaci modelů k souřadným osám při analýzách).

Tab. 9-4 udává pro srovnání velikosti působících sil na póly vypínačů u všech třech testovaných typů. Největší síly vznikají vždy v prostředních fázích vypínače, kterými ve vypočítaných simulacích protéká největší hodnota zkratového proudu a kde síly dosahují až trojnásobných hodnot oproti silám působících na sousední póly vypínače.

Tab. 9-4: Srovnání velikostí sil působících na póly analyzovaných vypínačů VD4.

Objekt	Vypínač VD4/P12 p.150 12 kV- 1250 A- 32 kA	Vypínač VD4/P12 p.210 12 kV- 2000 A- 50 kA	Vypínač VD4/P24 p.210 24 kV- 1250 A- 32 kA
Síly	$F$ [kN]	$F$ [kN]	$F$ [N]
Pól L2	2,693	25,8180	3,074
Pól L1	0,780	7,859	0,949
Pól L3	0,788	7,842	0,946

Na soudržnost celého vypínače v zafixované poloze v rozváděči mohou mít velikosti a směry působení vzniklých sil na póly vypínače již značný význam. Možná deformace konstrukce přístrojové části vypínače ani uchycení konstrukce vypínače v rozváděči vn, ale nejsou součástí této práce.

Síly působící v pravoúhlé U-smyčce mají také částečný vliv na velikosti sil působících na paže vypínače. Na rozdíl od pravoúhlého záhybu (vývodní/přívodní přípojnice-paže) působí síly

v U smyčce opačným směrem. Síly vzniklé v U-smyčce, tak zmenšují působící síly, které přitahují paže vypínače k sobě a mají příznivý vliv proti deformaci.

Druhou skupinou sil, jež působí na neizolované proudovodné dráhy vypínačů, jsou síly vzniklé interakcí magnetických polí okolních proudových drah. Sousedními fázemi protékají proudy opačného smyslu, jejichž magnetické pole vytvářejí síly způsobující, že se jednotlivé proudovodné dráhy od sebe odpuzují. Vzhledem k simulované volbě zkratových proudů dochází k odpuzování vodičů krajních fází. Ve střední fázi se síly navzájem vyrušují a k významné deformaci tak na nich nedochází.

K největším deformačním účinkům dochází v horním pravoúhlém záhybu U smyčky proudovodných pólů, ve kterých dochází u jednotlivých vypínačů k těmto maximálním velikostem deformací:

- VD4/P12 p.150: 1,22 mm
- VD4/P12 p.210: 1,28 mm
- VD4/P24 p.210: 2,44 mm

K minimálním deformacím dochází, vlivem navolených pevných spojů, u napojení paží vypínače s přívodními/ vývodními přípojnými. V rámci hodnocení účinků elektrodynamických sil je tedy žádoucí vyhodnotit ekvivalentní napětí, působící na tyto spoje. Ekvivalentní napětí představuje míru vnitřního rozložení sil na plochu tělesa působením silového pole. Na Obr. 9-4 a Obr. 9-13 vzniká největší ekvivalentní napětí u těchto vypínačů právě v uchycení spojovacího roubíku (paží vypínače) a přívodními/vývodními přípojnými. Největších velikostí namáhání dosahují u uchycení krajních fází, kde je napětí největší. U vypínače VD4/P12 p.210 nedochází k největšímu ekvivalentnímu napětí v uchycení s přípojnými díky větší proudovodné a stykové ploše přípojovacího roubíku (pažím vypínače) a přípojnými. Největší ekvivalentní napětí vzniká v tomto případě v pravoúhlém záhybu prostřední fáze pólu.

V jednotlivých konfiguracích vypínačů VD4 dosahuje ekvivalentní napětí těchto maximálních hodnot:

- VD4/P12 p.150: 76,89 MPa
- VD4/P12 p.210: 146,7 MPa
- VD4/P24 p.210: 37,89 MPa

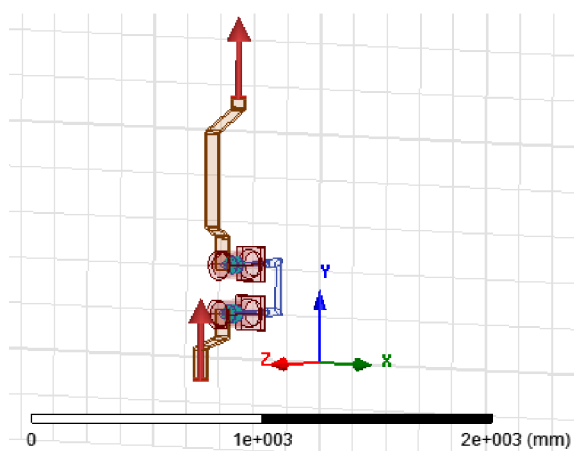
## 9.2 Modely vypínače se zaměřením na kontaktní systémy (růžice)

Simulace byla prováděna pro dva typy kontaktních systémů, které jsou podrobněji popsány v kapitole 8. Na každém typu kontaktních růžic byly provedeny dvě analýzy silových účinků magnetického pole při průchodu dvou hodnot zkratových proudů. Analýzy tak prezentují chování kontaktního systému ve dvou fázích- L1 a L2:

### 9.2.1 Kontaktní systém vypínače 12 kV - 1250 A - 32 kA

#### a) Fáze L1, nastavovaný proud: $I_{p1} = 40$ kA

Obr. 9-14 zobrazuje model vypínače vytvořeného pro simulaci v prostředí Ansys Maxwell. Orientace souřadného systému odpovídá směřům složek výsledných sil. Proud v modelu byl nastaven na základě kap. 8.2.2 na hodnotu:



- fáze L1:  $I_{p1} = 40$  kA

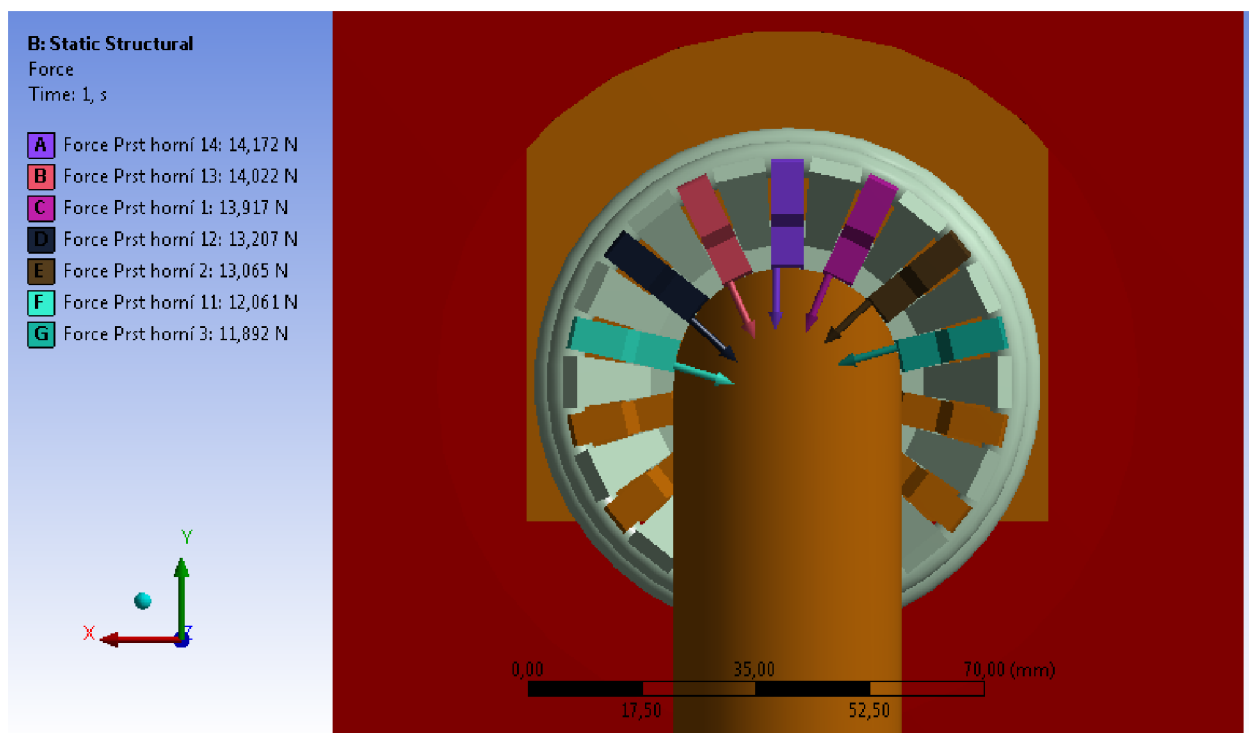
Obr. 9-14: Nastavení směru a velikosti proudu v analýze pro L1 růžice 12kV-1250A-32kV.

Simulací průchodu zkratového proudu touto fází byly vypočítány velikosti sil na jednotlivé kontaktní prsty růžice. Vypočítané síly na jednotlivé prsty jsou rozloženy do jednotlivých směřů-  $x$ ,  $y$  a  $z$ . Tabulka hodnot těchto sil je pro svoji obsáhlost přiložená v příloze na konci této práce (v Tab. 11-1). V tabulce jsou i vypočítané absolutní velikosti jednotlivých sil.

Z vypočítaných hodnot sil byly v prostředí Workbench vykresleny směry působení jednotlivých sil a vypočítány jejich velikost. Vyhodnocení působících sil je přehledně zobrazeno v každé kontaktní růžici v dalším pokračování hlavního textu práce. Velikosti sil zobrazených šipek jsou vyznačeny v legendové levé části obrázků. Jednotlivé barevné symboly u názvů kontaktních prstů a jejich velikostí, odpovídají barevně značeným prstům v modelu.

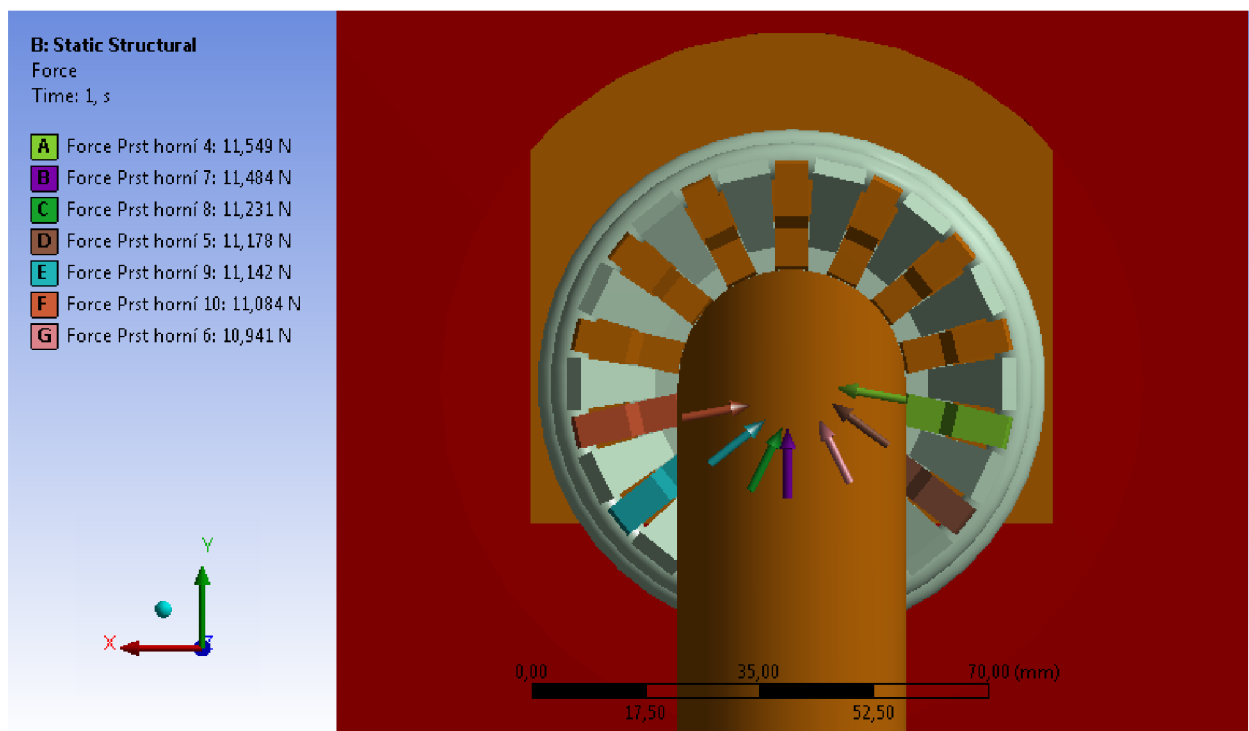
#### Zhodnocení dosažených výsledků

Obr. 9-15 zobrazuje sedm největších hodnot sil působících v horní fázi na kontaktní prsty růžice. Výsledné síly jednotlivých prstů působí radiálně směřem ke středové ose tubicové konstrukce proudové dráhy horní paže vypínače. Největší síly působí na prsty v horní části kontaktního systému. Na výslednou sílu působící na tyto kontaktní prsty má vliv pravouhlý záhyb, tvořený paží vypínače a přívodní přípojnici, jehož magnetické pole vytváří síly působící ve směřu záporné osy  $y$ . Největší síla působící na prsty kontaktní růžice je na horní prst 14, na který působí síla 14,172 N.



Obr. 9-15: Největší síly působící na prsty horní růžice 12kV-1250A-32kV,  $I_{p1} = 40kA$ .

Obr. 9-16 zobrazuje síly na ostatních prstech horního kontaktního systému vypínače. Nejmenší síla působící na horní kontaktní systém je v horním prstu 6, na který působí síla o velikosti 10,941 N. Rozdíl mezi největší a nejmenší hodnotou působících sil v horní fázi kontaktního systému je 3,23 N.

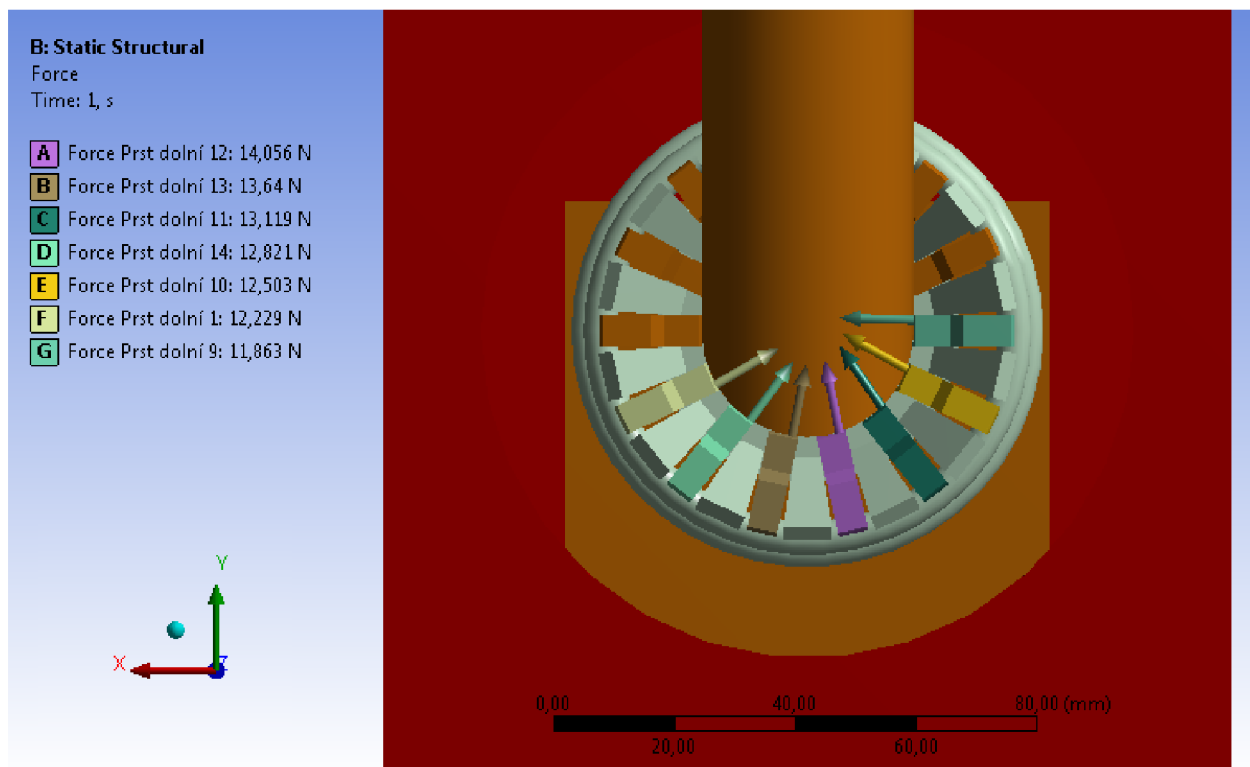


Obr. 9-16: Nejmenší síly působící na prsty horní růžice 12kV-1250A-32kV,  $I_{p1} = 40kA$ .

Obr. 9-17 zobrazuje sedm největší hodnot sil působících na dolní kontaktní prsty růžice. Největší síly působí na prsty v dolní části kontaktního systému. Výsledná síla je ovlivněna pravouhlým záhybem, tvořeným dolní paží vypínače a vývodní přípojnící, jehož magnetické pole

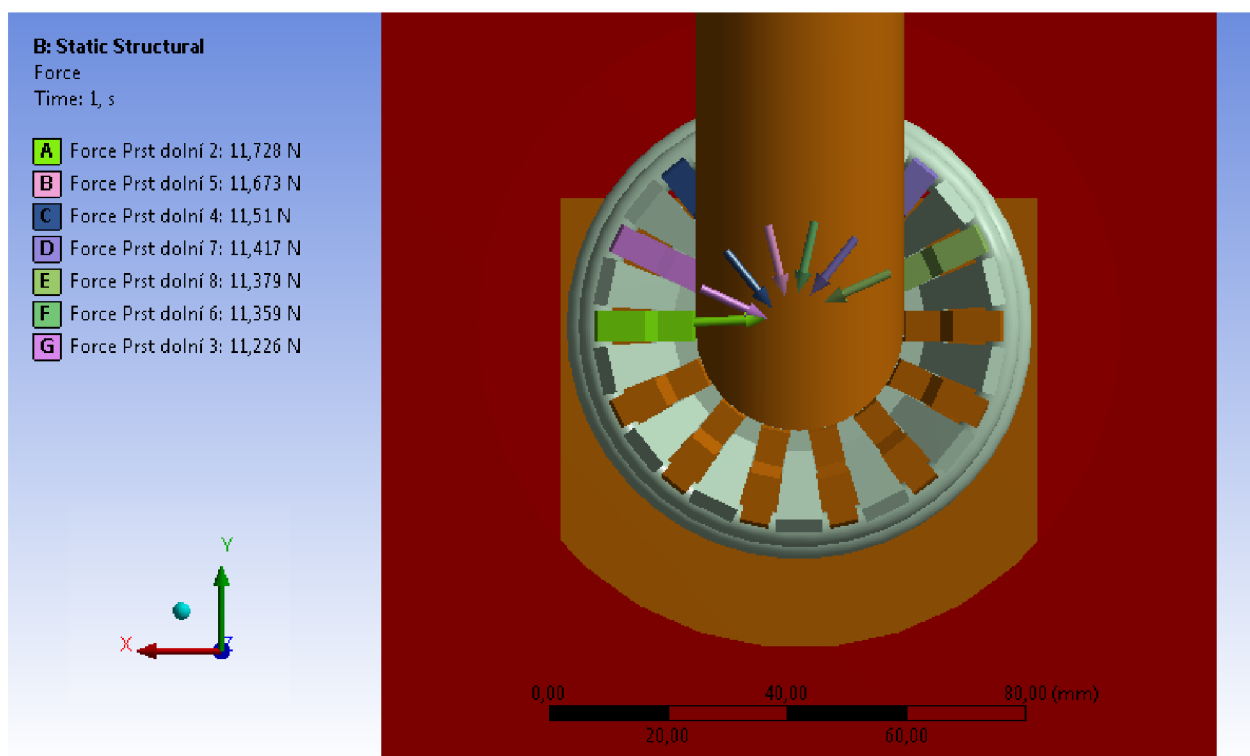


vytváří síly působící ve směru kladné osy y. Největší síla působí na dolní prst 12 kontaktní růžice, na který působí síla 14,056 N.



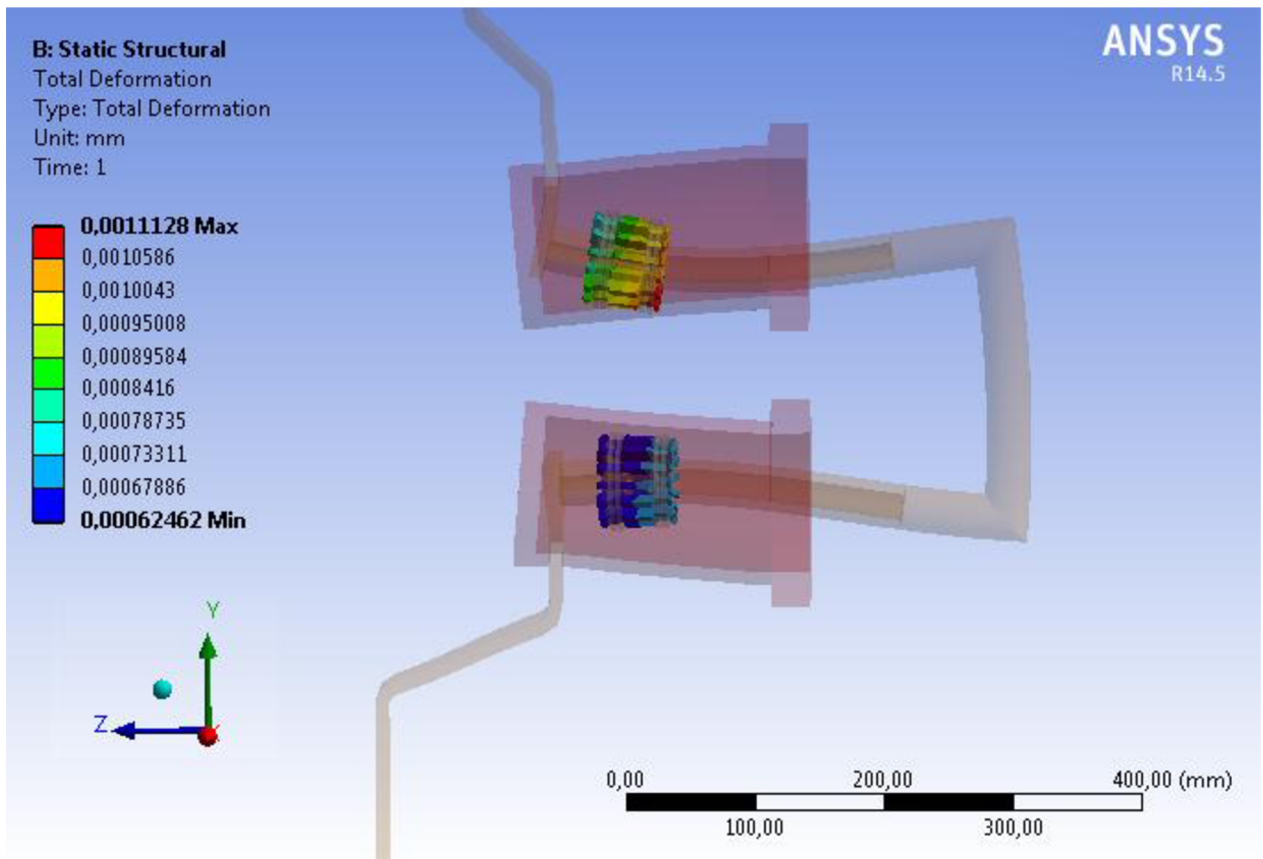
Obr. 9-17: Největší síly působící na prsty dolní růžice 12kV-1250A-32kV,  $I_{p1} = 40\text{kA}$ .

Obr. 9-18 zobrazuje působící síly na ostatních prstech dolního kontaktního systému vypínače. Nejmenší síla působící na dolní kontaktní systém je v dolním prstu 3, na který působí síla o velikosti 11,226 N. Rozdíl mezi největší a nejmenší hodnotou působících sil v dolním kontaktním systému je 2,83 N.



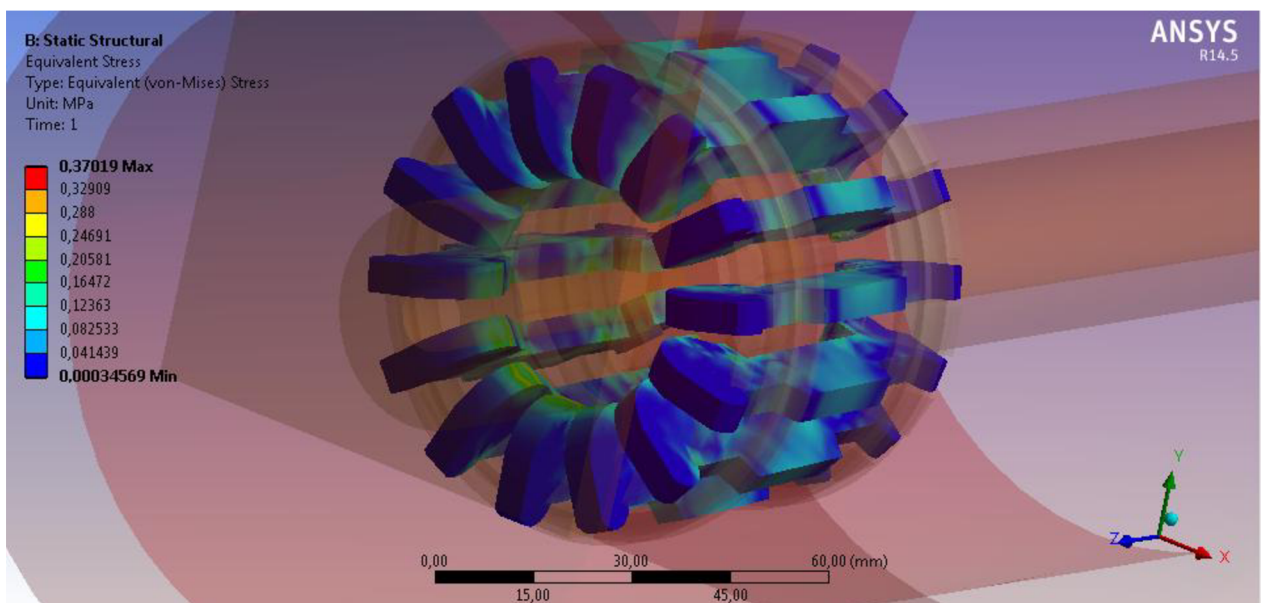
Obr. 9-18: Nejmenší síly působící na prsty dolní růžice 12kV-1250A-32kV,  $I_{p1} = 40\text{kA}$ .

Obr. 9-19 vykresluje deformaci vzniklou působením sil na prsty kontaktní růžice vypínače v měřítku 33000:1. Vykreslení deformace je 33000 krát větší než ve skutečnosti. Kontaktní systém vypínače je koncipován tak, aby byly jednotlivé prsty pevně zafixované. Vzhledem k vyšším deformacím v řádech tisícín milimetrů, lze konstatovat, že uchycení prstů v kontaktním systému růžice odolalo dynamickým silám v růžici.



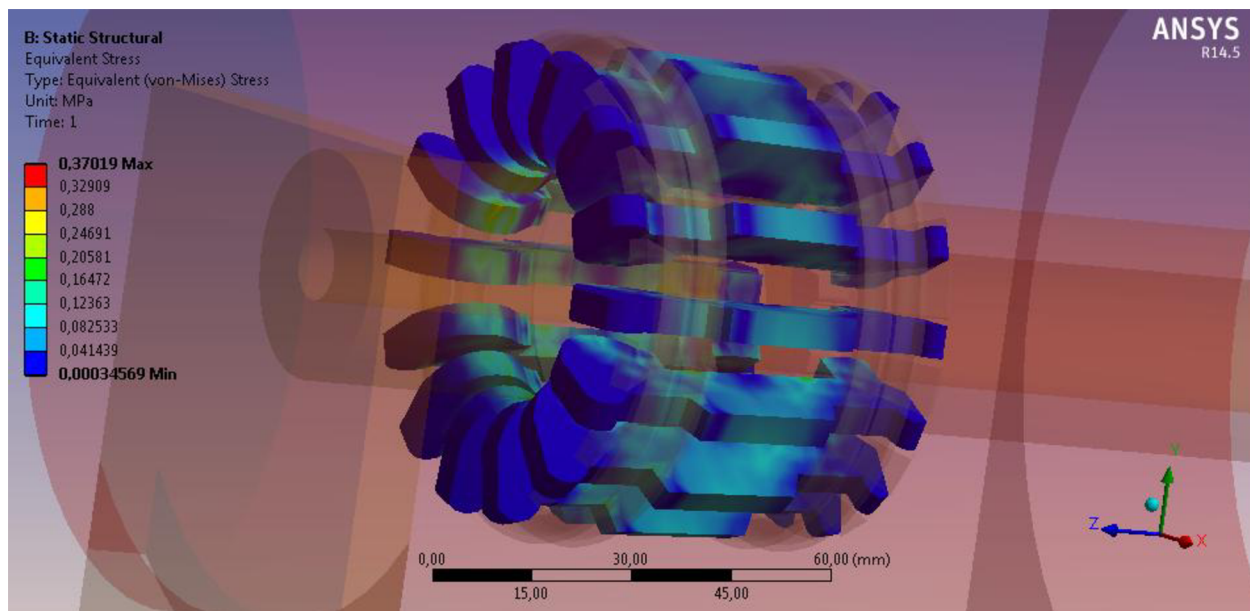
Obr. 9-19: Deformace fáze L1 růžice 12kV-1250A-32kV,  $I_{p1} = 40\text{kA}$ . Měřítko 33000:1.

Obr. 9-20 a Obr. 9-21 vyobrazuje ekvivalentní napětí na horní a dolní růžice.



Obr. 9-20: Ekvivalentní napětí horní růžice 12kV-1250A-32kV,  $I_{p1} = 40\text{kA}$ .

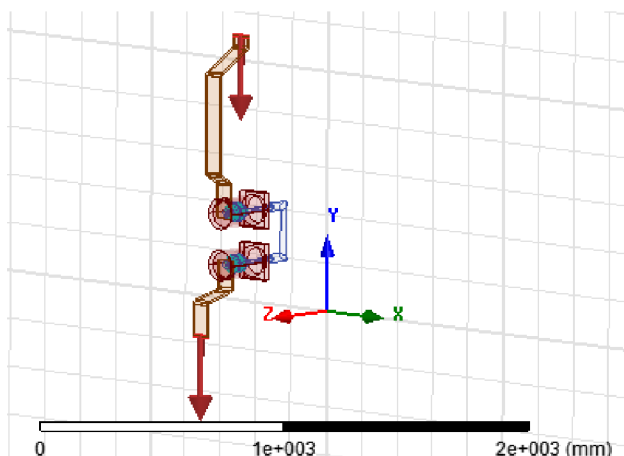
Světle modrá barva podél většiny těl prstů značí, že prsty vyvíjejí vnitřní síly k absorbování zatížení v hodnotě přibližně 0,15 MPa. Na dotykových plochách prstů s přípojovacím roubíkem a s pažemi vypínače je ekvivalentní namáhání průměrně 0,25 MPa. Maximálních hodnot dosahuje ekvivalentní napětí v záhybech prstů.



Obr. 9-21: Ekvivalentní napětí dolní rúžice 12kV-1250A-32kV,  $I_{p1} = 40\text{kA}$ .

### b) Fáze L2, nastavovaný proud: $I_{p2} = -80$ kA

Obr. 9-22 zobrazuje model kontaktního systému vypínače vytvořeného pro simulaci průchodu zkratového proudu fází L2 růžice 12 kV – 1250 A – 32 kA v Ansys Maxwell. Orientace souřadného systému odpovídá směřům složek výsledných sil. Proud v modelu byl nastaven na základě kap. 8.2.2 na hodnotu:



- fáze L2:  $I_{p2} = -80$  kA

Obr. 9-22: Nastavení směru a velikosti proudu v analýze pro L2 růžice 12kV-1250A-32kA.

Simulací průchodu zkratového proudu touto fází byly vypočítány velikosti sil na jednotlivé kontaktní prsty růžice. Vypočítané síly na jednotlivé prsty jsou rozloženy do jednotlivých směřů - x, y a z. Tabulka hodnot těchto sil je pro svoji obsáhlost přiložená v příloze na konci této práce (v Tab. 11-2). V tabulce jsou i vypočítané absolutní velikosti jednotlivých sil.

Z vypočítaných hodnot sil byly v prostředí Workbench vykresleny směry působení jednotlivých sil a vypočítány jejich velikosti. Vyhodnocení působících sil je přehledně zobrazeno v každé kontaktní růžici v dalším pokračování hlavního textu práce. Velikosti sil zobrazených šipek jsou vyznačeny v legendové levé části obrázků. Jednotlivé barevné symboly u názvů kontaktních prstů a jejich velikosti, odpovídají barevně značeným dílcům v modelu.

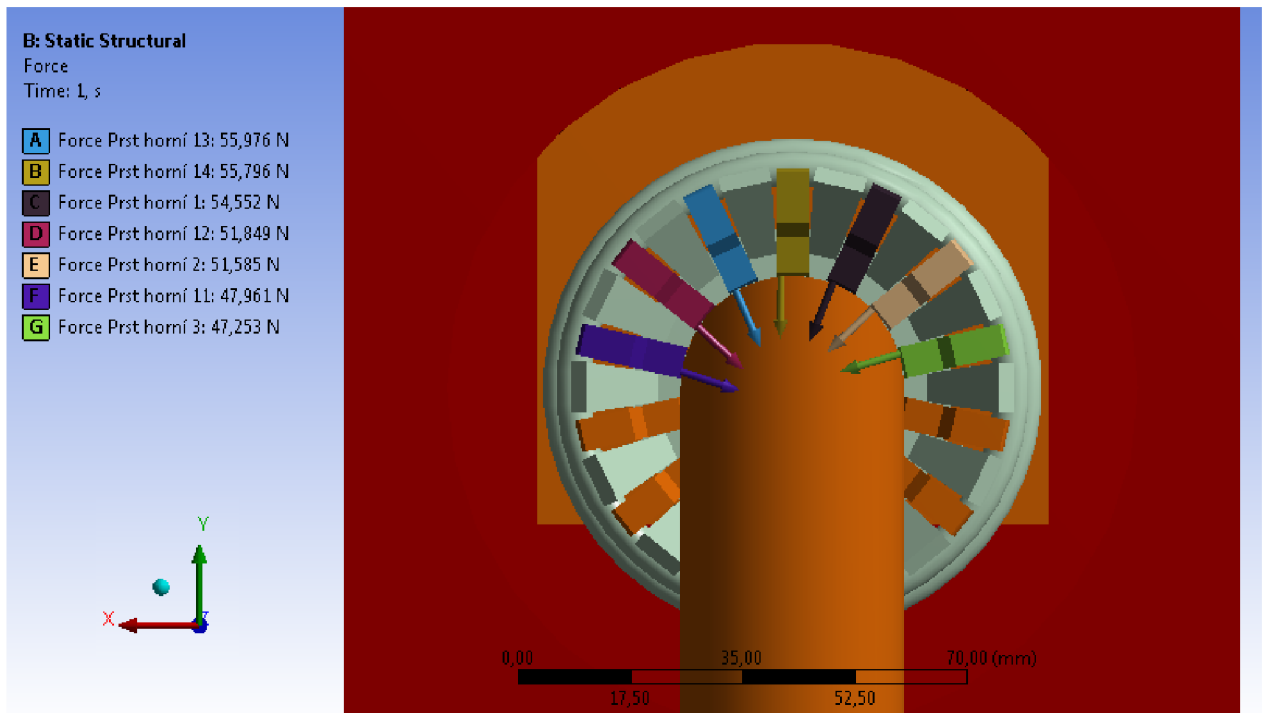
### Zhodnocení dosažených výsledků

Obr. 9-23 zobrazuje sedm největších hodnot sil působících v horní fázi na kontaktní prsty růžice. Výsledné síly jednotlivých prstů působí radiálně směřem ke středové ose trubkové konstrukce proudové dráhy horní paže vypínače. Největší síly působí na prsty v horní části kontaktního systému. Na větší výsledné síly působící na horní kontaktní prsty má vliv pravouhlý záhyb, tvořený paží vypínače a přívodní přípojnicí, jehož síly působí ve směřu záporné osy y. Největší síla působící na prsty kontaktní růžice je na horní prst 13, na který působí síla 55,976 N.

Srovnáním maximálních sil v totožných horních růžicích při průchodu zkratového proudu  $I_{p1} = 40$  kA a zkratového proudu  $I_{p2} = -80$  kA, dostaneme při průchodu dvojnásobného zkratového proudu téměř čtyřnásobné silové účinky na kontaktní prst.

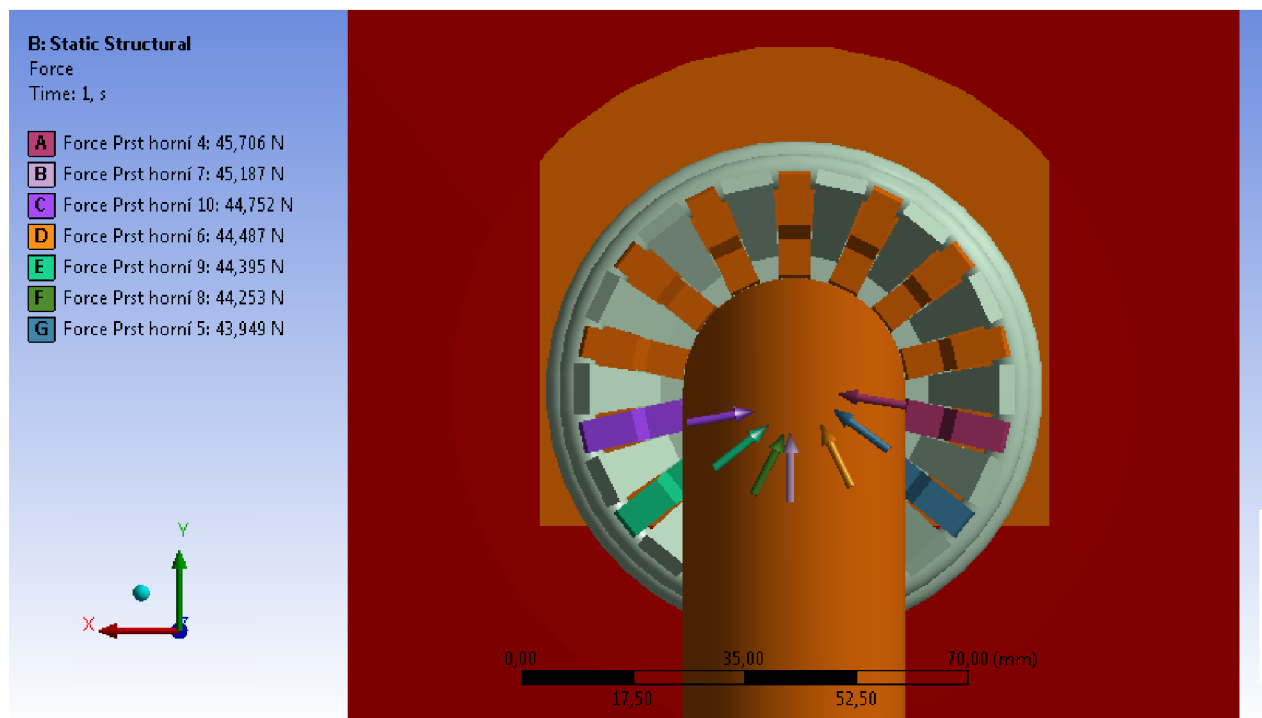
Tab. 9-5: Porovnání maximálních hodnot sil při nastavovaných zkratových proudech.

X	F [N]
$I_{p1} = 40$ kA	14,172
$I_{p2} = -80$ kA	55,976



Obr. 9-23: Největší síly působící na prsty horní růžice 12kV-1250A-32kV,  $I_{p2} = -80\text{kA}$ .

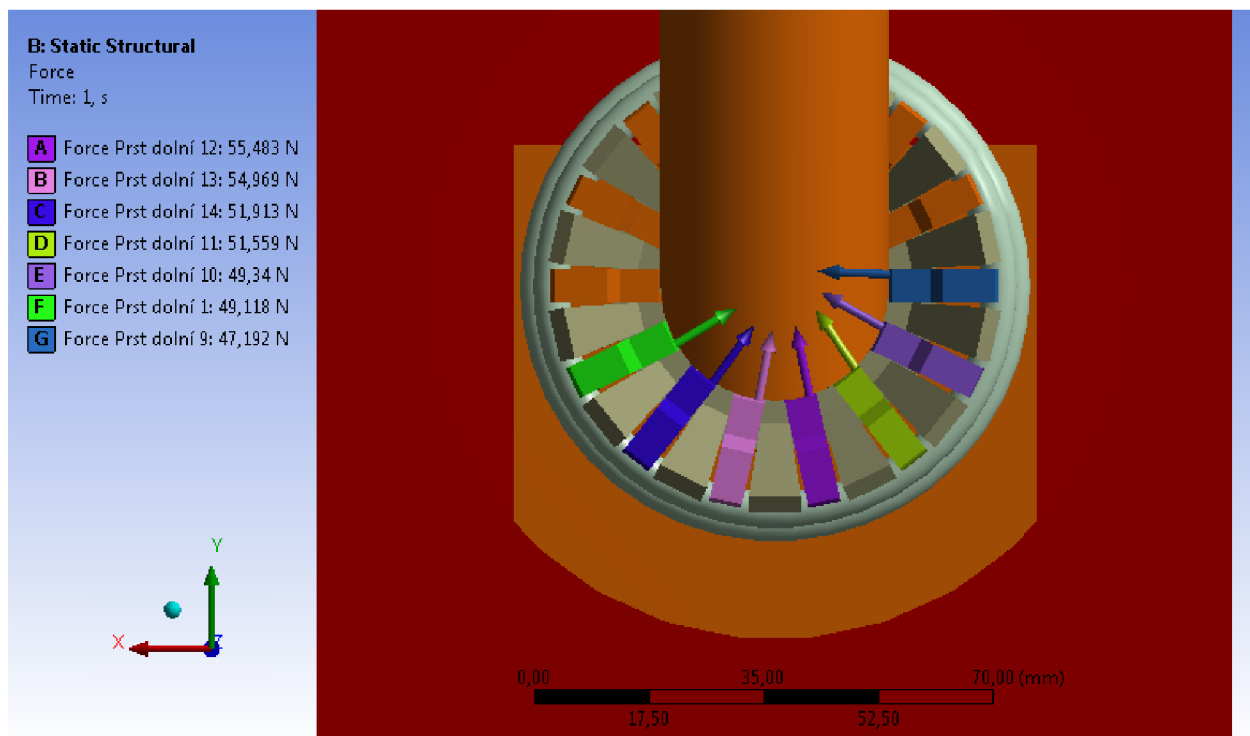
Obr. 9-24 zobrazuje síly na ostatních prstech horního kontaktního systému vypínače. Nejmenší síla působící na horní kontaktní systém je v horním prstu 5, na který působí síla o velikosti 43,949 N. Rozdíl mezi největší a nejmenší hodnotou působících sil v horní fázi kontaktního systému je 12,027 N.



Obr. 9-24: Nejmenší síly působící na prsty horní růžice 12kV-1250A-32kV,  $I_{p2} = -80\text{kA}$ .

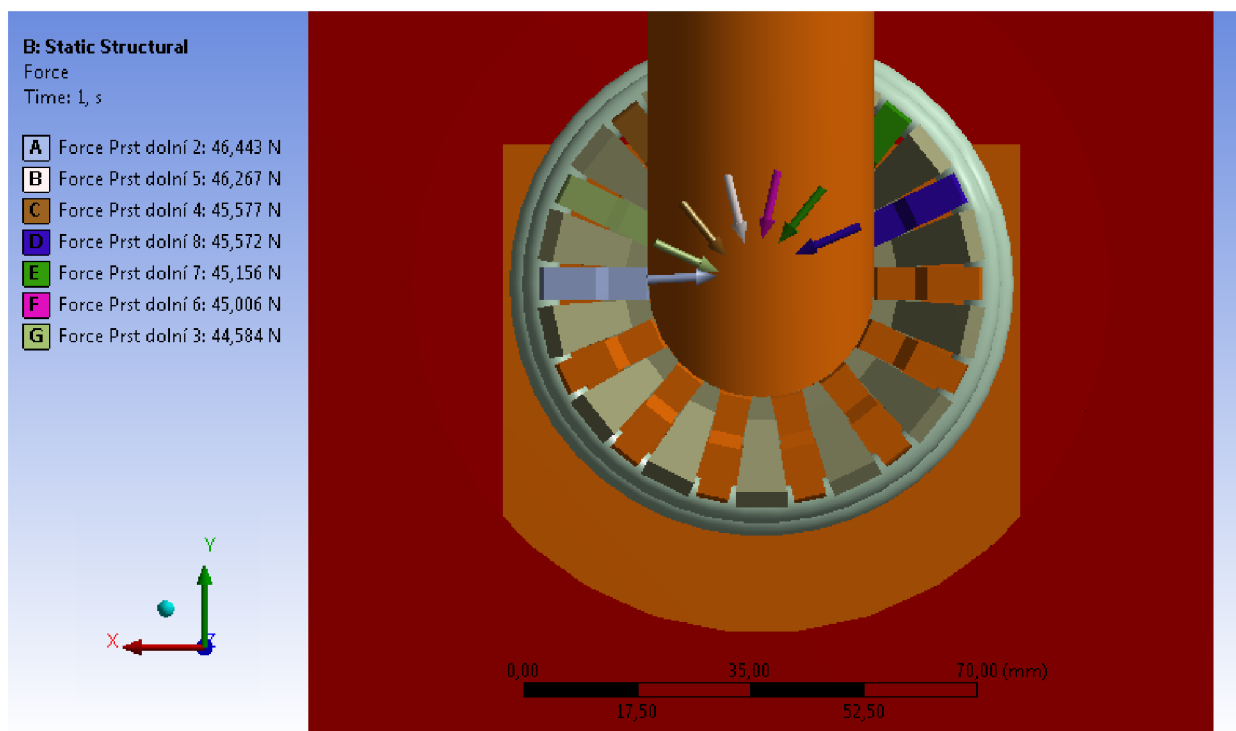
Obr. 9-25 zobrazuje sedm největší hodnot sil působících na dolní kontaktní prsty růžice. Největší síly vznikají na prstech v dolní části kontaktního systému. Výsledná větší síla na dolní části růžice je ovlivněna pravoúhlým záhybem, tvořeným dolní paží vypínače a vývodní

připojnicí, jehož síly působí ve směru kladné osy  $y$ . Největší síla působí na dolní prst 12 kontaktní růžice, na který působí síla 55,483 N.



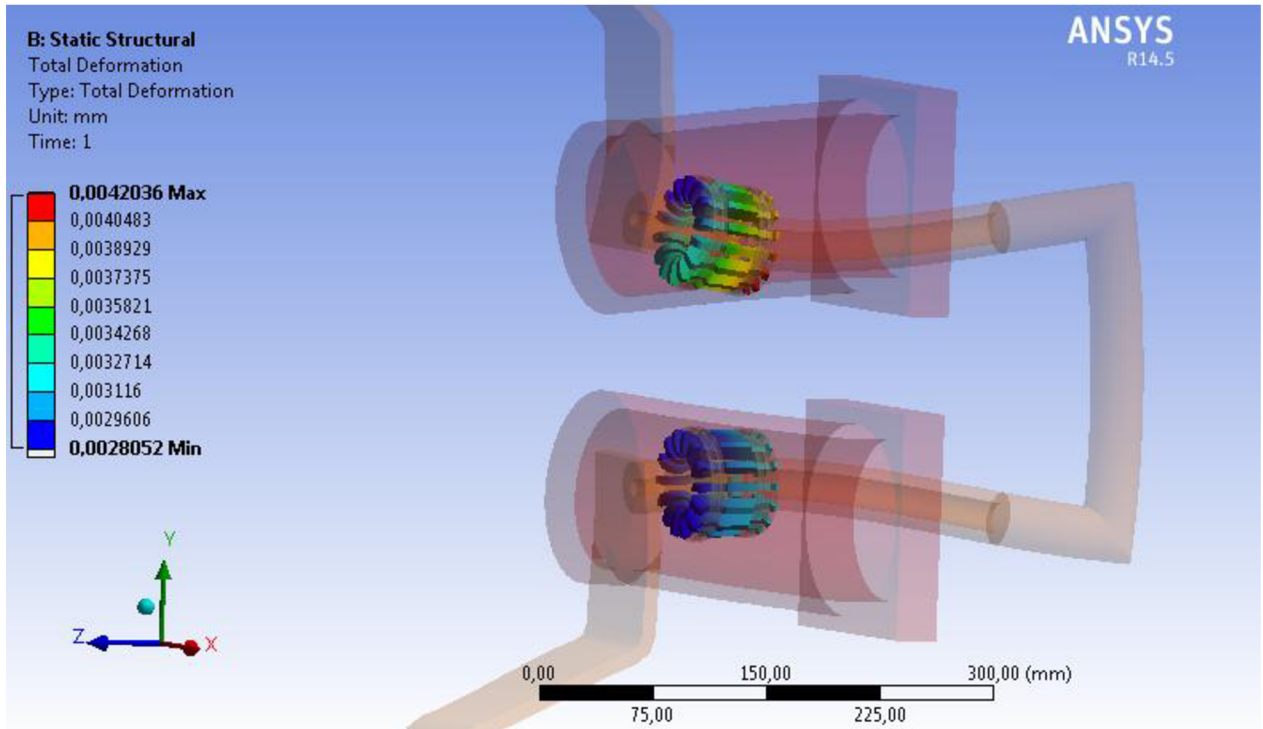
Obr. 9-25: Největší síly působící na prsty dolní růžice 12kV-1250A-32kV,  $I_{p2} = -80\text{kA}$

Obr. 9-26 zobrazuje působící síly na ostatních prstech dolního kontaktního systému vypínače. Nejmenší síla působící na dolní kontaktní systém je v dolním prstu 3, na který působí síla o velikosti 44,584 N. Rozdíl mezi největší a nejmenší hodnotou působících sil v dolním kontaktním systému je 10,899 N.



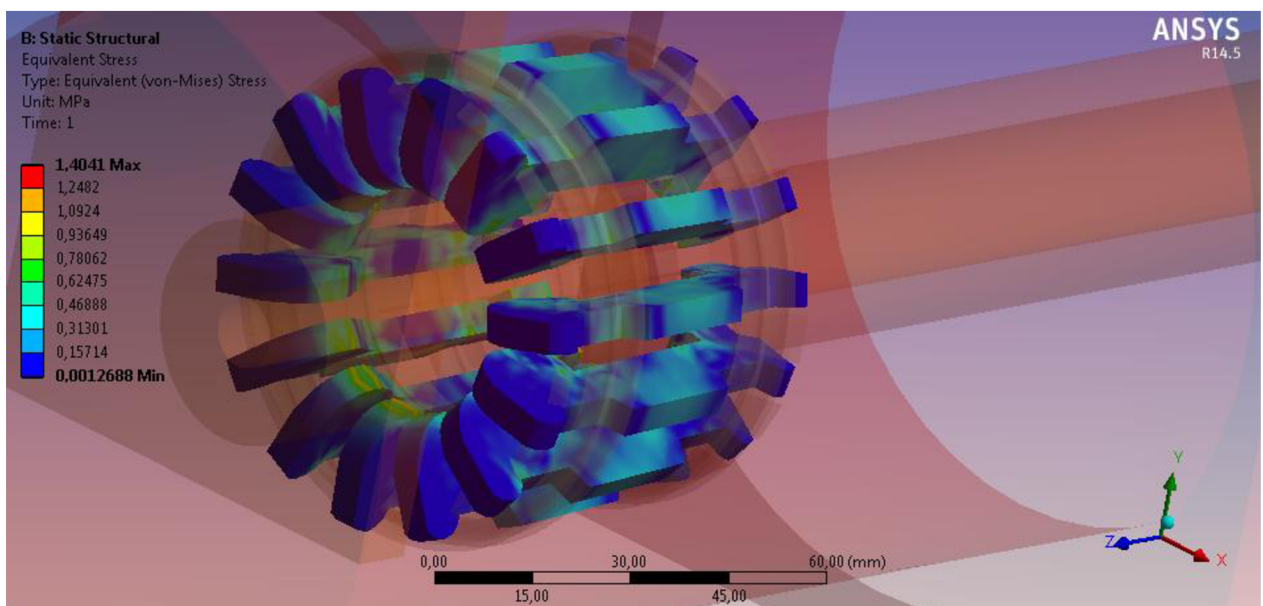
Obr. 9-26: Nejmenší síly působící na prsty dolní růžice 12kV-1250A-32kV,  $I_{p2} = -80\text{kA}$ .

Obr. 9-27 vykresluje deformaci vzniklou působením sil na prsty kontaktní růžice vypínače v měřítku 8600:1. Vykreslení deformace je 8600 krát větší než ve skutečnosti. Maximální hodnoty deformace jsou čtyři krát větší oproti hodnotám deformace při zkratovém proudu  $I_{p1}=40$  kA. Ale i při tomto zkratovém proudu vycházejí deformační účinky na kontaktní systém vypínače v řádech tisícín milimetrů. Uchycení prstů v kontaktním systému růžice tedy odolá dynamickým silám v růžici.



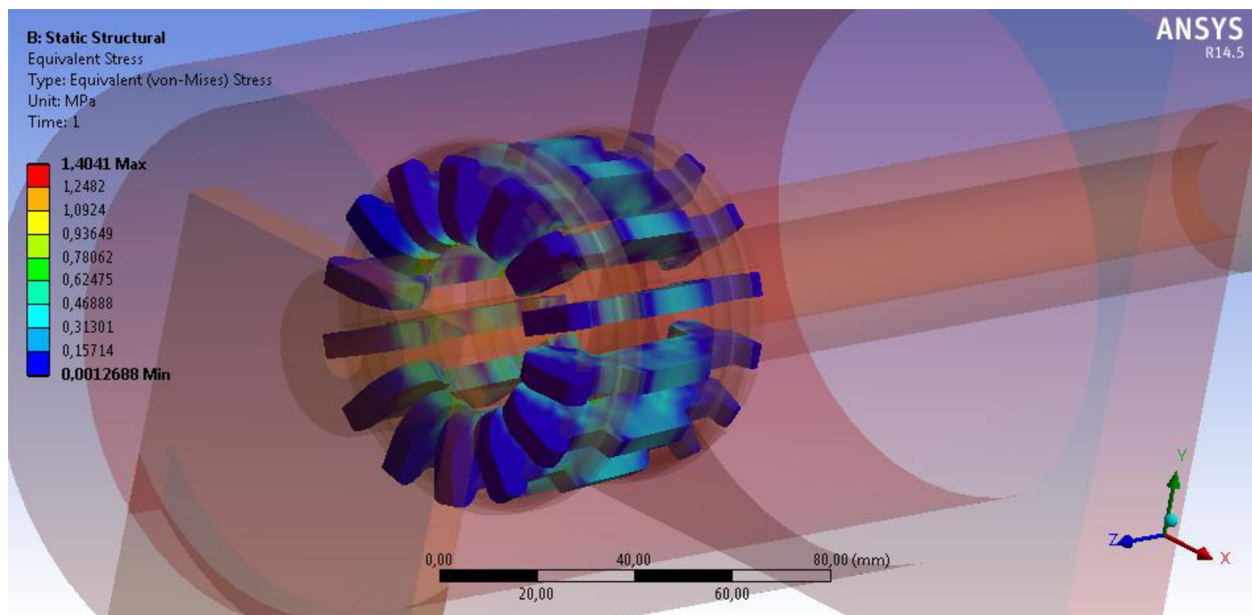
Obr. 9-27: Deformace působící na růžice 12kV-1250A-32kV,  $I_{p2} = -80$  kA.

Obr. 9-28 a Obr. 9-29 vyobrazuje ekvivalentní napětí na horní a dolní růžice.



Obr. 9-28: Ekvivalentní napětí horní růžice 12kV-1250A-32kV,  $I_{p2} = -80$  kA.

Světle modrá barva podél většiny těl prstů značí, že prsty vyvíjejí vnitřní síly k absorbování zatížení v hodnotě přibližně 0,50 MPa. Na dotykových plochách prstů s přípojovacím roubíkem a s pažemi vypínače je ekvivalentní namáhání průměrně 0,90 MPa. Maximálních hodnot dosahuje ekvivalentní napětí v záhybech prstů.



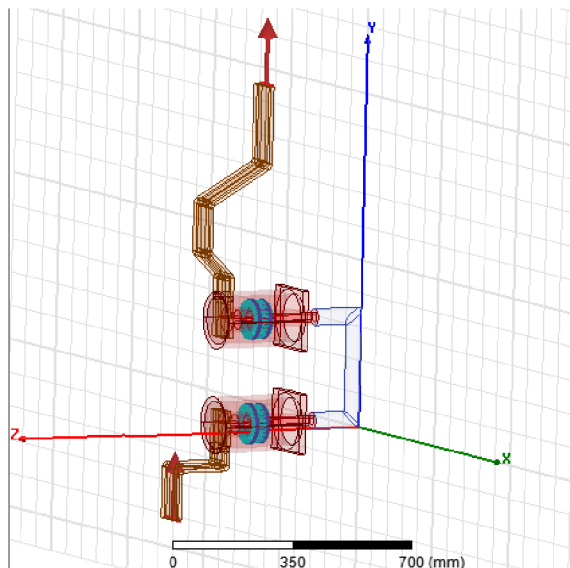
Obr. 9-29: Ekvivalentní napětí dolní ruzice 12kV-1250A-32kV,  $I_{p2} = -80kA$ .



## 9.2.2 Kontaktní systém vypínače 12 kV - 2000 A - 50 kV

### a) Fáze L1, nastavovaný proud: $I_{p1} = 62,5$ kA

Kontaktní systém vypínače zobrazený na Obr. 9-30 v prostředí ANSYS Maxwell se svými parametry (Tab. 8-1) a rozměry (výkres na Obr. 8-9) liší od kontaktního systému předchozího vypínače. Orientace souřadného systému odpovídá směřům složek výsledných sil. Proud v modelu byl nastaven na základě kap. 8.2.2 na hodnotu:



- fáze L1:  $I_{p1} = 62,5$  kA

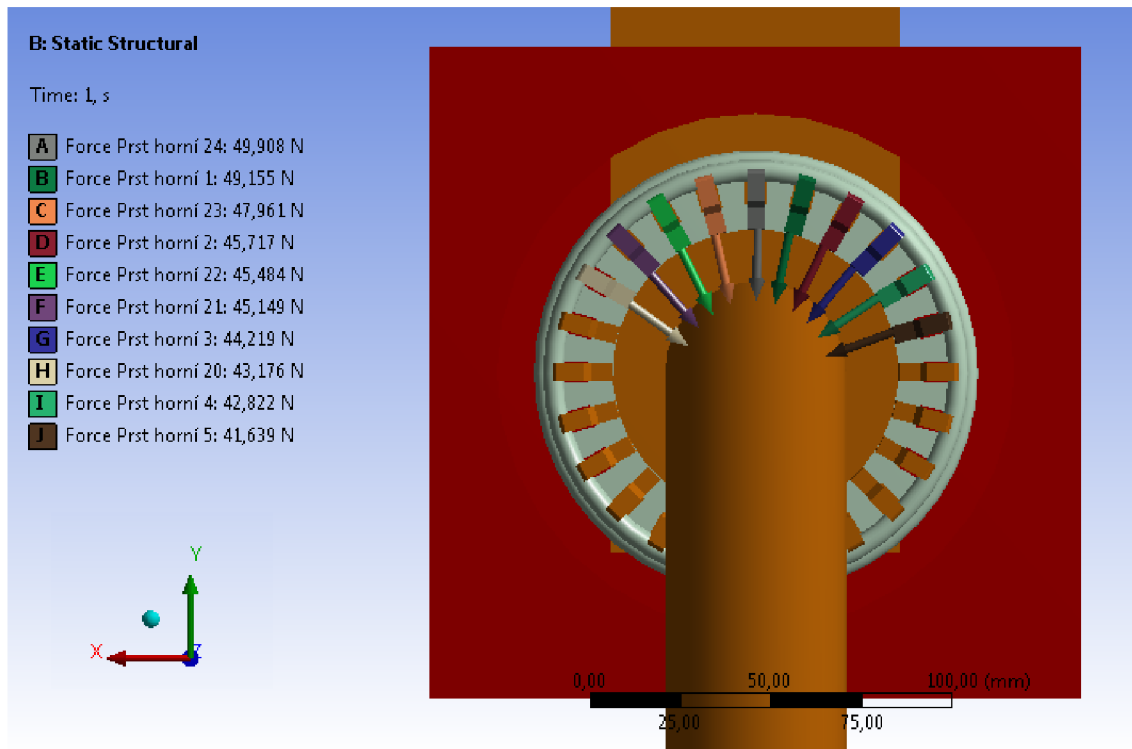
Obr. 9-30: Nastavení proudu v analýze pro L1 rúžice 12kV-2000A-50kV.

Simulací průchodu zkratového proudu touto fází byly vypočítány velikosti sil na jednotlivé kontaktní prsty rúžice. Vypočítané síly na jednotlivé prsty jsou rozloženy do jednotlivých směřů -  $x$ ,  $y$  a  $z$ . Tabulka hodnot těchto sil je pro svoji obsáhlost přiložená v příloze na konci této práce (v Tab. 11-3). V tabulce jsou vypočítané i absolutní velikosti jednotlivých sil působících na prsty kontaktní rúžice. Jelikož kvůli většímu počtu prstů v rúžici pro vypínač 12 kV - 2000 A - 50 kV, není možné do grafického vyhodnocení zahrnout všechny velikosti působících sil na prsty rúžice.

Z vypočítaných hodnot sil byly v prostředí Workbench vykresleny směry působení jednotlivých sil a vypočítány jejich velikost. Vyhodnocení největších a nejmenších působících sil je přehledně zobrazeno v každé kontaktní rúžici v dalším pokračování hlavního textu práce. Velikosti sil jsou vyznačeny v legendové levé části jednotlivých obrázků. Jednotlivé barevné symboly u názvů kontaktních prstů a jejich velikostí odpovídají barevně značeným prstům a šípkám v modelu.

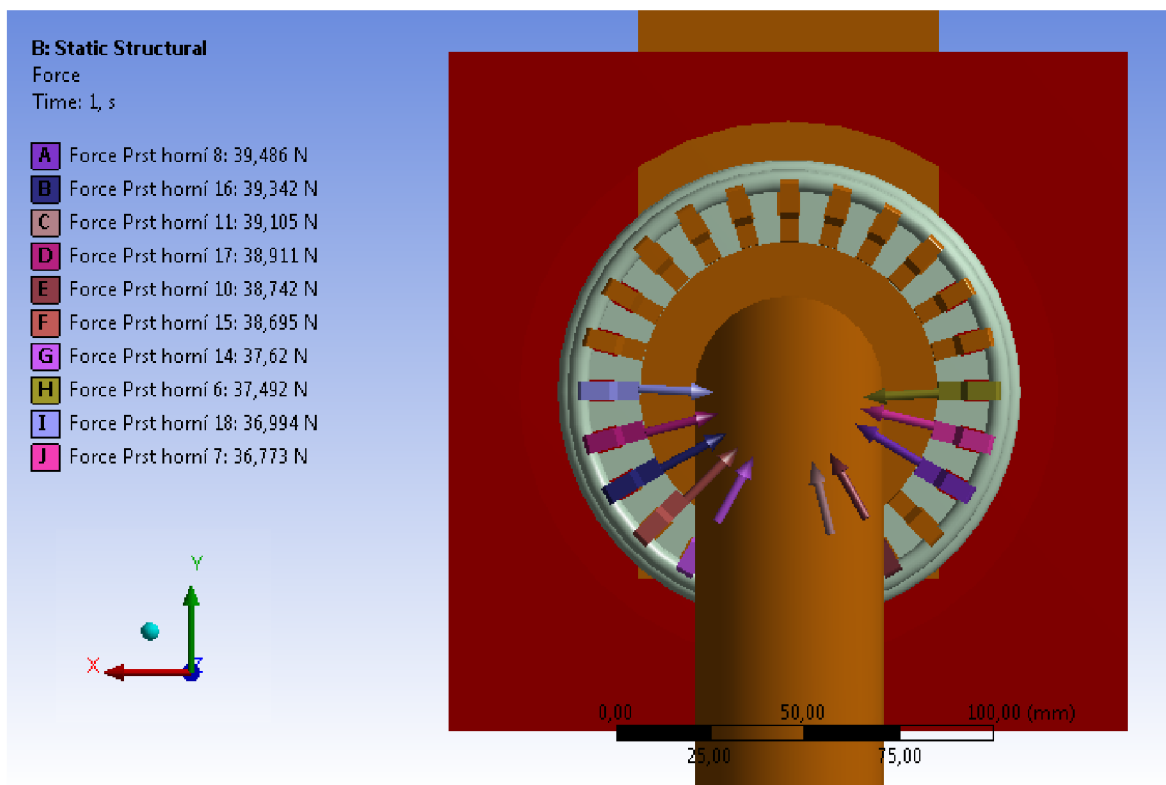
### Zhodnocení dosažených výsledků

Obr. 9-31 zobrazuje deset největších hodnot sil působících v horní fázi na kontaktní prsty rúžice. Výsledné síly jednotlivých prstů působí radiálním směřem ke středové ose trubicové konstrukce proudové dráhy horní paže vypínače. Největší síly působí na prsty v horní části kontaktního systému. Na větší výslednou sílu působící na tyto kontaktní prsty má vliv pravouhlý záhyb, tvořený paží vypínače a přívodní přípojnici, jehož síly působí ve směřu záporné osy  $y$ . Největší síla působící na kontaktní systém rúžice je na horní prst 24, na který působí síla 49,908 N.



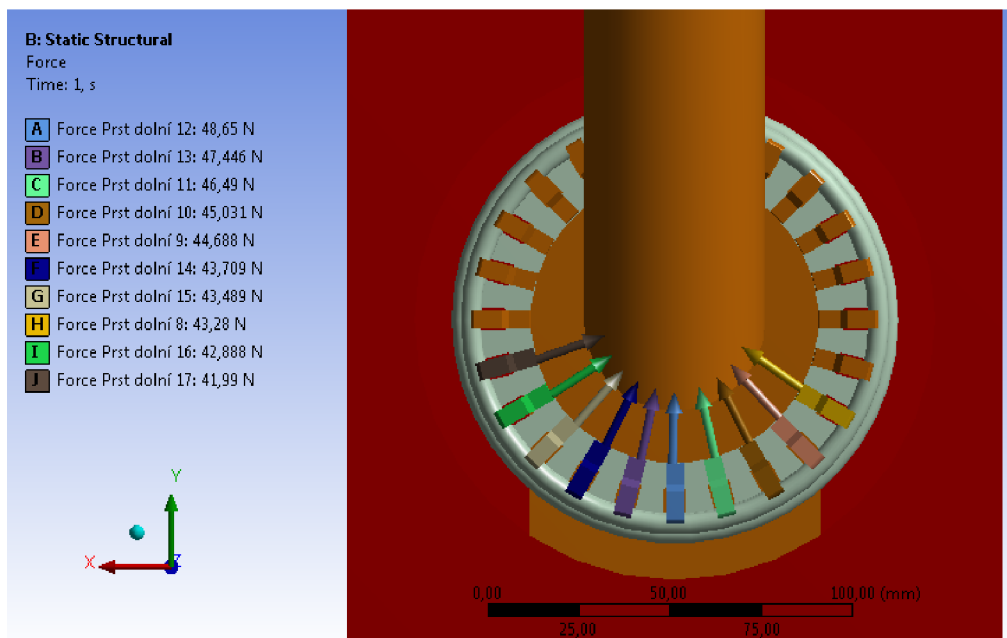
Obr. 9-31: Největší síly působící na prsty horní růžice 12kV-2000A-50kV,  $I_{p1} = 62,5\text{kA}$ .

Obr. 9-32 zobrazuje deset nejmenších působících sil na prsty horního kontaktního systému vypínače. Nejmenší síla působící na horní kontaktní systém je v horním prstu 7, na který působí síla o velikosti 36,773 N. Rozdíl mezi největší a nejmenší hodnotou působících sil v horní fázi kontaktního systému je 13,135 N.



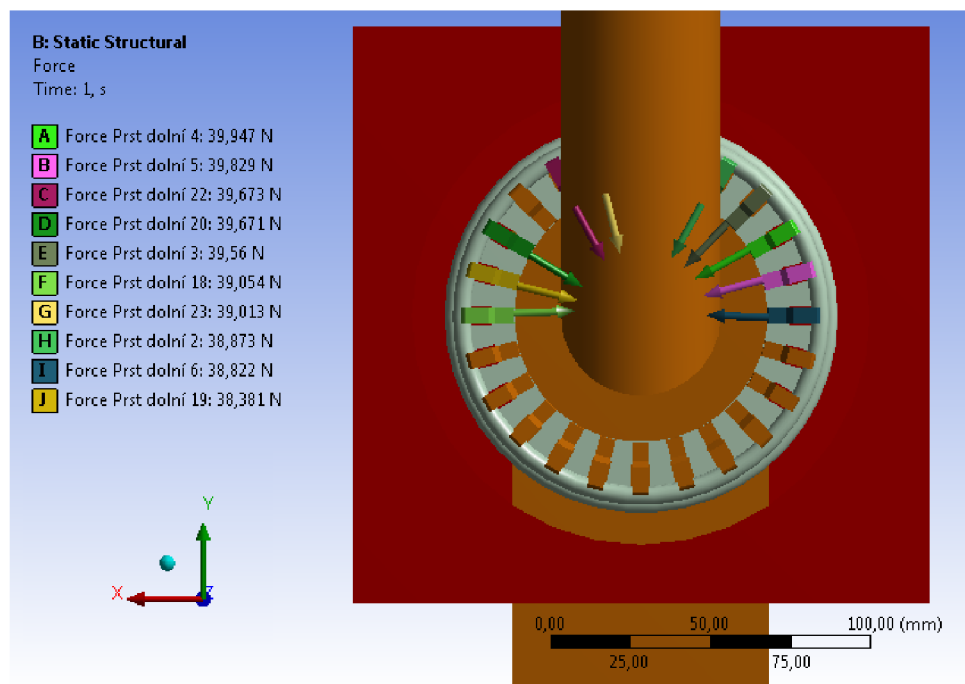
Obr. 9-32: Nejmenší síly působící na prsty horní růžice 12kV-2000A-50kV,  $I_{p1} = 62,5\text{kA}$ .

Obr. 9-33 zobrazuje deset největších hodnot sil působících na dolní kontaktní prsty růžice. Největší síly působí na prsty v dolní části kontaktního systému. Výsledná síla je ovlivněna pravoúhlým záhybem tvořeným dolní paží vypínače a vývodní přípojnící, jehož síly působí ve směru kladné osy y. Největší síla působí na dolní prst 12 kontaktní růžice, na který působí síla 48,65 N.



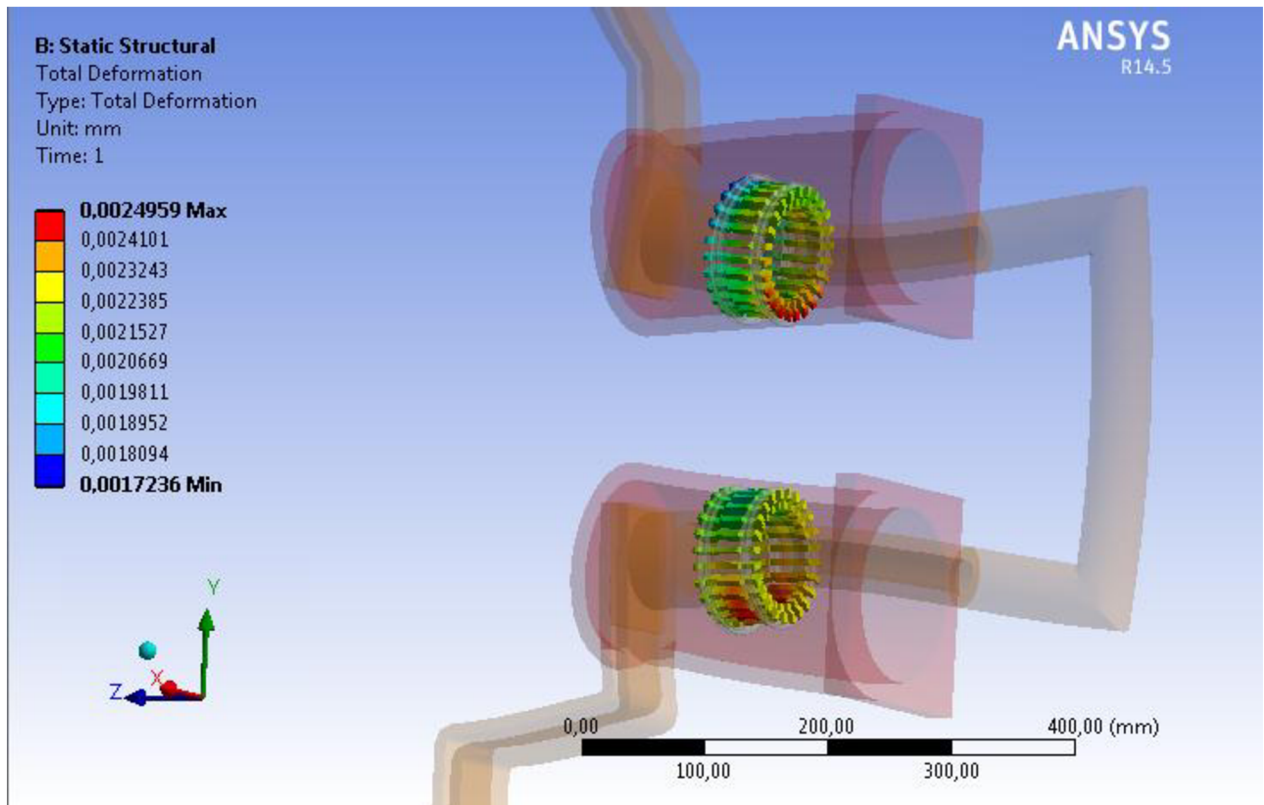
Obr. 9-33: Největší síly působící na prsty dolní růžice 12kV-2000A-50kV,  $I_{p1} = 62,5\text{kA}$ .

Obr. 9-34 zobrazuje působící síly na ostatních prstech dolního kontaktního systému vypínače. Nejmenší síla působící na dolní kontaktní systém je v dolním prstu 19, na který působí síla o velikosti 38,381 N. Rozdíl mezi největší a nejmenší hodnotou působících sil v dolním kontaktním systému je 10,269 N.



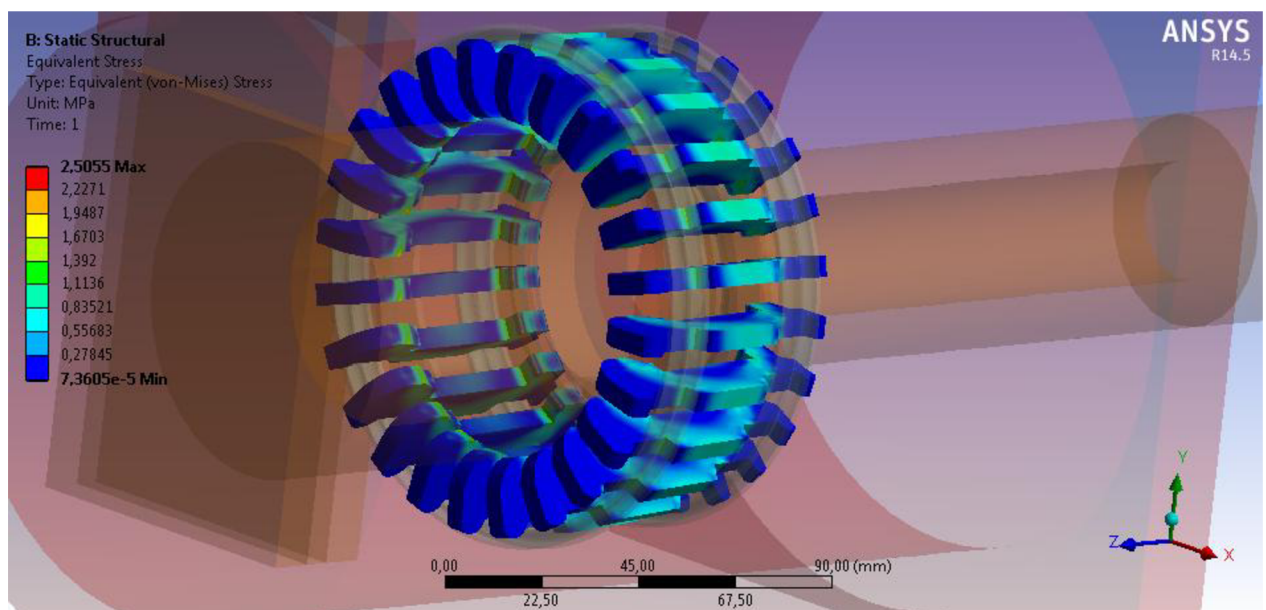
Obr. 9-34: Nejmenší síly působící na prsty dolní růžice 12kV-2000A-50kV,  $I_{p1} = 62,5\text{kA}$ .

Obr. 9-35 vykresluje deformaci vzniklou působením sil na prsty kontaktní ržice vypínače v měřítku 15000:1. Vykreslení deformace je 15000 krát větší než ve skutečnosti. Deformační účinky na kontaktní systém vypínače je v řádech tisícín milimetrů. Uchycení prstů v kontaktním systému ržice tedy odolá dynamickým silám v ržici.



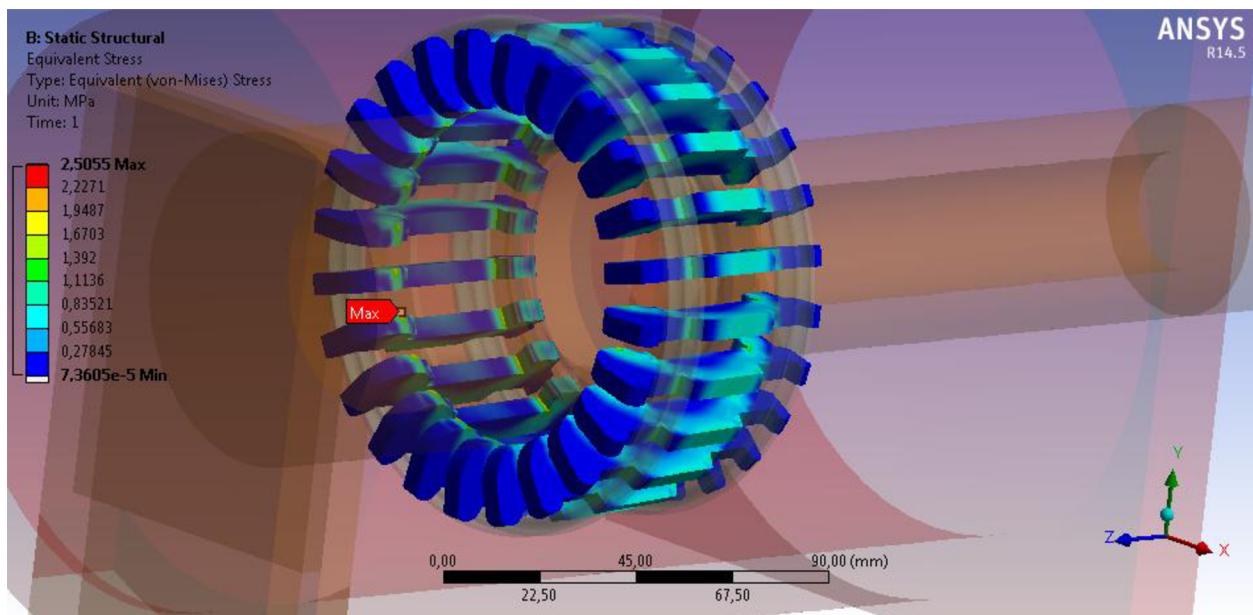
Obr. 9-35: Deformace působící na ržice 12kV-2000A-50kV,  $I_{pl} = 62,5kA$

Obr. 9-36 a Obr. 9-37 vyobrazuje ekvivalentní napětí na horní a dolní ržice.



Obr. 9-36: Ekvivalentní napětí horní ržice 12kV-2000A-50kV,  $I_{pl} = 62,5kA$ .

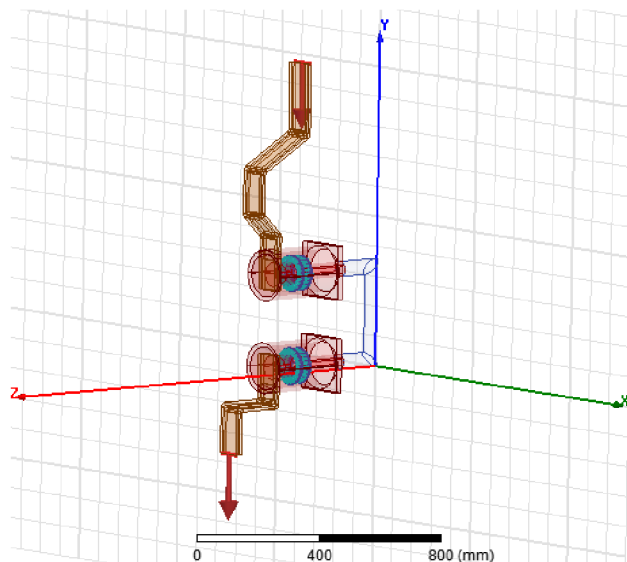
Světle modrá barva podél většiny těl prstů značí, že prsty vyvíjejí vnitřní síly k absorbování zatížení v hodnotě přibližně 0,80 MPa. Na dotkových plochách prstů s přípojovacím roubíkem a s pažemi vypínače je ekvivalentní namáhání průměrně 1,3 MPa. Maximálních hodnot dosahuje ekvivalentní napětí opět v záhybech prstů a na malých hranách.



Obr. 9-37: Ekvivalentní napětí spodní rúžice 12kV-2000A-50kV,  $I_{p1} = 62,5\text{kA}$ .

### b) Fáze L2, nastavovaný proud: $I_{p2} = -125 \text{ kA}$

Obr. 9-38 zobrazuje model kontaktního systému vypínače vytvořeného pro simulaci v prostředí ANSYS Maxwell. Orientace souřadného systému odpovídá směrům složek výsledných sil. Proud v modelu byl nastaven na základě kap. 8.2.2 na hodnotu:



- fáze L2:  $I_{p2} = -125 \text{ kA}$

Obr. 9-38: Nastavení proudu v analýze pro L2 rúžice 12kV-2000A-50kV.

Simulací průchodu zkratového proudu touto fází byly vypočítány velikosti sil na jednotlivé kontaktní prsty rúžice. Vypočítané síly na jednotlivé prsty jsou rozloženy do jednotlivých směrů - x, y a z. Tabulka hodnot těchto sil je pro svoji obsáhlost přiložená v příloze na konci této práce (v Tab. 11-4). V tabulce jsou i vypočítané absolutní velikosti jednotlivých sil.

Z vypočítaných hodnot sil byly v prostředí Workbench vykresleny směry působení jednotlivých sil a vypočítány jejich velikosti. Vyhodnocení působících sil je přehledně zobrazeno v každé kontaktní rúžici v dalším pokračování hlavního textu práce. Velikosti sil zobrazených šipek jsou vyznačeny v legendové levé části obrázků. Jednotlivé barevné symboly k názvům kontaktních prstů a jejich velikostí odpovídají barevně značeným dílcům v modelu.

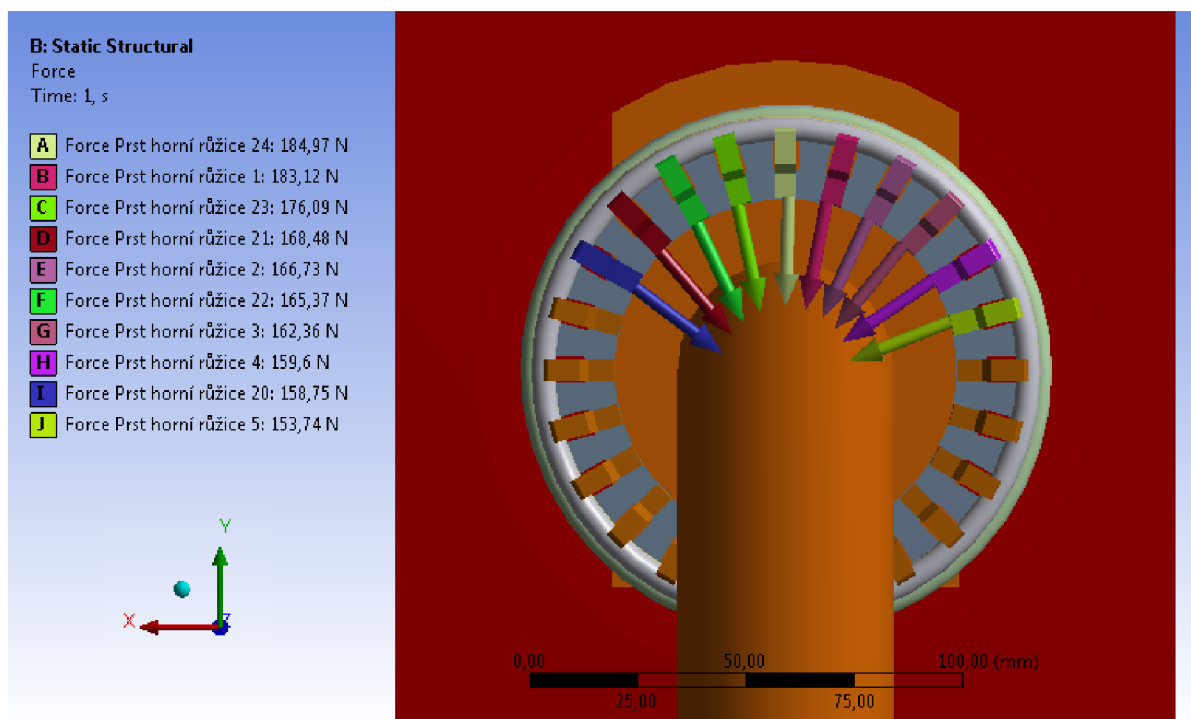
### Zhodnocení dosažených výsledků

Obr. 9-39 zobrazuje deset největších hodnot sil působících v horní fázi na kontaktní prsty rúžice. Výsledné síly jednotlivých prstů působí radiálním směrem ke středové ose trubkové konstrukce proudové dráhy horní paže vypínače. Největší síly působí na prsty v horní části kontaktního systému. Na větší výslednou sílu působící na tyto kontaktní prsty má vliv pravouhlý záhyb, tvořený paží vypínače a přívodní přípojnicí, jehož síly působí ve směru záporné osy y. Největší síla působící na prsty kontaktní rúžice je na horní prst 24, na který působí síla 184,97 N.

Srovnáním maximálních sil v totožných horních rúžicích při průchodu zkratového proudu  $I_{p1} = 62,5 \text{ kA}$  a zkratového proudu  $I_{p2} = 125 \text{ kA}$ , dostaneme při průchodu dvojnásobného zkratového proudu 3,7 násobek silových účinků na kontaktní prst.

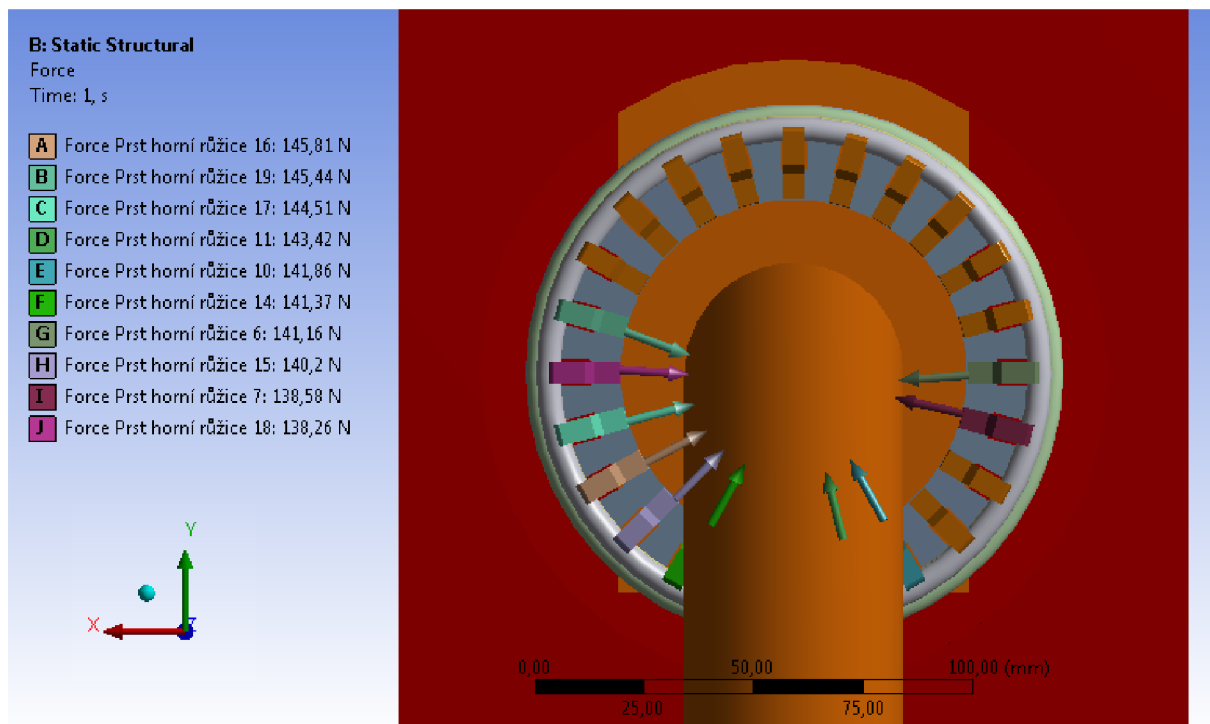
Tab. 9-6: Porovnání maximálních hodnot sil při nastavovaných zkratových proudech.

X	F [N]
$I_{p1} = 62,5 \text{ kA}$	49,908
$I_{p2} = 125 \text{ kA}$	184,97



Obr. 9-39: Největší síly působící na prsty horní růžice 12kV-2000A-50kV,  $I_{p2} = -125\text{kA}$ .

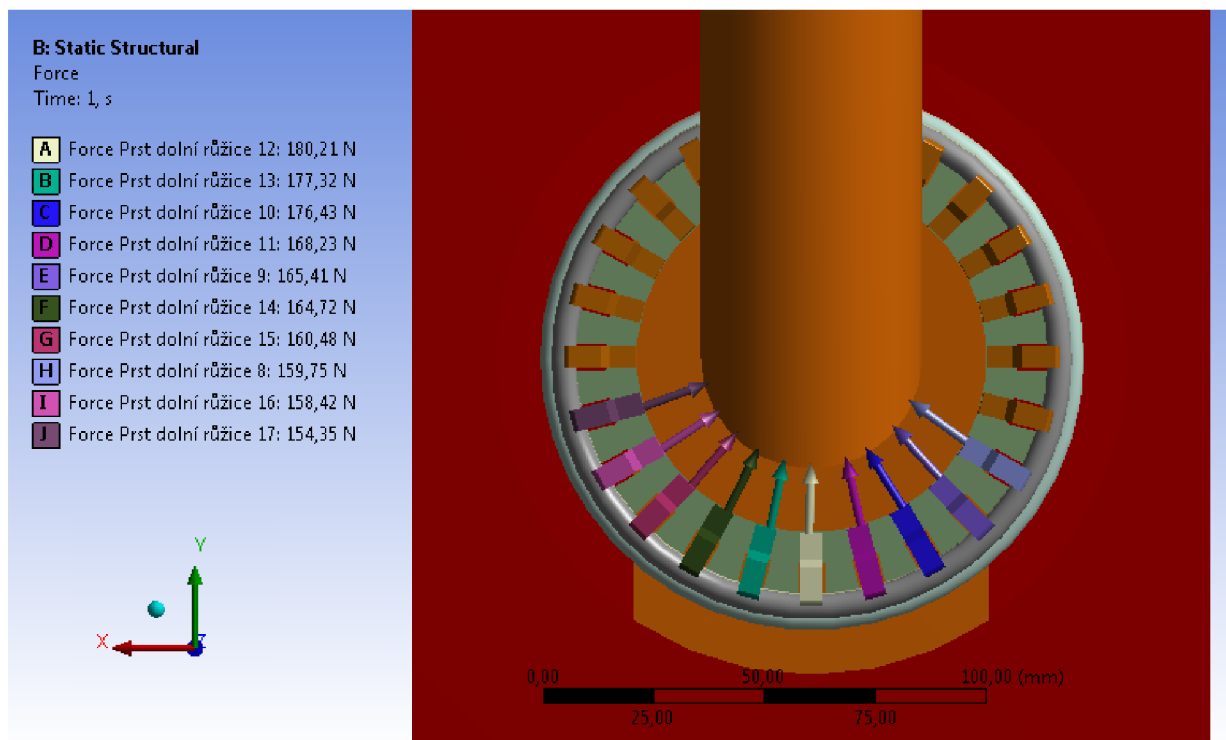
Obr. 9-40 zobrazuje deset nejmenších sil působících na prsty horního kontaktního systému vypínače. Nejmenší síla působící na horní kontaktní systém je v horním prstu 18, na který působí síla o velikosti 138,26 N. Rozdíl mezi největší a nejmenší hodnotou působících sil v horní fázi kontaktního systému je 46,71 N.



Obr. 9-40: Nejmenší síly působící na prsty horní růžice 12kV-2000A-50kV,  $I_{p2} = -125\text{kA}$ .

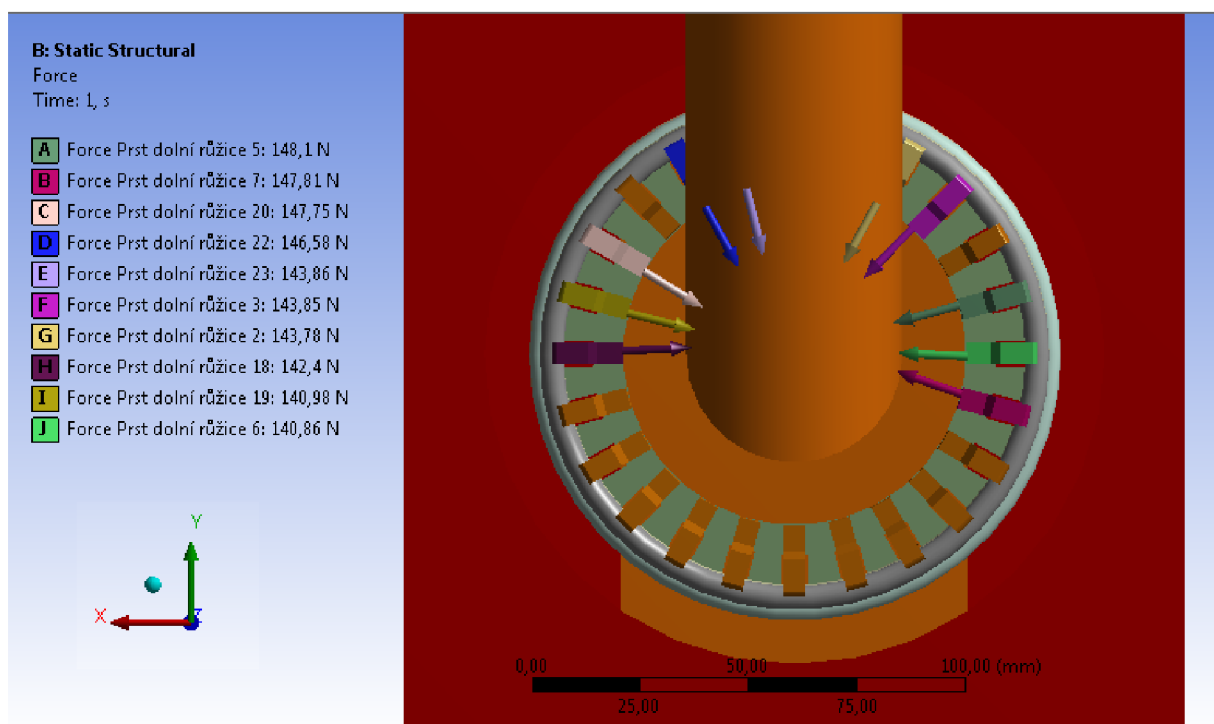
Obr. 9-41 zobrazuje deset největších hodnot sil působících na dolní kontaktní prsty růžice. Největší síly působí na prsty v dolní části kontaktního systému. Výsledná síla je ovlivněna pravoúhlým záhybem, tvořeným dolní paží vypínače a vývodní přípojnící, jehož síly působí ve

směru kladné osy y. Největší síla působí na dolní prst 12 kontaktní růžice, na který působí síla 180,21 N.



Obr. 9-41: Největší síly působící na prsty spodní růžice 12kV-2000A-50kV,  $I_{p2} = -125\text{kA}$ .

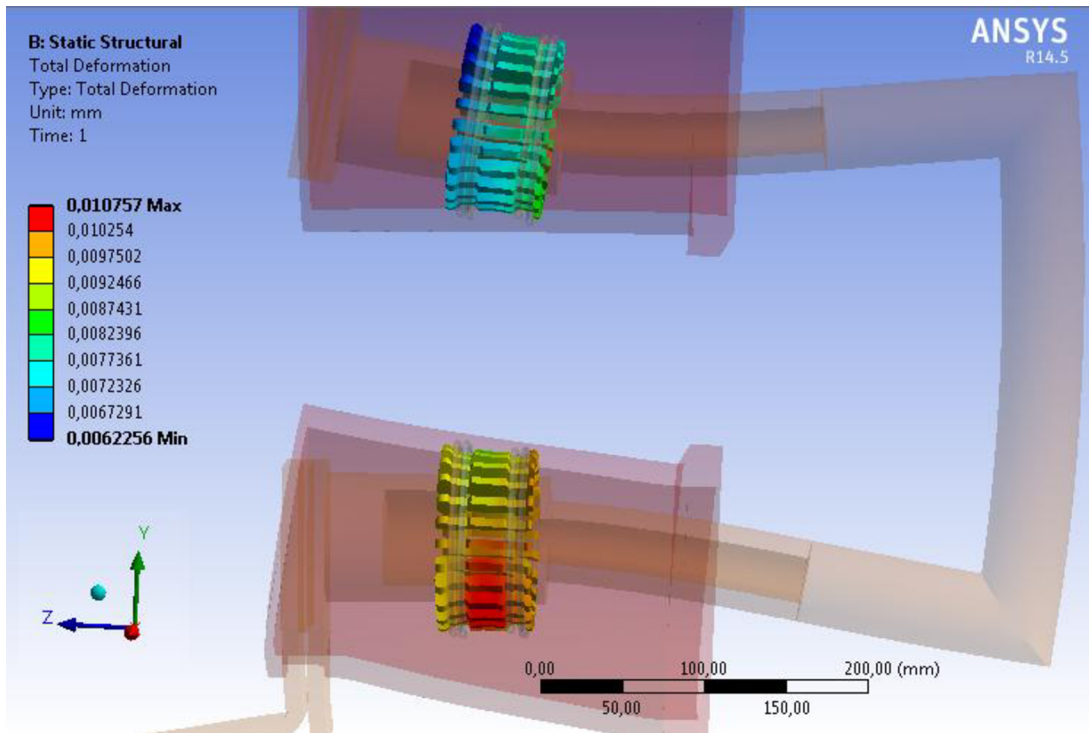
Obr. 9-42 zobrazuje deset nejmenších působících sil na prsty dolního kontaktního systému vypínače. Nejmenší síla působící na dolní kontaktní systém je v dolním prstu 6, na který působí síla o velikosti 140,86 N. Rozdíl mezi největší a nejmenší hodnotou působících sil na prsty v dolním kontaktním systému je 39,35 N.



Obr. 9-42: Nejmenší síly působící na prsty spodní růžice 12kV-2000A-50kV,  $I_{p2} = -125\text{kA}$ .

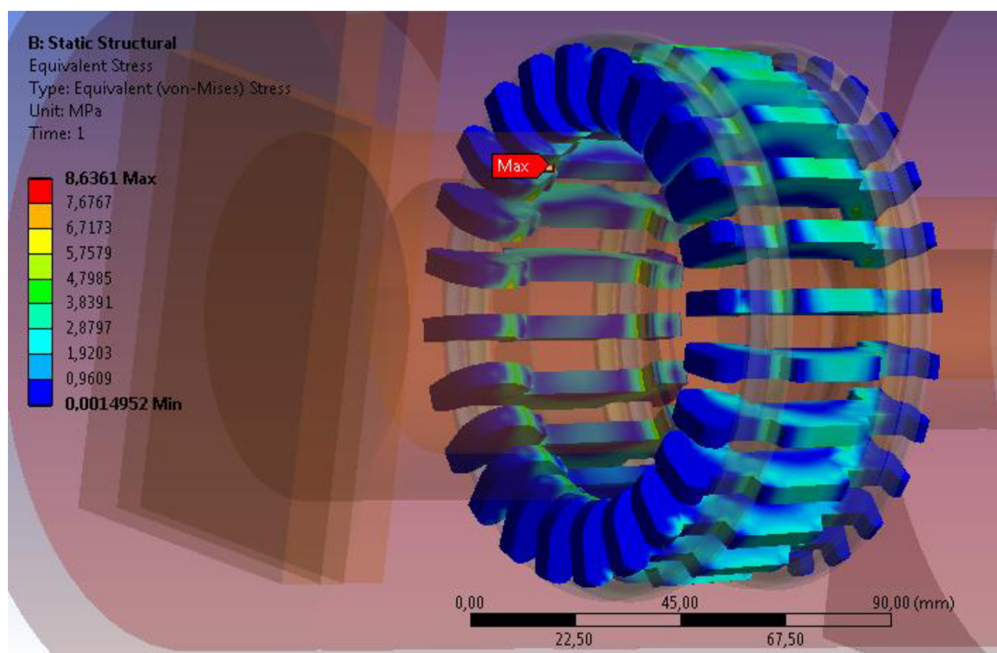


Obr. 9-43 vykresluje deformaci vzniklou působením sil na prsty kontaktní růžice vypínače v měřítku 3500:1. Vykreslení deformace je 3500 krát větší než ve skutečnosti. Maximální hodnoty deformace jsou čtyři krát větší oproti hodnotám deformace při zkratovém proudu  $I_{p1}=62,5$  kA. Při tomto zkratovém proudu vycházejí největší deformační účinky na kontaktní systém vypínače až jednu setinu milimetrů. Uchycení prstů v kontaktním systému růžice by ale i s takovou deformací mělo odolat dynamickým silám v růžici.



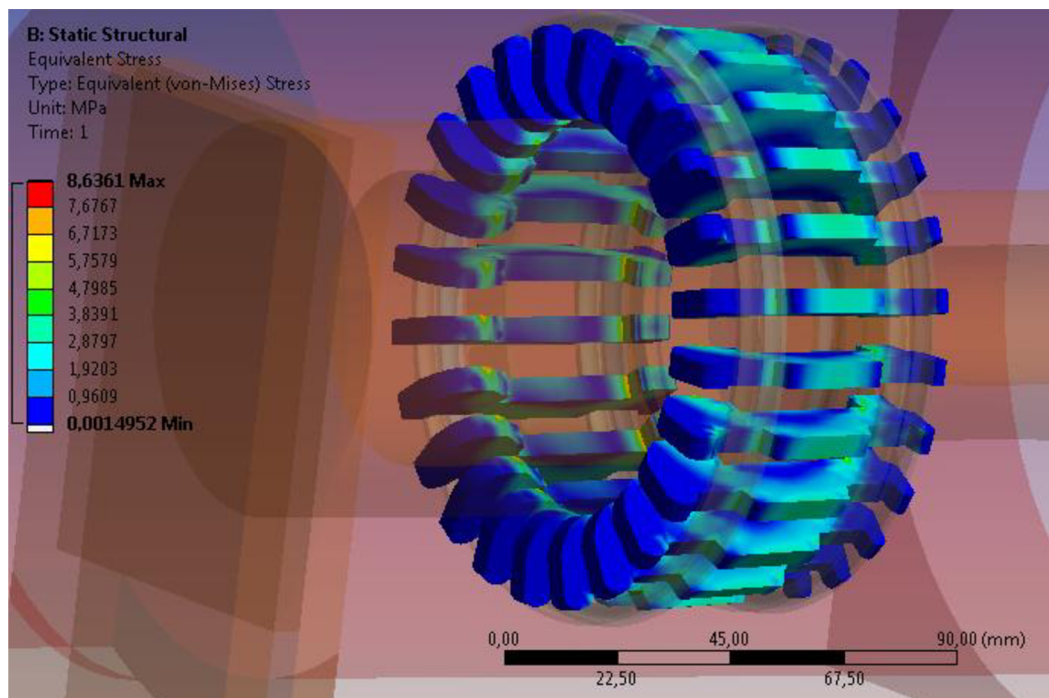
Obr. 9-43: Deformace působící na růžice 12kV-2000A-50kV,  $I_{p2} = -125$  kA.

Obr. 9-44 a Obr. 9-45 vyobrazuje ekvivalentní napětí na horní a dolní růžice.



Obr. 9-44: Ekvivalentní napětí horní růžice 12kV-2000A-50kV,  $I_{p2} = -125$  kA.

Světle zeleno-modrá barva podél většiny těl prstů značí, že prsty vyvíjejí vnitřní síly k absorbování zatížení v hodnotě přibližně 3,80 MPa. Na dotykových plochách prstů s přípojovacím roubíkem a s pažemi vypínače je ekvivalentní namáhání průměrně 4,8 MPa. Maximálních hodnot dosahuje ekvivalentní napětí opět v záhybech prstů a na malých hranách.

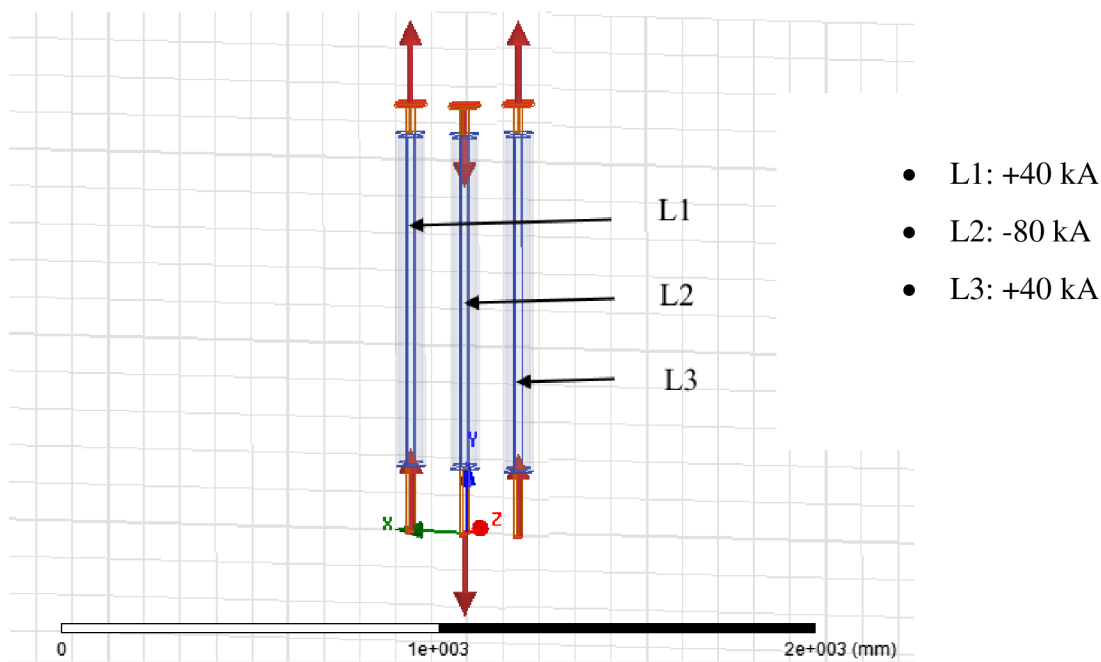


Obr. 9-45: Ekvivalentní napětí spodní růžice 12kV-2000A-50kV,  $I_{p2} = -125kA$ .

## 9.3 Model lineární konfigurace vypínače

### 9.3.1 Simulace silových účinků zkratových proudů

Simulací byly vypočítány síly, které vzniknou při průchodu zkratového proudu lineárním typem vypínače, pokud jsou zadány stejné podmínky výpočtu, jako u vypínačů VD4 s pravouhloú U-smyčkou. Zadané velikosti a směry proudu:



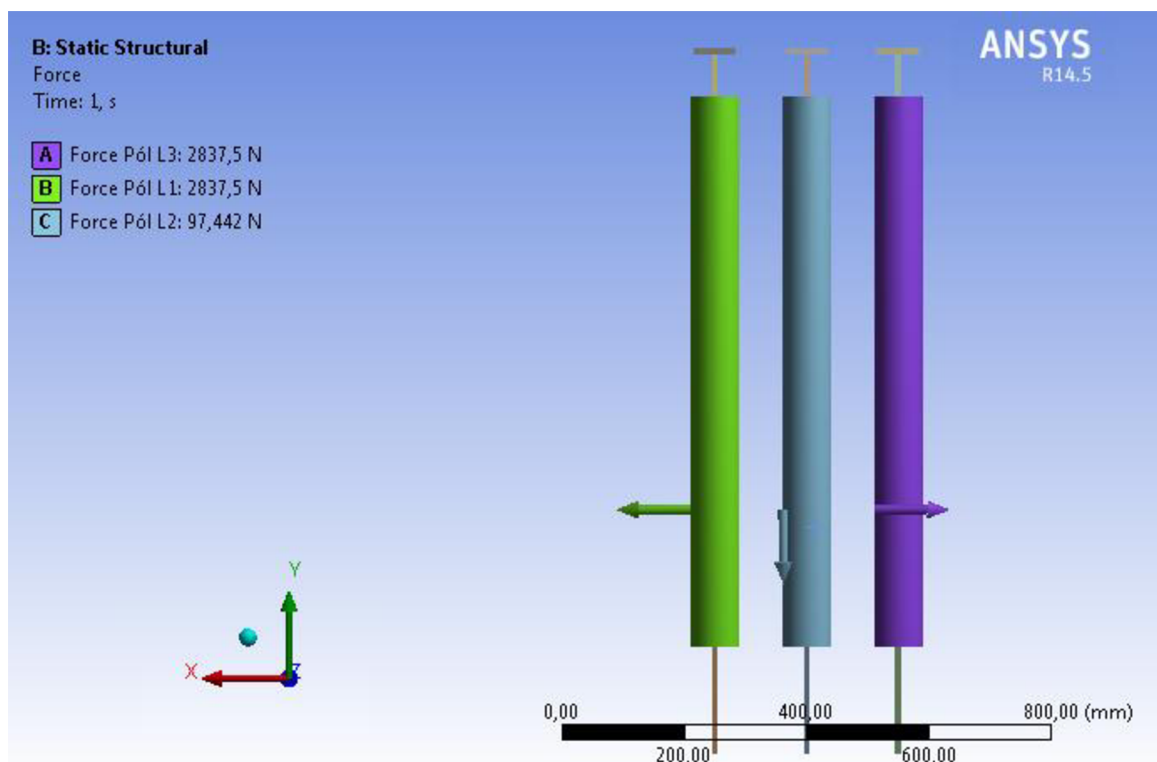
Obr. 9-46: Lineární konfigurace vypínače s vyznačenými směry zkratového proudu.

V Tab. 9-7 jsou výsledky výpočtu jednotlivých působících sil spočítané v prostředí ANSYS Maxwell. Vypočítané síly jsou rozloženy do jednotlivých směrů -  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .

Tab. 9-7: Působící síly na póly lineární konfiguraci vypínače.

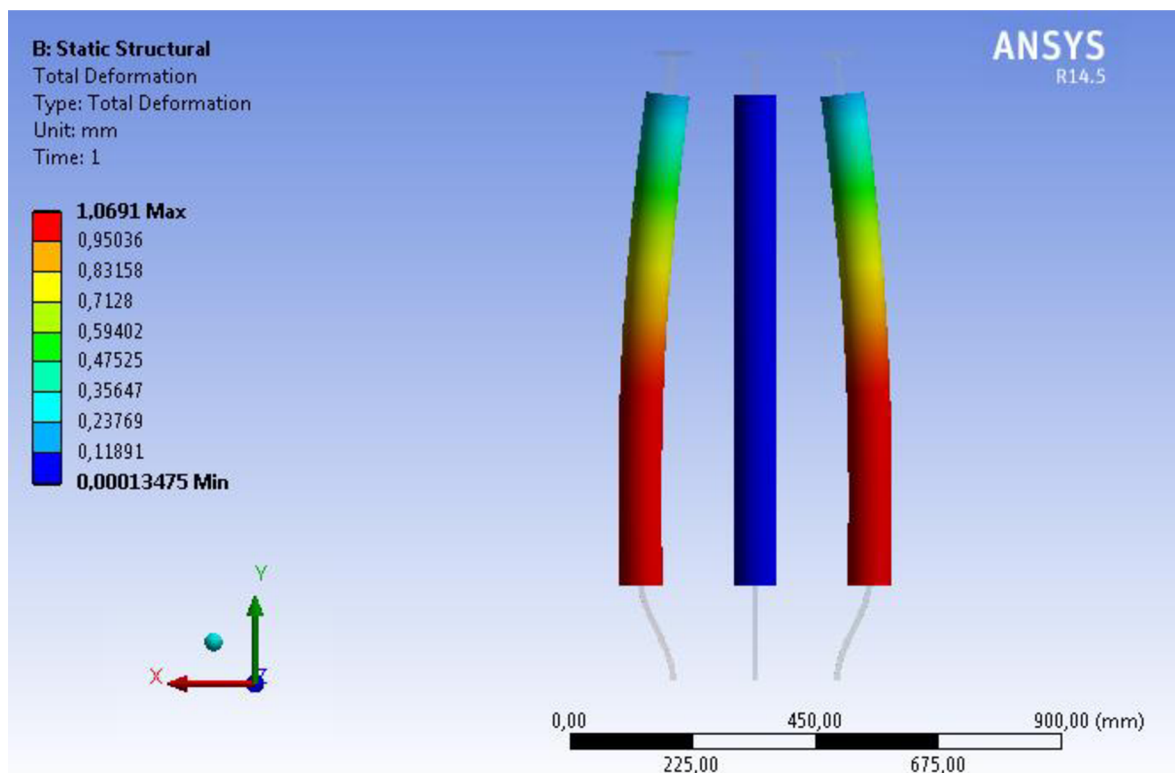
Objekt	$x$ [N]	$y$ [N]	$z$ [N]
Pól L1	2837,36	-23,889	0,221
Pól L2	-0,961	-97,1698	7,2078
Pól L3	-2837,48	-23,728	-0,185

Převedením vypočítaných sil do prostředí pro mechanické výpočty, bylo dosaženo grafického vykreslení směrů působících sil a byly vypočítány absolutní hodnoty velikosti sil působících ve směru udávajícím směry šipek (viz. Obr. 9-47). Opačný směr poloviční velikosti dynamického výdržného proudu v krajních fázích oproti fázi prostřední, má za následek vznik sil působících ve směru od prostřední fáze. Vlivem průchodu toho nastaveného proudu jsou póly lineární konfigurace vypínače odtahovány od prostřední fáze ve směru osy  $x$ .



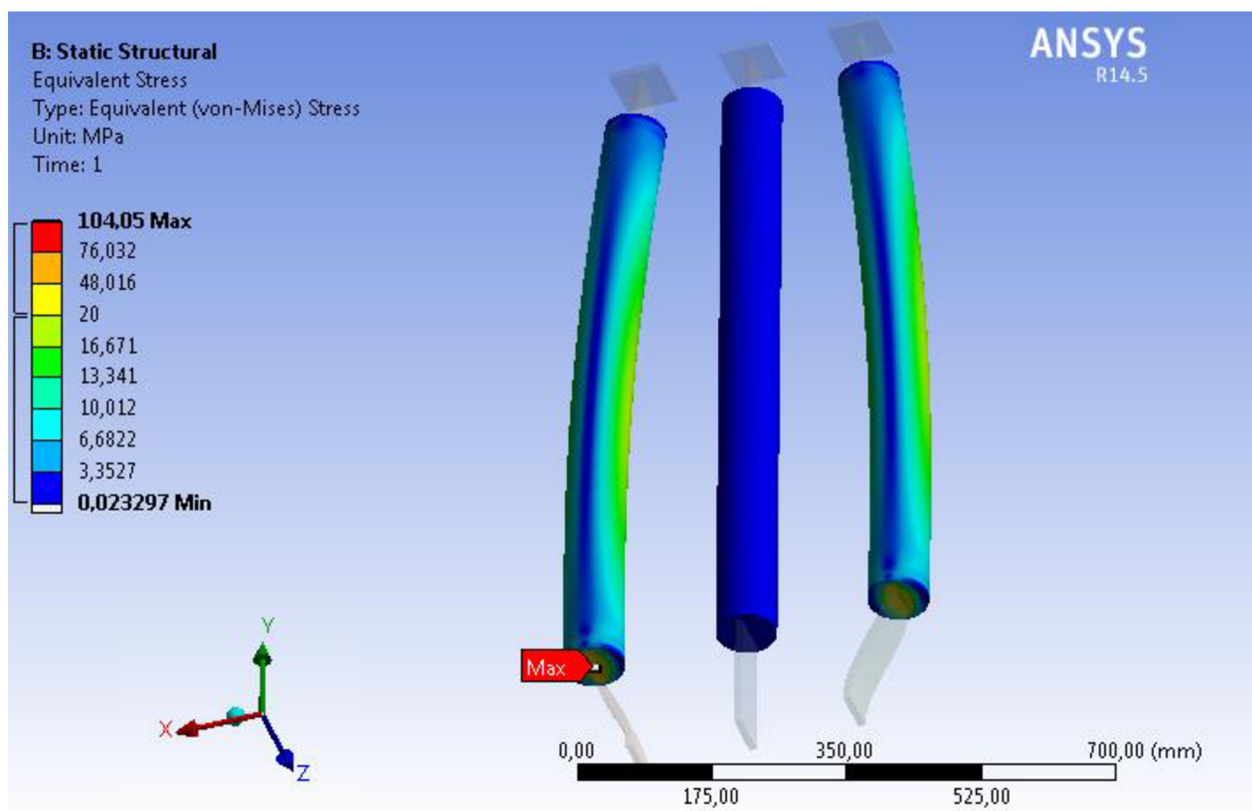
Obr. 9-47: Velikosti a směr působících sil na proudovodnou dráhu lin. konfigurace vypínače.

Z vypočítaných působících sil byla nasimulována a vykreslena deformace proudové dráhy. Obr. 9-48 zobrazuje konečnou deformaci proudové dráhy po průchodu zkratového proudu. Pro dostatečnou vizuální názornost vzniklé deformace je deformační účinek na paže a póly vypínače zobrazen v měřítku 38:1. Deformace je vykreslena 38 násobně větší, než ve skutečnosti na proudové dráze vypínače nastane.



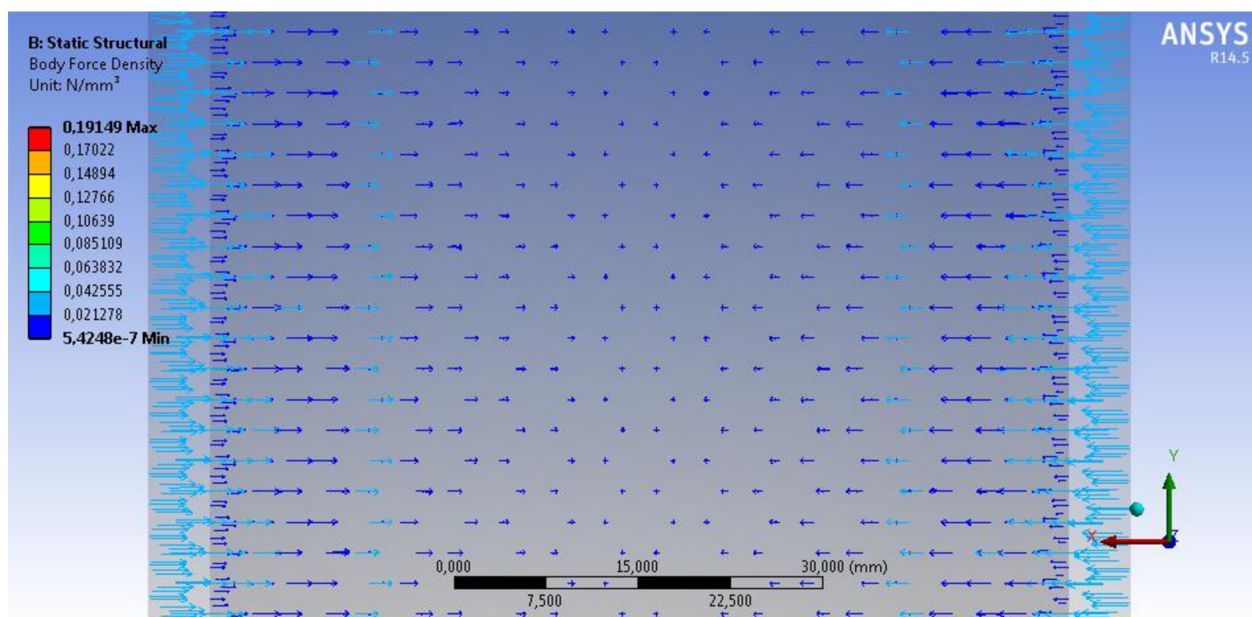
Obr. 9-48: Simulovaná deformace proudové dráhy lin. konfigurace vypínače. Měřítko 38:1.

Obr. 9-49 popisuje ekvivalentní napětí na pólech lineární konfigurace vypínače.



Obr. 9-49: Ekvivalentní napětí na lin. konfiguraci vypínače. Měřítko 38:1.

Zvolené simulované proudy protékající krajními fázovými vodiči, vytváří vlivem svého magnetického pole síly, které se při působení na prostřední fázi vzájemně vykrátí. Na prostřední fázi vypínače působí stejně velké opačné mechanické síly od krajních fází. Detail stejně velkých sil od krajních fází na prostřední pól fáze L2 je na Obr. 9-50.



Obr. 9-50: Detail vykreslení hustoty sil v prostřední fázi lin. konfigurace vypínače.

### 9.3.2 Zhodnocení dosažených výsledků

Vypočítané hodnoty silových účinků zkratového proudu při průchodu lineární konfigurací vypínače umožňuje nejen zhodnocení proběhnuté simulace na silové a deformační účinky proudu, ale i vzájemné porovnání mezi vypínačem VD4.

Maximální vypočítaná velikost silového namáhání je síla o velikost 2837,36 N působící od prostřední fáze na obě krajní fáze. Ve srovnání s pravoúhlou proudovou U smyčkou vypínače VD4, působí síly majoritně ve směru souřadné osy  $x$ . U vypínačů VD4 docházelo při stejné hodnotě nastavované velikosti zkratového proudu  $I_p = 80$  kA ke vznikům sil působících svou největší velikostí v ose  $z$ .

- vypínač 12 kV - 1250 A - 32 kA - fáze L2 ve směru osy  $z$  2693,7 N
- vypínač 24 kV - 1250 A - 32 kA - fáze L2 ve směru osy  $z$  3073,7 N
- lineární konfigurace vypínače - fáze L1 a L3 ve směru osy  $x$  2837,9 N

Deformace pólů vypínače dosahuje u lineární konfigurace vypínače maximální hodnoty 1,069 mm a to v dolní části vypínače. Vzniklé deformační účinky jsou z velké části dané uchycením vypínače. Uchycení vypínače (viz. Obr. 8-13) je provedeno za vnější hrany přívodních a vývodních přípojníc. Uchycení přívodu do vypínače je provedeno daleko větší plochou než uchycení za spodní vývod z vypínače. V případě zpevnění spodního uchycení můžou být účinky sil na deformaci lineární konfigurace vypínače ještě více minimalizovány. V porovnání s vypínači VD4, dochází v lineární konfiguraci vypínače k nejmenším hodnotám maximální deformace proudových drah:

- vypínač 12 kV - 1250 A - 32 kA - max. deformace krajních fází: 1,222 mm
- vypínač 24 kV - 1250 A - 32 kA - max. deformace krajních fází: 2,439 mm
- lineární konfigurace vypínače - max. deformace krajních fází: 1,069 mm

## 10 ZÁVĚR

Diplomová práce je zaměřena na problematiku mechanických účinků zkratového proudu při třífázovém zkratu. Vypracovaná práce je koncipována do dvou hlavních částí.

První část práce byla zaměřena na problematiku modelování silových účinků magnetického pole vzniklého při trojpolovém zkratu.

Kapitoly 2 a 3 popisují důležitou teorii potřebnou pro prováděné analýzy. Představují základní rozdělení účinků zkratových proudů a blíže popisují principy vzniku mechanických sil v magnetickém poli.

Hlavní úkolem první částí práce bylo si osvojit modelování silových účinků magnetického pole pomocí programu Ansys Maxwell 16.0. Tento program je jedním z předních světových softwarů pro simulaci používající k výpočtu metodu konečných prvků (MKP), v anglické literatuře známé jako Finite Element Method (FEM). Pro představení základního principu této metody je o ní krátce pojednáno v kapitole 5.

V rámci první praktické části byl vypracován model přípojnic v 3D modelovacím programu SolidWorks 2014. Nakreslené přípojnice byly následně přeneseny do simulačního prostředí Ansys Maxwell 16.0. Zde byly vypracovány dva typy simulací- statická a dynamická.

Statická analýza byla počítána pomocí funkce Magnetic Magnetostatic. Tato funkce se vyznačuje větší přesností oproti dynamické analýze, z důvodu rozdílného počítání sil, ale umožňuje počítání sil pouze v určitém statickém časovém okamžiku. Naopak dynamická analýza, v této práci počítána pomocí funkce Magnetic Transient, umožňuje počítat zvolený průběh zkratového proudu.

V dalším pokračování první praktické části práce bylo úkolem zkontrolovat výsledky simulace s numerickým výpočtem, tak aby se ověřila správnost nastavené simulace. Síly, odvozené a vypočítané v kapitole 6, působí kolmo na délku přípojnic (viz. Obr. 3-2). Program Ansys Maxwell je schopen počítat síly ve všech souřadnicových směrech. Avšak pro tuto část práce byly využity pouze síly působící podle Obr. 5-2 ve směru osy x, které lze verifikovat podle numerického výpočtu. Z výsledků statické analýzy a numerického výpočtu v Tab. 6-1 lze potvrdit správnost vytvořené statické analýzy. Výsledky jednotlivých sil vypočítaných v Ansys Maxwell 16.0 pomocí funkce Magnetic Magnetostatic se oproti numerickým vypočteným silám liší v řádu jednotek procent. Tyto malé odchylky mohou být způsobeny zaokrouhlováním při numerickém výpočtu nebo větší/menší přesností počítané sítě v simulačním prostředí Ansys Maxwell.

Průběh dynamické analýzy sil byl počítán pro časový okamžik 0 - 20 ms. V tomto časovém intervalu dochází vlivem působení zkratového proudu ke vzniku největších hodnot dynamických sil. Z průběhu sil lze ověřit správnost zvolení časového okamžiku  $t = 0,01s$  pro statickou analýzu, při kterém je síla působící na prostřední vodič největší. Z vypočítaného průběhu dynamické analýzy (Obr. 5-4) lze při srovnání průběhu dynamických sil s teoretickými předpokládanými průběhy (Obr. 3-7) konstatovat správnost výpočtu, vzhledem k odpovídajícím průběhům jednotlivých sil. Pro srovnání číselných výsledků s numerickými je tato analýza kvůli své nepřesnosti nevhodná. Dále je v kapitole 5.4 vypracována analýza pro porovnání změny působících sil na přípojnice při přítomnosti izolátorů a rozpěrek při třípolovém zkratu. V Tab. 5-3 jsou srovnány výsledky sil při simulaci, kdy byly uvažovány pouze přípojnice a výsledky sil, při kterých byly zahrnuty izolátory a rozpěrky v přípojnicovém systému. Přítomnost izolátorů a rozpěrek se významně projevilo na silách působících na fáze L1 a L3. Ve fázi L1 dochází k významnému nárůstu síly, ve fázi L3 naopak k jejímu poklesu oproti silám působících při

uvažování pouze holých přípojnic. Nejméně se naopak změnila síla v prostřední fázi. Ta je na základě dynamické analýzy z Obr. 5-5 stále maximální při  $t = 10$  ms. Hlavní důvod tohoto přerozdělení sil je přítomnost železa v rozpěrkách, které přitahuje a pohlcuje magnetické pole a má velký vliv na přerozdělení jednotlivých sil na jednotlivé fáze.

Druhá část diplomové práce byla již zadána zadavatelem diplomové práce - firmou ABB s.r.o. Hlavním úkolem této části bylo analyzovat silové účinky magnetického pole v rozváděči vn se zaměřením na paže a kontaktní systém vypínače VD4.

V rámci teoretické kapitoly 7 je podrobněji popsána skladba rozváděče vn či struktura a princip funkce testovaného vakuového vypínače VD4.

Kapitola 8 již popisuje praktickou část tvorby analýz. V rámci této kapitoly byly definovány požadavky zadavatele na testovanou konstrukci vypínače a nastavení zkratového proudu, při kterém byly vypočítány silové účinky magnetického pole.

Modely použité pro analýzy byly modelovány v softwaru SolidWorks 2014. V tomto 3D CAD prostředí byly namodelovány tři typy zjednodušených vypínačů, které se navzájem lišily rozměry a parametry (viz. kap. 8). Vypínač se testoval se základní výzbrojí rozváděče vn, tak aby byly co nejpřesněji simulované silové účinky, ke kterým dochází na vypínači v reálném rozváděči. Sestrojené sestavy proto obsahovaly přívodní a vývodní přípojnice a zjednodušenou izolační komoru. Dále byly modelovány dva typy kontaktních systémů pro paže vypínačů o jmenovitých parametrech 12 kV – 1250 A – 32 kA a 12 kV – 2000 A – 50 kA. Poslední modelovanou sestavou byla lineární konfigurace vypínače.

V rámci poslední kapitoly 9 jsou provedeny analýzy silových účinků magnetického pole. Jednotlivé vytvořené modely byly převedeny do prostředí programu Ansys Maxwell. Výpočet probíhal statickou analýzou za pomoci funkce Magnetic Magnetostatic, kterou byly počítány dynamické síly magnetického pole vzniklého průchodem zkratového proudu. Hodnoty zkratových proudů byly nastavovány podle požadavků zadavatele práce (viz. kap. 8.2). Vypočítané síly v programu Ansys Maxwell byly následně převedeny do programu Ansys Workbench, kde pomocí funkce Static Structural bylo zhodnoceno silové působení na mechanické vlastnosti konstrukce. Pomocí řešiče Mechanical byly vykresleny účinky sil na proudovodnou dráhu paží, pólů a kontaktních systémů pomocí deformace a ekvivalentního napětí.

Zhodnocení dosažených výsledků je taktéž provedeno v kapitole 9. U vypínačů se zaměřením na paže a póly v rámci samostatné podkapitoly (viz. 9.1.4), u kontaktních systémů vypínače a lineární konfigurace vypínače je zhodnocení provedeno přímo u vypracování.

K diplomové práci jsou přiložené dvě DVD, na kterých jsou modely vypínačů a kontaktních systémů přiložené ve formátu \*.SAT. Pro otevření tohoto formátu souboru je nutné vlastnit běžný 3D modelovací program. Dále jsou na DVD přiložené soubory ve formátu MXWLZ, jedná se o archivační formáty souborů v programu Ansys Maxwell, které v sobě sdružují kromě nastavených analýz i všechny vypočtené hodnoty. Tyto soubory lze otevřít ve verzích Ansys Maxwell 16.0 nebo jeho vyšších verzích. Posledním typem souborů, které DVD obsahují, jsou soubory ve formátu WBPZ. Jedná se opět o archivační soubory programu Ansys Workbench s nastavenými analýzami a výsledky výpočtů, které je možné otevřít nejlépe ve verzi Ansys Workbench 14.5 anebo vyšších verzích.



## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] ORSÁGOVÁ, Jaroslava. *Rozvodná zařízení*. Brno, 2015. Skripta. FEKT VUT.
- [2] PROKOP, J. *Analýza účinků zkratového proudu v rozváděči*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 95 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Valenta, Ph.D.
- [3] HAVELKA, Otto. *Elektrické přístroje: učebnice pro elektrotechnické fakulty vysokých škol technických*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1985.
- [4] DĚDKOVÁ, Jarmila a Tomáš KŘÍŽ. *Modelování elektromagnetických polí (MMEM)*. VUT Brno, 2012. Skripta., ISBN 978-80-214-4401-0
- [5] *Elektrorevue: Metoda konečných prvků v elektrotechnické praxi* [online]. VŠB-TU Ostrava: Fakulta elektrotechniky a informatiky, 2003 [cit. 2017-01-07]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/03024/index.html>
- [6] ČSN EN 60865-1 ed. 2 (333040) A *Zkratové proudy - Výpočet účinků. Část 1, Definice a výpočetní metody = Short-circuit currents - Calculation of effects. Part 1, Definitions and calculation methods*
- [7] FÁBRY, Karol. *Skratová bezpečnosť*. Bratislava: Alfa, 1968. Edícia elektrotechnickej literatúry.
- [8] Maxwell Online Help, ANSYS Electromagnetics Suite 16.0.0, 2014, SAS IP, Inc.
- [9] ABB. UniGear ZS1 Kovově krytý, vzduchem izolovaný rozváděč vysokého napětí, odolný proti vnitřním obloukovým zkratům se jmenovitým napětím do 24 kV [online]. 2013. [cit. 2017-03-26]. Dostupné z: <http://www.abb.cz/product/db0003db004279/c125739900636470c1256ec2003d60c8.aspx?>
- [10] ABB. *Vakuový vypínač typu VD4* [online]. 2017. [cit. 2017-04-16]. Dostupné z: <http://www.abb.cz/product/db0003db004279/c125739900636470c1256ebd00419dbb.aspx>
- [11] ČSN EN 62271-100 ed. 2 (354220) A *Vysokonapěťová spínací a řídicí zařízení. Část 100, Vypínače střídavého proudu = High-voltage switchgear and controlgear. Part 100, Alternating current circuit-breakers*. 2009. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [12] *Periodická tabulka. Tvrdost kovů, modul pružnosti* [online]. 2017 [cit. 2017-05-06]. Dostupné z: <http://www.prvky.com/tvrdost-kovu.html>
- [13] E-konstrukter: *Portál pro strojní konstruktéry* [online]. 2013 [cit. 2017-05-06]. Dostupné z: <http://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/plasty-mechanicke-vlastnosti>
- [14] Interní podklady poskytnuté firmou ABB s.r.o
- [15] ANSYS® Help Viewer, Version 15.0.0, 2013, SAS IP, Inc.

# 11 PŘÍLOHA A

Tab. 11-1: Výsledky působících sil na prsty růžice 12kV-1250A-32kV, pro  $I_{p1} = 40$  kA.

Objekt	x [N]	y [N]	z [N]	velikost [N]
Prst dolní růžice 1	-10,57	6,15	0,06	12,29
Prst dolní růžice 2	-11,71	0,55	0,33	11,728
Prst dolní růžice 3	-10,18	-4,7	0,54	11,226
Prst dolní růžice 4	-7,255	-8,92	0,52	11,51
Prst dolní růžice 5	-2,799	-11,32	0,54	11,673
Prst dolní růžice 6	2,49	-11,07	0,53	11,359
Prst dolní růžice 7	7,12	-8,91	0,52	11,417
Prst dolní růžice 8	10,41	-4,58	0,36	11,379
Prst dolní růžice 9	11,85	0,37	0,42	11,863
Prst dolní růžice 10	10,93	6,07	0,16	12,503
Prst dolní růžice 11	7,49	10,77	-0,15	13,119
Prst dolní růžice 12	2,82	13,77	-0,14	14,056
Prst dolní růžice 13	-2,59	13,39	-0,19	13,64
Prst dolní růžice 14	-7,58	10,34	0,02	12,821
Prst horní růžice 1	5,29	-12,87	-0,22	13,917
Prst horní růžice 2	9,62	-8,84	0,08	13,065
Prst horní růžice 3	11,43	-3,26	0,37	11,892
Prst horní růžice 4	11,36	2,04	0,41	11,549
Prst horní růžice 5	8,96	6,67	0,41	11,178
Prst horní růžice 6	4,82	9,81	0,49	10,941
Prst horní růžice 7	0,04	11,47	0,57	11,484
Prst horní růžice 8	-5,03	10,03	0,49	11,231
Prst horní růžice 9	-8,73	6,9	0,57	11,142
Prst horní růžice 10	-10,89	2,03	0,39	11,084
Prst horní růžice 11	-11,52	-3,57	0,14	12,061
Prst horní růžice 12	-9,73	-8,93	0,08	13,207
Prst horní růžice 13	-5,68	-12,82	-0,08	14,022
Prst horní růžice 14	0,12	-14,17	-0,23	14,172

Tab. 11-2: Výsledky působících sil na prsty růžice 12kV-1250A-32kV, pro  $I_{p2} = -80$  kA.

Objekt	x [N]	y [N]	z [N]	velikost [N]
Prst dolní 1	-42,22	25,1	0,29	49,11
Prst dolní 2	-46,36	2,49	1,22	46,443
Prst dolní 3	-40,44	-18,67	1,95	44,548
Prst dolní 4	-28,78	-35,28	2,08	45,577
Prst dolní 5	-11,15	-44,85	2,19	46,267
Prst dolní 6	9,9	-43,85	2,18	45,006
Prst dolní 7	28,31	-35,12	2,05	45,156
Prst dolní 8	41,82	-18,04	1,57	45,572
Prst dolní 9	47,13	1,92	1,47	47,192

Prst dolní 10	42,83	24,49	0,48	49,34
Prst dolní 11	28,98	42,64	0,55	51,559
Prst dolní 12	11,02	54,37	0,89	55,483
Prst dolní 13	-10,18	54,01	0,95	54,969
Prst dolní 14	-30,4	42,08	0,21	51,913
Prst horní 1	20,29	-50,63	0,94	54,522
Prst horní 2	37,55	-35,37	0,07	51,585
Prst horní 3	45,28	-13,46	1,2	47,253
Prst horní 4	45,01	7,78	1,61	45,706
Prst horní 5	35,39	26	1,74	43,949
Prst horní 6	19,64	39,86	2,13	44,487
Prst horní 7	-0,01	45,13	2,27	45,187
Prst horní 8	-19,98	39,43	2,1	44,253
Prst horní 9	-34,85	27,42	2,14	44,395
Prst horní 10	-44,05	7,74	1,56	44,752
Prst horní 11	-45,58	-14,91	0,66	47,961
Prst horní 12	-37,79	-35,5	0,15	51,849
Prst horní 13	-22,34	-51,32	0,68	55,976
Prst horní 14	0,71	-55,78	1,14	55,796

Tab. 11-3: Výsledky působících sil na prsty růžice 12kV-2000A-50kV, pro  $I_{p1} = 62,5$  kA.

Objekt	x [N]	y [N]	z [N]	velikost [N]
Prst horní růžice 1	9,76	-48,17	-0,79	49,155
Prst horní růžice 2	19,85	-41,18	-0,51	45,717
Prst horní růžice 3	28,57	-33,75	0,004	44,219
Prst horní růžice 4	35,66	-23,69	0,95	42,822
Prst horní růžice 5	39,05	-14,45	-0,29	41,639
Prst horní růžice 6	37,43	-2,11	0,44	37,492
Prst horní růžice 7	35,79	8,41	0,78	36,773
Prst horní růžice 8	33,9	20,2	1,37	39,486
Prst horní růžice 9	28,45	27,78	0,52	39,767
Prst horní růžice 10	18,88	33,82	0,84	38,742
Prst horní růžice 11	9,59	37,90	0,92	39,105
Prst horní růžice 12	-0,85	41,165	1,02	41,186
Prst horní růžice 13	-9,39	39,98	1,14	41,084
Prst horní růžice 14	-18,24	32,89	0,91	37,62
Prst horní růžice 15	-27,22	27,49	0,8	38,695
Prst horní růžice 16	-34,66	18,61	0,33	39,342
Prst horní růžice 17	-37,64	9,77	1,37	38,911
Prst horní růžice 18	-36,93	-2,08	0,66	36,994
Prst horní růžice 19	-37,41	-13,18	0,23	39,665
Prst horní růžice 20	-34,99	-25,29	0,49	43,176
Prst horní růžice 21	-29,95	-33,78	0,62	45,149
Prst horní růžice 22	-20,08	-40,81	-0,33	45,484

Prst horní růžice 23	-10,42	-46,81	-0,7	47,961
Prst horní růžice 24	1,1	-49,89	-0,74	49,908
Prst dolní růžice 1	9,47	-40,75	1,12	41,851
Prst dolní růžice 2	18,79	-34,02	0,83	38,873
Prst dolní růžice 3	27,6	-28,33	0,79	39,56
Prst dolní růžice 4	35,04	-19,18	0,33	39,947
Prst dolní růžice 5	38,4	-10,5	1,25	39,829
Prst dolní růžice 6	38,79	1,42	0,68	38,822
Prst dolní růžice 7	38,3	12,92	0,22	40,421
Prst dolní růžice 8	35,46	24,81	-0,42	43,28
Prst dolní růžice 9	30,27	32,87	0,55	44,688
Prst dolní růžice 10	20,23	40,23	-0,26	45,031
Prst dolní růžice 11	10,52	45,28	-0,62	46,49
Prst dolní růžice 12	-1,31	48,63	-0,51	48,65
Prst dolní růžice 13	-9,84	46,41	-0,65	47,446
Prst dolní růžice 14	-19,61	39,06	-0,49	43,709
Prst dolní růžice 15	-28,59	32,77	0,01	43,489
Prst dolní růžice 16	-36,1	23,14	0,82	42,888
Prst dolní růžice 17	-39,59	13,99	-0,22	41,99
Prst dolní růžice 18	-39,02	1,58	0,44	39,054
Prst dolní růžice 19	-37,24	-9,26	0,72	38,381
Prst dolní růžice 20	-33,89	-20,58	1,31	39,671
Prst dolní růžice 21	-28,95	-28,33	0,52	40,509
Prst dolní růžice 22	-19,23	-34,69	0,87	39,673
Prst dolní růžice 23	-9,58	-37,81	0,8	39,013
Prst dolní růžice 24	0,76	-42,06	0,98	42,078

Tab. 11-4: Výsledky působících sil na prsty růžice 12kV-2000A-50kV, pro  $I_{p2} = -125$  kA.

Objekt	x [N]	y [N]	z [N]	velikost [N]
Prst horní růžice 1	34,66	-179,78	-3,07	183,12
Prst horní růžice 2	70,21	-151,21	-2,29	166,73
Prst horní růžice 3	102,45	-125,96	-0,56	162,36
Prst horní růžice 4	131,58	-90,30	1,93	159,6
Prst horní růžice 5	143,07	-56,27	0,24	153,74
Prst horní růžice 6	140,79	-9,97	1,97	141,16
Prst horní růžice 7	135,00	31,15	2,86	138,58
Prst horní růžice 8	125,34	75,05	4,57	146,16
Prst horní růžice 9	104,70	101,73	2,72	146,01
Prst horní růžice 10	68,90	123,96	3,39	141,86
Prst horní růžice 11	34,95	139,05	3,54	143,42
Prst horní růžice 12	-3,43	150,58	3,84	150,67
Prst horní růžice 13	-33,55	148,03	4,44	151,85
Prst horní růžice 14	-68,30	123,72	3,77	141,37
Prst horní růžice 15	-98,60	99,62	3,29	140,2

Prst horní růžice 16	-128,91	68,10	2,26	145,81
Prst horní růžice 17	-139,97	35,69	4,19	144,51
Prst horní růžice 18	-137,92	-9,44	2,35	138,26
Prst horní růžice 19	-136,23	-50,92	1,06	145,44
Prst horní růžice 20	-126,62	-95,75	-0,59	158,75
Prst horní růžice 21	-109,99	-127,62	0,77	168,48
Prst horní růžice 22	-70,91	-149,39	-1,77	165,37
Prst horní růžice 23	-36,94	-172,14	-3,19	176,09
Prst horní růžice 24	4,82	-184,88	-3,09	184,97
Prst dolní růžice 1	33,86	-150,03	4,19	153,86
Prst dolní růžice 2	68,85	-126,17	3,54	143,78
Prst dolní růžice 3	100,24	-103,12	3,22	143,85
Prst dolní růžice 4	130,89	-70,69	2,22	148,78
Prst dolní růžice 5	142,94	-38,54	4,04	148,1
Prst dolní růžice 6	140,68	6,71	2,34	140,86
Prst dolní růžice 7	139,43	49,04	1,02	147,81
Prst dolní růžice 8	129,21	93,94	-0,59	159,75
Prst dolní růžice 9	110,70	122,91	0,69	165,41
Prst dolní růžice 10	93,59	149,56	-1,41	176,43
Prst dolní růžice 11	37,17	164,05	-2,74	168,23
Prst dolní růžice 12	-4,54	180,14	-2,44	180,21
Prst dolní růžice 13	-34,78	173,86	-2,40	177,32
Prst dolní růžice 14	-72,09	148,10	-1,85	164,72
Prst dolní růžice 15	-104,03	122,20	-0,52	160,48
Prst dolní růžice 16	-132,61	86,65	1,80	158,42
Prst dolní růžice 17	-144,75	53,57	0,32	154,35
Prst dolní růžice 18	-142,21	7,10	1,82	142,4
Prst dolní růžice 19	-136,89	-33,62	2,67	140,98
Prst dolní růžice 20	-126,06	-76,94	4,36	147,75
Prst dolní růžice 21	-106,90	-104,20	2,79	149,31
Prst dolní růžice 22	-70,79	-128,31	3,49	146,58
Prst dolní růžice 23	-34,98	-139,50	3,31	143,86
Prst dolní růžice 24	3,58	-155,59	3,90	154,28