



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

## SIMULACE OTEPLENÍ ROZVÁDĚČŮ VN

SIMULATION OF TEMPERATURE-RISE IN MV SWITCHGEAR ASSEMBLIES

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

**Bc. Alexej Kapalla**

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

**Ing. Jiří Valenta, Ph.D.**

**BRNO 2021**



# Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

**Student:** Bc. Alexej Kapalla

**ID:** 186435

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2020/21

**NÁZEV TÉMATU:**

## Simulace oteplení rozváděčů VN

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

1. Nastadujte požadavky norem týkající se problematiky oteplení rozváděčů vn a uveďte rozhodující vlivy na velikost oteplení.
2. Připravte vhodný geometrický 3D model rozváděče pro simulaci oteplení.
3. Provedte požadované simulace oteplení ve vhodném softwarovém prostředí.
4. Získané výsledky analyzujte.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

- [1] Havelka, O. a kol.: Elektrické přístroje, SNTL, 1985
- [2] Havelka, O. a kol.: Podklady a příklady pro navrhování elektrických přístrojů I, VUT v Brně, 1985
- [3] FERZIGER, J. H., PERIC, M.: Computational Methods for Fluid Dynamics, Springer-Verlag, Berlin, 2002, ISBN 3-540-42074-6
- [4] Soubor norem ČSN EN 62271

**Termín zadání:** 8.2.2021

**Termín odevzdání:** 24.5.2021

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

**doc. Ing. Ondřej Víték, Ph.D.**  
předseda rady studijního programu

**UPOZORNĚNÍ:**

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

## **Abstrakt**

Táto diplomová práca je zameraná na problematiku oteplenia rozvádzačov vysokého napätia. V práci sú uvedené popisy jednotlivých zariadení, ktoré rozvádzač obsahuje. Následne sa práca venuje teoretickým vzťahom opisujúcim oteplenie vodiča, rozoberá normatívne predpisy venujúce sa otepleniu VN rozvádzačov ako aj jednotlivé vplyvy ovplyvňujúce veľkosť výsledného oteplenia. Nasledujú kapitoly opisujúce úpravu 3D modelu rozvádzača pre potreby simulácie oteplenia a kapitoly venujúce sa samotnému simulačnému prostrediu. Ďalej sa práca venuje samotnej simulácii oteplenia rozvádzača VN a porovnáva výsledky simulácie s reálne nameranými hodnotami. Následne sú v práci uvedené výsledky simulácie oteplenia pri uvažovaní núteného chladenia rozvádzača. V poslednej časti sa práca venuje tvorbe excelového súboru, ktorý umožňuje predikovať výsledné oteplenie odpojovača na základe jeho prechodového odporu.

## **Kľúčové slová**

Oteplenie, rozvádzač, vysoké napätie, simulácia, nútené chladenie, prechodový odpor, metóda konečných objemov

## **Abstract**

This thesis focuses on the issue of heating of medium-voltage switchgears. The paper contains descriptions of the individual devices which the switchgear consists of. Furthermore, the paper examines the theoretical relations which describe the heating of the conductor. It also presents the normative regulations regarding the heating of MV switchgears as well as specific impacts which influence the final temperature-rise. This is followed by chapters that describe the refining of a 3D model of specific switchgear for purposes of simulating temperature-rise, further followed by chapters that look at the actual simulation environment. The thesis further focuses on the actual simulation of MV switchgear temperature-rise and it will compare the results of the simulation with measurements taken under real conditions. The thesis also includes results of simulated temperature-rise while taking into consideration the forced cooling of the switchgear. In the last part, it focuses on the creation of an excel file, which enables the prediction of final results for the temperature-rise of disconnector based on its contact resistance.

## **Keywords**

Heating, switchgear, medium voltage, simulation, forced cooling, contact resistance, finite volume method

## **Bibliografická citácia**

KAPALLA, Alexej. Simulace oteplení rozváděčů VN [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-03-25]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/134798>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce Jiří Valenta.

## Prehlásenie autora o pôvodnosti diela

<b>Jméno a příjmení studenta:</b>	Bc. Alexej Kapalla
<b>VUT ID studenta:</b>	186435
<b>Typ práce:</b>	Diplomová práce
<b>Akademický rok:</b>	2020/21
<b>Téma závěrečné práce:</b>	Simulace oteplení rozváděčů VN

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné 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 závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 20.5.2021

podpis autora

# Obsah

<b>ZOZNAM OBRÁZKOV .....</b>	<b>8</b>
<b>ZOZNAM TABULIEK .....</b>	<b>9</b>
<b>ÚVOD .....</b>	<b>10</b>
<b>1. ROZVÁDZAČE VYSOKÉHO NAPÄTIA .....</b>	<b>12</b>
1.1 ZÁKLADNÝ PRINCÍP FUNKCIE ROZVÁDZAČA VN .....	12
1.2 VÝKONOVÝ VN VYPÍNAČ.....	13
1.2.1 Prúdovodné časti výkonového vypínača .....	13
1.2.2 Izolačné prvky výkonového vypínača .....	14
1.2.3 Mechanizmus výkonového vypínača .....	14
1.2.4 Elektrický oblúk a zhášadlá .....	14
1.2.5 Výzbroj výkonového vypínača.....	15
1.3 ODPOJOVAČ .....	15
1.4 PRÍSTROJOVÉ TRANSFORMÁTORY PRÚDU A NAPÄTIA .....	17
1.5 PREVEDENIA VN ROZVÁDZAČOV .....	18
1.5.1 Kovové zapuzdrené rozvádzače.....	18
1.5.2 Konfigurácia kovového zapuzdreného VN rozvádzača .....	21
<b>2. TEPELNÉ ÚČINKY ELEKTRICKÉHO PRÚDU .....</b>	<b>23</b>
2.1 SPÔSOBY ŠÍRENIA TEPLA .....	23
2.2 OTEPLOVANIE PRÚDOVODNÉHO VODIČA .....	24
2.3 KRÁTKODOBÉ OTEPLENIE PRÚDOVODNÉHO VODIČA .....	26
2.4 ODPOR VODIČA .....	27
<b>3. OTEPLOVACIE SKÚŠKY .....</b>	<b>29</b>
3.1 SKÚŠKA TRVALÝM PRÚDOM.....	29
3.1.1 Umiestnenie skúšaného zariadenia.....	29
3.1.2 Skúšky hlavného obvodu .....	29
3.1.3 Skúška pomocných a radiacich zariadení.....	30
3.1.4 Meranie teploty pri skúške trvalým prúdom.....	30
3.1.5 Meranie odporu hlavného obvodu .....	32
3.1.6 Kritéria pre vyhodnotenie skúšky.....	32
<b>4. ROZVÁDZAČ IVEP.....</b>	<b>37</b>
<b>5. 3D MODEL ROZVÁDZAČA .....</b>	<b>39</b>
<b>6. VPLYVY OVPLYVŇUJÚCE VEĽKOSŤ OTEPLENIA ROZVÁDZAČA .....</b>	<b>44</b>
6.1 JAV SKINEFEKTU.....	45
6.2 ELEKTRICKÝ PRECHODOVÝ ODPOR .....	46
6.3 ZÁVISLOSŤ ODPORU POUŽITEJ MEDI NA TEPLOTE .....	47
<b>7. METÓDA KONEČNÝCH OBJEMOV .....</b>	<b>48</b>
<b>8. SOLIDWORKS FLOW SIMULATION.....</b>	<b>51</b>
8.1 NASTAVENIA SOLIDWORKS FLOW SIMULATION.....	51

<b>9.</b>	<b>SIMULÁCIA OTEPLENIA ROZVÁDZAČA VN .....</b>	<b>53</b>
9.1	PRVÁ SIMULÁCIA OTEPLENIA ROZVÁDZAČA VN .....	53
9.2	PRECHODOVÉ ODPORY PRÚDOVODNEJ DRÁHY ROZVÁDZAČA.....	58
9.3	DRUHÁ SIMULÁCIA OTEPLENIA ROZVÁDZAČA.....	61
9.4	DOSADENIE ELEKTRICKÝCH PRECHODOVÝCH ODPOROV DO SIMULÁCIE .....	61
9.5	POROVNANIE PRECHODOVÝCH ODPOROV ZO SIMULÁCIE A REÁLNE NAMERANÝCH PRECHODOVÝCH ODPOROV .....	64
9.6	VÝSLEDNÉ OTEPLENIE ROZVÁDZAČA PO DRUHEJ SIMULACÍI.....	66
<b>10.</b>	<b>SIMULÁCIA OTEPLENIA ROZVÁDZAČA S NÚTENÝM CHLADENÍM.....</b>	<b>72</b>
<b>11.</b>	<b>TVORBA VÝSTUPNEJ EXCELOVEJ TABUĽKY .....</b>	<b>79</b>
<b>12.</b>	<b>ZÁVER.....</b>	<b>83</b>
	<b>LITERATÚRA.....</b>	<b>84</b>
	<b>ZOZNAM SYMBOĽOV A SKRATIEK .....</b>	<b>86</b>

# ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. 1.1 Jednopolová schéma VN rozvádzača s prípojnicovým systémom A/B .....	13
Obr. 1.2 Nože uzemňovača po skrate .....	16
Obr. 1.3 Odpojovač VN pre vnútorné použitie .....	17
Obr. 1.4 Otvorené prevedenie rozvádzača .....	20
Obr. 1.5 Kovový zapuzdrený rozvádzač Siemens NXAir 550+ [5].....	20
Obr. 1.6 Rez kovovým zapuzdreným rozvádzačom [6] .....	22
Obr. 2.1 Príklad grafického zobrazenia priebehu oteplenia .....	25
Obr. 5.1 Pôvodný 3D model rozvádzača .....	39
Obr. 5.2 Porovnanie odpojovača QAK 36.4000.40 pred úpravou a po úprave.....	41
Obr. 5.3 Zjednodušený model prúdovodnej dráhy vypínača 3AH3.....	41
Obr. 5.4 Výsledný zjednodušený model rozvádzača bez predných dverí a skrine vypínača .....	42
Obr. 5.5 Výsledný zjednodušený model rozvádzača bez skrine .....	43
Obr. 7.1 Štruktúra programu využívajúceho metódu konečných objemov [11] .....	50
Obr. 9.1 Rozmiestnenie meracích bodov pri reálnom meraní aj simulácii .....	53
Obr. 9.2 Výsledky prvej simulácie bez uvažovania prechodových odporov .....	55
Obr. 9.3 Výsledky prvej simulácie pohľad v reze na fáze L2 .....	56
Obr. 9.4 Rozloženie definovaných elektrických prechodových odporov v simulácii .....	63
Obr. 9.5 Otepľovací profil oteplenia fáze L1 .....	66
Obr. 9.6 Otepľovací profil oteplenia fáze L2 .....	66
Obr. 9.7 Otepľovací profil oteplenia fáze L3 .....	67
Obr. 9.8 Vizualne zobrazenie výsledkov druhej simulácie .....	69
Obr. 9.9 Grafické zobrazenie výsledkov druhej simulácie v reze cez fázu L2 .....	70
Obr. 10.1 Závislosť statického tlaku na prietoku vzduchu ventilátora FPF15KGU230BE-120 .....	72
Obr. 10.2 Vizualne porovnanie rozloženia teploty medzi rozvádzačom bez ventilátora a rozvádzačom s ventilátorom s rovnakou farebnou stupnicou teploty.....	74
Obr. 10.3 Vizualne porovnanie rozloženia teploty medzi rozvádzačom bez ventilátora a rozvádzačom s ventilátorom s rovnakou farebnou stupnicou teploty v reze fáze L2 .....	75
Obr. 10.4 Porovnanie otepľovacieho profilu na fáze L1 medzi reálne nameranými hodnotami, hodnotami so simulácie a hodnotami so simulácie s uvažovaným núteným chladením .....	77
Obr. 10.5 Porovnanie otepľovacieho profilu na fáze L2 medzi reálne nameranými hodnotami, hodnotami so simulácie a hodnotami so simulácie s uvažovaným núteným chladením .....	77
Obr. 10.6 Porovnanie otepľovacieho profilu na fáze L3 medzi reálne nameranými hodnotami, hodnotami so simulácie a hodnotami so simulácie s uvažovaným núteným chladením .....	78
Obr. 11.1 Závislosť oteplenia jednotlivých fáz odpojovača na prechodovom odpore .....	81
Obr. 11.2 Obrázok tabuľky ktorá v excelovom súbore prepočítava prechodový odpor odpojovača na jeho priemerné výsledné oteplenie v meracích bodoch.....	82



## ZOZNAM TABULIEK

Tab. 3.1 Maximálne dovolené teploty a oteplenia pre jednotlivé prvky použité v rozvádzači VN podľa normy ČSN EN 62271-1 ed.2 [7].....	33
Tab. 4.1 Štítkové parametre rozvádzača .....	37
Tab. 4.2 Štítkové hodnoty prístrojov použitých v rozvádzači.....	38
Tab. 9.1 Vstupné parametre a nastavenia prvej simulácie .....	54
Tab. 9.2 Porovnanie výsledných hodnôt oteplenia prvej simulácie a reálne nameraných hodnôt .....	57
Tab. 9.3 Namerané elektrické prechodové odpory prúdovodnej dráhy rozvádzača .....	58
Tab. 9.4 Elektrické odpory prúdovodnej dráhy určené zo SWFS .....	59
Tab. 9.5 Rozdiel elektrických prechodových odporov v rozvádzači medzi simuláciou a meraním .....	60
Tab. 9.6 Elektrické prechodové odpory ostatných spojov prúdovodnej dráhy .....	60
Tab. 9.7 Parametre druhej simulácie.....	61
Tab. 9.8 Hodnoty odporov ku obrázku 9.4 .....	63
Tab. 9.9 Namerané prechodové odpory zo simulácie s dosadenými prechod. odpormi .....	64
Tab. 9.10 Rozdiel elektrických prechodových odporov v rozvádzači medzi druhou simuláciou a meraním .....	65
Tab. 9.11 Porovnanie hodnôt medzi druhou simuláciou a reálne nameranými hodnotami oteplenia pre jednotlivé meracie body .....	68
Tab. 10.1 Štítkové parametre použitého ventilátora .....	73
Tab. 10.2 Porovnanie výsledných oteplení v jednotlivých meracích bodoch simulácie s núteným chladením .....	76
Tab. 11.1 Výsledné hodnoty oteplenia pri navyšovaní prechod. odporu odpojovača.....	80

# ÚVOD

Oteplenie rozvádzačov je jednou z ich základných vlastností. Každý VN rozvádzač musí pri nominálnom ale aj poruchovom stave spĺňať požiadavky normy na túto problematiku. Pri ich návrhu je výhodné oteplenie pred samotnou výrobou nasimulovať a overiť tak vlastnosti rozvádzača pri rôznych konfiguráciách. Táto metóda dokáže výrazne znížiť náklady pri návrhu rozvádzačov a zároveň zrýchliť proces ich vývoja. Pri návrhu je potrebné brať do úvahy veľa vstupných parametrov, ktoré majú vplyv na výsledok oteplenia rozvádzača. Je potrebné nájsť optimálny pomer medzi kvalitou a množstvom použitého materiálu tak, aby rozvádzač spĺňoval parametre uvedené v norme. Každý rozvádzač obsahuje prístroje ako napríklad: výkonový vypínač, odpojovač, uzemňovač a ďalšie. Všetky prístroje a prvky, ktoré rozvádzač obsahuje majú vplyv na jeho výsledné oteplenie. Pri prekročení hodnôt maximálneho oteplenia dochádza ku degradácii materiálov použitých pri jeho výrobe. Sú to najmä materiály náchylné na vysoké teploty. V rozvádzačoch sa jedná predovšetkým o materiály použité na výrobu izolačných prvkov. Pri narušení vlastností materiálov použitých na výrobu izolačných prvkov môže dôjsť ku nevratnému poruchovému stavu v rozvádzači. Pri takomto poruchovom stave dochádza ku prerušeniu dodávok elektrickej energie na zariadeniach ktoré sú z rozvádzača napájané. To má za následok nežiadúce ekonomické škody najmä v priemyselnej výrobe.

V prípade prerušenia dodávok elektrickej energie do zariadení radených do 1. stupňa dôležitosti dodávok elektrickej energie môžu byť následky takejto poruchy ešte citeľnejšie.

Pri simulácii oteplenia rozvádzača je potrebné vykonať určité zjednodušenia na jeho 3D modeli tak, aby bola simulácia na tomto modeli vykonateľná. Zároveň je pred simuláciou potrebné zmerať potrebné vstupné parametre do tejto simulácie. To zahŕňa napríklad meranie prechodových odporov kontaktov na hlavnej prúdovodnej dráhe výkonového vypínača a odpojovača, prípadne meranie hodnôt prechodových odporov na stykových spojoch zberníc. Medzi vstupné parametre potrebné na simuláciu patria aj vlastnosti použitých zberníc alebo vodičov, prípadne ich povrchová úprava, ktorá ovplyvňuje ich emisivitu.

Každý rozvádzač po jeho návrhu a samotnej výrobe musí prejsť typovými skúškami stanovenými v norme. Ich súčasťou sú aj skúšky oteplenia rozvádzača. Po vykonaní simulácie a aj typových skúšok je potrebné výsledné hodnoty oteplenia porovnať. Vzhľadom na zistené odchýlky je potrebné model použitý na simuláciu upraviť tak, aby výsledky čo najviac odpovedali reálne nameraným hodnotám.

Po zosúladiení hodnôt reálne nameraných a nasimulovaných je možné simuláciu spoľahlivo používať pri návrhu nových konfigurácií rozvádzačového systému.

V diplomovej práci sú uvedené požiadavky noriem týkajúce sa problematiky oteplenia rozvádzačov VN. Následne sú v práci uvedené parametre a vlastnosti, ktoré

majú vplyv na oteplenie rozvádzača. Súčasťou diplomovej práce je úprava 3D modelu rozvádzača tak, aby v ňom bolo možné v simulačnom prostredí vykonať simuláciu oteplenia. Následne sa práca venuje samotnej simulácii a porovnávaní výsledných hodnôt zo simulácie a reálne nameraných hodnôt. Na základe porovnania výsledkov bola simulácia upravená tak, aby sa výsledné oteplenie rozvádzača čo najviac rovnalo s oteplením reálne nameraným. Po zladení simulácie a reálneho merania boli vykonané ďalšie simulácie ktoré predikujú výsledné oteplenie rozvádzača VN pri rôznych vstupných parametroch alebo pri uvažovaní núteného chladenia rozvádzača.

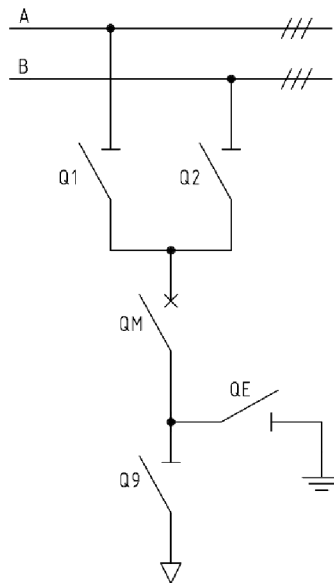
# 1. ROZVÁDZAČE VYSOKÉHO NAPÄTIA

Rozvádzač vysokého napätia je komplexný systém skladajúci sa z podružných systémov. Základná úloha každého rozvádzača je bezpečne a spoľahlivo distribuovať elektrickú energiu do podružných zariadení.

Rozvádzač VN sa skladá z elektrických prístrojov ako sú: odpojovač, uzemňovač, prístrojové transformátory prúdu a napätia, ochrana a výkonový vypínač. Tieto prvky sú v určitej konfigurácii umiestnené do kovovej šasi rozvádzača a tvoria z časti funkčne neoddeliteľný celok.

## 1.1 Základný princíp funkcie rozvádzača VN

Základný princíp funkcie rozvádzača VN spočíva v zapínaní a vypínaní podružných zariadení od zdroja elektrickej energie. Na tento účel obsahuje rozvádzač výkonový vypínač, ktorý je schopný opakovane a bezpečne zapínať a vypínať podružné zariadenia od zdroja el. energie. Zároveň výkonový vypínač zaisťuje funkciu bezpečnostného vypínania v prípade poruchy na podružnom zariadení. Samotný vypínač nie je schopný vyhodnotiť situáciu ktorá nastáva v sieti. Na tento účel rozvádzač obsahuje prístrojové transformátory prúdu a napätia (ďalej len PTP a PTN) ktoré znižujú hodnotu reálneho prúdu a napätia vo VN systéme v určitom pomere. Po prevode systémového napätia a prúdu pomocou PTP a PTN sú informácie o prúde a napätí privedené do ochrany a do zariadenia slúžiaceho na meranie spotreby elektrickej energie. Ochrana slúži na vyhodnocovanie stavov v sieti a v prípade nutnosti dáva povel na vypnutie výkonového vypínača. Súčasťou VN rozvádzača sú taktiež odpojovače a uzemňovač. Počet odpojovačov použitých v rozvádzači závisí na type použitého zbernicového systému. V prípade systému s dvojitými prívodnými zbernicovými systémami označovanými ako systém A a systém B, obsahuje rozvádzač dva prívodové odpojovače - jeden slúžiaci pre prívod z každého zbernicového systému. Po zopnutí jedného z odpojovačov je napätie privedené na vrchné kontakty výkonového vypínača. Rozvádzač v tejto konfigurácii obsahuje takisto vývodový odpojovač a uzemňovač. V praxi je funkcia týchto dvoch prístrojov zlúčená do jedného prístroja. Všetky odpojovače použité v rozvádzači slúžia pre úpravy konfigurácie v rozvodni ako celku, prípadne zabezpečujú bezpečnosť pri vykonávaných opravách alebo revíziách. Jednopolová schéma VN rozvádzača s dvojitým systémom prívodných zbernic je uvedená na obrázku č.1.



Obr. 1.1 Jednopolová schéma VN rozvádzača s prípojnicovým systémom A/B

## 1.2 Výkonový VN vypínač

Výkonový vypínač je prístroj určený na zapínanie a vypínanie elektrického obvodu bez ohľadu na veľkosť prúdu ním pretekajúceho. Z definície je zrejmé že výkonový vypínač dokáže vypínať skratové prúdy[1].

Základné konštrukčné diely výkonového vypínača sú:

- časti prúdovodné
- izolačné prvky
- mechanizmus
- zhášadlá
- výzbroj

Primárne sa výkonové vypínače delia podľa spôsobu použitého na uhasenie elektrického oblúka v zhášacej komore. Podľa tohto delenia sa teda výkonové vypínače delia na[1]:

- Vákuové
- Plynové
- Kvapalinové
- Magnetické
- Tlakovzdušné

### 1.2.1 Prúdovodné časti výkonového vypínača

Prúdovodné časti výkonového vypínača radíme svorky prístroja, kontakty a spojovacie časti. Prúdovodná dráha vypínača je za normálnej prevádzky namáhaná dvoma spôsobmi a to tepelne a mechanicky. Pri nominálnom zaťažení vypínača je potrebné počítať s trvalým tepelným namáhaním spôsobeným prechádzajúcim prúdom.

K výrazne zväčšenému tepelnému namáhaniu dôjde pri pôsobení krátkodobého skratového prúdu. Za krátky čas dôjde k výraznému zväčšeniu teploty prúdovodných častí vypínača. Ďalší druh tepelného namáhania na výkonovom vypínači je opaľovanie kontaktov vypínača pri vypínaní alebo zapínaní. Jedná sa o vyparovanie kontaktného materiálu do priestorov zhášacej komory vplyvom vysokej teploty vzniknutej ako dôsledok horiaceho elektrického oblúku[1].

### **1.2.2 Izolačné prvky výkonového vypínača**

Izolačné prvky výkonového vypínača sú určené na upevnenie prúdovodnej dráhy s ohľadom na dodržanie požadovanej mechanickej pevnosti a elektrickej izolácie od zeme prípadne dodržanie elektrickej izolácie medzi jednotlivými fázami vypínača. Vo vypnutom stave vypínača musia byť izolačné prvky schopné zabezpečiť dostatočnú elektrickú izoláciu obidvoch kontaktov. Na stavbu výkonových vypínačov sú používané izolačné materiály vo všetkých skupenstvách. Pri vypínačoch plynového typu sa využíva priaznivých izolačných vlastností plynu SF<sub>6</sub>. Pri vypínačoch kvapalinových sa zase využívajú izolačné vlastnosti oleja. Izolačné materiály z pevných látok sa používajú pri všetkých typoch vypínačov. Tvoria základný izolačný materiál ktorý mechanicky spojuje prúdovodnú dráhu s konštrukciou vypínača a zároveň zabezpečujú ich dostatočné elektrické oddelenie[1].

### **1.2.3 Mechanizmus výkonového vypínača**

Mechanizmus výkonového vypínača je určený na vykonávanie pohybu s hlavnými kontaktami v spínacej komore. Tvorí ho komplexný systém mechanických tiahel, pružín a prevodov, ktoré dokážu za krátky čas uvoľniť potencionálnu energiu uloženú v tomto systéme. Potencionálna energia býva často uložená vo forme natiahnutej pružiny. Naťahovanie tejto pružiny prípadne použitie iného spôsobu uloženia energie do mechanického systému výkonového vypínača sa nazýva strádanie. Strádanie výkonového vypínača je z pravidla možné elektricky alebo mechanicky. Pri elektrickom strádaní je použitý elektrický motor. V prípade nefunkčnosti el. motora je možné vypínač nastrádať mechanicky kľukov[1].

V prípade výkonových vypínačov s tlakovzdušným pohonom je potencionálna energia určená pre pohyb s hlavnými kontaktmi uložená vo podobe natlakovanej nádrže. Po uvoľnení západky dôjde ku jej uvoľneniu čo má za následok pohyb hl. kontaktov vypínača. K mechanickým častiam vypínača patrí taktiež konštrukčný rám, prípadne iná mechanická časť[1].

### **1.2.4 Elektrický oblúk a zhášadlá**

Pri spínanom procese vo výkonovom vypínači vznikajú prechodové deje ktorých súčasťou je aj vznik elektrického oblúka. Úspešné uhasenie elektrického oblúka nastáva vtedy, keď rekombinačné procesy prevládnu nad ionizačnými. Vypnutie elektrického

obvodu je úspešné v prípade, že elektrická pevnosť medzi kontaktami narastá rýchlejšie ako zotavené napätie[1].

Vo VN výkonových vypínačoch sa najčastejšie používajú vypínače s plynným zhášadlom, prípadne sa využíva vlastností vákua. V prípade plynového vypínača sa využíva vlastností plynu SF<sub>6</sub>. Vákuové vypínače sú široko používané do napäťovej hladiny 110kV. Pre napäťovú hladinu nad 110 kV sú používané vypínače s plynom SF<sub>6</sub>.

Princíp zhášania oblúka vo vákuu je založený na veľkej rýchlosti difúzie častíc v tomto prostredí. Pri vzniku oblúka vo vákuovej komore dochádza vplyvom rýchlych difúzných pochodov ku rozťahnutiu oblúka do veľkého priemeru, prakticky tak vyplní celý priestor vákuovej komory. Následkom rozťahnutia je koncentrácia nabitých častíc dostatočne malá nato, aby oblúk uhasol pri najbližšom prechode prúdu nulou. Samotný vznik elektrického oblúka vo vákuovej komore je umožnení vďaka odpareniu časti kontaktného materiálu a následného vzniku kovových parí v tejto komore. Bez vzniku elektrického oblúka pri vypínanom procese by veľkosť zotaveného napätia medzi kontaktami teoreticky dosiahla nekonečne veľkú hodnotu[1].

### **1.2.5 Výzbroj výkonového vypínača**

Výzbroj výkonového vypínača prakticky tvoria doplnkové elektrické prístroje, ktoré umožňujú jeho fungovanie. Jedná sa napríklad o zapínacie alebo vypínacie cievky. Po privedení napätia na tieto cievky dochádza ku zatlačeniu západky čo má za následok spustenie zapínacieho alebo vypínacieho procesu. Súčasťou výzbroje výkonového vypínača môžu byť aj pohon, pomocné signálne obvody prípadne podvozok alebo rôzne druhy krytov[1].

## **1.3 Odpojovač**

Odpojovač je elektrický prístroj slúžiaci na spojovanie a rozpojovanie elektrického obvodu ktorý nie je pod záťažou. Tieto elektrické prístroje slúžia hlavne ako manipulačný, prípadne bezpečnostný prvok v elektrických siet'ach. Ak je rozvodňa na to prispôsobená, je možné pomocou odpojovača rozvodu uviesť do požadovaného stavu bez toho, aby bol obmedzený prívod elektrickej energie. Zároveň v prípade revízií alebo servisu na elektrických zariadeniach je nutné po rozpojení odpojovača vizuálne skontrolovať obvod, či je naozaj v beznapäťovom stave na požadovanom úseku. Odpojovač je možné následne zablokovať proti opätovnému zapnutiu napríklad vložením pertinaxovej dosky (len v prípade otvoreného prevedenia rozvodne). V prípade že je odpojovač elektricky ovládaný, je pri revíziách alebo pri servise potrebné odpojovač odpojiť od elektrických obvodov tak, aby nedošlo k nežiadanejmu zapnutiu. Pri rozpojenom stave odpojovača musí byť elektrická pevnosť medzi rozpojenými kontaktmi dostatočne veľká aby odolala aj atmosférickým prepätiam. Rozvádzače VN obsahujú kvôli zvýšeniu bezpečnosti aj odpojovače vývodové, ktoré sú umiestnené pod výkonovým vypínačom na vývode a majú za úlohu odpojiť vývod rozvádzača na

zariadenie. V praxi nie je nezvyčajná situácia, kedy je výkonový vypínač vypnutý a na spodných práporcoch ako aj na vývode – kde by mal byť beznapätový stav, avšak kvôli rôznym slučkám a napájaniu z rôznych rozvodní to nie vždy musí byť pravda. Súčasťou sekcie odpojovačov je aj verzia odpojovača ktorá sa nazýva uzemňovač. Tento prístroj má za úlohu uzemniť vývod z rozvádzača a zaistiť tak bezpečnosť pri servise alebo revíziách na zariadeniach, ktoré daný rozvádzač napája. Ovládanie jednotlivých odpojovačov a uzemňovačov je v rozvádzači podmienené blokovacími podmienkami [1].

Nebezpečnou situáciou môže byť pri manipulácii hlavne na starších typoch rozvádzačov zazemnenie vývodu rozvádzača, pričom sa spätne na vývod rozvádzača dostáva napätie z nejakej inej rozvodne alebo slučky. Pri tomto stave sa jedná o kovový trojfázový skrat ktorý môže mať za následok vážne zranenie obsluhy a poškodenie zariadení odpojovača. Uzemňovač, ktorý bol nesprávne zopnutý do vývodu pod stálym napätím z druhej rozvodne, je možné vidieť na obrázku 2.2.



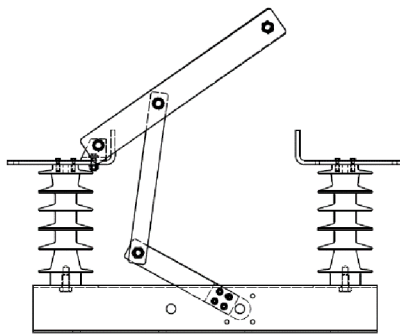
Obr. 1.2 Nože uzemňovača po skrate

Na obrázku 1.2 je možné taktiež vidieť následky krátkodobých tepelných a dynamických účinkov ktoré vznikajú pri skrate.

Existuje viacero konštrukčných typov odpojovačov. Jednotlivé konštrukčné typy závisia od napät'ovej hladiny a ich určenia. Pri vonkajších rozvodniach VVN sa používa pantografické prevedenie odpojovača[1].

Pri napät'ových hladinách do 35kV prevažuje pri odpojovačoch určených na vnútorné použitie prevedenie pákové s nožovými kontaktmi. Toto prevedenie môžeme vidieť na obrázku 1.3.





Obr. 1.3 Odpojovač VN pre vnútorné použitie

Prúdovodné časti odpojovača sú upevnené pomocou izolátorov na základnú konštrukciu. Pomocou izolačných tiahel je možné s nožmi odpojovača manipulovať do požadovanej polohy. Dĺžka izolačných tiahel závisí na napäťovej hladine pre ktorú je odpojovač určený. Keďže je odpojovač súčasťou elektrického vedenia, musí okrem trvalého nominálneho zaťaženia prúdom zniesť tepelné ale aj silové účinky prúdu, ktorý môže v obvode pri skrate tiecť [1].

## 1.4 Prístrojové transformátory prúdu a napätia

Prístrojové transformátory prúdu a prístrojové transformátory napätia (ďalej len PTP a PTN) sú zariadenia slúžiace na prispôsobenie hodnôt prúdu a napätia pre účely merania, regulácie a istenia. Zároveň slúžia ako bezpečnostný prvok a oddeľujú VN obvody od obvodov nízkeho napätia. Ich správna funkčnosť je v rozvádzačoch VN zásadná, nakoľko pri poruchovom stave sú to práve tieto zariadenia, ktoré dávajú do ochrany informáciu o aktuálnom stave v elektrickom obvode [3].

Prístrojové transformátory prúdu majú svoju pracovnú oblasť blízko chodu nakrátko. Sú navrhované tak, aby hodnoty prúdu na sekundárnych svorkách dosahovali čo najmenšiu chybovosť. Medzi základný parameter týchto zariadení patrí prevod prúdu. Každý PTP má určitú pracovnú charakteristiku, pre ktorú je definovaná trieda presnosti tohoto zariadenia. Pri prekročení určitej hodnoty prúdu na primárnych svorkách transformátoru dochádza ku saturácii. S týmto javom súvisí nadprúdové číslo definované ako násobok nominálneho primárneho prúdu, pri ktorom chyba transformátora dosiahne 10% [3].

Konštrukčne bývajú PTP riešené ako podoprené, tyčové, prípadne násuvné. V súčasnosti bývajú PTP často riešené ako integrovaná súčasť prúdovodnej dráhy rozvádzačov VN. Ako materiál slúžiaci na izoláciu VN vinutia od NN a zároveň slúžiaci ako základná konštrukcia transformátora sa najčastejšie používa epoxidová živica. Prúd

prevádzajú z primárnej strany z pravidla na hodnotu 1 A,5 A prípadne 10 A. Pri rozpojení sekundárnych svoriek transformátora dochádza ku poruchovému stavu [3].

Prístrojové transformátory napätia sú zariadenia s pracovnou oblasťou v blízkosti chodu naprázdno a sú navrhnuté tak, aby dosahovali čo najmenšej chyby merania napätia. Základné parametre PTN sú nominálny prevod napätia, trieda presnosti a maximálna záťaž pri ktorej chyba PTN neprekročí 10% [3].

Konštrukčné riešenie PTN je obdobné ako u PTP a na oddelenie primárnej a sekundárnej strany sa okrem iného využíva taktiež epoxidová živica. Primárne napätie na transformátore sa rovná napätiu siete, sekundárne napätie býva 100 V prípadne  $100/\sqrt{3}$  [3].

V praxi bývajú často funkcie týchto zariadení zlúčené do jednej. Takýto prístroj sa nazýva kombinovaný prístrojový transformátor.

## 1.5 Prevedenia VN rozvádzačov

Rozloženie a celkové vyhotovenie rozvádzačov VN sa môže zásadne líšiť. Kým staršie rozvádzače VN boli častokrát riešené v otvorenom prevedení, moderné rozvádzače VN bývajú z pravidla v zapuzdrenom prevedení. Hlavný dôvod prechodu na zapuzdrené verzie rozvádzačov VN umožnil vývoj v spínacej technike výkonových vypínačov. Nástup vákuových spínacích komôr prípadne spínacích komôr plnených plynom SF<sub>6</sub> zásadne zmenšil ich rozmery oproti predošlým vypínačom - napríklad olejovým. Toto zmenšenie umožnilo rozvádzače VN zmenšiť na toľko že je výhodné ich vyhotovovať ako zapuzdrené. Ďalším parametrom ktorý prispel ku verzii zapuzdrených rozvádzačov VN je bezpečnosť. V prípade vzniku poruchového stavu, najmä skratu, má puzdro rozvádzača významnú bezpečnostnú úlohu a dokáže obsluhu prípadne iné zariadenia v okolí ochrániť pre tepelnými ale aj silovými účinkami skratových prúdov. Jedným z mála parametrov ktoré zapuzdrenie rozvádzačov zhoršilo je ich chladenie. V prípade otvoreného rozvádzača VN zariadenia chladí okolitý vzduch. To sa pri zapuzdrenej verzii neuskutočňuje, preto je v prípade zapuzdrených rozvádzačov zavedené nútené chladenie tam, kde je to potrebné. Zároveň v prípade vzniku skratu v zapuzdrenom rozvádzači je potrebné vzniknutý pretlak odvieť zo zapuzdreného systému von. Na tento účel bývajú na zapuzdrených rozvádzačoch VN montované výfuky [4].

### 1.5.1 Kovové zapuzdrené rozvádzače

Všetky elektrické zariadenia, ktoré rozvádzač obsahuje sú umiestnené do uzavretej uzemnenej kovovej šasi. Takýto rozvádzač VN býva usporiadaný to jednotlivých polí z ktorého každé jedno obsahuje výkonový vypínač, odpojovač s uzemňovačom, PTP prípadne PTN a káblový vývod na zariadenie. Jednotlivé polia rozvádzača sú spoločne nad vrchnými svorkami jednotlivých rozvádzačov pospájané pomocou hlavných zberníc. Hlavným izolačným médiom pri tomto type rozvádzačov býva vzduch. Výnimku tvorí spínacia komora vypínača, ktorá môže obsahovať rôzne izolačné médium. Vrchná časť

poľa rozvádzača obsahuje ovládacie obvody a ochranu a je bezpečne oddelená od priestorov kde by mohli mať tepelné a dynamické účinky skratových prúdov na ne zničujúci vplyv. Výkonový vypínač pri tomto type rozvádzača býva často vo výsuvnom prevedení. Toto prevedenie umožňuje vypínač rýchlo a efektívne vymeniť v prípade jeho opotrebenia alebo poruchy. Zároveň je týmto riešením vykonávať pravidelnú údržbu a servis na spomínaných zariadeniach. Rozvádzač tohoto typu ako celok zvyčajne obsahuje PTN len v prírodných poliach, prípadne v poliach určených na meranie. PTP je umiestnený v každom poli nakoľko umožňuje ochrane vyhodnocovať veľkosť prúdu v sieti [4].

Súčasťou VN rozvádzača býva častokrát aj pole obsahujúce spojku. Spojka umožňuje meniť konfiguráciu rozvádzača pre potreby údržby a servisu najmä v prípade, že rozvádzač obsahuje 2 vývody, každý na jednej strane spojky pre jednotlivé zariadenia [4].

Základné výhody tohoto prevedenia rozvádzača teda sú:

- relatívne malé rozmery
- ochrana pred účinkami skratových prúdov
- prefabrikácia rozvádzačov vo výrobnom závode
- rýchla montáž
- efektívna údržba (hlavne pri revízií výkonových vypínačov)
- ochrana proti vzdušným nečistotám.

Zároveň s výhodami, ktoré nám zapuzdrené kovové rozvádzače poskytujú majú tieto typy rozvádzačov aj určité nevýhody. Medzi hlavnú nevýhodu oproti otvorených rozvádzačom patrí neschopnosť vizuálnej kontroly. Zatiaľ čo pri otvorených prevedeniach VN rozvádzačov je možné túto kontrolu vykonávať jednoducho a pravidelne, pri zapuzdrených kovových VN rozvádzačoch je to možné len po uvedení rozvádzača do beznapätového stavu. Zároveň, pri poškodení napríklad PTP alebo PTN prípadne odpojovača je výmena týchto zariadení podstatne jednoduchšia pri otvorenom prevedení rozvádzača.

Pole rozvádzača v otvorenom prevedení je na obrázku 1.4, prevedenie kovového zapuzdreného rozvádzača je na obrázku 1.5.



Obr. 1.4 Otvorené prevedenie rozvádzača



Obr. 1.5 Kovový zapuzdrený rozvádzač Siemens NXAir 550+ [5]

### 1.5.2 Konfigurácia kovového zapuzdreného VN rozvádzača

Kovové zapuzdrené VN rozvádzače majú spravidla podobné vyhotovenie. Výkonový vypínač býva v prípade výsuvného prevedenia umiestnený spredu v spodnej časti tak, aby mohol byť jednoducho na vozíku vytiahnutý z rozvádzača. V prednej vrchnej časti rozvádzača sa nachádzajú ovládacie, prípadne signalizačné obvody spoločne s ochranou. Celá sekcia týchto prvkov je oddelená od ostatných častí rozvádzača. Oddelenie ochraňuje ovládacie obvody a ochranu pred účinkami prúdu pri poruchovom stave, zároveň oddeľuje sekciu VN od sekcie NN [4].

Výkonový vypínač býva takisto oddelený od ostatných častí rozvádzača. Výsuvné prevedenie vypínača existuje v dvoch rôznych verziách - pri prvej verzii je vozík na ktorom sa vypínač vysúva z rozvádzača pevne spojený s vypínačom a je tak jeho súčasťou. V druhom prípade je vozík samostatne pohyblivý, a po umiestnení vozíka na správne miesto pred vypínačom je možné vypínač po lyžinách z rozvádzača na tento vozík vysunúť [4].

Samotný výkonový vypínač je však možné z rozvádzača vysunúť len po splnení určitých podmienok. Základnou podmienkou je vypnutý vypínač, na túto splnenú podmienku nadväzujú ďalšie podmienky, ktoré sa môžu líšiť podľa vyhotovenia VN rozvádzača. Výrobcovia niektorých rozvádzačov majú blokovanie vyriešené mechanicky, pomocou kľúčikov a západok. Kľúčik umiestnený na prednej prístupnej strane vypínača je možné vytiahnuť len po jeho vypnutí, následne sa kľúčik použije na odomknutie blokácie západok, tak možné výkonový vypínač vytiahnuť to revíznej polohy. Za revíziu považujeme takú polohu, pri ktorej je vypínač v dostatočnej vzdialenosti od prípojnic, zároveň je však stále vnútri rozvádzača so zavretými dverami. Ďalšou podmienkou pri manipulácii s rozvádzačom býva možnosť vytiahnuť vypínač z kobky len v prípade, že je vývodový odpojovač rozpojený a je v uzemnenom stave. Blokácie vo VN rozvádzačoch fungujú aj spätne. Rozvádzač mechanicky vyblokuje možnosť zasunúť vypínač z revíznej polohy do prípojnic v prípade že je vývodový odpojovač rozpojený a v uzemnenej polohe prípadne že je vypínač zapnutý. Jednotlivé podmienky sa sú vždy prispôsobené na daný typ konfigurácie rozvádzača tak aby nebolo možné dosiahnuť nežiadany poruchový stav [4].

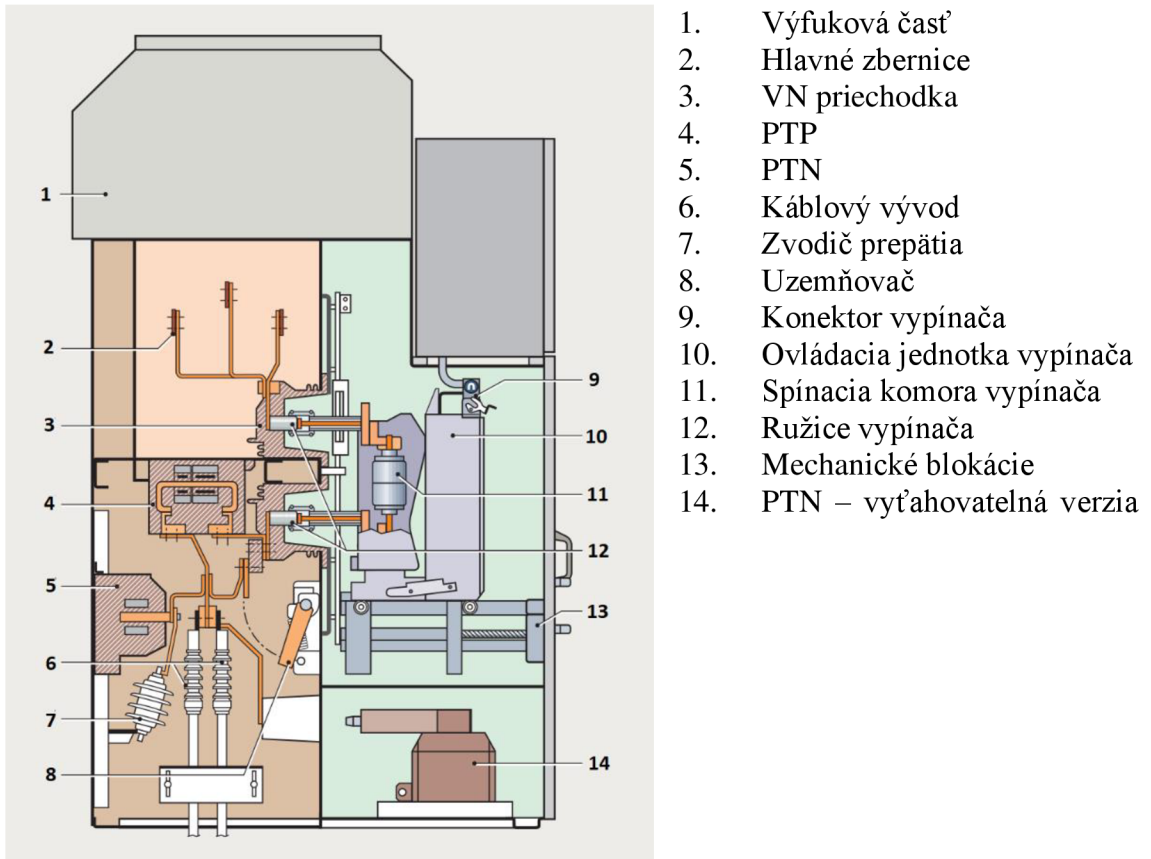
PTP bývajú často umiestnené za výkonovým vypínačom na prípojniciach. Výhodou tohoto riešenia je šetrenie miesta v rozvádzači. PTN bývajú často umiestnené v samostatnom poli a informácie o veľkosti napätia ktoré poskytujú sú využívané viacerými ochranami [4].

Za spodnými prípojnicami výkonového vypínača býva umiestnený vývodový odpojovač ktorý plní aj funkciu uzemňovača. Na spodných práporcoch odpojovača bývajú pripojené káblové koncovky slúžiace na prepoj medzi VN káblom a zbernicami [4].

Cez celý rozvádzač bývajú umiestnené hlavné zbernice ktoré horizontálne prechádzajú celým rozvádzačom. Rozdelené môžu byť v prípade použitia poľa so

spojkou. V jednom z polí je teda umiestnený prívod do rozvádzača. Ostatné polia bývajú vývodové. Nie je však výnimkou viacero samostatných prívodov do jedného rozvádzača najmä aj je v rozvádzači pole obsahujúce spojku [4].

Konfiguráciu VN zapuzdreného kovového rozvádzača s popisom jednotlivých častí je možné vidieť v reze na obrázku 1.6.



Obr. 1.6 Rez kovovým zapuzdreným rozvádzačom [6]

Jednotlivé polia v obdobnej konfigurácii ako na obrázku 2.6 sú následne uložené vedľa seba tak, ako to vidíme na obrázku 2.5.

## 2. TEPELNÉ ÚČINKY ELEKTRICKÉHO PRÚDU

V dôsledku prechádzajúceho prúdu vodičom s nenulovým odporom vznikajú straty, ktoré sa do okolia uvoľňujú vo forme tepla. Problematika vznikajúceho tepla sa týka celého spektra elektrotechniky a je potrebné sa s ňou čo najefektívnejšie a najbezpečnejšie vysporiadať. Teplo vzniknuté pri prechode prúdu vodičom môže mať za následok poškodenie samotnej prúdovodnej dráhy, prípadne poškodenie mechanických častí ako sú napríklad izolátory.

### 2.1 Spôsoby šírenia tepla

Teplo sa môže šíriť tromi základnými spôsobmi a to:

- prúdením
- vedením
- sálaním

V oblasti elektrotechniky je potrebné sa zaoberať všetkými spôsobmi šírenia tepla a zároveň je možné každý spôsob šírenia tepla ovplyvniť zmenou určitých technických parametrov, prípadne zmenou vlastností materiálov použitých na výrobu elektrického prístroja [2].

Pri šírení tepla sálaním dochádza v prípade, že je teleso teplejšie ako nula kelvinov. Svojím povrchom teleso do okolia vyžaruje tepelnú energiu vo forme elektromagnetických vln. Elektromagnetické žiarenie sa v priehľadnom priestore šíri priamočiaro všetkými smermi. V prípade prechodu elektromagnetického žiarenia z priehľadného priestoru do iného, dochádza ku zmene parametrov šíreného žiarenia. Táto zmena sa riadi podľa zákonov geometrickej optiky. Pri dopade elektromagnetického žiarenia na iné teleso môžu nastať 3 základné javy, ktoré závisia na priehľadnosti telesa na ktoré žiarenie dopadá. Časť žiarenia sa môže odraziť, časť môže teleso cez seba prepustiť a časť žiarenia teleso pohltí [2].

Vedením sa teplo šíri predovšetkým v látkach s pevným skupenstvom. Jedná sa o čiastočné predávanie kinetickej energie častíc ktoré majú vyššiu kinetickú energiu ako častice v inej oblasti. Jednotlivé častice sa pri tomto procese nepremiestňujú ale len kmitajú okolo svojich rovnovážnych polôh. Tento spôsob šírenia tepla prevláda pri silnoprúdových elektrotechnických zariadeniach [1].

Ku šíreniu tepla prúdením dochádza najmä pri prúdení kvapalín. Rozlišujeme dva základné stavy prúdenia - laminárny a turbulentný. Pri laminárnom prúdení tepla dochádza ku pomalému rovnobežnému pohybu častíc so okrajmi sústavy ktoré vedú tekutinu. Rozloženie rýchlosti častíc pri takomto type prúdenia je parabolické s minimálnou rýchlosťou pri stenách a s maximálnou rýchlosťou v strede medzi stenami

ktoré vedú tekutinu. Pri turbulentnom prúde dochádza ku chaotickému pohybu častíc a ku prenosu tepla dochádza len v pri stenách ktoré vedú tekutinu [1].

## 2.2 Otepľovanie prúdovodného vodiča

V prípade, že elektrickým vodičom s nenulovým odporom prechádza elektrický prúd dochádza v každom časovom úseku  $dt$  ku vzniku tepelných strát ktoré sú definované podľa vzorca [1]:

$$dQ = RI^2 dt \quad (1)$$

Časť takto vzniknutého tepla sa odvedie ochladzovaním vodiča do okolia. Druhá časť tepla vo vodiči ostáva a spôsobuje jeho oteplenie o  $d\theta$ . Teplo odvedené do okolia určujú dva parametre a to teplotný súčiniteľ prestupu tepla označovaný ako  $\alpha_0$  [ $W/m^2 \cdot K$ ] a ochladzovací povrch úseku označovaný ako  $A$  [ $m^2$ ]. Výsledná veľkosť tepla v definovanom časovom úseku odvedeného do okolia je rovná súčinu týchto dvoch veličín. Teplo spotrebované na ohrev samotného vodiča alebo všeobecne telesa je závislé na objemovej tepelnej kapacite označovanej ako  $c$  [ $J/m^3 \cdot K$ ] a na veľkosti objemu uvažovaného úseku vodiča, ktorá sa označuje ako  $V$  [ $m^3$ ]. Podľa vyššie uvedených vzťahov platí teda rovnica [1]:

$$RI^2 dt = \alpha_0 A \Delta\theta dt + cV d\theta \quad (2)$$

Po separácii premenných a následnej integrácii danej rovnice dostaneme tvar [1]:

$$t = -\frac{cV}{\alpha_0 A} \ln \left( \frac{RI^2}{cV} - \frac{\alpha_0 A \Delta\theta}{cV} \right) + K \quad (3)$$

Integračnú konštantu  $K$  je možné určiť na základe predpokladu, že v čase  $t = 0$  je oteplenie vodiča  $d\theta = 0$ . Integračná konštantu sa teda rovná [1]:

$$K = \frac{cV}{\alpha_0 A} \ln \frac{RI^2}{cV} \quad (4)$$

Výsledná rovnica po dosadení integračnej konštanty, po antilogaritmovaní s explicitne vyjadrených okamžitým oteplením má teda tvar [1]:

$$\Delta\theta = \Delta\theta_{\max} \left[ 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right] \quad (5)$$



V rovnici sme použili označenie ktoré definuje časovú konštantu  $\tau$  ako [1]:

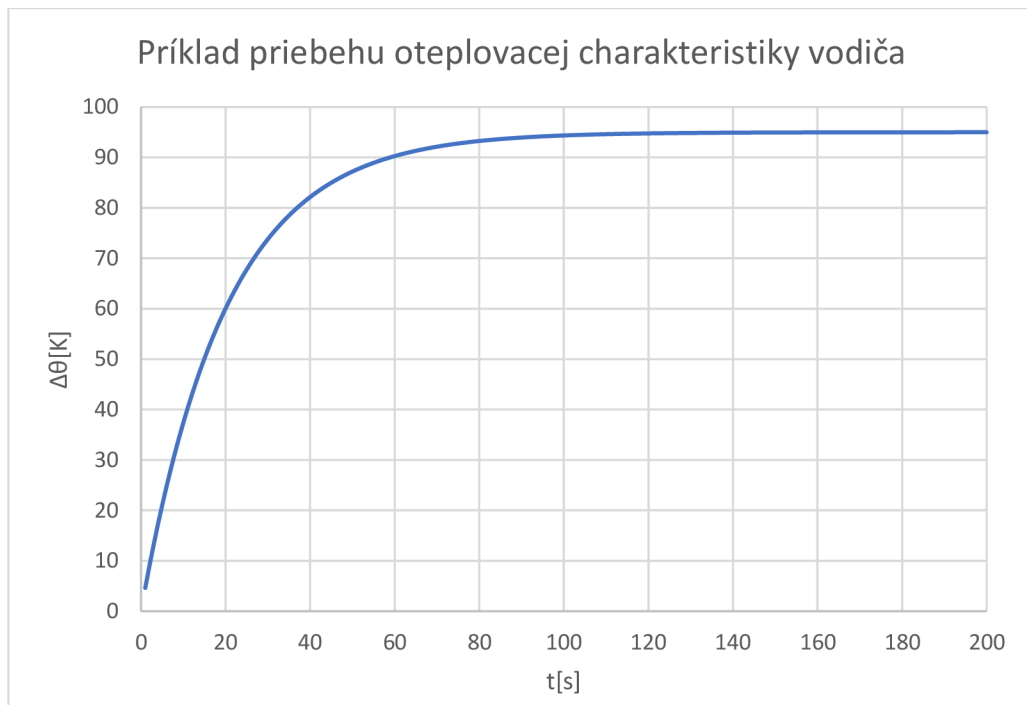
$$\tau = \frac{cV}{\alpha_0 A} \quad (6)$$

Označenie  $d\theta_{\max}$  predstavuje ustálenú maximálnu hodnotu oteplenia a tá je definovaná podľa rovnice [1]:

$$\Delta\theta_{\max} = \frac{RI^2}{\alpha_0 A} \quad (7)$$

Časovú konštantu v rovnici 5 je možné definovať ako čas, za ktorý by teleso respektíve vodič dosiahol maximálneho ustáleného oteplenia  $d\theta_{\max}$  v prípade, že by všetko vzniknuté teplo bolo spotrebované na ohrev samotného telesa t.j. v situácií, že by teplotný súčiniteľ prestupu tepla  $\alpha_0$  bol rovný nule [1].

Z výslednej rovnice 5 je zrejmé, že krivka časového priebehu oteplenia vodiča má exponenciálny charakter. Grafické zobrazenie tejto rovnice je na obrázku 2.1.



Obr. 2.1 Príklad grafického zobrazenia priebehu oteplenia

Uvedená teplotná rovnica počíta s určitým zjednodušením, nakoľko časová konštantu je definovaná ako konštantu. Veličiny, ktoré definujú časovú konštantu sú však závislé na oteplení  $\Delta\theta$ . Reálne nameraná oteplovacia krivka vodiča tak úplne neodpovedá oteplovacej rovnici vypočítanej [1].

Po dosiahnutí najvyššieho možného oteplenia za daných podmienok dochádza ku takzvanej tepelnej rovnováhe. Tepelná rovnováha je stav, pri ktorom sa všetko teplo vzniknuté vo vodiči predáva do okolia a už nespôsobuje ďalšie zahrievanie vodiča [1].

### 2.3 Krátkodobé oteplenie prúdovodného vodiča

Krátkodobé oteplenie vodiča nastáva ako dôsledok krátkodobého prechádzajúceho prúdu vodičom. V prípade že prúd prechádza vodičom po dobu menšiu ako je  $2\tau$  je možné zanedbať odvod tepla do okolia. Všetko vytvorené teplo v tomto vodiči sa tak spotrebuje na ohrev daného vodiča. Takáto situácia v praxi zvyčajne nastáva pri skratoch. Po zanedbaní odvodu tepla do okolia má rovnica tvar [1] :

$$RI^2 dt = cVd\theta \quad (8)$$

Pomocou integrácie za predpokladu vstupnej podmienky nulového času a nulového oteplenia dostávame vzťah [1]:

$$\Delta\theta_{kd} = \frac{RI^2}{cV} t_{kd} \quad (9)$$

Túto rovnicu je možné použiť na výpočet krátkodobého oteplenia vodiča, ktorý je nepravidelného tvaru a nie je možné v ňom nájsť najmenší prierez ktorým prechádza celý prúd. V prípade konštantného prierezu vodiča je možné použiť nasledovnú rovnicu [1]:

$$\Delta\theta_{kd} = \frac{\rho l I^2}{c l S^2} t_{kd} \quad (10)$$

Po použití tejto rovnice za predpokladu, že prierez vodiča je konštantný v celej dĺžke dostávame oteplenie pre celý vodič. Ak sa prierez vodiča mení počítame jeho oteplenie v mieste s najmenším prierezom, pretože tam dochádza ku najväčšiemu otepleniu v dôsledku najväčšej prúdovej hustoty [1].

Rovnice platia však len v krátkodobých časoch kedy poznáme efektívnu hodnotu prúdu. Za situácie meniacej sa veľkosti prúdu s časom je potrebné rovnicu spresniť do nasledujúceho tvaru [1]:

$$I^2 t_{kd} = \int_0^{t_{kd}} i^2(t) dt \quad (11)$$

Najmenej priaznivá situácia oteplenia vodiča nastáva pre prípad skratu po dlhodobom prechode nominálneho prúdu vodičom. Výsledná teplota takéhoto vodiča  $\theta_{kd}$  je súčtom teploty okolia  $\theta_0$ , oteplenia vodiča nominálnym prúdom  $\Delta\theta_{max}$  a krátkodobým oteplením vodiča  $\Delta\theta_{kd}$  [1].

$$\theta_{kd} = \theta_0 + \Delta\theta_{max} + \Delta\theta_{kd} \quad (12)$$

Táto teplota nesmie presiahnuť hodnotu, pri ktorej by došlo ku poškodeniu izolačných častí vodiča, alebo mechanickej pevnosti samotného vodiča napríklad v prípade holých zberníc. Maximálne teploty ktoré nie je možné presiahnuť závisia na type použitého materiálu a ich maximálne prípustné hodnoty sú definované v elektrotechnických normách [1].

## 2.4 Odpor vodiča

Aby bolo možné určiť veľkosť tepelných strát vznikajúcich vo vodiči, je potrebné poznať odpor daného vodiča. Pre rovnomerne rozložený prúd prechádzajúci vodičom s prierezom  $S$  [m<sup>2</sup>] a dĺžke  $l$  [m] platí nasledovná rovnica [1]:

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (13)$$

Veľičina označená ako  $\rho$  [ $\Omega \cdot m$ ] predstavuje elektrickú rezistivitu. Veľkosť rezistivity závisí od typu použitého materiálu. Pri kovových vodičoch dochádza pri zväčšovaní teploty vodiča ku nárastu rezistivity. Pri výpočtoch oteplenia je však v elektrotechnike vzhľadom na úzke pásmo prevádzkových teplôt postačujúce používať rovinu na výpočet rezistivity v lineárnom tvare. Rezistivita pre elektrický vodič sa teda spočíta podľa vzťahu [1]:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha \Delta\theta) \quad (14)$$

V uvedenej rovnici predstavuje  $\rho_0$  rezistivitu materiálu vodiča pri zvolenej referenčnej teplote  $\theta_0$ . Veľičina označená ako  $\alpha$  [ $K^{-1}$ ] reprezentuje teplotný súčiniteľ odporu a udáva pomerný nárast odporu pri zvýšení teploty o 1 K oproti referenčnej teplote  $\theta_0$ .  $\Delta\theta$  predstavuje odpovedajúce oteplenie vzhľadom na teplotu vodiča  $\theta$ .  $\Delta\theta$  je teda možné vypočítať podľa nasledovného vzťahu [1]:

$$\Delta\theta = \theta - \theta_0 \quad (15)$$

V prípade, že vodičom prechádza striedavý prúd, je vplyvom vzniknutého vlastného magnetického poľa vodiča nerovnomerne rozložený. Nerovnomerným rozložením prúdu

vo vodiči dochádza ku nárastu odporu vodiča. Kvôli tomto javu je potrebné rozšíriť rovnicu 15 o činiteľ povrchového zhustenia  $k_p$  a činiteľ javu blízkosti  $k_{bl}$ . Výsledná rovnica má teda tvar [1]:

$$R = \rho_0(1 + \alpha\Delta\theta) \frac{l}{S} k_p k_{bl} \quad (16)$$

Veľkosť činiteľov povrchového zhustenia a javu blízkosti závisí na frekvencii prúdu, pomernej permeabilite, veľkosti prierezu vodiča a jeho elektrickej vodivosti. Hodnoty týchto činiteľov pre frekvenciu 50 Hz a pomernú permeabilitu  $\mu_r = 1$  bývajú uvedené v grafoch [1]. Podrobnejšie sa tomuto javu venujeme v kapitole 6.1.

## 3. OTEPLOVACIE SKÚŠKY

Po návrhu a následnej výrobe nového typu rozvádzača výrobcom je potrebné vykonať typové skúšky, ktoré sú definované v normách. Aby mohol byť rozvádzač uvedený do prevádzky, musí týmto požiadavkám vo všetkých smeroch vyhovieť. Samostatne sa normy venujú problematike oteplenia rozvádzačov.

### 3.1 Skúška trvalým prúdom

Skúška trvalým prúdom sa podľa normy ČSN EN 62271-1 ed.2 vykonáva na objekte s čistými kontaktami. Pokiaľ je to možné, majú byť jeho súčasti, ktoré sú na to určené naplnené vhodnou kvapalinou prípadne plynom, pri najnižšom možnom prevádzkovom tlaku pre izoláciu [7].

#### 3.1.1 Umiestnenie skúšaného zariadenia

Zariadenie musí byť pri týchto skúškach umiestnené v priestore kde nedochádza k prúdeniu vzduchu. Jediné prípustné prúdenie vzduchu v uzavretej miestnosti je prúdenie spôsobené teplom skúšaného zariadenia. Norma definuje túto podmienku ako splnenú v prípade, že rýchlosť vzduchu v miestnosti nepresahuje 0,5 m/s. Zariadenie musí byť pri týchto skúškach zmontované čo najpodobnejšie tomu, ako bude zmontované pri reálnej prevádzke. Zariadenie musí mať namontované všetky kryty spínacích alebo riadiacich častí, zároveň musia byť namontované všetky kryty potrebné pre vykonanie skúšky t.j. napríklad kryt predĺženia prípojnice. Skúšané zariadenie musí byť chránené pred nadmerným oteplením alebo ochladením z vonkajšieho prostredia. Prakticky to znamená ochranu pred slnečným žiarením ktoré by do objektu mohlo prenikáť cez okná a spôsobovať dodatočné nežiaduce ohrievanie skúšaného objektu a podobne [7].

V prípade, že výrobca zariadenia umožňuje zmontovať zariadenie v rôznych konfiguráciách musí byť skúška vykonaná pre najmenej priaznivú konfiguráciu.

Skúšky sa vykonávajú v zásade na trojpólových spínacích a riadiacich zariadeniach. Je možné ich vykonať len na jednom pole zariadenia, pokiaľ je možné vplyv ostatných pólov zanedbať. V praxi to predstavuje najmä zariadenia, ktoré nie sú umiestnené v kovovom kryte a sú určené pre napätie nad 52 kV. V prípade trojpólových zariadení do 1250 A je možné zapojiť jednotlivé póly pri skúškach do série. Ak je skúšané zariadenie určené pre prúdy nad 1250 A musí byť skúška vykonaná pomocou trojfázového obvodu. Zariadenia veľkých rozmerov pri ktorých izolácia proti zemi nemá zásadný vplyv na oteplenie je možné testovať so zníženou izoláciou [7].

#### 3.1.2 Skúšky hlavného obvodu

Norma uvádza, že skúšky hlavného obvodu sa vykonávajú nominálnym trvalým prúdom spínacích a riadiacich zariadení umiestnených v obvode. Skúšobný prúd musí byť sínusového priebehu. Požiadavka sínusového prúdu je splnená pokiaľ efektívna hodnota

vyšších harmonických zložiek neprekročí 5 % hodnôt základného prúdu. Hodnota 5% môže byť prekročené pokiaľ s tým výrobca zariadenia súhlasí. Frekvencia pri skúške musí byť nominálna a musí sa pohybovať v rozmedzí +2 % a -5%. Hodnoty frekvencie je počas priebehu skúšky potrebné zaznamenávať do protokolu o meraní [7].

Samotnú skúšku je potrebné vykonávať pokiaľ zariadenia nedosiahne ustáleného oteplenia. Za ustálené oteplenie sa podľa normy považuje situácia, kedy nárast oteplenie neprekročí 1 K za 1 hodinu. Tohoto ustálenia nárastu teploty sa zvyčajne dosiahne za čas odpovedajúci päťnásobku časovej konštanty skúšaného zariadenia. Norma ďalej uvádza, že túto skúšku je možné skrátiť pomocou predhriatia zariadenia vyšším prúdom. Táto výnimka sa však nevzťahuje na situáciu kedy je požadované zmeranie tepelnej časovej konštanty [7].

### **3.1.3 Skúška pomocných a riadiacich zariadení**

Skúšky týchto zariadení je potrebné vykonávať predpísaním napájacím napätím. V prípade predpísaného striedavého napätie musí jeho frekvencia byť v medziach +2 % a -5%. Pomocné zariadenia sa skúšajú pri ich nominálnej napäťovej hladine prípadne pri ich nominálnom prúde. Napätie striedavého prúdu musí mať sínusový priebeh [7].

Pri skúšaní cievok určených k trvalej prevádzke je potrebné dosiahnuť ustáleného oteplenia. Za ustálené oteplenie sa považuje tak ako v predošlej kapitole navýšenie teploty o maximálne 1 K za dobu 1 hodiny [7].

Obvody ktoré sú určené k dočasnému napájaniu pri zapínaných alebo vypínaných cykloch spínacích zariadení a obsahujú automatické rozpojenie obvodu po vykonaní činnosti je potrebné uviesť pod napätia 10 krát za sebou po dobu 1s alebo pokiaľ nezapôsobí systém automatického rozpojenia obvodu po ukončení požadovanej činnosti. V prípade, že obvod neobsahuje automatické rozpájanie obvodu je potrebné naňho priviesť pri skúške napätie po dobu 15 s [7].

### **3.1.4 Meranie teploty pri skúške trvalým prúdom**

#### **3.1.4.1 Teplota okolitého vzduchu**

Teplota okolia sa podľa normy počas vykonávania skúšky pohybovať v rozpätí od +10 °C do +40 °C. V prípade dodržania tohoto rozpätia nie je potrebné vykonávať žiadne korekcie nameraných hodnôt oteplenia [7].

Za teplotu okolia sa považuje v prípade skúšok samostatných spínacích alebo riadiacich zariadení teplota vzduchu ktorá obklopuje tieto zariadenia. V prípade skúšok rozvádzača sa za teplotu okolia považuje teplota vzduchu obklopujúceho rozvádzač na vonkajšej časti kovového krytovania. Počas skúšky je potrebné teplotu merať minimálne tromi teplomermi, termoelektrickými článkami, prípadne inými zariadeniami určenými na meranie teploty. Zariadenia na meranie teploty musia byť rovnomerne rozložené v okolí skúšaného zariadenia v priemernej výške prúdovodných častí. Vzdialenosť od

skúšaného zariadenia by mala byť približne 1 m. Zariadenia na meranie teploty musia byť chránené pred prievanom prípadne pred sálaním [7].

Chybu pri meraní teploty okolia je možné zmenšiť umiestnením teplomerov do nádoby s obsahom približne 0,5 l oleja. Tento postup potlačí rýchle teplotné zmeny merané na teplomeroch. Počas poslednej štvrtiny trvania skúšky nesmie dôjsť ku zmene teploty okolia väčšej ako 1 K za dobu 1 h. V prípade že miestnosť v ktorej je skúška vykonávaná neumožňuje dodržanie tejto stabilnej teploty je možné vykonať meranie teploty okolia na rovnakom spínacom alebo riadiacom zariadení bez prúdu za rovnakých podmienok. Toto zariadenie nesmie byť vystavené prílišnému tepelnému sálaniu. Za teplotu okolia sa v tomto prípade berie teplota nameraná pri tomto rovnakom zariadení [7].

### **3.1.4.2 Teplota skúšaného zariadenia**

Pri meraní teploty skúšaného zariadenia je potrebné vykonať opatrenia ktoré majú za následok zníženie odchýlok a chýb spôsobených časovým oneskorením zmeny teploty medzi teplotou okolia a teplotou skúšaného zariadenia. Na meranie teploty skúšaného objektu by mali byť použité vhodné teplomery prípadne termoelektrické články umiestnené v miestach ktoré sú prístupné a zároveň najteplejšie [7].

Norma ďalej definuje 3 základné podmienky ktoré je potrebné dodržať pri meraní teploty skúšaného objektu [7] :

- Zariadenia na meranie teploty skúšaného zariadenia musia byť chránené proti vonkajšiemu ochladeniu. Chladiaci povrch skúšaného zariadenia musí však byť výrazne väčší oproti chránenej časti zariadenia.
- Je potrebné zaistiť dobrú tepelnú vodivosť medzi povrchom skúšaného zariadenia a teplotným čidlom.
- V prípade, že sú na meranie použité kvapalinové teplomery umiestnené v miestach s výskytom striedavého magnetického poľa je doporučené uprednostniť liehové teplomery pred ortuťovými.

Meranie oteplenia cievok sa pokiaľ je to možné vykonáva pomocou metódy teplotnej zmeny elektrického odporu [7].

Za účelom výpočtu tepelnej časovej konštanty je potrebné počas skúšky vykonávať dostatočné množstvo meraní v intervaloch maximálne 30 minút. Tieto teploty musia byť zaznamenané v protokole o vykonávanej skúške [7].

Ďalej norma uvádza je potrebné vykonávať meranie teploty na svorkách hlavného obvodu spolu s meraním teploty na dočasných spojoch určených na napájanie skúšaného zariadenia a to vo vzdialenosti 1 m od svoriek hlavného obvodu. Rozdiel v oteplení medzi týmito meracími bodmi nesmie prekročiť 5 K. V prípade že oteplenie medzi týmito bodmi prekročí hodnotu 5 K je stále možné skúšku považovať za úspešnú v prípade že sú splnené všetky podmienky uvedené v kritériách pre vyhodnocovanie skúšky [7].

### 3.1.5 Meranie odporu hlavného obvodu

Norma uvádza nutnosť vykonanie merania odporu hlavného obvodu pred samotným vykonaním tejto skúšky. Meranie odporu je potrebné vykonať nasledovne: meracie svorky sa umiestnia na najbližšie možné miesto pri kontaktoch, prípadne spojoch, pričom sa výsledná hodnota určí na základe spriemerovania hodnôt z troch samostatných meraní. V prípade spínacieho zariadenia je potrebné medzi meraniami vykonať cyklus vypnutia a opätovného zapnutia. Ak skúšané zariadenie obsahuje výsuvné časti, medzi meraniami musí byť vykonaný cyklus vysunutia a zasunutia [7].

Ak je nominálny prúd skúšaného zariadenia do 50 A, vykoná sa toto meranie s hodnotou prúdu 50 A s prípustným rozpätím -20% až 0%. Pri nominálnom prúde zariadenia vyšším ako 50 A je možné skúšku vykonať hodnotou prúdu od 50A až po nominálny prúd skúšaného zariadenia [7].

Ak skúšané zariadenie neumožňuje meranie odporu každého jednotlivého spoja prípadne kontaktu, je možné toto meranie vykonať na viacerých kontaktoch v sérii, alebo na kompletne celom poli zariadenia [7].

Po vykonaní skúšky, ktorá vyžaduje meranie odporu hlavného obvodu sa meranie vykoná rovnakým postupom znovu, pričom rozdiel teploty okolia musí byť maximálne do 10 K. Výsledná zmena odporu je daná odčítaním výslednej hodnoty odporu od hodnoty odporu zmeranej pred skúškou [7].

### 3.1.6 Kritéria pre vyhodnotenie skúšky

Po vykonaní skúšok sa zaradenie považuje za vyhovujúce pokiaľ žiadna z jeho častí nepresiahla maximálnu dovolenú teplotu, prípadne oteplenie pri teplote okolia 40°C. Samostatne je možné vyhodnotiť cievky použité v rozvádzači a to tak, že sa za dovolenú maximálnu hodnotu oteplenia považuje najmenšia hodnota oteplenia použitého izolačného materiálu [7].

V prípade, že skúšaný objekt obsahuje prístroje alebo prvky, pre ktoré sú maximálne oteplenia definované v samostatných normách, vyhodnocujú sa tieto prvky podľa ich samostatných noriem [7].

V nasledujúcej tabuľke z normy ČSN EN 62271-1 ed.2 sú uvedené maximálne teploty a maximálne dovolené oteplenia pre teplotu okolia 40 °C, týkajúce sa problematiky oteplenia rozvádzača podrobnejšie opísaného v kapitole číslo 5 [7].



Tab. 3.1 Maximálne dovolené teploty a oteplenia pre jednotlivé prvky použité v rozvádzači VN podľa normy ČSN EN 62271-1 ed.2 [7]

Časť, materiál, izolácia	Najvyššia hodnota	
	Teplota [°C]	Oteplenie pri najvyššej teplote okolitého vzduchu 40°C [K]
<b>1. Kontakty</b>		
Z medi a zliatin medi bez pokovenia		
• v OG (Poznámka 2)	75	35
• v NOG (Poznámka 2)	115	75
• v oleji	80	40
Pokovené striebrom alebo niklom		
• v OG	115	75
• v NOG	115	75
• v oleji	90	50
Pokovené cínom		
• v OG	90	50
• v NOG	90	50
• v oleji	90	50

Časť, materiál, izolácia	Najvyššia hodnota	
	Teplota [°C]	Oteplenie pri najvyššej teplote okolitého vzduchu 40°C [K]
<b><u>2.Šrubové prípadne ekvivalentné spoje</u></b> Z medi a zliatin medi alebo zliatin hliníku bez pokovenia <ul style="list-style-type: none"> <li>• v OG</li> <li>• v NOG</li> <li>• v oleji</li> </ul> Pokovené striebrom alebo niklom <ul style="list-style-type: none"> <li>• v OG</li> <li>• v NOG</li> <li>• v oleji</li> </ul> Pokovené cínom <ul style="list-style-type: none"> <li>• v OG</li> <li>• v NOG</li> <li>• v oleji</li> </ul>	100 115 100  115 115 100  105 105 100	60 75 60  75 75 60  65 65 60
<b><u>3.Šrubové prírodné svorky</u></b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• bez pokovenia</li> <li>• pokovené striebrom, nikom</li> <li>• pokovené cínom</li> </ul>	100 115 105	60 75 65
<b><u>4.Izolanty a kovové časti v styku s izolantami pre nasledujúce teplotné triedy</u></b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Y</li> <li>• A</li> <li>• E</li> <li>• B</li> <li>• F</li> </ul> Email: <ul style="list-style-type: none"> <li>• olejový</li> <li>• syntetický</li> <li>• H</li> <li>• C a ostatné izol. Materiály</li> </ul>	90 105 120 130 155  100 120 180 Poznámka 1	50 65 80 90 115  60 80 140 Poznámka 1

Časť, materiál, izolácia	Najvyššia hodnota	
	Teplota [°C]	Oteplenie pri najvyššej teplote okolitého vzduchu 40°C [K]
<b>5. Prístupové povrchy</b>		
Povrchy určené na ručné ovládanie pri ktorých sa predpokladá dotyk za normálnej prevádzky		
• kovové pokovené	55	15
• kovové nepokovené	55	15
• nekovové	65	25
Povrchy pri ktorých sa predpokladá za normálnej prevádzky krátkodobý dotyk		
• kovové pokovené	65	25
• kovové nepokovené	70	30
• nekovové	80	40
Povrchy pri ktorých za normálnej prevádzky nie je potrebný dotyk		
• kovové pokovené	80	40
• kovové nepokovené	80	40
• nekovové	90	50

Poznámka 1: Obmedzené len požiadavkou nespôsobíť poškodenie okolitých častí.

Poznámka 2: Za NOG sa považujú neoxidačné plyny typu SF<sub>6</sub>, CO<sub>2</sub>. Za OG sa považujú oxidačné plyny, ktoré môžu spôsobiť urýchlenú degradáciu použitých materiálov. Za toto prostredie sa považuje napríklad okolitý vzduch [7].

Popri vyššie uvedenej tabuľke predpísaných hodnôt maximálneho oteplenia platia nasledovné podmienky [7]:

- Pri vákuových spínacích komorách sa uvedené hodnoty oteplenia nevzťahujú na časti vo vákuu
- Kvalita pokovenia musí zostať súvislá aj po vykonaní predpísaných zapínacích a vypínacích skúšok, po skúškach krátkodobým výdržným prúdom a po skúškach mechanickej trvanlivosti. V prípade narušenia súvislej vrstvy po týchto skúškach je potrebné považovať použité vodiče za nepokovené

Norma ČSN EN 62271-200 ed.2 ďalej dopĺňa podmienky pre skúšky oteplenia o nasledovné podmienky: v prípade konštrukcie kovového krytého rozvádzača s viacerými možnosťami konfigurácie musí byť pri skúškach použitá najhoršia možná konfigurácia vzhľadom na podmienky pri skúškach oteplenia. Zároveň je potrebné rozvádzač usporiadať čo najbližšie tomu, ako bude usporiadaný v bežnej prevádzke. Všetky kryty a dvere je potrebné pred skúškami uzavrieť. Skúšky je potrebné vykonať na nominálnom počte fáz rozvádzača a prúd fázami musí pretekať z jedného konca prípojnic až po svorky určené na pripojenie káblov [8].

V prípade skúšok samostatných funkčných jednotiek je potrebné susedné jednotky zaťažiť nominálnym prúdom tak, aby vznikali výkonové straty ako za bežnej prevádzky. Susedné jednotky je možné nahradiť ekvivalentným zdrojom tepla, prípadne izoláciou.

Ak v rozvádzači existujú ďalšie hlavné funkčné časti, potom musia byť tieto časti schopné prenášať prúdy odpovedajúce nominálnym podmienkam [8].

Pre odpojovače, uzemňovače a spínače nad 1 kV do 52 kV platia podľa noriem ČSN EN IEC 62271-102 a ČSN EN 62271-103 rovnaké ustanovenia pre otepľovacie skúšky ako v norme ČSN 62271-1 ed.2.

## 4. ROZVÁDZAČ IVEP

Rozvádzač, ktorého otepleniu sa táto práca venuje, je určený pre potreby spínania primárnej strany transformátora, ktorý napája vysokú pec. Jedná sa o kovový krytý rozvádzač. Štítkové hodnoty rozvádzača sú uvedené v tabuľke č.4.1.

Tab. 4.1 Štítkové parametre rozvádzača

Typ rozvádzača		MVSI-CB 36.4000.40/1.3.7.400/3.B
Sériové číslo rozvádzača		20-2904
Menovité napätie	$U_r$ :	36 kV AC
Menovitý prúd výkonového vypínača	$I_r$ :	4000 A AC
Menovitý prúd odpojovača	$I_r$ :	3150 A AC
Menovitý prúd prúdovodnej dráhy	$I_r$ :	4000 A AC
Frekvencia	$f_n$ :	50 Hz
Menovitý krátkodobý výdržný prúd	$I_k$ :	40 kA
Menovitý nárazový výdržný prúd	$I_p$ :	100 kA
Menovité trvanie skratu	$t_k$ :	1 s
Menovité napätie pomocných obvodov	$U_a$ :	230 V AC/DC
Menové výdržné napätie (50Hz/1min)	$U_d$ :	70 kV
Výdržné rázové napätie (1,2/50 $\mu$ s)	$U_p$ :	170 kV
Stupeň krytia		IP 44

Rozvádzač obsahuje odpojovač IVEP QAK 36.4000.40, výkonový vypínač Siemens typu 3AH3 a uzemňovač IVEP QZ 36.40. Štítkové údaje týchto prístrojov sú uvedené v tabuľke 4.2.

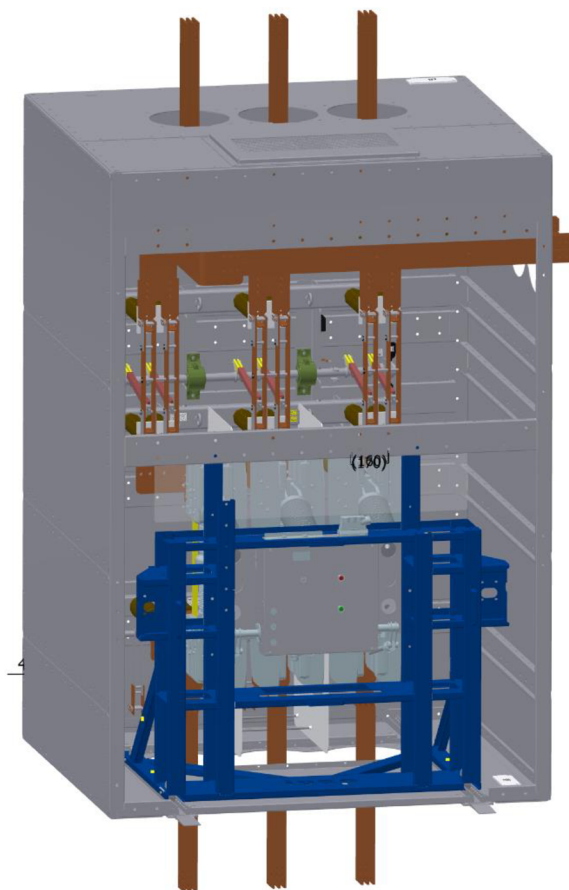
Celý rozvádzač je riešený pre nominálny prúd až do 4000 A. V momentálnej konfigurácii sú však použité prístroje s nominálnym prúdom 3150 A. Tieto prístroje a aj celý rozvádzač je kompatibilný pre prístroje s nominálnym prúdom 4000 A. Rozvádzač obsahuje aj výsuvný systém pre výkonový vypínač. Odpojovač a aj uzemňovač má osadený motor a prevodovku pre potreby diaľkového elektrického ovládania. V prípade prípojnicových zberníc je použitá medená pásovina s rôznymi prierezmi a aj počtom pásovín na jednotlivú fázu. Všetky medené zbernice sú postriebané. V rozvádzači sa nachádza jeden prívod z hornej časti, ktorý sa následne rozdelí na dve časti, pričom jedna pokračuje na vrchné svorky prívodového odpojovača a druhá časť pokračuje do vedľajšieho poľa.

Tab. 4.2 Štítkové hodnoty prístrojov použitých v rozvádzači

Prístroj:	Odpojovač		
Výrobca:	IVEP		
Typ:	QAK 36.4000.40/1.L.3.7.FE.500/3		
$U_r$ :	36 kV	$t_k$ :	1 s
$U_p$ :	170 kV	$M_r$ :	2000 C-O
$I_r$ :	4000 A	Váha:	262 kg
$I_k$ :	40 kA		
Prístroj:	Uzemňovač		
Výrobca:	IVEP		
Typ:	QZ 63.40/1.L.3.7.FE.500/3		
$U_r$ :	36 kV	$t_k$ :	1 s
$U_p$ :	170 kV	$M_r$ :	2000 C-O
$I_k$ :	40 kA	Váha:	183 kg
Prístroj:	Výkonový vypínač		
Výrobca:	Siemens		
Typ:	3AH3306-7		
$U_r$ :	36 kV	$I_r$ :	4000 A
$U_p$ :	170 kV	$I_{sc}$ :	40 kA
$U_d$ :	70 kV	$I_{ma}$ :	100/104 kA

## 5. 3D MODEL ROZVÁDZAČA

Pre potreby simulácie oteplenia v simulačnom prostredí SolidWorks Flow Simulation je potrebné 3D model rozvádzača zjednodušiť. Potrebný výpočetný výkon pre simuláciu oteplenia rozvádzača sa zväčšuje spolu s jeho komplexitou. Vzhľadom k tomu, že veľa častí pôvodného 3D modelu nemá žiadny, prípadne len zanedbateľný vplyv na výsledné oteplenie, je možné tieto časti z modelu úplne odstrániť, alebo ich zjednodušiť. To, či bolo zjednodušenie jednotlivých častí rozvádzača správne, je možné následne overiť porovnaním hodnôt oteplenia zistených pri simulácii a hodnôt oteplenia reálne nameraných. Následne je možné model rozvádzača a vstupné parametre simulácie upraviť tak, aby sa jednotlivé hodnoty čo najviac priblížili. Úprava 3D modelu bola vykonaná v softwarovom prostredí Autodesk Inventor, nakoľko bol pôvodný model vytvorený taktiež v tomto softwari. Pôvodný 3D model rozvádzača je možné vidieť na obrázku 5.1.

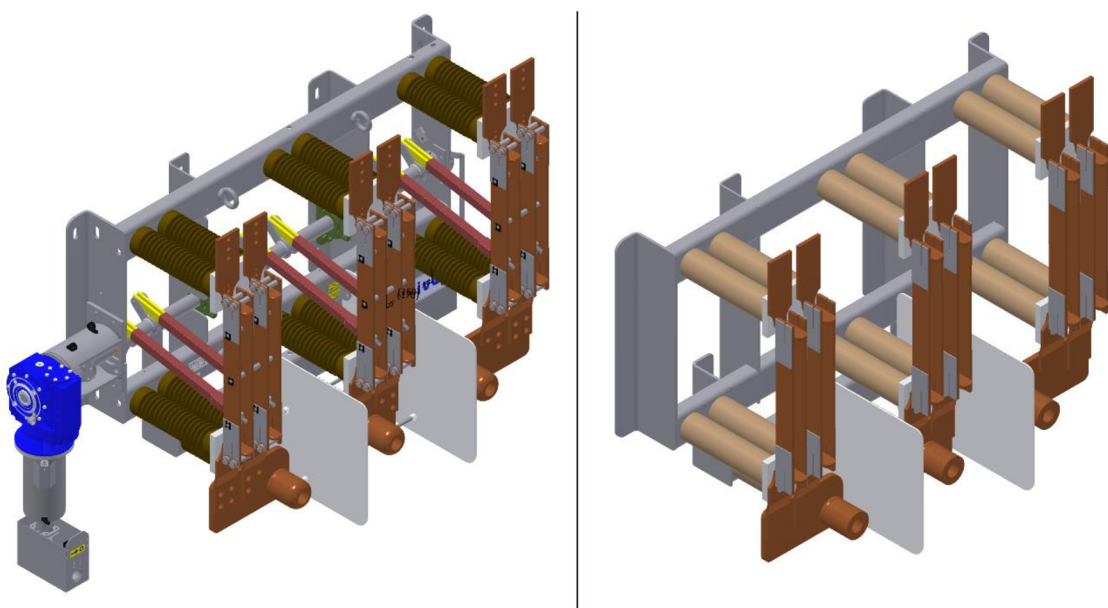


Obr. 5.1 Pôvodný 3D model rozvádzača

Z pôvodného 3D modelu rozvádzača sme ako prvé odstránili spojovací materiál typu nity, šróby a podobne. Tieto prvky zväčšujú komplexitu celého rozvádzača a zároveň nemajú žiadny, prípadne len minimálny vplyv na výsledné oteplenie rozvádzača. Jediná časť spojovacieho materiálu, ktorá priamo súvisí s výsledným oteplením je časť použitá na spojovanie hlavnej prúdovodnej dráhy. Aj tento spojovací materiál sme však odstránili a taktiež vzniknuté diery na hlavnej prúdovodnej dráhe v medených zberniciach. Toto zjednodušenie má za následok mierne skreslenie výsledkov o ktorých však predpokladáme, že budú zanedbateľné, nakoľko jednou zo vstupných podmienok do simulácie sú prechodové odpory jednotlivých stykových plôch na hlavnej prúdovodnej dráhe. Tieto hodnoty budú do simulácie zadané na základe reálne nameraných prechodových odporov. Tieto reálne namerané prechodové odpory v sebe budú zahŕňať aj negatívny vplyv použitého spojovacieho materiálu.

Ďalšie odstránené prvky z celého modelu sú všetky mechanické časti, ktoré sú mimo prúdovodnej dráhy, prípadne časti ako tiahla odpojovača, ktoré sa síce priamo dotýkajú prúdovodnej dráhy, avšak vzhľadom k tomu, že styková plocha je minimálna a časti sú vyrobené z izolačného materiálu, ktorý má mimo dobrých elektrických izolačných vlastností aj dobré tepelné izolačné vlastnosti, boli tieto tiahla a podobné prvky odstránené tiež.

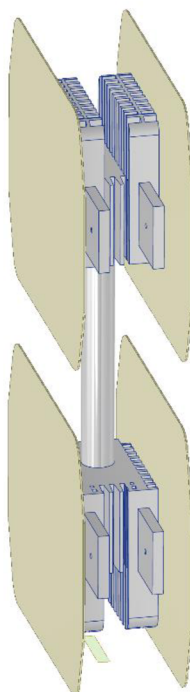
Následne sme na modeli upravili prvky, ktoré majú podstatný mechanický význam ale aj termodynamický význam a bolo ich možné upraviť na dostatočne zjednodušenú geometriu, ktorá nebude neúmerne zväčšovať potrebný výpočetný výkon na simuláciu. Medzi tieto prvky patria napríklad izolátory, prípadne izolačné prepážky medzi jednotlivými fázami. Porovnanie pôvodného a zjednodušeného odpojovača QAK 36.4000.40 je možné vidieť na obrázku 5.2. Uzemňovač bol zjednodušený obdobným spôsobom ako odpojovač.





Obr. 5.2 Porovnanie odpojovača QAK 36.4000.40 pred úpravou a po úprave

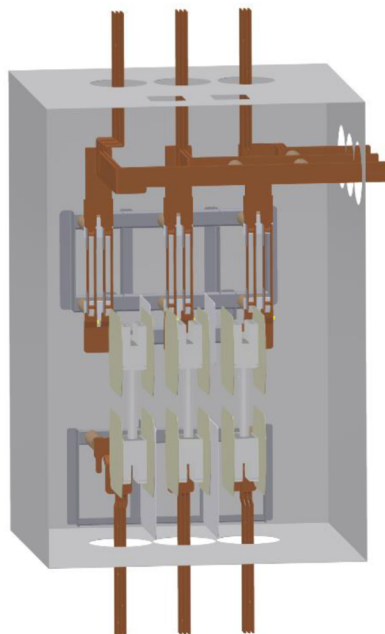
Model vypínača Siemens 3AH3 bolo potrebné nanovo vymodelovať, nakoľko v pôvodnom 3D modeli rozvádzača bol tento prvok ako celok a nebolo možné ho efektívne upravovať. Z celého výkonového vypínača má na oteplenie najväčší vplyv jeho prúdovodná dráha. Z tohoto dôvodu boli vymodelované len prúdovodné dráhy vypínača spolu s prepážkami medzi jednotlivými fázami a materiálom, ktorý plní funkciu chladiča v okolí prúdovodnej dráhy. Vákuová komora vypínača bola nahradená jednoduchou spojitou medenou tyčou. Ako vstupný parameter bude do simulácie zadaný prechodový odpor vákuovej komory. Zjednodušenú komoru vypínača je možné vidieť na obrázku 5.3.



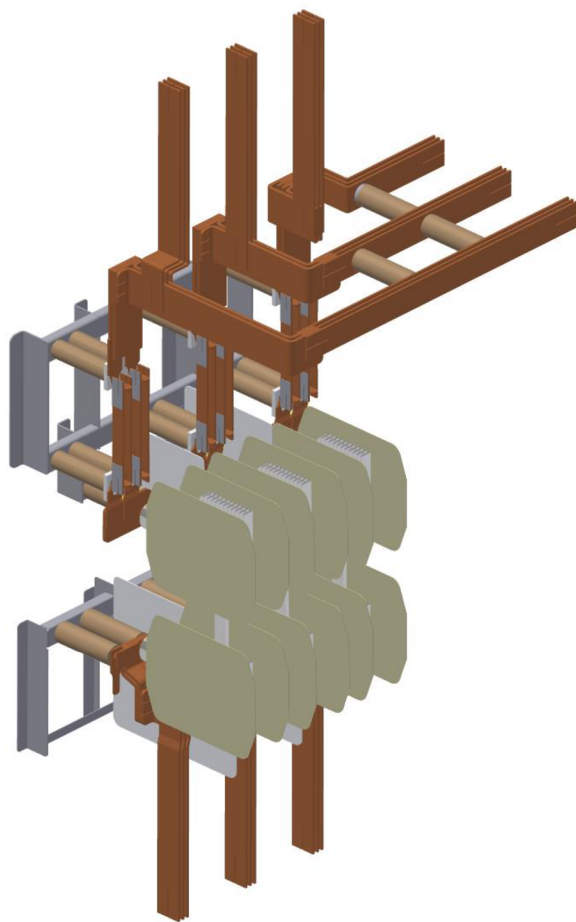
Obr. 5.3 Zjednodušený model prúdovodnej dráhy vypínača 3AH3

Ďalším prvkom, ktorý bol pre účely zjednodušenia vymodelovaný nanovo, je kovová skriňa rozvádzača. Pôvodná skriňa rozvádzača sa skladala zo základnej nosnej konštrukcie na ktorú sú pripevnené jednotlivé plechy slúžiace na zakrytie. Táto konfigurácia obsahuje neúmerne množstvo dier po spojoch, a sama o sebe je na účely simulácie príliš komplikovaná. Celá skriňa bola teda nahradená novým modelom skrine. Nový model skrine zodpovedá základným geometrickým rozmerom skrine pôvodnej, a obsahuje všetky diery, ktoré môžu mať vplyv na výsledné oteplenie. Šírka plechov nového modelu zodpovedá šírke pôvodných plechov.

Celý rozvádzač bol teda zbavený prvkov, ktoré nemajú, prípadne majú ale zanedbateľný vplyv na oteplenie. Výsledný zjednodušený model bez predných dverí je možné vidieť na obrázku 5.4. Zjednodušený model bez kovovej skrine je možné vidieť na obrázku 5.5.



Obr. 5.4 Výsledný zjednodušený model rozvádzača bez predných dverí a skrine vypínača



Obr. 5.5 Výsledný zjednodušený model rozvádzača bez skrine

## 6. VPLYVY OVPLYVNÚJÚCE VEĽKOSŤ OTEPLENIA ROZVÁDZAČA

Veľkosť výsledného oteplenia a samotný priebeh oteplenia vodiča, ktorým prechádza prúd je definovaný podľa vzorca [1]:

$$\Delta\theta = \Delta\theta_{\max} \left[1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right] \quad (17)$$

Veľkosť maximálneho oteplenia z tejto rovnice  $\Delta\theta_{\max}$  [K] je definovaná podľa vzorca 18 a časová konštanta  $\tau$  [-] je definovaná podľa vzorca 19 [1].

$$\Delta\theta_{\max} = \frac{RI^2}{\alpha_0 A} \quad (18)$$

$$\tau = \frac{cV}{\alpha_0 A} \quad (19)$$

Z vyššie uvedených rovníc je zrejmé, že na výslednú veľkosť oteplenia bude mať vplyv veľkosť prúdu, ktorý vodičom preteká a odpor vodiča ktorý závisí na jeho priereze, dĺžke a rezistivite. Veľkosť oteplenia v rozvádzači bude lokálne najväčšia tam, kde je použitý najmenší prierez vodiča, respektíve v prípade rozvádzača najmenší prierez medených zberníc. Všetky medené zbernice použité v rozvádzači sú vyrobené z rovnakého typu medi, až na časť výkonového vypínača. Rezistivita je teda v použitých medených zberniciach rovnaká. Ďalej z vyššie uvedených rovníc plynie, že na výslednú veľkosť oteplenia vodiča a teda aj rozvádzača ako celku má vplyv plocha  $A$  [m<sup>2</sup>] ktorá umožňuje odvádzanie tepla do okolia. Využitie tohoto parametra pre zníženie veľkosti výsledného oteplenia je možné vidieť na výkonovom vypínači. Práporce vypínača majú tvar ktorý zväčšuje chladiacu plochu  $A$ , a tým znižuje veľkosť výsledného oteplenia.

Veličina  $\alpha_0$  [W/m<sup>2</sup>·K], teplotný súčiniteľ prestupu tepla, má na ovplyvňuje nielen výslednú veľkosť oteplenia, ale aj jeho priebeh. Teplotný súčiniteľ prestupu tepla je veličina ktorú nie je možné s dostatočnou presnosťou určiť na základe výpočtu, nakoľko pri samotnom oteplení dochádza ku dynamickým dejom ktoré majú za následok jeho zmeny. Závisí od rôznych parametrov ako je napríklad rýchlosť prúdenia okolitého vzduchu a podobne. Túto veličinu je však možné ovplyvniť a to napríklad zväčšením emisivity použitého materiálu. Samotná emisivita použitého vodiča má teda vplyv na veľkosť a aj priebeh výsledného oteplenia rozvádzača. Ďalšími parametrami ktoré majú vplyv na priebeh samotného oteplenia, nie však na veľkosť výsledného oteplenia, sú objem uvažovaného vodiča  $V$  [m<sup>3</sup>] a objemová tepelná kapacita  $c$  [J/m<sup>3</sup>·K].

Na veľkosť výsledného oteplenia majú takisto vplyv aj rôzne konštrukčné parametre daného rozvádzača. Použitie prepážok medzi jednotlivými fázami dokáže zmenšiť ohrievanie vodiča od susedných fáz a tým ovplyvniť veľkosť výsledného oteplenia.

Samotné prúdenie vzduchu v rozvádzači má taktiež zásadný vplyv na veľkosť oteplenia. Prúdenie vzduchu v rozvádzači je ovplyvnené vetracími otvormi a podobne.

Parametre ovplyvňujúce výsledné oteplenie rozvádzača teda sú:

- Veľkosť prechádzajúceho prúdu
- Prierez vodiča, respektíve zberní
- Materiálové vlastnosti použitej medi
- Povrchová úprava medi
- Prvky s veľkou plochou ktoré sú súčasťou prúdovodnej dráhy
- Cirkulácia vzduchu v rozvádzači
- Rozloženie jednotlivých komponentov rozvádzača
- Prepážky medzi jednotlivými fázami rozvádzača
- Prechodové odpory na spojoch hlavnej prúdovodnej dráhy
- Skin efekt
- Mechanické časti slúžiace na uchytenie prúdovodnej dráhy
- Vonkajšie vplyvy ako napríklad teplota okolitého vzduchu
- Prítomnosť vedľajších polí pri rozvádzači

## 6.1 Jav Skinefektu

V prípade, že vodičom prechádza striedavý prúd, dochádza ku vytvoreniu časovo premennému magnetickému poľu v oblasti vodiča. Toto magnetické pole vo vodiči indukuje elektromotorické napätie. Dôsledkom tohoto javu je tvorba indukovaného prúdu, ktorý je fázovo posunutý voči prúdu ktorý vodičom prechádza. Tieto prúdy sa následne spoločne sčítajú a vytvorí sa výsledná veľkosť prúdu vo vodiči. Na vodič ako celok, pôsobí vzniknuté magnetické pole striedavého prúdu tak, že v obvode vzniká jav samoindukcie. Dôsledkom javu samoindukcie je vznik reaktančného úbytku napätia, zmenšenie prúdu v obvode a jeho fázový posun voči napätiu zdroja. Lokálny účinok magnetického poľa je vyvolaný jednotlivými prúdovými vláknami, ktoré sa do seba uzatvárajú vo vodiči. Magnetické pole meniace sa s časom indukuje v okolí vodiča napätia. Toto napätie má za následok vznik vírivých prúdov vo vodiči. Tieto prúdy majú opačnú fázu ako prúd prechádzajúci vodičom a spôsobujú vznik dodatočných strát. Vzniknuté vírivé prúdy sa pričítajú k prúdu, ktorý prechádza vodičom a to spôsobí nerovnomerné rozloženie prúdovej hustoty v priereze vodiča. Magnetické pole vzniknuté priechodom striedavého prúdu teda spôsobí vytlačenie prechádzajúceho prúdu vodičom do jeho okrajov. Tento jav sa nazýva skinefekt a prakticky spôsobuje znižovanie efektívneho prierezu vodiča a tým zväčšovanie jeho odporu [12].

Jav skinefektu je teda potrebné započítať do vzorca pre výpočet odporu vodiča. Vzorec na výpočet odporu vodiča so zahrnutým činiteľom  $k_s$ , ktorý predstavuje jav skinefektu má teda tvar [12]:

$$R = k_s \rho \frac{l}{S} \quad (20)$$

Činiteľ skinefektu je možné určiť na základe typu použitého materiálu, veľkosti a tvaru prúdovodnej dráhy z empiricky určených tabuliek. V rozvádzači ktorého oteplenie budeme simulovať je väčšina prúdovodnej dráhy tvorená medenou pásovinou o rozmeroch 120x10mm. Budeme teda pre určovanie koeficientu predstavujúceho účinky skinefektu uvažovať túto hodnotu. Rezistivita použitej medi E-Cu 57; 42 3001.00 pri teplote 20°C je 0,0174  $\mu\Omega\cdot\text{m}$ . Pomer dlhšej strany medenej pásoviny ku kratšej je 12. Z grafu uvedenom v [12] sme teda odčítali koeficient skinefektu a je to hodnota 1,22 [12].

Vzhľadom ku komplexnosti tvaru prúdovodnej dráhy, meniacemu sa prierezu ako aj mnoho ďalších, dynamicky sa meniacich parametrov medzi ktorými sú aj nemožnosti simulácie pri striedavom prúde, budeme tento koeficient podľa potreby a uváženia zarátavať do definovaných dodatočných elektrických prechodových odporov.

## 6.2 Elektrický prechodový odpor

Elektrický prechodový odpor kontaktných stykov prúdovodnej dráhy predstavuje významný zdroj strát v elektrických prístrojoch. Existujú dva základné typy kontaktných stykov v elektrických prístrojoch. Jeden typ kontaktných stykov je styk pracovný, pri ktorom je prítlak tvorený pružinami, prípadne inými prítlačným mechanizmom. Tento typ kontaktného styku sa vyskytuje pri spínacích prístrojoch, v našom prípade sa jedná o spínací kontakt vo vákuovej komore výkonového vypínača a o kontakty na odpojovači. Druhý typ kontaktného styku je styk trvalý, ktorý sa vyskytuje v miestach prúdovodnej dráhy, kde sú vodiče spojené trvalo šróbami. Elektrický prechodový odpor je možné v kontaktnom styku spočítať na základe rovnice č.21 [12].

$$R_s = k F^{-n} \quad (21)$$

Veľkosť elektrických prechodových odporov v kontaktných stykoch je teda podľa vyššie uvedenej rovnice závislá na veľkosti prítlačnej sily  $s$  na materiálovej konštante  $k$ . Za exponent  $n$  dosadzujeme do rovnice hodnotu, ktorá predstavuje druh styku. V prípade, že sa jedná o šróbový spoj dosadzujeme do rovnice  $n = 1$ . Materiálový koeficient „ $k$ “ použitý vo vzorci zohľadňuje vlastnosti materiálu a je závislá na rôznych ďalších parametroch. Najzásadnejší vplyv má na tento koeficient teplota daného materiálu. S rastúcou teplotou kontaktného styku dochádza ku mäknutiu materiálu. V prípade, že materiál kontaktného styku zmäkne, dochádza ku zmenšeniu prechodového odporu. Teplota mäknutia pre meď predstavuje 190°C. Pri skúškach trvalým prúdom, kedy je maximálna dovolená teplota postriebrenej medi 115°C, ku tomuto javu teda vo výraznej miere nedochádza. Jav sa prejavuje najmä pri nadprúdových, prípadne skratových stavoch [12].

Ďalšími parametrami ktoré sú zahrnuté v koeficiente  $k$ , sú povrchové vlastnosti kontaktného materiálu. Pri kontaktoch, ktoré sú umiestnené v ochrannom prostredí (napr. SF<sub>6</sub> alebo olej), je možné kontaktné plochy považovať za chránené pred vznikom

povrchovej oxidácie, tým pádom je koeficient  $k$  menší. Ďalšou situáciou kedy je možné koeficient  $k$  považovať za menší je situácia, kedy sa kontakt neustále čistí spínacím pohybom [12].

### **6.3 Závislosť odporu použitej medi na teplote**

Pri zväčšení teploty medeného vodiča dochádza ku zväčšovaniu jeho elektrického odporu. Pri meraní elektrických prechodových odporov prúdovodnej dráhy je súčasťou výsledného elektrického prechodového odporu aj samotný odpor medi. Keďže boli elektrické prechodové odpory merané na rozvádzači a jeho podružných zariadeniach pri teplote okolia 20°C, výsledný elektrický prechodový odpor pri simulácií bude zväčšený v závislosti od nárastu teploty v danom mieste.

Norma IEC 60889 a IEC 60028 definuje, že pri zväčšení teploty medi o 1°C, dochádza k nárastu odporu medi o 0,393% [14]. Tento nárast je teda potrebné zohľadniť pri porovnávaní výsledkov reálne nameraného elektrického prechodového odporu a elektrického prechodového odporu zisteného zo simulácie.

## 7. METÓDA KONEČNÝCH OBJEMOV

Metóda konečných objemov (ďalej len „MKO“) je matematická metóda využívajúca diskretizáciu, ktorá je využívaná pre numerické simulovanie. Samotná metóda spočíva v rozdelení objemu skúmaného priestoru na malý počet jednotlivých kontrolných objemov. Pre jednotlivé kontrolné objemy je následne možné použiť Navierové-Stokesové rovnice. Tieto rovnice matematicky vyjadrujú zákony zachovania hmotnosti, hybnosti a energie. Z rovníc zachovania zároveň vyplýva, že to, čo z kontrolného objemu vystúpi určitou plochou, musí zároveň vstúpiť do iného kontrolného objemu [9].

Integrálny tvar rovnice pre zákon zachovania hmotnosti je uvedený v rovnici č.20, kde  $V$  [ $m^3$ ] predstavuje objem,  $\rho$  [ $kg \cdot m^3$ ] predstavuje hustotu,  $S$  [ $m^2$ ] predstavuje plochu uzavretého objemu,  $\mathbf{v}$  predstavuje vektor rýchlosti a  $\mathbf{n}$  predstavuje normálový jednotkový vektor [10].

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho dV + \oint_S \rho \vec{v} \cdot \vec{n} dS = 0 \quad (22)$$

Výsledný vektor, ktorý vznikne po vektorovom súčine vektoru rýchlosti a jednotkového normálového vektoru v tejto rovnici smeruje von z kontrolného objemu a dáva tak zápornú hodnotu [10].

Ďalšou z rovníc, ktoré numerická metóda konečných objemov využíva, je rovnica zachovania hybnosti. Integrálny tvar tejto rovnice je uvedený v rovnici č. 21 [10].

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \vec{v} dV + \int_S \rho \vec{v} \vec{v} \cdot \vec{n} dS = \sum f \quad (21)$$

Z tejto rovnice vyplýva, že hybnosť látky v uzavretom objeme je rovná súčtu všetkých síl pôsobiacich na tento kontrolný objem. Tieto sily môžu predstavovať napríklad povrchové, prípadne objemové sily. Medzi povrchové sily patrí napríklad tlak, povrchové napätie alebo trenie. Objemové sily môžu predstavovať napríklad gravitáciu, odstredivé alebo elektromagnetické sily [10].



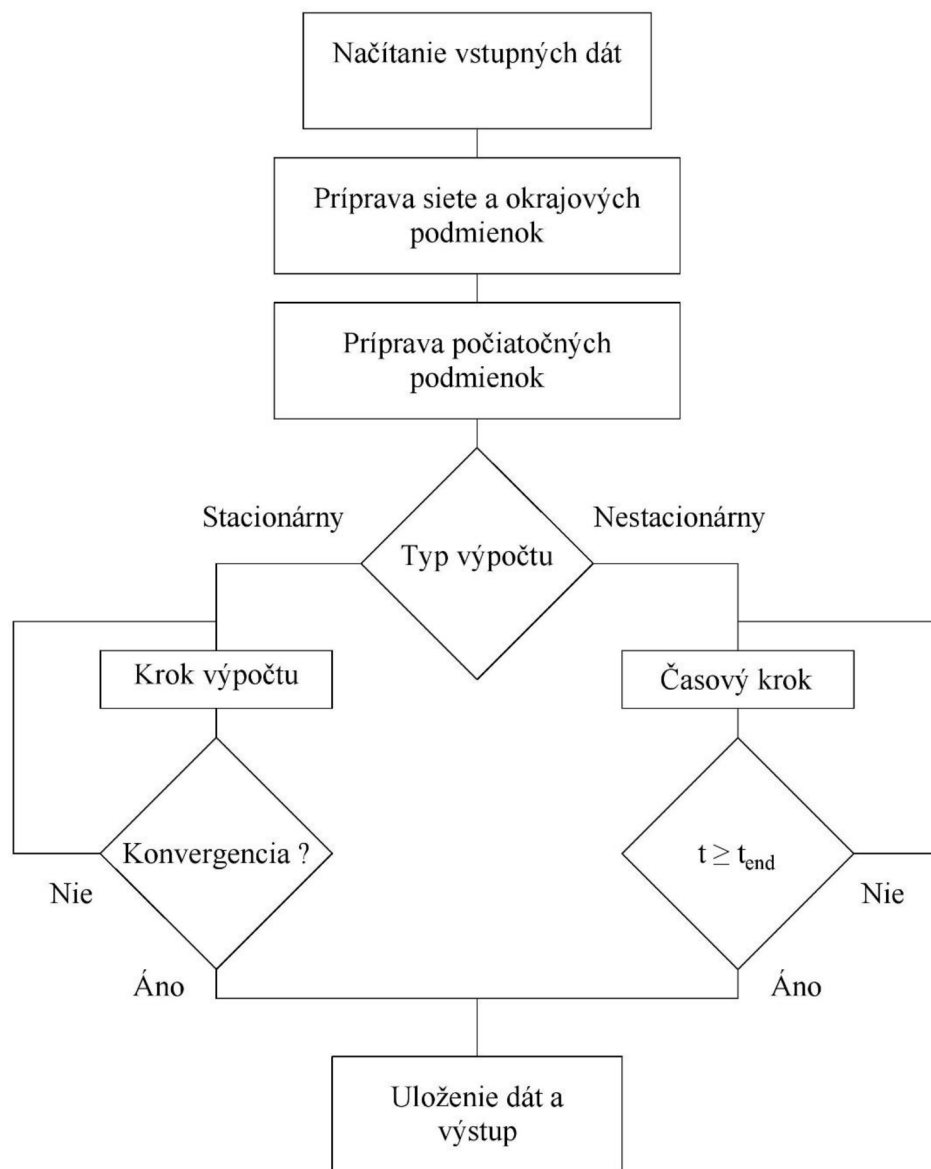
Zákon zachovania energie je ďalším zo zákonov, ktoré táto metóda využíva a je uvedený v rovnici č.22. Táto rovnica vyplýva z rovnice zachovania skalárnych veličín [10].

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V (\rho H) dV + \oint_S (\rho H \vec{v} \cdot \vec{n}) dS = \oint_S (k \text{ grad } T \cdot \vec{n}) dS + \int_V (\rho \vec{f}_e \cdot \vec{v} + q_H) dV + \oint_S ((\vec{\tau} \cdot \vec{v}) \cdot \vec{n}) dS + \int_V \frac{\partial p}{\partial t} dV \quad (21)$$

Ľavá strana rovnice predstavuje zmenu entalpie v čase, konkrétnej sledovanej hmoty. Prvý člen pravej strany rovnice predstavuje prácu tepla privedeného vedením, druhý člen vyjadruje práce síl elektromagnetickej povahy, tretí člen predstavuje prácu vnútorných trecích síl a posledný člen predstavuje prácu tlakových síl. Súčet týchto prác sa musí teda rovnať zmene entalpie konkrétnej sledovanej časti hmoty v čase.

Pre potreby simulácie je teda v simulačnom prostredí využívaná metóda konečných objemov, ktorá používa vyššie uvedené princípy. Samotné simulačné prostredie teda rozdelí celý výpočetný objem na požadovaný počet kontrolných objemov alebo „buniek“. Následné pri simulácii napríklad oteplenia uvažuje, že sa celé oteplenie sústreďí len v jednom kontrolnom objeme nachádzajúcom sa v strede. Postupným iteračným výpočtom povrchových a objemových integrálov v jednotlivých kontrolných objemoch, sa získa výsledná požadovaná hodnota [10].

Štruktúra programu využívajúceho metódu konečných objemov je zobrazená na obrázku 7.1.



Obr. 7.1 Štruktúra programu využívajúceho metódu konečných objemov [11]

## 8. SOLIDWORKS FLOW SIMULATION

SolidWorks Flow Simulation (ďalej len „SWFS“), je nadstavba softwaru SolidWorks určená na komplexnú simuláciu dynamiky tekutín a zdieľanie tepla. Pre simuláciu využíva metódu konečných objemov. Pri výpočtoch software využíva Navier-Stokesové rovnice zachovania hmotnosti, hybnosti a energie. Tieto rovnice sú zároveň doplnené o ďalšie rovnice ktoré vyjadrujú rôznorodé vlastnosti látok, napríklad tepelnú vodivosť. Niektoré z rovníc ktoré SWFS využíva, boli určené empiricky. SWFS teda predstavuje výhodný nástroj pre rôznorodé technické aplikácie [13].

Pre potreby simulácie bolo potrebné previesť 3D model rozvádzača zo softwaru Autodesk Inventor do SW. Pri tomto procese sme exportovali celý rozvádzač z Autodesk Inventor do formátu STEP. Následne sme tento formát importovali do prostredia SW. SWFS využíva pre potreby simulácie princípy metódy konečných objemov. SWFS umožňuje pre výpočty používať len jednosmerný prúd čo znamená, že simulácia nebude zohľadňovať skin efekt. V časti 6.2 sme síce určili, že jav skin efektu nebude mať na odpor prúdovodnej dráhy rozvádzača zanedbateľný efekt, avšak pre komplexnosť tvaru prúdovodnej dráhy a iných dynamicky meniacich sa parametrov budeme tento jav zanedbávať.

### 8.1 Nastavenia SolidWorks Flow Simulation

Pre potreby simulácie je potrebné v simulačnom prostredí nastaviť jednotlivé vstupné údaje tak, aby bola nájdená optimálna hladina medzi potrebným výpočtovým výkonom a presnosťou výsledkov.

Prvá vec ktorú sme v SWFS nastavili bola výpočetná doména, ktorá predstavuje hranice objemu v ktorom bude vykonaná simulácia. Následne sme definovali výpočetnú sieť. Hodnotu počiatkovej výpočetnej siete umožňuje SWFS nastaviť na hodnoty od 1 do 7, pričom 7 predstavuje sieť s najväčším počtom prvkov. Platí priama úmera, čím viac prvkov, respektíve jednotlivých objemov obsahuje definovaná sieť, tým je simulácia výpočetne náročnejšia. Zároveň sú však výsledne vypočítané hodnoty takejto siete presnejšie.

Vzhľadom na relatívnu komplexnosť 3D modelu rozvádzača sme už pri prvotnej simulácii nastavili hodnotu počiatkovej siete na 7.

Následne sme v SWFS nastavili typy jednotlivých použitých materiálov. Fyzikálne vlastnosti najzásadnejších použitých materiálov sme nastavili podľa reálne použitých materiálov.

Pri reálnom meraní došlo ku postupnému stúpaniu teploty okolia. Do simulačného prostredia bola zadaná priemerná teplota okolia vypočítaná z týchto hodnôt. Pre potreby našej simulácie sme zanedbali turbulentné prúdenie vzduchu.

Po nastavení vyššie uvedených hodnôt a vstupných parametrov, SWFS vypočítal celkový objem jednotlivých materiálov v definovanej výpočetnej doméne. Pri tomto výpočte došlo k chybe, kedy časť geometrie SWFS považoval za krivku nulovej hĺbky a tak nebol schopný objem jednotlivých materiálov spočítať. Táto chyba bola odstránená dodatočným upravením 3D modelu. Chybná geometria bola nahradená novou, upravenou.

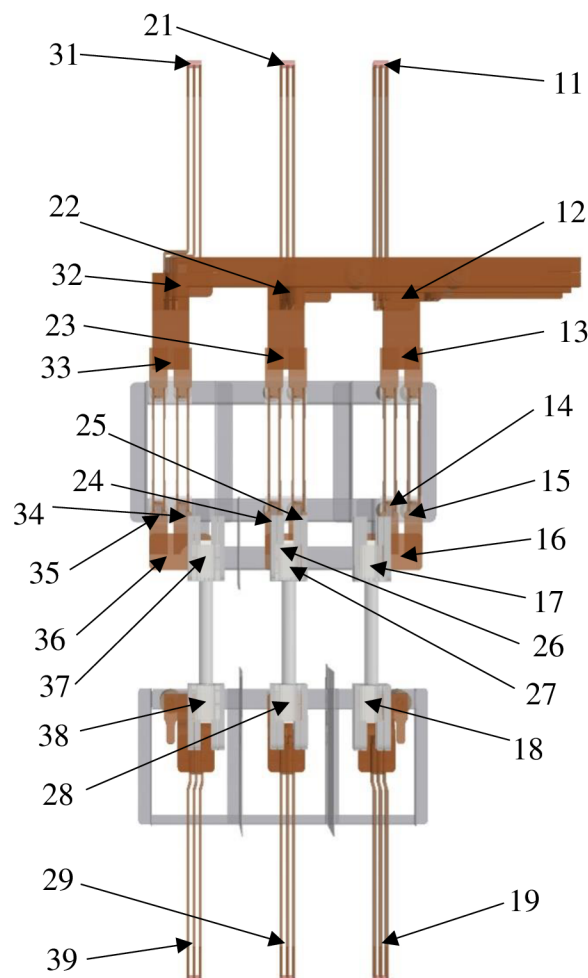
V simulačnom prostredí sme nastavili vstupné a výstupné plochy do ktorých vstupuje a vystupuje elektrický prúd. Prúd pre jednotlivé fázy sme nastavili v súlade s prúdom použitým pri reálnom meraní t.j. 3250 A. Pri reálnom meraní došlo k miernemu poklesu prúdu v dôsledku ohrevu prúdovodnej dráhy. Z priemernej hodnoty prúdu na začiatku merania 3253 A, došlo k jeho zníženiu v priebehu merania až na hodnotu 3203 A. Túto zmenu pri simulácií zanedbávame.

## 9. SIMULÁCIA OTEPLENIA ROZVÁDZAČA VN

Celý proces simulácie spočíva v dvoch základných krokoch. Prvý krok je samotné nastavenie vstupných parametrov aby vôbec bolo možné simuláciu vykonať. V ďalšom kroku bola vykonaná prvotná simulácia. Po úspešnej prvej simulácii boli výsledné hodnoty porovnané s hodnotami reálne nameranými. Na základe zistených odlišností výsledkov je možné následne vstupné parametre samotného modelu upraviť tak, aby výsledky následnej druhej simulácie dosiahli čo najväčšiu zhodu s reálne nameranými hodnotami. Pri definícii vstupných parametrov pred druhou simuláciou sme vykonali niekoľko menších simulácií, určených na aproximáciu niektorých vstupných parametrov.

### 9.1 Prvá simulácia oteplenia rozvádzača VN

Na porovnanie výsledkov simulácie s reálne nameranými hodnotami boli v simulácii rozmiestnené meracie body na jednotlivých fázach v rovnakých miestach ako pri reálnom meraní. Jednotlivé umiestnenie meracích bodov môžeme vidieť na obrázku č. 9.1.

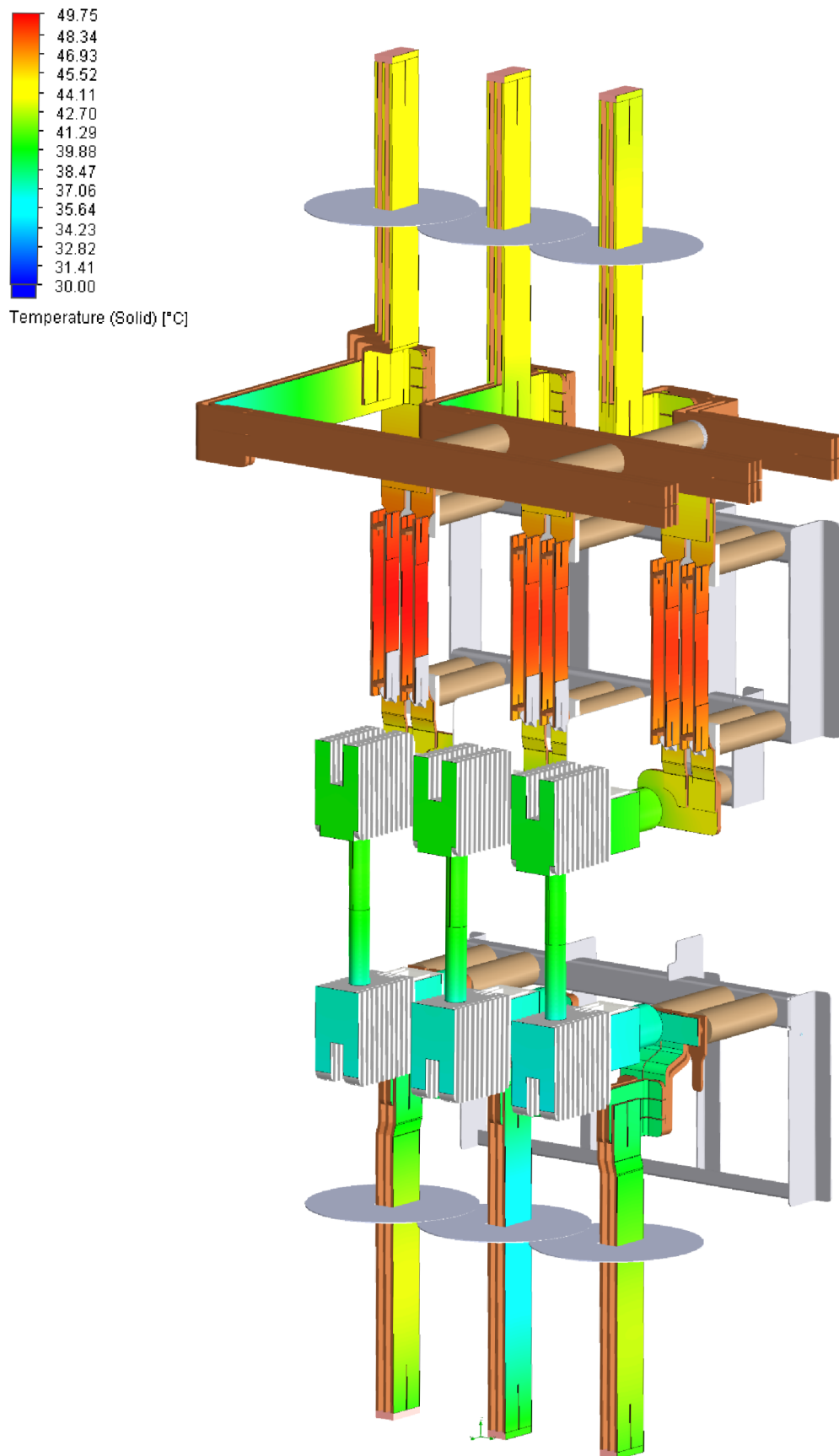


Obr. 9.1 Rozmiestnenie meracích bodov pri reálnom meraní aj simulácii

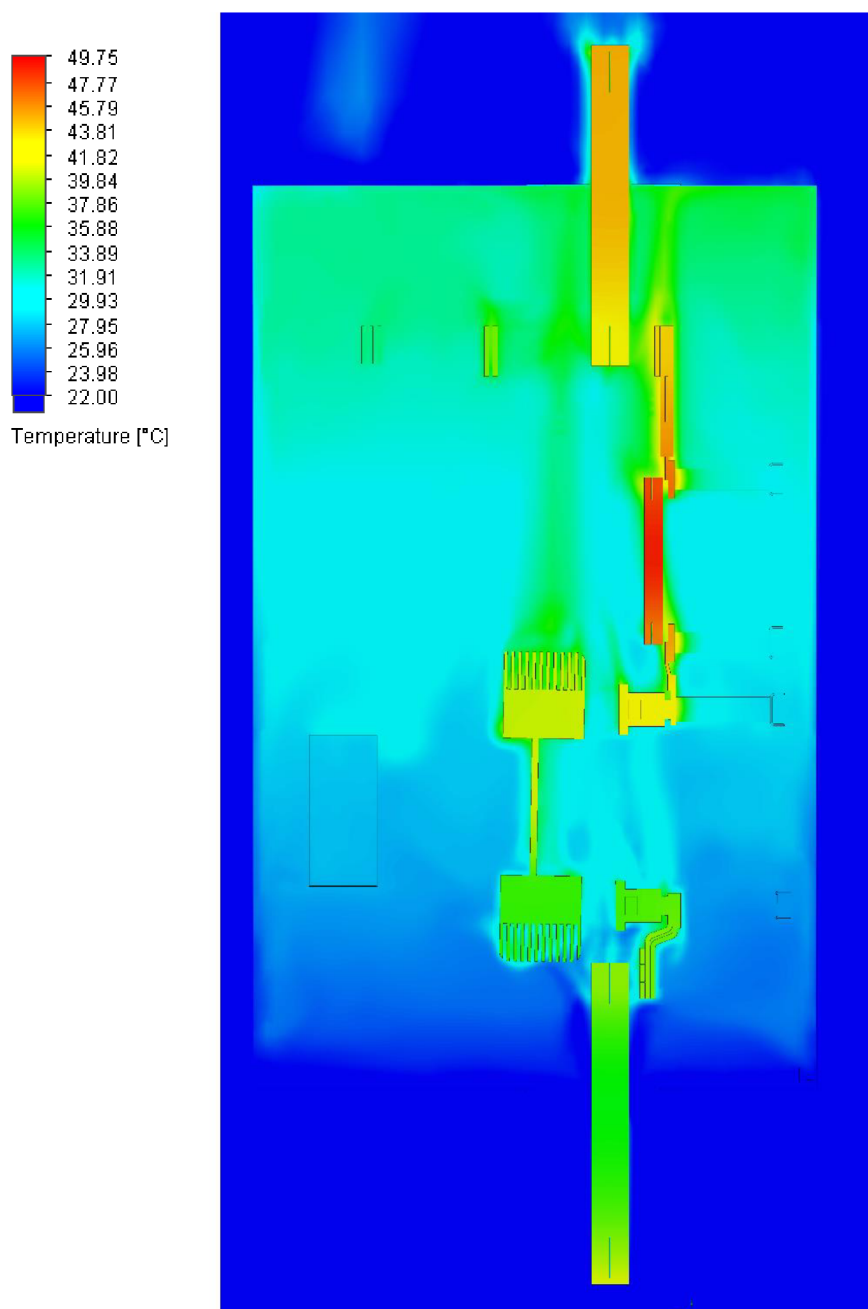
Prvotná simulácia bola vykonaná bez uvažovania elektrických a tepelných prechodových odporov prúdovodnej dráhy. Prúdovodná dráha je teda v simulácii považovaná za spojitú. Prehľad vstupných parametrov a nastavení prvej simulácie môžeme vidieť v tabuľke č. 9.1. Výsledný pohľad na rozloženie teploty v rozvádzači môžeme vidieť na obrázku č. 9.2. Vypočítanú hodnotu teploty v reze na fáze L2 je možné vidieť na obrázku 9.3. Pre potreby zobrazenia modelu bolo v 3D modeli potlačené zobrazenie plechovej skrine.

Tab. 9.1 Vstupné parametre a nastavenia prvej simulácie

Teplota okolia $\vartheta_o$ [°C]:	19,37
$I_{L1}$ [A]:	3250
$I_{L2}$ [A]:	3250
$I_{L3}$ [A]:	3250
Počiatočná výpočetná sieť:	7
Výsledný počet iterácií:	382
Celkový počet kontrolných objemov:	1 404 495
Počet kontrolných objemov obsahujúcich vzduch:	1 171 701
Počet kontrolných objemov obsahujúcich pevné časti:	232 794
Počet objemov obsahujúcich vzduch, ktoré sa dotýkajú kontrolných objemov obsahujúcich pevnú látku:	207 519
Čas simulácie [h:m:s]:	2:32:52



Obr. 9.2 Výsledky prvej simulácie bez uvažovania prechodových odporov



Obr. 9.3 Výsledky prvej simulácie pohľad v reze na fáze L2

Na obrázku 9.2 je možné na spodných práporcoch vidieť zníženú povrchovú teplotu fázy L2 oproti ostatným fázam. Tento jav bol spôsobený nerovnomerným rozložením prúdového zaťaženia. Pri pohľade na fázu L2 z druhej strany, je situácia opačná a fáza L2 dosahuje vyššie teploty ako ostatné dve fázy. Z výsledných teplôt v ostatných miestach je možné pozorovať jav, kedy stredná fáza dosiahne vyššiu teplotu v dôsledku dodatočného ohrevu od susedných dvoch fáz. V ostatných častiach rozvádzača pozorujeme približne rovnaké rozloženie teploty, nakoľko majú všetky tri fázy takmer



rovnakú plochu chladiaceho povrchu čo je v súlade s rovnicou č. 18, kedy výsledná veľkosť oteplenia je závislá práve na veľkosti chladiaceho povrchu.

Na obrázku 9.3 je možné vidieť prirodzené stúpanie tepla v rozvádzači. Môžeme teda pozorovať efekt, kedy ohrev spodných častí rozvádzača spôsobuje dodatočný ohrev častí vrchných.

Najväčšie oteplenie bolo v simulácií dosiahnuté na nožoch odpojovača. Vzhľadom na to, že odpojovač je ako jediný dimenzovaný na menovitý prúd 3250 A, je tento výsledok v súlade s predpokladmi.

Porovnanie výsledných oteplení v meracích bodoch je možné vidieť v tabuľke č. 9.2 pričom  $\Delta\vartheta_M$  predstavuje namerané oteplenie,  $\Delta\vartheta_S$  predstavuje výsledné oteplenie simulácie a  $\Delta$  predstavuje rozdiel týchto dvoch hodnôt.

Tab. 9.2 Porovnanie výsledných hodnôt oteplenia prvej simulácie a reálne nameraných hodnôt

Merací bod:	11	12	13	14	15	16	17	18	19
$\Delta\vartheta_M$ [K]	46,0	50,0	58,4	61,2	72,6	62,9	61,0	42,3	47,6
$\Delta\vartheta_S$ [K]	24,1	24,3	26,3	27,1	27,1	23,9	21,2	17,5	23,1
$\Delta$ [K]	21,9	25,7	32,1	34,1	45,5	39,0	39,8	24,8	24,5
Merací bod:	21	22	23	24	25	26	27	28	29
$\Delta\vartheta_M$ [K]	47,2	51,3	61,7	65,0	73,9	68,9	66,9	49,5	46,4
$\Delta\vartheta_S$ [K]	25,8	23,4	26,6	26,7	26,7	23,4	23,4	17,8	22,4
$\Delta$ [K]	21,4	27,9	35,1	38,3	47,2	45,5	43,5	31,7	24,0
Merací bod:	31	32	33	34	35	36	37	38	39
$\Delta\vartheta_M$ [K]	45,0	48,5	61,3	72,5	61,5	59,7	56,2	55,3	44,3
$\Delta\vartheta_S$ [K]	25,0	24,2	27,3	27,9	27,9	24,7	21,9	17,8	22,2
$\Delta$ [K]	20,0	24,3	34,0	44,6	33,6	35,0	34,3	37,5	22,1

Z vyššie uvedených výsledkov je zrejmé, že prechodové odpory v jednotlivých častiach prúdovodnej dráhy majú zásadný vplyv na veľkosť výsledného oteplenia. Červenou sú v tabuľke 9.2 označené miesta, kde rozdiel výsledkov simulácie a reálneho merania dosiahol najvyššie hodnoty. Podľa umiestnenia meracích bodov je teda zrejmé, že najväčšiu odchýlku medzi simuláciou a reálnym meraním dosahujeme v spodnej časti odpojovača na všetkých troch fázach.

## 9.2 Prechodové odpory prúdovodnej dráhy rozvádzača

Na základe porovnania výsledkov prvej simulácie a reálne nameraných hodnôt je potrebné do prúdovodnej dráhy rozvádzača zakomponovať elektrické a tepelné prechodové odpory jednotlivých súčastí. Elektrické prechodové odpory prúdovodnej dráhy boli výrobcom pri skúškach trvalým prúdom zmerané ako celkové t.j. od vrchného práporca rozvádzača až po spodný. Zároveň výrobca pre potreby zadania elektrických prechodových odporov do simulácie zmeral elektrické prechodové odpory aj na výkonovom vypínači a odpojovači. Celkové elektrické prechodové odpory prúdovodnej dráhy boli pri meraní vykonané pred skúškou trvalým prúdom ako aj po skúške trvalým prúdom tak, ako to predpisuje norma ČSN EN 62271-1 ed.2. Keďže naša simulácia určuje oteplenia v rozvádzači v konečnom, ustálenom stave, budeme na účely zadania elektrických prechodových odporov do simulácie uvažovať elektrické prechodové odpory namerané po skúške trvalým prúdom. Celkové elektrické prechodové odpory po skúške trvalým prúdom boli zmerané dvakrát, do simulácie teda použijeme priemerovanú hodnotu. Hodnoty nameraných elektrických prechodových odporov celej prúdovodnej dráhy, výkonového vypínača a odpojovača pre jednotlivé fázy pri teplote okolia 20°C sú uvedené v tabuľke č.9.3.

Tab. 9.3 Namerané elektrické prechodové odpory prúdovodnej dráhy rozvádzača

Celkový nameraný elektrický prechodový odpor					
$R_{ML1}[\mu\Omega]$	49,5	$R_{ML2}[\mu\Omega]$	52,85	$R_{ML3}[\mu\Omega]$	56,05
Nameraný elektrický prechodový odpor odpojovača					
$R_{ML1}[\mu\Omega]$	11,9	$R_{ML2}[\mu\Omega]$	11,3	$R_{ML3}[\mu\Omega]$	11,8
Nameraný elektrický prechodový odpor vypínača					
$R_{ML1}[\mu\Omega]$	19,7	$R_{ML2}[\mu\Omega]$	19,1	$R_{ML3}[\mu\Omega]$	19,8

Vyššie uvedené prechodové odpory potrebujeme zakomponovať do simulácie takým spôsobom, aby sa teplotný profil jednotlivých fáz čo najviac priblížil reálne nameraným hodnotám.

Pri prvej simulácii sme do simulácie zadali ako jeden s požadovaných výsledkov veľkosť napätia v nami určených meracích bodoch. Meracie body sme umiestnili v rovnakých bodoch ako boli umiestnené meracie svorky pri reálnom meraní elektrického prechodového odporu výkonového vypínača, odpojovača a celkového elektrického prechodového odporu. Z rozdielu nameraných napätí je možné následne vypočítať elektrický odpor jednotlivých častí rozvádzača. Výsledné hodnoty napätí v jednotlivých meracích bodoch simulácie ako aj z nich vypočítané elektrické odpory, sú uvedené v tabuľke 9.4. Prúd pri simulácii bol 3250 A. Indexy pri uvedených napätiach v tabuľke zodpovedajú jednotlivým meracím bodom z obrázku 9.1. Index „M“ pri odpore znamená,

že sa jedná o hodnotu reálne zmeranú, index „S“ pri odpore znamená, že sa jedná o hodnotu vypočítanú zo simulácie.

Tab. 9.4 Elektrické odpory prúdovodnej dráhy určené zo SWFS

Celkové elektrické odpory prúdovodnej dráhy					
L1		L2		L3	
U <sub>11</sub> [mV]	85,85	U <sub>21</sub> [mV]	80,93	U <sub>31</sub> [mV]	84,27
U <sub>19</sub> [mV]	3,61	U <sub>29</sub> [mV]	3,5	U <sub>39</sub> [mV]	3,5
ΔU <sub>L1</sub> [mV]	82,24	ΔU <sub>L2</sub> [mV]	77,43	ΔU <sub>L3</sub> [mV]	80,77
I [A]	3250	I [A]	3250	I [A]	3250
<b>R<sub>SL1</sub>[μΩ]</b>	<b>25,30</b>	<b>R<sub>SL2</sub>[μΩ]</b>	<b>23,82</b>	<b>R<sub>SL3</sub>[μΩ]</b>	<b>24,85</b>
Elektrický odpor odpojovača					
L1		L2		L3	
U <sub>13</sub> [mV]	65,94	U <sub>23</sub> [mV]	64,18	U <sub>33</sub> [mV]	66,12
U <sub>16</sub> [mV]	44,25	U <sub>26</sub> [mV]	42,8	U <sub>36</sub> [mV]	44,67
ΔU <sub>L1</sub> [mV]	21,69	ΔU <sub>L2</sub> [mV]	21,38	ΔU <sub>L3</sub> [mV]	21,45
I [A]	3250	I [A]	3250	I [A]	3250
<b>R<sub>SL1</sub>[μΩ]</b>	<b>6,67</b>	<b>R<sub>SL2</sub>[μΩ]</b>	<b>6,58</b>	<b>R<sub>SL3</sub>[μΩ]</b>	<b>6,60</b>
Elektrický odpor výkonového vypínača					
L1		L2		L3	
U <sub>17</sub> [mV]	43,78	U <sub>27</sub> [mV]	42,81	U <sub>37</sub> [mV]	43,99
U <sub>18</sub> [mV]	26,65	U <sub>28</sub> [mV]	26,93	U <sub>38</sub> [mV]	27,08
ΔU <sub>L1</sub> [mV]	17,13	ΔU <sub>L2</sub> [mV]	15,88	ΔU <sub>L3</sub> [mV]	16,91
I [A]	3250	I [A]	3250	I [A]	3250
<b>R<sub>SL1</sub>[μΩ]</b>	<b>5,27</b>	<b>R<sub>SL2</sub>[μΩ]</b>	<b>4,89</b>	<b>R<sub>SL3</sub>[μΩ]</b>	<b>5,20</b>

Rozdiely v elektrických prechodových odporoch jednotlivých fáz spôsobili výrazný rozdiel vo výsledkoch simulácie a reálneho merania. Odčítaním hodnôt prechodových odporov určených zo SWFS od reálne nameraných hodnôt sme určili, o minimálne koľko je potrebné elektrický prechodový odpor jednotlivých fáz v simulácii zväčšiť. Tieto hodnoty sú uvedené v tabuľke 9.5. Pri dosadzovaní elektrických prechodových odporov bude však potrebné počítať s javom, kedy odpor samotnej medi stúpa s rastúcou teplotou a s javom, kedy bol reálne nameraný elektrický prechodový odpor prúdovodnej dráhy rozvádzača meraní pri teplote okolia 20°C. Výsledný určený elektrický prechodový odpor zo simulácie bude teda väčší ako elektrický prechodový odpor reálne nameraný.

Tab. 9.5 Rozdiel elektrických prechodových odporov v rozvádzači medzi simuláciou a meraním

Celková prúdovodná dráha					
$R_{ML1}[\mu\Omega]$	49,5	$R_{ML2}[\mu\Omega]$	52,85	$R_{ML3}[\mu\Omega]$	56,05
$R_{SL1}[\mu\Omega]$	25,30	$R_{SL2}[\mu\Omega]$	23,82	$R_{SL3}[\mu\Omega]$	24,85
<b><math>\Delta R_{L1}[\mu\Omega]</math></b>	<b>24,20</b>	<b><math>\Delta R_{L1}[\mu\Omega]</math></b>	<b>29,03</b>	<b><math>\Delta R_{L1}[\mu\Omega]</math></b>	<b>31,20</b>
Odpojovač					
$R_{ML1}[\mu\Omega]$	11,9	$R_{ML2}[\mu\Omega]$	11,3	$R_{ML3}[\mu\Omega]$	11,8
$R_{SL1}[\mu\Omega]$	6,67	$R_{SL2}[\mu\Omega]$	6,58	$R_{SL3}[\mu\Omega]$	6,60
<b><math>\Delta R_{L1}[\mu\Omega]</math></b>	<b>5,23</b>	<b><math>\Delta R_{L1}[\mu\Omega]</math></b>	<b>4,72</b>	<b><math>\Delta R_{L1}[\mu\Omega]</math></b>	<b>5,20</b>
Výkonový vypínač					
$R_{ML1}[\mu\Omega]$	19,7	$R_{ML2}[\mu\Omega]$	19,1	$R_{ML3}[\mu\Omega]$	19,8
$R_{SL1}[\mu\Omega]$	5,27	$R_{SL2}[\mu\Omega]$	4,89	$R_{SL3}[\mu\Omega]$	5,20
<b><math>\Delta R_{L1}[\mu\Omega]</math></b>	<b>14,43</b>	<b><math>\Delta R_{L1}[\mu\Omega]</math></b>	<b>14,21</b>	<b><math>\Delta R_{L1}[\mu\Omega]</math></b>	<b>14,60</b>

Z vyššie uvedenej tabuľky je zrejmé, že veľkosť ostatných elektrických prechodových odporov prúdovodnej dráhy je daná odčítaním elektrického prechodového odporu výkonového vypínača a odpojovača od celkového elektrického prechodového odporu. Veľkosť týchto prechodových odporov je uvedená v tabuľke 9.6.

Tab. 9.6 Elektrické prechodové odpory ostatných spojov prúdovodnej dráhy

Elektrické prechodové odpory ostatných spojov prúdovodnej dráhy					
$R_{L1}[\mu\Omega]$	4,54	$R_{L2}[\mu\Omega]$	10,09	$R_{L3}[\mu\Omega]$	11,41

### 9.3 Druhá simulácia oteplenia rozvádzača

Pri druhej simulácii rozvádzača sme do simulácie postupne dosadili jednotlivé elektrické prechodové odpory na základe predpokladov o ich výskyte a na základe reálne nameraných elektrických prechodových odporov. Elektrické prechodové odpory sme zároveň rozmiestnili tak, aby sa výsledné oteplenie čo najviac rovnalo hodnotám oteplenia reálne nameraným. Tepelné prechodové odpory sme ani pri druhej simulácii neuvažovali, nakoľko nemajú vplyv na výsledné celkové oteplenie rozvádzača keďže sami o sebe nevytvárajú teplo a zároveň nie sú k dispozícii žiadne vstupné dáta. Vstupné parametre, najmä veľkosť jednotlivých elektrických prechodových odporov sme postupnými krátkymi opakovanými simuláciami upravovali pre dosiahnutie čo najväčšej zhody.

Tab. 9.7 Parametre druhej simulácie

Teplota okolia $\vartheta_0$ [°C]:	19,37
$I_{L1}$ [A]:	3250
$I_{L2}$ [A]:	3250
$I_{L3}$ [A]:	3250
Počiatočná výpočetná sieť:	7
Výsledný počet iterácií:	268
Celkový počet kontrolných objemov:	1 303 845
Počet kontrolných objemov obsahujúcich vzduch:	1 093 557
Počet kontrolných objemov obsahujúcich pevné časti:	210 288
Počet objemov obsahujúcich vzduch, ktoré sa dotýkajú kontrolných objemov obsahujúcich pevnú látku:	189 539
Čas simulácie [h:m:s]:	4:54:22

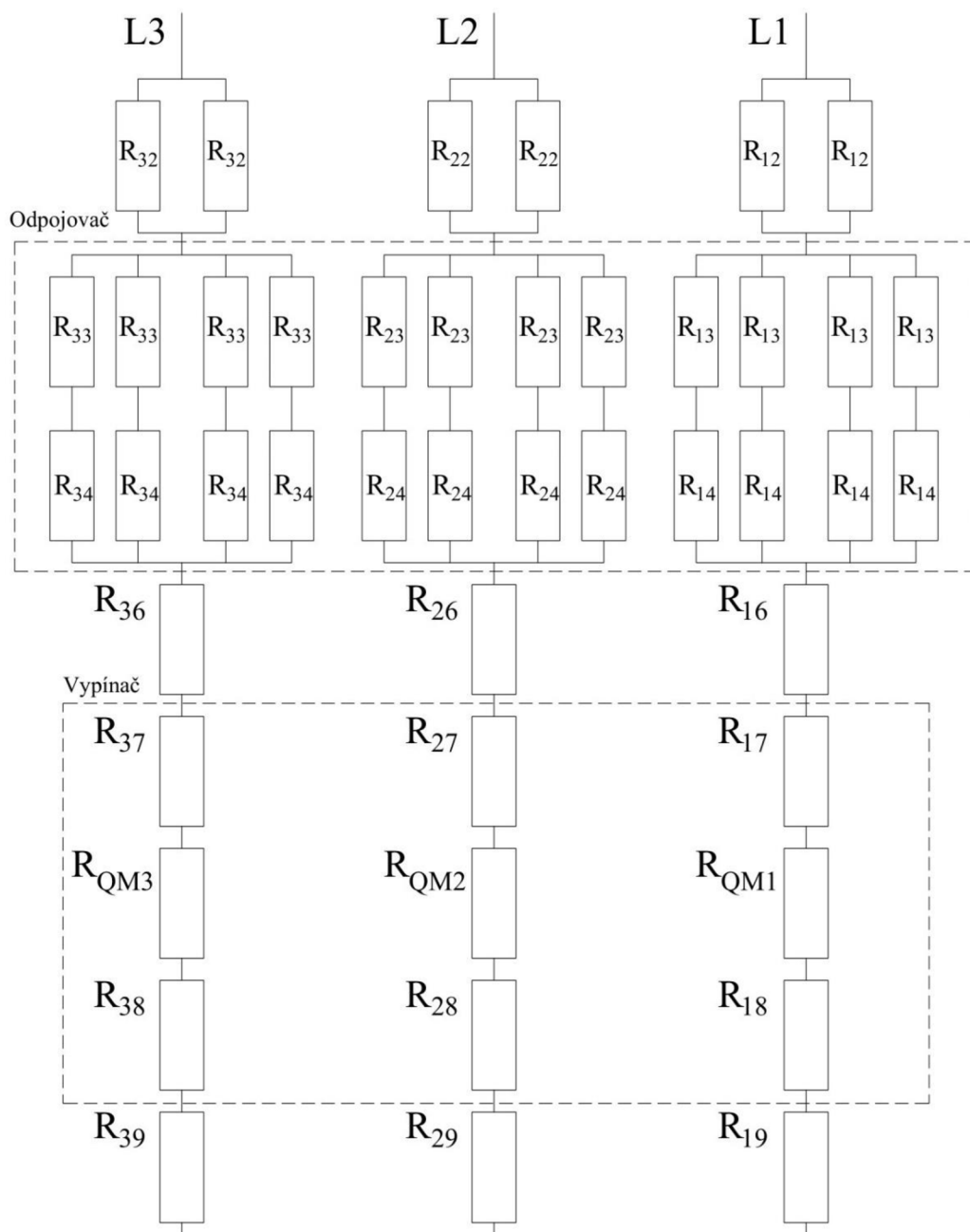
### 9.4 Dosadenie elektrických prechodových odporov do simulácie

Podľa vyššie uvedených zistených nezrovnalostí v elektrických prechodových odporoch prúdovodnej dráhy v simulácii oproti reálnej prúdovodnej dráhe sme do prúdovodnej dráhy v simulácii doplnili chýbajúce elektrické prechodové odpory. Elektrické prechodové odpory sme v miestach kde je známa len ich celková veľkosť rozmiestnili na základe našich predpokladov o ich výskyte. Jednotlivé prechodové odpory sme postupne opakovanými krátkymi simuláciami upravovali tak, aby sa výsledný pomer medzi elektrickými prechodovými odpormi čo najviac rovnal pomeru

medzi reálne nameranými elektrickými prechodovými odporami a zároveň sa nameraný teplotný profil prúdovodnej dráhy čo najviac priblížil výslednému teplotnému profilu prúdovodnej dráhy zo simulácie. Pri zadávaní elektrických prechodových odporov do simulácie bolo potrebné počítať s dynamikou samotnej simulácie. Tým že sme do určitého miesta pridali elektrický prechodový odpor, stúpla výsledná teplota v tomto mieste. Med' teda dosiahla v týchto miestach vyššiu teplotu a tým spätne ovplyvnila veľkosť samotného odporu medi, keďže táto veličina je teplotne závislá. Blokové zobrazenie pridaných elektrických prechodových odporov je na obrázku č. 9.4.. Zároveň sme pri dosadzovaní elektrických prechodových odporov nemohli úplne vychádzať z reálne nameraných elektrických prechodových odporov, pretože tieto hodnoty boli namerané pri teplote okolia 20°C. Výsledné elektrické prechodové odpory ktoré sú uvažované v simulácii, sú väčšie oproti tým reálne nameraným a to z týchto hlavných dôvodov:

- Nárast rezistivity medi s rastúcou teplotou (meranie el. prechodového odporu pri 20°C, v simulácii 60°C až 90°C)
- Jav skin efektu, ktorý v rôznych miestach, rôzne znižuje efektívny prierez medi, a tým zväčšuje rezistivitu.

Jav skin efektu, má vplyv na celú prúdovodnú dráhu, nielen na kontaktné styky. Kvôli možnosti simulácie len jednosmerným prúdom, komplexnému tvaru prúdovodnej dráhy a rôznej teplote v iných miestach prúdovodnej dráhy, nie je možné koeficient skin efektu pre jednotlivé miesta dostatočne efektívne určiť. Jeho vplyv bude teda zarátaný do veľkosti zadaných prechodových odporov, ktoré boli definované tak, aby sa tepelná charakteristika simulácie čo najviac priblížila reálne nameraným hodnotám. Rozloženie jednotlivých dosadených elektrických prechodových odporov je na obrázku 9.4. Jednotlivé hodnoty dosadených prechodových odporov sú uvedené v tabuľke 9.8.



Obr. 9.4 Rozloženie definovaných elektrických prechodových odporov v simulácii

Tab. 9.8 Hodnoty odporov ku obrázku 9.4

$R_{32}$ [ $\mu\Omega$ ]	0,6	$R_{22}$ [ $\mu\Omega$ ]	1	$R_{12}$ [ $\mu\Omega$ ]	1
$R_{33}$ [ $\mu\Omega$ ]	6	$R_{23}$ [ $\mu\Omega$ ]	4	$R_{13}$ [ $\mu\Omega$ ]	5
$R_{34}$ [ $\mu\Omega$ ]	3,2	$R_{24}$ [ $\mu\Omega$ ]	3	$R_{14}$ [ $\mu\Omega$ ]	2
$R_{36}$ [ $\mu\Omega$ ]	0	$R_{26}$ [ $\mu\Omega$ ]	1,7	$R_{16}$ [ $\mu\Omega$ ]	1,8
$R_{37}$ [ $\mu\Omega$ ]	7	$R_{27}$ [ $\mu\Omega$ ]	7	$R_{17}$ [ $\mu\Omega$ ]	15
$R_{QM3}$ [ $\mu\Omega$ ]	8	$R_{QM2}$ [ $\mu\Omega$ ]	7	$R_{QM1}$ [ $\mu\Omega$ ]	8
$R_{38}$ [ $\mu\Omega$ ]	13	$R_{28}$ [ $\mu\Omega$ ]	7	$R_{18}$ [ $\mu\Omega$ ]	7
$R_{39}$ [ $\mu\Omega$ ]	14,5	$R_{29}$ [ $\mu\Omega$ ]	9	$R_{19}$ [ $\mu\Omega$ ]	10

## 9.5 Porovnanie prechodových odporov zo simulácie a reálne nameraných prechodových odporov

Prechodové odpory namerané v simulácií aj s dosadenými prechodovými odpormi sú uvedené v tabuľke 9.9. Porovnanie prechodových odporov reálne nameraných a prechodových odporov zo simulácie môžeme vidieť v tabuľke 9.10.

Tab. 9.9 Namerané prechodové odpory zo simulácie s dosadenými prechod. odpormi

Celkové elektrické odpory prúdovodnej dráhy					
L1		L2		L3	
$U_{11}$ [mV]	231,69	$U_{21}$ [mV]	238,85	$U_{31}$ [mV]	250,09
$U_{19}$ [mV]	3,69	$U_{29}$ [mV]	3,62	$U_{39}$ [mV]	3,66
$\Delta U_{L1}$ [mV]	228	$\Delta U_{L2}$ [mV]	235,23	$\Delta U_{L3}$ [mV]	246,43
$I$ [A]	3250	$I$ [A]	3250	$I$ [A]	3250
<b><math>R_{SL1}</math> [<math>\mu\Omega</math>]</b>	<b>70,15</b>	<b><math>R_{SL2}</math> [<math>\mu\Omega</math>]</b>	<b>72,38</b>	<b><math>R_{SL3}</math> [<math>\mu\Omega</math>]</b>	<b>75,82</b>
Elektrický odpor odpojovača					
L1		L2		L3	
$U_{13}$ [mV]	206,67	$U_{23}$ [mV]	220,11	$U_{33}$ [mV]	229,99
$U_{16}$ [mV]	147,47	$U_{26}$ [mV]	158,85	$U_{36}$ [mV]	167,11
$\Delta U_{L1}$ [mV]	59,2	$\Delta U_{L2}$ [mV]	61,26	$\Delta U_{L3}$ [mV]	62,88
$I$ [A]	3250	$I$ [A]	3250	$I$ [A]	3250
<b><math>R_{SL1}</math> [<math>\mu\Omega</math>]</b>	<b>18,22</b>	<b><math>R_{SL2}</math> [<math>\mu\Omega</math>]</b>	<b>18,85</b>	<b><math>R_{SL3}</math> [<math>\mu\Omega</math>]</b>	<b>19,35</b>
Elektrický odpor výkonového vypínača					
L1		L2		L3	
$U_{17}$ [mV]	136,92	$U_{27}$ [mV]	151,75	$U_{37}$ [mV]	164,12
$U_{18}$ [mV]	71,37	$U_{28}$ [mV]	82,99	$U_{38}$ [mV]	99,1
$\Delta U_{L1}$ [mV]	65,55	$\Delta U_{L2}$ [mV]	68,76	$\Delta U_{L3}$ [mV]	65,02
$I$ [A]	3250	$I$ [A]	3250	$I$ [A]	3250
<b><math>R_{SL1}</math> [<math>\mu\Omega</math>]</b>	<b>20,17</b>	<b><math>R_{SL2}</math> [<math>\mu\Omega</math>]</b>	<b>21,16</b>	<b><math>R_{SL3}</math> [<math>\mu\Omega</math>]</b>	<b>20,01</b>



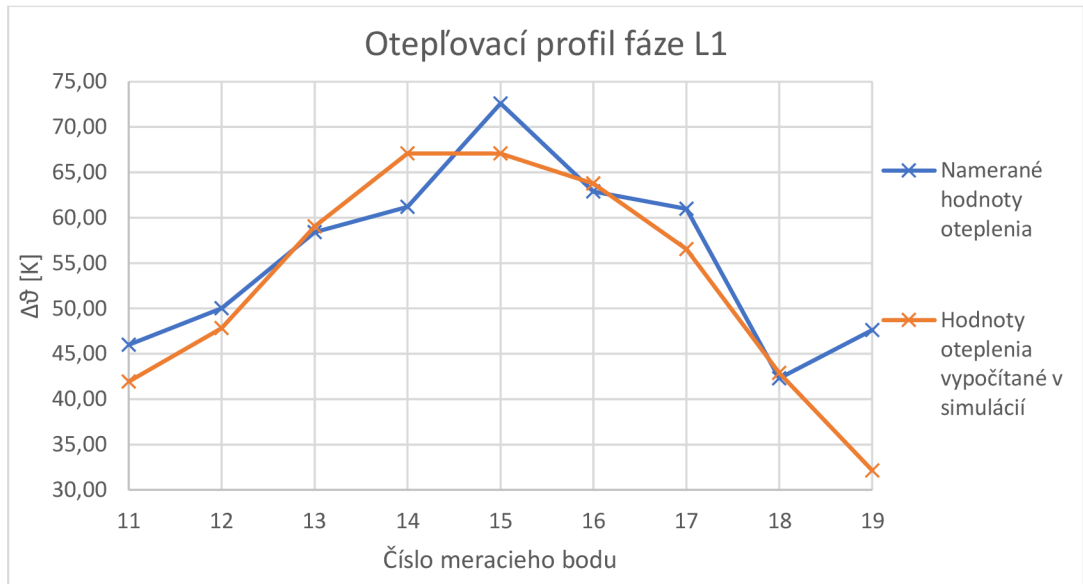
Tab. 9.10 Rozdiel elektrických prechodových odporov v rozvádzači medzi druhou simuláciou a meraním

Celková prúdovodná dráha					
$R_{ML1}[\mu\Omega]$	49,5	$R_{ML2}[\mu\Omega]$	52,85	$R_{ML3}[\mu\Omega]$	56,05
$R_{SL1}[\mu\Omega]$	70,15	$R_{SL2}[\mu\Omega]$	72,38	$R_{SL3}[\mu\Omega]$	75,82
$\Delta R_{L1}[\mu\Omega]$	<b>20,65</b>	$\Delta R_{L1}[\mu\Omega]$	<b>19,53</b>	$\Delta R_{L1}[\mu\Omega]$	<b>19,77</b>
Odpojovač					
$R_{ML1}[\mu\Omega]$	11,9	$R_{ML2}[\mu\Omega]$	11,3	$R_{ML3}[\mu\Omega]$	11,8
$R_{SL1}[\mu\Omega]$	18,22	$R_{SL2}[\mu\Omega]$	18,85	$R_{SL3}[\mu\Omega]$	19,35
$\Delta R_{L1}[\mu\Omega]$	<b>6,32</b>	$\Delta R_{L1}[\mu\Omega]$	<b>7,55</b>	$\Delta R_{L1}[\mu\Omega]$	<b>7,55</b>
Výkonový vypínač					
$R_{ML1}[\mu\Omega]$	19,7	$R_{ML2}[\mu\Omega]$	19,1	$R_{ML3}[\mu\Omega]$	19,8
$R_{SL1}[\mu\Omega]$	20,17	$R_{SL2}[\mu\Omega]$	21,16	$R_{SL3}[\mu\Omega]$	20,01
$\Delta R_{L1}[\mu\Omega]$	<b>0,47</b>	$\Delta R_{L1}[\mu\Omega]$	<b>2,06</b>	$\Delta R_{L1}[\mu\Omega]$	<b>0,21</b>

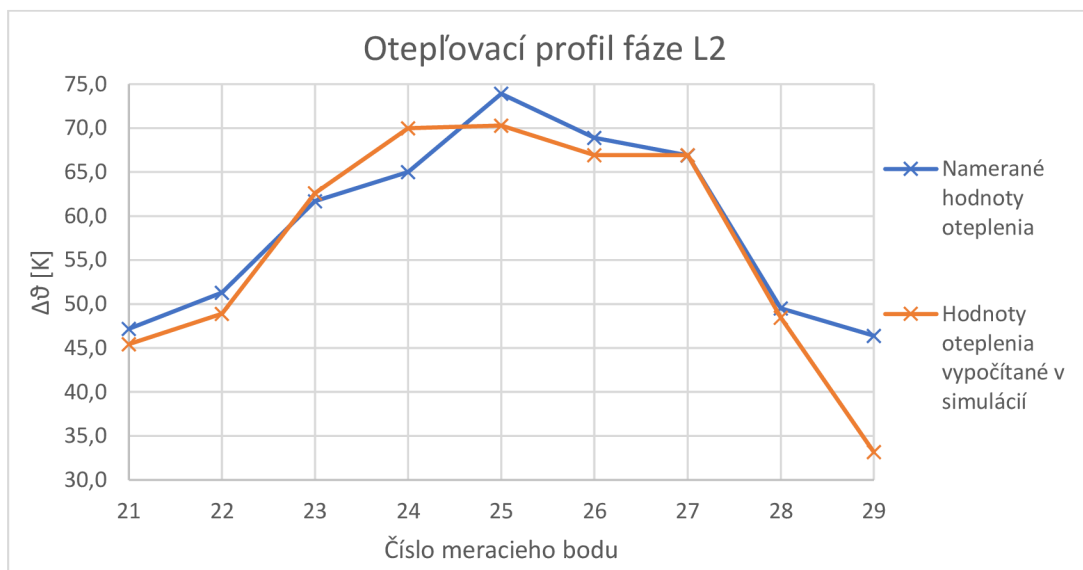
Z vyššie uvedených nameraných hodnôt elektrických prechodových odporov a ich porovnaní s reálne nameranými hodnotami je zrejmé, že celkové prechodové odpory v simulácií neodpovedajú reálne nameraným elektrickým prechodovým odporom. Táto nezrovnalosť bola spôsobená už vyššie spomínaným javom, že reálne meranie prechodového odporu prebiehalo pri teplote okolia 20°C. V simulácií však teplota prúdovodnej dráhy dosahovala podstatne väčšiu výslednú teplotu. V kapitole 6.3. uvádzame, že elektrický odpor medi stúpne o 0,393% pri náraste teploty o 1°C [14]. Vzhľadom na rozdielne hodnoty teploty v jednotlivých častiach prúdovodnej dráhy nie je možné prepočítať reálne namerané hodnoty elektrického odporu pri 20°C na elektrické odpory pre 80°C. Zároveň však nepoznáme ani pomer medzi elektrickým odporom a prechodovým odporom kontaktných stykov z ktorých sa skladá celý nameraný prechodový odpor. Ďalšou s vecí ktoré mohli zapríčiniť vyššie uvedené rozdiely je meniaci sa samotný prechodový odpor kontaktných stykov. S vyššou teplotou môže dochádzať ku materiálovým javom pri ktorých sa jeho hodnota zvýši, prípadne zníži. V neposledom rade sme už v kapitole 9.1 určili, že jav skin efektu nebude mať nezanedbateľný vplyv, a v určitých miestach prúdovodnej dráhy bude tento jav znižovať jej efektívny prierez. Pri porovnávaní hodnôt je teda potrebné uvažovať aj nad týmto javom ktorý spôsobil, že pre dosiahnutie rovnakej teploty v určitom bode prúdovodnej dráhy je potrebné dosadiť do simulácie o niečo väčší prechodový odpor. Reálne namerané prechodové odpory boli merané jednosmerným prúdom 100 A. Pri tomto prúde sa jav skin efektu ešte neprejavuje a tak v reálne nameraných hodnotách tento jav nie je zarátaný.

## 9.6 Výsledné oteplenie rozvádzača po druhej simulácii

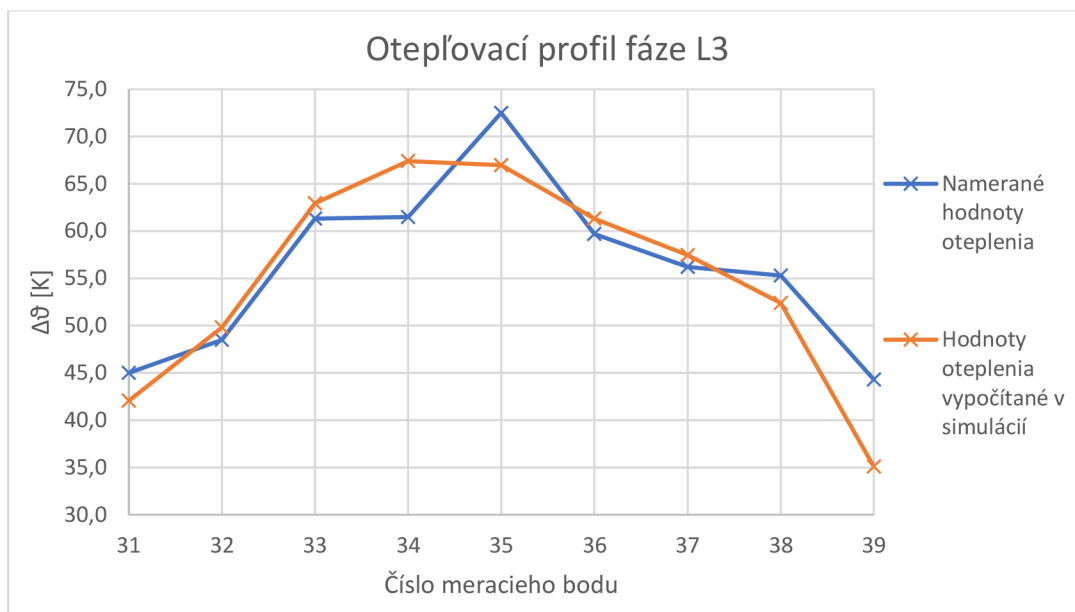
V dôsledku správneho dosadenia jednotlivých elektrických prechodových odporov sa výsledné oteplenia druhej simulácie dostatočne priblížili tým reálne nameraným. Porovnanie nameraného teplotného profilu jednotlivých fáz a výsledného teplotného profilu simulácie môžeme vidieť v grafoch č. 9.5 až 9.7.



Obr. 9.5 Otepľovací profil oteplenia fáze L1



Obr. 9.6 Otepľovací profil oteplenia fáze L2



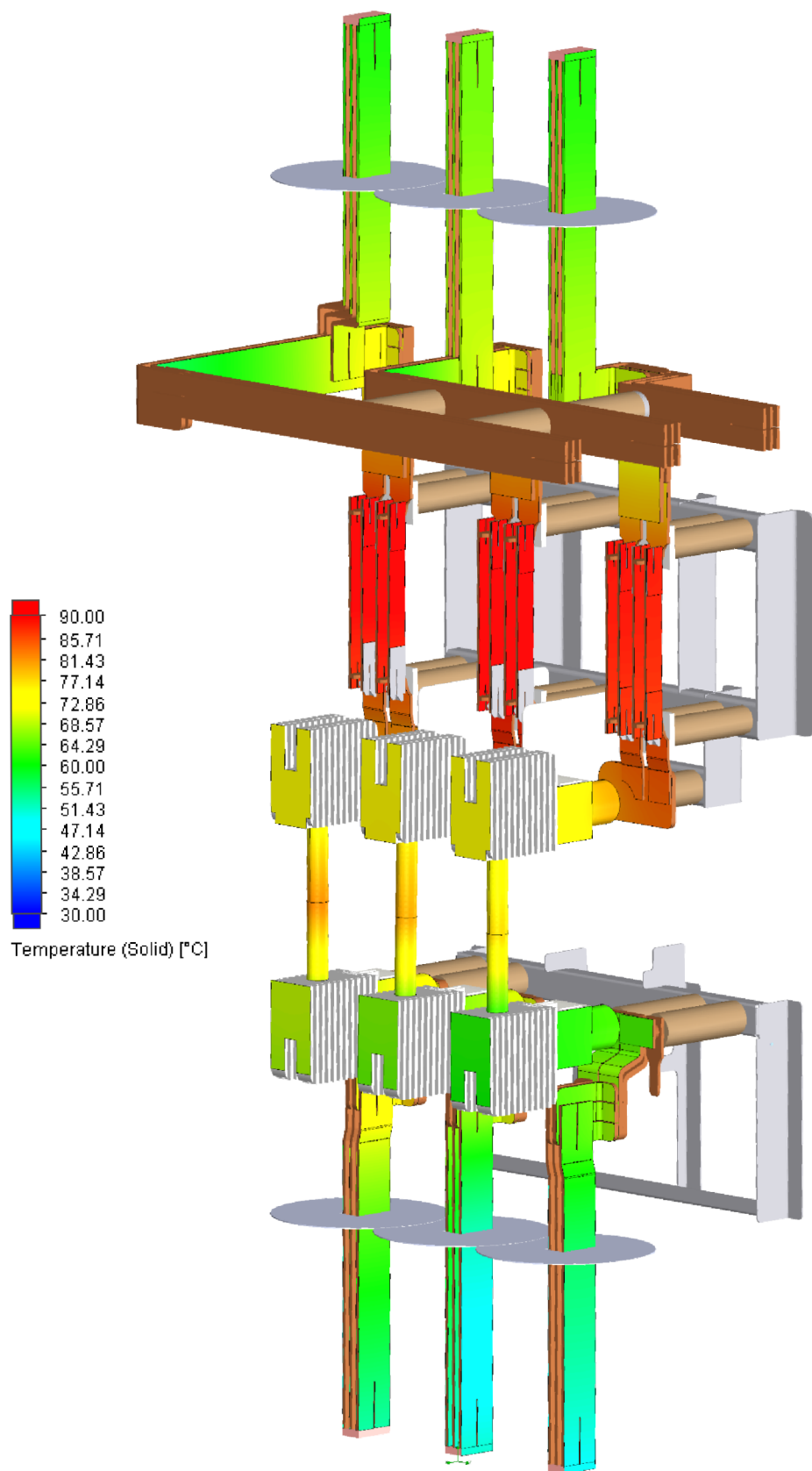
Obr. 9.7 Otepľovací profil oteplenia fáze L3

Teplotné profily jednotlivých fáz sú v dostatočnej korelácii s reálne nameranými teplotnými profilmi. Rozdiel medzi simuláciou a reálnym meraním je najväčší vo vrchnom a spodnom meracom bode jednotlivých fáz. Tieto body však nepovažujeme za smerodajné, keďže sa nenachádzajú vnútri skrine rozvádzača a pri reálnom meraní mohli byť ovplyvňované rôznymi vplyvmi, ktoré nemáme započítané do simulácie ako sú napríklad prírodné prúdovodné káble alebo zbernice od prúdových zdrojov. Ďalšie rozdiely medzi reálne nameranými hodnotami a hodnotami zo simulácie sú v bodoch na fáze 14, 15 na fáze L1 v bodoch 24,25 na fáze L2 a v bodoch 34, 35 na fáze L3. Tieto meracie body sú súčasťou spodnej časti pričom každý bod zodpovedá inej strane nožov odpojovača tak, ako je to uvedené na obrázku 9.1. Pri reálnom meraní dosahovalo oteplenie v bodoch končiacich sa číslom 5 väčšieho oteplenia ako v bodoch končiacich sa číslom 4. Tento rozdiel bol pravdepodobne spôsobený rozdielnymi prechodovými odpormi medzi jednotlivými kontaktnými stykmi na spodnej časti odpojovača. V simulácií sa nám nepodarilo tento rozdiel oteplenia dosiahnuť avšak oteplenie v týchto bodoch v simulácií dosahuje oteplenie v hodnotách približne medzi týmito dvoma bodmi a tak výsledok považujeme za uspokojivý. Porovnanie hodnôt medzi druhou simuláciou a reálne nameranými hodnotami oteplenia pre jednotlivé meracie body môžeme vidieť v tabuľke č.9.11.

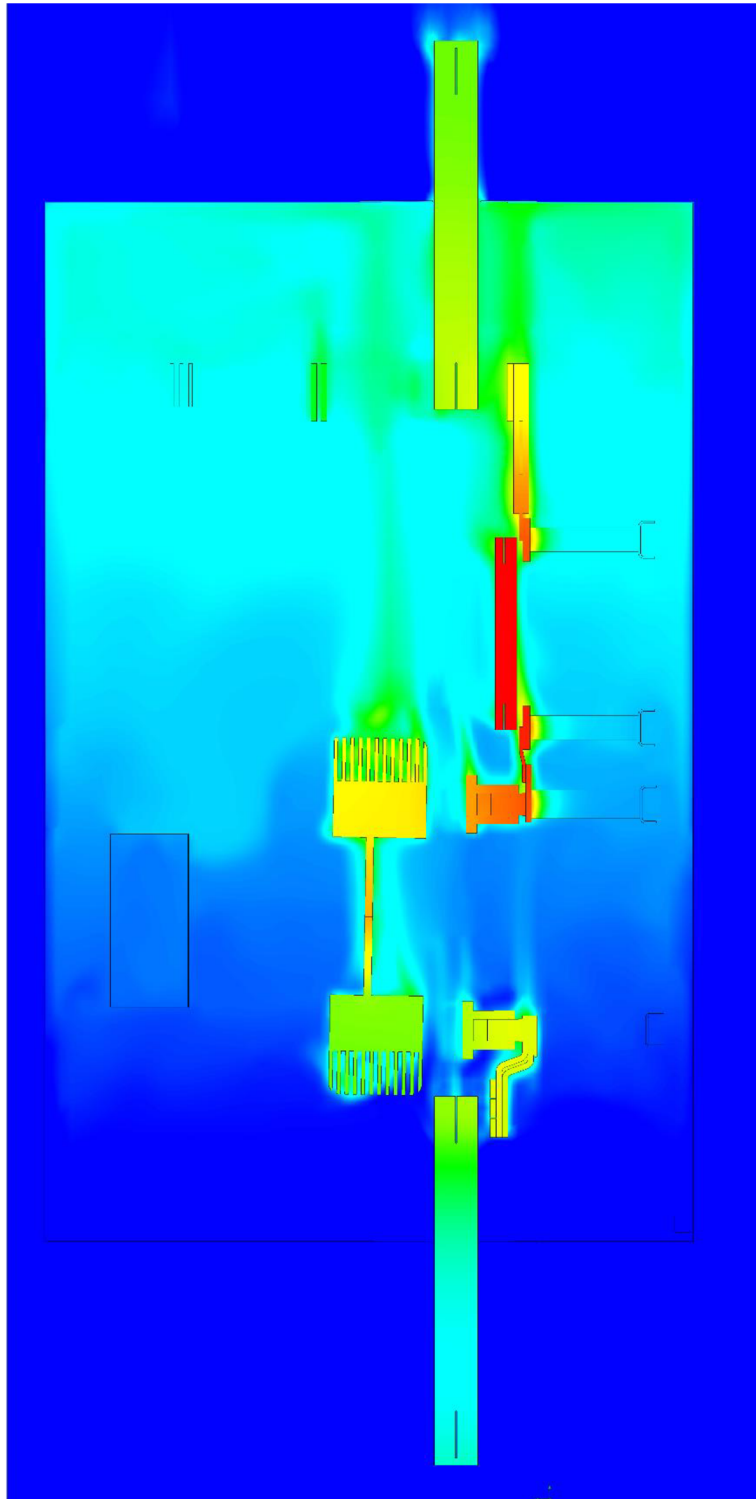
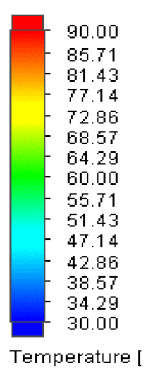
Tab. 9.11 Porovnanie hodnôt medzi druhou simuláciou a reálne nameranými hodnotami oteplenia pre jednotlivé meracie body

Merací bod:	$\Delta\theta_M$ [K]	$\Delta\theta_S$ [K]	$\Delta$ [K]
11	46,0	41,9	4,1
12	50,0	47,8	2,2
13	58,4	59,0	-0,6
14	61,2	67,1	-5,9
15	72,6	67,1	5,5
16	62,9	63,8	-0,9
17	61,0	56,6	4,4
18	42,3	42,9	-0,6
19	47,6	32,1	15,5
21	47,2	45,5	1,7
22	51,3	48,9	2,4
23	61,7	62,6	-0,9
24	65,0	70,0	-5,0
25	73,9	70,3	3,6
26	68,9	66,9	2,0
27	66,9	66,9	0,0
28	49,5	48,5	1,0
29	46,4	33,2	13,2
31	45,0	42,1	2,9
32	48,5	49,8	-1,3
33	61,3	62,9	-1,6
34	61,5	67,4	-5,9
35	72,5	67,0	5,5
36	59,7	61,3	-1,6
37	56,2	57,5	-1,3
38	55,3	52,4	2,9
39	44,3	35,1	9,2

Vizuálne rozloženie teploty v rozvádzači z druhej simulácie je uvedené na obrázku 9.8. Rozloženie teploty v reze rozvádzača cez fázu L2 je na obrázku 9.9.



Obr. 9.8 Vizualne zobrazenie výsledkov druhej simulácie



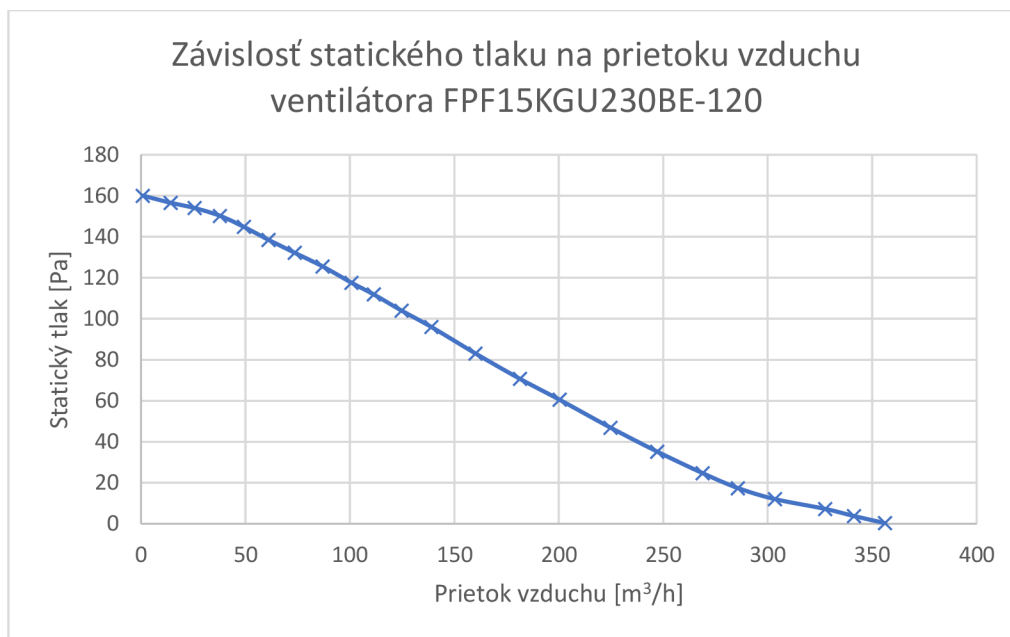
Obr. 9.9 Grafické zobrazenie výsledkov druhej simulácie v reze cez fázu L2

Pri porovnaní grafických výsledkov prvej simulácie bez definovaných elektrických prechodových odporov medzi kontaktami a druhou simuláciou je možné vidieť podobné rozloženie teploty v rozvádzači. Hodnoty oteplenia a rozdiely medzi jednotlivými otepleniami v jednotlivých častiach sú však výrazne vyššie. Najväčšiu teplotu a tým aj

oteplenie dosahujeme na odpojovači čo znovu odpovedá predpokladom, keďže odpojovač je ako jediný prvok prúdovodnej dráhy navrhnutý na nominálnu hodnotu prúdu 3250 A. Simulácia na základe porovnania reálne nameraných hodnôt a výsledkov simulácie dostatočne presne korešponduje so skutočnosťou. Pri definícii vstupných údajov ako aj pri porovnávaní výsledných hodnôt sme však museli uvažovať s javmi, ktoré v simulácii zahrnuté nie sú. Simuláciu je teda v tomto bode možné považovať za odladenú a výsledné oteplenie v prípade zmeny konfigurácie rozvádzača, alebo v prípade doplnenia núteného chladenia je možné považovať za správne.

## 10. SIMULÁCIA OTEPLENIA ROZVÁDZAČA S NÚTENÝM CHLADENÍM

Po úspešnom odladení simulácie oteplenia rozvádzača je možné simuláciu využiť na predikciu výsledného oteplenia pri rôznych konfiguráciách. Na základe dodatočnej požiadavky zadávateľa témy diplomovej práce sme vykonali simuláciu oteplenia rozvádzača obsahujúceho nútené chladenie vo forme ventilátora, ktorý v spodnej časti rozvádzača tlačí okolitý vzduch do skrine rozvádzača. Všetky ostatné parametre simulácie ostali rovnaké ako v simulácií bez núteného chladenia. Typ ventilátora bol zvolený zadávateľom témy diplomovej práce a jedná sa o štandardný ventilátor s rozmermi 223x223mm, dosahujúci pri maximálnych otáčkach prietok vzduchu 360 m<sup>3</sup>/h. Pre potreby simulácie bolo do simulačného prostredia potrebné zadať závislosť statického tlaku na prietoku vzduchu pre daný typ ventilátora. V prípade vháňania vzduchu do uzavretého prietoku, v našom prípade do uzavretého rozvádzača s vetracími mriežkami vo vrchnej časti, dôjde k javu, kedy navýšenie množstva vzduchu v rozvádzači spôsobí nárast tlaku. Tento zvýšený tlak vzduchu v uzavretom priestore následne kladie odpor ventilátoru a tým znižuje prietok vzduchu za čas, ktorý by ventilátor bol schopný pretlačiť v prípade, že by ku navýšeniu tlaku v uzavretom priestore nedošlo. Pre zadanie tejto charakteristiky do simulácie sme použili voľne dostupný digitalizér grafických priebehov, nakoľko táto charakteristika bola v datasheete od výrobcu len v grafickej podobe. Výsledná charakteristika ventilátora po digitalizácii a spätnom vytvorení grafického priebehu je na obrázku č. 10.1. Parametre použitého ventilátora sú uvedené v tabuľke 10.2.



Obr. 10.1 Závislosť statického tlaku na prietoku vzduchu ventilátora FPF15KGU230BE-120

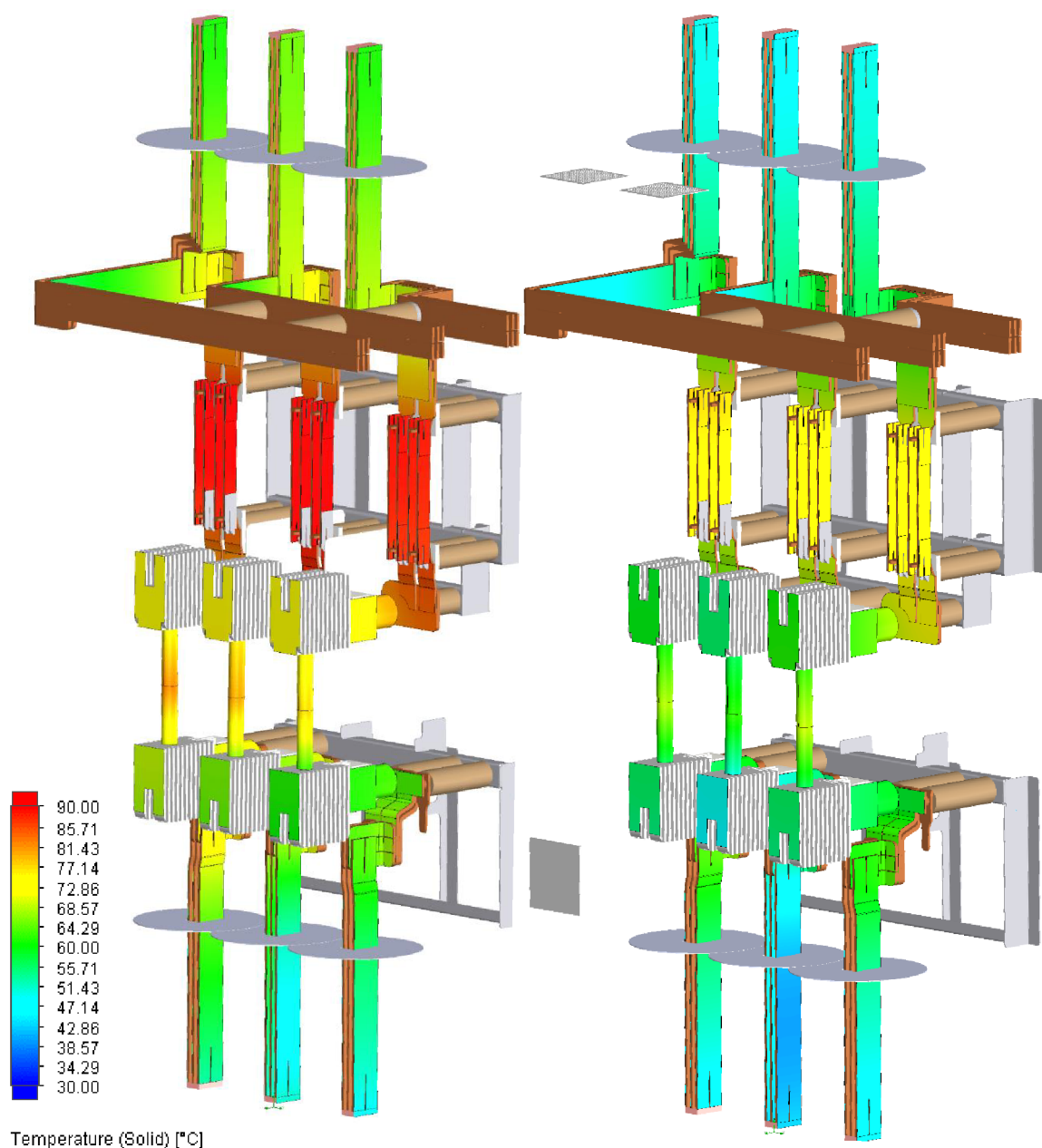


Tab. 10.1 Štítkové parametre použitého ventilátora

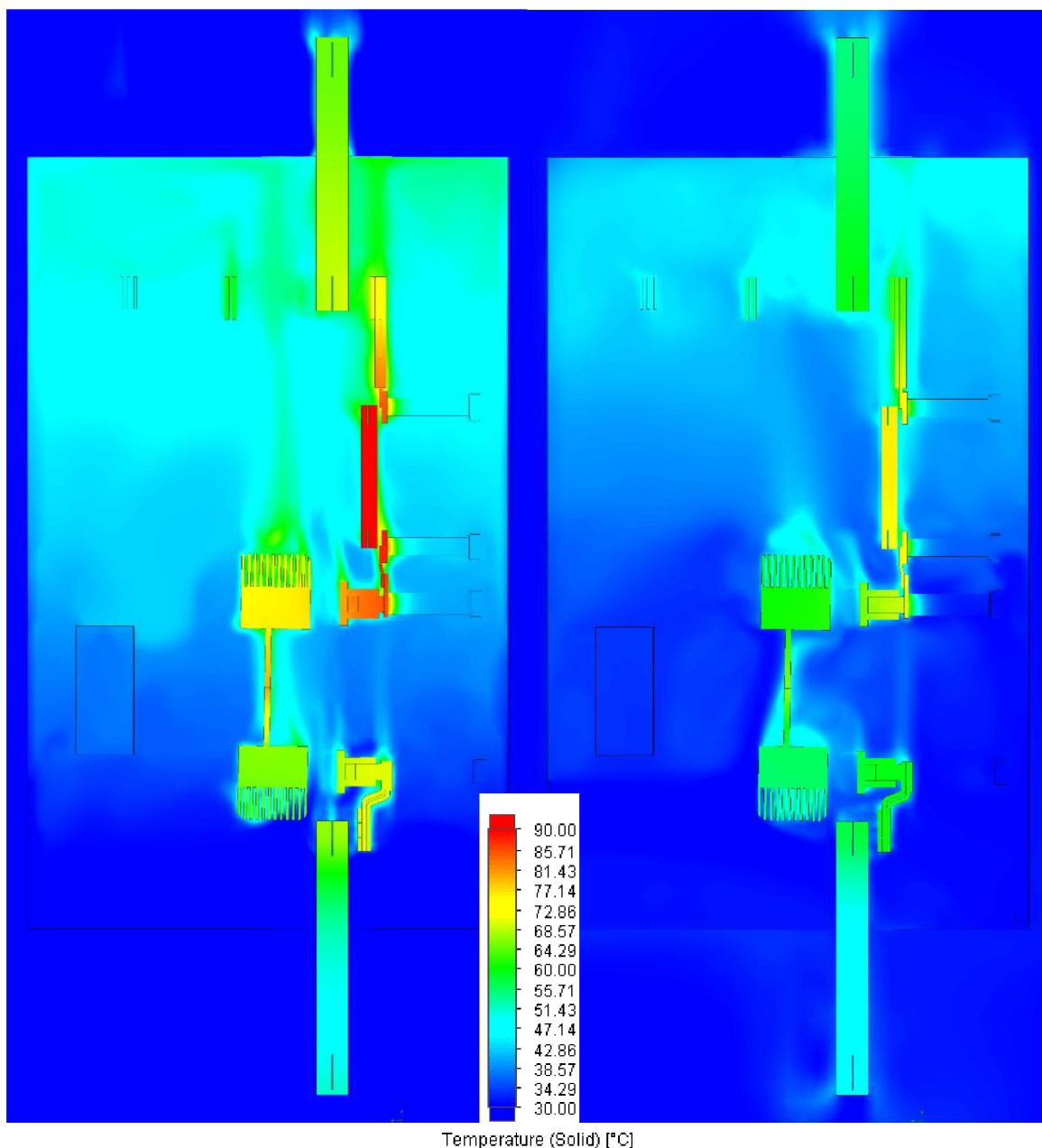
Typ:	FPF15KGU230BE-120
Rozmery [mm]:	230x230
$U_N$ [V]:	230
$I_N$ [A]:	0,3
f [Hz]:	50
P [W]:	67
Maximálny prietok vzduchu [m <sup>3</sup> /h]	360

Pri nútenom chladení dochádza ku vŕhaniu chladnejšieho okolitého vzduchu do priestoru rozvádzača. Tým by malo dôjsť ku zmenšeniu výsledného oteplenia na jednotlivých zariadeniach v prípade, že okolitý vzduch dosahuje nižšie teploty, ako jednotlivé zariadenia. Ventilátor sme umiestnili do spodnej tretiny predných dverí rozvádzača, nastavili sme jednotlivé parametre ventilátora a vrchné odvetrávacie diery sme doplnili o mriežky. Následne sme vykonali simuláciu oteplenia rozvádzača.

Vizuálne porovnanie rozloženia teploty medzi rozvádzačom bez ventilátora a rozvádzačom s ventilátorom s rovnakou farebnou stupnicou teploty je na obrázku 10.2. Vizuálne porovnanie rozloženia teploty medzi rozvádzačom bez ventilátora a rozvádzačom s ventilátorom s rovnakou farebnou stupnicou teploty v reze fáze L2 je na obrázku 10.3.



Obr. 10.2 Vizualne porovnanie rozloženia teploty medzi rozvádzačom bez ventilátora a rozvádzačom s ventilátorom s rovnakou farebnou stupnicou teploty



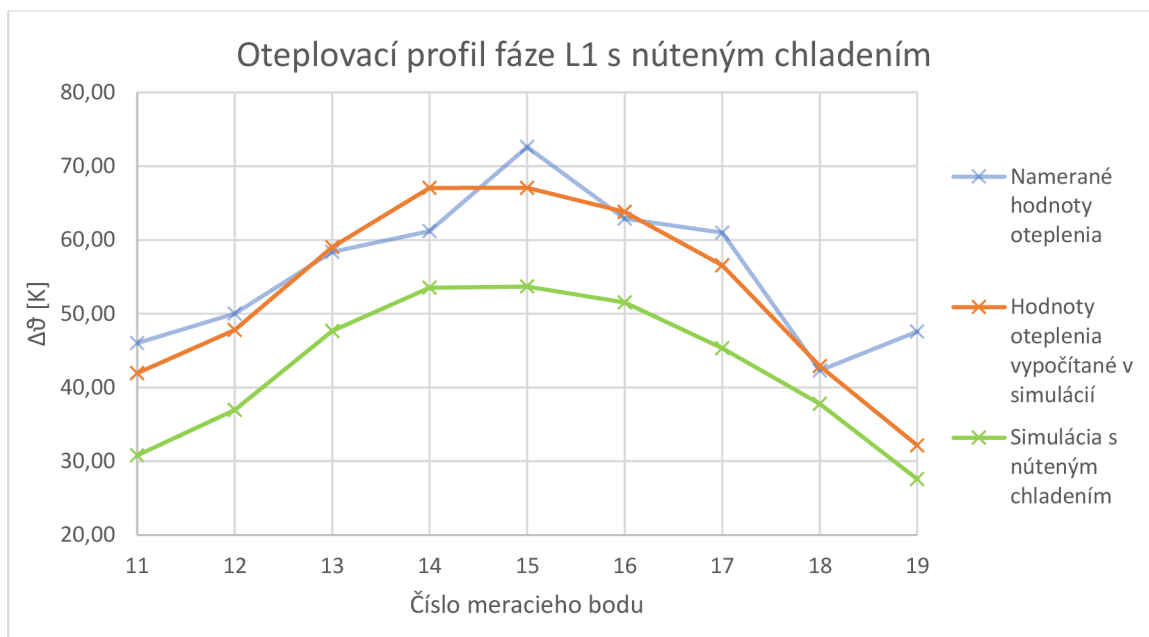
Obr. 10.3 Vizúálne porovnanie rozloženia teploty medzi rozvádzačom bez ventilátora a rozvádzačom s ventilátorom s rovnakou farebnou stupnicou teploty v reze fáze L2

Z vyššie uvedených vizuálnych porovnaní výsledkov je zrejmé, že dodatočné uvažovanie núteného chladenia pomocou ventilátora má pozitívny vplyv na výslednú teplotu jednotlivých častí rozvádzača. Porovnanie výsledných oteplení v jednotlivých meracích bodoch simulácie s núteným chladením a bez, je uvedené v tabuľke 10.2. Označenie  $\Delta\vartheta_M$  je pre výsledné oteplenie simulácie bez núteného chladenia, označenie  $\Delta\vartheta_{MCH}$  je pre výsledky oteplenia s uvažovaným ventilátorom.

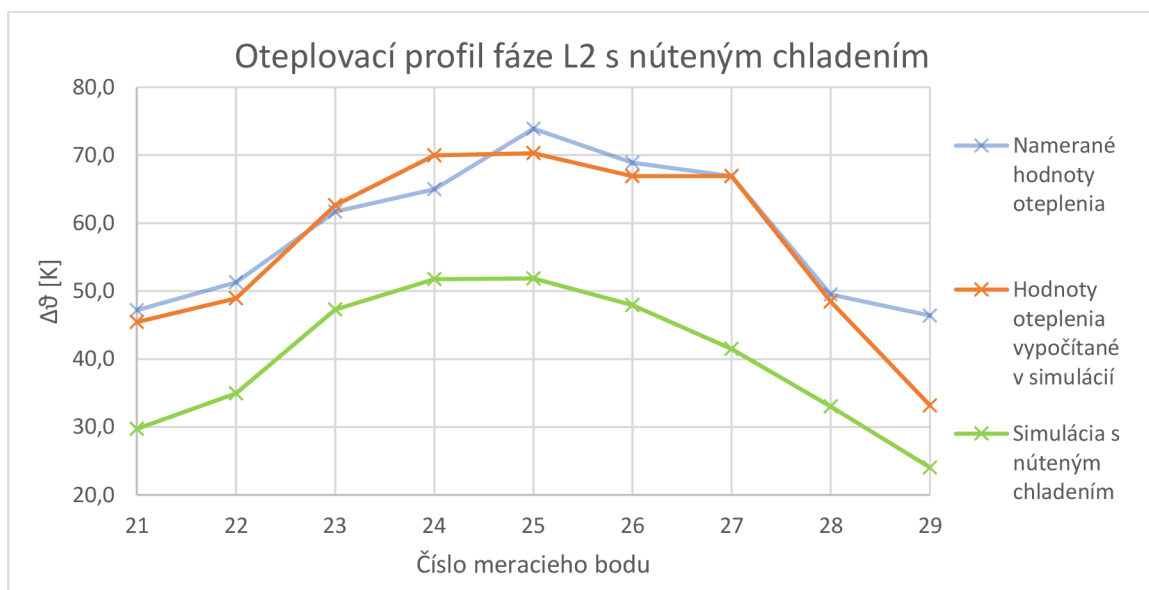
Tab. 10.2 Porovnanie výsledných oteplení v jednotlivých meracích bodoch simulácie s núteným chladením

Merací bod:	$\Delta\vartheta_M$ [K]	$\Delta\vartheta_{MCH}$ [K]	$\Delta$ [K]	%
11	46,0	30,8	15,2	-33,0
12	50,0	36,9	13,1	-26,1
13	58,4	47,7	10,7	-18,3
14	61,2	53,5	7,7	-12,6
15	72,6	53,7	18,9	-26,1
16	62,9	51,5	11,4	-18,1
17	61,0	45,3	15,7	-25,7
18	42,3	37,8	4,5	-10,7
19	47,6	27,6	20,0	-42,1
21	47,2	29,7	17,5	-37,0
22	51,3	34,9	16,4	-31,9
23	61,7	47,3	14,4	-23,4
24	65,0	51,8	13,2	-20,4
25	73,9	51,9	22,0	-29,8
26	68,9	48,0	20,9	-30,4
27	66,9	41,5	25,4	-38,0
28	49,5	33,0	16,5	-33,3
29	46,4	24,0	22,4	-48,2
31	45,0	30,6	14,4	-32,0
32	48,5	35,9	12,6	-26,0
33	61,3	48,1	13,2	-21,5
34	61,5	51,0	10,5	-17,0
35	72,5	51,3	21,2	-29,2
36	59,7	46,1	13,6	-22,8
37	56,2	43,3	12,9	-23,0
38	55,3	38,2	17,1	-31,0
39	44,3	28,6	15,7	-35,4

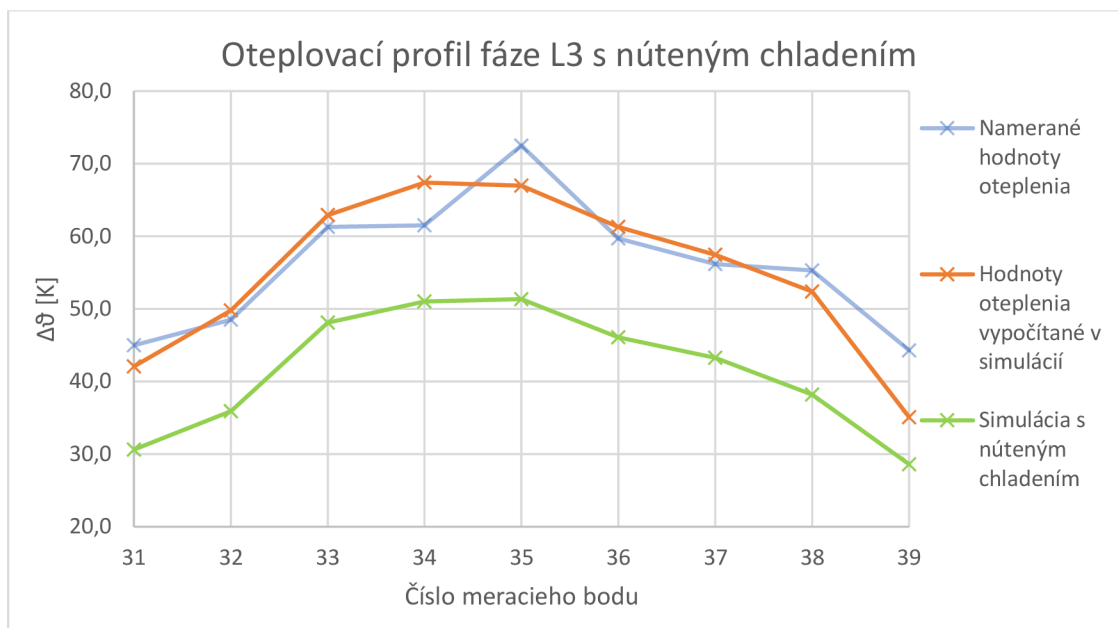
Výsledné oteplenie jednotlivých častí rozvádzača s uvažovaným núteným chladením pomocou ventilátora znížilo výsledné oteplenie v priemere o 23,6% na fáze L1, 32,5% na fáze L2 a 26,4% na fáze L3. Zníženie výsledného oteplenia na fáze L2 dosahuje percentuálne najväčšej hodnoty. Tento jav je spôsobený faktom, že ventilátor umiestnený na predných dverách je v jednej rovine spolu s fázou L2. Teplotné profily jednotlivých fáz sú zobrazené na obrázkoch 10.4 až 10.6



Obr. 10.4 Porovnanie otepľovacieho profilu na fáze L1 medzi reálne nameranými hodnotami, hodnotami so simulácie a hodnotami so simulácie s uvažovaným núteným chladením



Obr. 10.5 Porovnanie otepľovacieho profilu na fáze L2 medzi reálne nameranými hodnotami, hodnotami so simulácie a hodnotami so simulácie s uvažovaným núteným chladením



Obr. 10.6 Porovnanie otepľovacieho profilu na fáze L3 medzi reálne nameranými hodnotami, hodnotami so simulácie a hodnotami so simulácie s uvažovaným núteným chladením

Teplotné profily jednotlivých fáz ukazujú, že nútené chladenie spôsobilo pokles výslednej hodnoty oteplenia vo všetkých častiach prúdovodnej dráhy. Dodatočné osadenie ventilátora do rozvádzača sa teda na základe výsledkov simulácie javí ako účinný spôsob zníženia výsledného oteplenia a môže mať priaznivý vplyv na životnosť celého systému. Podstatná veličina, ktorá bude mať vplyv na efektivitu takéhoto chladenia je teplota okolitého vzduchu. Pri simulácii bola uvažovaná teplota okolitého vzduchu 19,37 °C, teda rovnaká ako v prípade simulácie bez núteného chladenia ako aj pri reálnom meraní oteplenia rozvádzača. Táto teplota sa však v praxi líši a s jej nárastom logicky klesá efektivita chladenia prúdovodnej dráhy okolitým vzduchom. Výsledný pokles priemernej hodnoty oteplenia prúdovodnej dráhy rozvádzača o 27,5% je však vzhľadom na pomerne nízke náklady tohto systému núteného chladenia veľmi efektívny.

## 11. TVORBA VÝSTUPNEJ EXCELOVEJ TABUĽKY

Pre výsledné oteplenie rozvádzača VN v simulácií ako aj realite má zásadný vplyv prechodový odpor jednotlivých stykových plôch alebo kontaktov. Odladená simulácia rozvádzača nám umožnila sledovať vplyv veľkosti prechodového odporu v jednotlivých častiach rozvádzača na jeho výsledné oteplenie. Túto závislosť sme pozorovali už pri odlaďovaní simulácie, kedy sme museli jednotlivé prechodové odpory nastaviť tak, aby výsledné oteplenie v simulácií zodpovedalo reálne nameranému otepleniu. Ako výstupnú excelovú tabuľku sme sa teda rozhodli vytvoriť rovnicový prepočet, ktorý umožní vypočítať priemerné oteplenie v jednotlivých meracích bodoch odpojovača. Vďaka prepočtu je možné dopredu zmerať prechodový odpor jednotlivých fáz odpojovača a po následnom zadaní do excelu dochádza k vypočítaniu jeho výsledného oteplenia.

Postup pri tvorení tohto excelového prepočtu bol nasledovný: pre potreby prepočtu bolo potrebné zistiť matematické závislosť medzi prechodovým odporom odpojovača a jeho výsledným oteplením. Pre potrebu zistenia tejto závislosti sme vykonali opakované simulácie oteplenia rozvádzača, pričom pri každej simulácií sme rovnomerne navýšili prechodový odpor jednotlivých častí odpojovača. Výsledné hodnoty zo simulácie sú uvedené v tabuľke 11.1, a na ich základe sme vytvorili graf závislosti nameraného prechodového odporu odpojovača na jeho výslednom priemernom oteplení. Tento graf môžeme vidieť na obrázku 11.1. Hodnoty prechodového odporu definovaného v simulácií sme v tabuľke prepočítali na ekvivalentné prechodové odpory, ktoré by boli reálne namerané a spôsobili by rovnaké oteplenie ako hodnoty ktoré boli použité v simulácií. Tento prepočet sme vykonali na základe porovnania výsledkov odladenej druhej simulácie uvedenej v kapitole č. 9.3.

Tab. 11.1 Výsledné hodnoty oteplenia pri navyšovaní prechod. odporu odpojovača

	$R_s$ [ $\mu\Omega$ ]	$k_p$ [-]	$R_E$ [ $\mu\Omega$ ]	Mer. Bod	$\Delta\vartheta$ [K]	Mer. Bod	$\Delta\vartheta$ [K]	Mer. Bod	$\Delta\vartheta$ [K]	$\Delta\vartheta_{AVG}$ [K]
L1	18,22	0,65	11,90	13	59,00	14	67,10	15	67,10	64,40
L2	18,85	0,60	11,30	23	62,60	24	70,00	25	70,30	67,63
L3	19,35	0,61	11,80	33	62,90	34	67,40	35	67,00	65,77
L1	20,26	0,65	13,23	13	62,63	14	70,41	15	70,53	67,86
L2	21,01	0,60	12,59	23	64,39	24	74,51	25	75,34	71,41
L3	21,75	0,61	13,26	33	65,77	34	68,61	35	70,03	68,14
L1	24,49	0,65	16,00	13	69,56	14	75,27	15	75,59	73,47
L2	24,89	0,60	14,92	23	70,02	24	79,17	25	80,76	76,65
L3	27,09	0,61	16,52	33	73,45	34	74,64	35	76,28	74,79
L1	30,82	0,65	20,13	13	79,49	14	82,77	15	83,11	81,79
L2	30,73	0,60	18,42	23	78,79	24	86,85	25	89,08	84,91
L3	35,09	0,61	21,40	33	85,36	34	84,21	35	86,79	85,45

$R_s$  [ $\mu\Omega$ ] - prechodový odpor v simulácií

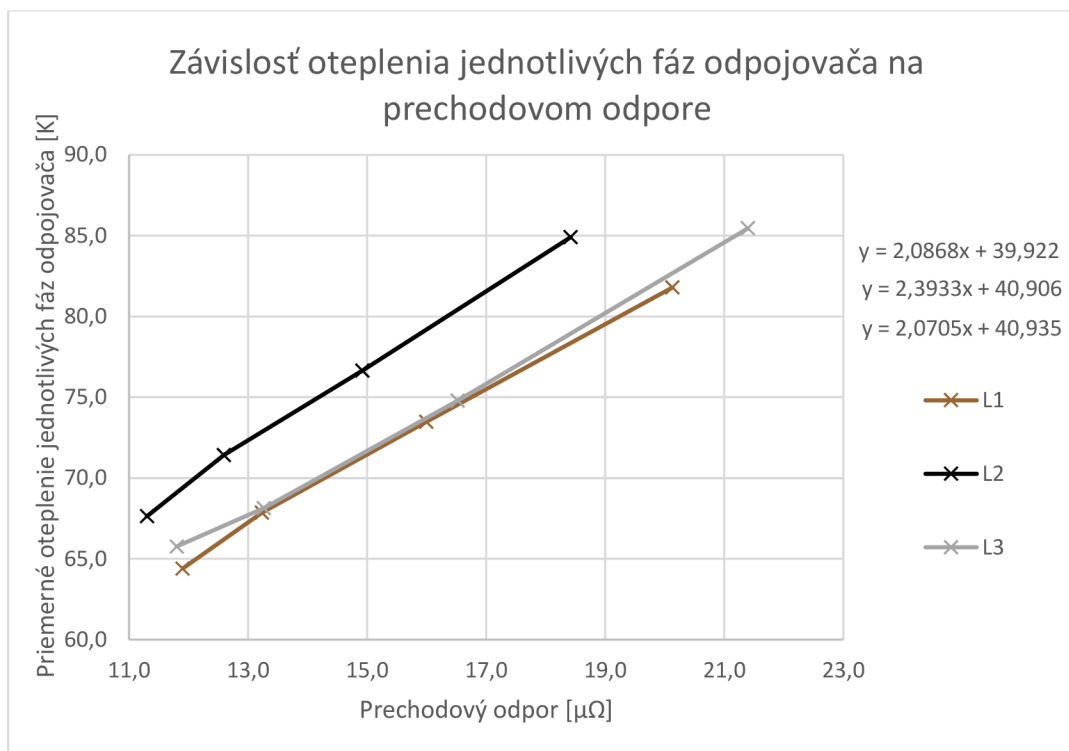
$k_p$  [-] - koeficient prepočítavajúci prechod. odpor v simulácií na ekvivalent prechodového odporu ktorý by bol reálne nameraný

$R_E$  [ $\mu\Omega$ ] - prechodový odpor prepočítaný na reálne nameraný

$\Delta\vartheta$  [K] - oteplenie v určitom meracom bode

$\Delta\vartheta_{AVG}$  [K] - priemerné oteplenie odpojovača vypočítané z oteplení v mer. bodoch





Obr. 11.1 Závislosť oteplenia jednotlivých fáz odpojovača na prechodovom odpore

Jednotlivé priebehy vyššie uvedených závislostí sme následne preložili lineárnou trendovou spojnicou čím sme závislosť linearizovali. Rovnice týchto trendových spojnic nám teda udávajú závislosť veľkosti prechodového odporu odpojovača na výslednom priemernom oteplení v jednotlivých meracích bodoch odpojovača. Tieto rovnice sme následne použili na tvorbu excelového prepočtu veľkosti reálne nameraného prechodového odporu a veľkosti výsledného oteplenia. Obrázok tabuľky, ktorá prepočítava vyššie uvedené veličiny je na obrázku 11.2. Pri využívaní tohoto prepočítavacieho nástroja je však potrebné počítať s nasledujúcimi obmedzeniami:

1. Veľkosť prechodového odporu v jednotlivých miestach bola zvyšovaná rovnomerne
2. Teplota okolia pri všetkých simuláciách bola uvažovaná 19,37 °C
3. Prepočítavacia tabuľka počíta s konštantným prechodovým odporom iných častí odpojovača
4. V prípade, že navýšime prechodový odpor určitej fázy, vzniknuté dodatočné teplo ohrieva aj susedné fázy. Tento jav prepočítavacia tabuľka nezohľadňuje
5. Prepočet počíta s linearizovanou závislosťou ktorá platí len v obmedzenom rozsahu

Z vyššie uvedených obmedzení vyplývajú nasledovné závery: v prípade, že dôjde k výraznému nárastu prechodového odporu len v jednom z kontaktných alebo stykových bodov odpojovača, môže dôjsť k výraznému nárastu oteplenia odpojovača v určitej časti.

Tento parameter prepočítavacia tabuľka nezohľadňuje. V prípade, že dôjde k nárastu prechodového odporu v inej časti rozvádzača, tento nárast spôsobí vznik väčšieho tepla, ktoré môže mať za následok dodatočné ohriatie odpojovača. Tento jav takisto prepočítavacia tabuľka nezohľadňuje.

	Zadajte nameraný prechodový odpor odpojovača v $\mu\Omega$	Vypočítané oteplenie [K]
L1	25	<b>92,162</b>
L2	16	<b>79,1988</b>
L3	12	<b>65,781</b>

Obr. 11.2 Obrázok tabuľky ktorá v excelovom súbore prepočítava prechodový odpor odpojovača na jeho priemerné výsledné oteplenie v meracích bodoch

Z tejto prepočítavacej tabuľky nám vyplynulo, že pri teplote okolia 20°C dosiahnu jednotlivé fázy odpojovača maximálneho možného oteplenia podľa normy ČSN EN 62271-1 ed.2 [7] t.j. 95 K za predpokladu, že sa ich prechodový odpor zvýšil rovnomerne pri prechodových odporoch na fáze L1 - 26,4  $\mu\Omega$ , na fáze L2 - 22,6  $\mu\Omega$  a na fáze L3 – 26,1  $\mu\Omega$ .

## 12. ZÁVER

Simulácia oteplenia rozvádzača VN je efektívny nástroj overenia termodynamických vlastností rozvádzača ešte pred jeho vyrobením prípadne pri jeho rôznych konfiguráciách. V tejto diplomovej práci boli uvedené vlastnosti základných prvkov rozvádzačových systémov. Parametre spomínaných prvkov majú priamy vplyv na výsledné oteplenie rozvádzača. Celkové oteplenie rozvádzača a aj samotné skúšky oteplenia rozvádzača musia spĺňať požiadavky noriem, ktoré sú v práci opísané. Následne boli v práci vyhodnotené vplyvy, ktoré majú priamy dopad na výsledné oteplenie rozvádzača. Samotný 3D model rozvádzača VN bol upravený a úspešne importovaný do simulačného prostredia. V simulačnom boli následne vstupné parametre simulácie upravené tak, aby sa výsledné oteplenie rozvádzača čo najviac priblížilo tomu reálne nameranému. Výsledné otepľovacie profily jednotlivých fáz v simulácií sú v dostatočnej korelácii s reálne nameranými hodnotami. Výrazné odlišnosti medzi simuláciou a reálnym meraním nastali pri prechodových odporoch jednotlivých častí prúdovodnej dráhy rozvádzača. Tieto odlišnosti boli spôsobené rozdielnou teplotou prúdovodnej dráhy pri reálnom meraní prechodového odporu a pri určovaní prechodového odporu zo simulácie a faktom, že v simulácií pretekala prúdovodnou dráhou jednosmerný prúd, ktorý nespôsovoval jav skin efektu tak ako tomu bolo pri reálnom meraní, kedy prúdovodnou dráhou tiekol prúd striedavý. Väčšie definované prechodové odpory v simulácií je teda možné považovať za určitú kompenzáciu vyššie uvedených javov. Po úspešnom odladení simulácie oteplenia rozvádzača sme vykonali simuláciu oteplenia s núteným chladením, kedy sme do spodnej časti rozvádzačovej skrine umiestnili ventilátor. Simulácia s núteným chladením preukázala efektívnosť takéhoto chladenia. Pridaný ventilátor spôsobil zníženie výsledného priemerného oteplenia prúdovodnej dráhy rozvádzača o 27,5%. V poslednej časti tejto práce bolo vykonaných niekoľko opakovaných simulácií pri rôznych definovaných hodnotách prechodového odporu odpojovača. Na základe výsledkov bola vytvorená excelová tabuľka, ktorá na základe prechodového odporu odpojovača vypočítava jeho oteplenie.

## LITERATÚRA

- [1] ING. HAVELKA, Otto a kolektiv. Elektrické přístroje. Praha: SNTL, 1985. ISBN 04-529-85.
- [2] RADA, Jozef a kolektiv. Elektrotepelná technika. 1. Praha: SNTL, 1985. ISBN 04-525-85.
- [3] HEŘMAN, Jozef a kolektiv. Příručka silnoproudé elektrotechniky. Praha: SNTL, 1986. ISBN 621.3.027.3.
- [4] SALLAM, A. a . INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, INC. Electric distribution systems. 1. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2011. ISBN 978-0-470-27682-2.
- [5] Air-insulated medium-voltage switchgear NXAirS: NXAirS 550+. Siemens [online]. [cit. 2020-12-10]. Dostupné z: <https://new.siemens.com/global/en/products/energy/medium-voltage/systems/nxairs.html>
- [6] SIEMENS AG. Air-Insulated Medium-Voltage Switchgear NXAIR and NXAIR M: Siemens HA 25.71 [online]. 91052 Erlangen, Germany, 2019, , 48 [cit. 2020-12-10]. Dostupné z: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:78bf32f3-4865-4cde-9a98-9267cc6b7f0b/ha-25-71-en.pdf>
- [7] ČSN EN 62271-1 ED.2. Vysokonapěťová spínací a řídicí zařízení - Část 1: Společná ustanovení pro spínací a řídicí zařízení střídavého proudu. 2. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2018.
- [8] ČSN EN 62271-200 ED.2. Vysokonapěťová spínací a řídicí zařízení - Část 200: Kovově kryté rozváděče na střídavý proud pro jmenovitá napětí nad 1 kV do 52 kV včetně. 2. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2012.
- [9] EYMARD, Robert, Thierry GALLOUËT a Raphaële HERBIN. Finite Volume Methods [online]. 2019 [cit. 2021-04-10]. Dostupné z: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02100732v2/document>
- [10] FERZIGER, J.H. a M. PERIĆ. *Computational Methods for Fluid Dynamics*. 3. vydanie. New York: Springer, 2002. ISBN 3-540-42076-6.
- [11] FUKA, Vladimír. Modelování proudění ve vysokém rozlišení. Praha, 2006. Diplomová práce. Univerzita Karlova v Praze.
- [12] HAVELKA, Otto. Stavba elektrických přístrojů 1. Brno: Ediční středisko VUT Brno, 320.
- [13] SolidWorks Flow Simulation 2012: Technical reference [online]. 2012, 184 [cit. 2021-04-17]. Dostupné z: [https://d2t1xqejof9utc.cloudfront.net/files/18565/SW\\_CFD\\_technical\\_reference.pdf?1361897013](https://d2t1xqejof9utc.cloudfront.net/files/18565/SW_CFD_technical_reference.pdf?1361897013)

- [14] DE BRUYNE, Patrick a Benjamin CURRAT. Temperature and frequency effects on cable resistance: Snapshots on multi-materials power cable linear resistance [online]. AESA Cortailod, 2015, , 3 [cit. 2021-04-20]. Dostupné z: [https://www.aesa-cortailod.com/fileadmin/documents/knowledge/AN\\_150617\\_E\\_Snapshots\\_multi\\_materials.pdf](https://www.aesa-cortailod.com/fileadmin/documents/knowledge/AN_150617_E_Snapshots_multi_materials.pdf)
- [15] FPF15KG SERIES FAN FILTER. Axair Fans UK LtG [online]. [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: [https://www.axair-fans.co.uk/FPF-datasheets/FPF15KGU\\_R.pdf](https://www.axair-fans.co.uk/FPF-datasheets/FPF15KGU_R.pdf)
- [16] TANG, Johann. Fan Basics: Air Flow, Static Pressure, and Impedance [online]. [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://blog.orientalmotor.com/fan-basics-air-flow-static-pressure-impedance>

## ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK

### Skratky:

VN	...	Vysoké napätie
VVN	...	Veľmi vysoké napätie
PTP	...	Prístrojový transformátor prúdu
PTN	...	Prístrojový transformátor napätia
SF <sub>6</sub>	...	Fluorid sírový
CO <sub>2</sub>	...	Oxid uhličitý
NOG	...	Neoxidačné plyny
OG	...	Oxidačné plyny
SWFS	...	SolidWorks Flow Simulation
MKO	...	Metóda konečných objemov

### Symbols:

U	...	napätie	[V]
I	...	prúd	[A]
R	...	odpor	[Ω]
t	...	čas	[s]
$\alpha_0$	...	súčiniteľ prestupu tepla	[W/m <sup>2</sup> K]
A	...	plocha	[m <sup>2</sup> ]
$\Delta\theta$	...	veľkosť oteplenia	[K]
c	...	objemová tepelná kapacita	[J/m <sup>3</sup> K]
V	...	objem	[m <sup>3</sup> ]
$\tau$	...	časová konštanta	[-]
$\Delta\theta_{\max}$	...	ustálená maximálna hodnota oteplenia	[K]
$\Delta\theta_{\text{kd}}$	...	krátkodobá hodnota oteplenia	[K]
$\theta_0$	...	teplota okolia	[°C]
$\rho$	...	elektrická rezistivita	[Ωm]
$k_p$	...	činiteľ povrchového zhustenia	[-]
$k_{\text{bl}}$	...	činiteľ javu blízkosti	[-]
$\alpha$	...	teplotný súčiniteľ odporu	[K <sup>-1</sup> ]
$U_r$	...	nominálne napätie	[kV]
$I_r$	...	nominálny prúd	[A]
$I_k$	...	nominálny krátkodobý výdržný prúd	[A]
$I_p$	...	nominálny nárazový výdržný prúd	[A]
$R_M$	...	nameraný prechodový odpor	[μΩ]
$R_S$	...	prechodový odpor určený zo simulácie	[μΩ]