

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

ANALÝZA ÚČINKŮ ZKRATOVÉHO PROUDU V ROZVÁDĚČI

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

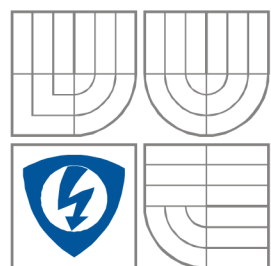
Bc. JAN PROKOP

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLÓGIÍ**

**ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY
A ELEKTRONIKY**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC
ENGINEERING

ANALÝZA ÚČINKŮ ZKRATOVÉHO PROUDU V ROZVÁDĚČI

ANALYSIS OF EFFECTS OF SHORT-CIRCUIT CURRENT IN SWITCHGEAR CABINET

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

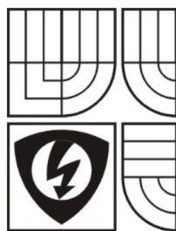
Bc. JAN PROKOP

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JIŘÍ VALENTA, Ph.D.

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika

Student: Bc. Jan Prokop

Ročník: 2

ID: 133775

Akademický rok: 2014/15

NÁZEV TÉMATU:

Analýza účinků zkratového proudu v rozváděči

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se s požadavky norem na konstrukci a zkoušky rozváděčů vysokého napětí a aplikujte na konkrétní provedení.
2. Popište působení dynamických sil na jednotlivé části rozváděče.
3. Uveďte teorii vývinu plynu při obloukovém zkratu a principy výpočtu tlakových účinků. Aplikujte na vybranou skříň.
4. Vytvořte numerický model vhodný pro výpočet dynamických sil pro konkrétní uspořádání.
5. Výsledky přehledně vyhodnoťte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Havelka, O. a kol.: Elektrické přístroje, SNTL, 198

[2] Havelka, O. a kol.: Podklady a příklady pro navrhování elektrických přístrojů I, VUT v Brně, 1985

Termín zadání: 22.9.2014

Termín odevzdání: 26.5.2015

Vedoucí práce: Ing. Jiří Valenta, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce:

Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Tato práce je zaměřena na problematiku dynamických účinků zkratových proudů, přesněji dynamických účinků zkratových proudů na rozváděč (kabelovou koncovku). Práce byla určena pro konkrétní konstrukční zadání dvou rozváděčových skříní umístěných na točivých strojích firmy Siemens Electric Machines Drásov s.r.o.. Provedení skříní je určeno pro nevybušné prostředí, kde vzduch slouží jako izolační médium. Úkolem bylo zjistit jak se zařízení budou chovat při trojpolovém (3 fázovém) zkratu a úplném (3 fázovém zemním) zkratu, zda tato zařízení obstojí požadavkům daným zákazníkem. Pro výpočty a simulace byly využity následující výpočetní programy: Ansoft Maxwell 16.0, Ansoft Maxwell 2015 a ANSYS Workbench 16.0. Za pomoci těchto programů bylo nasimulováno působení sil na proudovodné části ve svorkovnici způsobené průchodem zkratového proudu, jak staticky, tak i dynamicky. Dále bylo staticky a dynamicky simulováno působení tlaků na kostru rozváděče vzniklého při obloukovém zkratu. Všechny dosažené výsledky jsou přehledně shrnuty v závěru, závěr také obsahuje finální zhodnocení funkčnosti obou zařízení.

Abstract

The work is focusing on dynamic effects of short-circuit currents, more precisely dynamic effects of short-circuit currents on switchgear cabinet (terminal box). The work was designated to a concrete construction type of two switchgear cabinets located on rotating machines via company Siemens Electric Machines Drásov s.r.o.. The switchgear cabinets are designed for non-explosive environment where the air is used as an insulating medium. The task was to determine how the device will behave during the three-phase short-circuit and three-phase short-circuit with earth/ground connection. The following programs were used for the calculations and simulations: Ansoft Maxwell 16.0, Ansoft Maxwell 2015 and ANSYS Workbench 16.0. By using these programs the effects of forces which acts on current paths in cabinet caused by the passage of short-circuit current were simulated, statically and also dynamically. Further the effects of pressure acting on cabinet frame during the arc short-circuit have been statically and dynamically simulated. All the results are summarized in the conclusion. Conclusion also contains the final evaluation of the functionality of both switchgear cabinets.

Klíčová slova

Dynamické účinky zkratového proudu; rozváděč; kabelová koncovka; točivý stroj; Siemens Electric Machines Drásov s.r.o.; nevýbušné prostředí; izolační médium; trojpólový zkrat; úplný zkrat; Ansoft Maxwell 16.0; Ansoft Maxwell 2015; ANSYS Workbench 16.0; obloukový zkrat.

Keywords

Dynamic effects of short-circuit current; switchgear cabinet; terminal box; rotating machine; Siemens Electric Machines Drásov s.r.o.; non-explosive environment; insulating medium; three-phase short-circuit; three-phase short-circuit with earth/ground connection; Ansoft Maxwell 16.0; Ansoft Maxwell 2015; ANSYS Workbench 16.0; arc short-circuit.

Bibliografická citace

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..

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma *Analýza účinků zkratového proudu v rozváděči* jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne

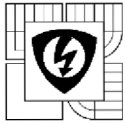
Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Jiřímu Valentovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce. Rád bych také poděkoval Petru Hájkovi, Karlu Fučíkovi a Janu Benešovi z firmy Siemens Electric Machines Drásov s.r.o. za jejich cenné rady z praxe a pomoc při zpracování vyhodnocení simulací na působení sil na proudovodné části v rozváděčích způsobených průchodem zkratového proudu. Následně bych také rád poděkoval Ing. Tomáši Návratovi, Bc. Marku Benešovskému a Ing. Petru Kubíkovi z VUT Fakulty strojního inženýrství za jejich odbornou pomoc při zpracování simulací chování tlaku v rozváděčové skříni a v neposlední řadě bych rád poděkoval Mgr. Petru Klocovi, Ph.D. za pomoc při výpočtu energie vzniklé při obloukovém zkratu a prof. RNDr. Vladimíru Aubrechtovi, CSc. za poskytnutou literaturu k danému tématu.

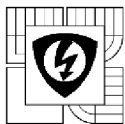
V Brně dne

Podpis autora

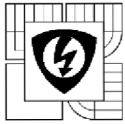


OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	9
SEZNAM TABULEK	12
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	13
1 ÚVOD	15
2 ZKRATY V ELEKTRICKÝCH ZAŘÍZENÍCH	17
2.1 DRUHY ZKRATŮ.....	17
2.2 ÚČINKY ZKRATŮ	19
2.2.1 MECHANICKÉ	19
2.2.2 TEPELNÉ ÚČINKY ZKRATOVÝCH PROUDŮ.....	19
2.2.3 INDUKČNÍ ÚČINEK ZKRATOVÝCH PROUDŮ	20
2.2.4 STABILITA NAPÁJECÍ SOUSTAVY	20
3 SILOVÉ ÚČINKY ELEKTRICKÉHO PROUDU.....	21
3.1 VZNIK ELEKTRODYNAMICKÝCH SIL.....	21
3.2 ELEKTRODYNAMICKÉ SÍLY V TROJFÁZOVÉ SOUSTAVĚ	22
3.3 ELEKTRODYNAMICKÉ SÍLY V ZAKŘIVENÉ PROUDOVODNÉ DRÁZE	23
3.4 ELEKTRODYNAMICKÉ SÍLY PROUDOVÉ DRÁHY V BLÍZKOSTI FEROMAG. ROZHRANÍ.....	23
3.5 REZONANČNÍ JEVY.....	24
4 OBECNÁ TEORIE OBLOUKU	25
4.1 HLAVNÍ ZNAKY OBLOUKU	25
4.2 DYNAMICKÝ OBLOUK	25
4.3 VÝPOČET ENERGIE OBLOUKU	26
4.4 ENERGIE PŘEMĚNĚNÁ NA ZÁŘIVOU SLOŽKU	27
5 POŽADAVKY ZÁKAZNÍKA NA ZKOUŠKU A ZKOUMANÉ ZAŘÍZENÍ	29
5.1 ZADANÉ PARAMETRY PRO TEST OD ZADAVATELE.....	29
5.2 DALŠÍ PARAMETRY POUŽITÉ PRO VÝPOČET	29
5.3 ANALÝZA VÝSLEDKŮ	29
6 CHARAKTERISTIKA ZKOUMANÝCH ZAŘÍZENÍ	30
6.1 ROZVÁDĚČ 1XD1 525-3AA	30
6.1.1 PARAMETRY ROZVÁDĚČE	30
6.1.2 PŘÍKLAD UMÍSTĚNÍ ROZVÁDĚČE NA STROJI.....	30
6.1.3 VÝKRES ROZVÁDĚČE	31
6.2 ROZVÁDĚČ 1XF4 525-3EB	32
6.2.1 PARAMETRY ROZVÁDĚČE	32
6.2.2 PŘÍKLAD UMÍSTĚNÍ ROZVÁDĚČE NA STROJI.....	32
6.2.3 VÝKRES ROZVÁDĚČE	33

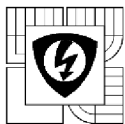


7 STATICKÁ A DYNAMICKÁ KONTROLA NA ÚČINKY ZKRATOVÉHO PROUDU (NADPROUDU) V ZAŘÍZENÍCH.....	34
7.1 ROZVÁDĚČ 1XD1 525-3AA	35
7.1.1 STATICKÁ ANALÝZA	35
7.1.2 DYNAMICKÁ ANALÝZA	41
7.2 ROZVÁDĚČ 1XF4 525-3EB	44
7.2.1 STATICKÁ ANALÝZA	44
7.2.2 DYNAMICKÁ ANALÝZA	50
8 ZHODNOCENÍ STATICKÉ A DYNAMICKÉ KONTROLY NA ÚČINKY ZKRATOVÉHO PROUDU (NADPROUDU) V ZAŘÍZENÍCH.....	53
8.1 ROZVÁDĚČ 1XD1 525-3AA	53
8.2 ROZVÁDĚČ 1XF4 525-3EB	54
9 STATICKÁ A DYNAMICKÁ KONTROLA NA PŮSOBENÍ TLAKŮ NA KOSTRU ZAŘÍZENÍ VZNIKLÉHO PŘI OBLOUKOVÉM ZKRATU	55
9.1 VÝPOČET OBLOUKOVÉ ENERGIE	56
9.2 ROZVÁDĚČ 1XD1 525-3AA	60
9.2.1 DYNAMICKÁ ANALÝZA.....	60
9.2.2 STATICKÁ ANALÝZA	75
9.3 ROZVÁDĚČ 1XF4 525-3EB	77
9.3.1 DYNAMICKÁ ANALÝZA.....	77
9.3.2 STATICKÁ ANALÝZA	89
10 ZHODNOCENÍ STATICKÉ A DYNAMICKÉ KONTROLY NA PŮSOBENÍ TLAKŮ NA KOSTRU ZAŘÍZENÍ VZNIKLÉHO PŘI OBLOUKOVÉM ZKRATU.....	91
10.1 ROZVÁDĚČ 1XD1 525-3AA	91
10.2 ROZVÁDĚČ 1XF4 525-3EB.....	92
11 ZÁVĚR.....	93
LITERATURA	95

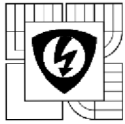


SEZNAM OBRÁZKŮ

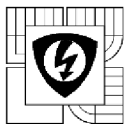
<i>Obr. 2-1 Druhy zkratů</i>	17
<i>Obr. 2-2 Průběh zkratového proudu</i>	17
<i>Obr. 2-3 Průběh souměrného zkratového proudu</i>	18
<i>Obr. 2-4 Průběh nesouměrného zkratového proudu</i>	18
<i>Obr. 3-1 Síla působící na proudové vlákno v magnetickém poli</i>	21
<i>Obr. 3-2 Průběh proudů a sil působících na jednotlivé fáze při nesymetrickém průběhu zkratového proudu</i>	22
<i>Obr. 3-3 Průběh síly působící na pravoúhlý proudový záhyb</i>	23
<i>Obr. 3-4 Přitažlivá síla mezi proudovodičem a feromagnetickým rozhraním</i>	24
<i>Obr. 3-5 Časový průběh síly: a) s přechodnou složkou, b) bez přechodné složky</i>	24
<i>Obr. 4-1 Průběhy napětí a proudu obloukem v obvodu střídavého proudu a dynamická charakteristika oblouku</i>	26
<i>Obr. 4-2 Náhradní schéma pro obloukový zkrat</i>	26
<i>Obr. 4-3 Koefficient záření v závislosti na teplotě plazmatu oblouku ve vzduchu při různých příměsích Cu ($r = 0.1 \text{ cm}$, $p = 1 \text{ atm}$)</i>	28
<i>Obr. 6-1 Příklad umístění rozváděče IXD1-525-3AA na stroji</i>	30
<i>Obr. 6-2 Výkres rozváděče IXD1 525-3AA</i>	31
<i>Obr. 6-3 Příklad umístění rozváděče IXF4 525-3EB na stroji</i>	32
<i>Obr. 6-4 Výkres rozváděče IXF4 525-3EB</i>	33
<i>Obr. 7-1 Model skříně rozváděče IXD1 525-3AA v prostředí Ansoft Maxwell</i>	35
<i>Obr. 7-2 Model skříně rozváděče IXD1 525-3AA – pevné části proudovodné dráhy</i>	36
<i>Obr. 7-3 Simulovaná deformace pevných částí skříně rozváděče IXD1 525-3AA v milimetrech</i> .	37
<i>Obr. 7-4 Simulovaná deformace pevných částí skříně rozváděče IXD1 525-3AA v milimetrech bez izolátorů 1 a 2</i>	38
<i>Obr. 7-5 Model skříně rozváděče IXD1 525-3AA – kabely z generátoru</i>	39
<i>Obr. 7-6 Model skříně rozváděče IXD1 525-3AA – kabely od vývodů</i>	40
<i>Obr. 7-7 Zkoumané pevné části u rozváděče IXD1 525-3AA u dynamické analýzy</i>	41
<i>Obr. 7-8 Rozváděč IXD1 525-3AA - průběh proudu jednotlivými pevnými částmi (fázemi)</i>	42
<i>Obr. 7-9 Rozváděč IXD1 525-3AA - průběh sil v pevných částech v ose x</i>	42
<i>Obr. 7-10 Rozváděč IXD1 525-3AA - průběh sil v pevných částech v ose y</i>	43
<i>Obr. 7-11 Rozváděč IXD1 525-3AA - průběh sil v pevných částech v ose z</i>	43
<i>Obr. 7-12 Model skříně rozváděče IXF4 525-3EB v prostředí Ansoft Maxwell</i>	44



<i>Obr. 7-13 Model skříně rozváděče 1XF4 525-3EB – pevné části proudovodné dráhy.....</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 7-14 Simulovaná deformace pevných částí skříně rozváděče 1XF4 525-3EB v milimetrech</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 7-15 Simulovaná deformace pevných částí skříně rozváděče 1XF4 525-3EB v milimetrech bez izolátorů 1 a 2</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 7-16 Model skříně rozváděče 1XF4 525-3EB – kabely z generátoru</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 7-17 Model skříně rozváděče 1XF4 525-3EB – kabely od vývodů</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 7-18 Zkoumané pevné části u rozváděče 1XF4 525-3EB u dynamické analýzy.....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 7-19 Rozváděč 1XF4 525-3EB - průběh proudu jednotlivými pevnými částmi (fázemi).....</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 7-20 Rozváděč 1XF4 525-3EB - průběh sil v pevných částech v ose x.....</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 7-21 Rozváděč 1XF4 525-3EB - průběh sil v pevných částech v ose y.....</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 7-22 Rozváděč 1XF4 525-3EB - průběh sil v pevných částech v ose z.....</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 9-1 Schéma zapojení měřících přístrojů při měření 3 fázového zkratu</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 9-2 Průběh proudu při 3 fázovém zkratu</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 9-3 Průběh napětí při 3 fázovém zkratu.....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 9-4 Schéma zapojení měřících přístrojů při měření 3 fázového zemního zkratu.....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 9-5 Průběh proudu při 3 fázovém zemním zkratu.....</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 9-6 Průběh napětí při 3 fázovém zemním zkratu</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 9-7 Model skříně rozváděče 1XD1 525-3AA v prostředí ANSYS Workbench</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 9-8 Model skříně rozváděče 1XD1 525-3AA připravený k dynamické analýze.....</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 9-9 Maximální deformace předních dveří rozváděče v milimetrech</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 9-10 Průběh maximální a minimální deformace předních dveří rozváděče v čase</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 9-11 Maximální deformace zadní části rozváděče v milimetrech.....</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 9-12 Průběh maximální a minimální deformace zadní části rozváděče v čase</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 9-13 Maximální deformace zadní části rozváděče v milimetrech – detail.....</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 9-14 Průběh maximální a minimální deformace zadní části rozváděče v čase - detail.....</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 9-15 Maximální deformace pravého boku rozváděče v milimetrech.....</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 9-16 Průběh maximální a minimální deformace pravého boku rozváděče v čase</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 9-17 Maximální deformace levého boku rozváděče v milimetrech.....</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 9-18 Průběh maximální a minimální deformace levého boku rozváděče v čase</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 9-19 Maximální deformace vrchní části rozváděče v milimetrech</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 9-20 Průběh maximální a minimální deformace vrchní části rozváděče v čase.....</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 9-21 Maximální deformace spodní části rozváděče v milimetrech.....</i>	<i>69</i>
<i>Obr. 9-22 Průběh maximální a minimální deformace spodní části rozváděče v čase</i>	<i>69</i>

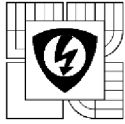


<i>Obr. 9-23 Rozmístění snímačů tlaku pro simulaci u rozváděče 1XD1 525-3AA</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 9-24 Průběh tlaku na čidle tlaku – membrána.....</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 9-25 Průběh tlaku na čidle tlaku - přední dveře</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 9-26 Průběh tlaku na čidle tlaku - zadní část</i>	<i>72</i>
<i>Obr. 9-27 Průběh tlaku na čidle tlaku - pravý bok</i>	<i>72</i>
<i>Obr. 9-28 Průběh tlaku na čidle tlaku - levý bok</i>	<i>73</i>
<i>Obr. 9-29 Průběh tlaku na čidle tlaku - vrchní část.....</i>	<i>73</i>
<i>Obr. 9-30 Průběh tlaku na čidle tlaku - spodní část</i>	<i>74</i>
<i>Obr. 9-31 Model rozváděče 1XD1 525-3AA s definovanými hodnotami statických tlaků</i>	<i>75</i>
<i>Obr. 9-32 Výsledná deformace rozváděče 1XD1 525-3AA při zadaných podmínkách zjištěná ze statické analýzy pro čas 9ms</i>	<i>76</i>
<i>Obr. 9-33 Model skříně rozváděče 1XF4 525-3EB v prostředí ANSYS Workbench</i>	<i>77</i>
<i>Obr. 9-34 Model skříně rozváděče 1XF4 525-3EB připravený k dynamické analýze</i>	<i>79</i>
<i>Obr. 9-35 Maximální deformace předních dveří rozváděče v milimetrech</i>	<i>80</i>
<i>Obr. 9-36 Průběh maximální a minimální deformace předních dveří rozváděče v čase</i>	<i>80</i>
<i>Obr. 9-37 Maximální deformace zadní části rozváděče v milimetrech.....</i>	<i>81</i>
<i>Obr. 9-38 Průběh maximální a minimální deformace zadní části rozváděče v čase</i>	<i>81</i>
<i>Obr. 9-39 Maximální deformace zadní části rozváděče v milimetrech – detail.....</i>	<i>82</i>
<i>Obr. 9-40 Průběh maximální a minimální deformace zadní části rozváděče v čase - detail.....</i>	<i>82</i>
<i>Obr. 9-41 Maximální deformace pravého boku rozváděče v milimetrech</i>	<i>83</i>
<i>Obr. 9-42 Průběh maximální a minimální deformace pravého boku rozváděče v case</i>	<i>83</i>
<i>Obr. 9-43 Maximální deformace levého boku rozváděče v milimetrech.....</i>	<i>84</i>
<i>Obr. 9-44 Průběh maximální a minimální deformace levého boku rozváděče v čase</i>	<i>84</i>
<i>Obr. 9-45 Maximální deformace vrchní části rozváděče v milimetrech</i>	<i>85</i>
<i>Obr. 9-46 Průběh maximální a minimální deformace vrchní části rozváděče v čase.....</i>	<i>85</i>
<i>Obr. 9-47 Maximální deformace spodní části rozváděče v milimetrech.....</i>	<i>86</i>
<i>Obr. 9-48 Průběh maximální a minimální deformace spodní části rozváděče v čase</i>	<i>86</i>
<i>Obr. 9-49 Rozmístění snímačů tlaku pro simulaci u rozváděče 1XF4 525-3EB.....</i>	<i>87</i>
<i>Obr. 9-50 Průběh tlaku na čidle tlaku – membrána.....</i>	<i>88</i>
<i>Obr. 9-51 Model rozváděče 1XF4 525-3EB s definovanými hodnotami statických tlaků</i>	<i>89</i>
<i>Obr. 9-52 Výsledná deformace rozváděče 1XF4 525-3EB při zadaných podmínkách zjištěná ze statické analýzy.....</i>	<i>90</i>



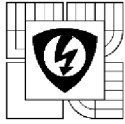
SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 2-1 Teploty vodičů.....</i>	<i>20</i>
<i>Tab. 2-2 Vlastnosti materiálů vodičů</i>	<i>20</i>
<i>Tab. 7-1 Výsledky výpočtu - rozváděč 1XD1 525-3AA - pevné části prodovodné dráhy.....</i>	<i>36</i>
<i>Tab. 7-2 Výsledné síly a momenty v izolátorech pro rozváděč 1XD1 525-3AA.....</i>	<i>37</i>
<i>Tab. 7-3 Výsledné síly a momenty v izolátorech pro rozváděč 1XD1 525-3AA bez izolátorů 1 a 2</i>	<i>38</i>
<i>Tab. 7-4 Výsledky výpočtu - rozváděč 1XD1 525-3AA - kabely z generátoru</i>	<i>39</i>
<i>Tab. 7-5 Výsledky výpočtu - rozváděč 1XD1 525-3AA - kabely od vývodů</i>	<i>40</i>
<i>Tab. 7-6 Výsledky výpočtu - rozváděč 1XF4 525-3EB - pevné části prodovodné dráhy</i>	<i>45</i>
<i>Tab. 7-7 Výsledné síly a momenty v izolátorech pro rozváděč 1XF4 525-3EB.....</i>	<i>46</i>
<i>Tab. 7-8 Výsledné síly a momenty v izolátorech pro rozváděč 1XF4 525-3EB bez izolátorů 1 a 2</i>	<i>47</i>
<i>Tab. 7-9 Výsledky výpočtu - rozváděč 1XF4 525-3EB - kabely z generátoru.....</i>	<i>48</i>
<i>Tab. 7-10 Výsledky výpočtu - rozváděč 1XF4 525-3EB - kabely od vývodů.....</i>	<i>49</i>

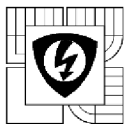


SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

B [T]	<i>Magnetická indukce</i>
c [Ws/cm ³ °C]	<i>Měrné teplo</i>
$\cos\varphi$ [-]	<i>Účinník</i>
E_{arc} [J]	<i>Energie obsažená v oblouku</i>
E_c [J]	<i>Celková energie</i>
E_{konv} [J]	<i>Energie vyzářená obloukem</i>
E_{plyn} [J]	<i>Energie tlaku plynu</i>
E_{tep} [J]	<i>Tepelná energie proudovodných drah</i>
E_{vyb} [J/kg]	<i>Energie výbušniny</i>
F [N]	<i>Síla</i>
f [Hz]	<i>Frekvence</i>
F_t [N]	<i>Tahová síla</i>
F_o [N]	<i>Ohybová síla</i>
i [A]	<i>Proud</i>
I_{arc} [A]	<i>Proud obloukem</i>
I_{do} [A]	<i>Subtranzitní proud</i>
I_e [A]	<i>Ekvivalentní oteplovací zkratový proud</i>
i_{Fe} [A]	<i>Proud v blízkosti feromagnetického rozhraní</i>
I_k [A]	<i>Ustálený proud nakrátko</i>
I_m [A]	<i>Nárazový zkratový proud; dynamický proud</i>
k [W/m K]	<i>Tepelná vodivost</i>
k_{arc} [-]	<i>Koeficient tvaru oblouku</i>
l_{arc} [mm]	<i>Délka oblouku</i>
M_t [Nm]	<i>Torzní moment</i>
M_o [Nm]	<i>Ohybový moment přes délku</i>
p [MPa]	<i>Tlak</i>
r [mm]	<i>Poloměr oblouku</i>
S_v [mm ²]	<i>Průřez vodiče</i>
t [s]	<i>Čas</i>
T_{arc} [K]	<i>Teplota oblouku</i>
U_{arc} [V]	<i>Napětí na oblouku</i>



$V_{arc} [m^3]$	<i>Objem oblouku</i>
$V_{ign} [V]$	<i>Zapalovací napětí</i>
$V_{qe} [V]$	<i>Zhášecí napětí</i>
$\mu_r [-]$	<i>Poměrná permeabilita</i>
$\alpha [rad/s]$	<i>Fázový posuv</i>
$\varepsilon_n [W/m^3 sr]$	<i>Koeficient záření</i>
$\rho [\Omega mm^2/m]$	<i>Měrný odpor</i>
$\omega [rad/s]$	<i>Úhlová frekvence</i>
$\vartheta_1 [^{\circ}C]$	<i>Největší teplota vodiče po zkratu</i>
$\vartheta_0 [^{\circ}C]$	<i>Teplota vodiče před zkratem</i>
$\tau [s]$	<i>Časová konstanta</i>
AVI	<i>(Audio Video Interleave) – formát multimediálního kontejneru pro sledování videa i zvuku</i>
FEM	<i>Finite Element Method – metoda konečných prvků</i>
IP	<i>Stupeň krytí</i>
MXWL	<i>Formát pro ukládání Ansoft Maxwell projektů</i>
PDF	<i>(Portable Document Format) – souborový formát pro ukládání dokumentů nezávisle na softwaru i hardwaru, na kterém byly pořízeny</i>
STEP	<i>(STandard for Exchange of Product model data) – výměnný souborový formát pro 3D CAD data používaný ve strojírenství</i>
WBPZ	<i>Formát pro ukládání archivů ANSYS Workbench projektů</i>



1 ÚVOD

Diplomová práce se zabývá analýzou dynamických účinků proudu v rozváděči (kabelové koncovec). Výpočty budou aplikovány na dva konkrétní typy rozváděčů firmy Siemens Electric Machines Drásov s.r.o. v provedení $11kV$ (1XD1 525-3AA) a $13,8kV$ (1XF4 525-3EB) do nevýbušného prostředí, kde vzduch slouží jako izolační médium. Další informace ke zkoumaným zařízením je možné nalézt v kapitole 6 této práce. V práci budou zkoumány 2 poruchové stavy, které případně mohou nastat na těchto rozvaděčích, bude se jednat o trojpólový (3 fázový) zkrat a úplný (3 fázový zemní) zkrat. Výsledkem bude zhodnocení zda zařízení těmto poruchovým stavům odolají, případně navrhnout možné úpravy, aby zařízení těmto poruchovým stavům „odolala“. Více k požadavkům zákazníka v kapitole 5.

Součástí práce bude vytvoření zjednodušených modelů, které budou sloužit pro analýzy. Jedny typy modelů budou sloužit pro výpočty dynamických účinků zkratových proudů v rozváděči s využitím simulačního programu Ansoft Maxwell ve verzi 16.0 a novější verzi 2015, tato analýza bude zpřesněným výpočtem problematiky v souladu s normou ČSN EN 60865-1 ed. 2: Zkratové proudy – Výpočet účinků – Část 1: Definice a výpočetní metody, kapitola 1, bod d), protože postupy uvedené v této normě nejsou pro tento případ použitelné.

Další modely budou vytvořeny pro analýzu působení tlaků plynů ve zkoumaných zařízeních při vzniklém oblouku, což bude provedeno v programu ANSYS Workbench 16.0. Výsledkem analýzy bude animace přibližného chování tlaku na kostru rozváděče.

Pro tvorbu modelů budou využity 3D modelovací programy SolidWorks 2012 a NX 4.0.

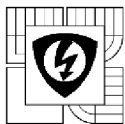
Dále blíže k jednotlivým kapitolám práce.

Kapitola 2 této práce se zabývá zkraty v elektrických zařízeních, popisuje jednotlivé druhy zkratů a zabývá se jejich průběhy. V kapitole jsou dále uvedeny jednotlivé účinky zkratů. Kapitola slouží jako teorie prou analýzy.

Třetí kapitola uvádí teorii k analýze na dynamické působení proudu v rozváděči. Pojednává se v ní obecně o účincích proudu při jeho průchodu, zabývá se vzniklými silami, potažmo mechanickým namáháním, které způsobuje. V kapitole je jednoduše sepsán vznik elektrodynamických sil a jejich působení v zakřivené proudovodné dráze. Dále kapitola obsahuje subkapitolu pojednávající o elektrodynamických silách proudovodné dráhy v blízkosti feromagnetického rozhraní a je zde krátce popsán rezonanční jev a jeho vliv na mechanické namáhání (průhyb). Kapitola dále uvádí příklad působení elektrodynamických sil v trojfázové soustavě, průběh proudu zde obsažený a informace poskytnuté z firmy Siemens Electric Machines Drásov s.r.o. budou sloužit pro simulaci analýzy účinků elektrodynamických sil na proudovodnou dráhu zkoumaných zařízení.

Kapitola číslo 4 se zabývá teorií obloukových zkratů. V kapitole je uvedena stručná definice oblouku, dále sepsán vznik oblouku a jeho dynamický průběh. Kapitola dále obsahuje potřebnou teorii pro výpočet obloukové energie, která bude využita pro dynamickou analýzu chování tlaků ve skřini rozváděče.

V páté kapitole jsou uvedeny požadavky zákazníka na zkoušku a zkoumané zařízení. Jsou zde i definovány požadované výstupy z analýz.



Kapitola 6 informuje o zkoumaných zařízeních, kapitola obsahuje základní parametry zkoumaných objektů, příklad jejich umístění na konkrétním stroji a dále výkres posuzovaného objektu.

Kapitoly 7 a 8 informují o statické a dynamické analýze na účinky zkratového proudu v zařízeních. V kapitole 7 je krátce sepsán postup jednotlivých analýz a dále zjištěné výsledky pro každé posuzované zařízení zvlášť. Kapitola 8 následně uvádí poznatky ze zkoušek a uvádí finalní zhodnocení funkčnosti zařízení.

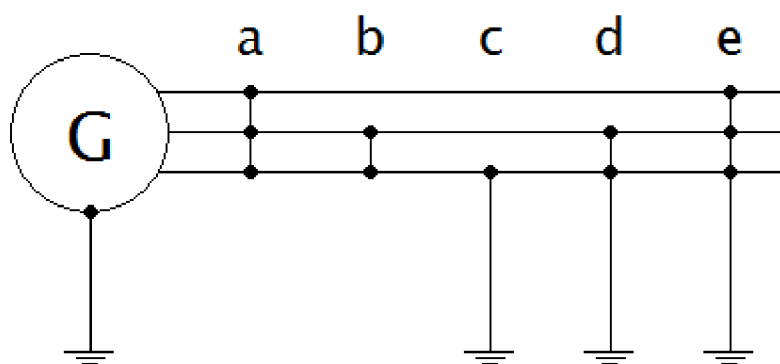
Kapitoly 9 a 10 informují o statické a dynamické analýze na působení tlaků na kostru zařízení vzniklého při obloukovém zkratu. Kapitola 9 dále obsahuje postup výpočtu energie vzniklé při obloukovém zkratu. V kapitole je dále krátce sepsán postup jednotlivých analýz a pro každé zařízení jsou uvedeny výsledky jednotlivých výpočtů. Kapitola 10 uvádí poznatky z analýz a součástí kapitoly je dále posouzení zda zařízení vyhoví požadavkům stanoveným zákazníkem. Požadavky od zákazníka uvedeny v kapitole 5.

2 ZKRATY V ELEKTRICKÝCH ZAŘÍZENÍCH

Jestliže dojde ke styku mezi dvěma vodiči různé polarity, nastává zkrat. Příčinou může být buď nahodilý dotyk mezi vodiči holými, nebo zničení izolace u vodičů izolovaných; někdy dojde také vlivem přepětí k přeskočení mezi dvěma vodiči a vzniklý oblouk přejde ve zkrat.

2.1 Druhy zkratů

V trojfázové síti může nastat několik druhů zkratů viz Obr. 2-1.

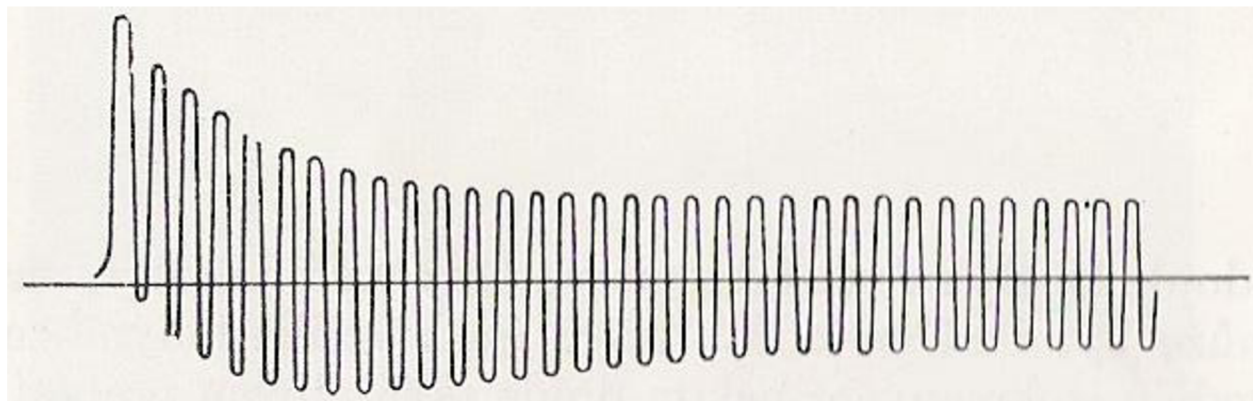


Obr. 2-1 Druhy zkratů

- a) trojpólový
- b) dvojpólový
- c) jednopólový zemní zkrat
- d) dvojpólový zemní zkrat
- e) úplný zkrat

Zkrat uvedený v bodě *a*) je souměrný, ostatní jsou nesouměrné. Většinou vzniká zkrat jako dvojpólový, který však vlivem vytvořeného oblouku přechází nejčastěji ve zkrat trojpólový.

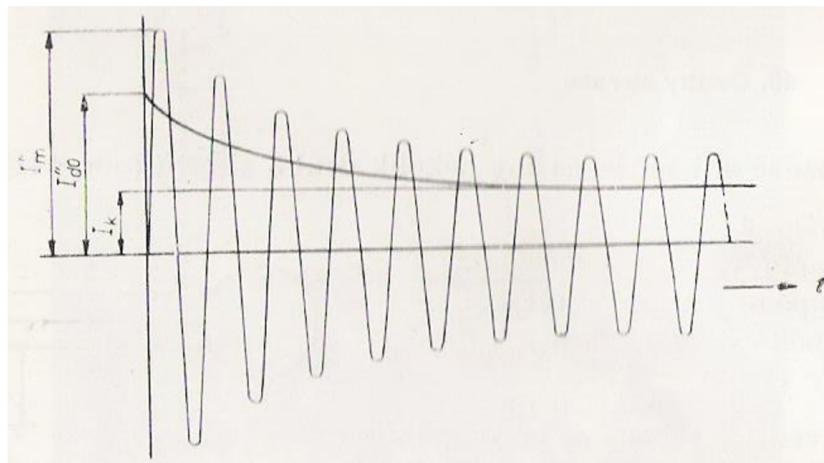
Pod názvem zkrat rozumíme celý průběh zkratového proudu proudu od okamžiku vzniku zkratu až do vypnutí (Obr. 2-2).



Obr. 2-2 Průběh zkratového proudu [2]

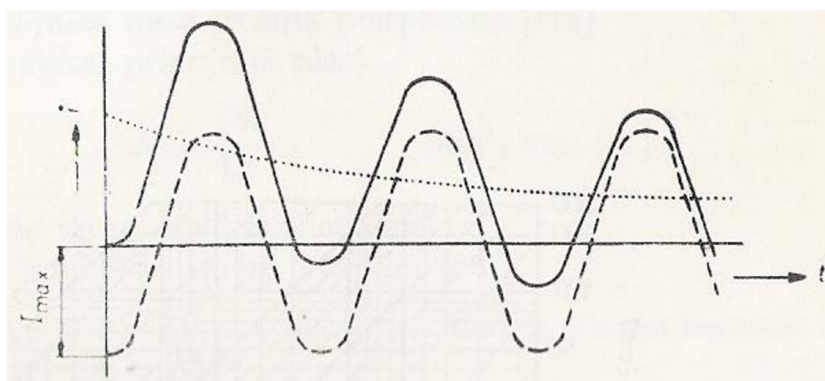
Průběh zkratového proudu může být souměrný k nulové ose (Obr. 2-3), bude obsahovat pouze tzv. střídavou složku, nebo nesouměrný (Obr. 2-4). Příčinou různého průběhu je, že fázové posunutí mezi proudem a napětím při zkratu je téměř 90° .

Jestliže zkrat vznikne v okamžiku, kdy střídavé napětí dosáhlo vrcholové hodnoty, je průběh zkratového proudu souměrný. Nesouměrný zkratový proud je možné považovat za proud složený ze složky střídavé, ve všech fázích stejné a souměrné k nulové ose, a ze složky stejnosměrné, v každé fázi jiné, která po několika kmitech zcela vymizí (do $0,1$ až $0,2s$ od okamžiku vzniku zkratu). Zkrat začíná nárazovým zkratovým proudem, tzv. proudem dynamickým I_m (Obr. 2-3), což je vrcholová hodnota první amplitudy zkratového proudu i se stejnosměrnou složkou, a končí ustáleným proudem nakrátko I_k . Efektivní hodnota souměrného zkratového proudu, tj. bez stejnosměrné složky, v okamžiku vzniku zkratu je tzv. proud subtranzitní I_{do} , tj. počáteční rázový zkratový proud.

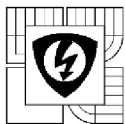


Obr. 2-3 Průběh souměrného zkratového proudu [2]

Jestliže naproti tomu vznikne zkrat v okamžiku, kdy napětí prochází nulou, musela by velikost proudu okamžitě dosáhnout největší vrcholové hodnoty I_m počátečního zkratového proudu, jak znázorňuje čárkovaná křivka na Obr. 2-4. Poněvadž satorové vinutí generátoru má indukční odpor, není taková náhlá změna velikosti satorového proudu možná. Vzniká vyrovnávací stejnosměrná složka, vyznačená tečkovaně, jejíž velikost s rostoucím časem klesá. Sečtením obou proudů dostáváme výsledný proud zkratový, znázorněný plnou čarou. Jeho průběh je nesouměrný k nulové ose.



Obr. 2-4 Průběh nesouměrného zkratového proudu [2]



Ekvivalentní proud oteplovací I_e je stálá ekvivalentní hodnota zkratového proudu, který za uvažovanou dobu trvání zkratu způsobí stejné oteplení jako skutečný zkratový proud.

2.2 Účinky zkratů

2.2.1 Mechanické

Mezi souběžnými vodiči, kterými protéká zkratový proud, vzniká elektrodynamický ráz, způsobovaný nárazovým zkratovým proudem dynamickým I_m . U souběžných vodičů mohou mezi vodiči vzniknout velké mechanické síly, které se snaží podle okamžitého směru proudu příslušné vodiče buď navzájem přitáhnout, nebo odpudit.

2.2.2 Tepelné účinky zkratových proudů

Zkratovým proudem se vodiče rychle zahřejí. Poněvadž celý průběh zkratu trvá jen krátký čas, spotřebuje se teplo při zkratu pouze na oteplení vodičů, je proto možné sestavit tuto rovnici:

$$I_e = S_v \sqrt{\frac{(\vartheta_1 - \vartheta_0)c}{t\rho}} \quad (2.1)$$

Po úpravě

$$I_e = \frac{S_v K}{\sqrt{t}}, \quad \text{kde} \quad K = \sqrt{\frac{(\vartheta_1 - \vartheta_0)c}{\rho}} \quad (2.2)$$

I_e – ekvivalentní oteplovací zkratový proud

S_v – průřez vodiče

ϑ_1 – největší teplota vodiče po zkratu

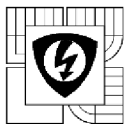
ϑ_0 – teplota vodiče před zkratem

c – měrné teplo

t – doba trvání zkratu

ρ – měrný odpor

Z této rovnice je buď možno vypočítat potřebný průřez vodiče S_v , jestliže je znám vypínací čas t a ekvivalentní oteplovací zkratový proud I_e , nebo je také možné určit přípustný oteplovací zkratový proud.



Pro výpočet se předpokládají teploty vodičů uvedené v Tab. 2-1.

Tab. 2-1 Teploty vodičů

Druh vodiče	Největší teplota [°C]	Teplota okolí [°C]	Oteplení [°C]	Provozní teplota [°C]	Střední teplota [°C]
Holé vodiče	300	20	30	50	175
Kabely 6 až 30kV	135	20	25	45	90

Měrný odpor vodičů se počítá ze střední teploty uvedené v posledním sloupci tabulky. Pro daný druh vodiče jsou oteplení ($\vartheta_1 - \vartheta_0$), měrné teplo c a měrný odpor ρ veličiny stálé, takže výraz pod odmocninou je pro určitý druh vodiče stálý a v rovnici byl označen jako konstanta K . Velikosti této konstanty pro různé vodiče jsou uvedeny v Tab. 2-2.

Tab. 2-2 Vlastnosti materiálů vodičů

Vlastnosti	Druh materiálu		
	Cu	Al	Fe
Střední měrné teplo [Ws/cm ³ °C]	3,5	2,417	3,77
Měrný odpor [Ω mm ² /m]			
90 °C	1/43,8	1/27,3	1/5,32
175 °C	1/34,9	1/21,6	1/4,12
Konstanta K pro			
Holý vodič	185	120,7	66
Kabel 6 až 30kV	133	86,9	-

2.2.3 Indukční účinek zkratových proudů

Zkratové proudy mohou vytvořit nebezpečné hodnoty naindukovaných napětí na elektrickém zařízení, které mohou mít pro něj škodlivý vliv.

2.2.4 Stabilita napájecí soustavy

Nastane-li zkrat v síti napájené z několika elektráren, přibrzdí se alternátory v elektrárně blíže místa zkratu. Nastane tzv. kývání synchronního stroje což má za následek předávání výkonu z elektrárny do elektrárny a problémy s regulací energetického systému. Toto může mít vliv na stabilitu celé napájecí soustavy. [2]

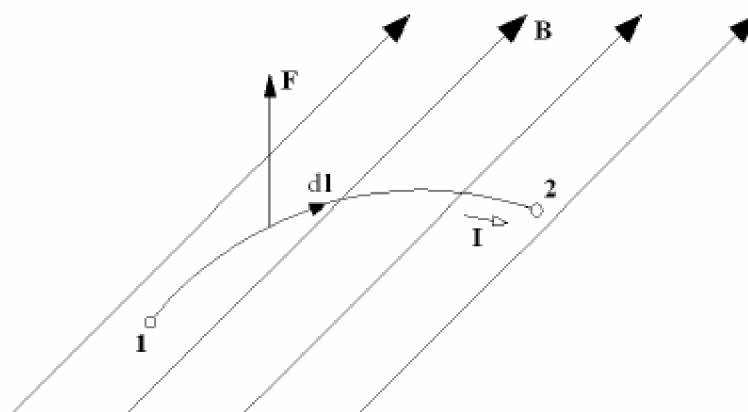
3 SILOVÉ ÚČINKY ELEKTRICKÉHO PROUDU

3.1 Vznik elektrodynamických sil

Prochází-li proudovou dráhou elektrického zařízení proud, vzniká síla, která způsobuje mechanické namáhání. Mechanické namáhání může dosáhnout zvláště velkých hodnot při zkratech, kdy procházejí zařízením poměrně velké proudy. K ještě většímu mechanickému namáhání proudové dráhy, nebo její části, může dojít při působení stejné síly tehdy, dostane-li se proudová dráha nebo její část do rezonance s elektrodynamickou silou. V některých případech je nutné síly vzniklé v elektrických přístrojích potlačit jako nežádoucí, někdy je zase právě naopak konstrukčními úpravami zvětšit. [3]

Příčinou vzniku síly v elektrických zařízeních je existence magnetických polí, která na sebe působí. Obecně platí, že na element $d\vec{l}$ proudového vlákna s proudem i , které se nachází v magnetickém poli indukce B , působí síla (Obr. 3-1)

$$d\vec{F} = i d\vec{l} \times \vec{B} \quad (3.1)$$



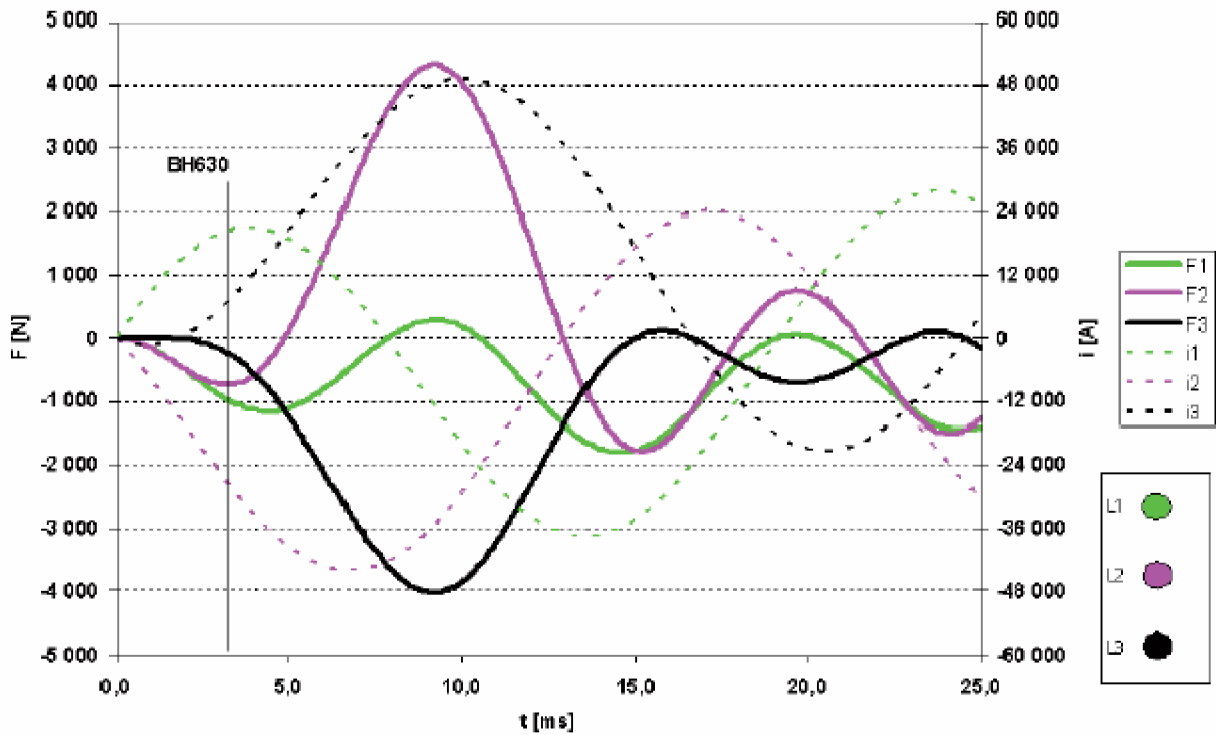
Obr. 3-1 Síla působící na proudové vlákno v magnetickém poli [4]

V elektrických přístrojích dochází při průchodu proudu ke vzniku magnetických polí, která jsou příčinou vzniku elektrodynamických sil v těchto případech:

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

3.2 Elektrodynamické síly v trojfázové soustavě

V trojfázové soustavě mohou být síly působící na jednotlivé dráhy různé. Pro jejich velikosti je potřebné znát průběh proudu. Příklad průběhu proudů a sil působících na jednotlivé fáze při nesymetrickém průběhu zkratového proudu viz Obr. 3-2. Jedná se o případ, kdy dochází k maximálnímu silovému namáhání.



Obr. 3-2 Průběh proudů a sil působících na jednotlivé fáze při nesymetrickém průběhu zkratového proudu [4]

Obecná rovnice pro časový průběh proudu procházejícího jednotlivými fázemi vychází z teorie zapínání obvodu napájeného střídavým napětím: [3]

$$i = I_{do} \cdot \sqrt{2} \cdot \left(\sin(\omega t + \alpha) - \sin(\alpha) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (3.2)$$

I_{do} – jmenovitý dynamický výdržný proud

ω – úhlová frekvence

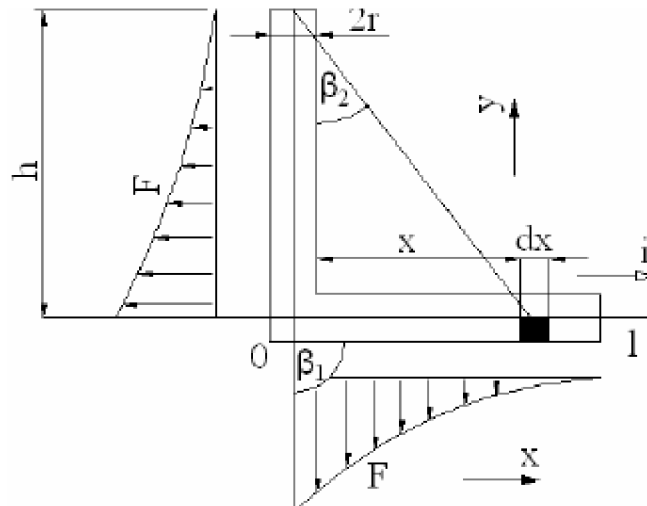
t – doba trvání zkratu

α – fázový posuv

τ – časová konstanta

3.3 Elektrodynamické síly v zakřivené proudovodné dráze

Zakřivená proudová dráha s proudem vytváří magnetické pole, které je příčinou elektrodynamických sil na zakřivenou proudovodnou dráhu.



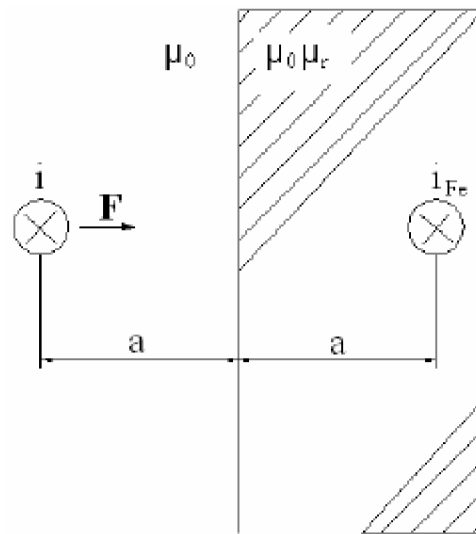
Obr. 3-3 Průběh síly působící na pravoúhlý proudový záhyb [4]

3.4 Elektrodynamické síly proudové dráhy v blízkosti feromag. rozhraní

Nachází-li se vodič s proudem v blízkosti feromagnetického rozhraní (např. ocelové desky, konstrukce apod.), působí na něj síla. Její velikost je možné stanovit pomocí zrcadlového obrazu vodiče (Obr. 3-4), jímž souhlasným smyslem prochází proud velikosti

$$i_{Fe} = \frac{\mu_r - 1}{\mu_r + 1} i \quad (3.3)$$

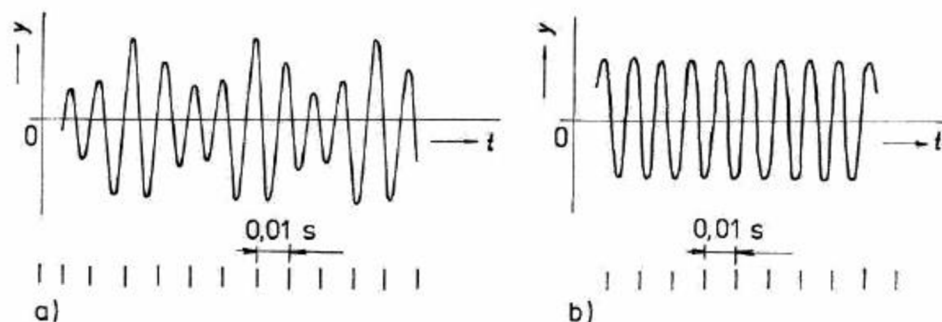
přičemž μ_r je poměrná permeabilita feromagnetika. Za tohoto předpokladu je možné celý případ posuzovat jako případ dvou rovnoběžných, nekonečně dlouhých vodičů.



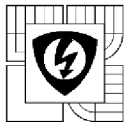
Obr. 3-4 Přitažlivá síla mezi proudovodičem a feromagnetickým rozhraním [4]

3.5 Rezonanční jevy

Proudová dráha či její části představují pružná tělesa, která se svými vlastnostmi blíží nosníkům. Působením elektrodynamických sil, které mají u střídavých proudů kmitavý charakter, se tyto části mohou rozkmitat, což vyvolá jejich mechanické namáhání. Mírou mechanického namáhání nosníku při působení kmitavé síly je jeho průhyb. Průhyb nosníku se skládá z průhybu vyvolaného působící silou, který se mění stejným kmitočtem jako síla, a z průhybu vyvolaného volnými kmity nosníku, jejichž kmitočet je závislý na vlastnostech nosníku. Druhá složka průhybu se časem utlumí vlivem různých odporů. Časový průběh průhybu s přechodnou složkou je patrný z Obr. 3-5 a), bez přechodné složky z Obr. 3-5 b).



Obr. 3-5 Časový průběh síly: a) s přechodnou složkou, b) bez přechodné složky [3]



4 OBECNÁ TEORIE OBLOKU

Definice pojmu elektrický oblouk:

Elektrický oblouk je na pohled oslnivě zářící elektrický výboj, soustředěný do tenkého sloupce. Jádrem oblouku tvoří ionizovaný plyn (plasma), které přenáší elektrický proud. Proudová hustota v jádru dosahuje, podle velikosti proudu, až několik tisíc ampér na centimetr čtvereční. [6]

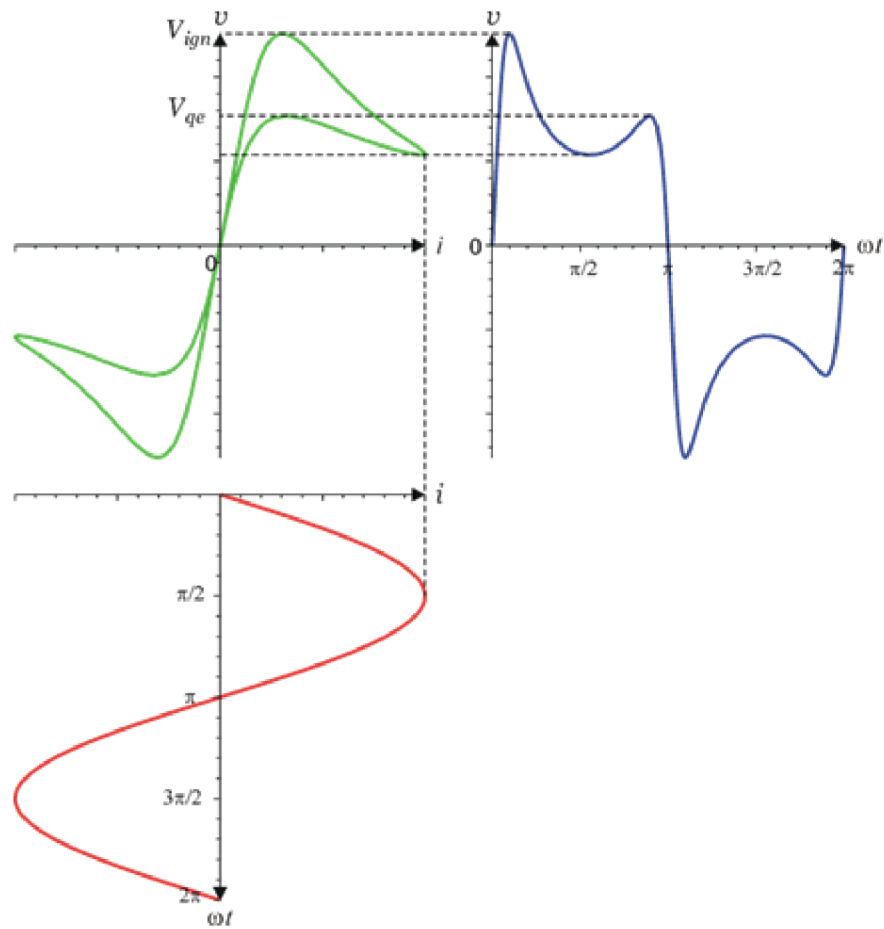
4.1 Hlavní znaky oblouku

- vysoká teplota katodové skvrny umožňující tepelnou emisi elektronů
- velká hustota proudu v katodové skvrně
- malé úbytky napětí na sloupci oblouku, větší úbytky napětí při elektrodách
- malé obloukové napětí mezi elektrodami (vzhledem k napětí zdroje)
- intenzivní vyzařování světla z výbojového plazmatu a z elektrod

4.2 Dynamický oblouk

Sloupec hořícího elektrického oblouku se vyznačuje tím, že jeho teplota je velmi vysoká, řádově několik tisíc až desítek tisíc kelvinů. Je tedy zřejmé, že obloukový sloupec má určitý tepelný obsah, který nelze skokově měnit, protože má tepelnou setrvačnost. Proto lze při dostatečně rychlých časových změnách proudu v obvodu, porovnatelných s tepelnou setrvačností oblouku, pozorovat jistou hysterizi napětí na oblouku (Obr. 4-1). [7]

Na začátku půlperrody napětí na místech vzniku oblouku stoupá souhlasně s napětím zdroje v obvodu až do napětí potřebného pro zapálení oblouku. Viz zapalovací špička napětí V_{ign} . Po zapálení oblouku napětí na místech vzniku oblouku poklesne na napětí hořícího oblouku. Po určité části perrody se napětí mění velmi málo. Po dobu hoření oblouku je odporem oblouku mírně deformován proud, nemá přesně sinusový průběh. Na konci půlperrody hoření oblouku se napětí nepatrně zvyšuje, maximální hodnota zvýšeného napětí je nazývána zhášecí špička napětí (V_{qe}). Její velikost do jisté míry vypovídá o intenzitě chlazení oblouku těsně před nulovou hodnotou vypínaného proudu. Eliminováním času z průběhů napětí a proudu se dostane dynamická charakteristika oblouku. Dynamická charakteristika oblouku zobrazená na Obr. 4-1 platí pouze pro danou časovou závislost rychlosti změny proudu. [8]

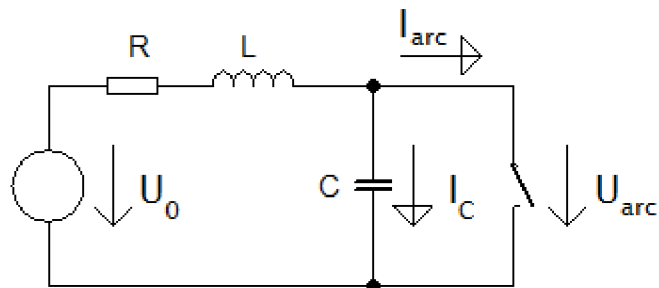


Obr. 4-1 Průběhy napětí a proudu obloukem v obvodu střídavého proudu a dynamická charakteristika oblouku [9]

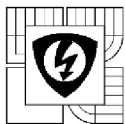
4.3 Výpočet energie oblouku

Obecná rovnice pro určení energie vzniklé při obloukovém zkratu: [9]

$$E_{arc} = \int_0^{t_{arc}} u_{arc} \cdot i_{arc} \cdot dt \quad (4.1)$$



Obr. 4-2 Náhradní schéma pro obloukový zkrat



4.4 Energie přeměněná na zářivou složku

Ze znalosti základních parametřů oblouku je možné určit zářivou složku energie vzniklé při obloukovém zkratu viz rovnice níže. [10]

$$\sigma E^2 = 4\pi\varepsilon_n + \left(\frac{1}{r}\right) \cdot l_{arc} \cdot \left[-r \cdot k \cdot \left(\frac{dT}{dr}\right)\right] dr \quad (4.2)$$

σE^2 – dodávaný výkon

ε_n – koeficient záření

r – poloměr oblouku

l_{arc} – délka oblouku

k – tepelná vodivost

Zjednodušením této rovnice dostáváme vztah:

$$E_{konv} = 4\pi\varepsilon_n \cdot V_{arc} \cdot t \quad (4.3)$$

E_{konv} – energie záření oblouku

ε_n – koeficient záření

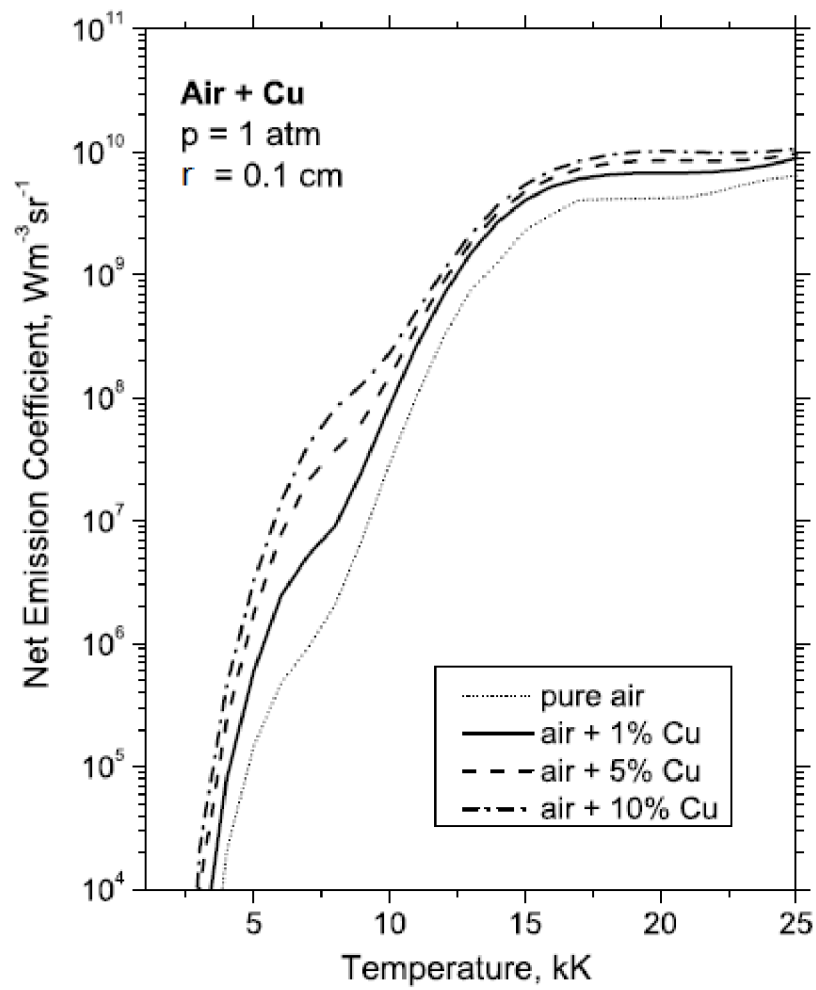
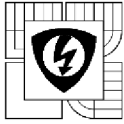
V_{arc} – objem oblouku

t – doba trvání zkratu

Pro určení objemu oblouku je nutné znát přibližný poloměr oblouku a jeho délku. Délka oblouku nemá přímkový tvar, proto je nutné délku oblouku vynásobit koeficientem tvaru oblouku k_{arc} jeho rozmezí hodnot je: 1 – 1,5. 1,5 značí deformaci oblouku do tvaru půlkruhu.

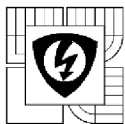
$$V_{arc} = \pi r^2 \cdot (k_{arc} \cdot l_{arc}) \quad (4.4)$$

Pro rovnici 4.3 je dále potřeba znát hodnotu ε_n , koeficientu záření oblouku. Pro tento koeficient je potřeba znát teplotu plazmatu (oblouku), jeho poloměr a základní informace o prostředí, ve kterém k oblouku dochází. Obr. 4-3 uvádí jednu z těchto možných charakteristik. Více k této problematice je možné nalézt v odkazu [11] této diplomové práce. Net Emission Coefficient v Obr. 4-3 značí koeficient záření oblouku.



Obr. 4-3 Koeficient záření v závislosti na teplotě plazmatu oblouku ve vzduchu při různých příměsích Cu ($r = 0.1 \text{ cm}$, $p = 1 \text{ atm}$)

[11]



5 POŽADAVKY ZÁKAZNÍKA NA ZKOUŠKU A ZKOUMANÉ ZAŘÍZENÍ

Ze strany firmy Siemens Electric Machines Drásov s.r.o. byly zadány pro zkoumání dva z možných poruchových stavů na rozváděči. Trojpólový (3 fázový) zkrat pro určení chování oblouku ve skříni rozváděče a úplný (3 fázový zemní) zkrat pro zkoumání dynamických účinků zkratových proudů na pevné části proudovodné dráhy. Více o těchto zkratech je možno nalézt v kapitole 3 (Zkraty v elektrických zařízeních).

5.1 Zadané parametry pro test od zadavatele

- jmenovitý dynamický výdržný proud 50 kA
- doba trvání zkratu 0,2 s

5.2 Další parametry použité pro výpočet

- nárazový zkratový proud v jedné fázi 134 kA

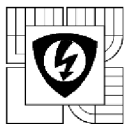
Nárazový zkratový proud v jedné fázi je určený pro výpočet elektrodynamických sil působících na pevnou část proudovodné dráhy viz kapitola 7 této zprávy.

5.3 Analýza výsledků

V analýze chování zkoumaných zařízení při 3 fázovém zemním zkratu má být zkoumáno především uchycení vodivých cest, zda zvolené řešení uchycení odolá účinkům působících dynamických sil. Případně navrhnout možné úpravy s podmínkou, aby zadané zařízení odolalo zkratu bez větších úhon.

V analýze chování zkoumaných zařízení při 3 fázovém zkratu má být zkoumáno chování tlaku na kostru testované rozváděčové skříňe a především zhodnotit funkci ochranné membrány. Podmínkou zkoušky je, aby kostra testovaného zařízení odolala poruchovému stavu bez relativně velkých úhon.

Analýzy mají být provedeny při stejných parametrech viz bod 5.1 pro oba typy rozváděčových skříní.



6 CHARAKTERISTIKA ZKOUMANÝCH ZAŘÍZENÍ

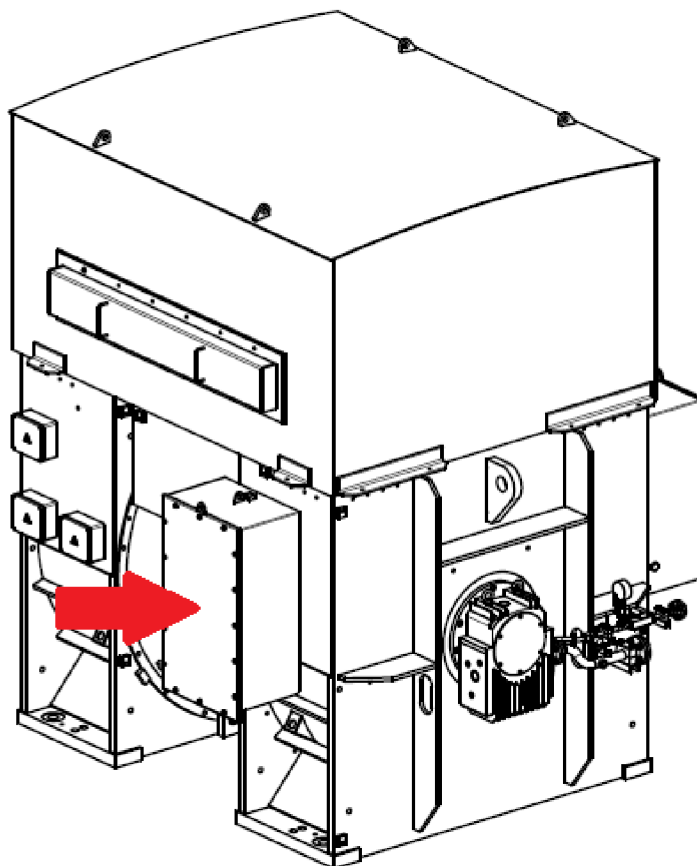
6.1 Rozváděč 1XD1 525-3AA

Provedení rozváděče je určeno pro stroje do nevybušného prostředí, jako izolační médium je zde použit vzduch. Jednotlivé boční kryty jsou z ocelového plechu. Přívodní deska s průchodkami je vyvedena ze sklotextitu, spodní plech s průchodkami je mosazný. Více o rozměrech a rozmístění jednotlivých prvků ve skříni v kapitole 6.1.3. Při poruchovém stavu na rozváděči (zkratu) dojde ke vzniku dynamických účinků zkratového proudu a v krajním případě k vývinu plynu. Odvod takto vzniklých plynů je řešen za pomoci mosazné membrány (materiál CuZn37) o tloušťce $0,32\text{mm}$.

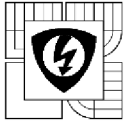
6.1.1 Parametry rozváděče

- | | | | |
|--------------------|----------|-------------------|--------|
| • jmenovité napětí | 11 kV | • stupeň krytí | IP 55 |
| • maximální proud | 1100 A | • izolační médium | vzduch |
| • frekvence | 50/60 Hz | • váha | 120 kg |

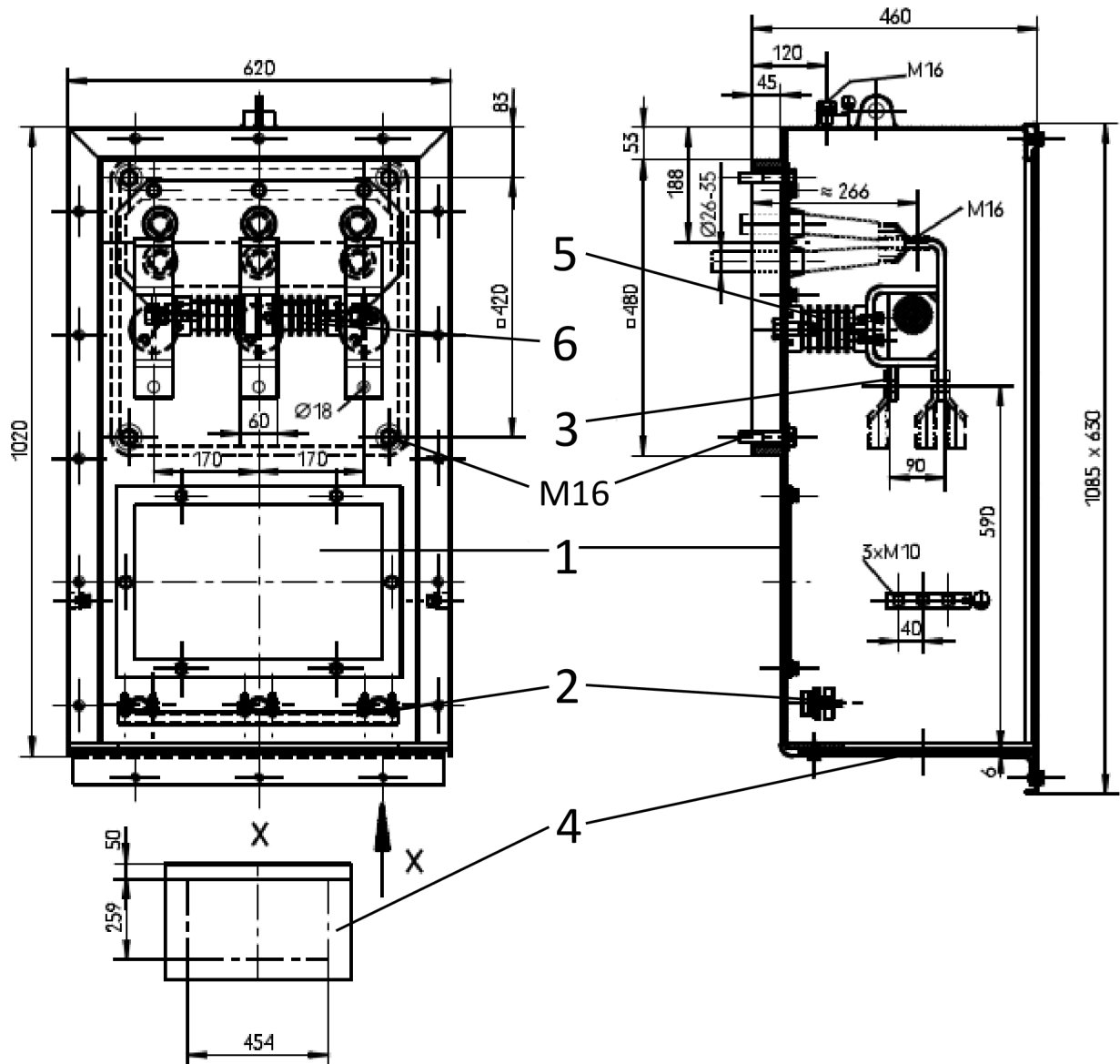
6.1.2 Příklad umístění rozváděče na stroji



Obr. 6-1 Příklad umístění rozváděče 1XD1-525-3AA na stroji [12]



6.1.3 Výkres rozváděče



Obr. 6-2 Výkres rozváděče IXD1 525-3AA [12]

Legenda:

- 1 – membrána
- 2 – držák kabelů
- 3 – připojení k vývodům, max. 3 kabelová oka na každou fázi
- 4 – mosazná deska: při montáži kabelů bude doplněna kabelovými průchodkami
- 5 – podpěrný izolátor
- 6 – rozpěrný izolátor

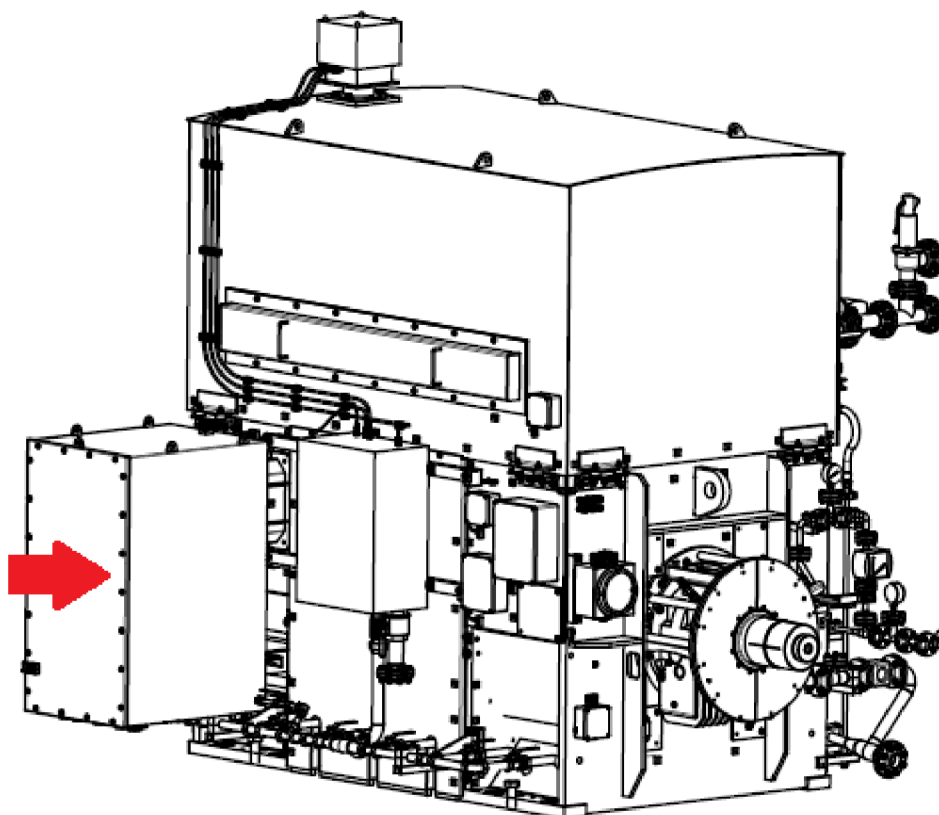
6.2 Rozváděč 1XF4 525-3EB

Provedení rozváděče 1XF4 525-3EB se v parametrech, rozměrech a osazení výrazně liší od předešlého. Rozváděč je opět určen pro stroje do nevýbušného prostředí, jako izolační médium je zde použito vzduchu. Kostra svorkovnice je z ocelového plechu. Přívodní a vývodní plechy s průchodkami jsou mosazné. Oproti rozvaděči 1XD1 525-3AA skříň obsahuje přepěťovou ochranu (svodiče přepětí pro každou fázi a kondenzátor). Rozměry skříně a rozmístění komponent ve skříně je uvedeno v kapitole 6.2.3. Ochrana na vznik obloukových plynů je řešena na stejném principu : mosazná membrána (materiál CuZn37) tloušťky 0,32mm se protrhne a vypustí nebezpečné plyny do bezpečného prostoru.

6.2.1 Parametry rozváděče

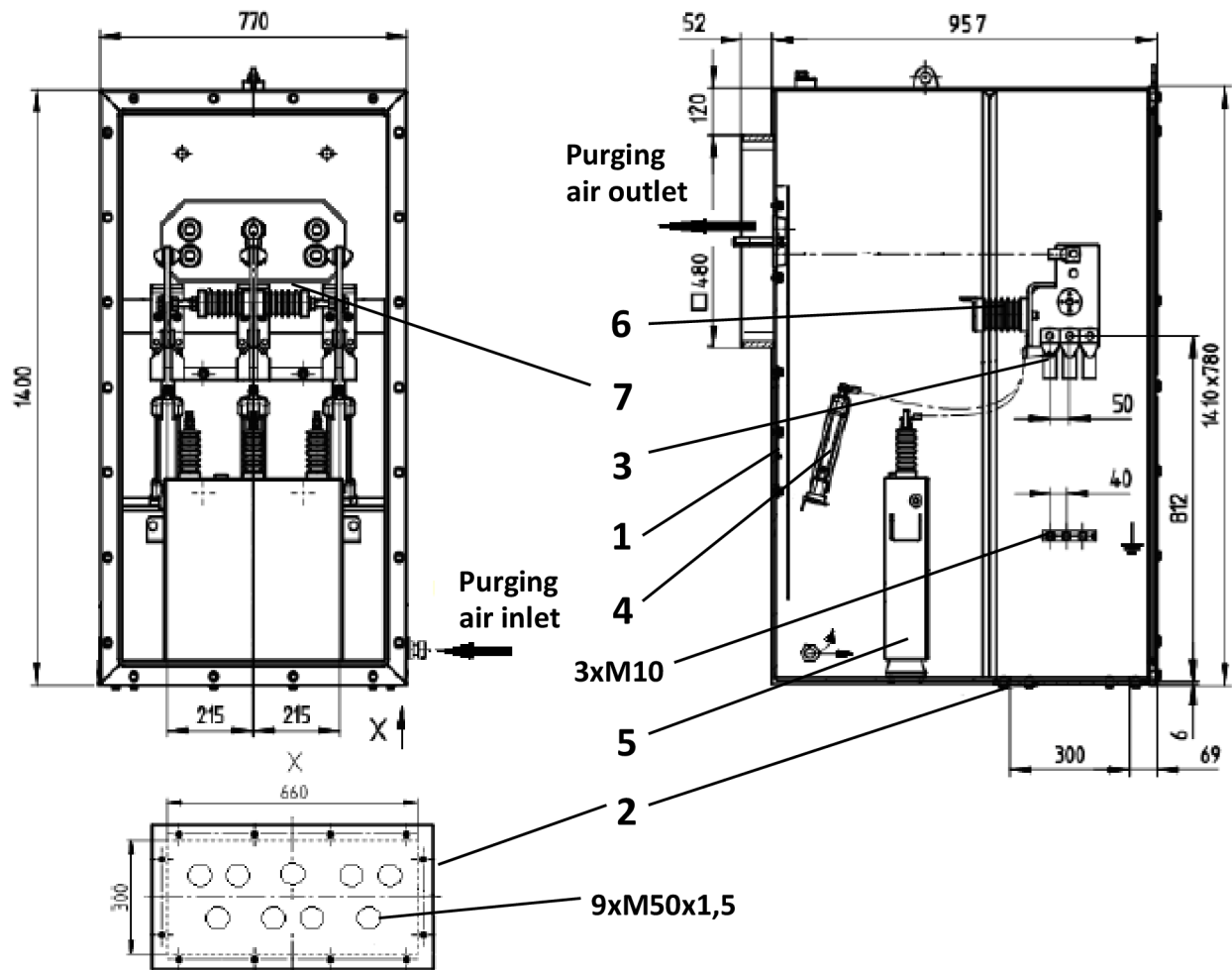
- | | | | |
|--------------------|----------|-------------------|--------|
| • jmenovité napětí | 13,8 kV | • stupeň krytí | IP 55 |
| • maximální proud | 1100 A | • izolační médium | vzduch |
| • frekvence | 50/60 Hz | • váha | 340 kg |

6.2.2 Příklad umístění rozváděče na stroji



Obr. 6-3 Příklad umístění rozváděče 1XF4 525-3EB na stroji [12]

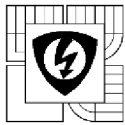
6.2.3 Výkres rozváděče



Obr. 6-4 Výkres rozváděče IXF4 525-3EB [12]

Legenda:

- 1 – membrána
- 2 – mosazná deska s průchodkami
- 3 – připojení k vývodům, max. 6 kabelových ok na každou fázi
- 4 – svodiče přepětí
- 5 – přepětěový kondenzátor
- 6 – podpěrný izolátor
- 7 – rozpěrný izolátor



7 STATICKÁ A DYNAMICKÁ KONTROLA NA ÚČINKY ZKRATOVÉHO PROUDU (NADPROUDU) V ZAŘÍZENÍCH

Teorie pro výpočty uvedena v kapitole 2 (Silové účinky elektrického proudu), parametry pro výpočet a požadavky zákazníka na zkoušku uvedeny v kapitole 5. Jmenovitý dynamický výdržný proud $50kA$ a nárazový zkratový proud v jedné fázi stanoven na hodnotu $134kA$.

Pro metodiku výpočtu byl zvolen výpočet za pomoci metody konečných prvků (Finite Element Method - FEM) v simulačním prostředí Ansoft Maxwell 16.0. Jedná se o zpřesněný výpočet v souladu s normou ČSN EN 60865-1 ed. 2: Zkratové proudy – Výpočet účinků – Část 1: Definice a výpočetní metody, kapitola 1, bod d), protože postupy uvedené v této normě nejsou pro tento případ použitelné.

Pro simulace byly vytvořeny geometrie zkoumaných zařízení, rozváděčů viz Obr. 7-1 a Obr. 7-12 s jednotlivými materiálovými charakteristikami. Geometrie byly vytvořeny za pomoci upravených modelů a výkresů zapůjčených firmou Siemens Electric Machines Drásov s.r.o.. Kvůli reálnějšímu rozložení proudu byly paralelní přívody a vývody jednotlivých fází u obou zkoumaných zařízení propojeny.

Nejprve byla provedena statická simulace a to za pomoci Magnetic Magnetostatic, výstupem bylo rozložení sil na jednotlivé části proudovodné dráhy. Statické rozložení sil bylo dále zhodnoceno a v prostředí pro mechanické výpočty ve firmě Siemens Electric Machines Drásov s.r.o. převedeno na odpovídající sílová zatížení jednotlivých pevných uchycení. Ve statické analýze za pomoci Ansoft Maxwell 2015 byly dále simulovány elektrodynamické síly v kabelech. Tyto síly mohou sloužit pro určení umístění tzv. držáku kabelů, které řeší vliv pohybu kabelů při případném zkratu. Návrh umístění držáku kabelů není součástí diplomové práce. Hodnoty vynesných sil odpovídají danému časovému okamžiku.

Dynamická kontrola na účinky zkratového proudu byla opět provedena v simulačním prostředí Ansoft Maxwell 2015 tentokrát pomocí Magnetic Transient. Simulace byla provedena do času $20ms$, dále má průběh zkratového proudu klesající charakter a tedy i dynamické síly působící na proudovodné části mají klesající charakter.

Zhodnocení jednotlivých analýz je uvedeno pro každé zkoumané zařízení zvlášť v kapitole 8 (Zhodnocení získaných poznatků ze statické a dynamické kontroly zařízení). Výsledky dynamické simulace, tedy grafické průběhy sil působících na pevné části proudovodné dráhy s ohledem na protékající proud slouží pouze pro informaci. Statická analýza je pro zhodnocení funkčnosti zařízení dostatečná.

Na příloženém DVD této práce lze nalézt archivy jednotlivých simulací ve formátu MXWL. Pro jejich otevření je nutné vlastnit nejlépe Ansoft Maxwell 2015 nebo jeho vyšší verzi.

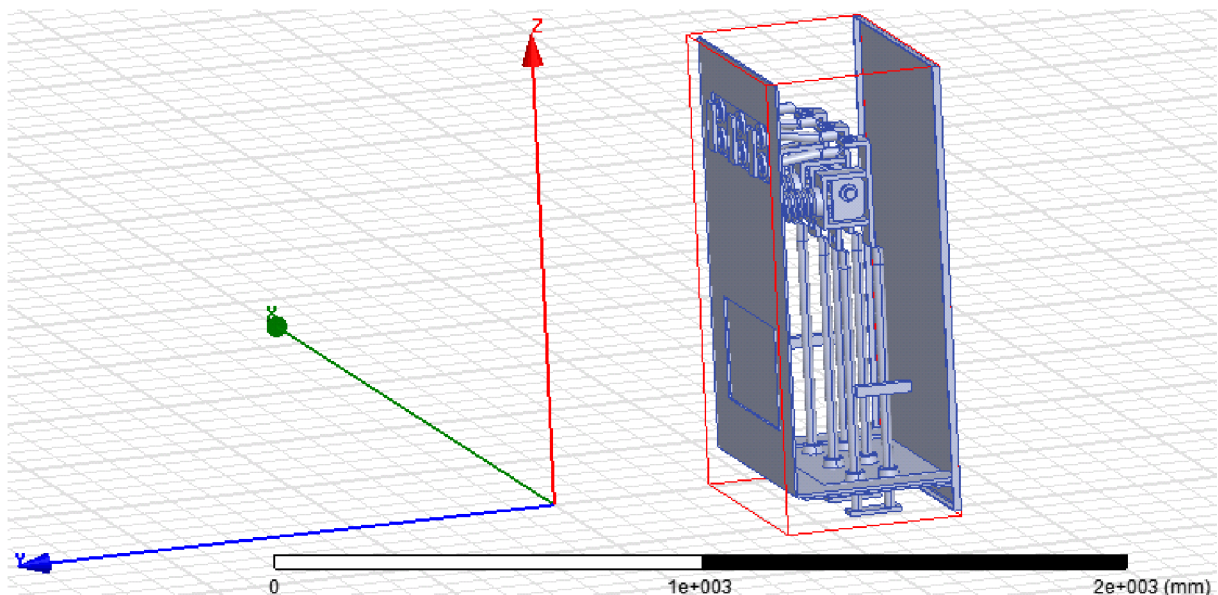
7.1 Rozváděč 1XD1 525-3AA

7.1.1 Statická analýza

Obr. 7-1 zobrazuje model rozváděče vytvořený pro simulace v prostředí Ansoft Maxwell, orientace souřadného systému odpovídá směřům složek výsledných sil. Fáze L1 se nachází nejbližší k pozorovateli. Proudy v jednotlivých fázích byly nastaveny na následující hodnoty:

- L1: +38 kA
- L2: +110 kA
- L3: -134 kA

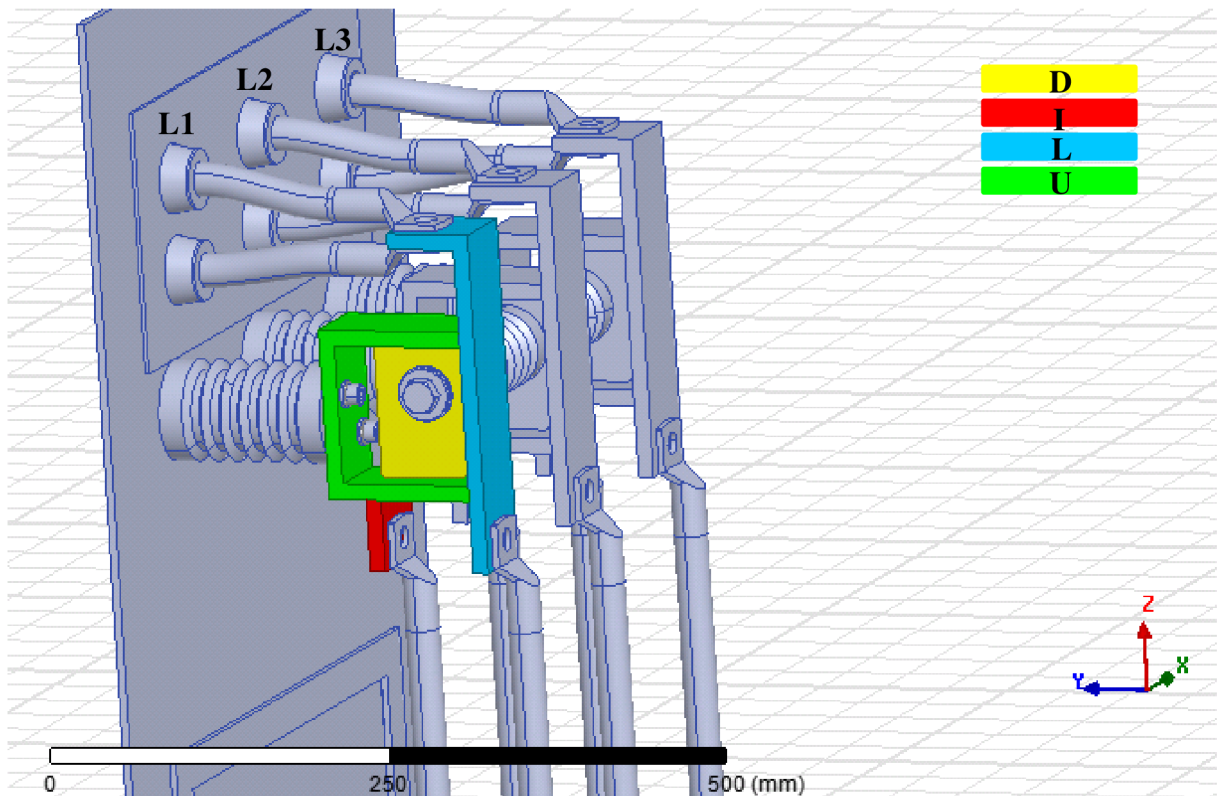
Hodnoty proudů byly stanoveny poměrem efektivních složek střídavých proudů za pomoci Obr. 3-3 viz podkapitola 3.2 této práce. Proudy ve fázi L1 a L2 byly z důvodu bezpečnosti zvětšeny cca o 10%, ve fázi L3 potom na plný nárazový proud, i když maximum síly by nastalo pro daný případ o něco dříve, před prvním vrcholem. Uvedené rozložení proudů odpovídá maximální síle na prostřední fázi ve směru osy x (která je v určitém čase největší) při vzniku maximální nesymetrie. Ocelové části byly modelovány jako feromagnetikum.



Obr. 7-1 Model skříně rozváděče 1XD1 525-3AA v prostředí Ansoft Maxwell

Statické vyhodnocení elektrodynamických sil bylo řešeno za pomoci Magnetic Magnetostatic funkce. Jednotlivé proudovodné části cesty byly rozděleny do tří sekcí: pevná část proudovodné dráhy viz Obr. 7-2, kabely z generátoru Obr. 7-5 a kabely od vývodů Obr. 7-6.

Pevné části proudovodné dráhy:



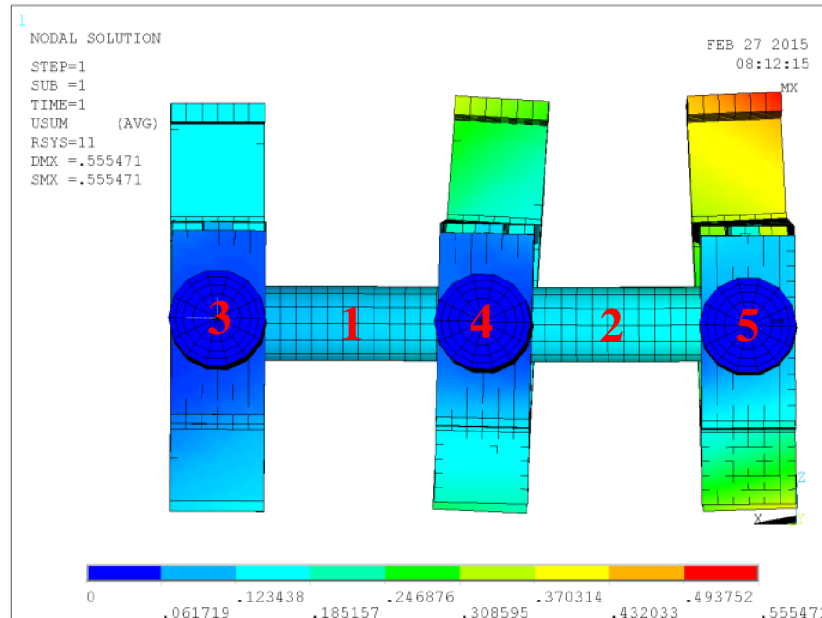
Obr. 7-2 Model skříně rozváděče 1XD1 525-3AA – pevné části proudovodné dráhy

Tab 7-1 uvádí síly na pevnou část proudovodné dráhy skříně každé fáze (značeno C) i jednotlivé části viz Obr. 7-2 (značení: L – tvar L, D – spojovací deska, U – tvar U a I – tvar I). Síly jsou rozloženy do jednotlivých směrů – x, y, z.

Tab. 7-1 Výsledky výpočtu - rozváděč 1XD1 525-3AA - pevné části proudovodné dráhy

Síly ve fázi L1	Síla [N]	Síly ve fázi L2	Síla [N]	Síly ve fázi L3	Síla [N]
L1_C_x	556	L2_C_x	-3541	L3_C_x	2869
L1_C_y	-442	L2_C_y	-2742	L3_C_y	-4015
L1_C_z	6	L2_C_z	203	L3_C_z	388
L1_D_x	51	L2_D_x	-347	L3_D_x	290
L1_D_y	-59	L2_D_y	-421	L3_D_y	-588
L1_D_z	-14	L2_D_z	-117	L3_D_z	-161
L1_I_x	55	L2_I_x	-359	L3_I_x	289
L1_I_y	-69	L2_I_y	-294	L3_I_y	-406
L1_I_z	25	L2_I_z	182	L3_I_z	264
L1_L_x	443	L2_L_x	-2707	L3_L_x	2127
L1_L_y	-160	L2_L_y	-1317	L3_L_y	-2010
L1_L_z	198	L2_L_z	1542	L3_L_z	2372
L1_U_x	7	L2_U_x	-128	L3_U_x	163
L1_U_y	-155	L2_U_y	-710	L3_U_y	-1011
L1_U_z	-204	L2_U_z	-1403	L3_U_z	-2087

Převedením hodnot z Tab. 7-1 do prostředí pro mechanické výpočty ve firmě Siemens Electric Machines Drásov s.r.o. bylo dosaženo vykreslení finální deformace pevných částí způsobených průchodem definovaného zkratového proudu rozváděčem, viz Obr. 7-3 níže. Číselné označení značí jednotlivé izolátory. Tab. 7-2 informuje o vypočítaných hodnotách sil a momentů působících na jednotlivé izolátory. Rozložení os x,y,z odpovídá Obr. 7-2.

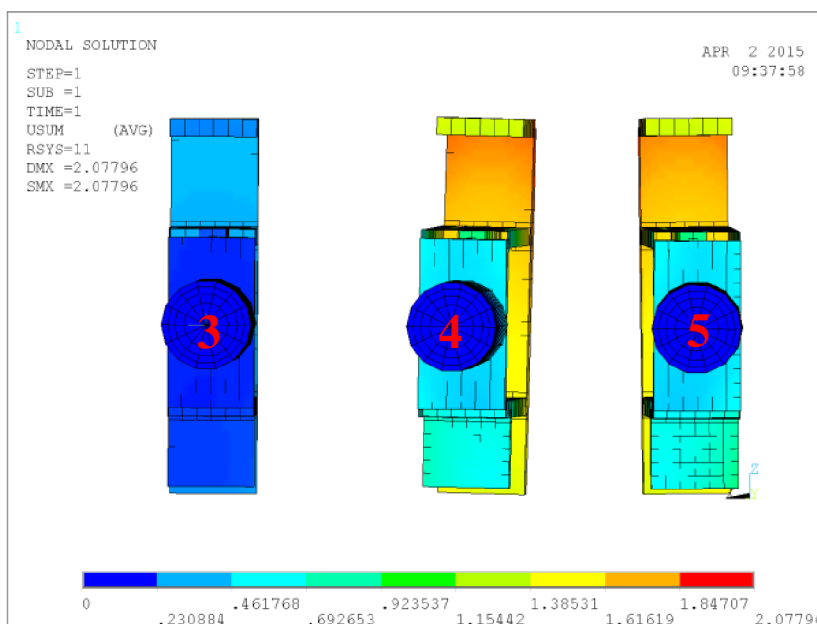


Obr. 7-3 Simulovaná deformace pevných částí skříně rozváděče 1XD1 525-3AA v milimetrech

Tab. 7-2 Výsledné síly a momenty v izolátorech pro rozváděč 1XD1 525-3AA

	Izolátor 1	Izolátor 2	Izolátor 3	Izolátor 4	Izolátor 5
Síla ve směru osy x [kN]	4,52	4,52	0,17	0,12	0,33
Síla ve směru osy y [kN]	0,41	0,41	0,66	2,13	4,12
Síla ve směru osy z [kN]	0,13	0,11	0,11	0,02	0,19
Moment ve směru osy x [Nm]	13,48	16,26	48,76	71,89	128,13
Moment ve směru osy y [Nm]	42,70	42,70	13,78	27,61	50,92
Moment ve směru osy z [Nm]	61,06	61,82	38,49	19,37	84,71

Jako další varianta pro mechanický výpočet bylo řešeno odstranění mezifázových izolátorů 1 a 2. Výsledná podoba této deformace pevné části způsobená průchodem definovaného zkratového proudu je zobrazena na Obr. 7-4. Tab. 7-3 informuje o vypočítaných hodnotách sil a momentů na jednotlivé izolátory zbylé izolátory. Osy x,y,z se řídí opět dle Obr. 7-2.



Obr. 7-4 Simulovaná deformace pevných částí skříně rozváděče 1XD1 525-3AA v milimetrech bez izolátorů 1 a 2

Tab. 7-3 Výsledné síly a momenty v izolátorech pro rozváděč 1XD1 525-3AA bez izolátorů 1 a 2

	Izolátor 1	Izolátor 2	Izolátor 3	Izolátor 4	Izolátor 5
Síla ve směru osy x [kN]	-	-	0,63	4,40	4,39
Síla ve směru osy y [kN]	-	-	0,48	2,54	3,89
Síla ve směru osy z [kN]	-	-	0,02	0,09	0,21
Moment ve směru osy x [Nm]	-	-	10,87	88,83	148,94
Moment ve směru osy y [Nm]	-	-	10,11	70,32	70,65
Moment ve směru osy z [Nm]	-	-	141,66	982,92	971,04

Uchycení pevných částí proudovodné dráhy ke skříně rozváděče:

Uchycení je řešeno za pomoci dvou typů izolátorů. Jako podpěrné izolátory slouží izolátory typu 3FA1111-4. Izolátory typu 3FA1110-7 jsou použity mezi měděné vývody jednotlivých fází. Pro zhodnocení deformace je nutné znát dovolené hodnoty sil a momentů v izolátorech. Tyto hodnoty jsou uvedeny níže:

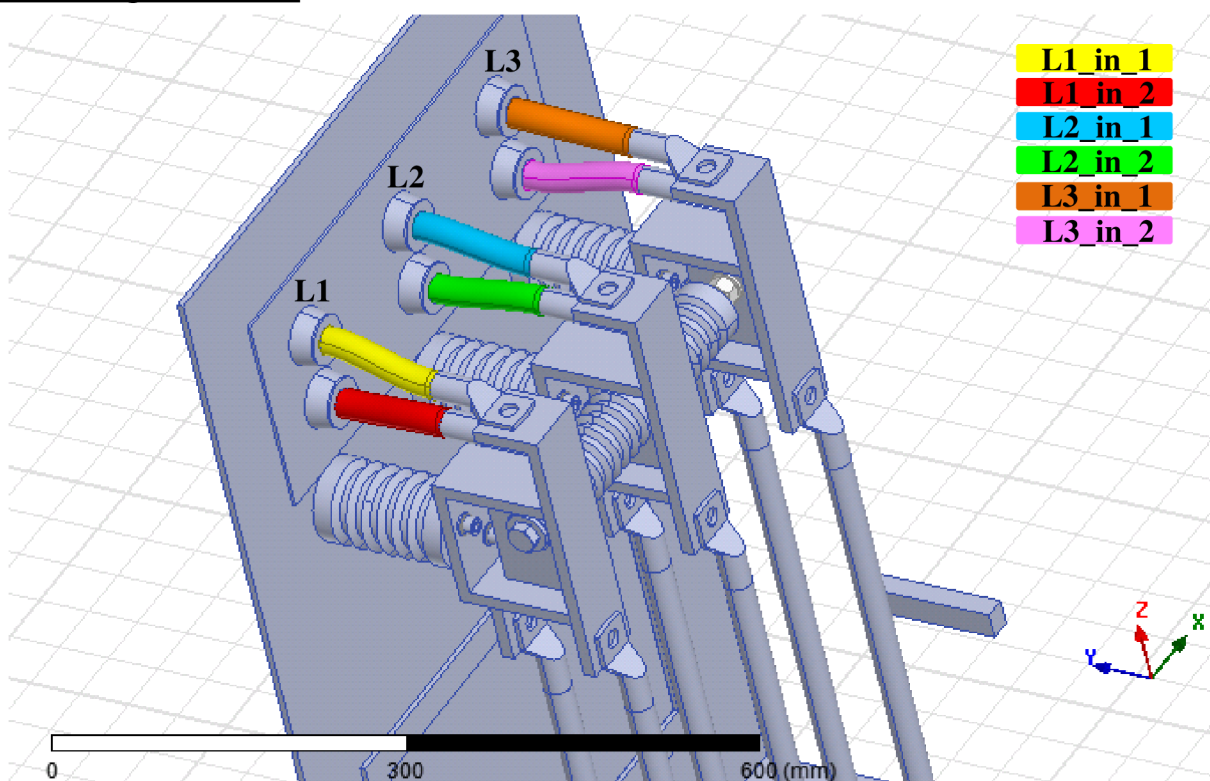
Izolátor typ 3FA1111-4:

- Dovolená tahová síla: 20 kN
- Dovolený torzní moment: 400 Nm
- Dovolená ohybová síla: 10 kN
- Dovolený ohybový moment přes délku (130 mm): 1300 Nm

Izolátor typ 3FA1110-7:

- Dovolená tahová síla: 10 kN
- Dovolенý torzní moment: 200 Nm
- Dovolенá ohybová síla: 5 kN
- Dovolенý ohybový moment přes délku (130 mm): 650 Nm

Kabely z generátoru:



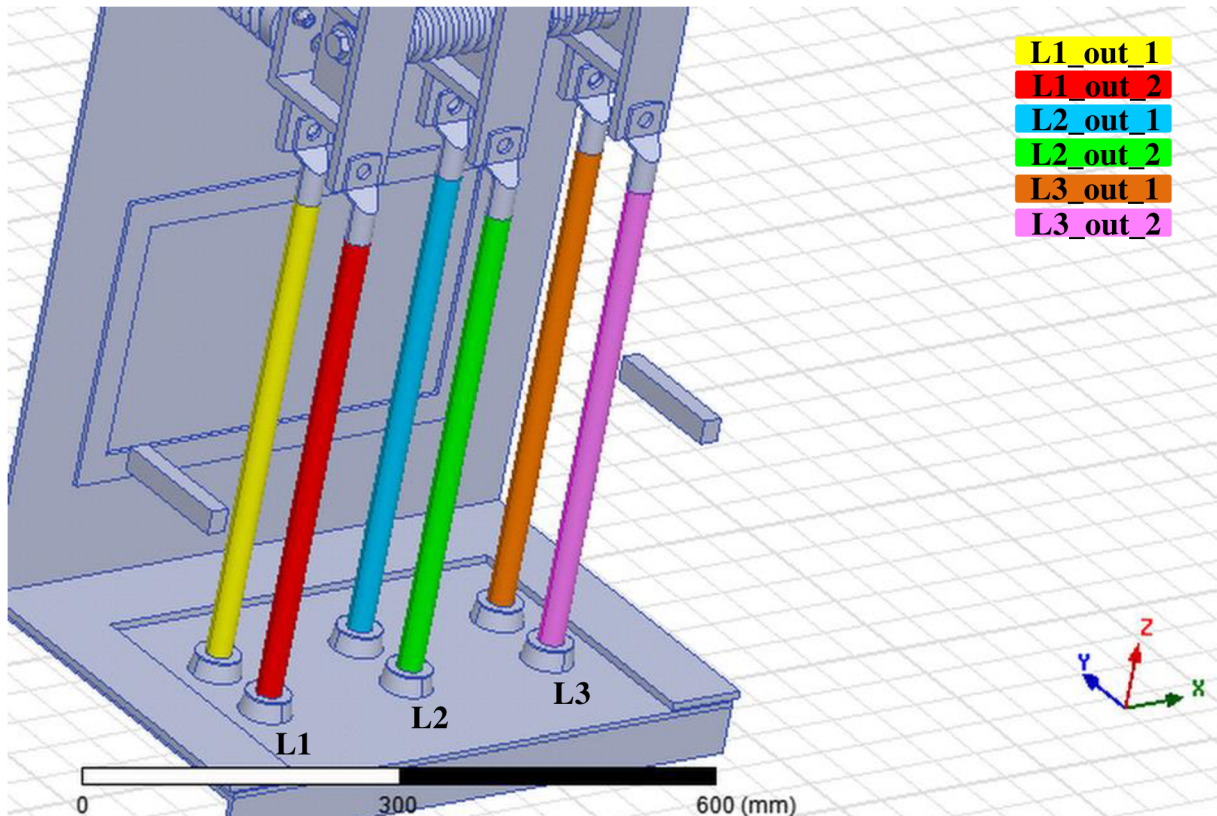
Obr. 7-5 Model skříně rozváděče IXD1 525-3AA – kabely z generátoru

Tab 7-4 ukazuje síly deformující jednotlivé přívodní kabely uvnitř rozváděče vedené z generátorem na pevnou část pro dané směry – x, y, z. Názvy vodičů se odkazují na Obr. 7-5 viz výše.

Tab. 7-4 Výsledky výpočtu - rozváděč IXD1 525-3AA - kabely z generátoru

Síly ve fázi L1	Síla [N]	Síly ve fázi L2	Síla [N]	Síly ve fázi L3	Síla [N]
L1_in_1_x	235	L2_in_1_x	-1653	L3_in_1_x	1353
L1_in_1_y	3	L2_in_1_y	106	L3_in_1_y	132
L1_in_1_z	-101	L2_in_1_z	-1002	L3_in_1_z	-1539
L1_in_2_x	237	L2_in_2_x	-1614	L3_in_2_x	1304
L1_in_2_y	19	L2_in_2_y	168	L3_in_2_y	285
L1_in_2_z	380	L2_in_2_z	1907	L3_in_2_z	2796

Kabely od vývodů:



Obr. 7-6 Model skříně rozváděče IXD1 525-3AA – kabely od vývodů

Tab 7-5 ukazuje síly deformující jednotlivé vývodní kabely rozváděče vedené z pevných částí na stranu zákazníka opět pro dané směry – x, y, z. Názvy vodičů se odkazují na Obr. 7-6 viz výše.

Tab. 7-5 Výsledky výpočtu - rozváděč IXD1 525-3AA - kabely od vývodů

Síly ve fázi L1	Síla [N]	Síly ve fázi L2	Síla [N]	Síly ve fázi L3	Síla [N]
L1_out_1_x	749	L2_out_1_x	-5105	L3_out_1_x	4109
L1_out_1_y	-675	L2_out_1_y	-3625	L3_out_1_y	-5142
L1_out_1_z	6	L2_out_1_z	54	L3_out_1_z	81
L1_out_2_x	736	L2_out_2_x	-5066	L3_out_2_x	4111
L1_out_2_y	733	L2_out_2_y	3471	L3_out_2_y	4940
L1_out_2_z	6	L2_out_2_z	54	L3_out_2_z	84

7.1.2 Dynamická analýza

Pro dynamické simulace byl použit model rozváděče vytvořený pro statickou analýzu. V tomto případě byla zkoumána pouze pevná část proudovodné dráhy. Pevné části byly rozděleny na celky dle jednotlivých fází, viz Obr. 7-7. Orientace souřadného systému odpovídá směrům složek výsledných sil. Dynamické proudy v jednotlivých fázích byly nastaveny za pomoci těchto rovnic:

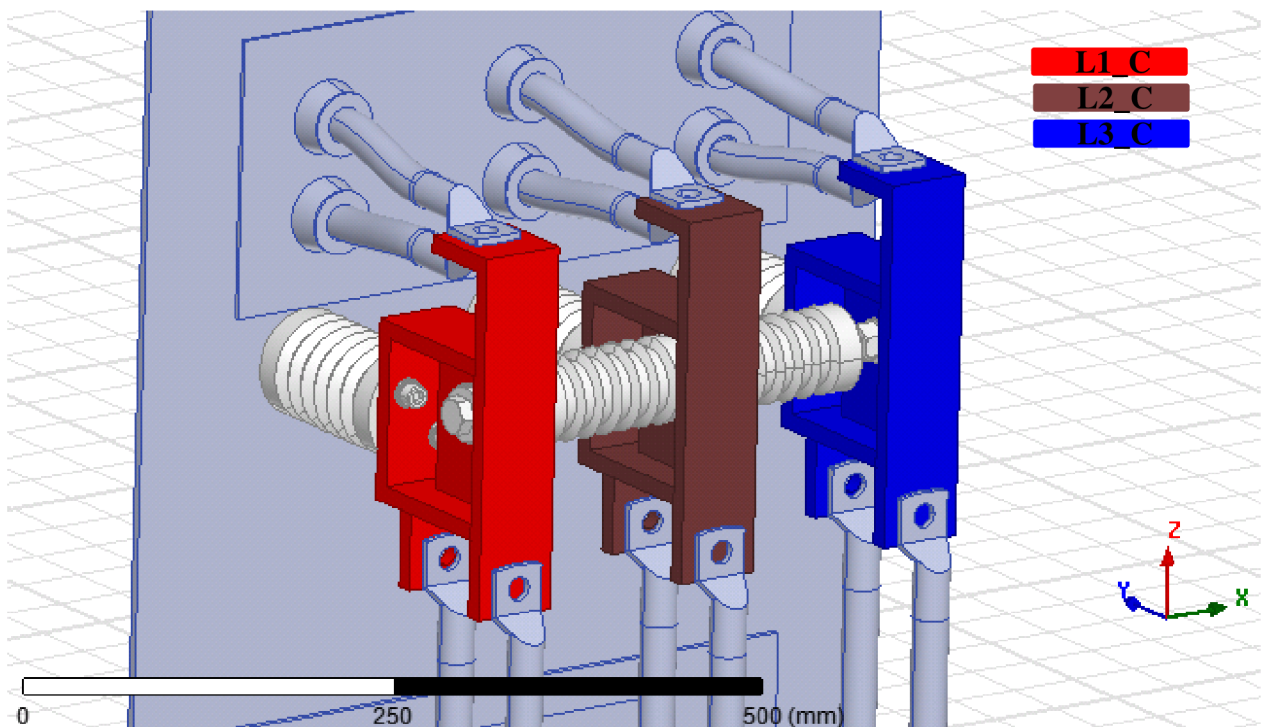
$$i_{L1} = 50000 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(314t) \quad (7.1)$$

$$i_{L2} = 50000 \cdot \sqrt{2} \cdot \left(\sin\left(314 \cdot t + \frac{4}{3}\pi\right) - \sin\left(\frac{4}{3}\pi\right) \cdot e^{-\frac{t}{0,021}} \right) \quad (7.2)$$

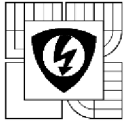
$$i_{L3} = 50000 \cdot \sqrt{2} \cdot \left(\sin\left(314 \cdot t + \frac{2}{3}\pi\right) - \sin\left(\frac{2}{3}\pi\right) \cdot e^{-\frac{t}{0,021}} \right) \quad (7.3)$$

Rovnice proudů byly stanoveny ze znalosti rovnice 3.2 z podkapitoly 3.2 (Elektrodynamické síly v trojfázové soustavě). Hodnoty definované pro analýzu a následně dosazené do rovnic viz níže. Účinník $\cos\varphi$ sloužil pro výpočet časové konstanty τ .

- Jmenovitý dynamický výdržný proud $I_{do} = 50kA$
- Frekvence $f = 50Hz$
- Účinník $\cos\varphi = 0,2$

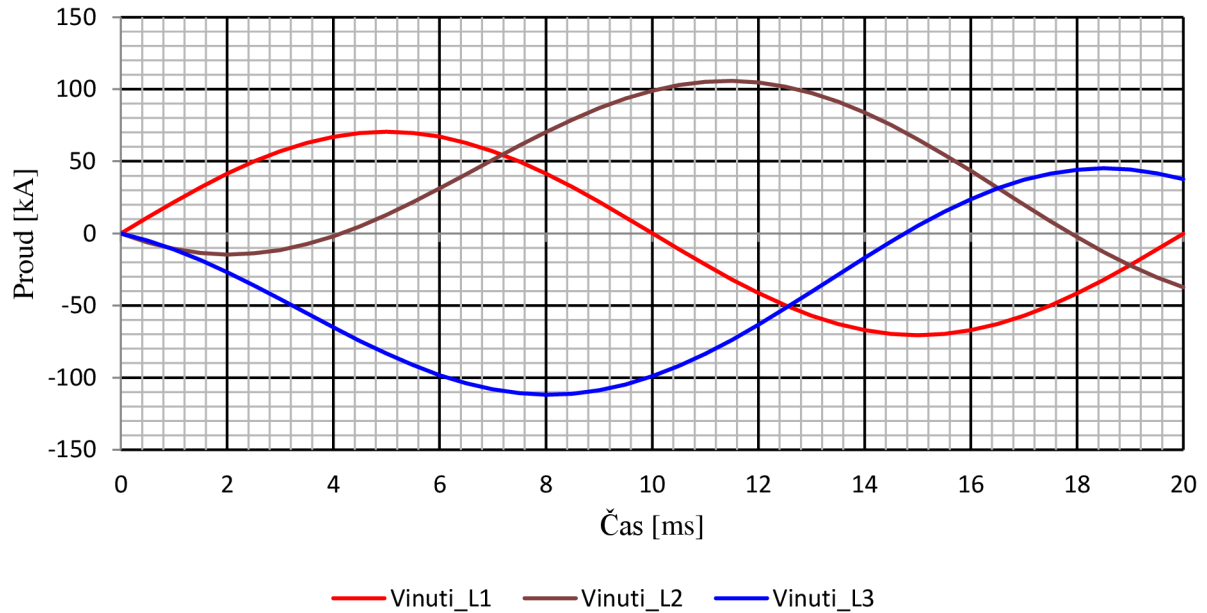


Obr. 7-7 Zkoumané pevné části u rozváděče 1XD1 525-3AA u dynamické analýzy



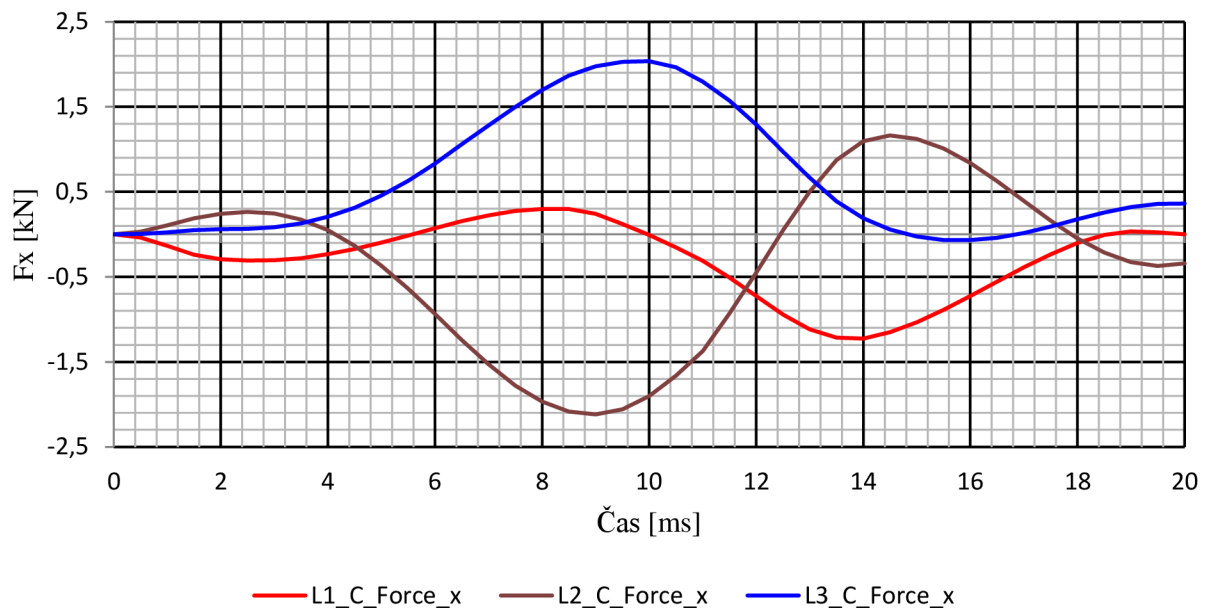
Dynamické vyhodnocení elektrodynamických sil bylo řešeno za pomoci Magnetic Transient funkce. Průběhy dynamického proudu a k němu odvislé průběhy síly na pevné části proudovodné dráhy dle fází jsou umístěny níže. Obr. 7-8 ukazuje simulovaný průběh proudu jednotlivými fázemi v čase. Obr. 7-9, 10 a 11 ukazují průběhy sil působících v pevných částech proudovodné dráhy závislé na protékajícím proudu v jednotlivých osách x,y,z. Průběhy jsou vyneseny do času 20ms, po tomto čase mají síly klesající charakter.

Průběh proudů jednotlivými pevnými částmi (fázemi)

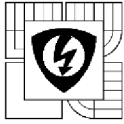


Obr. 7-8 Rozváděč 1XD1 525-3AA - průběh proudu jednotlivými pevnými částmi (fázemi)

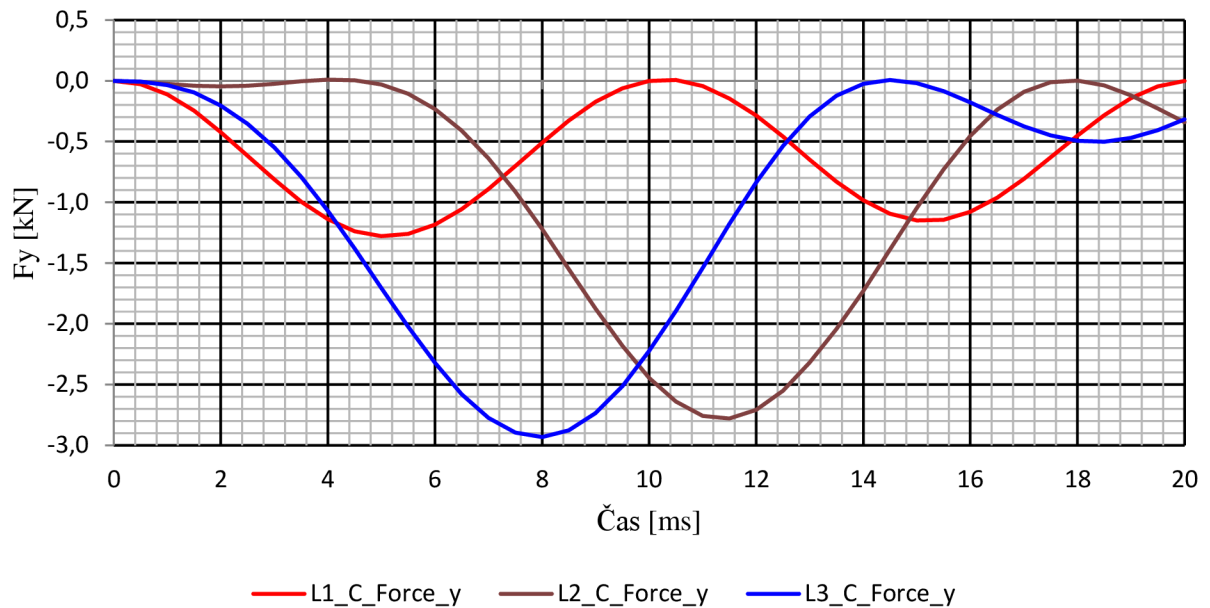
Průběh sil v pevných částech v ose x



Obr. 7-9 Rozváděč 1XD1 525-3AA - průběh sil v pevných částech v ose x

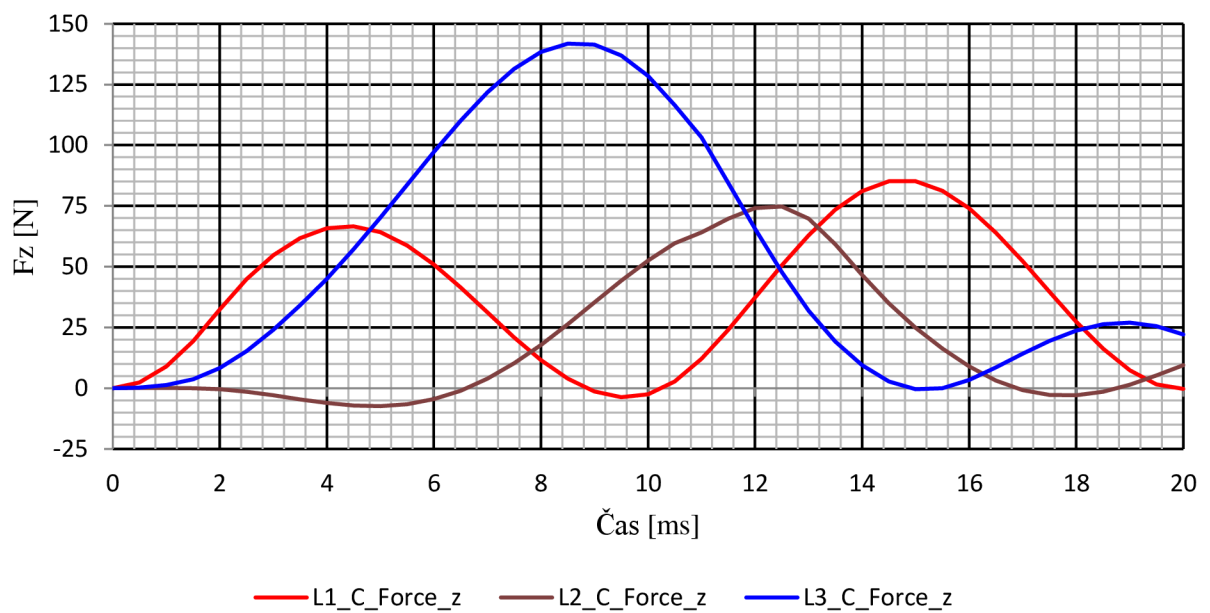


Průběh sil v pevných částech v ose y



Obr. 7-10 Rozváděč 1XD1 525-3AA - průběh sil v pevných částech v ose y

Průběh sil v pevných částech v ose z



Obr. 7-11 Rozváděč 1XD1 525-3AA - průběh sil v pevných částech v ose z

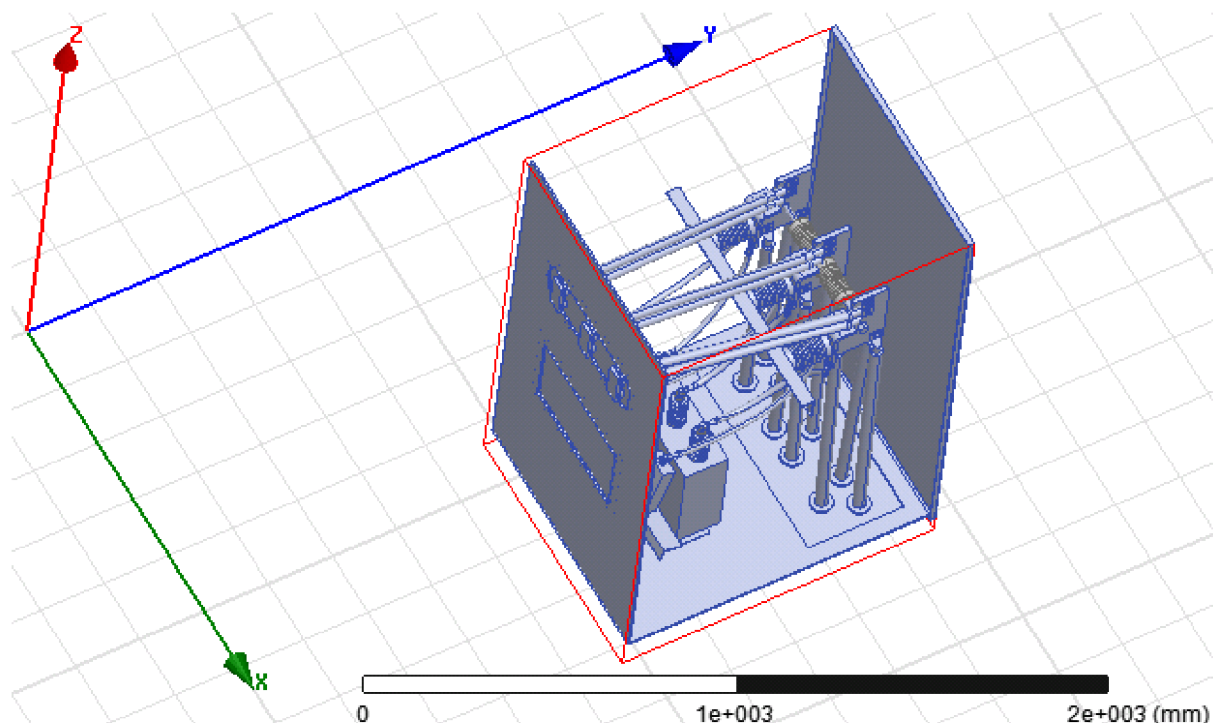
7.2 Rozváděč 1XF4 525-3EB

7.2.1 Statická analýza

Obr. 7-12 zobrazuje model rozváděče vytvořený pro simulace v prostředí Ansoft Maxwell, orientace souřadného systému odpovídá směřům složek výsledných sil. Tato verze rozváděče oproti předešlé obsahuje přepěťovou ochranu (svodiče přepětí pro každou fázi a kondenzátor). Fáze L1 se z pohledu pozorovatele nachází na dolní straně Obr. 7-12. Proudů v jednotlivých fázích byly nastaveny na následující hodnoty:

- L1: +38 kA
- L2: +110 kA
- L3: -134 kA

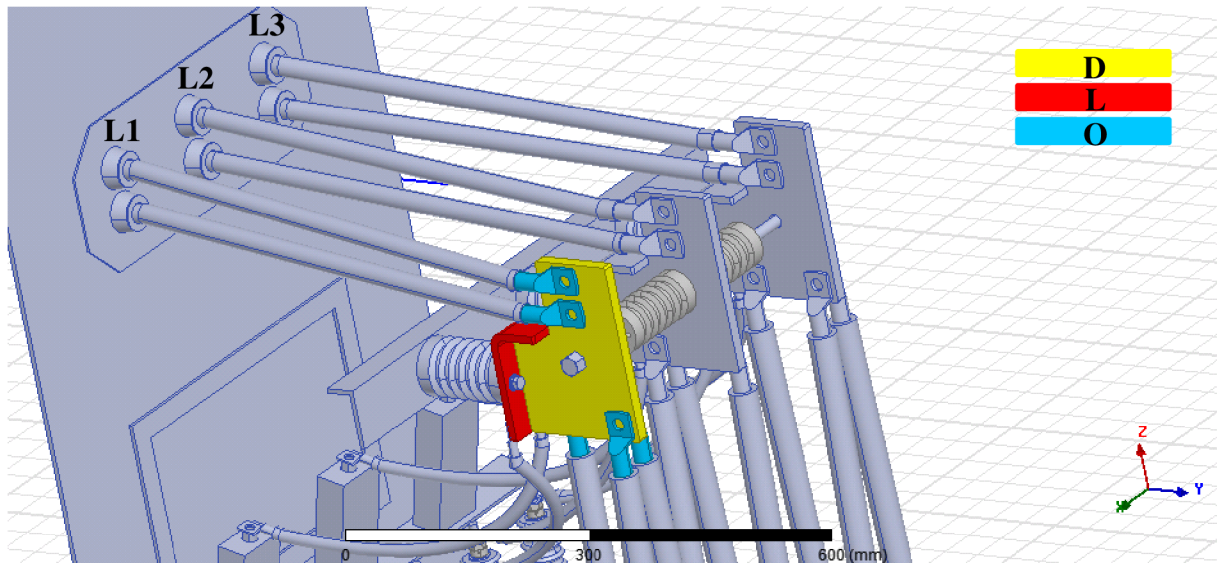
Hodnoty proudů byly stanoveny poměrem efektivních složek střídavých proudů za pomoci Obr. 3-3 viz podkapitola 3.2 této práce. Proudů ve fázi L1 a L2 byly z důvodu bezpečnosti zvětšeny cca o 10%, ve fázi L3 potom na plný nárazový proud, i když maximum síly by nastalo pro daný případ o něco dříve, před prvním vrcholem. Uvedené rozložení proudů odpovídá maximální síle na prostřední fázi ve směru osy x (která je v určitém čase největší) při vzniku maximální nesymetrie. Ocelové části byly modelovány jako feromagnetikum.



Obr. 7-12 Model skříně rozváděče 1XF4 525-3EB v prostředí Ansoft Maxwell

Statické vyhodnocení elektrodynamických sil bylo řešeno za pomoci Magnetic Magnetostatic funkce. Jednotlivé proudovodné části cesty byly rozděleny do tří sekcí: pevná část proudovodné dráhy viz Obr. 7-13, kabely z generátoru Obr. 7-16 a kabely od vývodů Obr. 7-17.

Pevné části proudovodné dráhy:



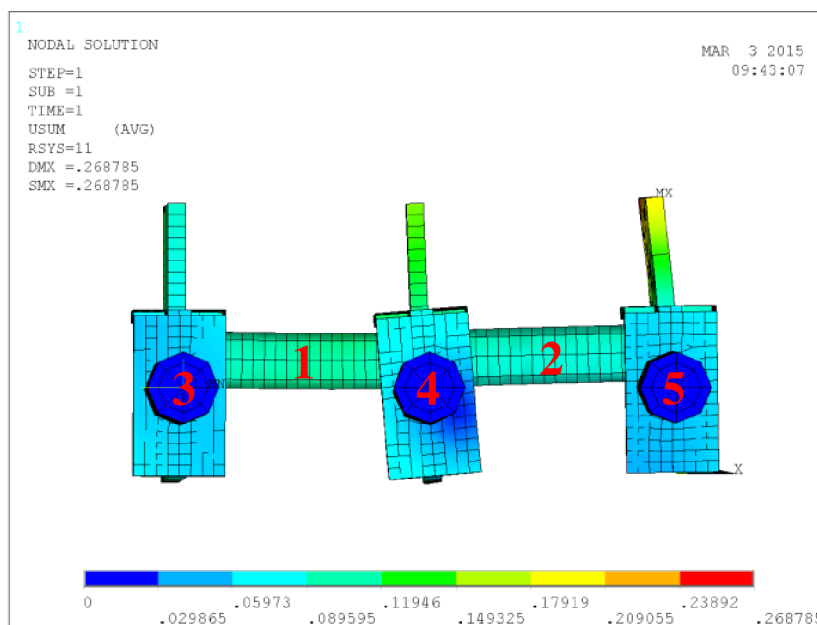
Obr. 7-13 Model skříně rozváděče 1XF4 525-3EB – pevné části proudovodné dráhy

Tab 7-6 uvádí síly na pevnou část proudovodné dráhy skříně každé fáze (značeno C) i jednotlivé části viz Obr. 7-13 (značení: L – tvar L, D – deska). Navíc je ještě spočítána síla na pevnou část včetně kabelových ok (značení C+U = součet síly C a síly na kabelová oka). Síly jsou rozloženy do jednotlivých směrů – x, y, z.

Tab. 7-6 Výsledky výpočtu - rozváděč 1XF4 525-3EB - pevné části proudovodné dráhy

Síly ve fázi L1	Síla [N]	Síly ve fázi L2	Síla [N]	Síly ve fázi L3	Síla [N]
L1_C_x	-402	L2_C_x	623	L3_C_x	-3081
L1_C_y	212	L2_C_y	1923	L3_C_y	2389
L1_C_z	-81	L2_C_z	-1027	L3_C_z	-1023
L1_D_x	-382	L2_D_x	716	L3_D_x	-2826
L1_D_y	149	L2_D_y	1452	L3_D_y	1847
L1_D_z	-23	L2_D_z	-521	L3_D_z	-375
L1_L_x	-20	L2_L_x	-93	L3_L_x	-255
L1_L_y	63	L2_L_y	471	L3_L_y	542
L1_L_z	-58	L2_L_z	-505	L3_L_z	-648
L1_(C+O)_x	-495	L2_(C+O)_x	2458	L3_(C+O)_x	-3081
L1_(C+O)_y	260	L2_(C+O)_y	2286	L3_(C+O)_y	3103
L1_(C+O)_z	68	L2_(C+O)_z	-150	L3_(C+O)_z	446

Převedením hodnot z Tab. 7-6 do prostředí pro mechanické výpočty ve firmě Siemens Electric Machines Drásov s.r.o. bylo dosaženo vykreslení finální deformace pevných částí způsobených průchodem definovaného zkratového proudu rozváděčem, viz Obr. 7-14 níže. Číselné označení značí jednotlivé izolátory. Tab. 7-7 informuje o vypočítaných hodnotách sil a momentů působících na jednotlivé izolátory. Rozložení os x,y,z odpovídá Obr. 7-13.

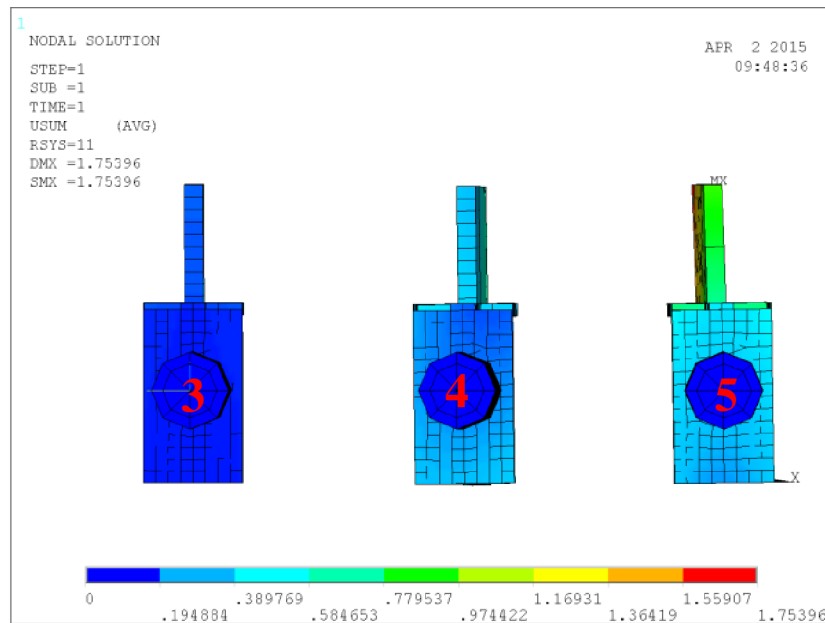


Obr. 7-14 Simulovaná deformace pevných částí skříně rozváděče 1XF4 525-3EB v milimetrech

Tab. 7-7 Výsledné síly a momenty v izolátorech pro rozváděč 1XF4 525-3EB

	Izolátor 1	Izolátor 2	Izolátor 3	Izolátor 4	Izolátor 5
Síla ve směru osy x [kN]	2,19	2,32	0,58	0,06	0,78
Síla ve směru osy y [kN]	0,23	0,34	0,03	2,05	3,20
Síla ve směru osy z [kN]	0,30	0,17	0,26	0,17	0,36
Moment ve směru osy x [Nm]	9,52	9,52	57,44	53,91	28,95
Moment ve směru osy y [Nm]	71,91	71,91	3,33	82,43	138,08
Moment ve směru osy z [Nm]	43,58	46,13	91,62	39,21	111,57

Jako další varianta pro mechanický výpočet bylo řešeno odstranění mezifázových izolátorů 1 a 2. Výsledná podoba této deformace pevné části způsobená průchodem definovaného zkratového proudu je zobrazena na Obr. 7-15. Tab. 7-8 informuje o vypočítaných hodnotách sil a momentů na jednotlivé izolátory zbylé izolátory. Osy x,y,z se řídí opět dle Obr. 7-13.



Obr. 7-15 Simulovaná deformace pevných částí skříně rozváděče 1XF4 525-3EB v milimetrech bez izolátorů 1 a 2

Tab. 7-8 Výsledné síly a momenty v izolátorech pro rozváděč 1XF4 525-3EB bez izolátorů 1 a 2

	Izolátor 1	Izolátor 2	Izolátor 3	Izolátor 4	Izolátor 5
Síla ve směru osy x [kN]	-	-	0,45	2,14	3,10
Síla ve směru osy y [kN]	-	-	0,25	2,17	2,86
Síla ve směru osy z [kN]	-	-	0,04	0,31	0,19
Moment ve směru osy x [Nm]	-	-	4,71	97,49	140,04
Moment ve směru osy y [Nm]	-	-	7,33	88,51	98,38
Moment ve směru osy z [Nm]	-	-	96,38	410,97	679,75

Uchycení pevných částí proudovodné dráhy ke skříně rozváděče:

Uchycení je řešeno za pomoci dvou typů izolátorů. Jako podpěrné izolátory slouží izolátory typu 3FA1111-4. Izolátory typu 3FA1110-7 jsou použity mezi měděné vývody jednotlivých fází. Pro zhodnocení deformace je nutné znát dovolené hodnoty sil a momentů v izolátorech. Tyto hodnoty jsou uvedeny níže:

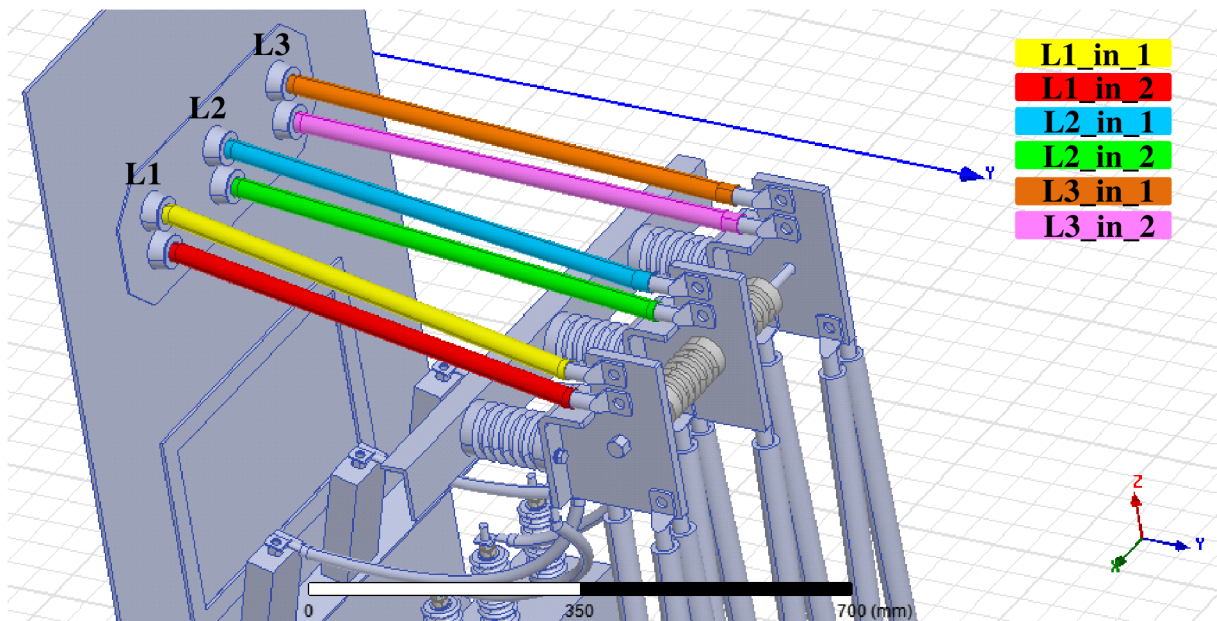
Izolátor typ 3FA1111-4:

- Dovolená tahová síla: 20 kN
- Dovolený torzní moment: 400 Nm
- Dovolená ohybová síla: 10 kN
- Dovolený ohybový moment přes délku (130 mm): 1300 Nm

Izolátor typ 3FA1110-7:

- Dovolená tahová síla: 10 kN
- Dovolенý torzní moment: 200 Nm
- Dovolенá ohybová síla: 5 kN
- Dovolенý ohybový moment přes délku (130 mm): 650 Nm

Kabely z generátoru:



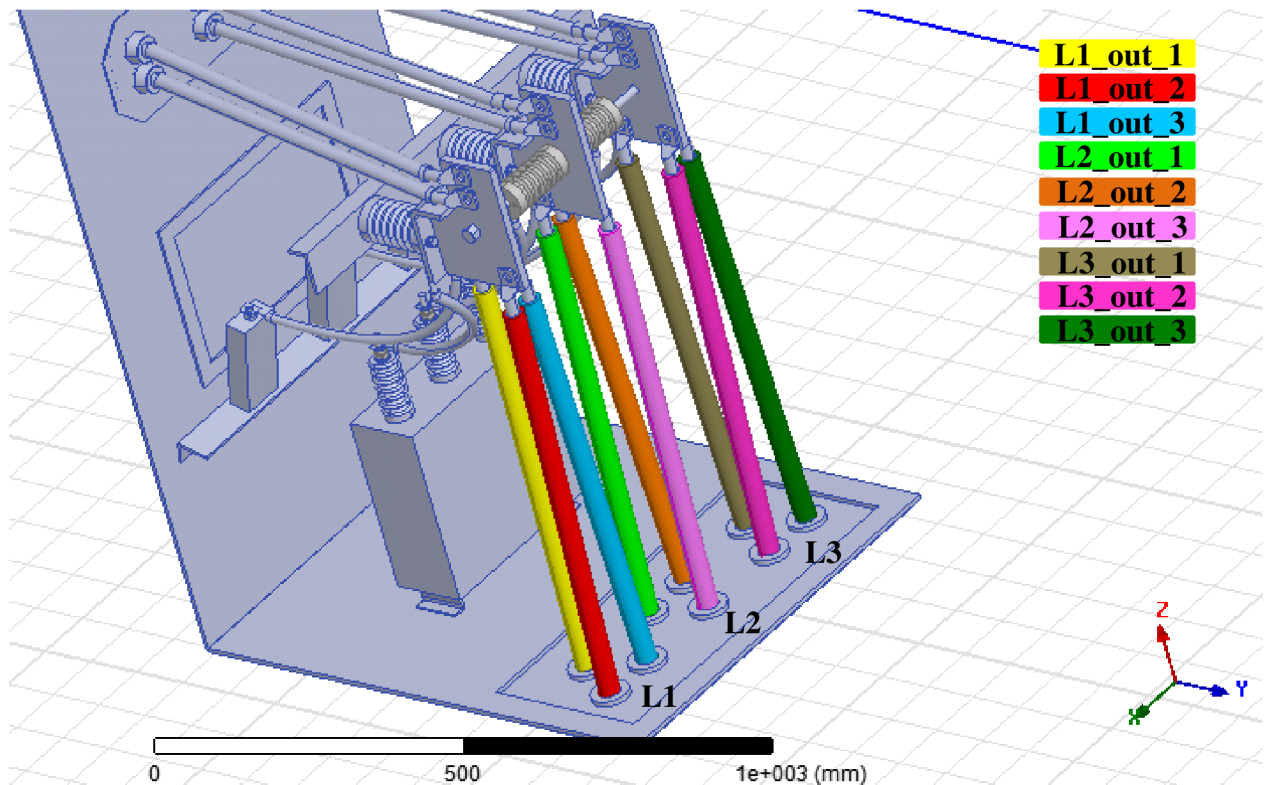
Obr. 7-16 Model skříně rozváděče IXF4 525-3EB – kabely z generátoru

Tab 7-9 ukazuje síly deformující jednotlivé přívodní kabely uvnitř rozváděče vedené z generátou na pevnou část pro dané směry – x, y, z. Názvy vodičů se odkazují na Obr. 7-16 viz výše.

Tab. 7-9 Výsledky výpočtu - rozváděč IXF4 525-3EB - kabely z generátoru

Síly ve fázi L1	Síla [N]	Síly ve fázi L2	Síla [N]	Síly ve fázi L3	Síla [N]
L1_in_1_x	-875	L2_in_1_x	6381	L3_in_1_x	-5093
L1_in_1_y	18	L2_in_1_y	-776	L3_in_1_y	-1130
L1_in_1_z	-880	L2_in_1_z	-6643	L3_in_1_z	-10083
L1_in_2_x	-880	L2_in_2_x	6747	L3_in_2_x	-5243
L1_in_2_y	179	L2_in_2_y	377	L3_in_2_y	551
L1_in_2_z	1258	L2_in_2_z	8534	L3_in_2_z	12052

Kabely od vývodů:



Obr. 7-17 Model skříně rozváděče IXF4 525-3EB – kabely od vývodů

Tab 7-10 ukazuje síly deformující jednotlivé vývodní kabely rozváděče vedené z pevných částí na stranu zákazníka opět pro dané směry – x, y, z. Názvy vodičů se odkazují na Obr. 7-17 viz výše.

Tab. 7-10 Výsledky výpočtu - rozváděč IXF4 525-3EB - kabely od vývodů

Síly ve fázi L1	Síla [N]	Síly ve fázi L2	Síla [N]	Síly ve fázi L3	Síla [N]
L1_out_1_x	-703	L2_out_1_x	-631	L3_out_1_x	-4075
L1_out_1_y	461	L2_out_1_y	1345	L3_out_1_y	5200
L1_out_1_z	-20	L2_out_1_z	-55	L3_out_1_z	81
L1_out_2_x	-975	L2_out_2_x	7757	L3_out_2_x	8871
L1_out_2_y	-383	L2_out_2_y	897	L3_out_2_y	-1504
L1_out_2_z	-36	L2_out_2_z	-306	L3_out_2_z	-359
L1_out_3_x	-209	L2_out_3_x	4323	L3_out_3_x	3588
L1_out_3_y	-598	L2_out_3_y	-3595	L3_out_3_y	-1823
L1_out_3_z	6	L2_out_3_z	98	L3_out_3_z	-175

7.2.2 Dynamická analýza

Pro dynamické simulace byl použit model rozváděče vytvořený pro statickou analýzu. V tomto případě byla zkoumána pouze pevná část proudovodné dráhy. Pevné části byly rozděleny na celky dle jednotlivých fází, viz Obr. 7-18. Orientace souřadného systému odpovídá směrům složek výsledných sil. Dynamické proudy v jednotlivých fázích byly nastaveny za pomoci těchto rovnic:

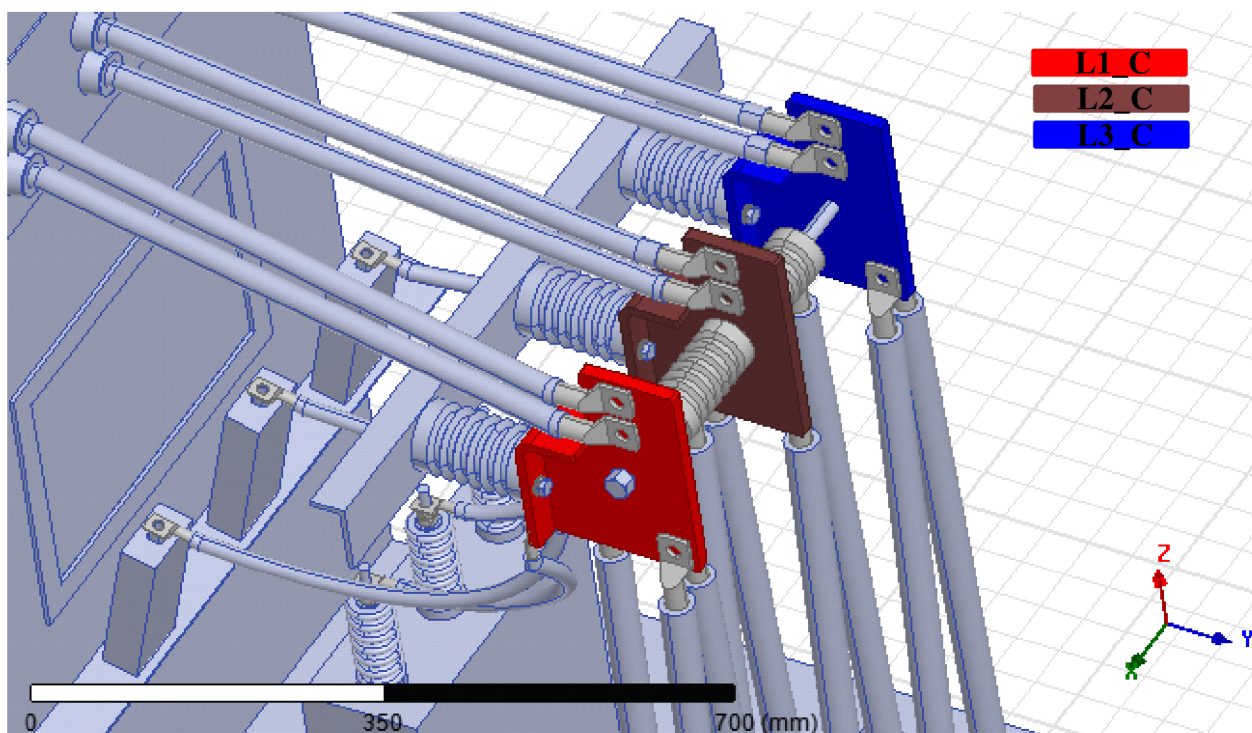
$$i_{L1} = 50000 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(314t) \quad (7.4)$$

$$i_{L2} = 50000 \cdot \sqrt{2} \cdot \left(\sin\left(314 \cdot t + \frac{4}{3}\pi\right) - \sin\left(\frac{4}{3}\pi\right) \cdot e^{-\frac{t}{0,021}} \right) \quad (7.5)$$

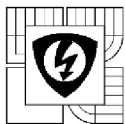
$$i_{L3} = 50000 \cdot \sqrt{2} \cdot \left(\sin\left(314 \cdot t + \frac{2}{3}\pi\right) - \sin\left(\frac{2}{3}\pi\right) \cdot e^{-\frac{t}{0,021}} \right) \quad (7.6)$$

Rovnice proudů byly stanoveny ze znalosti rovnice 3.2 z podkapitoly 3.2 (Elektrodynamické síly v trojfázové soustavě). Hodnoty definované pro analýzu a následně dosazené do rovnic viz níže. Účinník $\cos\varphi$ sloužil pro výpočet časové konstanty τ .

- Jmenovitý dynamický výdržný proud $I_{do} = 50kA$
- Frekvence $f = 50Hz$
- Účinník $\cos\varphi = 0,2$

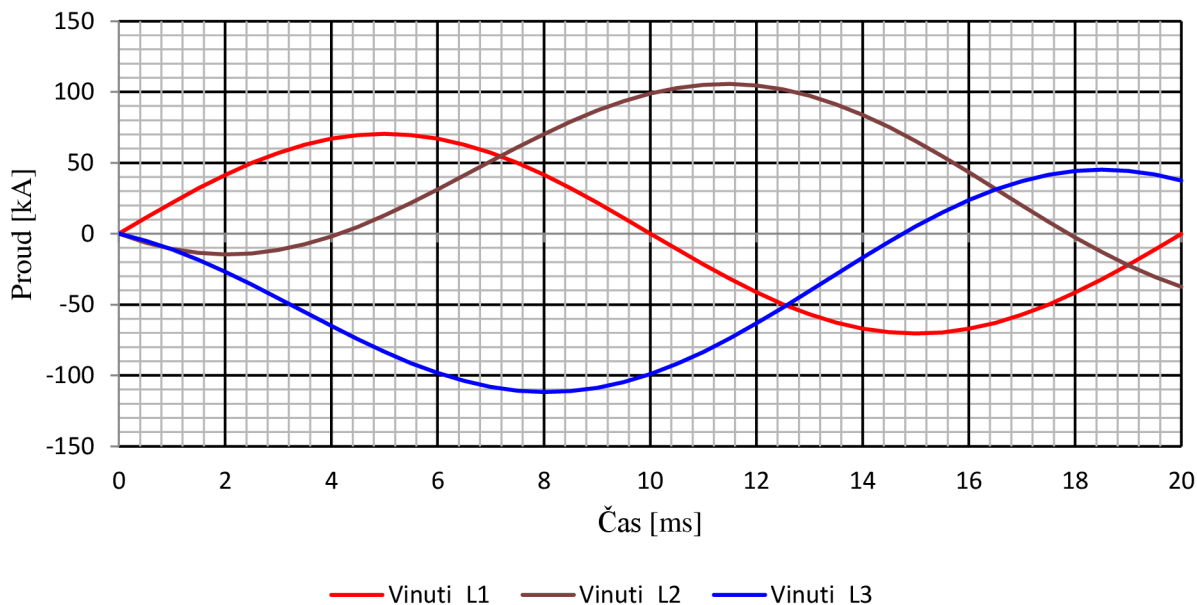


Obr. 7-18 Zkoumané pevné části u rozváděče 1XF4 525-3EB u dynamické analýzy



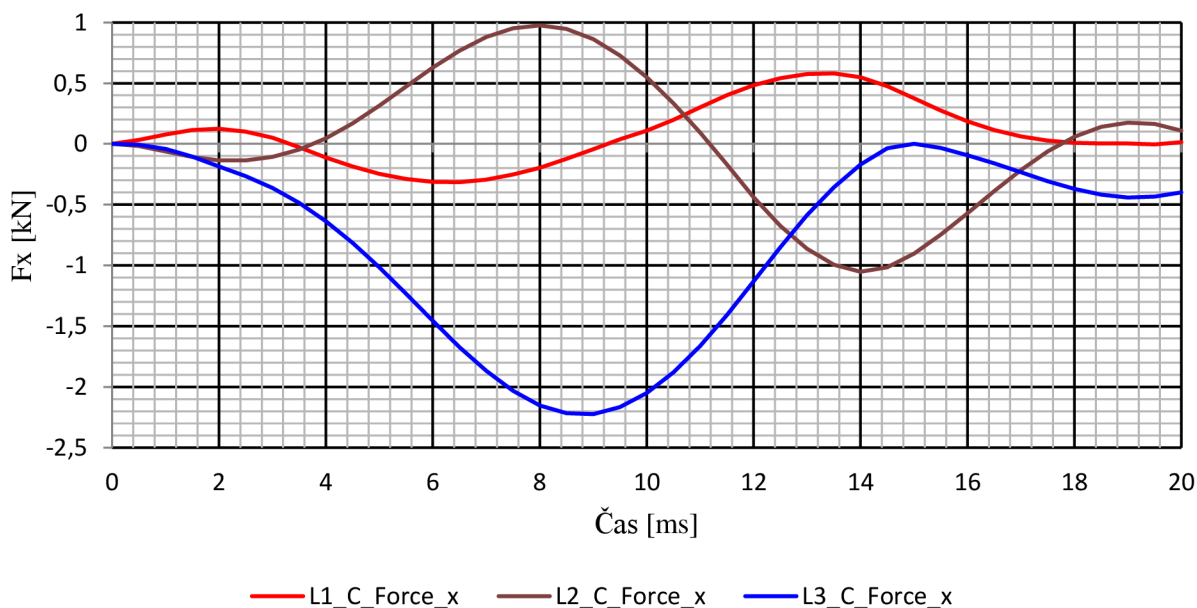
Dynamické vyhodnocení elektrodynamických sil bylo řešeno za pomoci Magnetic Transient funkce. Průběhy dynamického proudu a k němu odvislé průběhy síly na pevné části proudovodné dráhy dle fází jsou umístěny níže. Obr. 7-19 ukazuje simulovaný průběh proudu jednotlivými fázemi v čase. Obr. 7-20, 21 a 22 ukazují průběhy sil působících v pevných částech proudovodné dráhy závislé na protékajícím proudu v jednotlivých osách x,y,z. Průběhy jsou vyneseny do času 20ms, po tomto čase mají síly klesající charakter.

Průběh proudů jednotlivými pevnými částmi (fázemi)

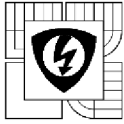


Obr. 7-19 Rozváděč 1XF4 525-3EB - průběh proudu jednotlivými pevnými částmi (fázemi)

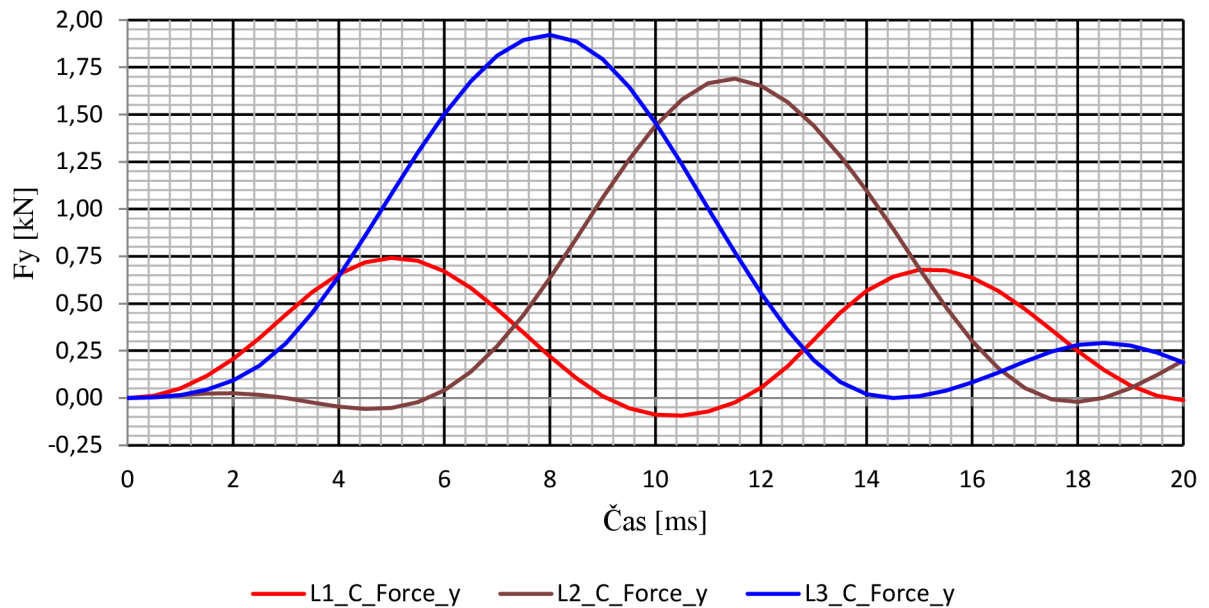
Průběh sil v pevných částech v ose x



Obr. 7-20 Rozváděč 1XF4 525-3EB - průběh sil v pevných částech v ose x

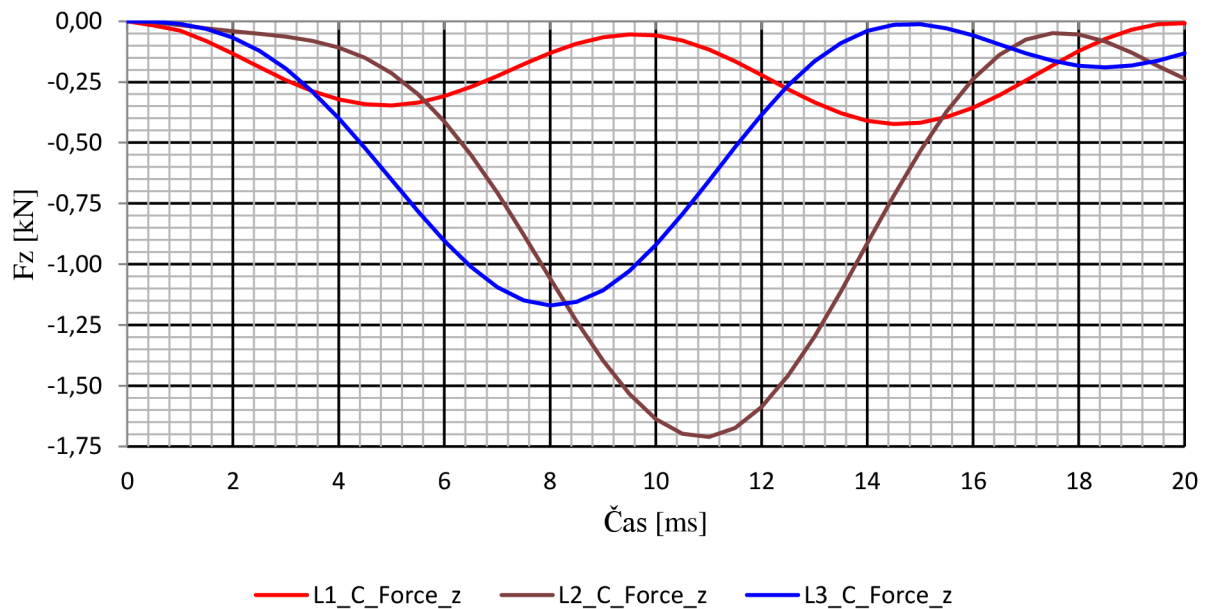


Průběh sil v pevných částech v ose y

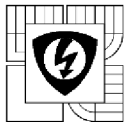


Obr. 7-21 Rozváděč 1XF4 525-3EB - průběh sil v pevných částech v ose y

Průběh sil v pevných částech v ose z



Obr. 7-22 Rozváděč 1XF4 525-3EB - průběh sil v pevných částech v ose z



8 ZHODNOCENÍ STATICKÉ A DYNAMICKÉ KONTROLY NA ÚČINKY ZKRATOVÉHO PROUDU (NADPROUDU) V ZAŘÍZENÍCH

8.1 Rozváděč 1XD1 525-3AA

Porovnáním zjištěných hodnot ze statické analýzy pevných částí proudovodné dráhy viz bod 7.1.1 práce a hodnot dovolených sil a momentů pro jednotlivé typy izolátorů můžeme stanovit jejich deformaci vlivem průchodu zkratového proudu.

První varianta simulace řeší využití všech stávajících izolátorů v rozváděči. Hodnoty pro porovnání vychází z Tab. 7-2.

Izolátory 1 a 2 (3FA1110-7):

- Největší tahová síla (F_x) je v obou izolátorech: **4,52 kN** < 10 kN
- Největší torzní moment (M_x) je v izolátoru 2: **16,26 Nm** < 200 Nm
- Největší ohybový moment (M_y a M_z) je v izolátoru 2: **75,13 Nm** < 650 Nm

Izolátory 3, 4 a 5 (3FA1111-4):

- Největší tahová síla (F_y) je v izolátoru 5: **4,12 kN** < 20 kN
- Největší torzní moment (M_y) je v izolátoru 5: **50,92 Nm** < 400 Nm
- Největší ohybový moment (M_x a M_z) je v izolátoru 5: **153,60 Nm** < 1300 Nm

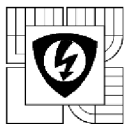
Druhá varianta simulace řeší využití pouze podpěrných izolátorů 3FA1111-4 pro jištění pevných částí proudovodné dráhy ve skřini rozváděče. Porovnávané hodnoty vychází z Tab. 7-3.

Pouze izolátory 3, 4 a 5 (3FA1111-4):

- Největší tahová síla (F_y) je v izolátoru 5: **3,89 kN** < 20 kN
- Největší torzní moment (M_y) je v izolátoru 5: **70,65 Nm** < 400 Nm
- Největší ohybový moment (M_x a M_z) je v izolátoru 4: **986,92 Nm** < 1300 Nm

Všechny vypočítané vrcholové hodnoty, jak pro variantu rozváděče 1XD1 525-3AA s plným využitím izolátorů, tak i pro variantu, která neuvažuje využití izolátorů umístěných mezi fázemi vychází hodnoty pod dovolenými limity uvedenými od výrobce izolátorů. Obě testované varianty by měly vydržet zvolené podmínky analýzy: 50kA efektivní hodnota dynamického výdržného proudu po dobu 0,2s.

Výsledky dynamické simulace působení zkratového proudu na pevné části proudovodné dráhy jsou pouze informativní, z hlediska zhodnocení deformací na uchycení (izolátorech) je statická analýza dostatečná. Statická analýza řeší maximální možné zatížení těchto míst.



8.2 Rozváděč 1XF4 525-3EB

Porovnáním zjištěných hodnot ze statické analýzy pevných částí proudovodné dráhy viz bod 7.2.1 práce a hodnot dovolených sil a momentů pro jednotlivé typy izolátorů můžeme stanovit jejich deformaci vlivem průchodu zkratového proudu.

První varianta simulace řeší využití všech stávajících izolátorů v rozváděči. Hodnoty pro porovnání vychází z Tab. 7-7.

Izolátory 1 a 2 (3FA1110-7):

- Největší tahová síla (F_x) je v izolátoru 2: $2,32 \text{ kN}$ $< 10 \text{ kN}$
- Největší torzní moment (M_x) je v obou izolátorech: $9,52 \text{ Nm}$ $< 200 \text{ Nm}$
- Největší ohybový moment (M_y a M_z) je v izolátoru 2: $85,43 \text{ Nm}$ $< 650 \text{ Nm}$

Izolátory 3, 4 a 5 (3FA1111-4):

- Největší tahová síla (F_y) je v izolátoru 5: $3,20 \text{ kN}$ $< 20 \text{ kN}$
- Největší torzní moment (M_y) je v izolátoru 5: $138,08 \text{ Nm}$ $< 400 \text{ Nm}$
- Největší ohybový moment (M_x a M_z) je v izolátoru 5: $115,26 \text{ Nm}$ $< 1300 \text{ Nm}$

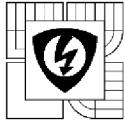
Druhá varianta simulace řeší využití pouze podpěrných izolátorů 3FA1111-4 pro jištění pevných částí proudovodné dráhy ve skřini rozváděče. Porovnávané hodnoty vychází z Tab. 7-8.

Pouze izolátory 3, 4 a 5 (3FA1111-4):

- Největší tahová síla (F_y) je v izolátoru 5: $2,86 \text{ kN}$ $< 20 \text{ kN}$
- Největší torzní moment (M_y) je v izolátoru 5: $98,38 \text{ Nm}$ $< 400 \text{ Nm}$
- Největší ohybový moment (M_x a M_z) je v izolátoru 5: $679,90 \text{ Nm}$ $< 1300 \text{ Nm}$

Všechny vypočítané vrcholové hodnoty, jak pro variantu rozváděče 1XF4 525-3EB s plným využitím izolátorů, tak i pro variantu, která neuvažuje využití izolátorů umístěných mezi fázemi vychází hodnoty pod dovolenými limity uvedenými od výrobce izolátorů. Obě testované varianty by měly vydržet zvolené podmínky analýzy: 50 kA efektivní hodnota dynamického výdržného proudu po dobu $0,2 \text{ s}$.

Výsledky dynamické simulace působení zkratového proudu na pevné části proudovodné dráhy jsou pouze informativní, z hlediska zhodnocení deformací na uchycení (izolátorech) je statická analýza dostatečná. Statická analýza řeší maximální možné zatížení těchto míst.



9 STATICKÁ A DYNAMICKÁ KONTROLA NA PŮSOBENÍ TLAKŮ NA KOSTRU ZAŘÍZENÍ VZNIKLÉHO PŘI OBLOUKOVÉM ZKRATU

Teorie pro výpočty uvedena v kapitole 4 (Obecná teorie oblouku), parametry pro výpočet a požadavky zákazníka na zkoušku uvedeny v kapitole 5. Jmenovitý dynamický výdržný proud $50kA$ a doba trvání oblouku $0,2s$.

Jelikož hodnoty tlaků působících v rozvaděčové skříni nebyly známy, byl zvolen nejprve postup výpočtem dynamické simulace působení tlaku uvnitř zařízení. Pro metodiku výpočtu byl zvolen výpočet za pomoci metody konečných prvků (Finite Element Method - FEM) v simulačním prostředí ANSYS Workbench 16.0.

Pro simulace byla vytvořena zjednodušená geometrie zkoumaných zařízení, rozváděčů viz Obr. 9-7 a Obr. 9-34. Geometrie vycházely z výkresů a upravených modelů zapůjčených firmou Siemens Electric Machines Drásov s.r.o..

Ze znalosti průběhů proudu a napětí při obloukovém zkratu, znalostí přibližné hodnoty úbytku energie daného ohříváním proudovodných drah a ze znalosti přibližné vyzářené energie při oblouku teorie viz kapitola 4 byla za pomoci Mgr. Petra Kloce, Ph.D. určena přibližná hodnota energie, která se uvolní při oblouku. Tato energie byla dále uložena do navržené výbušniny umístěné v možném místě vzniku obloukového zkratu. Výbušnina má za cíl simulovat chování oblouku ve zkoumaném zařízení. Z hlediska různých rozměrových dispozic skříní se navržené výbušniny liší. Postup výpočtu uveden v podkapitole 9.1.

Výstupem dynamické analýzy je animace působení tlaku na kostru obou typů rozvaděčů ve formátu AVI. Uvedené statické analýzy slouží pro kontrolu těchto analýz.

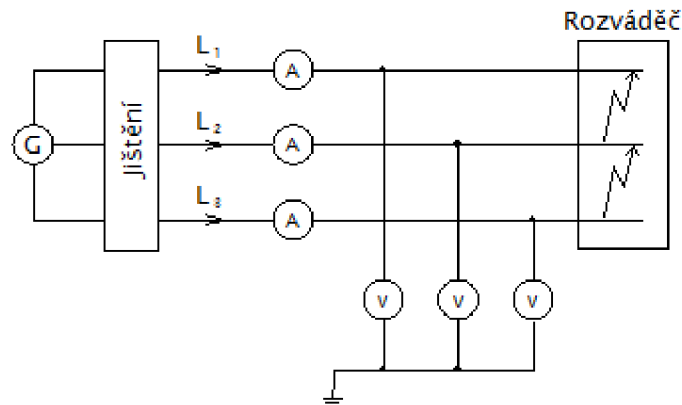
Zhodnocení jednotlivých analýz je uvedeno pro každé zkoumané zařízení zvlášť v kapitole 10 (Zhodnocení statické a dynamické kontroly na působení tlaků na kostru zařízení vzniklého při obloukovém zkratu).

Na příloženém DVD této práce lze nalézt archivy jednotlivých simulací uložené ve formátu WBPZ. Pro jejich otevření je nutné vlastnit nejlépe ANSYS Workbench 16.0 nebo jeho vyšší verzi.

Výsledky simulací doporučuji ověřit ve specializované zkušebně a podle nich následně dopravit simulace.

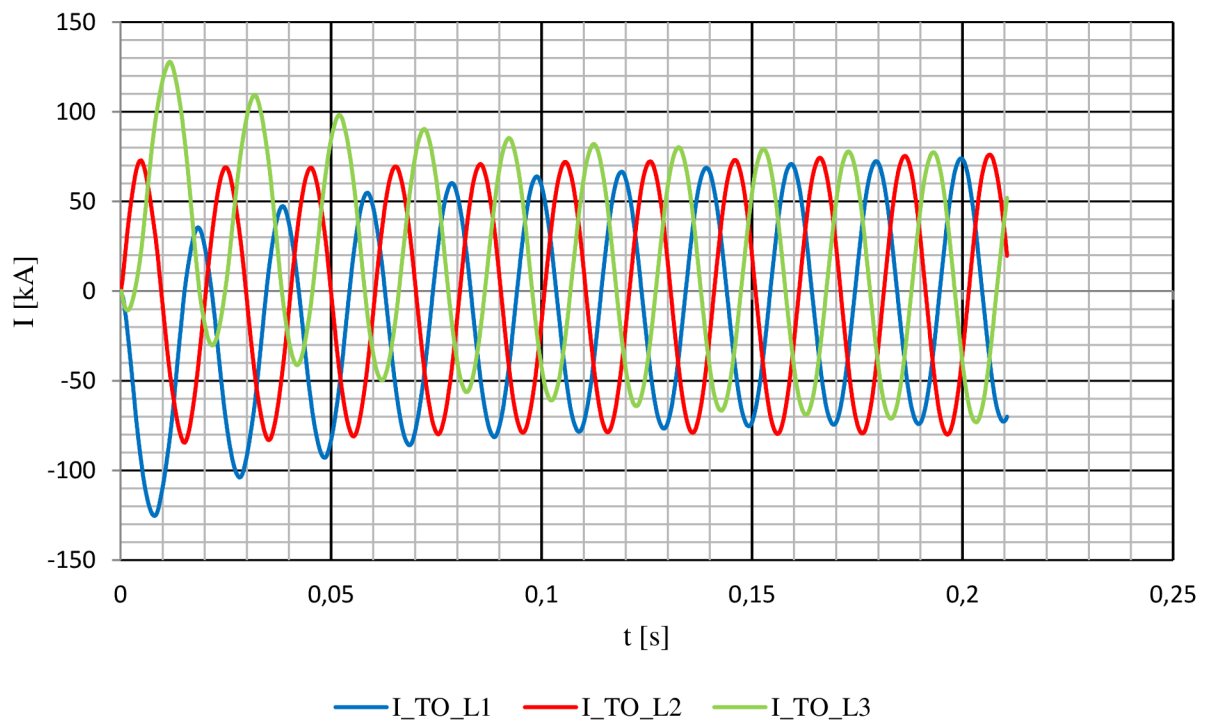
9.1 Výpočet obloukové energie

Výpočet obloukové energie vychází z podkapitol 4.3 a 4.4 této práce. Pro určení energie obsažené v oblouku bylo potřeba znát průběhy proudu a napětí v čase při daném obloukovém zkratu (Obr. 9-2 a Obr. 9-3). Tyto průběhy byly poskytnuty firmou Siemens Electric Machines Drásov s.r.o. viz níže. Pomocí rovnice 4.1 byla vypočtena energie obsažená v oblouku E_{arc} . Doba trvání oblouku byla brána do času 0,2s. V průběhu napětí na Obr. 9-3 bylo zanedbáno pro výpočet počáteční vysoká hodnota napětí.



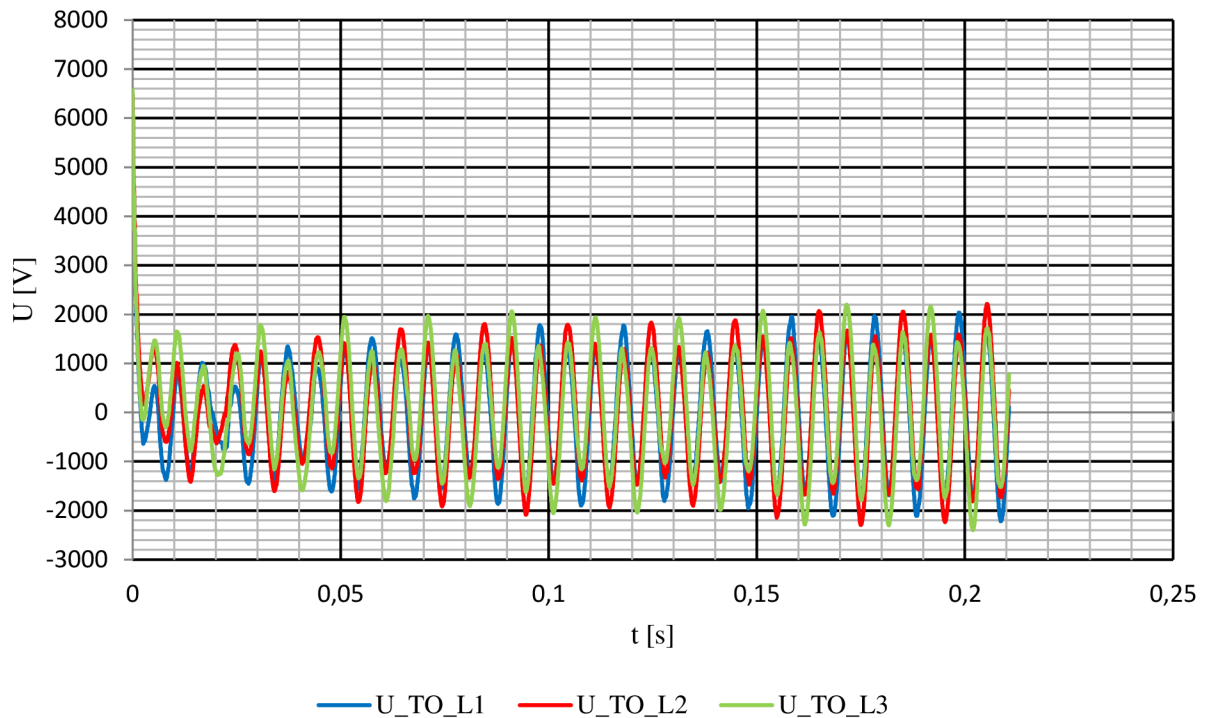
Obr. 9-1 Schéma zapojení měřících přístrojů při měření 3 fázového zkratu

Průběh proudu při 3 fázovém zkratu



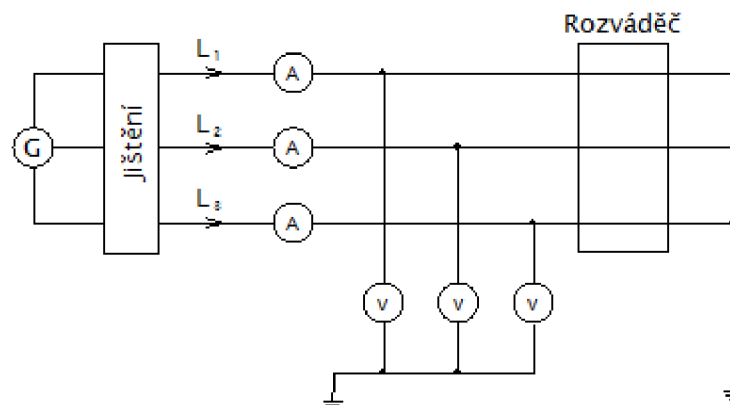
Obr. 9-2 Průběh proudu při 3 fázovém zkratu [12]

Průběh napětí při 3 fázovém zkratu

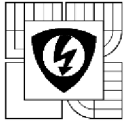


Obr. 9-3 Průběh napětí při 3 fázovém zkratu [12]

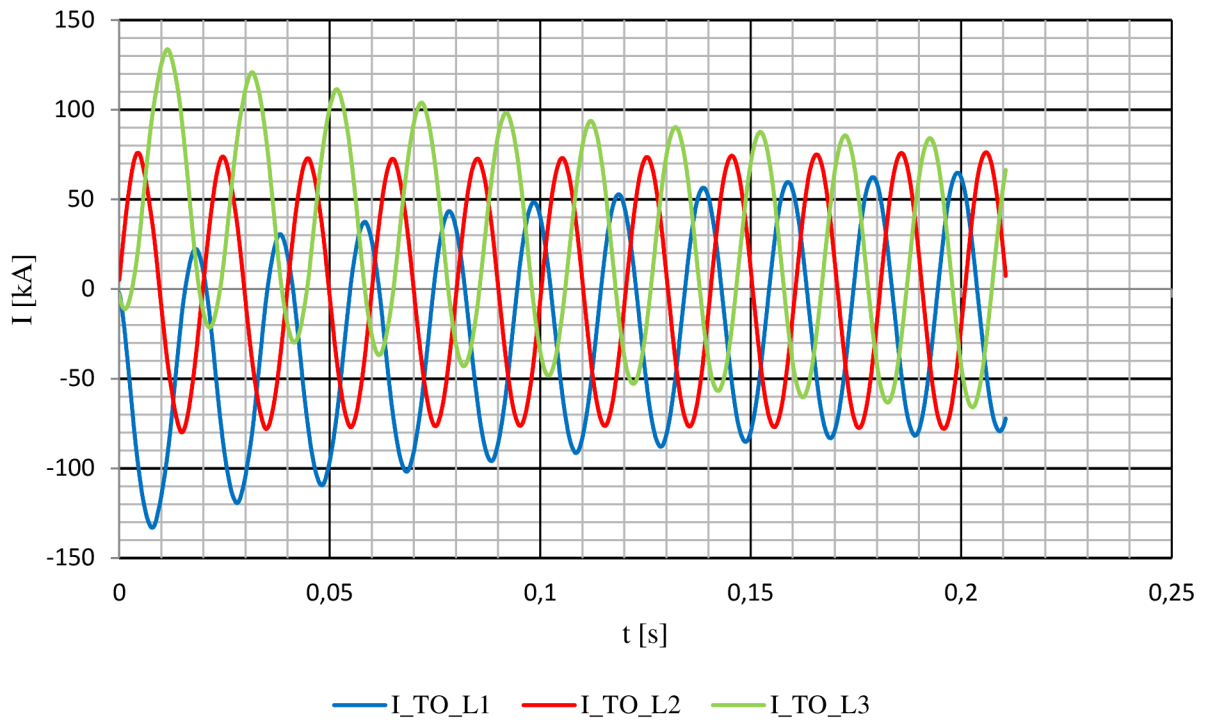
Hodnota energie při daných průbězích 3 fázového zkratového proudu činila $E_c = 8,31 \text{ MJ}$. Z vypočtené energie bylo dále nutné odečíst ztráty dané oteplením proudovodné dráhy při průchodu zkratového proudu, jelikož nebylo měřeno napětí přímo na oblouku. K určení těchto ztrát bylo využito další měření, měření 3 fázového zemního zkratu viz Obr. 9-4. Zapojení měřicích přístrojů bylo obdobné. Při využití naměřeného průběhu napětí viz Obr. 9-6 a při zanedbání určitých nevyužitých délek proudovodné dráhy bylo možné stanovit přibližně hodnotu tepelných ztrát na proudovodné dráze rozváděče, $E_{tep} = 0,89 \text{ MJ}$. Výsledná energie oblouku tedy vyšla: $E_{arc} = E_c - E_{tep} = 8,31 - 0,89 = 7,42 \text{ MJ}$.



Obr. 9-4 Schéma zapojení měřicích přístrojů při měření 3 fázového zemního zkratu

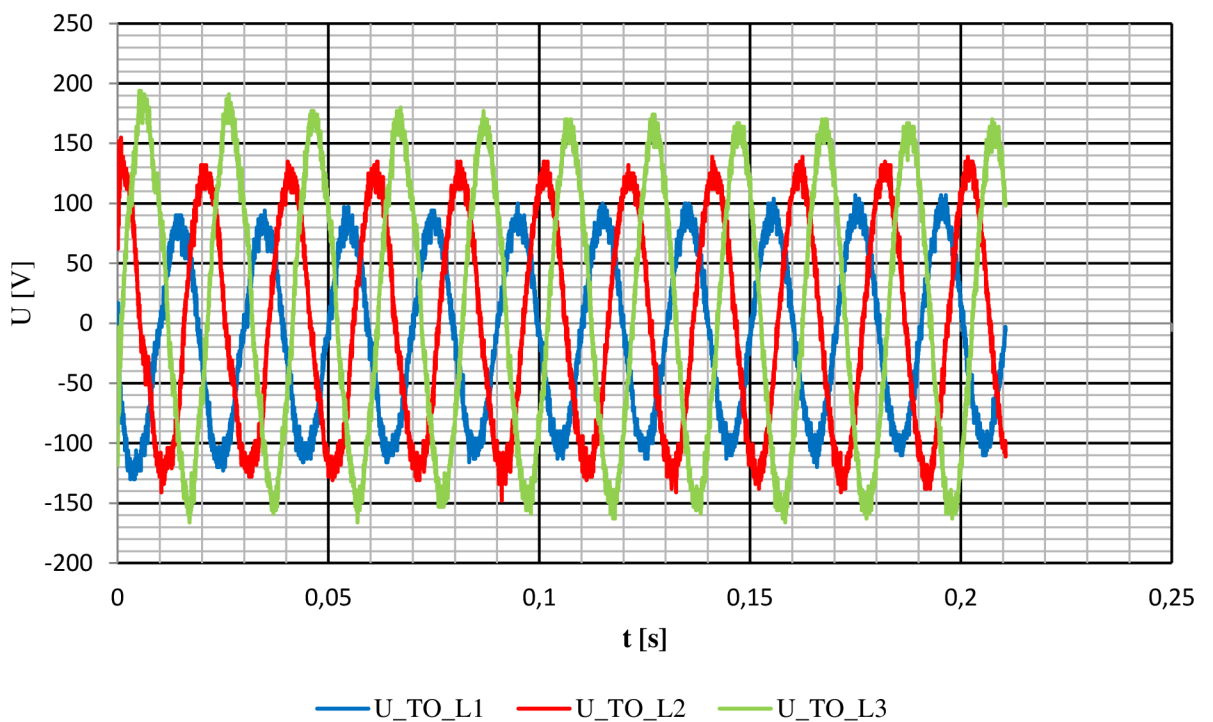


Průběh proudu při 3 fázovém zemním zkratu

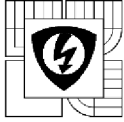


Obr. 9-5 Průběh proudu při 3 fázovém zemním zkratu [12]

Průběh napětí při 3 fázovém zemním zkratu



Obr. 9-6 Průběh napětí při 3 fázovém zemním zkratu [12]



Ze zjištěné energie obsažené v oblouku byla dále za pomoci rovnice 4.3 odečtena zářivá složka energie. Teplota oblouku a poloměr oblouku byly stanoveny za pomoci znalostí Ing. Jiřího Valenty, vedoucího práce, pracovník zkušebny. Teplota oblouku: $T_{arc} = 25kK$; poloměr oblouku: $r = 10mm$. Pomocí těchto hodnot a Obr. 4-3 byla určena hodnota koeficientu záření $\epsilon_n = 6,1 \cdot 10^9 W/m^3 \cdot sr$. Z výkresu rozváděče na Obr. 6-2 byla odečtena délka oblouku $l_{arc} = 220mm$. Koeficient tvaru oblouku byl stanoven na hodnotu $k_{arc} = 1,2$. Energie vyzářená obloukem byla vypočtena na hodnotu $E_{konv} = 1,38MJ$.

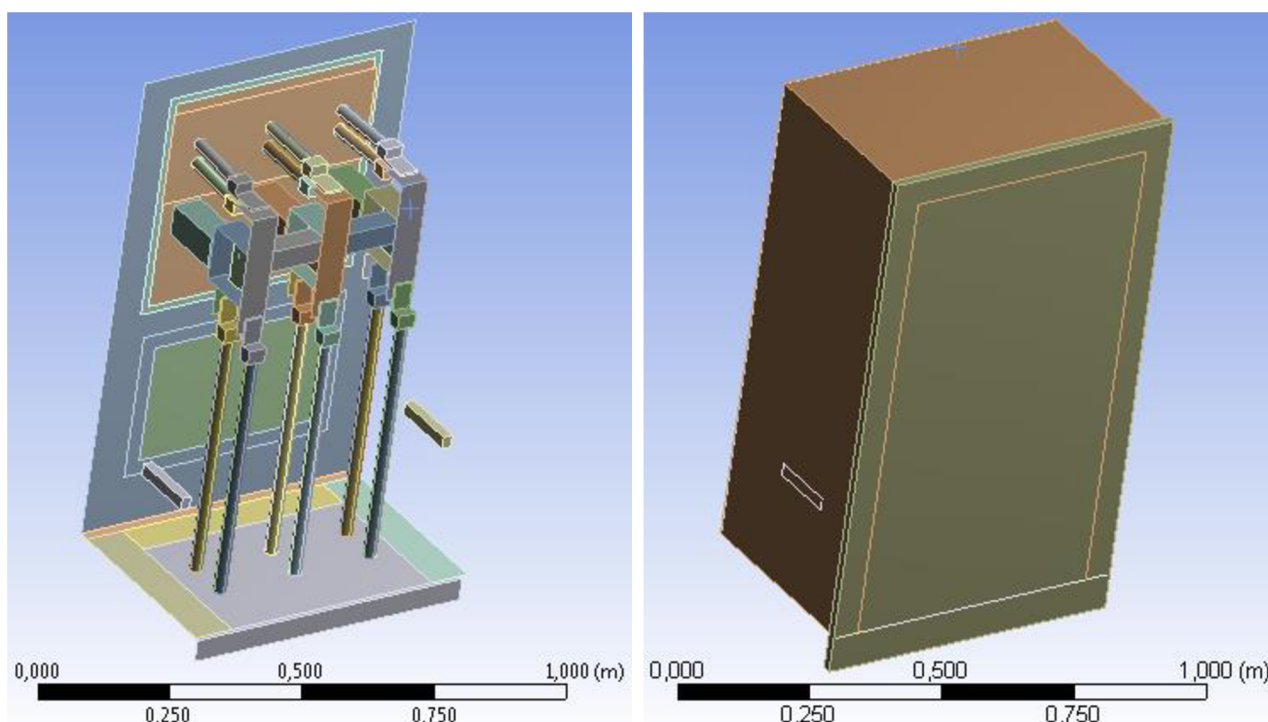
Při zanedbání tepelné složky vzniklé při oblouku byla stanovena výsledná mechanická energie plynu: $E_{plyn} = E_{arc} - E_{konv} = 6,04MJ$.

Tato energie byla aplikována pro obě varianty rozváděčových skříní.

9.2 Rozváděč 1XD1 525-3AA

9.2.1 Dynamická analýza

Na Obr. 9-7 je zobrazen model rozváděče 1XD1 525-3AA vytvořený pro simulace v prostředí ANSYS Workbench. Jednotlivé prvky byly zjednodušeny a převedeny na plošné útvary. Uchycení jednotlivých prvků bylo řešeno za pomoci Bonded kontaktů a kontaktů Mesh Connection. Na přiloženém DVD je uvedena i varianta při využití tzv. Spot Weld kontaktů, tato varianta simuluje uchycení prvků za pomoci šroubových spojů. Varianta při využití Spot Weldů výrazně zesložití a prodlouží čas výpočtu, nebyla proto vybrána pro následnou dynamickou analýzu.



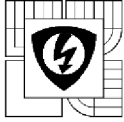
Obr. 9-7 Model skříně rozváděče 1XD1 525-3AA v prostředí ANSYS Workbench

Materiálové charakteristiky prvků použitých pro výpočet:

Jednotlivým prvkům rozváděče byly přiřazeny jejich materiálové charakteristiky potřebné pro výpočet. U sledovaných bočních krytů rozváděče byly nastaveny plasticity materiálů a pro membránu byl nastaven přibližný předpokládaný tlak pro její vybavení vše viz níže.

Ocel:

- Modul pružnosti v tahu: $200\,000\text{ MPa}$
- Poissonovo číslo: $0,3 [-]$
- Hustota: 7850 kg/m^3
- Mez kluzu: 230 MPa
- tgE : $10\,000\text{ MPa}$



Mosaz:

- Modul pružnosti v tahu: $125\ 000\ MPa$
- Poissonovo číslo: $0,33\ [-]$
- Hustota: $8400\ kg/m^3$
- Mez kluzu: $150\ MPa$
- tgE : $5\ 000\ MPa$

Membrána:

- Modul pružnosti v tahu: $125\ 000\ MPa$
- Poissonovo číslo: $0,33\ [-]$
- Hustota: $8400\ kg/m^3$
- Mez kluzu: $150\ MPa$
- tgE : $5\ 000\ MPa$
- Tlak potřebný pro vybavení: $0,43\ MPa$

Sklotextit:

- Modul pružnosti v tahu: $17\ 200\ MPa$
- Poissonovo číslo: $0,41\ [-]$
- Hustota: $1700\ kg/m^3$

Měď:

- Modul pružnosti v tahu: $117\ 000\ MPa$
- Poissonovo číslo: $0,35\ [-]$
- Hustota: $8960\ kg/m^3$

Tvrzený epoxid:

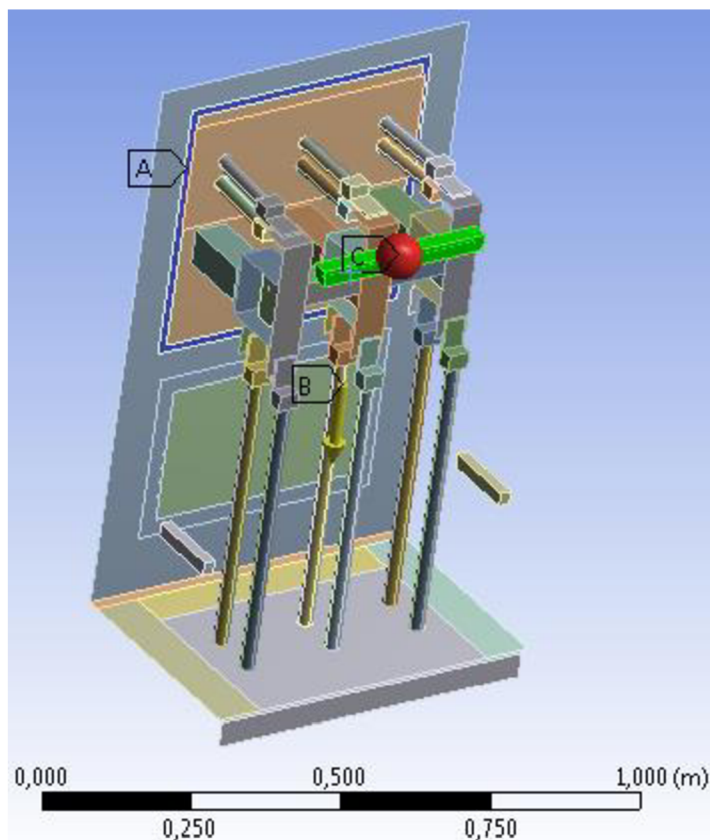
- Modul pružnosti v tahu: $20\ 000\ MPa$
- Poissonovo číslo: $0,33\ [-]$
- Hustota: $1800\ kg/m^3$

Kabely:

- Modul pružnosti v tahu: $500\ MPa$
- Poissonovo číslo: $0,3\ [-]$
- Hustota: $6000\ kg/m^3$

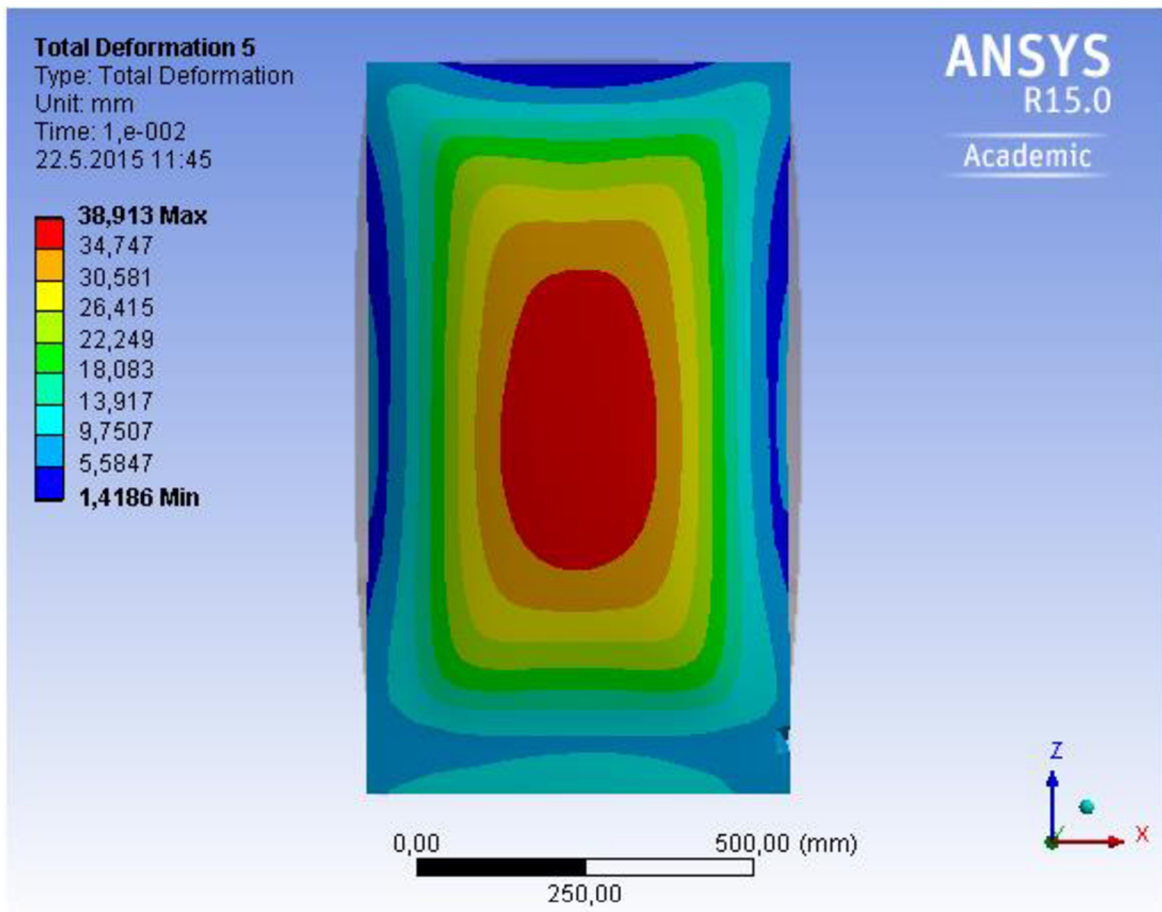
Dále byl pro simulaci využit atmosférický vzduch jako obklopující element prostředí okolo rozváděče a výbušnina. Výbušnina byla nastavena na stabilní hodnotu výbuchu pro celý průběh simulace ($0 - 0,2s$). Její hodnota byla stanovena z výpočtu viz podkapitola 9.1 (Výpočet obloukové energie) a hmotnosti výbušniny. Hodnota použité výbušniny oproti výpočtu byla dále navýšena o bezpečnostní koeficient 10% . Výsledná velikost výbušniny pro simulaci u rozváděčové skříně 1XD1 525-3AA činila: $E_{vyb1} = 2,48 \cdot 10^7\ J/kg$.

Dynamická analýza byla provedena pomocí analytického systému Explicit Dynamics v prostředí ANSYS Workbench. Obr. 9-8 ukazuje konfiguraci simulace před samotným započítáním. Odkaz A značí pevnou podporu, v tomto místě kde je rozváděč připevněn na kostru stroje. Odkaz B značí umístění těžiště s gravitačním tíhovým zatížením. Následně odkaz C značí místo detonačního bodu, umístění detonačního bodu je řešeno v prostředí výbušniny viz sytě zelený prvek. Místo výbušniny, tedy **místo vzniku oblouku, bylo zvoleno ve vrchní části u vývodů.**



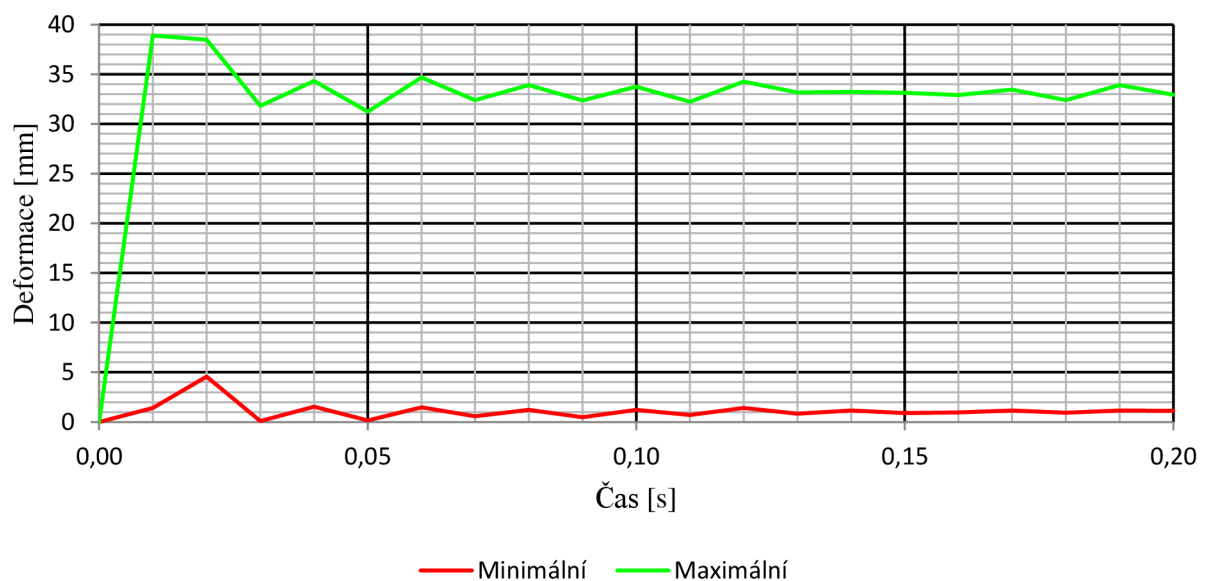
Obr. 9-8 Model skříně rozváděče 1XD1 525-3AA připravený k dynamické analýze

Výsledkem dynamické analýzy jsou animace působení tlaku ve zkoumaném zařízení s hodnotami deformací v čase. Působení tlaku bylo zkoumáno na jednotlivých částech kostry rozváděče 1XD1 525-3AA. Animace jsou uvedeny v přiloženém DVD ve formátu AVI. Zjištěné maximální deformace jednotlivých zkoumaných ploch lze nalézt na dalších stranách.

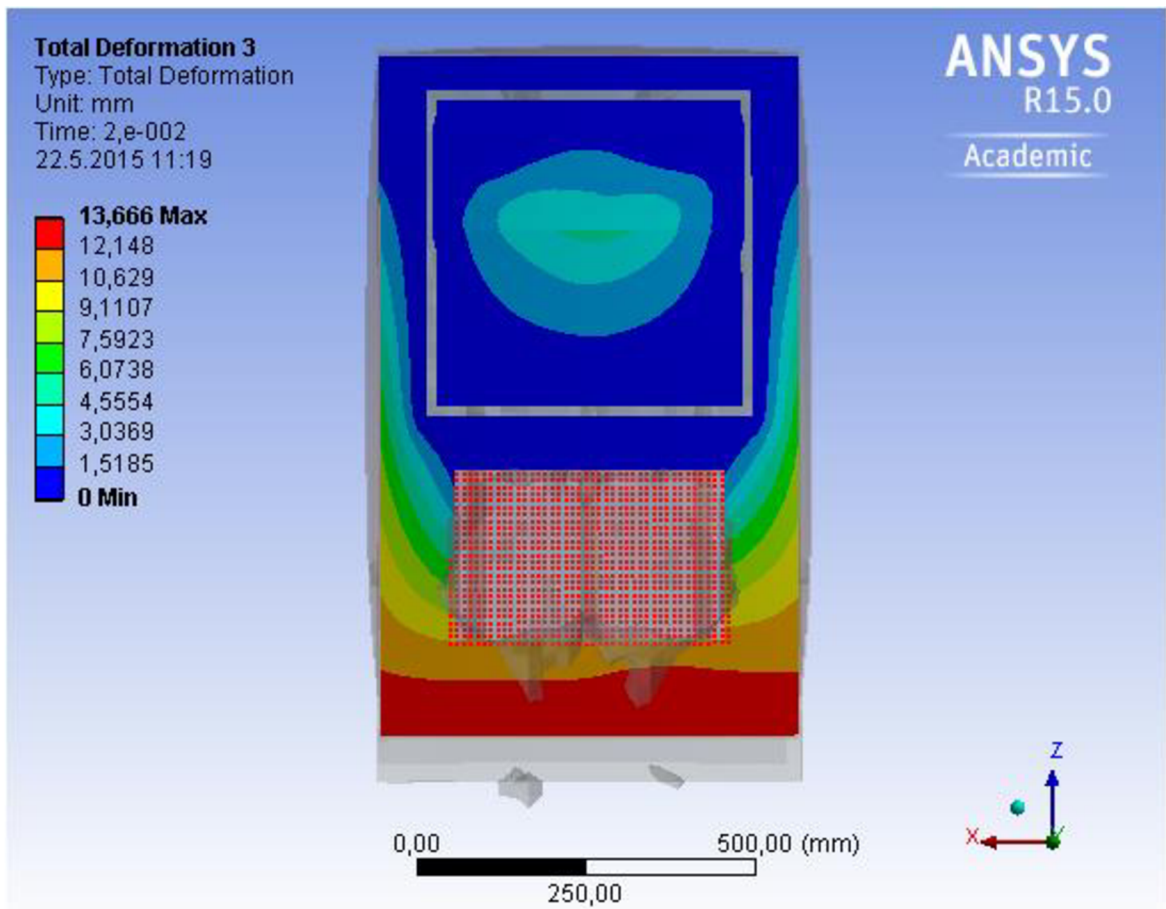


Obr. 9-9 Maximální deformace předních dveří rozváděče v milimetrech

Průběh maximální a minimální deformace předních dveří rozváděče v čase

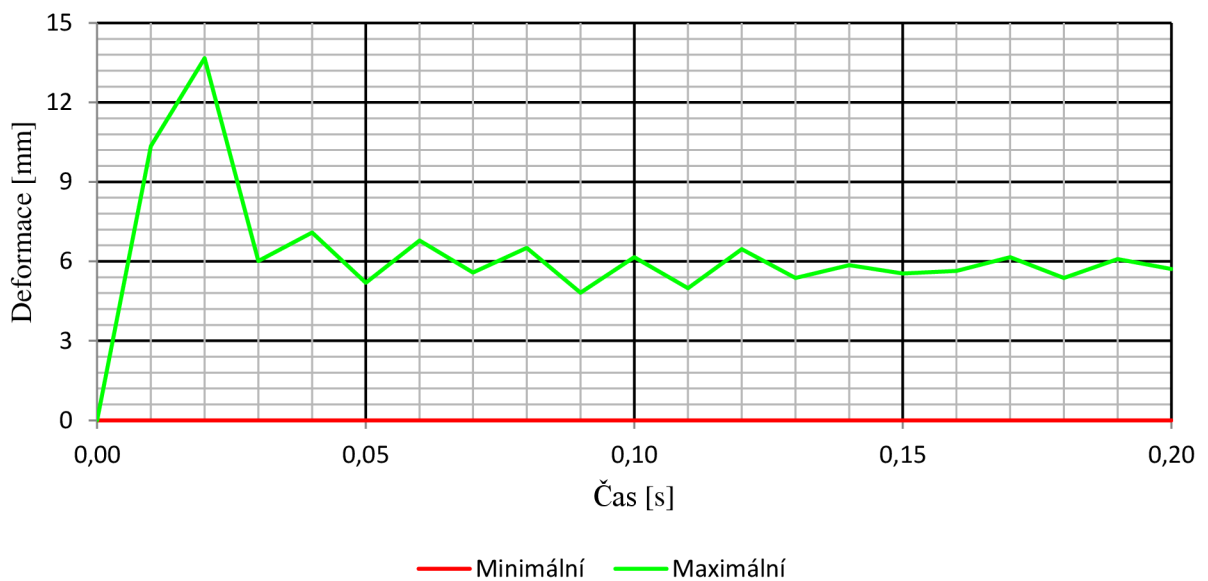


Obr. 9-10 Průběh maximální a minimální deformace předních dveří rozváděče v čase

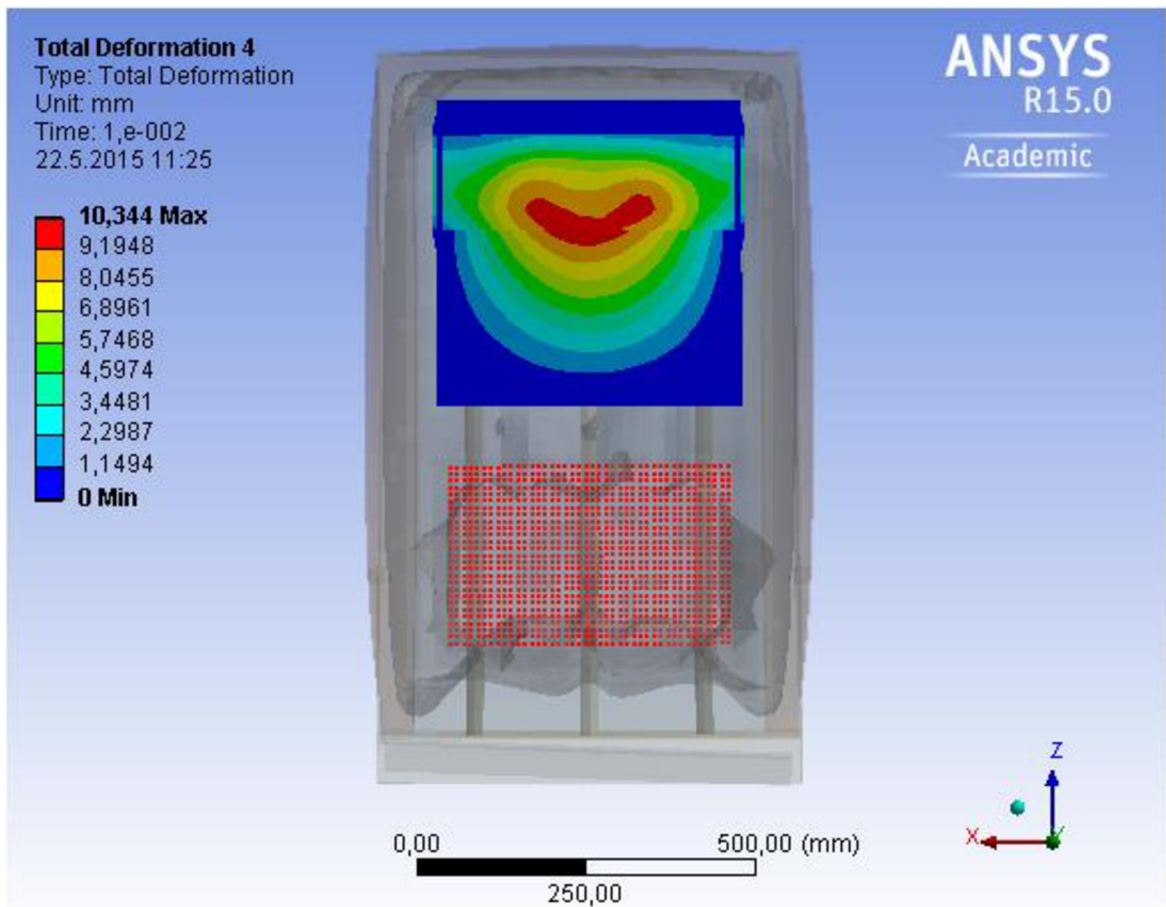


Obr. 9-11 Maximální deformace zadní části rozváděče v milimetrech

Průběh maximální a minimální deformace zadní části rozváděče v čase

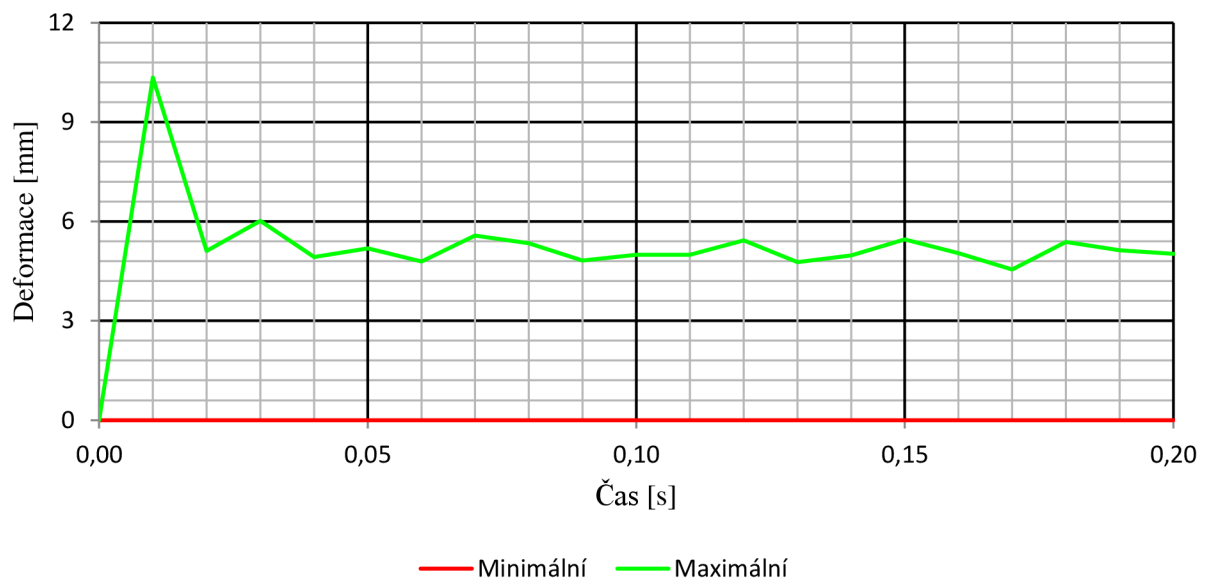


Obr. 9-12 Průběh maximální a minimální deformace zadní části rozváděče v čase

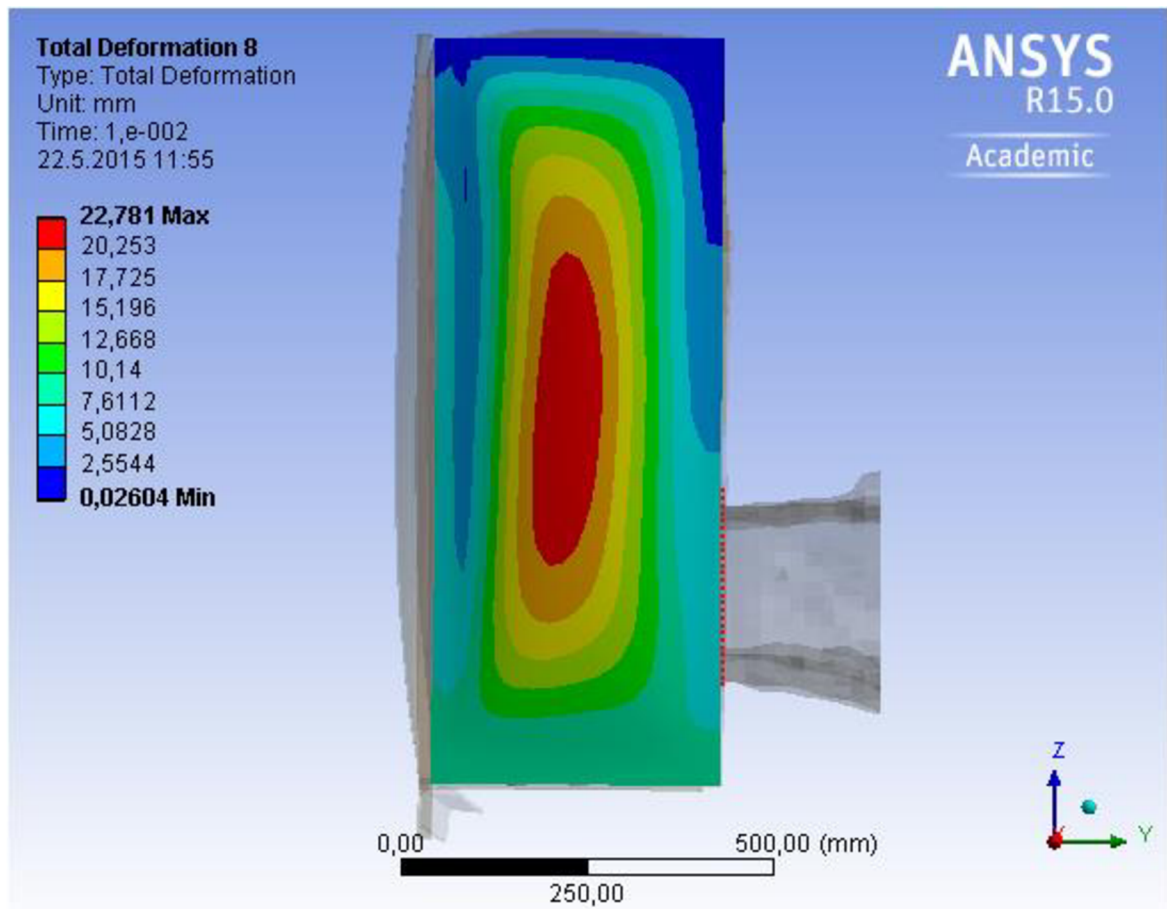


Obr. 9-13 Maximální deformace zadní části rozváděče v milimetrech – detail

Průběh maximální a minimální deformace zadní části rozváděče v čase - detail

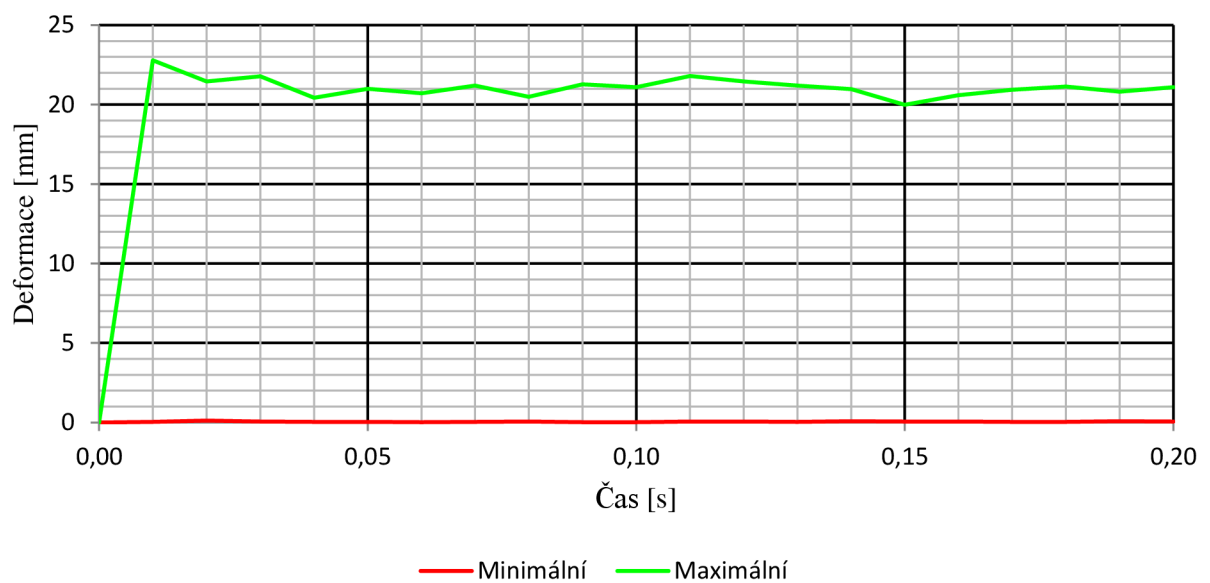


Obr. 9-14 Průběh maximální a minimální deformace zadní části rozváděče v čase - detail

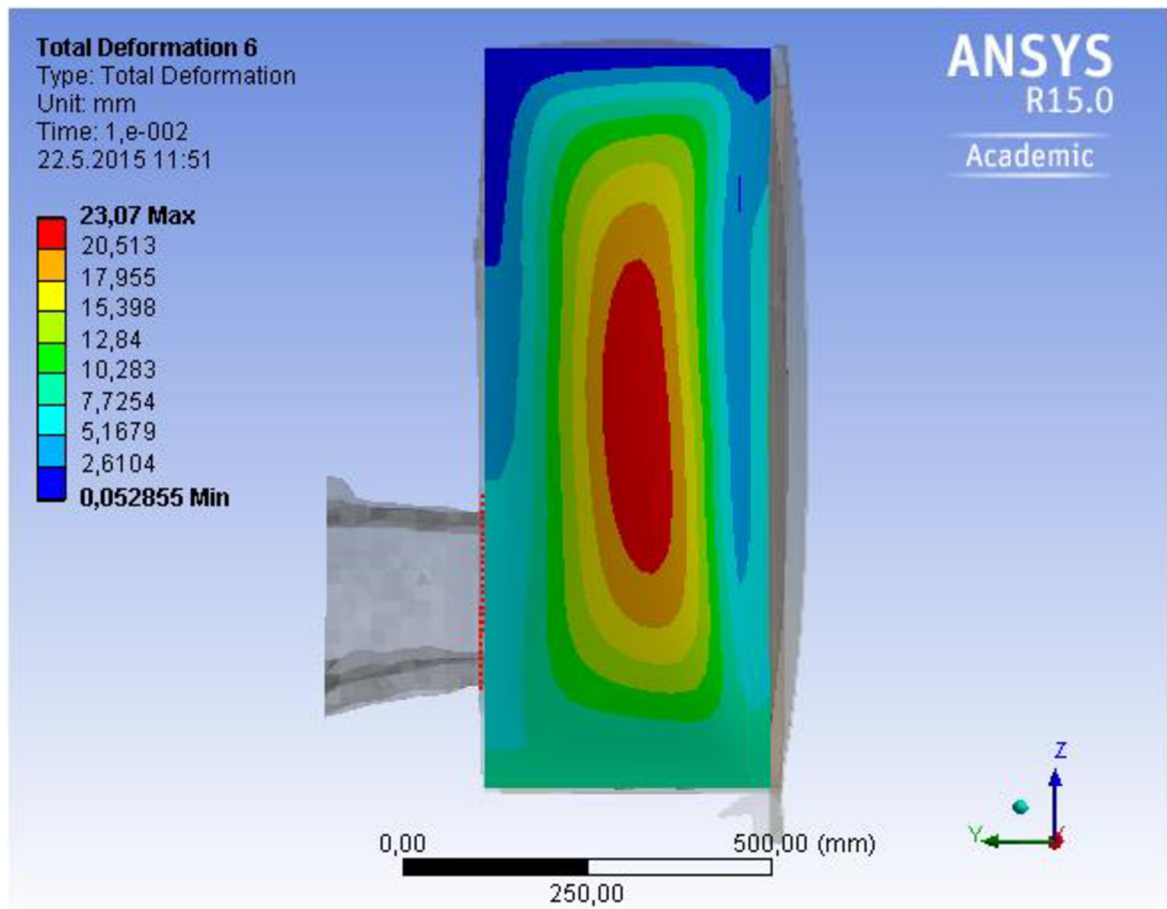


Obr. 9-15 Maximální deformace pravého boku rozváděče v milimetrech

Průběh maximální a minimální deformace pravého boku rozváděče v čase

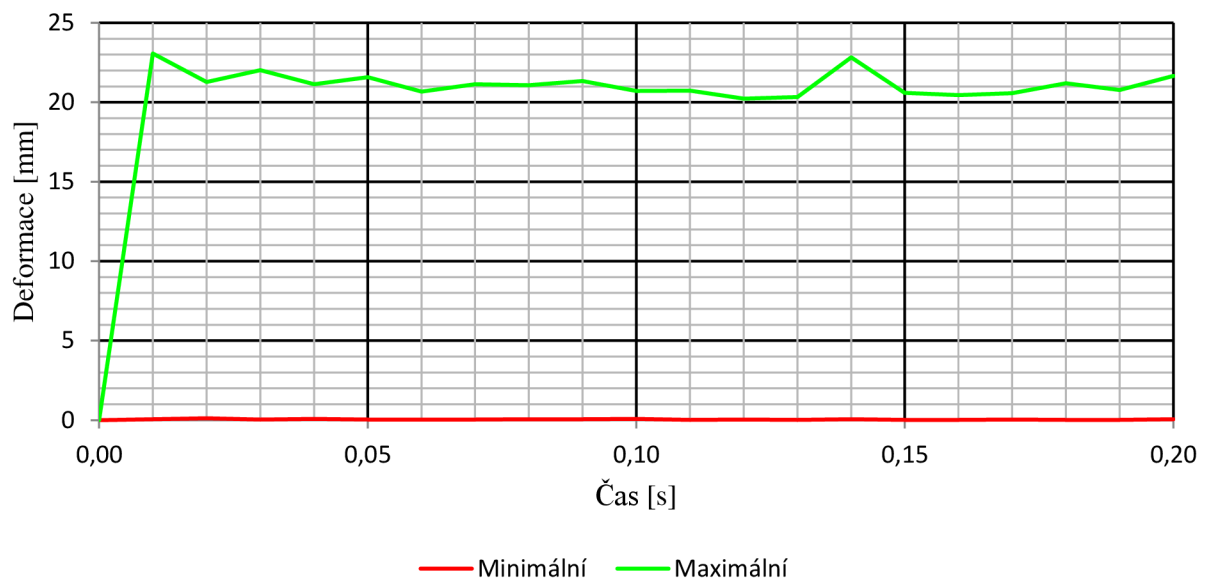


Obr. 9-16 Průběh maximální a minimální deformace pravého boku rozváděče v case

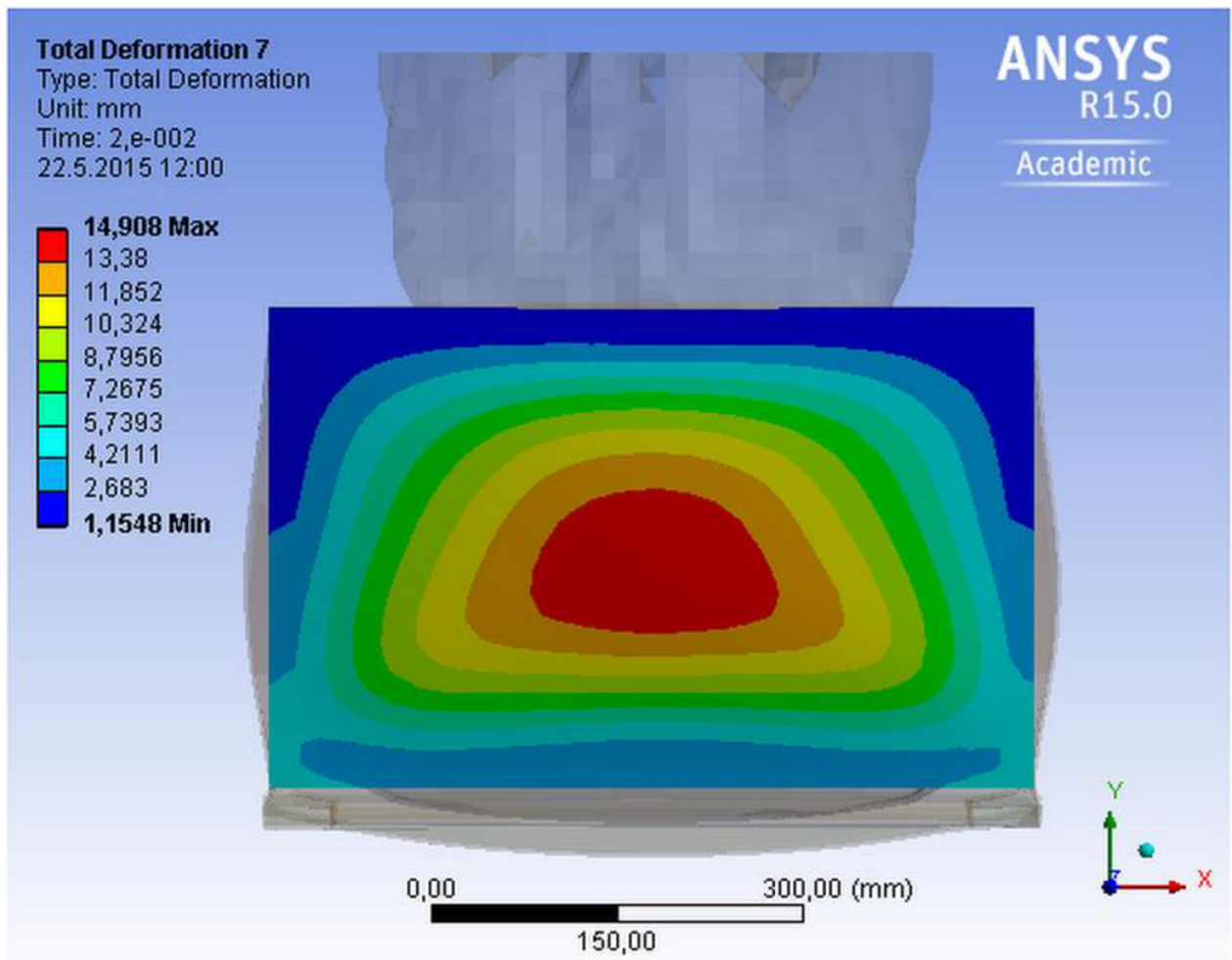


Obr. 9-17 Maximální deformace levého boku rozváděče v milimetrech

Průběh maximální a minimální deformace levého boku rozváděče
 v čase

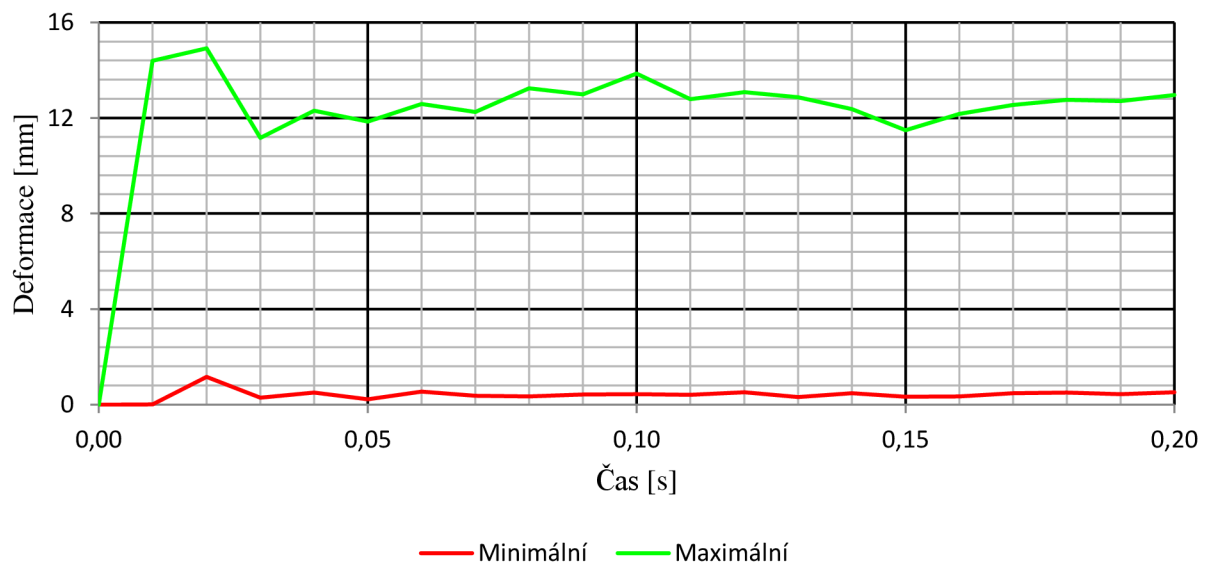


Obr. 9-18 Průběh maximální a minimální deformace levého boku rozváděče v čase

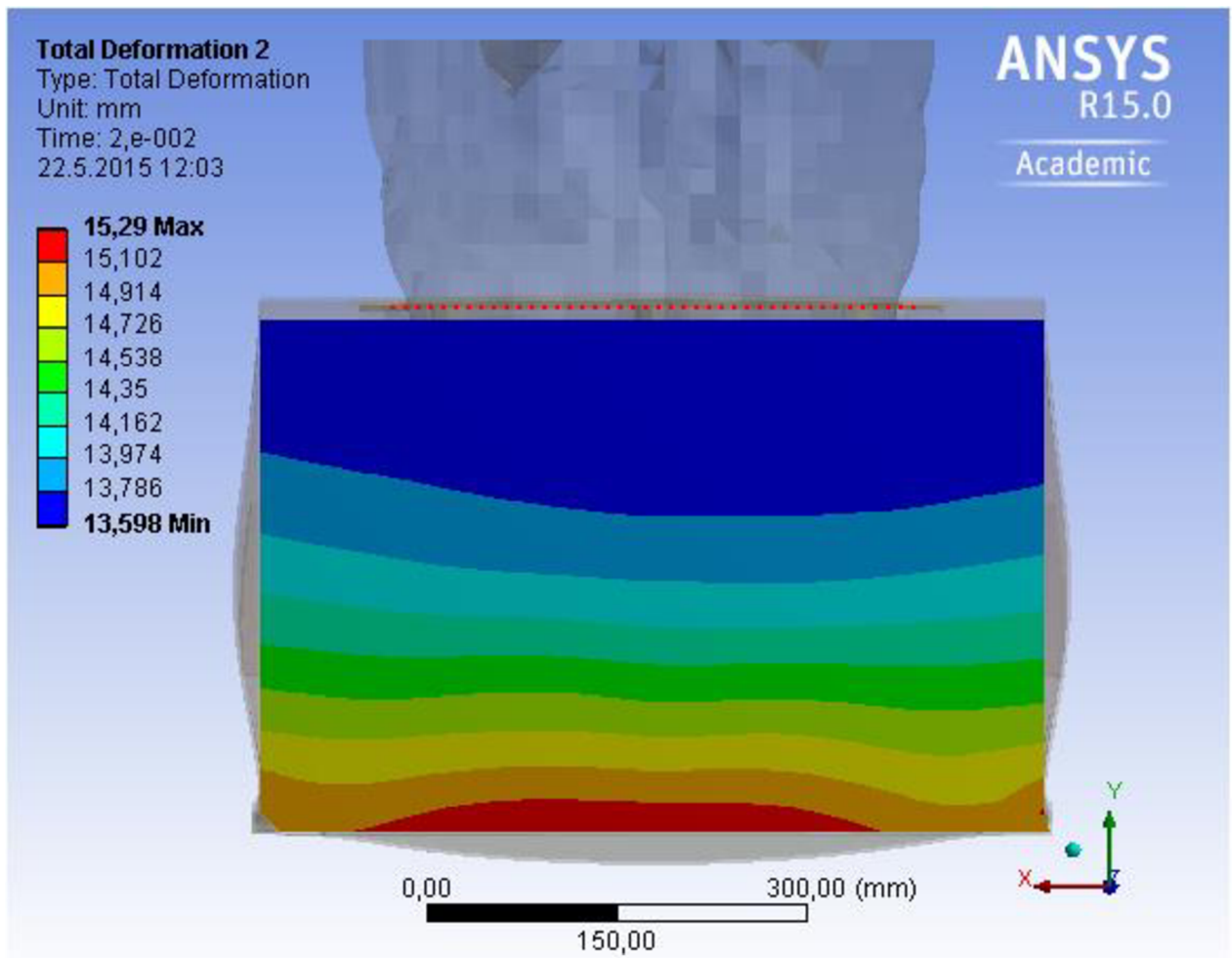


Obr. 9-19 Maximální deformace vrchní části rozváděče v milimetrech

Průběh maximální a minimální deformace vrchní části rozváděče
v čase

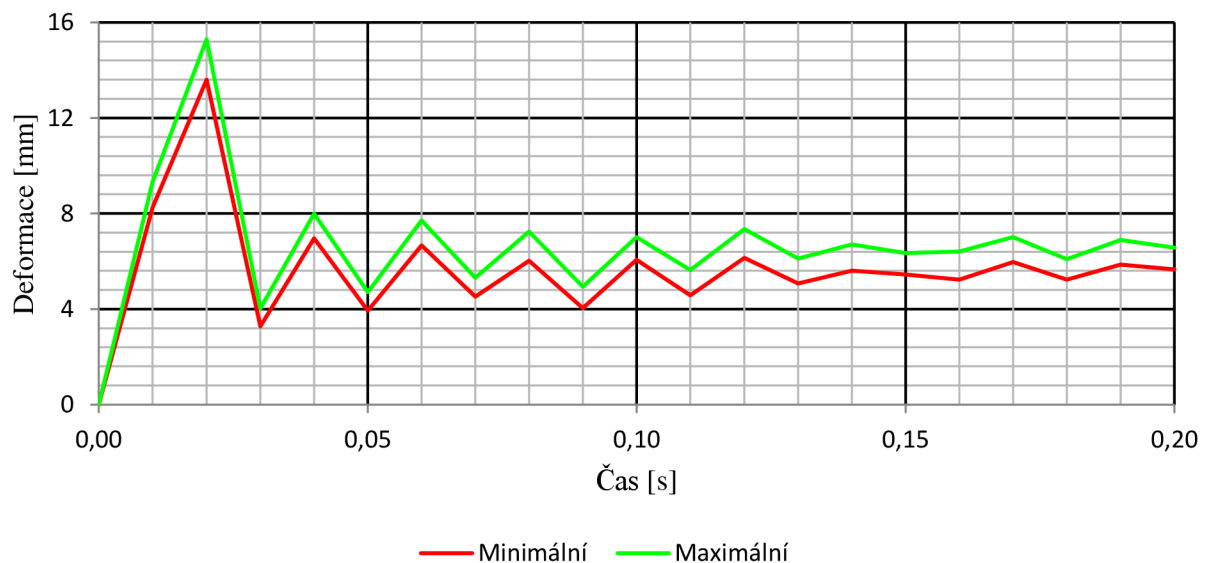


Obr. 9-20 Průběh maximální a minimální deformace vrchní části rozváděče v case



Obr. 9-21 Maximální deformace spodní části rozváděče v milimetrech

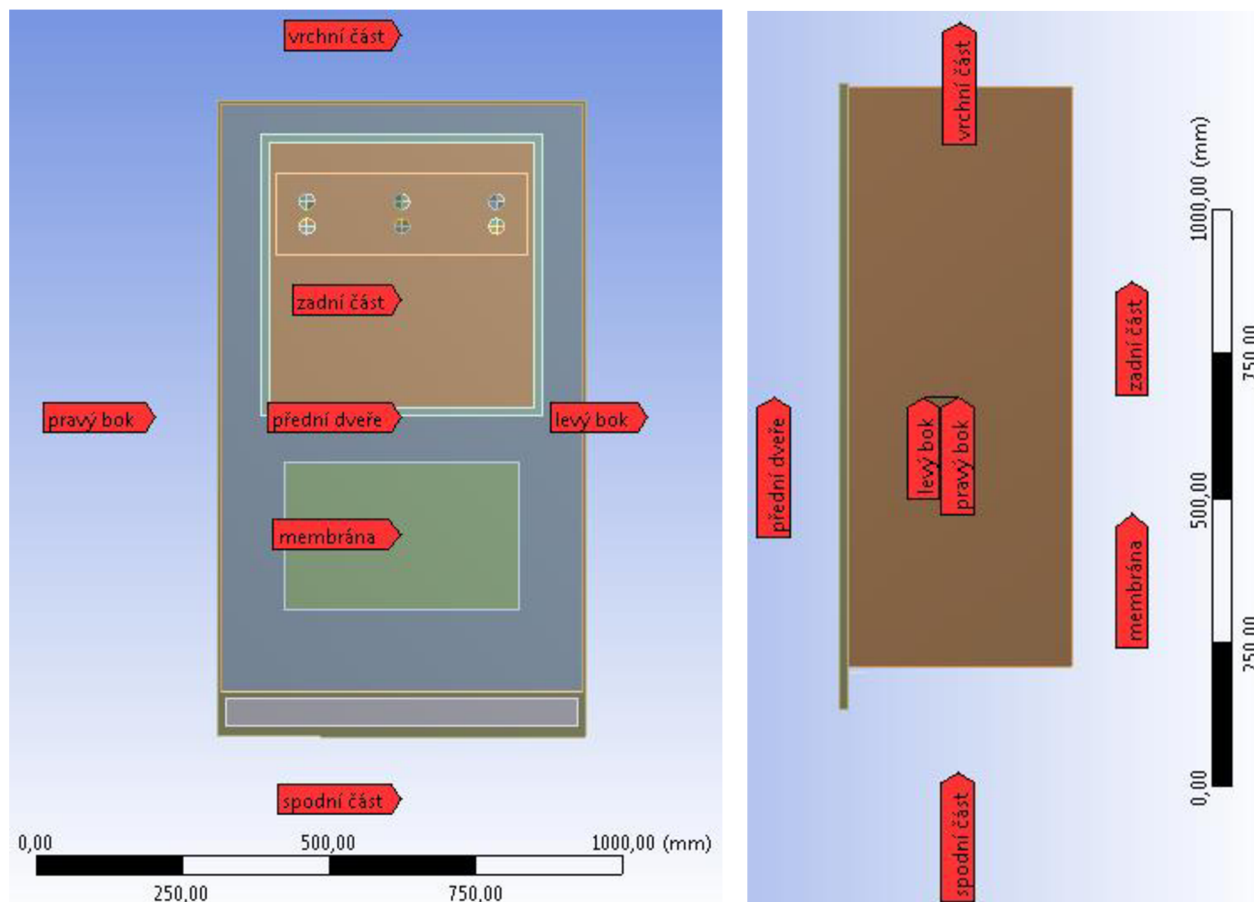
Průběh maximální a minimální deformace spodní části rozváděče
v čase



Obr. 9-22 Průběh maximální a minimální deformace spodní části rozváděče v čase

Průběhy tlaků na jednotlivých částech skříně rozváděče:

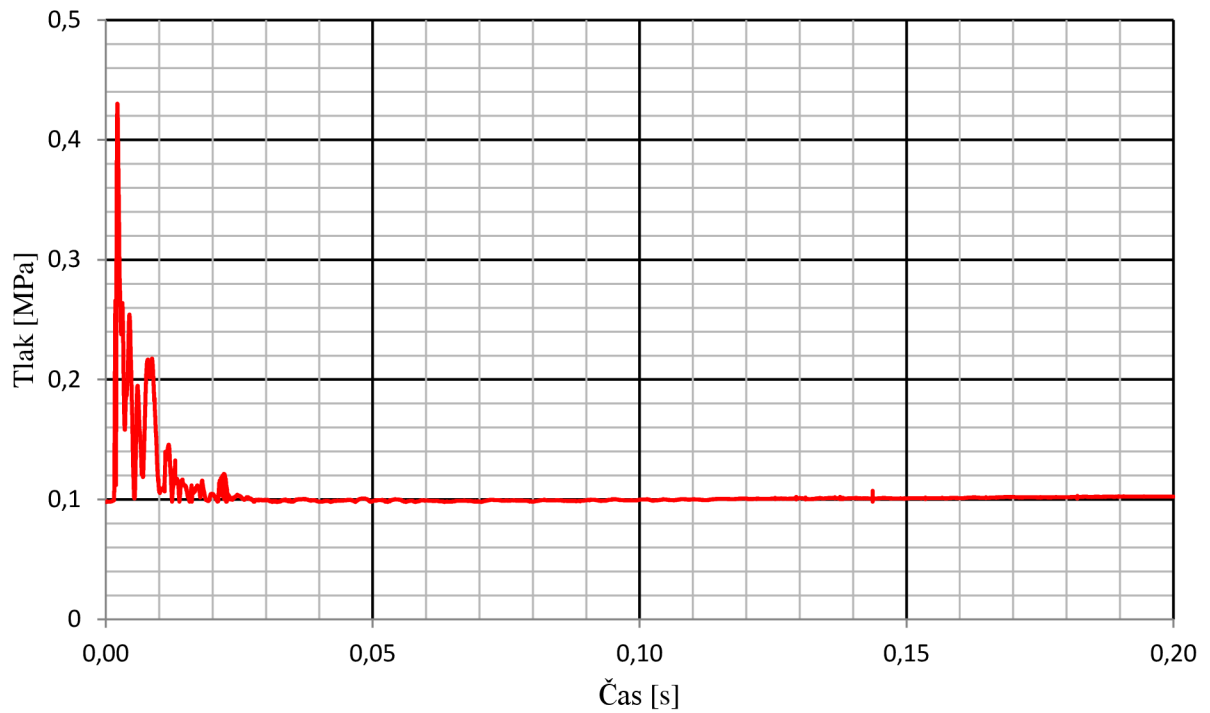
Na zkoumaných místech mimo rozváděč byly umístěny snímače tlaku, jejich rozložení je možné nalézt na Obr. 9-23. Za pomoci těchto snímačů byly naměřeny přibližné podoby tlaků na jednotlivých deformovaných částech. Za pomoci statické analýzy byly tyto průběhy zpřesněny a výsledek z analýzy je možné nalézt na dalších stranách této práce viz Obr. 9-24 – 30.



Obr. 9-23 Rozmístění snímačů tlaku pro simulaci u rozváděče 1XD1 525-3AA

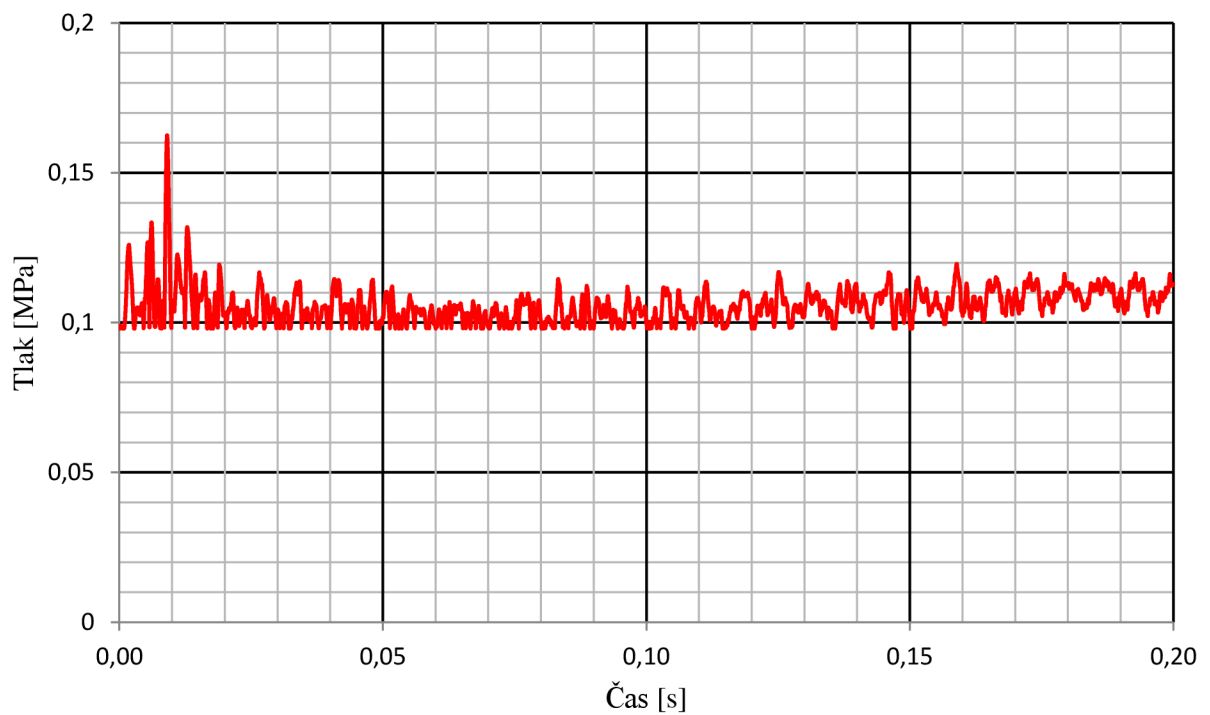
Z průběhu tlaku na čidle umístěném na membráně viz Obr.9-24 je možné přibližně určit dobu vybavení ochranné membrány. K porušení membrány při stanoveném tlaku vybavení membrány ($0,43\text{Mpa}$) došlo v čase: **2,2 ms**.

Průběh tlaku na ochranné membráně

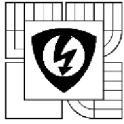


Obr. 9-24 Průběh tlaku na čidle tlaku – membrána

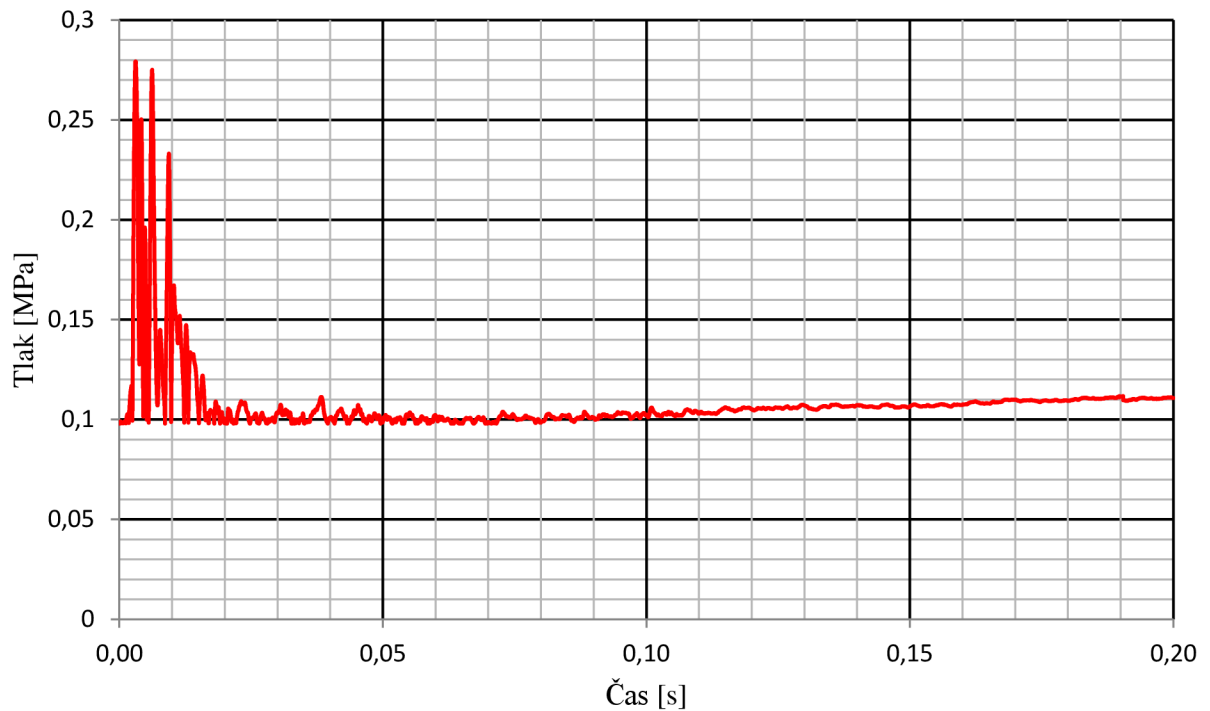
Průběh tlaku na předních dveřích rozváděče



Obr. 9-25 Průběh tlaku na čidle tlaku - přední dveře

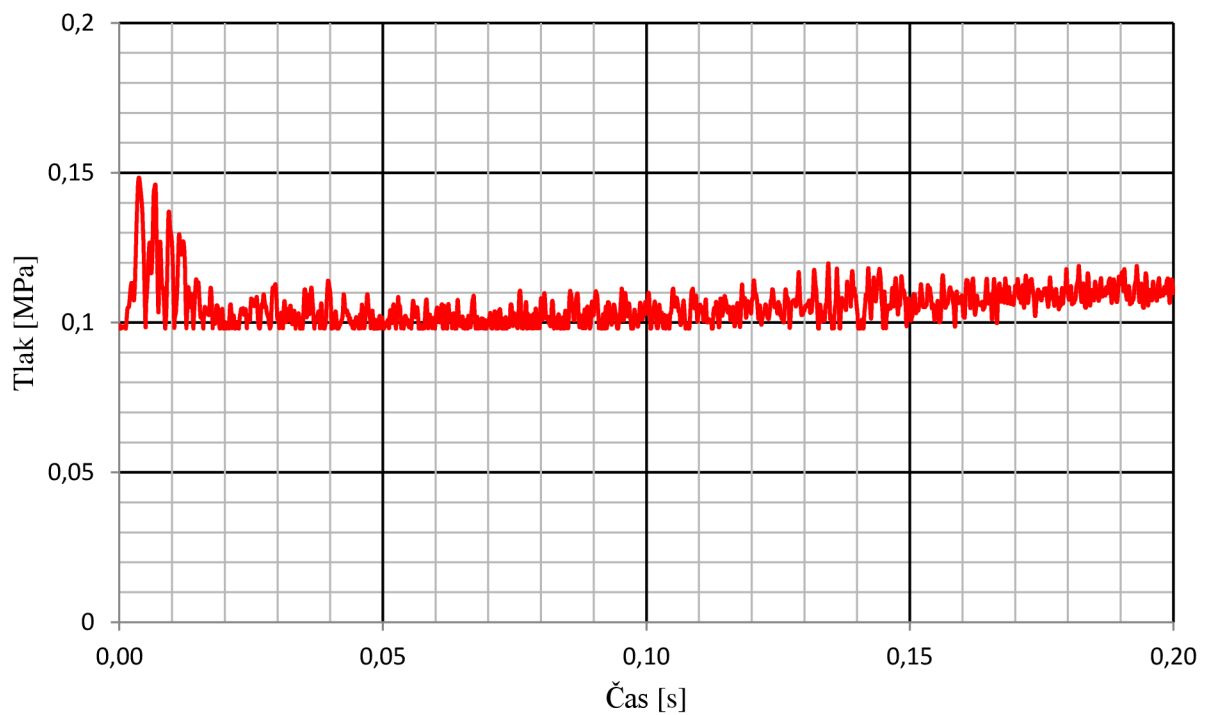


Průběh tlaku na zadní části rozváděče

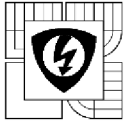


Obr. 9-26 Průběh tlaku na čidle tlaku - zadní část

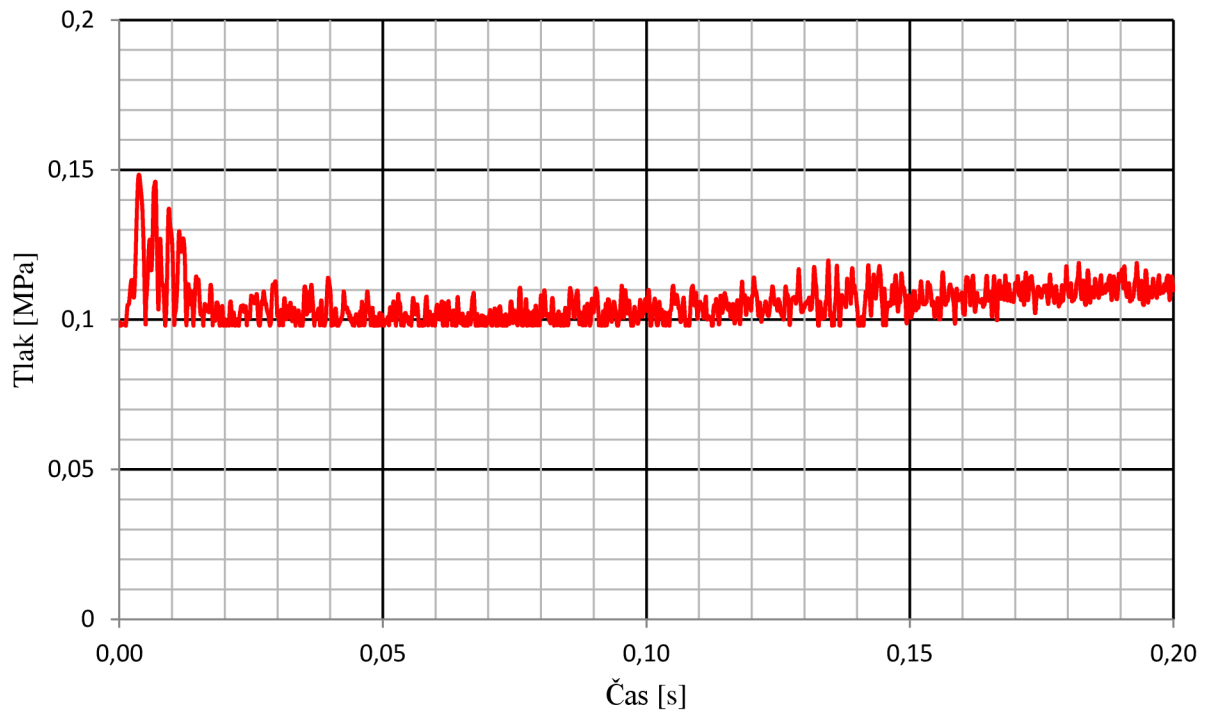
Průběh tlaku na pravém boku rozváděče



Obr. 9-27 Průběh tlaku na čidle tlaku - pravý bok

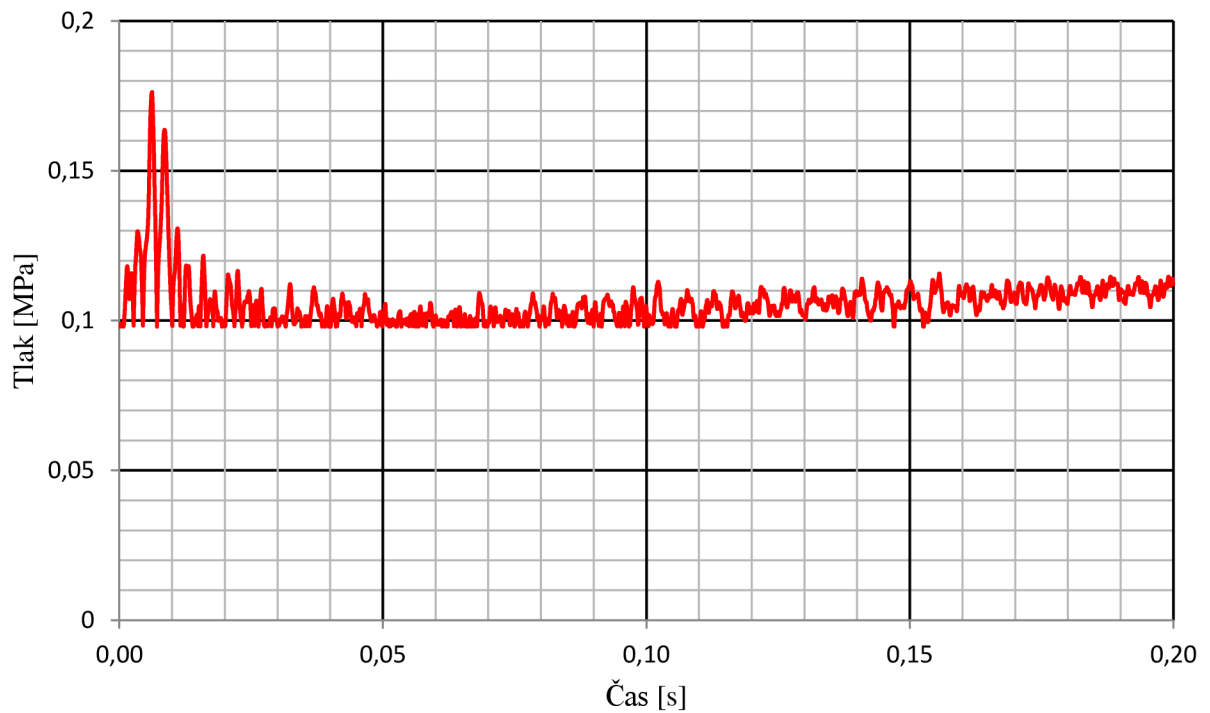


Průběh tlaku na levém boku rozváděče

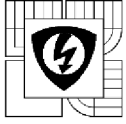


Obr. 9-28 Průběh tlaku na čidle tlaku - levý bok

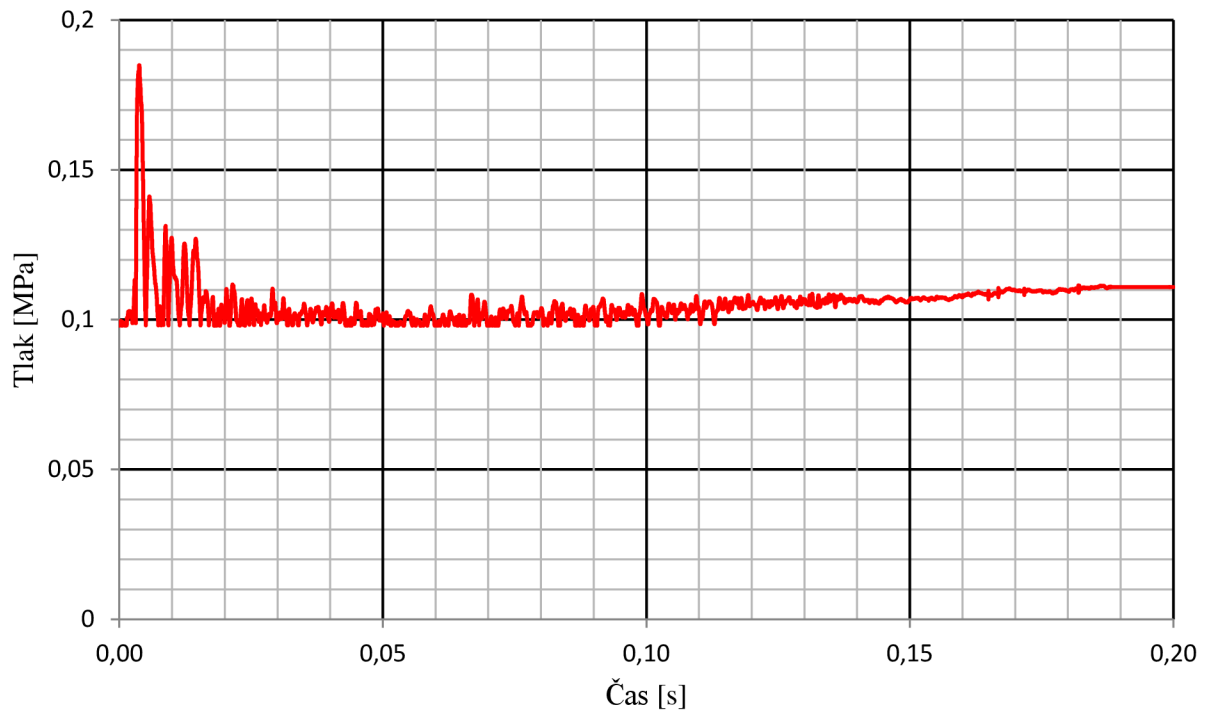
Průběh tlaku na vrchní části rozváděče



Obr. 9-29 Průběh tlaku na čidle tlaku - vrchní část



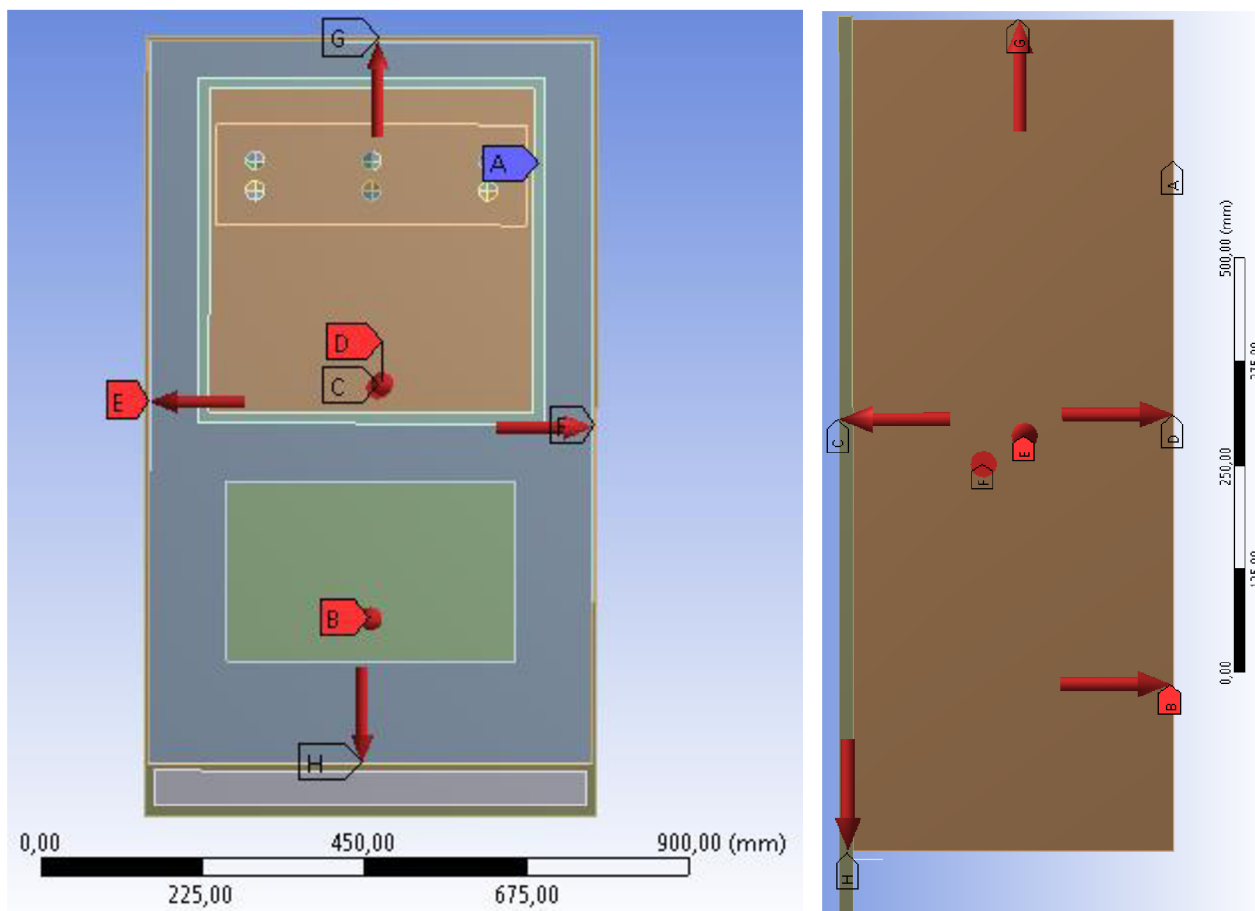
Průběh tlaku na spodní části rozváděče



Obr. 9-30 Průběh tlaku na čidle tlaku - spodní část

9.2.2 Statická analýza

Pro kontrolu dynamické analýzy byly aplikovány zjištěné hodnoty tlaků na jednotlivé části rozváděče z průběhů na Obr. 9-24 – 30 na statický model. Pro kontrolu byl zvolen čas **9ms**. V tomto čase dochází k největší deformaci na předních dveřích rozváděče. Obr. 9-31 ukazuje statický model s definovanými hodnotami tlaku na jednotlivé části kostry rozváděče, odkazy značí místa tlakových sil. Více informací k velikostem sil použitých pro statickou analýzu je možné nalézt v legendě pod obrázkem.

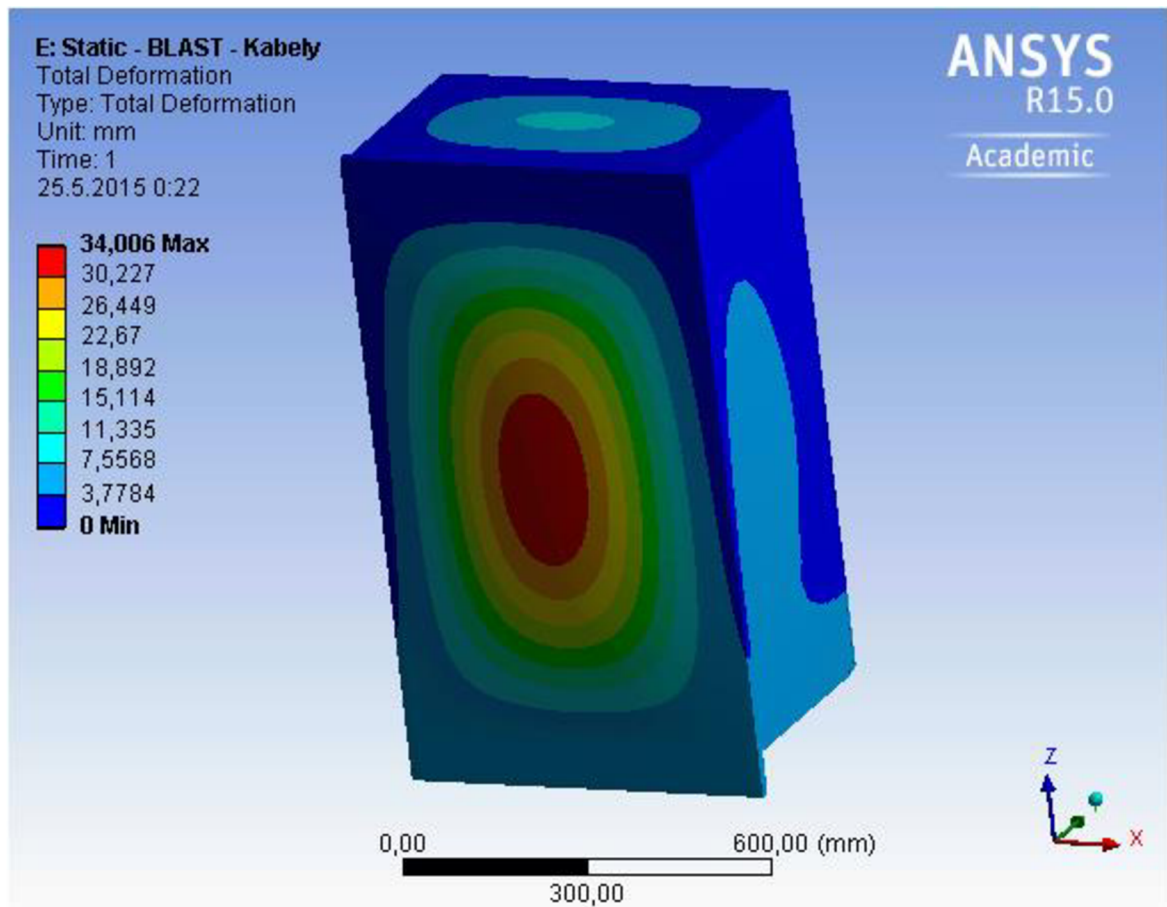


Obr. 9-31 Model rozváděče 1XD1 525-3AA s definovanými hodnotami statických tlaků

Legenda:

A – Uchytení rozváděče ke stroji	
B – Membrána:	- MPa
C – Přední dveře:	0,049 MPa
D – Zadní část:	0,035 MPa
E – Pravý bok:	0,003 MPa
F – Levý bok:	0,003 MPa
G – Vrchní část:	0,060 MPa
H – Spodní část:	0,030 MPa

Statický model níže zobrazuje výslednou deformaci skříně rozváděče 1XD1 525-3AA v čase 9ms zjištěnou ze statické analýzy.



Obr. 9-32 Výsledná deformace rozváděče 1XD1 525-3AA při zadaných podmínkách zjištěná ze statické analýzy pro čas 9ms

Velikosti deformací jednotlivých částí kostry skříně rozváděče v čase 9ms:

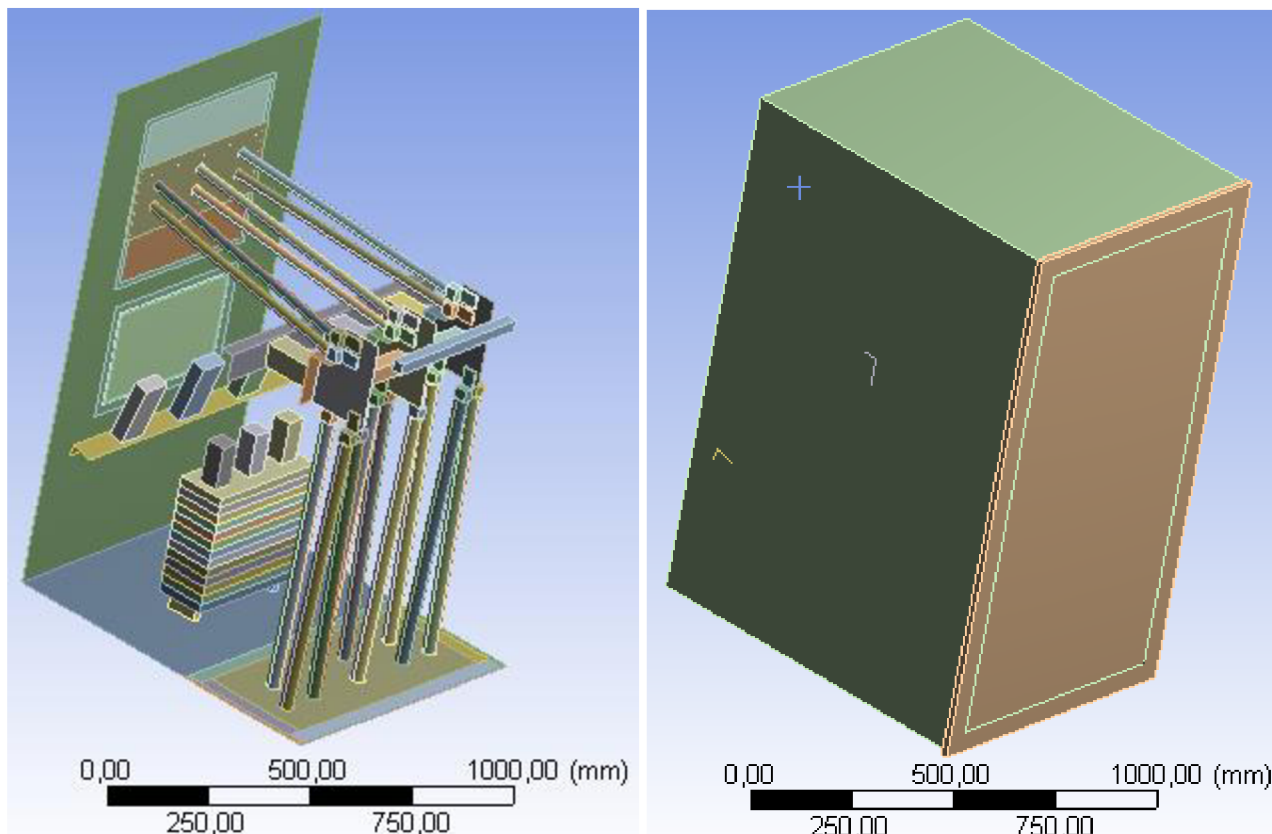
- Přední dveře: **34,0 mm**
- Zadní část: **4,6 mm**
- Pravý bok: **5,5 mm**
- Levý bok: **5,5 mm**
- Vrchní část: **8,1 mm**
- Spodní část: **5,0 mm**

Hodnoty se vůči dynamické analýze mírně liší. Důvodem je především využití hodnot meze kluzu a tgE ve výpočtu dynamické analýzy. Tyto hodnoty značně ovlivní vlastnosti materiálu pro výpočet.

9.3 Rozváděč 1XF4 525-3EB

9.3.1 Dynamická analýza

Na Obr. 9-33 je zobrazen model rozváděče 1XF4 525-3EB vytvořený pro simulace v prostředí ANSYS Workbench. Jednotlivé prvky byly zjednodušeny a převedeny na plošné útvary. Uchycení jednotlivých prvků bylo řešeno za pomoci Bonded kontaktů a kontaktů Mesh Connection.



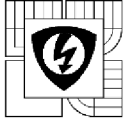
Obr. 9-33 Model skříně rozváděče 1XF4 525-3EB v prostředí ANSYS Workbench

Materiálové charakteristiky prvků použitých pro výpočet:

Jednotlivým prvkům rozváděče byly přiřazeny jejich materiálové charakteristiky potřebné pro výpočet. U sledovaných bočních krytů rozváděče byly nastaveny plasticity materiálů a pro membránu byl nastaven přibližný předpokládaný tlak pro její vybavení vše viz níže.

Ocel:

- Modul pružnosti v tahu: $200\,000\text{ MPa}$
- Poissonovo číslo: $0,3 [-]$
- Hustota: 7850 kg/m^3
- Mez kluzu: 230 MPa
- tgE : $10\,000\text{ MPa}$



Mosaz:

- Modul pružnosti v tahu: $125\ 000\ \text{MPa}$
- Poissonovo číslo: $0,33\ [-]$
- Hustota: $8400\ \text{kg/m}^3$
- Mez kluzu: $150\ \text{MPa}$
- tgE : $5\ 000\ \text{MPa}$

Membrána:

- Modul pružnosti v tahu: $125\ 000\ \text{MPa}$
- Poissonovo číslo: $0,33\ [-]$
- Hustota: $8400\ \text{kg/m}^3$
- Mez kluzu: $150\ \text{MPa}$
- tgE : $5\ 000\ \text{MPa}$
- Tlak potřebný pro vybavení: $0,43\ \text{MPa}$

Sklotextit:

- Modul pružnosti v tahu: $17\ 200\ \text{MPa}$
- Poissonovo číslo: $0,41\ [-]$
- Hustota: $1700\ \text{kg/m}^3$

Měď:

- Modul pružnosti v tahu: $117\ 000\ \text{MPa}$
- Poissonovo číslo: $0,35\ [-]$
- Hustota: $8960\ \text{kg/m}^3$

Tvrzený epoxid:

- Modul pružnosti v tahu: $20\ 000\ \text{MPa}$
- Poissonovo číslo: $0,33\ [-]$
- Hustota: $1800\ \text{kg/m}^3$

Keramika:

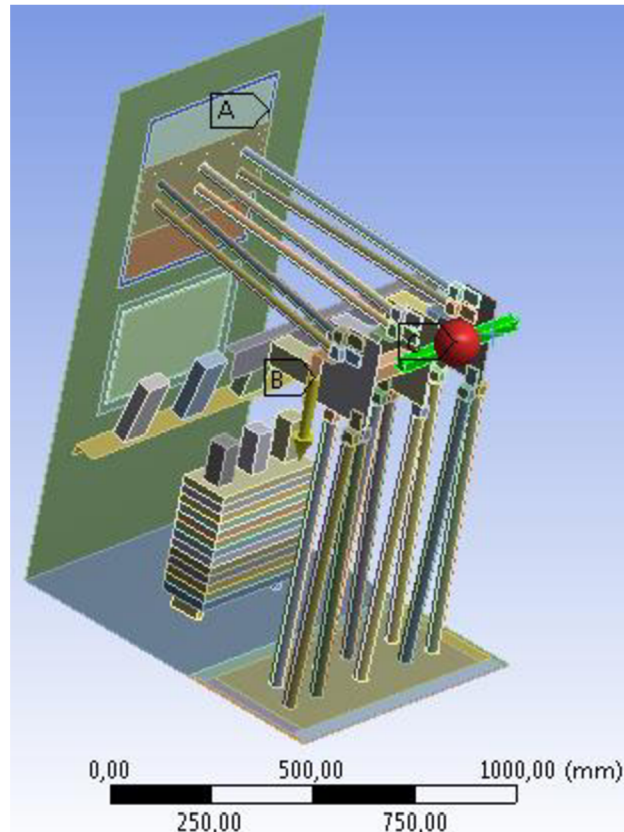
- Modul pružnosti v tahu: $360\ 000\ \text{MPa}$
- Poissonovo číslo: $0,2\ [-]$
- Hustota: $1800\ \text{kg/m}^3$

Kabely:

- Modul pružnosti v tahu: $500\ \text{MPa}$
- Poissonovo číslo: $0,3\ [-]$
- Hustota: $3300\ \text{kg/m}^3$

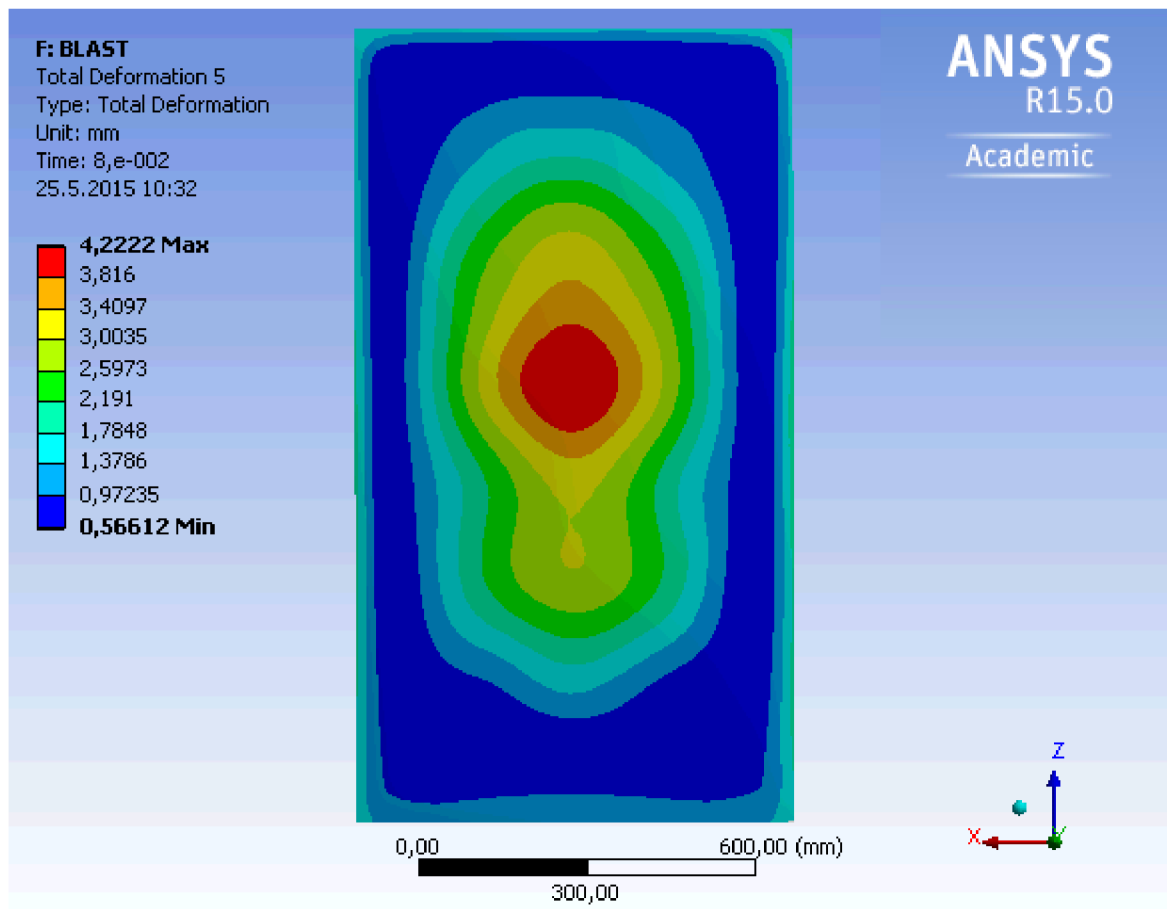
Dále byl pro simulaci využit atmosférický vzduch jako obklopující element prostředí okolo rozváděče a výbušnina. Výbušnina byla nastavena na stabilní hodnotu výbuchu pro celý průběh simulace ($0 - 0,2\ \text{s}$). Její hodnota byla stanovena z výpočtu viz podkapitola 9.1 (Výpočet obloukové energie) a hmotnosti výbušniny. Hodnota použité výbušniny oproti výpočtu byla dále navýšena o bezpečnostní koeficient 10% . Výsledná velikost výbušniny pro simulaci u rozváděčové skříně 1XF4 525-3EB činila: $E_{vyb2} = 1,89 \cdot 10^7\ \text{J/kg}$.

Dynamická analýza byla provedena pomocí analytického systému Explicit Dynamics v prostředí ANSYS Workbench. Obr. 9-34 ukazuje konfiguraci simulace před samotným započítím. Odkaz A značí pevnou podporu, v tomto místě kde je rozváděč připevněn na kostru stroje. Odkaz B značí umístění těžiště s gravitačním tíhovým zatížením. Následně odkaz C značí místo detonačního bodu, umístění detonačního bodu je řešeno v prostředí výbušniny viz sytě zelený prvek. Místo výbušniny, tedy **místo vzniku oblouku, bylo zvoleno ve vrchní části u vývodů.**



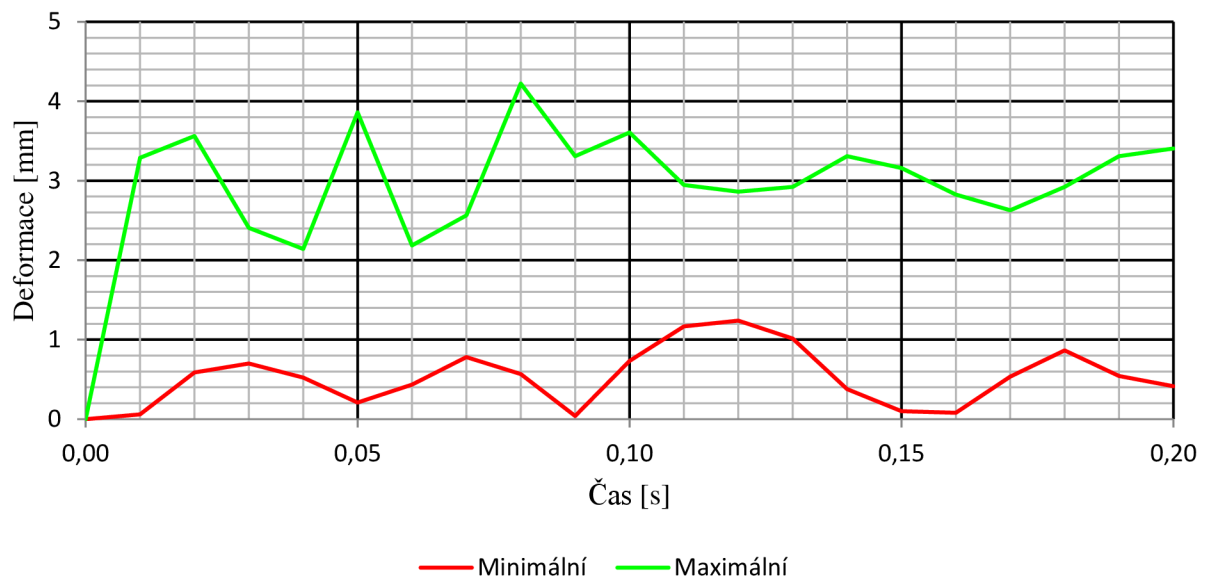
Obr. 9-34 Model skříně rozváděče 1XF4 525-3EB připravený k dynamické analýze

Výsledkem dynamické analýzy jsou animace působení tlaku ve zkoumaném zařízení s hodnotami deformací v čase. Působení tlaku bylo zkoumáno na jednotlivých částech kostry rozváděče 1XF4 525-3EB. Animace jsou uvedeny v příloženém DVD ve formátu AVI. Zjištěné maximální deformace jednotlivých zkoumaných ploch lze nalézt na dalších stranách.

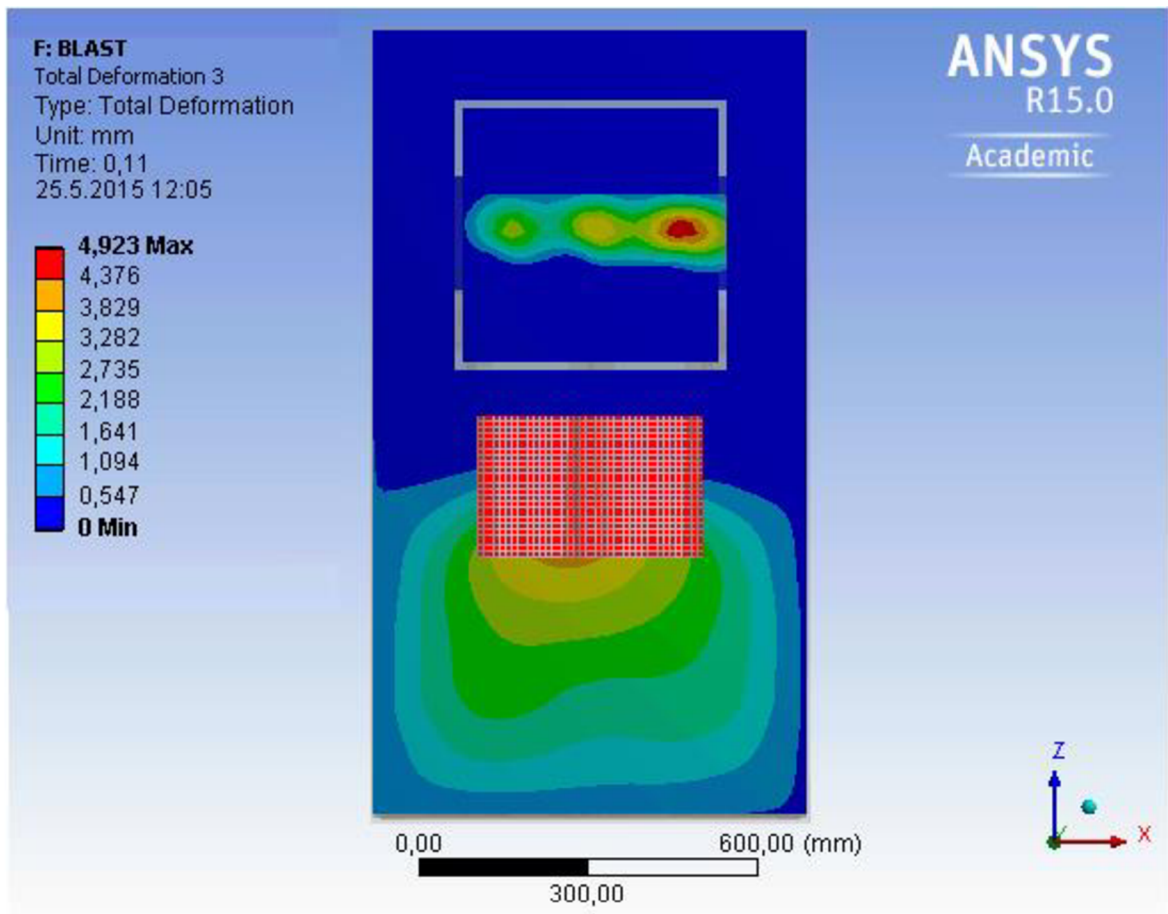


Obr. 9-35 Maximální deformace předních dveří rozváděče v milimetrech

Průběh maximální a minimální deformace předních dveří rozváděče v čase

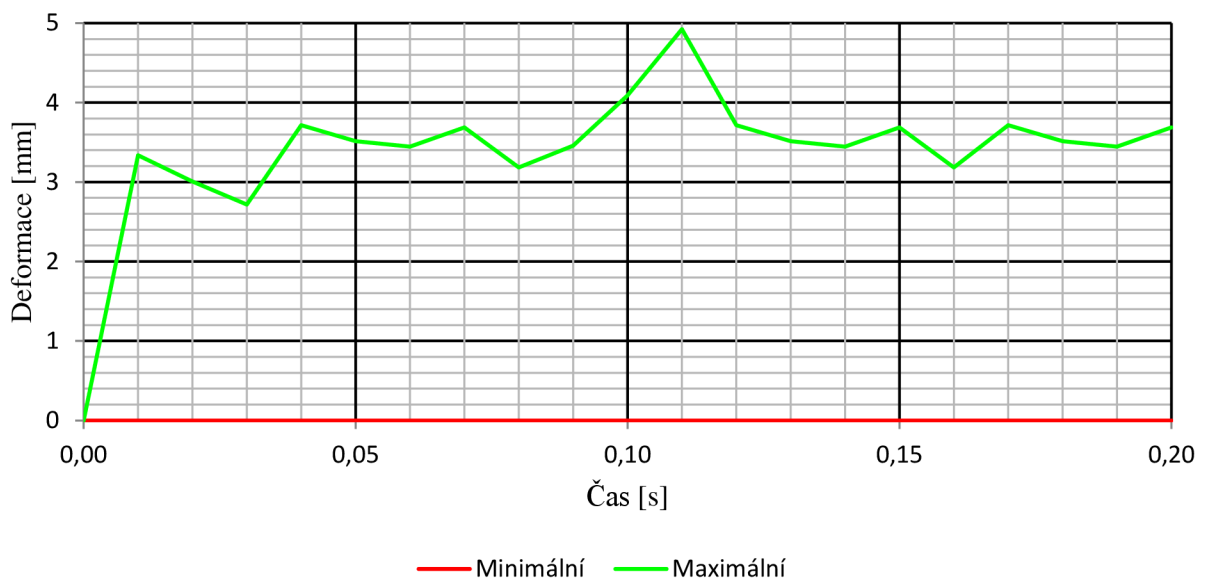


Obr. 9-36 Průběh maximální a minimální deformace předních dveří rozváděče v čase

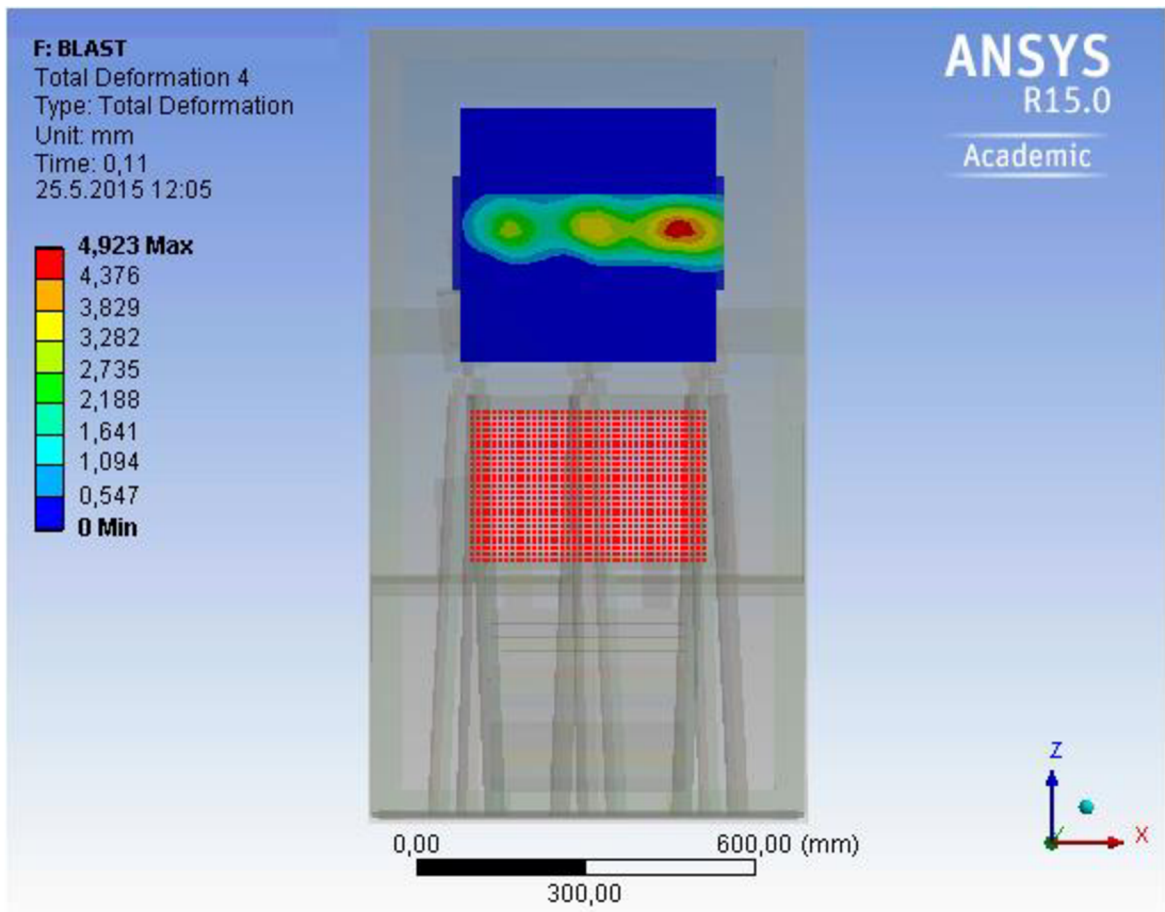


Obr. 9-37 Maximální deformace zadní části rozváděče v milimetrech

Průběh maximální a minimální deformace zadní části rozváděče v čase

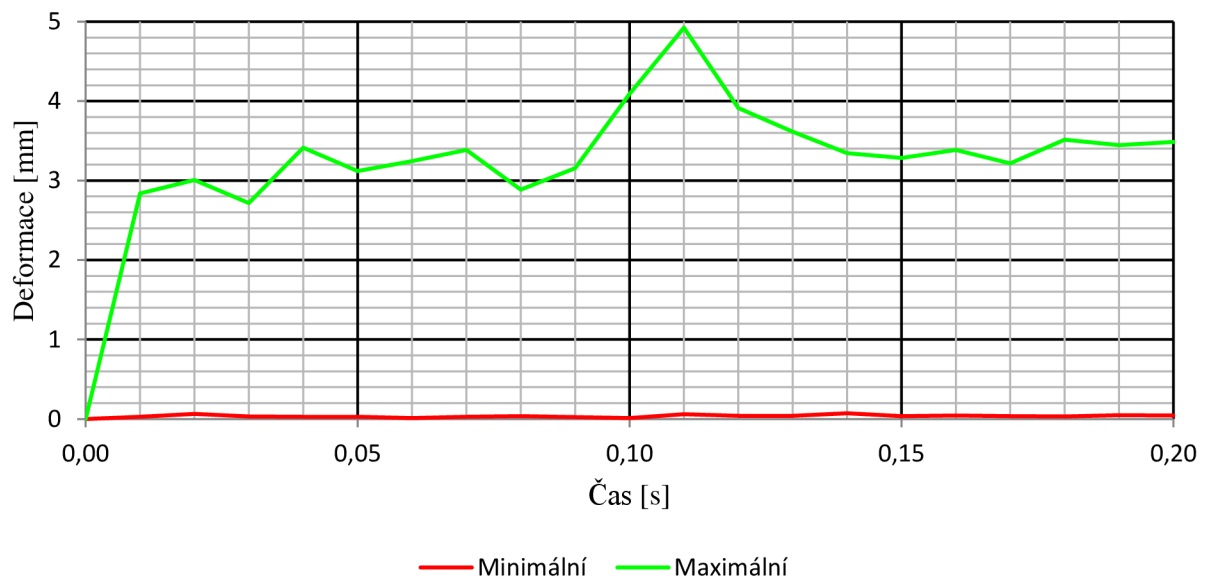


Obr. 9-38 Průběh maximální a minimální deformace zadní části rozváděče v čase

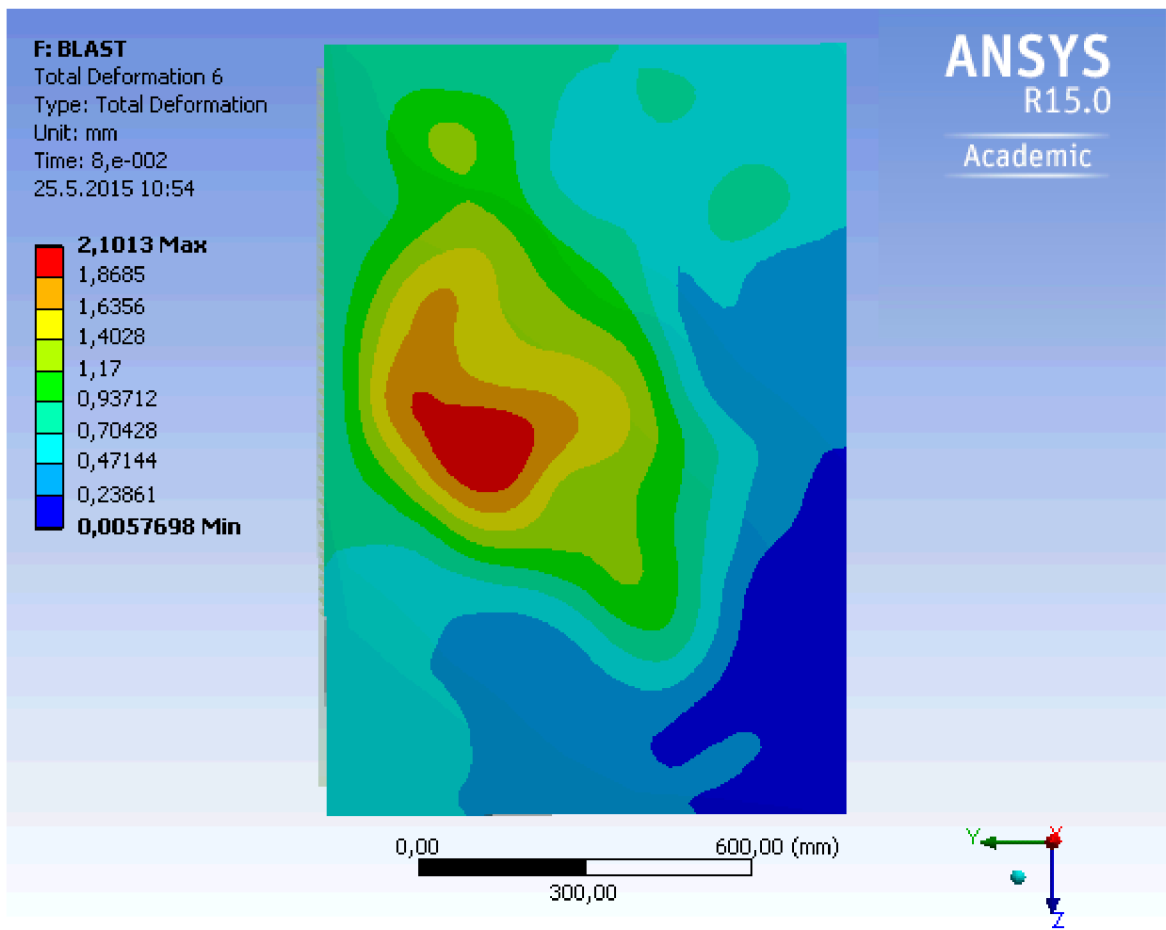


Obr. 9-39 Maximální deformace zadní části rozváděče v milimetrech – detail

Průběh maximální a minimální deformace zadní části rozváděče v čase - detail

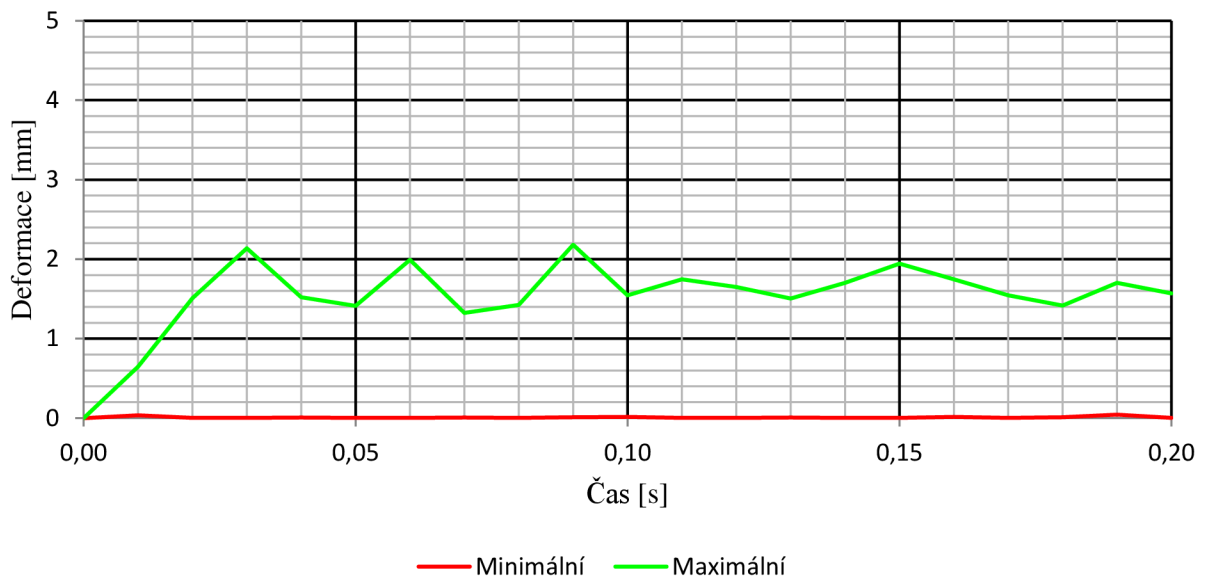


Obr. 9-40 Průběh maximální a minimální deformace zadní části rozváděče v čase - detail

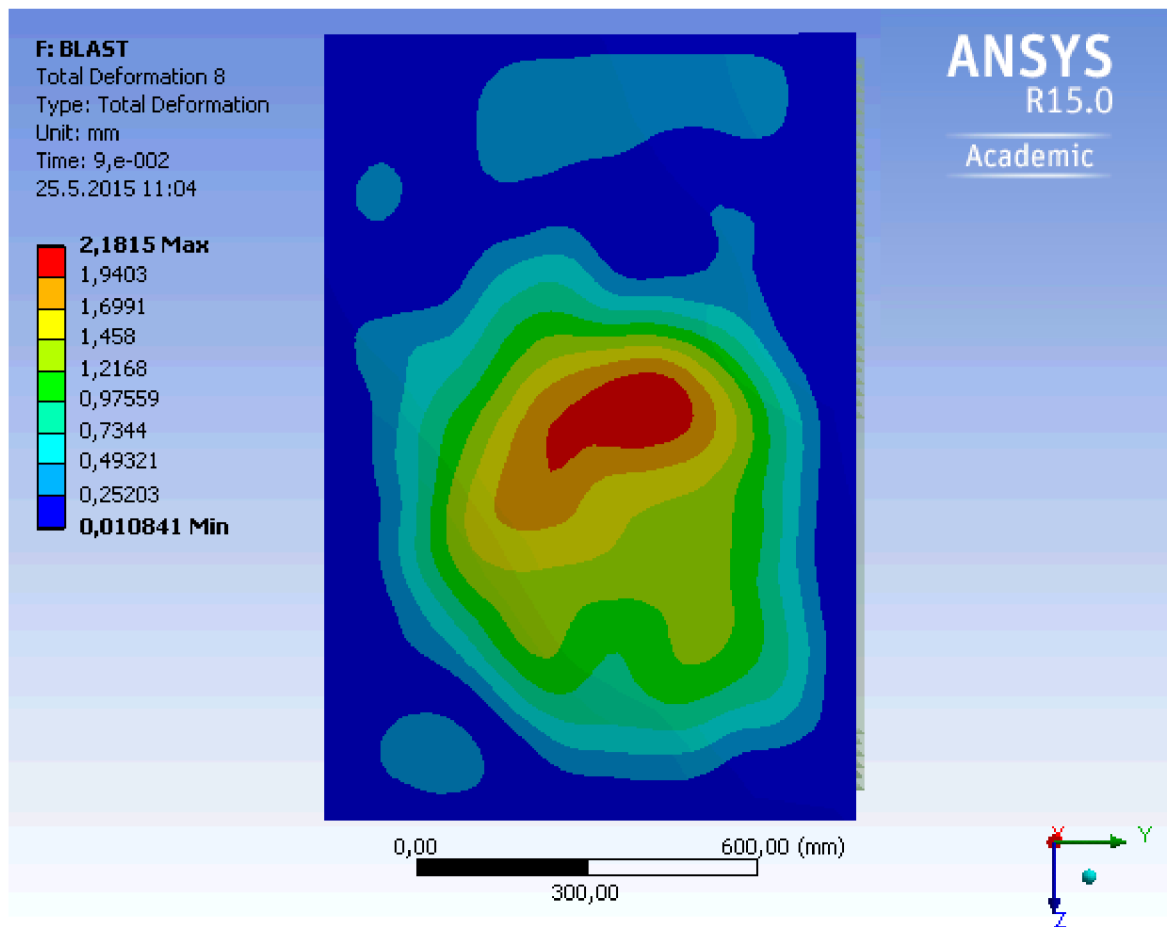


Obr. 9-41 Maximální deformace pravého boku rozváděče v milimetrech

Průběh maximální a minimální deformace pravého boku rozváděče v čase

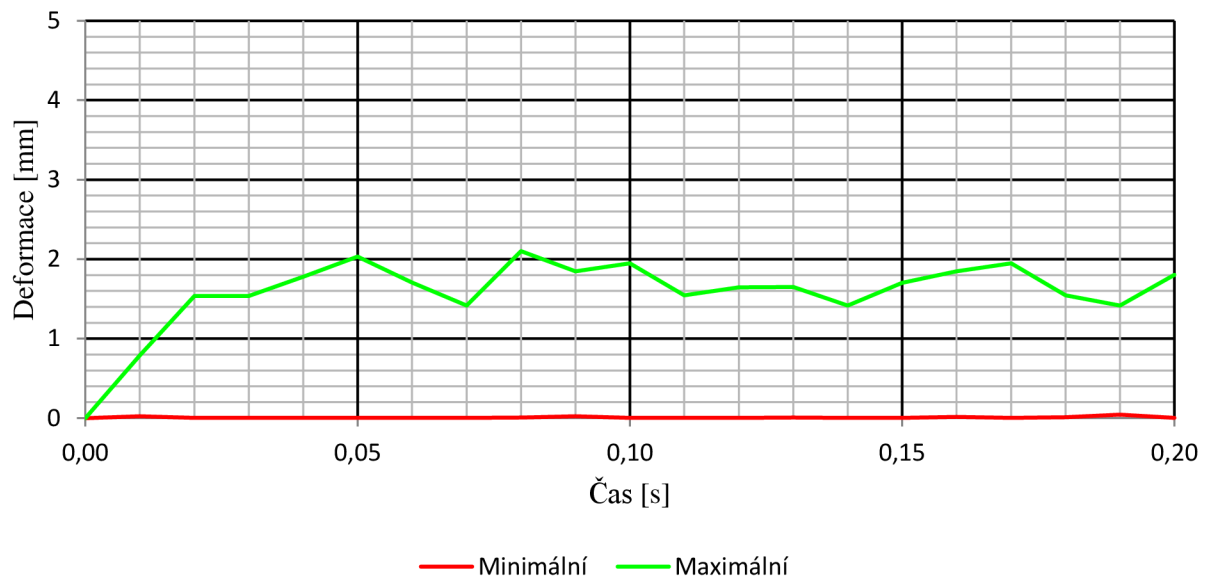


Obr. 9-42 Průběh maximální a minimální deformace pravého boku rozváděče v čase

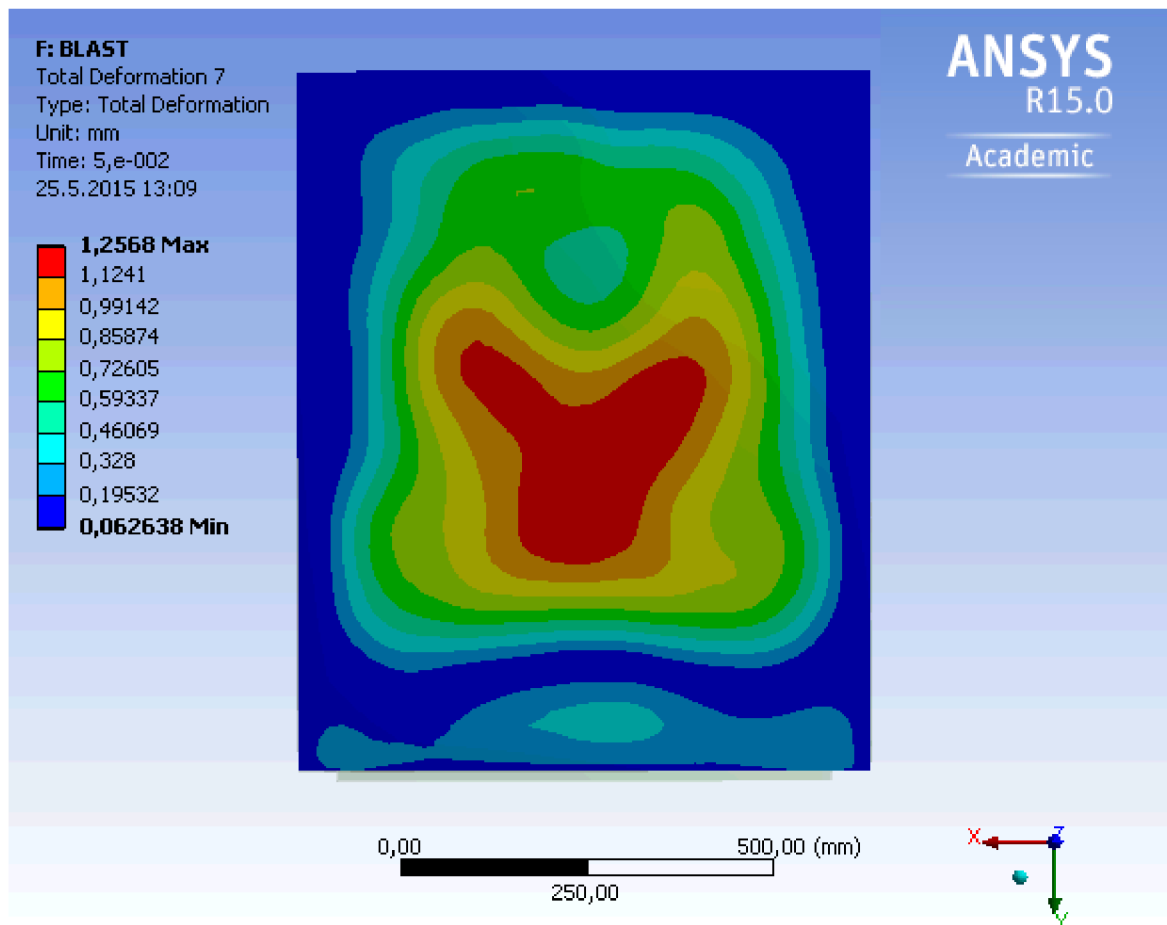


Obr. 9-43 Maximální deformace levého boku rozváděče v milimetrech

Průběh maximální a minimální deformace levého boku rozváděče
 v čase

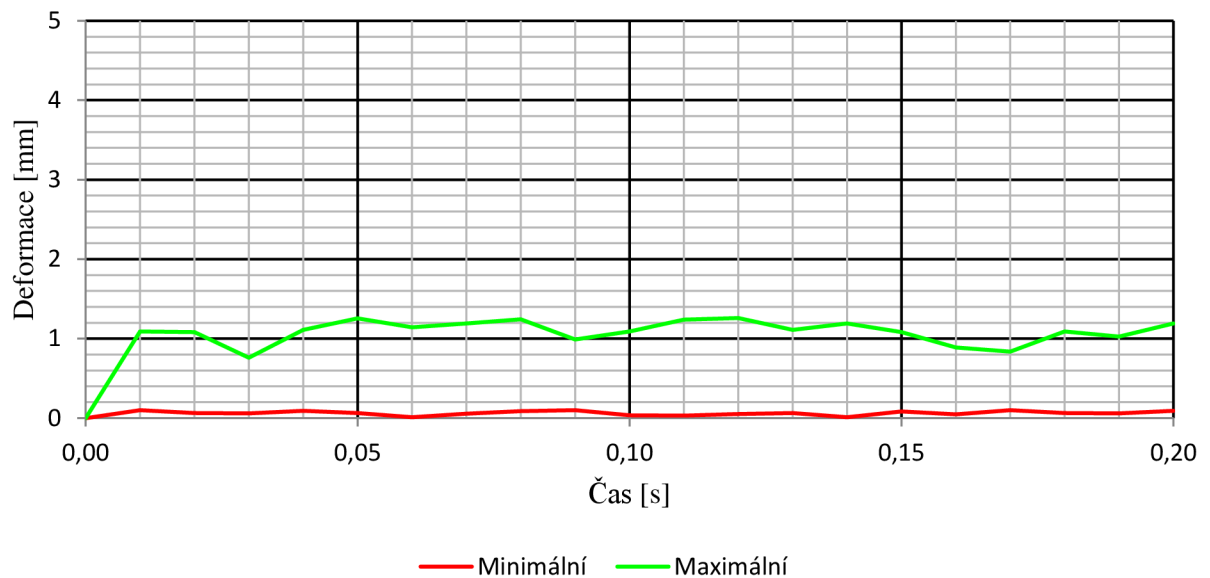


Obr. 9-44 Průběh maximální a minimální deformace levého boku rozváděče v čase

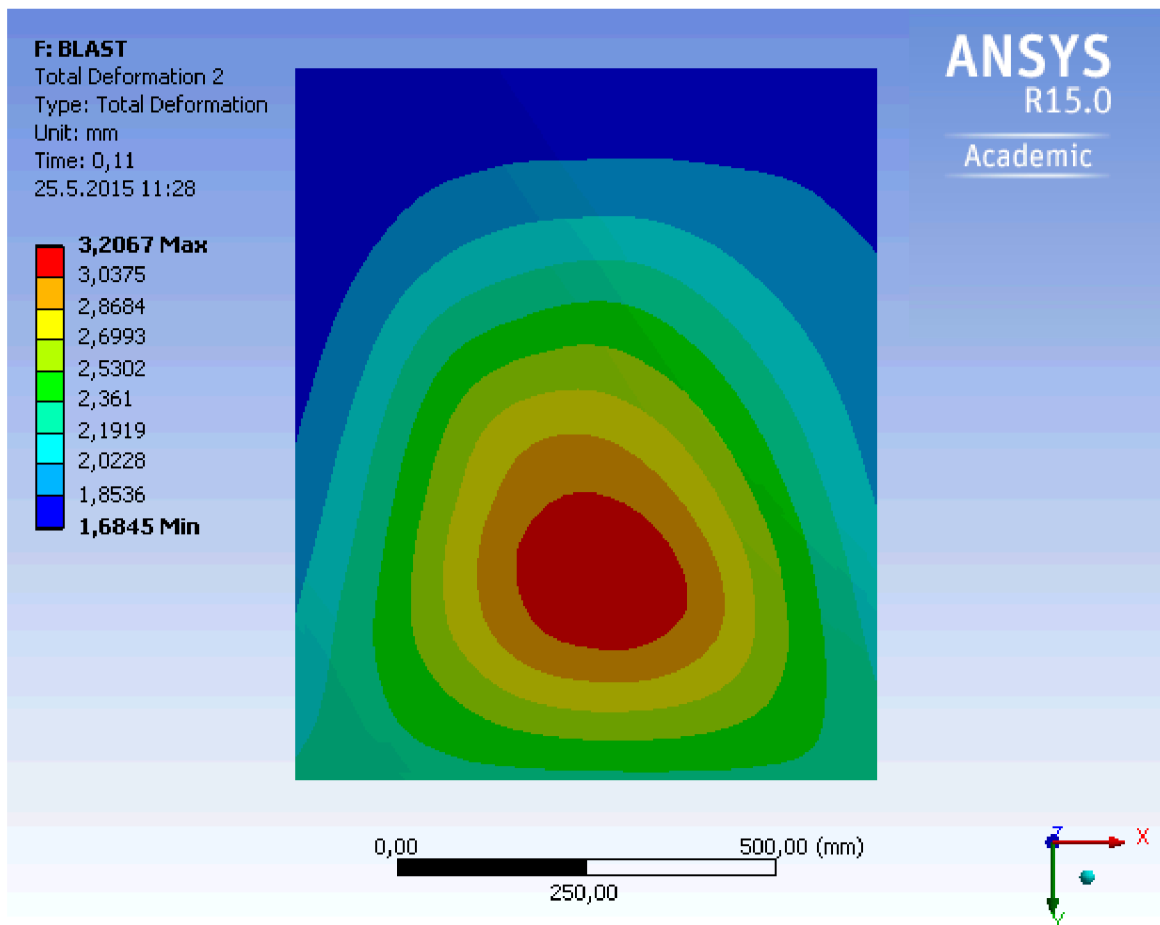


Obr. 9-45 Maximální deformace vrchní části rozváděče v milimetrech

Průběh maximální a minimální deformace vrchní části rozváděče v čase

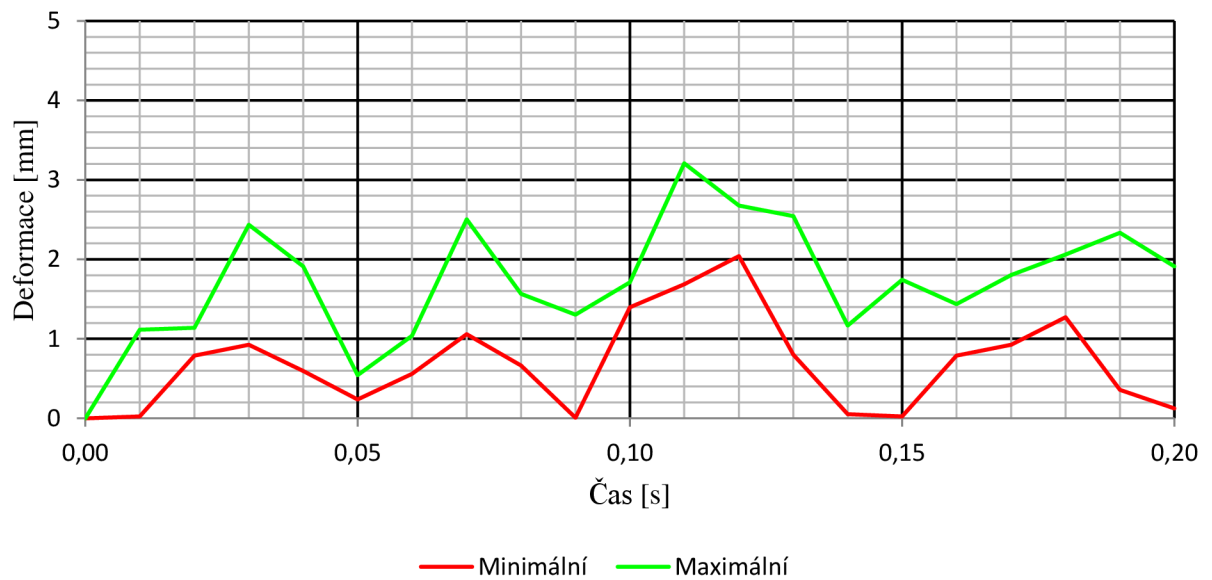


Obr. 9-46 Průběh maximální a minimální deformace vrchní části rozváděče v čase



Obr. 9-47 Maximální deformace spodní části rozváděče v milimetrech

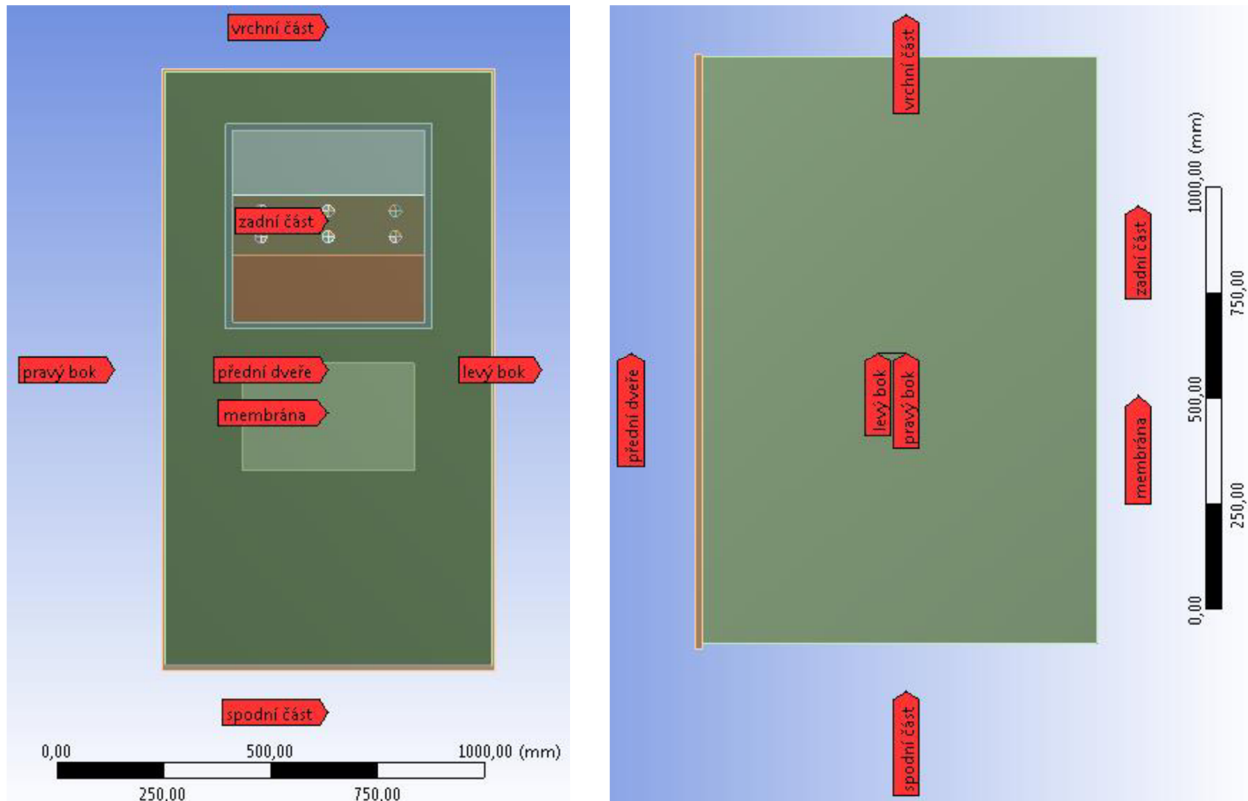
Průběh maximální a minimální deformace spodní části rozváděče v čase



Obr. 9-48 Průběh maximální a minimální deformace spodní části rozváděče v čase

Průběhy tlaků na jednotlivých částech skříně rozváděče:

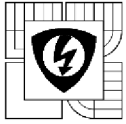
Na zkoumaných místech mimo rozváděč byly umístěny snímače tlaku, jejich rozložení je možné nalézt na Obr. 9-49. Pomocí těchto snímačů je možné určit přibližnou podobu tlaku působící na jednotlivé deformované části skříně rozváděče.



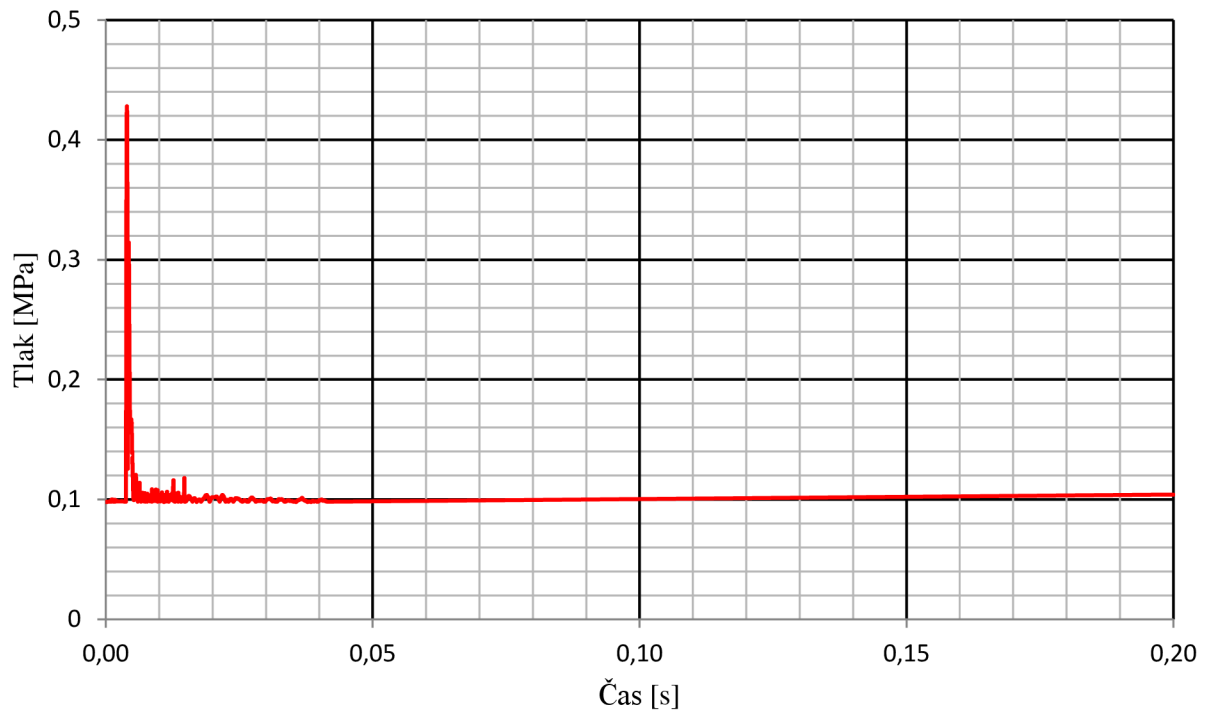
Obr. 9-49 Rozmístění snímačů tlaku pro simulaci u rozváděče 1XF4 525-3EB

Z důvodu vysoké časové náročnosti tohoto výpočtu byla vynesena pouze podoba průběhu tlaku na čidle tlaku umístěném u ochranné membrány. Průběhy tlaku pro další měřené části rozváděče je možné zpětně odsimulovat za pomoci archivu simulace umístěného na příloženém DVD k této práci.

Z průběhu tlaku na čidle umístěném na membráně viz Obr.9-50 je možné přibližně určit dobu vybavení ochranné membrány. K porušení membrány při stanoveném tlaku vybavení membrány ($0,43\text{MPa}$) došlo přibližně v čase: **3,9 ms**.



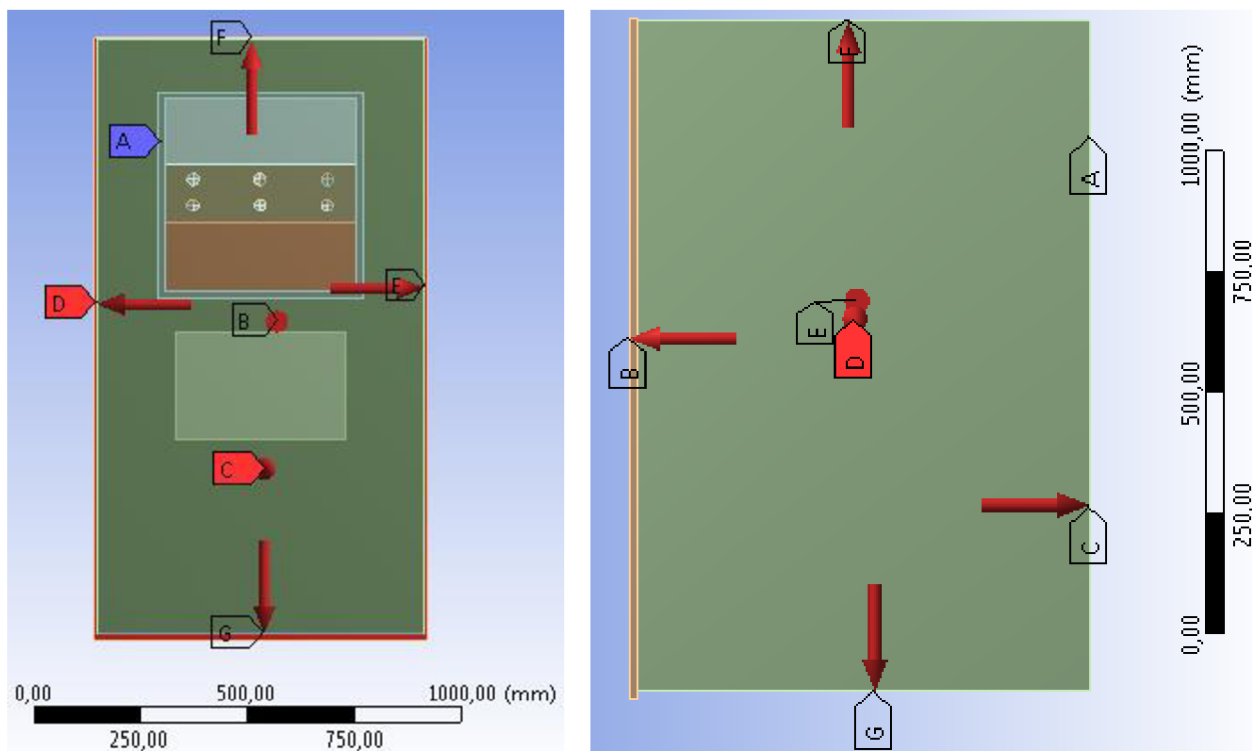
Průběh tlaku na ochranné membráně



Obr. 9-50 Průběh tlaku na čidle tlaku – membrána

9.3.2 Statická analýza

Obr. 9-51 ukazuje statický model s definovanými hodnotami tlaku na jednotlivé části kostry rozváděče, odkazy značí místa tlakových sil. Více informací k velikostem sil použitých pro statickou analýzu je možné nalézt v legendě pod obrázkem.

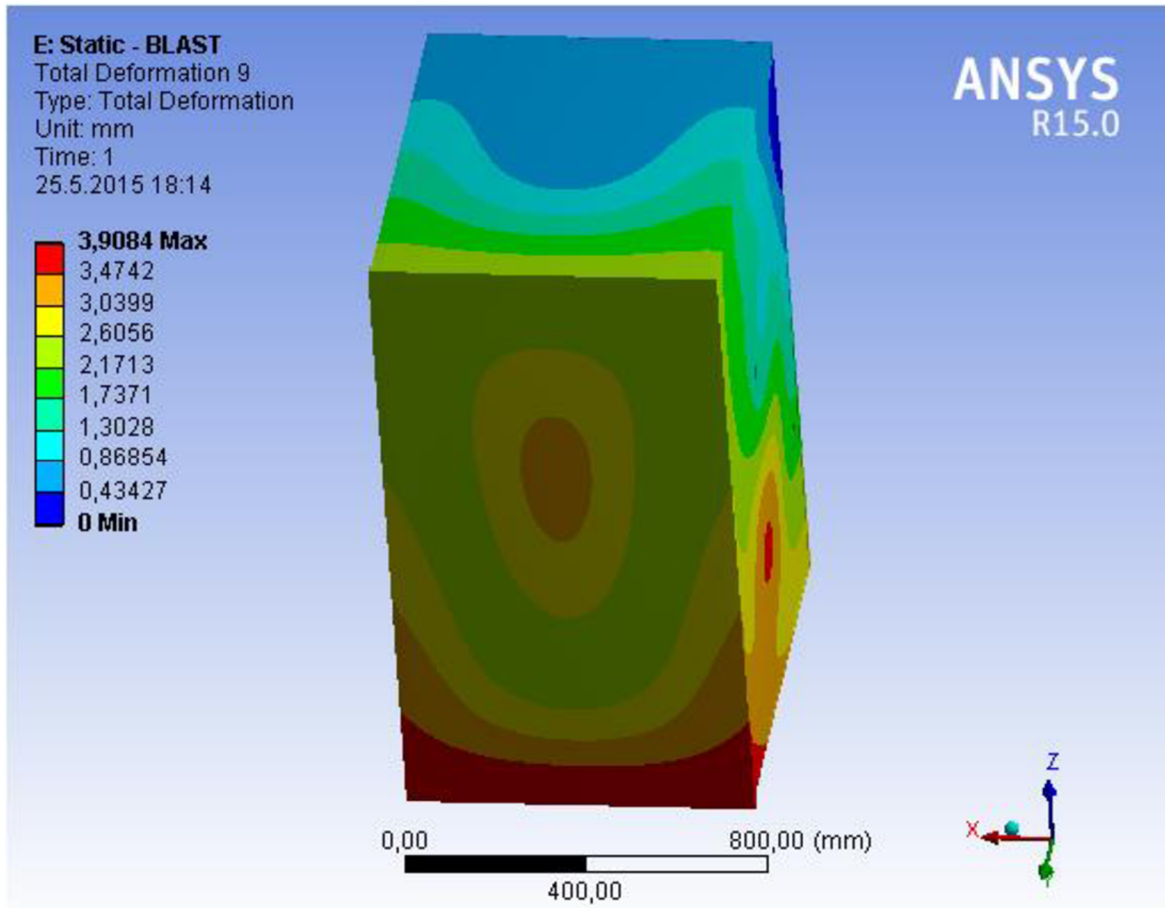


Obr. 9-51 Model rozváděče 1XF4 525-3EB s definovanými hodnotami statických tlaků

Legenda:

- A – Uchycení rozváděče ke stroji
- B – Membrána: - MPa
- C – Přední dveře: $0,002 MPa$
- D – Zadní část: $0,007 MPa$
- E – Pravý bok: $0,002 MPa$
- F – Levý bok: $0,002 MPa$
- G – Vrchní část: $0,001 MPa$
- H – Spodní část: $0,003 MPa$

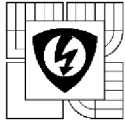
Statický model níže zobrazuje výslednou deformaci skříně rozváděče 1XF4 525-3EB zjištěnou ze statické analýzy při daných vstupních parametrech. U statické analýzy je nutné brát v potaz, že model nepracuje s hodnotami meze kluzu a $\text{tg}E$, které značně ovlivní vlastnosti a chování materiálu pro výpočet. Hodnoty z dynamické a statické analýzy se budou odlišné.



Obr. 9-52 Výsledná deformace rozváděče 1XF4 525-3EB při zadaných podmínkách zjištěná ze statické analýzy

Velikosti deformací jednotlivých částí kostry skříně rozváděče při zadaných podmínkách:

- Přední dveře: **3,9 mm**
- Zadní část: **3,0 mm**
- Pravý bok: **3,8 mm**
- Levý bok: **3,8 mm**
- Vrchní část: **2,5 mm**
- Spodní část: **3,8 mm**



10 ZHODNOCENÍ STATICKÉ A DYNAMICKÉ KONTROLY NA PŮSOBENÍ TLAKŮ NA KOSTRU ZAŘÍZENÍ VZNIKLÉHO PŘI OBLOUKOVÉM ZKRATU

10.1 Rozváděč 1XD1 525-3AA

Porovnáním výsledků dosažených ze statické a dynamické analýzy rozváděče uvedených v podkapitole 9.2 bylo možné stanovit následující:

Největší hodnoty deformací jednotlivých částí kostry skříně rozváděče:

- Přední dveře: *38,9 mm*
- Zadní část: *13,7 mm*
- Pravý bok: *22,8 mm*
- Levý bok: *23,1 mm*
- Vrchní část: *14,9 mm*
- Spodní část: *15,3 mm*

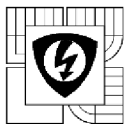
Čas, kdy dojde k protržení ochranné membrány: *2,2 ms*

Všechny vypočítané hodnoty značí o tom, že rozváděčová skříň 1XD1 525-3AA odolá zvoleným podmínkám obloukového zkratu: 3 fázový zkrat, *50kA* efektivní hodnota dynamického výdržného proudu, doba trvání zkratu *0,2s*.

Místo vzniku oblouku bráno ve vrchní části vývodů ve skříně rozváděče.

Hodnoty deformací jednotlivých částí kostry rozváděče je možné dále zmenšit změnou tloušťky ochranné membrány, pro analýzu brána membrána tloušťky *0,32mm*; materiál *CuZn37*; tlak potřebný pro protržení membrány: *0,43MPa*.

Na přiloženém DVD je možné nalézt simulovanou animaci deformace rozvaděčové skříně v průběhu působení obloukového zkratu. Výsledek analýzy doporučuji ověřit v autorizované zkušebně (zkratovně) při zadaných parametrech analýzy.



10.2 Rozváděč 1XF4 525-3EB

Porovnáním výsledků dosažených ze statické a dynamické analýzy rozváděče uvedených v podkapitole 9.3 bylo možné stanovit následující:

Největší hodnoty deformací jednotlivých částí kostry skříně rozváděče:

- Přední dveře: *4,2 mm*
- Zadní část: *4,9 mm*
- Pravý bok: *2,1 mm*
- Levý bok: *2,2 mm*
- Vrchní část: *1,3 mm*
- Spodní část: *3,2 mm*

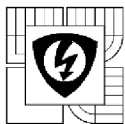
Čas, kdy dojde k protržení ochranné membrány: *3,9 ms*

Všechny vypočítané hodnoty značí o tom, že rozváděčová skříň 1XF4 525-3EB odolá zvoleným podmínkám obloukového zkratu: 3 fázový zkrat, 50kA efektivní hodnota dynamického výdržného proudu, doba trvání zkratu 0,2s.

Místo vzniku oblouku bráno ve vrchní části vývodů ve skříně rozváděče.

Hodnoty deformací jednotlivých částí kostry rozváděče je možné dále zmenšit změnou tloušťky ochranné membrány, pro analýzu brána membrána tloušťky 0,32mm; materiál CuZn37; tlak potřebný pro protržení membrány: 0,43MPa.

Na přiloženém DVD je možné nalézt simulovanou animaci deformace rozvaděčové skříně v průběhu působení obloukového zkratu. Výsledek analýzy doporučuji ověřit v autorizované zkušebně (zkratovně) při zadaných parametrech analýzy.



11 ZÁVĚR

V práci je probrána problematika elektrodynamických účinků proudu a dynamických účinků tlaku vzniklého při obloukovém zkratu na konkrétních konstrukčních zadáních rozváděčových skříní 11kV (1XD1 525-3AA) a 13,8kV (1XF4 525-3EB) v provedení do nevýbušného prostředí firmy Siemens Electric Machines Drásov s.r.o.. Více informací k daným skříním lze nalézt v kapitole 6. V práci jsou zkoumány dva možné poruchové stavy, které mohou na zařízeních během provozu nastat. Trojpolový (3 fázový) zkrat a úplný (3 fázový zemní) zkrat.

Kapitoly 2, 3 a 4 uvádí potřebnou teorii pro jednotlivé analýzy.

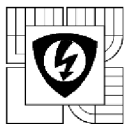
Kapitola 5 shrnuje požadavky zákazníka na zkoušky. Zákazníkem nastavené parametry pro analýzu: **jmenovitý dynamický výdržný proud 50kA, doba trvání zkratu 0,2s**. V analýze chování zkoumaných zařízení při 3 fázovém zemním zkratu bylo zkoumáno především uchycení vodivých cest, zda zvolené řešení uchycení odolá účinkům působících dynamických sil. Případně navrhnout možné úpravy, ale s podmínkou, aby zadané zařízení odolalo zkratu bez větších úhon. V analýze chování zkoumaných zařízení při 3 fázovém zkratu bylo zkoumáno chování tlaku na kostru testované rozváděčové skříně a dále byl požadavek na zhodnocení funkce ochranné membrány. Podmínkou zkoušky bylo, aby kostra testovaného zařízení odolala poruchovému stavu bez relativně velkých úhon.

Pomocí programu Ansoft Maxwell ve verzích 16.0 a novější verzi 2015, což jsou přední softwary pro simulaci používající k výpočtu metodiku konečných prvků (FEM), byly zjišťovány dynamické účinky zkratových proudů na rozváděč. Tato analýza odpovídala zpřesněnému výpočtu problematiky v souladu s normou ČSN EN 60865-1 ed. 2: Zkratové proudy – Výpočet účinků – Část 1: Definice a výpočetní metody, kapitola 1, bod d), protože postupy uvedené v této normě nejsou pro tento případ použitelné.

Nejvíce namáhané části rozváděčové skříně na elektrodynamické síly byly podpěrné izolátory přípojnic vývodů a izolátory mezi vývody. Byly zkoumány dvě varianty využití těchto izolátorů: 1) využití podpěrných izolátorů a izolátorů mezi vývody; 2) využití pouze podpěrných izolátorů. Obě tyto varianty prošly analýzou a výsledek analýzy stanovil, že všechny vypočítané vrcholové hodnoty, jak pro variantu rozváděčů s plným využitím izolátorů, tak i pro variantu, která neuvažuje využití izolátorů umístěných mezi fázemi vychází hodnoty pod dovolenými limity uvedenými od výrobce izolátorů. Více ke zjištěným výsledkům analýzy je možné nalézt v kapitole 8 (Zhodnocení statické a dynamické kontroly na účinky zkratového proudu (nadproudu) v zařízeních)

V další části simulací byl položen základ pro výpočet deformací kabelů umístěných v rozváděčové skříně. Tento výpočet může sloužit pro určení rozmístění tzv. “držáku kabelů”, který slouží k fixaci kabelů v rozváděčové skříně při působících nadproudech.

Pomocí programu ANSYS Workbench ve verzi 16.0 využívající opět metodiku výpočtu za pomoci metody konečných prvků bylo dále simulováno působení tlaku plynů na kostru rozváděče při obloukovém zkratu. Z doložených průběhů od Siemens Electric Machines Drásov s.r.o. bylo možné stanovit přibližnou hodnotu energie, která se přemění na tlak plynu, který bude deformovat kostru rozváděče, **$E_{plyn} = 6,04MJ$, od počátku zkratu po 0,2s**. Blíže k výpočtu je možné nalézt v podkapitole 9.1. **Místo vzniku oblouku bráno u obou rozváděčových skříní ve vrchní části u vývodů**. Výsledkem simulace byla animace působení tlaku ve skříně při obloukovém zkratu a dále podoba maximální deformace celého zařízení při poruchovém stavu.

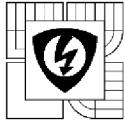


Ze simulací byly následně určeny jednotlivé velikosti deformací skříně rozváděče, průběhy tlaků na zkoumané části a dále byla určena přibližně doba vybavení ochranné membrány. Čas vybavení ochranné membrány u rozváděčové skříně 1XD1 525-3AA: **2,2ms**; u skříně 1XF4 525-3EB: **3,9ms**.

Všechny vypočítané hodnoty vypovídají o tom, že rozváděčové skříně odolají zvoleným podmínkám obloukového zkratu. Hodnoty deformací jednotlivých částí kostry rozváděče je možné dále zmenšit vhodnou změnou tloušťky ochranné membrány, pro analýzu brána membrána tloušťky 0,32mm; materiál CuZn37; tlak potřebný pro protržení membrány: 0,43MPa. Více ke zjištěným výsledkům analýzy je možné nalézt v kapitole 10 (Zhodnocení statické a dynamické kontroly na působení tlaků na kostru zařízení vzniklého při obloukovém zkratu).

Teoretické výpočty získané ze simulací doporučuji prakticky ověřit v autorizované zkušebně (zkratovně) při zadaných parametrech od zadavatele. Doporučuji změřit velikosti působících tlaků plynů na jednotlivé části rozváděče a dále změřit velikosti teplot během celého procesu. Pomocí rychloběžné kamery dále zobrazit šíření tlakových vln a účinky na konstrukci (části) skříně. Za pomoci této fyzické kontroly bude možné dále doladit postupy analýz a následně celý tento postup bude možné s vysokou přesností aplikovat na další možná řešení rozváděčových skříní.

K práci je přiloženo DVD, uvnitř tohoto DVD je možné nalézt modely rozváděčů použité pro simulace, tyto modely jsou uloženy ve formátu STEP. Pro jejich otevření je nutné vlastnit běžný 3D modelovací program. Na přiloženém DVD je dále možno nalézt archivy jednotlivých simulací na účinky zkratového proudu (nadproudu) v zařízeních ve formátu MXWL. Pro jejich otevření je nutné vlastnit nejlépe Ansoft Maxwell 2015 nebo jeho vyšší verzi. Dále DVD obsahuje archivy simulací působení tlaků na kostru zařízení vzniklého při obloukovém zkratu uložené ve formátu WBPZ. V archivu pro variantu skříně 1XD1 525-3AA je uvedena i varianta při využití tzv. Spot Weld kontaktů, tato varianta simuluje uchycení prvků za pomoci šroubových spojů. Varianta při využití Spot Weldů výrazně zesložití a prodlouží čas výpočtu, nebyla proto vybrána pro dynamickou analýzu. Pro otevření archivů ve formátu WBPZ je nutné vlastnit nejlépe ANSYS Workbench 16.0 a nebo jeho vyšší verzi. DVD dále obsahuje renderované animace analýzy obloukového zkratu působícího uvnitř rozváděčů ve formátu AVI. Jako poslední DVD obsahuje tento samotný dokument a prezentaci práce, která byla využita při obhajobě diplomové práce na VUT Fakultě elektrotechniky a komunikačních technologií (FEKT). Tyto soubory byly uloženy ve formátu PDF.



LITERATURA

- [1] ČSN EN 60865-1 ed. 2. *Zkratové proudy - Výpočet účinků - Část 1: Definice a výpočetní metody*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012. 44 p.
- [2] HOLUB, V, VOŠICKÝ, J. *Elektroenergetika*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1964, 316 stran.
- [3] HAVELKA, O, a kolektiv. *Elektrické přístroje*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1985, 440 stran.
- [4] MAKKI, Z. 3D CAD systémy používané v oblasti elektrických přístrojů . Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 54 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Valenta, Ph.D.
- [5] HAVELKA, O, a kolektiv. *Podklady a příklady pro navrhování elektrických přístrojů I*. VUT v Brně, 1985, 196 stran.
- [6] BUŠOV, B. *P9_Oblouk a jeho zhášení, principy, konstrukce vypínačů*. Přednáška. Brno, 2014.
- [7] BÁRTA, K, VOSTRACKÝ, Z, a kolektiv. *Spínací přístroje velmi vysokého napětí*. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1983, 448 stran.
- [8] KAPETANOVIĆ, M. *High voltage circuit breakers*. Sarajevo: ETF – Faculty of Electrotechnical Engineering, Sarajevo, 2011. ISBN 978-9958-629-39-6.
- [9] KOLLER, L, NOVÁK, B, TAMUS Á. *Electrical switching devices and insulators*. Budapest: Budapest University of Technology and Economics Department of Electric Power Engineering, 2011. BMEVIVEM174.
- [10] PHILLIPS, R, L. *The Behaviour of Dynamic Electric Arcs*. Department of Aeronautical and Astronautical Engineering of Michigan, 1964. ARL 64-150.
- [11] AUBRECHT, V, M BARTLOVA a O COUFAL. 2010. *Radiative emission from air thermal plasmas with vapour of Cu or W*. J. Phys. D: Appl. Phys. (43): 11. DOI: 10.1088/0022-3727/43/43/434007. Dostupné také z: stacks.iop.org/JPhysD/43/434007
- [12] Interní podklady poskytnuté firmou Siemens Electric Machines Drásov s.r.o.
- [13] Maxwell Online Help, ANSYS Electromagnetics Suite 16.0.0, 2014, SAS IP, Inc.
- [14] *Physics Forums* [online]. 2015 [cit. 2015-05-25]. Dostupné z: <https://www.physicsforums.com>
- [15] ANSYS® Help Viewer, Version 15.0.0, 2013, SAS IP, Inc.