



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

OTEPLENÍ ODPOJOVAČE TYPU KBE, 38 KV, 4000 A

WARMING OF THE DISCONNECTOR, TYPE KBE, 38 KV, 4000 A

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ondřej Švábek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Bohuslav Bušov, CSc.

BRNO 2024

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Ondřej Švábek

ID: 195450

Ročník: 3

Akademický rok: 2023/24

NÁZEV TÉMATU:

Oteplení odpojovače typu KBE, 38 kV, 4000 A

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se s elektrickými přístroji vn z produkce IVEP, a.s.
2. Nastudujte ČSN příslušné k odpojovačům.
3. Vypočítejte ustálené oteplení konkrétního odpojovače KBE 38 kV, 4000 A.
4. Posuďte výsledky výpočtu oteplení s firemními výsledky simulace oteplení a oteplovací zkouškou.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Havelka O. a kol.: Elektrické přístroje, SNTL/ALFA, Praha 1985.
- [2] Sekvence k tématu tepelné účinky proudu v .ppt z BPC-EPR.
- [3] Sekvence k tématu tepelné účinky proudu v .ppt z MPC-SVP.

Termín zadání: 5.2.2024

Termín odevzdání: 29.5.2024

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

prof. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské 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

Bakalářská práce je zaměřena na teorii a výpočet tepelných účinků elektrického proudu a ustáleného oteplení odpojovače KBE 38 kV, 4000 A. Další důležitou částí této práce je seznámení se s elektrickými přístroji firmy IVEP a.s. a na studium norem spojených s odpojovači. V rámci práce je proveden výpočet ustáleného oteplení konkrétního odpojovače zadavatele a zhodnocení výsledků výpočtů a měření.

Klíčová slova

Odpojovač; zkouška trvalým proudem; výpočet oteplení

Abstract

The bachelor's thesis is focused on the theory and calculation of the thermal effects of electric current and temperature-rise test of the disconnector KBE 38 kV, 4000 A. Another important part of this thesis is familiarisation with the electrical devices of the company IVEP, a.s. and studying norms related to disconnectors. The procedure for the calculation of warming of a particular disconnector is described within the thesis. The last part of the thesis evaluates the results of calculation and measurement.

Keywords

Disconnector; temperature-rise test; calculation of warming

Bibliografická citace

ŠVÁBEK, Ondřej. *Oteplení odpojovače typu KBE, 38 kV, 4000 A*. Brno, 2024. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/160589>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce Bohuslav Bušov.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	<i>Ondřej Švábek</i>
VUT ID studenta:	<i>195 450</i>
Typ práce:	<i>Semestrální práce</i>
Akademický rok:	<i>2023/24</i>
Téma závěrečné práce:	<i>Oteplení odpojovače KBE</i>

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: 26. května 2024

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Bušovovi za vedení a cenné rady při tvorbě odborného textu, Ing. Šimkovi za vedení a poznatky při výpočtu ustáleného oteplení odpojovače a Ing. Vlkovi za poskytnuté materiály a vstřícnost.

V Brně dne: 26. května 2024

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	10
SEZNAM TABULEK.....	11
ÚVOD	12
1. FIRMA IVEP, A.S. A JEJÍ PORTFOLIO.....	13
1.1 PRODUKTY IVEP, A.S.....	13
1.1.1 <i>Odpojovače, přepínače a uzemňovače.....</i>	<i>13</i>
1.1.2 <i>Odpínače.....</i>	<i>16</i>
1.1.3 <i>Rozváděče vn.....</i>	<i>18</i>
1.1.4 <i>F.L.I.R.....</i>	<i>19</i>
1.1.5 <i>Pohony spínacích přístrojů.....</i>	<i>20</i>
1.1.6 <i>Izolátory.....</i>	<i>20</i>
1.1.7 <i>Zapouzdržené vodiče.....</i>	<i>21</i>
1.1.8 <i>Dekády a zkušební zařízení.....</i>	<i>22</i>
1.2 TYPOVÉ ZKOUŠKY NA ZKUŠEBNĚ	23
2. NORMY PRO VYSOKONAPĚŤOVÁ SPÍNACÍ A ŘÍDÍCÍ ZAŘÍZENÍ	24
2.1 NORMÁLNÍ A ZVLÁŠTNÍ PRACOVNÍ PODMÍNKY	24
2.1.1 <i>Normální pracovní podmínky pro spínací a řídicí zařízení venkovního provedení.....</i>	<i>24</i>
2.1.2 <i>Zvláštní pracovní podmínky pro spínací a řídicí zařízení venkovního provedení.....</i>	<i>24</i>
2.2 JMENOVITÉ HODNOTY	25
2.3 TYPOVÉ ZKOUŠKY	25
2.3.1 <i>Zkoušky trvalým proudem.....</i>	<i>27</i>
2.4 VÝROBNÍ KUSOVÉ ZKOUŠKY	29
3. TEPELNÉ ÚČINKY ELEKTRICKÉHO PROUDU	30
3.1 OTEPLENÍ PROUDOVODIČE.....	30
3.2 ODPOR VODIČE	31
3.3 PRINCIP TEPELNÉ SÍTĚ	33
3.4 NÁHRADNÍ TEPELNÁ SCHÉMATA	33
3.5 METODA TŘETÍ HODNOTY.....	34
4. VÝPOČET NÁHRADNÍCH TEPELNÝCH SCHÉMAT ODPOJOVAČE.....	35
4.1 PŘEPOČET MĚRNÉHO ODPORU MĚDI.....	35
4.2 VÝPOČET NÁHRADNÍHO SCHÉMATU PŘÍVODNÍCH VODIČŮ	35
4.2.1 <i>Určení koeficientu zhuštění proudnic.....</i>	<i>36</i>
4.2.2 <i>Skinefekt a jev blízkosti.....</i>	<i>37</i>
4.2.3 <i>Výpočet elektrického odporu jedné pásoviny.....</i>	<i>37</i>
4.2.4 <i>Výpočet měrné chladivosti pásoviny.....</i>	<i>38</i>
4.2.5 <i>Výpočet chladicí plochy.....</i>	<i>38</i>
4.2.6 <i>Výpočet náhradního schématu pásoviny.....</i>	<i>38</i>
4.2.7 <i>Uvážení konce pásoviny jako chladiče.....</i>	<i>39</i>
4.2.8 <i>Kompletní tepelné schéma přívodních vodičů.....</i>	<i>39</i>
4.3 VÝPOČET NÁHRADNÍHO SCHÉMATU PŘÍVODNÍ SVORKY.....	39
4.3.1 <i>Určení koeficientu zhuštění proudnic SPI.....</i>	<i>40</i>

4.3.2	Vliv skinefektu SP1.....	41
4.3.3	Výpočet elektrického odporu SP1	41
4.3.4	Výpočet měrné chladivosti SP1	41
4.3.5	Výpočet chladicí plochy SP1.....	41
4.3.6	Výpočet náhradního schématu SP1.....	42
4.3.7	Uvážení začátku SP1 jako chladiče.....	42
4.3.8	Kompletní tepelné schéma SP1	43
4.3.9	Předmluva k výpočtu spojnice praporců SP2	43
4.3.10	Určení koeficientu zhuštění proudnic SP2	43
4.3.11	Vliv skinefektu SP2.....	43
4.3.12	Výpočet elektrického odporu SP2.....	44
4.3.13	Výpočet měrné chladivosti SP2	44
4.3.14	Výpočet chladicí plochy SP2.....	44
4.3.15	Výpočet náhradního schématu SP2.....	45
4.3.16	Uvážení konce SP2 jako chladiče.....	45
4.3.17	Kompletní tepelné schéma SP2	46
4.3.18	Kompletní tepelné schéma přívodní svorky.....	46
4.4	VÝPOČET NÁHRADNÍHO SCHÉMATU PRAPORCE	46
4.4.1	Určení koeficientu zhuštění proudnic P1	47
4.4.2	Skinefekt a jev blízkosti P1	47
4.4.3	Výpočet elektrického odporu jednoho praporce P1	48
4.4.4	Výpočet měrné chladivosti P1	48
4.4.5	Výpočet chladicí plochy P1.....	48
4.4.6	Výpočet náhradního schématu P1.....	49
4.4.7	Uvážení začátku P1 jako chladiče.....	49
4.4.8	Kompletní tepelné schéma P1	49
4.4.9	Určení koeficientu zhuštění proudnic P2	50
4.4.10	Skinefekt a jev blízkosti P2.....	50
4.4.11	Výpočet elektrického odporu jednoho praporce P2	51
4.4.12	Výpočet měrné chladivosti P2	51
4.4.13	Výpočet chladicí plochy P2	51
4.4.14	Výpočet náhradního schématu P2.....	52
4.4.15	Uvážení začátku P2 jako chladiče.....	52
4.4.16	Kompletní tepelné schéma SP2	52
4.4.17	Uvážení ocelového U-profilu jako chladiče	53
4.4.18	Kompletní tepelné schéma praporce na straně pevného kontaktu	55
4.4.19	Praporec na straně pohyblivého kontaktu.....	55
4.5	VÝPOČET NÁHRADNÍHO SCHÉMATU KONTAKTNÍHO NOŽE	56
4.5.1	Určení koeficientu zhuštění proudnic kontaktního nože.....	56
4.5.2	Skinefekt a jev blízkosti kontaktního nože	57
4.5.3	Výpočet elektrického odporu jednoho kontaktního nože.....	57
4.5.4	Výpočet měrné chladivosti kontaktního nože	57
4.5.5	Výpočet náhradního schématu kontaktního nože	58
4.5.6	Uvážení konců nože jako chladičů	58
4.5.7	Dosavadní tepelné schéma kontaktního nože.....	60
4.5.8	Uvážení ocelových příložek jako chladiče	60
4.5.9	Uvážení distančních válečků jako chladiče.....	61
4.5.10	Uvážení stříšky nad pohyblivým kontaktem jako chladiče	62

4.5.11	<i>Kompletní schéma tepelné schéma kontaktního nože</i>	64
4.6	VÝPOČET NÁHRADNÍHO SCHÉMATU KONTAKTNÍHO PRACOVNÍHO STYKU	66
4.6.1	<i>Výpočet parametrů tepelného schématu kontaktního pracovního styku</i>	66
4.6.2	<i>Kompletní tepelné schéma kontaktního pracovního styku</i>	67
4.7	VÝPOČET NÁHRADNÍHO SCHÉMATU ŠROUBOVÉHO KONTAKTNÍHO STYKU PRAPORCE A SPOJNICE PRAPORCŮ.....	67
4.7.1	<i>Výpočet přítlaku síly šroubu M16</i>	67
4.7.2	<i>Výpočet parametrů náhradního schématu šroubového kontaktního styku praporce a spojnice praporců</i>	67
4.7.3	<i>Kompletní tepelné schéma šroubového kontaktního styku praporce a spojnice praporců</i> . 68	
4.8	VÝPOČET NÁHRADNÍHO SCHÉMATU ŠROUBOVÉHO KONTAKTNÍHO STYKU PŘÍVODNÍCH VODIČŮ A SPOJNICE PRAPORCŮ	68
4.8.1	<i>Výpočet parametrů náhradního schématu šroubového kontaktního styku přívodních vodičů a spojnice praporců</i>	69
4.8.2	<i>Kompletní tepelné schéma šroubového kontaktního styku přívodních vodičů a spojnice praporců</i>	69
4.9	KOMPLETACE TEPELNÉHO SCHÉMATU	70
5.	VÝPOČET USTÁLENÉHO OTEPLENÍ ODPOJOVAČE	71
6.	SROVNÁNÍ USTÁLENÝCH OTEPLENÍ A PODMÍNKY PANUJÍCÍ PŘI ZKOUŠCE	74
6.1	INTERPRETACE VYPOČTENÝCH HODNOT USTÁLENÉHO OTEPLENÍ	74
6.2	SKUTEČNÉ PODMÍNKY ZKOUŠKY TRVALÝM PROUDEM	75
6.3	SROVNÁNÍ VYPOČTENÝCH A NAMĚŘENÝCH HODNOT USTÁLENÉHO OTEPLENÍ.....	75
7.	NÁVRH KONSTRUKČNÍCH ŘEŠENÍ	77
7.1	NÁTĚR ODPOJOVAČE	77
7.2	ZMĚNA PRŮŘEZU PROUDOVODNÉ DRÁHY	77
7.3	VĚTŠÍ PŘÍTLAK V KONTAKTNÍM STYKU	77
7.4	VOLBA ODLIŠNÉHO KONTAKTNÍHO STYKU	78
7.5	ORIENTACE A TVAR PROUDOVODNÉ DRÁHY	78
7.6	AKTIVNÍ CHLAZENÍ.....	78
8.	ZÁVĚR.....	79
	LITERATURA.....	80
	SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	81

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Odpojovač KBE 3D	15
3.1	Obecný průběh oteplení proudovodiče.....	31
4.1	Přívodní pásovina.....	36
4.2	Kompletní tepelné schéma přívodních vodičů	39
4.3	Spojnice praporců a její schématické rozdělení	40
4.4	Kompletní tepelné schéma SP1	43
4.5	Kompletní tepelné schéma SP2	46
4.6	Kompletní tepelné schéma přívodní svorky	46
4.7	Praporec a jeho schématické rozdělení.....	47
4.8	Kompletní tepelné schéma P1	50
4.9	Kompletní tepelné schéma P2	53
4.10	Rozvinutý U-profil	53
4.11	Kompletní tepelné schéma praporce na straně pevného kontaktu	55
4.12	Kompletní tepelné schéma praporce na straně pohyblivého kontaktu.....	55
4.13	Kontaktní nůž a jeho schématické rozdělení	56
4.14	Dosavadní tepelné schéma nože	60
4.15	Rozvinutá stříška	63
4.16	Kompletní tepelné schéma nože	65
4.17	Kompletní tepelné schéma kontaktního pracovního styku	67
4.18	Kompletní tepelné schéma šroubového kontaktního styku praporce a spojnice praporců	68
4.19	Kompletní tepelné schéma šroubového kontaktního styku přívodních vodičů a spojnice praporců ..	69
5.1	Kompletní elektrické schéma odpojovače.....	71

SEZNAM TABULEK

1.1	Typy linkových tahových kompozitních izolátorů.....	21
1.2	Typy podpěrných kompozitních izolátorů.....	21
2.1	Mezní teploty a oteplení pro vybrané materiály vysokonapěťových spínacích zařízení v prostředí s oxidačními plyny	28
5.1	Vypočítané hodnoty oteplení v naznačených bodech dle obrázku 5.1	73

ÚVOD

Elektrické přístroje jsou početnou skupinou prvků v elektrizační soustavě a jsou s ní neodmyslitelně spjaty. Přístroje plní v elektrizační soustavě řadu funkcí, které jsou potřebné pro dodávku elektrické energie z místa výroby až ke spotřebiteli. Spínací přístroje jsou nejpočetnější skupinou, do níž patří i odpojovače.

Uvedení elektrického přístroje na trh je možné až po vykonání řady typových a kusových zkoušek definovaných v příslušných normách, jinak tomu není ani u odpojovačů. Jednou z nich je zkouška trvalým proudem, při které se na odpojovači měří ustálené oteplení při průchodu nominálního proudu v nejvíce tepelně namáhaných místech. Při překročení maximálního dovoleného oteplení by mohlo dojít ke strukturálním změnám v materiálech odpojovače a ten by při spínání nebyl schopen plnit svoji funkci.

Při výpočtu ustáleného oteplení jsou zaváděny zjednodušující předpoklady, které umožňují se k reálným hodnotám pouze přiblížit. Další odchylky vznikají vlivem závislosti odporů proudovodné dráhy na mnohých faktorech. Nejpřesnějším ale nákladnějším postupem je aktuálně experimentální zkouška.

Bakalářská práce je členěna do čtyř základních částí. Kapitola 1 představuje firmu IVEP, a.s. a její portfolio přístrojů. Normy spjaté s odpojovači jsou popsány v kapitole 2. Kapitola 3 se zabývá teoretickými základy tepelných účinků elektrického proudu, náhradních tepelných schémat, principem tepelné sítě a jejím výpočtem. Ve 4. kapitole je proveden výpočet náhradních tepelných schémat konkrétního odpojovače. Kapitola 5. a 6. shrnuje výpočet ustáleného oteplení v daných bodech odpojovače, porovnání výsledků výpočtu a měření a konstrukční návrhy pro snížení oteplení odpojovače.

Přínos této bakalářské práce shledávám v seznámení se s elektrickými přístroji a s normami jim příslušícími. Dále v absolvování výpočtu náhradního schématu daného odpojovače, po jehož odladění se může jednat o jednořadové tepelné schéma, které půjde využít při návrhu dalších typově podobných odpojovačů. V neposlední řadě je přínosem návrh a zhodnocení konstrukčních řešení pro snížení oteplení odpojovače.

1. FIRMA IVEP, A.S. A JEJÍ PORTFOLIO

IVEP, a.s. je brněnskou firmou specializující se na výrobu elektrických spínacích zařízení nízkého a vysokého napětí a jejich příslušenství. Součástí areálu je taktéž zkušebna, kde mohou probíhat typové zkoušky na těchto zařízeních nebo na zařízeních zákazníků.

Datum vzniku a zápisu firmy podle literatury [1] se datuje k 28. březnu 1991. Historie firmy je podle [2] rozmanitější. Inženýři Bartelmus a Donát založili v osmdesátých letech devatenáctého století v Brně první českou továrnu na elektrické stroje a zařízení. Škodovy závody odkoupily továrnu v roce 1927. Továrna se následně osamostatnila a přejmenovala na EJF Brno v roce 1949. V roce 1966 vznikl z vývojového střediska EJF Brno Výzkumný ústav elektrických přístrojů a rozváděčů, ze kterého se pro revoluci stala společnost IVEP, a.s..

1.1 Produkty IVEP, a.s.

Objem výroby elektrických přístrojů je velmi malý oproti sériové výrobě větších společností jako ABB, Siemens a další. IVEP a.s. se zaměřuje na výrobu přístrojů zákazníkovi přímo na míru, a to tam, kde použití sériově vyráběných kusů není ekonomické nebo vůbec možné. Výrobky jejich vlastní konstrukce jsou nainstalovány po světě v takřka 60-ti zemích světa.

Katalog produktů je k nalezení na jejich webových stránkách [2]. Katalog není definitivní soupiskou produktů, slouží jako rozcestník pro zákazníka. IVEP a.s. je schopen na základě zadání od zákazníka modulárně upravovat vybraný elektrický přístroj přímo pro danou aplikaci.

Počet nabízených unikátních přístrojů se na základě modulárních úprav pohybuje okolo tří tisíc kusů, proto se následující podkapitoly zaměří pouze základní popis přístrojů jejich druhy a technické údaje.

1.1.1 Odpojovače, přepínače a uzemňovače

Odpojovače jsou přístroje, které spínají a rozepínají nezátížené elektrické obvody mechanicky s viditelným rozpojením. V sítích nn se odpojovače používají jen zřídka. Z pravidla jsou instalovány v sítích vn a výše, kde je nedostatečné přerušování obvodu vypnutím vypínače. [3] Nejsou konstrukčně vybaveny pro vypínání nadproudů a zhášení oblouku, po určitou dobu musejí odolat účinkům nadproudů, než zapůsobí nadřazená ochrana.

Odpojovači přerušujeme části obvodů za účelem revizí, oprav nebo změny konfigurace. Jejich hlavním úkolem je chránit osoby pracující na odpojených částech zařízení. U odpojovače musí být zajištěna větší izolační pevnost mezi kontakty odpojovače než mezi kontaktem a zemí, aby byl přeskok při vzniku přepětí vždy sveden k zemi, a nikoliv k protějším kontaktu. Odpojovače mohou být vybaveny též ocelovým

uzemňovacím nožem, uzemňovačem (zkratovačem), který po odpojení vedení uzemní. Hřídele pro pohon odpojovače a uzemňovače musí mít vzájemné blokování. Nesmí být možné zapnout uzemňovací nože při sepnutých kontaktech odpojovače a kontakty odpojovače lze manipulovat pouze při rozepnutých kontaktech uzemňovače.[3]

Odpojovače se dělí podle orientace odpojovače na:

1. horizontální uložení,
2. vertikální uložení.

Odpojovače se vyrábějí pro vnitřní montáž i venkovní montáž. S rostoucí hladinou napětí převažuje venkovní instalace nad umístěním uvnitř. Neexistuje norma, kdy daný odpojovač musí být ve venkovním nebo vnitřním provedení. Literatura [3] nabízí následující rozdělení:

1. do 12 kV se odpojovače vyrábějí pro vnitřní montáž,
2. pro vyšší napětí vn se objevuje provedení pro vnitřní i venkovní montáž,
3. hladiny vvn a zvn jsou osazeny odpojovači výhradně pro venkovní montáž.

V produktovém katalogu na webových stránkách IVEP a.s. [2] jsou nabízeny tyto druhy odpojovačů:

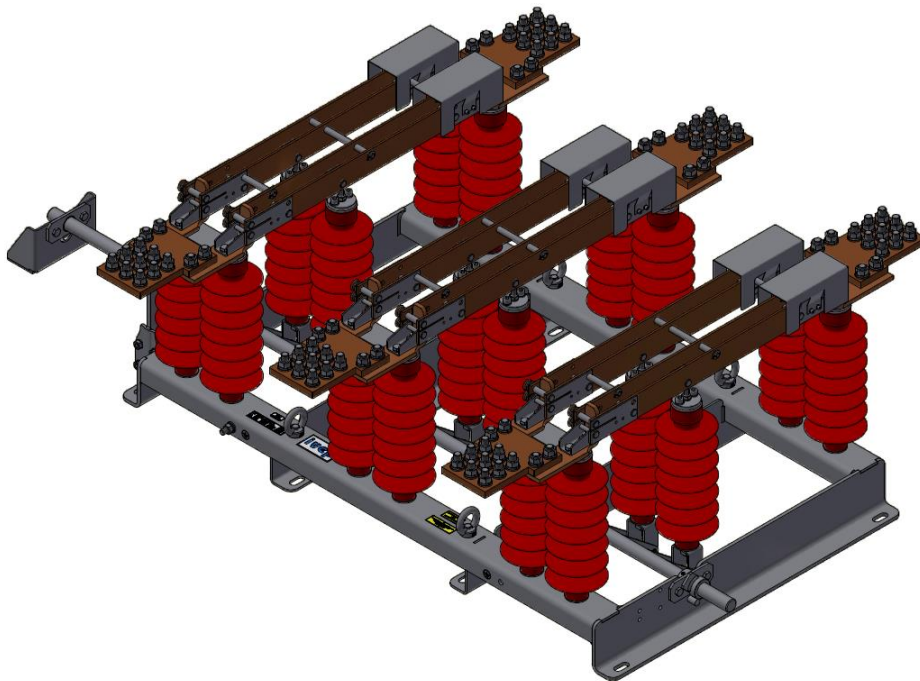
Vnitřní odpojovače QAK, QAKZ (s uzemňovačem) pro jmenovitá napětí o síťové frekvenci od 1 kV do 12 kV, jmenovité proudy od 100 A do 8 kA a krátkodobé výdržné proudy od 16 kA do 120 kA. Konstrukční nosné prvky jsou z válcovaných profilů a ocelových plechů s povrchovou ochranou proti korozi galvanickým pozinkováním. Elektrovodné díly jsou z elektrolytické mědi s postříbřením. V kontaktním nožovém třecím spoji zajišťují přítlak do kontaktu korozivzdorné tlačné pružiny. Proudovodná dráha je umístěna na izolátorech z epoxidové pryskyřice. Přístroj může být vybaven dálkovou signalizací stavu a poháněn motoricky nebo ručně. Konfigurace prvků na odpojovači je variabilní. Využití pro spínání v rozváděcích a rozvodnách.

Vnitřní generátorové odpojovače QAS pro jmenovitá napětí síťové frekvence od 12 kV do 36 kV, jmenovité proudy až 22 kA a krátkodobé výdržné proudy až 190 kA. Využití materiálu pro konstrukci jsou stejné jako pro odpínač QAK. Z důvodu vyšších nominálních proudů je druh kontaktního styku roubíkový, jedná se o posuvný válcový kontakt. Pohon přístroje je ruční přes převodovku nebo motorický, s možností dálkové signalizace. Využití pro spínání obvodů generátoru v rozváděcích a rozvodnách.

Vnitřní odpojovače QAK HD pro jmenovitá napětí od 100 V do 12 kV, jmenovité proudy od 8 kA do modulárního provedení 160 kA instalovatelné v stejnosměrných DC i vysokofrekvenčních VF sítích. Krátkodobý výdržný proud pro jeden odpojovač dosahuje hodnoty až 160 kA. Konstrukční nosné prvky jsou ze sklotextilových dílců, hliníkových praporců a ocelových plechů s povrchovou ochranou proti korozi galvanickým pozinkováním. Elektrovodné díly jsou z elektrolytické mědi s postříbřením. V nožovém kontaktním spoji zajišťují přítlak do kontaktu korozivzdorné talířové pružiny. Možnost dálkové signalizace a ručního nebo motorového pohonu. Využití pro spínání

v rozváděcích a speciálních provozech (elektrolytické vany, grafitizační pece, tavicí pece atd.).

Venkovní odpojovače KBE pro jmenovitá napětí o síťové frekvenci od 12 kV do 52 kV, jmenovité proudy od 400 A do 3150 A a krátkodobé výdržné proudy 20 kA. Existuje více typů odpojovačů KBE, které jsou ověšeny doplňkovou výzbrojí jako například uzemňovačem, pojistkovým spodkem a zhášecím mechanismem, který je tvořen vypínacím prutem. Odpojovač, na kterém je proveden výpočet, je na obrázku 1.1. Izolátory mohou být porcelánové, epoxidové nebo silikonové. Ovládání přístroje je prováděno ručně. Přístroj je navržen pro montáž v distribučních sítích vn.



Obrázek 1.1 Odpojovač KBE 3D

Venkovní trakční odpojovače QAV, EQAV (s uzemňovačem) pro stejnosměrné sítě o napětí 1,5 kV, proudu 3000 A a krátkodobém výdržném proudu 20kA. Vyznačují se vysokou střednědobou přetížitelností, dvojitou izolací a opalovacími růžky. Proudovodná dráha je z elektrovedné mědi s postříbřením. Druh kontaktního styku je nožový třecí. Ovládání přístroje je prováděno ručně nebo motorově. Přístroj je instalován pro spínání trakčních vedení MHD, trakčních systémů celostátních drah a vleček a v povrchových dolech.

Venkovní trakční odpojovač QAD, QADZ (s uzemňovačem) pro stejnosměrné sítě o napětí 3 kV a proudech od 2000 A do 4500 A i střídavé sítě o jmenovitém napětí do 25 kV. Při krátkodobém výdržném proudu 31,5kA. Přístroj je vybaven opalovacími růžky, které chrání hlavní kontakty před poškozením. Konstrukční nosné prvky jsou z nerezivějící oceli s pozinkováním. Proudovodná dráha je z elektrovedné mědi

s postříbřením. V kontaktním spoji je nožový třecí styk. Proudovodná dráha je umístěna na epoxidových nebo silikonových izolátorech. Ovládání přístroje je prováděno ručně nebo motorově. Využití pro stejnosměrná trakční vedení.

Venkovní trakční odpojovač QAD-A pro jmenovité napětí 17,5 kV, jmenovité proudy 1800 A nebo 2000 A a krátkodobý výdržný proud 31,5 kA. Přístroj se vyznačuje vysokou přetížitelností. Proudovodná dráha je z elektrovedné mědi bez postříbření s nožových kontaktním stykem. Druh pohonu je ruční nebo motorový. Přístroj je doplněn signalizační šipkami, které slouží k snazší identifikaci polohy kontaktů při zhoršené viditelnosti. Využití pro montáže do jednofázových střídavých trakčních vedení a napájecích stanic.

Přepínače jsou navrženy na velký počet spínacích operací, které jako odpojovače provádějí bez zatížení. Na rozdíl od odpojovačů nemusí být jejich proudovodná dráha viditelně rozpojena.

Přepínače a uzemňovače dostupné na stránkách [2]:

Vnitřní přepínač PQAK a PQAKZ (s uzemňovačem) pro jmenovitá napětí od 1 kV do 52 kV, jmenovité proudy od 100 A do 4000 A a krátkodobé výdržné proudy 80 kA. Konstrukční nosné prvky jsou z válcovaných profilů a ocelových plechů s povrchovou ochranou proti korozi galvanickým pozinkováním. Proudovodná dráha je z elektrovedné mědi s postříbřením. V kontaktním nožovém třecím spoji zajišťují přítlak do kontaktu korozivzdorné tlačné pružiny. Proudovodná dráha je umístěna na izolátorech z epoxidové pryskyřice nebo porcelánu. Přístroj je možné ovládat ručně nebo motoricky. Lze jej dodávat v jedno nebo více pólovém provedení a jeho spínací schéma je libovolně konfigurovatelné. Využití přístroje je v rozváděcích a rozvodnách vn.

Vnitřní uzemňovač QZ pro jmenovitá napětí od 1 kV do 123 kV a krátkodobé výdržné proudy od 16 kA do 120 kA. Použité materiály jsou stejné jako u přepínače PQAK. Ovládání je provedeno s ručním nebo motorovým pohonem. Využívají se pro uzemnění elektrických obvodů, vybíjení kapacitorů nebo zbytkové kapacity vedení v rozváděcích a rozvodnách vn.

Vnitřní zkratovače QZR pro jmenovitá napětí od 1 kV do 25 kV a krátkodobé výdržné proudy od 16 kA do 100 kA. Použité materiály jsou stejné jako u přepínače PQAK. Jejich předností je mžikový pohyb hlavních kontaktů pro dosažení dostatečné zkratové schopnosti. Kinetická energie nakumulovaná v sestavách tlačných pružin je utlumena v rámu přístroje. Jejich využití je ve vstupních polích rozváděčů nebo rozvoden vn.

1.1.2 Odpínače

Odpínače, též nazývané jako přístroje prosté, jsou přístroje viditelně spínající obvod ve jmenovitém stavu. Vypínací schopnost je omezena na jmenovité proudy a všechny druhy nadproudů zvládají odpínače pouze přenášet. Oproti odpojovačům jsou kontakty odpínače hmotnější, protože při jejich činnosti dochází k opalování kontaktů. Snížení doby opalování se docílí rychlým pohybem kontaktů při zapnutí. Konstrukčně je odpínač

navržen tak, aby se pata oblouku při vypínání zatíženého obvodu pohybovala na jiných místech než při zapínání. [3]

Odpínače se dělí podobně jako odpojovače dle uložení (horizontální a vertikální), místa montáže (venkovní a vnitřní) a principu zhášení oblouku. Jejich vypínací schopnost je značně ovlivněna typem zátěže.

Druhy odpínačů v produktovém katalogu firmy IVEP, a.s. [2] jsou:

Vnitřní odpínače QDS pro jmenovitá napětí od 1 kV do 25 kV, jmenovité proudy od 100 A do 2 kA a krátkodobý výdržný proud od 16 kA do 40 kA. Jmenovitý vypínací proud při převážně činné zátěži je až 630 A. Konstruktivní nosné prvky jsou z válcovaných profilů a ocelových plechů s povrchovou ochranou proti korozi galvanickým pozinkováním. Elektrovodné díly jsou z elektrolytické mědi s postříbřením. Přítlačnou sílu do kontaktu zajišťují korozivzdorné tlačné pružiny. Proudovodná dráha je umístěna na izolátorech z epoxidové pryskyřice nebo porcelánu. Pohon odpínače je ruční nebo motorový s dálkovou signalizací stavu. Zhášení oblouku při zapínání i vypínání probíhá mžikově ve vypínací komoře NPAK 5. Oblouk je zhášen plynným médiem, které sublimuje působením tepla oblouku z tenké plastové destičky ve zhašecí komoře. Mezi jednotlivými póly jsou umístěny izolační desky, aby nedošlo k přeskoku mezi fázemi při hoření oblouku. Využití pro rozvodné skříně a vnitřní rozvody vn.

Venkovní odpínače CUB 2, CUB S2 a CUBZ (s uzemňovačem) pro jmenovitá napětí až 38,5 kV, jmenovité proudy od 400 A do 630 A a krátkodobý výdržný proud 20 kA. Jmenovitý vypínací proud při převážně činné zátěži je 630 A pro napětí až 25 kV a 400 A pro napětí vyšší. Flexibilní konstrukce CUB S2 umožňuje montáž rámu až na místě instalace s nastavitelnou pólovou roztečí. Pouze horizontální umístění. Použité materiály jsou stejné jako pro odpínač QDS. Splňuje izolační pevnost mezi fázemi bez použití dalších konstrukčních dílů. Ovládání ze země ručně nebo pohonem. Zhášení oblouku probíhá ve vypínací komoře z LEXANu 103 s výfukem, kde vlivem tepelné energie oblouku sublimuje zhašedlo, které je schopno při proudu 600 A až 50 vypnutí. Vlivem bezolejového vypínání je odpínače vhodný i pro oblasti s přísnými ekologickými požadavky. Využití pro vypínání distribučních transformátorů vn/nn a odboček venkovních vedení vn.

Venkovní odpínače CUB 3, CUB S3 a CUBZ (s uzemňovačem) jsou konstrukčně podobné k odpínačům CUB 2 s rozdílem možnosti instalace v horizontální i vertikální poloze.

Venkovní odpínače LEV a LEVZ (s uzemňovačem) pro jmenovitá napětí 12 kV a 25 kV, jmenovité proudy od 400 A do 630 A a krátkodobý výdržný proud 20 kA. Jmenovitý vypínací proud při převážně činné zátěži je 20 A. Použité materiály jsou stejné jako pro odpínač QDS. Ovládání ze země ručně. Odpínač není vybaven zhašecí komorou. Mžikové zhášení oblouku zajišťuje pomocný vypínací kontakt na pružině, který při pohybu do polohy vypnuto pohybuje velmi rychle a utrhne oblouk. Odpínač je vhodný

pro horizontální instalace do ekologicky nejpřísnějších oblastí, nedochází u něj vlivem mechanismu zhášení k úniku oleje ani plynu.

Venkovní odpínače FLE pro jmenovité napětí 25 kV, jmenovité proudy od 400 A do 630 A a krátkodobý výdržný proud 20 kA. Jmenovitý vypínací proud při převážně činné zátěži je 400 A nebo 630 A. Zhášení oblouku probíhá ve vypínací komoře NPAK 5, princip je stejný jako u odpínače *QDS*, kdy je oblouk zhášen působením plynů, které sublimují v komoře tepelným působením oblouku. Využití pro vypínání distribučních transformátorů vn/nn a odboček venkových vedení vn.

1.1.3 Rozváděče vn

Rozváděče jsou kompaktní přizpůsobitelné stavby určené k vývodu a rozvodu elektrické energie. Jejich vývody a přívody mohou být realizovány kabelem, pásovinou nebo zapouzdřenými vodiči. Vnitřní schéma zapojení rozváděče je plně modifikovatelné pro jednotlivé aplikace, rozváděč může být osazen odpojovači, odpínači, uzemňovači, vypínači a dalšími přístroji. Rozváděče mohou být také vybaveny přístroji pro měření jako jsou například měřicí transformátory proudu nebo Rogowského cívky, měřicí transformátory napětí nebo přetlaková a záblesková čidla, která vyhodnocují výskyt oblouku uvnitř rozváděče a dávají impuls nadřazené ochraně. Pro napájení měřících přístrojů, ochran a dálkového ovládání je typicky na stejné nosné konstrukci umístěn taktéž rozváděč nn.

V produktovém katalogu firmy IVEP, a.s. [2] jsou uvedeny tyto druhy rozváděčů:

Skříň vývodu vn generátorů pro jmenovitá napětí od 3 kV do 25 kV, jmenovité proudy od 50 A do 12 kA a krátkodobý výdržný proud od 50 kA do 150 kA. Skříň rozváděče lze vyrábět modulárně pro snazší dopravu a v místě instalace ji spojit. Rozváděč lze vybavit produktovou řadou IVEP nebo výrobky od renomovaných výrobců. Typické měřicí přístroje jsou měřicí transformátory proudu a napětí, přepětíová ochrana nebo měření částečných výbojů. Výkon lze vyvádět kabely, pásovinami nebo zapouzdřenými vodiči. Slouží k vyvedení elektrické energie generátoru do hlavních proudovodičů nebo k vytvoření uzlu na statoru generátoru. Typické aplikace jsou v paroplynových elektrárnách, vodních elektrárnách a pro zkratové generátory zkušeben.

Vnitřní generátorové rozváděče vn typu GSI, primární rozvod pro jmenovitá napětí od 3 kV do 36 kV, jmenovité proudy od 3150 A do 12 kA a krátkodobý výdržný proud od 50 kA do 150 kA. Skříň rozváděče je vzduchem izolovaná, skelet skříně je z ocelového plechu s práškovým lakováním nebo z nerezové oceli pro zvláštní podmínky (velmi vysoké proudy nebo chemický průmysl). Lze ji taktéž modulárně dopravovat. Výzboj a ověšení rozváděče je plně modifikovatelné jako u předcházejícího rozváděče. Vyvedení výkonu je možné kabely, pásovinami, zapouzdřenými vodiči nebo sběrnici. Slouží k vývodu elektrické energie od generátoru, případně transformátoru v primárním rozvodu. Typickou aplikací jsou prašné provozy jako ropný a chemický průmysl, papírny, ocelárny, cementárny nebo také elektrárny, rozvody a datová centra.

Venkovní generátorové rozváděče vn typu GSO, primární rozvod pro jmenovitá napětí od 3 kV do 36 kV, jmenovité proudy od 3150 A do 12 kA a krátkodobý výdržný proud od 50 kA do 150 kA. Velmi podobné provedení skříně rozváděče jako u typu GSI doplněné o stříšku. Výzbroj a ověšení rozváděče je typově stejné jako u Skříně vývodu vn generátorů. Výkon lze vyvést kabely, pásovinami, zapouzdřenými vodiči nebo sběrnicí. Slouží k vývodu elektrické energie od generátoru, případně transformátoru v primárním rozvodu. Vhodné pro instalace v místech s vysokou náročností klimatických podmínek nebo do míst s vysokou prašností jako ropný a chemický průmysl, papírný, ocelárny, cementárny nebo také elektrárny, rozvody a datová centra.

Rozváděče vn typu MVSI a MVSO, sekundární rozvod pro jmenovitá napětí od 3 kV do 36 kV, jmenovité proudy od 400 A do 2150 A a krátkodobý výdržný proud od 16 kA do 50 kA. Jsou to vzduchem izolované rozváděče určené pro vnitřní (MVSI) i vnější (MVSO) instalace. Jejich provedení a míra upravitelnosti na míru je srovnatelná se Skříní vývodu vn generátorů. Vzduchová izolace umožňuje použití v prašných prostorech a chemických procesech.

Přechodové rozváděče pro jmenovitá napětí od 1 kV do 36 kV, jmenovité proudy od 630 A do 8000 A a krátkodobý výdržný proud od 20 kA do 100 kA. Jsou určeny pro vnější i vnitřní aplikace. Přechodové rozváděče jsou dvou typů, CCO do 7,2 kV a PPE od 6 kV do 36 kV. Mohou být využity pro prodloužení kabelů, v místech krátkodobé instalace, přechodu z plastového na pryžový kabel a podobně nebo pro přechody mezi různými konfiguracemi poloh pásovin.

1.1.4 F.L.I.R.

V anglické literatuře označovaný zkratkou F.L.I.S.R., která znamená Fault Location, Isolation and Service Restoration (v překladu lokalizuje poruchu, izoluje ji a obnoví napájení pro části vedení bez poruchy). Použitím skupiny těchto přístrojů v důležitých bodech vedení napájeného z více stran se dosáhne přerušení dodávky jen ve velmi malém úseku, kde přetrvává porucha. Po odstranění poruchy přístroje opět obnoví původní topologii napájení sítě. Přístroje FLIR jsou vybaveny signalizačními a komunikačními prvky pro komunikaci s dispečinkem, která jejich stav může monitorovat a řídit ručně z velínu. Toto řešení je tedy vhodné například pro sítě okružní a uzlové, kde lze linku napájet z více bodů. [6]

IVEP, a.s. ve svém katalogu [2] nabízí dva přístroje:

F.L.I.R. IVEP ADD ON systém do sítí jmenovitého napětí 11, 22, 25, 38, 40,5 kV se jmenovitými proudy do 400 A. Zařízení lze instalovat na jakýkoliv spínací přístroj v distribuční soustavě. Skříně je z nerezové oceli, zařízení komunikuje pomocí GPRS/LTE, 3G, 4G nebo radia. Zařízení zajišťuje měření proudu, detekci napětí, měření a detekci poruch, určení směru události, vyhodnocování stavu sítě, predikci poruch, zápis dat a komunikaci s řídicím systémem

F.L.I.R. LM IVEP systém pro stejné napět'ové hladiny a dovolené proudy. Zkratka LM znamená line measurement (měření na vedení). Zařízení je jednopólové a instaluje se do série na vedení vysokého napětí.

1.1.5 Pohony spínacích přístrojů

Pohony slouží k zapínání a vypínání spínacích přístrojů, pohony jsou mechanismy uvádějící kontakty do pohybu. Konstrukce mechanismů jsou velmi různorodé, jejich provedení nejvíce závisí na použitém zdroji energie a principu činnosti. Dimenzování pohonů se řídí potřebnými velikostmi sil při zapínání, aby k sobě přitlačovaly kontakty, a při vypínání, aby se kontakty oddálily od sebe požadovanou rychlostí i navzdory setrvačné hmotnosti a odporu proti pohybu. [3]

Konstrukční části pohonů jsou poháněcí ústrojí (pohon), které vytváří hnací sílu nebo moment, převody a brzda (tlumič), která snižuje mechanické namáhání pohybujících se částí. Provedení mechanismu je závislé na kinematických požadavcích jako jsou například zdvih kontaktů, rychlost a charakter pohybu kontaktů. Mechanismus musí produkovat takové síly, aby byl schopen provést zapnutí a vypnutí nejen při provozních podmínkách, ale taky při zkratu, kdy se výrazně projeví elektrodynamické síly. [3]

Literatura [3] rozděluje pohony podle:

1. druhu pohonu na ruční a strojní,
2. předávání energie na přímé a nepřímé.

Síla vyvozovaná ručními a strojními pohony může být kontaktní soustavě předávána přímo nebo pomocí převodové soustavy. Energie nepřímého pohonu se nejprve předává akumulárnímu členu, který následně vykonává sekvenci zapnutí a vypnutí. V akumulárním musí být nastrádána taková energie, aby se na popud automatických ochranných nebo obsluhy provedla operace O-C-O (open-close-open). [3]

IVEP, a.s. ve svém katalogu [2] nabízí pohony pro ovládání vn přístrojů:

1. elektromotorové pohony pro venkovní instalace typu *SUP*, *SUP-A*, *SUP-DO* a *SUP-DOF*,
2. elektromotorové pohony pro vnitřní instalace typu *SP-CB*, *HF* a *SPT-CB*, *HF*,
3. ruční pohon pro venkovní přístroje typu *RPV*,
4. ruční pohon pro vnitřní přístroje typu *RPP-CB*, *HF* a *RPU*.

1.1.6 Izolátory

Izolátor je elektrotechnickou součástí, jejíž hlavním účelem je elektricky oddělit konstrukční části elektrických zařízení o rozdílných potenciálech a taktéž přenášet mechanické síly mezi konstrukčními částmi. Konstrukce a použité materiály na výrobu izolátorů se odvíjejí od jeho použití a prostředí instalace. Rozměry a počet sukýnek izolátorů narůstají se zvyšujícím se rozdílem potenciálů. Povrchová dráha musí být dostatečně velká, aby elektrická pevnost byla větší než přiložené průrazné napětí. Elektrická pevnost izolátorů klesá se stářím izolátoru, s množstvím nečistot na izolátoru

a vlhkostí prostředí. [4]

Izolátory podle literatury [4] se dělí podle způsobu uchycení na:

1. *podpěrné*, které jsou namáhány tahem a tíhou vodiče,
2. *závěsné*, které jsou namáhány jen tahem vodiče,
3. *průchodkové*, které vytvářejí izolovanou dráhu pro vodič polem o jiném potenciálu.

Druhy izolátorů a jejich specifikace z katalogu [2] jsou v tabulkách 1.1 a 1.2.

Tabulka 1.1 Typy linkových tahových kompozitních izolátorů

Druh izolátorů		TENAX FXB-24/70-1	TENAX FXB-24/70-2	TENAX FXB- 24/70-xxx
jmenovité napětí	(kV)	25	25	25
materiál	(-)	silikon	silikon	silikon
povrchová izolační dráha	(mm)	650	391	391;613
Pevnost v tahu	(kN)	70	70	70
Pevnost v krutu	N/m	50	50	50
Jmenovité výdržné napětí při atmosférickém impulsu 1,2/50 μ s	(kV)	171	126	126;171
Jmenovité jednominutové krátkodobé výdržné střídavé napětí průmyslového kmitočtu za sucha a za deště	(kV)	87	57	57;87

Tabulka 1.2 Typy podpěrných kompozitních izolátorů

Druh izolátorů		FAVEO FZY4-12/8	FAVEO CBSZ2-24-00	FAVEO FZY 3-25-4	FAVEO FZY2-35/4
jmenovité napětí	(kV)	12	25	25	36
materiál	(-)	silikon	silikon	silikon	silikon
povrchová izolační dráha	(mm)	372	645	775	950
Pevnost v tahu	(kN)	25	25	25	25
Pevnost v ohybu	(kN)	8	4	4	4
Jmenovité výdržné napětí při atmosférickém impulsu 1,2/50 μ s	(kV)	90	125	170	230
Jmenovité jednominutové krátkodobé výdržné střídavé napětí průmyslového kmitočtu za sucha a za deště	(kV)	50	50	90	95

1.1.7 Zapouzdřené vodiče

Zapouzdřené vodiče využívají elektronegativních vlastností plynu SF₆. Tento plyn je chemicky inertní, nehořlavý a nekorozivní, je výrazně těžší než vzduch a má výborné tepelné a elektrické izolační vlastnosti. Fluorid sírový je skleníkovým plynem. Ekvivalentem 1 kg SF₆ je 25200 kg CO₂, proto Rada Evropské unie vydala rozhodnutí o zákazu výroby vn přístrojů od roku 2031. SF₆ umožňuje snížit izolační vzdálenosti mezi

jednotlivými fázemi na jednotky centimetrů, což vede ke značné minimalizaci plochy rozvodu a vývodů výkonů z generátorů. Celková zastavěná plocha je několikanásobně menší za vyšší pořizování náklady. [5]

V katalogu [2] IVEP, a.s. nabízí jeden typ zapouzdřených vodičů, a to *Zaústění kabelů s plynem SF₆ pro transformátory 110 kV*. Zaústění kabelu je jednopólové pro venkovní instalace a je navrženo pro jmenovité napětí 123 kV, jmenovitý proud 630 A a jmenovitý krátkodobý proud 25 kA. Zaústění je chráněno průtržnou kovovou membránou, která zabezpečuje odvod plynu. Životnost elektrického zařízení je 40 let s deklarovaným únikem SF₆ od výrobce menším než 1 % za rok.

1.1.8 Dekády a zkušební zařízení

Odporové dekády jsou pasivním prvkem obvodu, požadovanou hodnotu odporu lze nastavit vhodným sérioparalelním spojením jednotlivých sekcí odporníku. Lze je využít jako pomocné odporníky ke zhášecím tlumivkám, spouštěče a brzdové odporníky, zemní odporníky, zatěžovací odporníky, odporníky pro trakční soustavu nebo jak odporníky ve zkušebnách a zkratovnách, kde slouží k nastavení požadované obálky napětí při zkouškách.

Indukční dekády jsou pasivním prvkem obvodu, požadovanou hodnotu odporu lze nastavit vhodným sériovým spojením jednotlivých sekcí tlumivky. Používají se k omezení velikosti a strmosti nárůstu elektrického proudu nebo jako nastavitelná indukčnost pro zkušebny a zkratovny

Katalog [2] nabízí následující vybavení:

Jednopólové odporníky nn a vn, odporová část je tvořena vylišovanými plechy z materiálu ALKRAL-K, které jsou meandrovitě tvarovány a uchyceny v izolačním držáku. Izolační držáky jsou upevněny na ocelovém rámu a měděné vývody odporů jsou pájeny stříbrem pro lepší vodivost. Pro sérioparalelní připojení jednotlivých odporů slouží sady propojek, které se montují šroubovými spoji.

Jednopólové vzduchové tlumivky nn a vn, cívky se vzduchovým jádrem jsou navinuty měděným vodičem různého průřezu se smaltovou izolací. Cívky jsou po navinutí zpevněny skelnou páskou a zalakovány. Reaktor obsahuje 21 cívek s různou indukci, jejich konce jsou vyvedeny na izolační rozvodnou desku. Na desce je 80 uzlů, ve kterých je možno zapojovat jednotlivé cívky do série.

VN přepínač odboček transformátoru musí přepínat bez zatížení. Provedení přepínače je variabilní pro různý počet odboček a pro zapojení vývodů transformátoru (hvězda, trojúhelník, lomená hvězda). Zařízení je vyráběno na konkrétní typ transformátoru.

Zkušební zkratová stolice ZSI 800 a ZSI 2000, zařízení sloužící pro upevnění a ovládání zkoušeného nn přístroje při zkratových, oteplovacích a provozních zkouškách. Stolice je ve čtyřpólovém provedení. Na hliníkovém rámu je upevněna sklotextitová deska s přívodními pasovinami, které jsou podle typu stolice dimenzovány na jmenovitý

krátkodobý proud (40 kA/1s, 150 kA/0,2s) a jmenovitý dynamický proud (100 kA, 375kA).

1.2 Typové zkoušky na zkušebně

Druhy zkoušek prováděné na místní zkušebně jsou děleny do několika kategorií podle literatury [2] na:

1. ověřování rozváděčů včetně typové zkoušky podle ČSN EN 60439-1,
2. dílčí a typové zkoušky rozváděčů nn, kompenzačních rozváděčů, rozvodnic, staveništních rozváděčů a kabelových rozvodných,
3. stanovení oteplení rozváděče extrapolací dle ČSN IEC 890+A1,
4. napěťové zkoušky vysokonapěťových zařízení a spínacích přístrojů, impulsní napětí do 1,2 MV, střídavé napětí do 500 kV/50-200 Hz, stejnosměrné napětí do 50 kV,
5. výkonové – zkratové zkoušky el. Zařízení,
6. zkoušky mechanické a elektrické trvanlivosti přístrojů nn,
7. seizmické zkoušky a zkoušky odolnosti proti vibracím a pádům,
8. úřední ověřování přístrojových transformátorů,
9. zkoušení pracovních pomůcek pro elektrotechniku,
10. konzultační a poradenská činnost při výrobě a zkoušení rozváděčů.

2. NORMY PRO VYSOKONAPĚŤOVÁ SPÍNACÍ A ŘÍDÍCÍ ZAŘÍZENÍ

Následující podkapitoly vycházejí z norem ČSN EN 62271-1 ed.2 Vysokonapěťová spínací a řídicí zařízení – Část 1: Společná ustanovení pro spínací a řídicí zařízení střídavého proudu [7] a ČSN EN 62271-102 ed.2 Vysokonapěťová spínací a řídicí zařízení – Část 102: Odpojovače a uzemňovače střídavého proudu [8]. Dodržování norem není ustanoveno zákonem, normy jsou souborem doporučení, kterými by se konstruktér potažmo výrobce měl řídit.

Normy pro odpojovače popisují termíny a definice spínacích přístrojů a jejich provozních charakteristik, pracovní podmínky, jmenovité hodnoty, konstrukci a provedení, typové zkoušky, výrobní kusové zkoušky, volby nominálních parametrů, doporučené informace a parametry v nabídkách, přepravu, skladování, montáž a definují podmínky bezpečnosti odpojovače. Z norem jsou vybrány pouze určité statě týkající se venkovního odpojovače KBE a oteplovací zkoušky.

2.1 Normální a zvláštní pracovní podmínky

Odpojovače, jejich pohony a pomocná zařízení jsou určeny k použití při jmenovitých hodnotách a při normálních pracovních podmínkách, pokud není definováno jinak.

2.1.1 Normální pracovní podmínky pro spínací a řídicí zařízení venkovního provedení

Normální pracovní podmínky jsou definovány následujícími hodnotami parametrů prostředí. Teplota okolního vzduchu je v rozmezí od -25 °C do 40 °C a její průměr za 24 hodin nepřesáhne hodnotu 35 °C . Hustota výkonu slunečního záření působící na přístroj nepřekročí 1000 W/m^2 a přístroj bude instalován v nadmořské výšce nepřesahující 1000 m nad mořem. Maximální tloušťka námrazy nesmí být větší než 20 mm a rychlost větru v místě instalace nepřekračuje 34 ms^{-1} . Okolní vzduch může být znečištěn a znečištění nepřesáhne stupeň znečištění střední na místě užití dle normy. Průměrná relativní vlhkost vzduchu za 24 hodin nepřekročí 95% a průměrná hodnota tlaku vodní páry nepřesáhne $2,2\text{ kPa}$. Po dobu jednoho měsíce nevzroste průměrná relativní vlhkost na 90% a průměrná hodnota tlaku vodní páry nepřesáhne $1,8\text{ kPa}$. Vibrace způsobené vnějšími vlivy nebo zemětřesení nepřekročí vibrace způsobené činností samotného zařízení.

2.1.2 Zvláštní pracovní podmínky pro spínací a řídicí zařízení venkovního provedení

Jestliže bude zařízení používáno v podmínkách jiných než normálních pracovních podmínkách definovaných v kapitole 2.1.1, mají požadavky uživatele pro výrobce

obsahovat údaje o zvláštních podmínkách.

Izolační výdržná hladina pro nadmořské výšky nad 1000 m nad mořem musí být větší než jmenovitá. Těžký nebo velmi těžký stupeň znečištění dle normy snižuje izolační vlastnosti vzduchu a musí se přizpůsobit údržba a izolační vzdálenosti přístroje. Teplota okolního vzduchu se může pohybovat od $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $55\text{ }^{\circ}\text{C}$. Uživatel musí definovat polohu instalace přístroje v jiné poloze, než na kterou je přístroj navrhnut, pokud hrozí riziko zemětřesení musí být uživatelem specifikovány provozní požadavky a dovolené hladiny poškození. Uživatel musí definovat místa s neobvyklými druhy vibrací, jako jsou například místa instalace v blízkosti důlních odstřelů.

2.2 Jmenovité hodnoty

Jmenovité hodnoty jsou nutné pro správnou volbu přístroje a jeho funkci v síti. Mezi vybrané jmenovité hodnoty odpojovačů se řadí:

1. *jmenovité napětí* U_r je efektivní hodnota sdruženého napětí odpovídající nejvyšší hodnotě napětí sítě, na kterou je zařízení určeno,
2. *jmenovité krátkodobé střídavé výdržné napětí průmyslového kmitočtu* U_d je efektivní hodnota napětí, odpovídající nejvyšší hodnotě průmyslového napětí působícího po jednu minutu bez poškození přístroje,
3. *jmenovité výdržné napětí při atmosférickém impulsu* U_p je vrcholová hodnota napětí, které nezpůsobí přeskok mezi kontakty přístroje. Doba čela impulsu je $1,2\text{ }\mu\text{s}$ a doba půltýlu je $50\text{ }\mu\text{s}$,
4. *jmenovitý proud* I_r je efektivní hodnota proudu, kterou může přístroj trvale přenášet za předepsaných provozních podmínek definovaných v kapitole 2.1.,
5. *jmenovitý krátkodobý výdržný proud* I_k je efektivní hodnota proudu, kterou může přístroj přenášet v zapnuté poloze po stanovenou dobu za provozních podmínek,
6. *jmenovitá doba trvání zkratu* t_k je doba, po kterou je přístroj schopen přenášet proud roven jmenovitému krátkodobému výdržnému proudu I_k , typicky 1 s nebo 3 s,
7. *jmenovitý dynamický výdržný proud* I_p je vrcholová hodnota první velké půlvlny jmenovitého zkratového výdržného proudu, který přístroj snese bez poškození v zapnuté poloze za provozních podmínek. V sítích 50 Hz je maximální hodnota jmenovitého dynamického výdržného proudu I_p rovna 2,5násobku jmenovitého krátkodobého výdržného proudu I_k .

2.3 Typové zkoušky

Typové zkoušky slouží k prověření jmenovitých a charakteristických hodnot spínacích přístrojů, jejich řídicích zařízení a pohonů. Každá typová zkouška musí být provedena na zkoušeném objektu s plnou výzbrojí v provozních podmínkách. Charakteristiky

odpojovače musí být ověřeny ve správných podmínkách montáže (např. v plynech izolovaných rozváděčích) a užití se všemi součástmi, které mohou ovlivnit jejich funkci (spoje, podpěry, větrací zařízení, atd.).

Výsledky typových zkoušek jsou zaznamenávány do protokolů o typových zkouškách. Protokoly obsahují informace o shodě naměřených a jmenovitých hodnot v rámci jednotlivých zkoušek a informace potřebné k identifikaci hlavní části přístroje, důležité jsou zejména tyto informace:

1. výrobce,
2. typ a výrobní číslo zkoušeného spínacího a řídicího zařízení,
3. jmenovité charakteristiky zkoušeného objektu předepsané v příslušných normách IEC,
4. obecný popis zkoušeného objektu včetně počtu pólů,
5. výrobce, typ, výrobní čísla a jmenovité hodnoty základních částí, které přicházejí v úvahu (např. pohony, zhášedla),
6. obecné údaje o rámu spínacího přístroje nebo rozváděče, jehož nedílnou součástí je spínací přístroj,
7. podrobné údaje o pohonech použitých při zkouškách,
8. fotografická dokumentace znázorňující stav spínacího a řídicího zařízení před a po zkoušce,
9. výkresy a soubory dat popisující zkoušený objekt,
10. seznam čísel všech předložených výkresů, včetně čísel změn pro identifikaci hlavních částí zkoušeného objektu,
11. prohlášení, že zkoušený objekt odpovídá předloženým výkresům,
12. podrobný popis zkoušeného zařízení (vč. Schématu zkušebního obvodu),
13. záznamy o chování zkušebního objektu během zkoušek, jeho stav po zkouškách a záznam o prováděných změnách nebo úpravách během zkoušek,
14. záznam o neúplných průrazných výbojích během obnovování zotaveného napětí,
15. záznamy zkušebních hodnot během zkoušky nebo zkušebního sledu,
16. místo a název laboratoře, kde byly zkoušky prováděny.

Druhy typových zkoušek prováděných na odpojovačích a uzemňovačích:

1. zkoušky elektrické pevnosti izolace,
2. zkoušky rádiového rušení (RIV),
3. měření rezistence,
4. zkoušky trvalým proudem,
5. zkoušky krátkodobým výdržným a dynamickým výdržným proudem,
6. ověření stupně ochrany krytem,
7. zkouška těsnosti,
8. zkoušky elektromagnetické kompatibility (EMC),
9. doplňující zkoušky pomocných a řídicích obvodů,
10. zkouška rentgenového záření pro vakuová zhášedla,

11. zkouška na ověření zkratové zapínací schopnosti uzemňovačů,
12. zkoušky funkce a mechanické trvanlivosti,
13. funkce v obtížných podmínkách ledu a námrazy,
14. zkoušky při nízkých a vysokých teplotách,
15. zkoušky pro ověření správné funkce ukazatele polohy,
16. zkoušky spínání indukovaného proudu u uzemňovačů,
17. zkoušky spínání nezatížených přípojnic u odpojovačů.

2.3.1 Zkoušky trvalým proudem

Zkouška trvalým proudem, takzvaně oteplovací zkouška, se provádí na zkoušeném objektu s čistými kontakty. V uzavřené místnosti, kde se provádí zkouška, nedochází k proudění vzduchu kromě proudění, které je vyvoláno teplem zkoušeného objektu. Podmínka je považována za splněnou, pokud rychlost vzduchu v místnosti nepřesahuje $0,5 \text{ ms}^{-1}$.

Zkoušený objekt a jeho příslušenství se instaluje v nejnepříznivější poloze pro oteplovací zkoušku, pro kterou je přístroj navržen. Zkoušený objekt s příslušenstvím je sestaven do takového stavu, ve kterém by se nacházel v provozu, včetně všech krytů spínacího a řídicího zařízení. Zvenčí musí být zařízení chráněno proti nadměrnému oteplení nebo ochlazení. Zkouška probíhá na trojpolových spínacích a řídicích zařízeních, pokud není možné vliv ostatních pólů na výsledné oteplení zanedbat. Póly zařízení do 1250 A se mohou propojit do série. Dočasné připojení k hlavnímu obvodu musí být provedeno tak, aby během zkoušky nedocházelo k nadměrnému odvodu nebo přívodu tepla ze zkoušeného objektu nebo do něj.

Zkouška hlavního obvodu se provede při jmenovitém trvalém proudu I_r spínacího a řídicího zařízení, který musí mít prakticky sinusový průběh. Norma připouští podíl efektivních hodnot vyšších harmonických proudu pod 5 % oproti první harmonické. Průběh kmitočtu proudu se během zkoušky zaznamenává a nesmí překročit $\frac{+2}{-5} \%$ jmenovitého kmitočtu. Přístroje navržené pro provoz na 50 Hz a 60 Hz, mohou být zkoušeny jen při 50 Hz, pokud výsledné teploty nepřesáhnou 95 % nejvyšších dovolených hodnot. Zkouška musí probíhat až do dosažení ustálené (kvaziustálené) teploty. Za ustálenou teplotu je považován takový stav, kdy nárůst oteplení nepřesáhne 1 K za 1 hodinu. Tato podmínka je obvykle splněna při délce zkoušky trvající pětinásobku tepelné časové konstanty zkoušeného objektu.

Při zkoušce se zaznamenává průměrná teplota okolního vzduchu obklopující zkoušený objekt, teplota je měřena alespoň třemi teploměry, termoelektrickými články nebo jinými zařízeními rozmístěnými rovnoměrně kolem spínacího přístroje v úrovni průměrné výšky proudovodné dráhy, a to ve vzdálenosti 1 m od zkoušeného objektu. Během poslední čtvrtiny zkoušky nesmí změna teploty okolního vzduchu přesáhnout 1 K za 1 hodinu, pokud se v průběhu zkoušky prohybuje teplota v rozmezí od $10 \text{ }^\circ\text{C}$ do $40 \text{ }^\circ\text{C}$, tak není třeba provádět korekci oteplení.

Teplota různých částí zkoušeného objektu, pro které jsou předepsány mezní teploty, se měří pomocí teploměrů nebo termoelektrických článků vhodných typů, umístěných v přístupných nejteplejších místech. Podmínky pro měření teploměry nebo termoelektrickými články jsou:

1. baňky teploměrů nebo teplé konce termoelektrických článků musí být chráněny proti vnějšímu ochlazení. Plocha chráněné části musí být zanedbatelná ve srovnání s povrchem zkoušeného přístroje,
2. zajištění dobré tepelné vodivosti mezi měřeným místem přístroje a teploměrem nebo termoelektrickým článkem,
3. pro měření teploty ve okolí střídavého magnetického pole kapalinovými teploměry je doporučeno použít lihové teploměry, které nepodléhají vlivu měnícího se magnetického pole do takové míry jako rtuťové.

Pokud je dílčím cílem zkoušky stanovit tepelnou časovou konstantu, musí proběhnout dostatečné množství měření v intervalech kratších 30 minut. Teplota se musí být měřena i na svorkách hlavního obvodu a na dočasných spojích ve vzdálenosti 1 m od svorek, rozdíl oteplení v těchto dvou místech nesmí překročit 5 K.

Před zkouškou trvalým proudem se musí provést měření rezistence hlavního obvodu zkoušeného objektu při teplotě okolí. Hodnota rezistance se porovnává s rezistancí po oteplovací zkoušce a jiných typových zkouškách

Zkoušený objekt vyhověl, pokud oteplení částí zkoušeného objektu nepřesáhne mezní hodnoty předepsané v tabulce 2.1, kde je oteplení vztaženo vůči nejvyšší teplotě okolního vzduchu 40 °C.

Tabulka 2.1 Mezní teploty a oteplení pro vybrané materiály vysokonapěťových spínacích zařízení v prostředí s oxidačními plyny

Část, materiál, izolace		Nejvyšší hodnota	
		Teplota (°C)	Oteplení (K)
Kontakty z mědi postříbřené		115	75
Šroubová nebo ekvivalentní měděná spojení postříbřené		115	75
Šroubové přívodní svorky postříbřené		115	75
Izolanty a kovové části ve styku s izolanty	Y	90	50
	A	105	65
	E	120	80
	B	130	90
	F	155	115
Přístupné povrchy	Předpokládaný styk	55	15
	Předpokládaný dotyk	65	25
	Nepředpokládaný dotyk	80	40

2.4 Výrobní kusové zkoušky

Pomocí těchto zkoušek jsou zjišťovány vady výroby nebo materiálu. Výrobní kusové zkoušky se provádějí přednostně ve výrobním podniku na každém vyrobeném přístroji a nesmějí zhoršit vlastnosti ani spolehlivost zkoušeného objektu. Není-li spínací a řídicí část přístroje zkompletována před přepravou, musí se provádět zkouška na všech přepravních dílcích. O výsledku zkoušek není potřeba vypracovávat protokol, pokud se výrobce a uživatel nedohodnou jinak.

Výrobní kusové zkoušky pro odpojovače a uzemňovače zahrnují:

1. zkoušku elektrické pevnosti izolace hlavního obvodu,
2. zkoušky řídicích a pomocných obvodů,
3. měření rezistance hlavního obvodu,
4. zkoušku těsnosti,
5. kontrolu dokumentace a vizuální prohlídku,
6. zkoušky mechanické funkce,
7. ověření funkce uzemnění.

3. TEPELNÉ ÚČINKY ELEKTRICKÉHO PROUDU

Procházející proud spínacím přístrojem vytváří v každém okamžiku tepelné ztráty (Jouleovy ztráty), které oteplují proudovodnou dráhu a svoje okolí. Tyto ztráty musí být v dostatečné míře odváděny s ohledem na bezpečný a spolehlivý provoz, aby nedošlo k nevratnému snížení elektrické nebo mechanické pevnosti vodičů a izolantů. Podkladem pro následující kapitoly je literatura [3].

3.1 Oteplení proudovodiče

Protéká-li elementem vodiče o odporu R elektrický proud I , pak v něm každém okamžiku dt vznikají tepelné ztráty dQ . Tepelné ztráty se dělí na teplo odvedené povrchem elementu vodiče dQ_o a na teplo v elementu vodiče spotřebované na zvýšení jeho teploty dQ_s .

$$dQ = dQ_o + dQ_s \quad (1)$$

,kde dQ (J) Jouleovo teplo v elementu vodiče,
 dQ_o (J) teplo odvedené povrchem elementu vodiče,
 dQ_s (J) teplo spotřebované na zvýšení teploty elementu vodiče.

Vnikající tepelné ztráty jsou rovny v každém okamžiku Jouleovým ztrátám. Velikost odvedeného tepla je závislá na povrchu vodiče, okamžitém oteplení a součiniteli přestupu tepla α_o , který udává množství tepla za sekundu, které prostoupí povrchem vodiče při rozdílu teplot povrchu a okolí o 1 K. Teplo spotřebované zvyšuje teplotu vodiče o $d\vartheta$ a je úměrné objemu vodiče a objemové tepelné kapacitě c , která vyjadřuje množství dodaného tepla za sekundu jednotce objemu, aby se jeho teplota navýšila o 1 K.

$$RI^2 dt = \alpha_o A \Delta\vartheta dt + cV d\vartheta \quad (2)$$

, kde R (Ω) elektrický odpor,
 I (A) elektrický proud,
 α_o ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$) součinitel přestupu tepla,
 A (m^2) povrch proudovodiče,
 c ($\text{Wm}^{-3}\text{K}^{-1}$) objemová tepelná kapacita,
 V (m^3) objem proudovodiče.

Řešením diferenciální rovnice (2) je vztah pro okamžité oteplení proudovodiče, který má exponenciální charakter.

$$\Delta\vartheta(t) = \Delta\vartheta_m \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (3)$$

, kde $\Delta\vartheta(t)$ (K) okamžité oteplení,
 $\Delta\vartheta_m$ (K) ustálené (maximální) oteplení,

t (s) čas průchodu proudu,
 τ (s) časová konstanta.

Ustáleného oteplení $\Delta\vartheta_m$ dosáhne vodič za podmínky, kdy veškeré teplo vznikající v proudovodiči je celé odváděno povrchem a není žádné akumulováno ve vodiči.

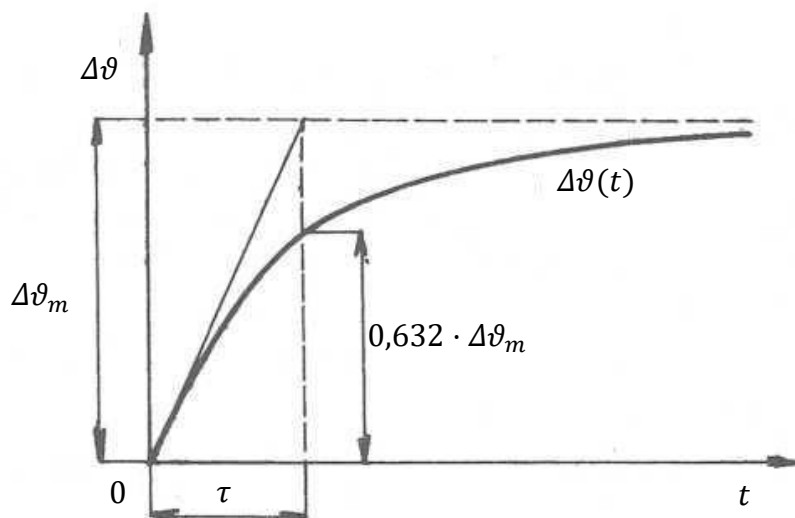
$$\Delta\vartheta_m = \frac{RI^2}{\alpha_0 A} \quad (4)$$

Časová konstanta τ představuje čas, za který by vodič dosáhl ustáleného oteplení, kdyby se veškeré teplo spotřebovalo na zvyšování jeho teploty a žádné by nepřestupovalo jeho povrchem do okolí.

$$\tau = \frac{cV}{\alpha_0 A} \quad (5)$$

Pro zajištění bezpečného a spolehlivého provozu zařízení, nesmí ustálené oteplení každé jeho části překročit dovolené ustálené oteplení daného materiálu při trvalém chodu. Největší teplo typicky vzniká v kontaktním styku a na přívodních svorkách, nejméně tepelně odolné bývají izolanty.

Na obrázku 3.1 je vyobrazen obecný průběh oteplení proudovodiče podle rovnice (3) s vyznačenými charakteristickými hodnotami.



Obrázek 3.1 Obecný průběh oteplení proudovodiče

3.2 Odpor vodiče

Pro výpočet tepelných ztrát ve vodiči je nutné kromě velikosti protékajícího proudu taktéž znát velikost odporu vodiče. Pokud je proud ve vodiči o konstantním

průřezu S rovnoměrně rozložen v celé délce l , je odpor vodiče závislého na teplotě roven:

$$R_{\vartheta} = \rho_{\vartheta} \cdot \frac{l}{S} = \rho_{ref} \cdot (1 + \alpha \Delta\vartheta) \cdot \frac{l}{S} \quad (6)$$

, kde	$R_{\vartheta} (\Omega)$	odpor vodiče při teplotě ϑ ,
	$\rho_{\vartheta} (\Omega\text{mm}^2\text{m}^{-1})$	rezistivita při teplotě ϑ ,
	$\rho_{ref} (\Omega\text{mm}^2\text{m}^{-1})$	rezistivita při referenční teplotě,
	$\alpha (\text{K}^{-1})$	teplotní součinitel odporu,
	$\Delta\vartheta (\text{K})$	oteplení oproti referenční teplotě,
	$l (\text{m})$	délka vodiče,
	$S (\text{mm}^2)$	průřez vodiče.

Rezistivity udávané v tabulkách jsou z pravidla vztažené na teplotu okolí 20 °C, při výpočtu ustáleného oteplení je výhodnější počítat s rezistivitou vztaženou k nejvyšší možné teplotě okolí za normálních pracovních podmínek (tj. 40 °C). Teplotní součinitel odporu α je stejně jako rezistivita závislý na teplotě a udává poměrný přírůstek odporu při zvýšení teploty o 1 K oproti referenční teplotě.

Při průchodu střídavého proudu vodičem se kromě výše zmíněných vlivů projeví za určitých okolností skin efekt a jev blízkosti. Důsledkem skin efektu je nerovnoměrné rozložení proudové hustoty střídavého proudu v průřezu vodiče vlivem pronikání vlastního magnetického pole vodiče z okolí vodiče dovnitř. Vlivem skin efektu se snižuje účinný průřez vodiče a tím roste jeho odpor. Zvětšení odporu povrchovým jevem (skin efektem) je zohledňováno činitelem povrchového zhuštění k_p , který je větší než 1. Tento činitel se v praxi zanedbává do velikosti procházejícího proudu 200 A, protože do této hodnoty proudu je přírůstem odporu vlivem skin efektu zanedbatelný. [9]

Jev blízkosti popisuje pronikání cizích magnetických polí vodiče v okolním prostředí do vodiče, ve kterém podobně jako povrchový jev způsobuje nerovnoměrné rozložení proudové hustoty střídavého proudu v průřezech blízkých vodičů. Jev blízkosti vede ke zvýšení odporu ve vodiči a je popisován činitelem blízkosti k_{bl} , který je větší než 1. Tento jev se projevuje u vodičů s průřezem odpovídajícími proudům větším než 200 A a jejich osová vzdálenost je menší než rozměr vodičů v rovině osy. [9]

Určení činitelů k_p a k_{bl} je analyticky velice náročné a jejich hodnoty lze získat z grafů, které jsou získány složitými výpočty ověřenými experimenty. Odpor vodiče protékajícího střídavým proudem se při uvažování obou činitelů rovná:

$$R_{\vartheta} = \rho_{ref} \cdot (1 + \alpha \Delta\vartheta) \cdot \frac{l}{S} \cdot k_s \cdot k_{bl} \quad (7)$$

, kde	$k_p (-)$	činitel skinefektu,
	$k_{bl} (-)$	činitel blízkosti.

3.3 Princip tepelné sítě

Následující podkapitoly vycházejí z literatury [3].

Konstrukci každého spínacího přístroje si lze rozdělit na soubor dílčích těles, z nichž jen v některých vzniká teplo. Vnikající teplo následně proudí od místa vzniku do sousedních těles, přes která se předává do prostoru. Rozhraní mezi tělesem a vnější atmosférou se nazývá ochlazovací povrch. Teplo se předává i v průběhu proudění, kdy část tepla uniká povrchem částí do prostoru. Výpočet oteplení dílčích těles je obtížný, protože se v přístroji vytváří řada tepelných toků, které se různě dělí a rozvětvují.

Metoda vhodná pro řešení oteplení nejen přístrojů je metoda tepelných obvodů, ve které se využívá analogických postupů z elektrických obvodů. Každé dílčí těleso lze popsat individuálním tepelným schématem, které se následně dle konkrétní konstrukce zařízení řetězí do tepelné sítě.

V případě přístrojů na vyšší napětí, bývají proudovodné dráhy jednotlivých fází odděleny takovou vrstvou vzduchu, že se vzájemně tepelně neovlivňují. Pro popis oteplení takové přístroje stačí vyřešit oteplení pouze jednoho pólu, výsledná tepelná síť má podobu jednořadové tepelné sítě. Pokud by se póly vzájemně tepelně ovlivňovaly, je nutné vyřešit oteplení pro střední pól, který bude nejvíce tepelně namáhám.

3.4 Náhradní tepelná schémata

Tepelná síť elektrických přístrojů může být tvořena pomocí osmi náhradních tepelných schémat, která nahrazují prvky:

Tyče beze ztrát o konstantním průřezu nejsou protékány proudem a lze je nahradit π -článkem složeným z longitudinálního (podélného) tepelného odporu R_{gTl} a dvou transverzálních (příčných) tepelných odporů R_{gTr} , které končí oteplením $\Delta\theta_{\infty}$ 0 K a jejich prostřednictvím se odvádí teplo. Pro tepelně dlouhé tyče beze ztrát lze π -článek zredukovat na vstupní příčný odpor, protože se všechn tepelný tok předá povrchem do okolí.

Tyče beze ztrát s mírně proměnlivým průřezem nejsou protékány proudem. Podle strmosti změny průřezu se rozdělí na více dílčích tyčí konstantního průřezu a každá dílčí tyč se nahradí π -článkem.

Tyče beze ztrát konstantního průřezu, ze kterých se veškeré vstupující teplo předává povrchem do ovzduší reprezentují chladicí díly (žebra) a jsou nahrazeny příčným odporem s konečným oteplením 0 K.

Tyče se ztrátami o konstantním průřezu jsou protékány proudem a opět se nahrazují π -článkem. Oteplení vnějších konců příčných odporů je nenulové a fiktivní pro výpočet schématu. Pokud oteplení vnějších konců příčných odporů bude větší než oteplení hlavní větve, tak teplo z proudovodné dráhy neodchází a chlazení vlastního dílce je nedostatečné. Přebytkové teplo přestupuje do sousedních dílců s lepším chlazením

a prostřednictvím nich odvádí se do okolí. Tepelně dlouhé tyče lze opět zjednodušit na příčný odpor.

Tyče se ztrátami s mírně proměnlivým průřezem jsou protékány proudem a nahrazují se stejně jako tyče beze ztrát s mírně proměnlivých průřezem.

Kovové těleso neurčitého tvaru se ztrátami i beze ztrát, neuvažuje se u něj podélný odpor. Těleso se ztrátami je nahrazeno v příslušném uzlu tepelným vtokem (tokem) a příčným odporem končícím oteplením 0 K . Těleso beze ztrát se nahrazuje pouze příčným odporem

Kontaktní styk je místem, kde vzniká velké teplo bez uvažování chladícího povrchu. Podélný odpor je nezanedbatelný a do náhradního schématu je kontaktní styk nahrazen přímým vtokem jedné poloviny ztrát do každého z obou konců podélného odporu.

Přívody se velkou měrou podílejí na odvodu tepla a tím i na chlazení celého přístroje. Přestože nejsou součástí přístroje, tak se připojují k jeho svorkám a musí se jejich tepelný vliv zahrnout do schématu. Náhradní schéma lze zredukovat na odpor s příčnou větví na jejímž konci je reálné oteplení přívodu v dostatečné vzdálenosti od svorky přístroje. V tomto případě je velikost oteplení přívodu reálným oteplením.

3.5 Metoda třetí hodnoty

Sestavenou jednořadovou tepelnou síť lze řešit ekvivalentně jako elektrické obvody. Základem řešení je použití analogie prvního Kirchhoffova zákona, podle něž je součet tepelných toků Φ v uzlu roven nule. Neznámou veličinou je oteplení uzlu $\Delta\theta$, pro n uzlů lze napsat n uzlových rovnic. Tepelnou síť, lze tedy řešit metodou soustavy rovnic nebo metodou třetí hodnoty.

Metoda třetí hodnoty je založena na skutečnosti, že všechny parametry sítě R_θ , Φ a $\Delta\theta_\infty$ jsou pro výpočet sítě konstantními koeficienty. Vlivem toho změna vstupního oteplení veden k lineární změně toků a oteplení v tepelné síti.

Prvním krokem výpočtu je volba oteplení na jednom konci tepelné sítě, pomocí kterého lze vypočítat tok příčnou větví přívodu. Postupným řešením tepelného schématu dostaneme hodnotu tepelného toku na jeho druhém konci, který by měl být ideálně nulový. Po prvním odhadu oteplení bude tok nenulový, provedeme druhý odhad a spočítáme opět tepelný tok na konci schématu. Dva výstupní tepelné toky poslouží k lineární interpolaci nebo extrapolaci již správné (domněle skutečné) velikosti vstupního oteplení, při kterém by měl být výstupní tok roven nule.

4. VÝPOČET NÁHRADNÍCH TEPELNÝCH SCHÉMAT ODPOJOVAČE

V této kapitole je proveden výpočet ustáleného oteplení proudovodné dráhy odpojovače KBE 36.3150.40/1 při nominálním proudu 4000 A. Výpočet je realizován dle literatury [11]. Při využití grafů a tabulek je u čísla literatury taktéž uvedeno, ze které stránky, tabulky nebo grafu a průběhu je odečítáno. Při výpočtů jednotlivých náhradních tepelných schémat je využito některých zjednodušení a předpokladů, bez kterých by nebylo možné se k realitě přiblížit. Tato zjednodušení jsou uvedena v průběhu výpočtu a následně zhodnocena.

4.1 Přepočet měrného odporu mědi

Proudovodná dráha odpojovače je vyrobena z elektrovodné mědi (Cu-ETP, dříve E-Cu), která je postříbřena. Vrstva stříbra o tloušťce několika μm nemá velký vliv na měrný odpor, a proto ji lze zanedbat. Povrchová úprava ovlivní tvorbu cizích vrstev, oxidy cizích vrstev u stříbra mají nižší tvrdost než měděnka a rozpadají se při 180 °C až 200°C. Čistě stříbrná proudovodná dráha by mohla být více zatěžována než proudovodná dráha z elektrovodné mědi.

Pro první iteraci výpočtu je zvoleno předpokládané oteplení 70 K při nejhorší možné teplotě okolí dle normy 40 °C, uvažovaná rezistivita mědi je rovna $\rho_{Cu20} = 1,72 \cdot 10^{-8} \Omega m$ s teplotním součinitelem $\alpha = 0,00393 K^{-1}$ pro teploty 20-200 °C.

Rezistivita mědi se vypočte dle vzorce:

$$\rho_{Cu110} = \rho_{Cu20} \cdot (1 + \alpha \Delta \vartheta_z) \quad (8)$$

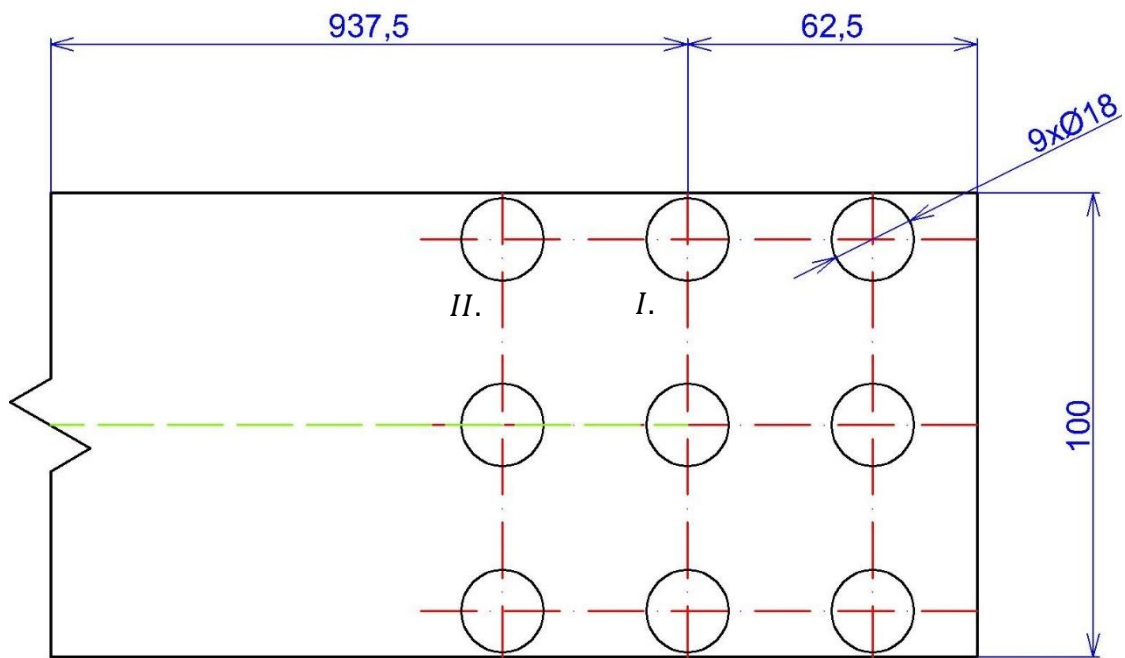
Po dosazení do vzorce (8) je určena rezistivita:

$$\rho_{Cu110} = 1,72 \cdot 10^{-8} \cdot (1 + 0,00393 \cdot 90) = 23,28 \cdot 10^{-9} \Omega m$$

4.2 Výpočet náhradního schématu přírodních vodičů

Napájení odpojovače je realizováno pomocí čtyř pásovin o rozměru 100x10 mm, dvě jsou připojeny na spodní stranu přírodní svorky a dva jsou připojeny na horní stranu přírodní svorky. Při výpočtu je realizováno zjednodušení, když místo dvou přípojnic na každé straně je uvažována jedna na každé straně o rozměrech 100x20 mm.

Náhradní schéma je rozděleno na dvě části. První dílec je realizován jako tepelně dlouhá tyč, která je ohraničena délkou střední proudnice, zelená úsečka, na obrázku 4.1. Druhým dílcem je část pásovin ohraničená koncem střední délky proudnice a koncem pásovin, tento dílec slouží jako chladič a je nahrazen jako tepelná tyč beze ztrát.



Obrázek 4.1 Přívodní pásovina

4.2.1 Určení koeficientu zhuštění proudnic

Na obrázku 4.1 je vidět dvě zúžení, kterými prochází střední délka proudnice. Zhuštění proudnic vyvolané dírami o průměru 18 mm způsobí zvýšení odporu proudovodné dráhy. Obě zúžení jsou stejná, proto stačí určit koeficient pro jeden z nich.

V místě I. a II. dochází k zúžení vlivem tří děr současně, nejdříve je určeno zúžení od jedné díry:

$$a = b - \varnothing \quad (9)$$

, kde a (mm) zúžená šířka pásoviny,
 b (mm) šířka pásoviny,
 \varnothing (mm) průměr díry.

$$a = b - \varnothing_1 = 100 - 18 = 82 \text{ mm}$$

$$\frac{a}{b} = \frac{100}{82} = 0,82$$

Z grafu v literatuře [11], na str. 31, Obr. 2-5 je na základě $\frac{a}{b}$ a typu zúžení určen koeficient zhuštění proudnic od jedné díry:

$$K_1(0,82; \text{charakteristika } 4) = 1,2 = K_2.$$

Na zúžení v těchto místech se podílí současně tři díry, proto se výsledný koeficient zhuštění proudnic rovná:

$$K_1^3 = K_2^3 = 1,2^3 = 1,728.$$

4.2.2 Skinefekt a jev blízkosti

Vlivem geometrie pásovin a jejich vzájemné polohy je uvažováno zvýšení odporu přírodních vodičů povrchovým jevem a jevem blízkosti.

Pro určení koeficientu reprezentujícího vliv skinefektu je nutné znát podíl šířky ku výšce pásovin $\frac{b}{h}$, průřez pásovin a hodnotu výrazu $\sqrt{\frac{S \cdot f}{\rho_{Cu110}}}$ při síťové frekvenci 50 Hz.

$$\frac{b}{h} = \frac{100}{20} = 5$$

$$S = b \cdot h = 100 \cdot 20 = 20 \cdot 10^{-4} m^2$$

$$\sqrt{\frac{S \cdot f}{\rho_{Cu110}}} = \sqrt{\frac{20 \cdot 10^{-4} \cdot 50}{23,28 \cdot 10^{-9}}} = 2072$$

Z grafu v literatuře [11], na str. 29, Obr. 2-3 je na základě $\frac{b}{h}$ a $\sqrt{\frac{S \cdot f}{\rho_{Cu110}}}$ určen koeficient skinefektu k_s :

$$k_s \left(\frac{b}{h}; \sqrt{\frac{S \cdot f}{\rho_{Cu110}}} \right) = 1,34.$$

Pro určení koeficientu reprezentujícího vliv jevu blízkosti je nutné znát podíl osové vzdálenosti pásovin ku výšce pásovin $\frac{a}{d}$, průřez pásovin a hodnotu výrazu $\sqrt{\frac{S \cdot f}{\rho_{Cu110}}}$ při síťové frekvenci 50 Hz, která je shodná pro oba koeficienty.

$$\frac{a}{d} = \frac{10 + 20}{20}$$

Z grafu v literatuře [11], na str. 30, Obr. 2-4 je na základě $\frac{a}{d}$ a $\sqrt{\frac{S \cdot f}{\rho_{Cu110}}}$ určen koeficient skinefektu k_{bl} :

$$k_{bl} \left(\frac{a}{d}; \sqrt{\frac{S \cdot f}{\rho_{Cu110}}} \right) = 1,18.$$

4.2.3 Výpočet elektrického odporu jedné pásovin

V předchozích podkapitolách jsou byly určeny všechny údaje potřebné pro výpočet elektrického odporu napájecího přívodu. Zúžení v místě III. nevstupuje do výpočtu, protože není součástí aktivní proudovodné dráhy. Odpor je vypočten dle:

$$R_{p1} = \frac{\rho_{Cu110}}{S} \cdot (l_{stř} + b \cdot (K_1 + K_2 - n)) \cdot k_s \cdot k_{bl} \quad (10)$$

, kde $l_{stř}$ (mm) délka střední proudnice,
 n (-) počet zúžení.

Po dosazení do (10) je odpor pásovin:

$$R_{p1} = \frac{23,28 \cdot 10^{-9}}{20 \cdot 10^{-4}} \cdot (0,9375 + 0,1 \cdot (1,728 + 1,728 - 2)) \cdot 1,34 \cdot 1,18 = 19,9 \mu\Omega$$

4.2.4 Výpočet měrné chladivosti pásoviny

Pro určení měrné chladivosti zářením je pro kovově lesklou měď pásovin převzata emisivita z literatury [11], na str. 49, Tab. 2-8 $E_z = 0,1$.

V literatuře [11], na str. 52, Tab. 2-10 není uveden vzorec pro emisivitu 0,1 při teplotě okolí 40 °C, proto je výsledný vzorec lineárně aproximován:

$$E_z = 0,4: \alpha_z = 2,8 + 0,017 \cdot \Delta\vartheta_z,$$

$$E_z = 0,15: \alpha_z = 1,1 + 0,006 \cdot \Delta\vartheta_z.$$

Výsledný vzorec pro $E_z = 0,1$:

$$\alpha_z = \left(1,1 + \frac{2,8-1,1}{0,25} \cdot (0,1 - 0,15)\right) + \left(0,006 + \frac{0,017-0,006}{0,25} \cdot (0,1 - 0,15) \cdot \Delta\vartheta_z\right).$$

Při odhadu činitele stínění protějšší pásovinou $N = 0,8$ je měrná chladivost rovna:

$$\alpha_z = 0,8 \cdot (0,76 + 0,0038 \cdot 70) = 0,7182 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

Měrnou chladivost prouděním odečteme z téže tabulky pro šířku pásoviny 100 mm:

$$\alpha_K = 3,7 + 0,046 \cdot \Delta\vartheta_z,$$

$$\alpha_K = 3,7 + 0,046 \cdot 70 = 6,92 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}.$$

Výslednou měrnou chladivost určíme součtem měrné chladivosti zářením a prouděním:

$$\alpha_C = \alpha_z + \alpha_K = 0,7182 + 6,92 = 7,64 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}.$$

4.2.5 Výpočet chladící plochy

Chladícím povrchem se rozumím povrch podél proudovodné dráhy, který není zakrytý jinými součástmi. Je uvažován povrch okolo střední délky proudnice s odečtem styku pásoviny a přívodní svorky, pro přesnější vyjádření chladící plochy je vynásobena $\frac{2}{3}$, protože teplo z dolní pásoviny bude zahřívát horní pásovinu:

$$P = \frac{2}{3} \cdot (2 \cdot 0,9375 \cdot 0,02 + 2 \cdot 0,9375 \cdot 0,1 - 0,0625 \cdot 0,1) = 0,146 \text{ m}^2.$$

4.2.6 Výpočet náhradního schématu pásoviny

Nejprve je vypočtena velikost chladícího obvodu se zanedbáním navýšení povrchu vlivem šroubových spojení:

$$O_v = \frac{P}{l_{stř}} = \frac{0,146}{0,9375} = 0,156 \text{ m}.$$

Následně jsou určeny parametry náhradního schématu pro součinitel tepelné vodivosti mědi $\lambda_{Cu} = 385 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$:

$$\delta = \sqrt{\alpha_C \cdot 2 \cdot O_v \cdot \lambda_{Cu} \cdot 2 \cdot S} = \sqrt{7,64 \cdot 2 \cdot 0,156 \cdot 385 \cdot 2 \cdot 20 \cdot 10^{-4}} = 1,913,$$

$$R_{Tt} = \frac{1}{\delta} = \frac{1}{1,913} = 0,523 \text{ KW}^{-1},$$

$$\Delta\vartheta_{\infty} = \frac{R_{p1} \cdot I^2}{\alpha_C \cdot 2 \cdot P} = \frac{19,9 \cdot 10^{-6} \cdot 4000^2}{7,64 \cdot 2 \cdot 0,146} = 71,6 \text{ K}.$$

Oteplení $\Delta\vartheta_{\infty}$ zde symbolizuje skutečné oteplení přívodu ve vzdálenosti 1 m od svorky přístroje.

4.2.7 Uvážení konce pásoviny jako chladiče

Plochu chladiče tvoří příspěvky horní, boční a čelní stěny. Potřebné údaje jsou odečteny z obrázku 4.1. Chladicí plocha je opět vynásobena $\frac{2}{3}$, aby bylo reflektováno zahřívání horního chladiče.

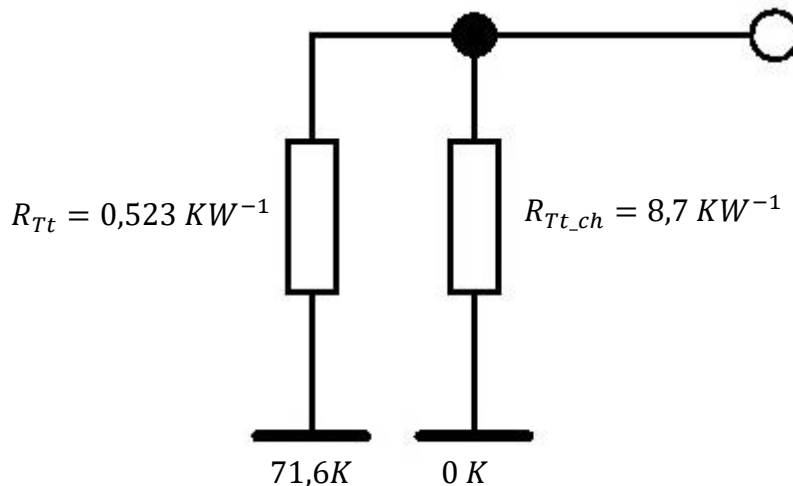
$$P_{ch} = \frac{2}{3} \cdot (0,1 \cdot 0,0625 + 0,1 \cdot 0,02 + 2 \cdot 0,0625 \cdot 0,02) = 0,0072 \text{ m}^2.$$

Měrná chladivost odpovídá chladivosti pásoviny. Příčný odpor v náhradním schématu je roven s uvážením nárůstu chladicí plochy o 1,05 s ohledem na šrouby:

$$R_{Tt_ch} = \frac{1}{\alpha_c \cdot 2 \cdot 1,05 \cdot P_{ch}} = \frac{1}{7,64 \cdot 2 \cdot 1,05 \cdot 0,0072} = 8,7 \text{ KW}^{-1}.$$

4.2.8 Kompletní tepelné schéma přívodních vodičů

Na základě vypočtených hodnot z přecházejících podkapitol je sestaveno tepelné schéma přívodních vodičů:

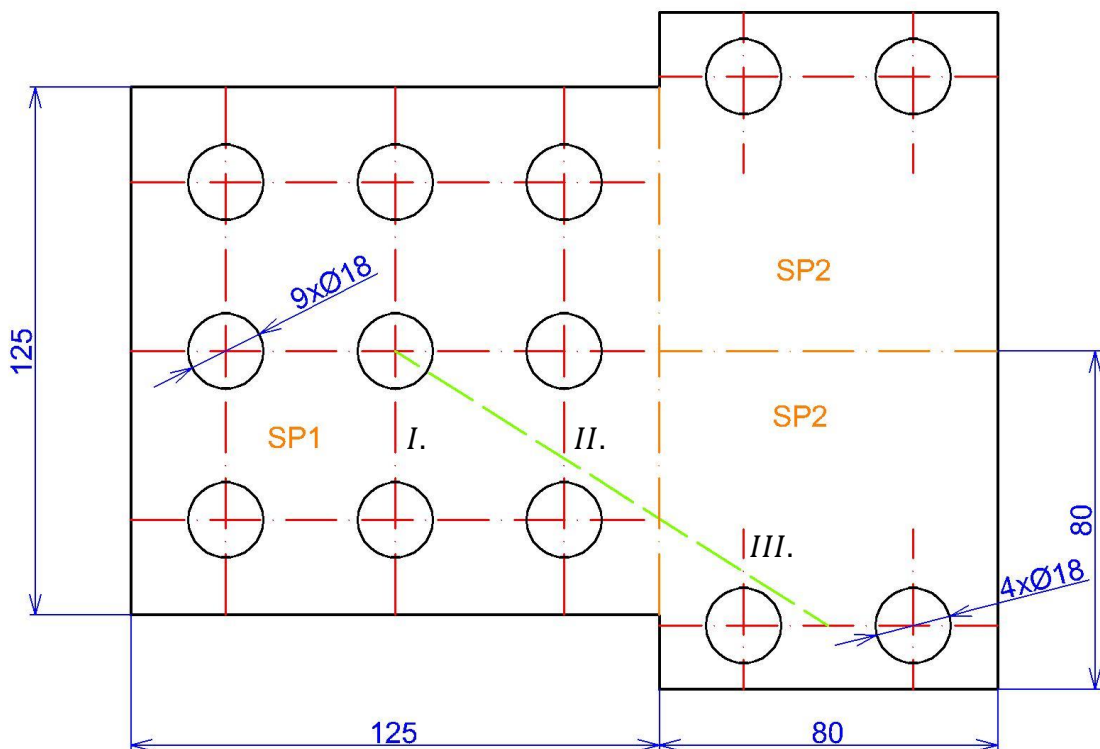


Obrázek 4.2 Kompletní tepelné schéma přívodních vodičů

4.3 Výpočet náhradního schématu přívodní svorky

Náčrt přívodní svorky je na obrázku 4.3, přívodní svorka plní dvě hlavní funkce. První funkcí je upevnění přívodních vodičů a druhou funkcí je rozdělení tekoucího elektrického proudu na dvě paralelní větve do praporců odpojovače, proto bude přívodní svorka nadále nazývána jako spojnice praporců. Při výpočtu je použito zjednodušení, kdy jsou zanedbány zaoblené hrany spojnice praporců.

Na spojnici praporců je pohlíženo jako tyč se ztrátami s mírně proměnlivým průřezem, proto je tento dílec rozdělen na dva π -články v sérii, na jejichž obou koncích je umístěn chladič, jehož plocha je vytyčena konci střední proudnice, zelená úsečka. První část spojnice je označena dále jako SP1 a druhá část spojnice je označena jako SP2. Spojnice praporců má tloušťku 16 mm.



Obrázek 4.3 Spojnice praporců a její schématické rozdělení

4.3.1 Určení koeficientu zhuštění proudnic SP1

Na obrázku 4.3 jsou patrná dvě zúžení, kterými vede střední délka proudnice. V místě I. a II. se na zúžení podílí tři díry o průměru 18 mm, stačí určit koeficient zhuštění jen pro jeden bod:

$$a = b - \varnothing_1 = 125 - 18 = 107 \text{ mm},$$

$$\frac{a}{b} = \frac{125}{107} = 0,856.$$

Z grafu v literatuře [11], na str. 31, Obr. 2-5 je na základě $\frac{a}{b}$ a typu zúžení určen koeficient zhuštění proudnic od jedné díry:

$$K_1(0,856; \text{charakteristika } 4) = 1,15 = K_2.$$

Na zúžení v těchto místech se podílí současně tři díry, proto se výsledný koeficient zhuštění proudnic rovná:

$$K_1^3 = K_2^3 = 1,15^3 = 1,521.$$

4.3.2 Vliv skin efektu SP1

Koeficient reprezentující vliv skin efektu je určen obdobně jako v předcházející podkapitole:

$$\frac{b}{h} = \frac{125}{16} = 7,1825,$$

$$S = b \cdot h = 125 \cdot 16 = 20 \cdot 10^{-4} m^2,$$

$$\sqrt{\frac{S \cdot f}{\rho_{Cu110}}} = \sqrt{\frac{20 \cdot 10^{-4} \cdot 50}{23,28 \cdot 10^{-9}}} = 2072.$$

Z grafu v literatuře [11], na str. 29, Obr. 2-3 je na základě $\frac{b}{h}$ a $\sqrt{\frac{S \cdot f}{\rho_{Cu110}}}$ určen koeficient skin efektu k_s :

$$k_s \left(\frac{b}{h}; \sqrt{\frac{S \cdot f}{\rho_{Cu110}}} \right) = 1,31.$$

4.3.3 Výpočet elektrického odporu SP1

Střední délka proudnice je určena na základě obrázku 4.3:

$$l_{stř} = 74,01 \text{ mm} = 0,07401 \text{ m}.$$

Vlivem zhuštění proudnic od děr a vlivem skin efektu je výsledný elektrický odpor spojnice praporců SP1 roven:

$$R_{SP1} = \frac{23,28 \cdot 10^{-9}}{20 \cdot 10^{-4}} \cdot (0,07401 + 0,125 \cdot (1,521 + 1,521 - 2)) \cdot 1,31 = 3,11 \mu\Omega.$$

4.3.4 Výpočet měrné chladivosti SP1

Všechny konstrukční části odpojovače jsou vyrobeny z elektrovodné mědi s postříbřením. Pro určení měrné chladivosti záření je pro stříbřitě lesklý povrch převzata emisivita z literatury [11], na str. 49, Tab. 2-8 $E_z = 0,4$.

V literatuře [11], na str. 52, Tab. 2-10 je uveden vzorec pro měrnou chladivost záření při emisivitě 0,4 při teplotě okolí 40 °C:

$$\alpha_z = 2,8 + 0,017 \cdot \Delta\vartheta_z = 2,8 + 0,017 \cdot 70 = 3,99 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}.$$

V téže tabulce není uveden vzorec pro měrnou chladivost prouděním pro šířku 125 mm, proto je výsledný vzorec lineárně aproximován:

$$\text{pro } 100 \text{ mm: } \alpha_K = 3,7 + 0,046 \cdot \Delta\vartheta_z,$$

$$\text{pro } 200 \text{ mm } \alpha_K = 3,3 + 0,035 \cdot \Delta\vartheta_z.$$

Výsledný vzorec pro šířku 125 mm:

$$\alpha_K = \left(3,7 + \frac{3,7-3,3}{100} \cdot (100 - 125) \right) + \left(0,046 + \frac{0,046-0,035}{100} \cdot (100 - 125) \right) \cdot \Delta\vartheta_z,$$

$$\alpha_K = 3,6 + 0,04325 \cdot \Delta\vartheta_z = 3,6 + 0,04325 \cdot 70 = 6,628 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}.$$

Výsledná měrná chladivost spojnice praporců SP1 je rovna:

$$\alpha_C = \alpha_z + \alpha_K = 3,99 + 6,628 = 10,62 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}.$$

4.3.5 Výpočet chladící plochy SP1

Chladící plocha spojnice praporců SP1 je ohraničena střední délkou proudnice a je

výrazně umenšena plochou přírodních vodičů, které jej zakrývají. Zde je zavedena chladicí plocha P_1 , která v sobě zahrnuje horní a boční strany SP1 a plocha P_2 zahrnující spodní část SP1:

$$P_1 = 2 \cdot 12,5 \cdot 62,5 + 2 \cdot 16 \cdot 62,5 = 3562,5 \text{ mm}^2,$$

$$P_2 = 2 \cdot 12,5 \cdot 62,5 = 1562,5 \text{ mm}^2.$$

Efektivní chladicí plocha P_2 je uvažována ze $\frac{2}{3}$ s ohledem na kvalitu chlazení daných částí, pro celkovou plochu platí:

$$P = P_1 + \frac{2}{3} \cdot P_2 = 3562,5 + \frac{2}{3} \cdot 1562,5 = 0,0046 \text{ m}^2.$$

4.3.6 Výpočet náhradního schématu SP1

Pro velikost chladicího obvodu platí:

$$O_v = \frac{P}{l_{stř}} = \frac{0,0046}{0,07401} = 0,062 \text{ m}.$$

Parametry náhradního schématu jsou rovny:

$$\beta \cdot l_{stř} = l_{stř} \cdot \sqrt{\frac{\alpha_C \cdot O_v}{\lambda_{Cu} \cdot S}} = 0,07401 \cdot \sqrt{\frac{10,62 \cdot 0,062}{385 \cdot 20 \cdot 10^{-4}}} = 0,069,$$

$$\delta = \sqrt{\alpha_C \cdot O_v \cdot \lambda_{Cu} \cdot S} = \sqrt{10,62 \cdot 0,062 \cdot 385 \cdot 20 \cdot 10^{-4}} = 0,713,$$

$$R_{Tl} = \frac{\sinh \beta \cdot l_{stř}}{\delta} = \frac{\sinh 0,069}{0,713} = 96,19 \text{ mKW}^{-1},$$

$$R_{Tt} = \frac{1}{\delta \cdot \operatorname{tgh} \frac{\beta \cdot l_{stř}}{2}} = \frac{1}{0,713 \cdot \operatorname{tgh} \frac{0,069}{2}} = 40,929 \text{ KW}^{-1},$$

$$\Delta\vartheta_{\infty} = \frac{R_{SP1} \cdot I^2}{\alpha_C \cdot P} = \frac{3,11 \cdot 10^{-6} \cdot 4000^2}{10,62 \cdot 0,0046} = 1019,414 \text{ K}.$$

Oteplení $\Delta\vartheta_{\infty}$ zde nepředstavuje skutečné oteplení spojnice praporců SP1, tuto hodnotu lze použít k orientačnímu posouzení, kolik tepla bude tímto dílcem odcházet. Pro takto velkou hodnotu oteplení není očekávám odvod tepla.

4.3.7 Uvážení začátku SP1 jako chladiče

Velikost chladivé plochy začátku přírodní svorky je opět markantně snížena plochou přírodních vodičů, jelikož se jedná o stejný dílec, tak měrné chladivosti jsou shodné s SP1.

Pro chladivé plochy P_1 a P_2 platí:

$$P_1 = 2 \cdot 12,5 \cdot 62,5 + 2 \cdot 16 \cdot 62,5 = 3562,5 \text{ mm}^2,$$

$$P_2 = 2 \cdot 12,5 \cdot 62,5 + 16 \cdot 125 = 3562,5 \text{ mm}^2.$$

Efektivní chladicí plocha P_2 , ve které jsou zahrnuty spodní části a čelo spojnice praporců SP1, je uvažována ze $\frac{2}{3}$ s ohledem na kvalitu chlazení daných částí, pro celkovou plochu platí:

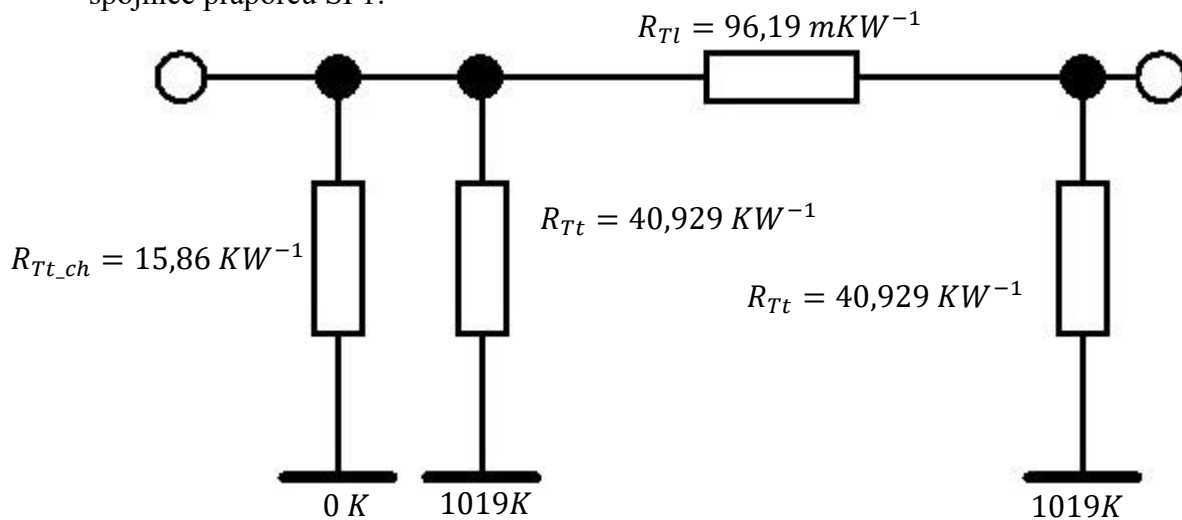
$$P = P_1 + \frac{2}{3} \cdot P_2 = 3562,5 + \frac{2}{3} \cdot 3562,5 = 0,0059 \text{ m}^2.$$

Příčný odpor chladiče SP1 je roven:

$$R_{Tt_ch} = \frac{1}{\alpha_C \cdot P_{ch}} = \frac{1}{10,62 \cdot 0,0059} = 15,86 \text{ KW}^{-1}.$$

4.3.8 Kompletní tepelné schéma SP1

Na základě vypočtených hodnot z přecházejících podkapitol je sestaveno tepelné schéma spojnice praporců SP1:



Obrázek 4.4 Kompletní tepelné schéma SP1

4.3.9 Předmluva k výpočtu spojnice praporců SP2

Jak bylo zmíněno na začátku kapitoly 4.3, tak spojnice praporců rozvádí proud do dvou paralelních praporů. Při následujícím výpočtu je širší část spojnice praporců rozdělena příčně na dvě části SP2 dle obr 4.3. Každá z těchto částí je protékána polovinou proudu a je s nimi zacházeno, jako s paralelními větvemi.

4.3.10 Určení koeficientu zhuštění proudnic SP2

Na obrázku 4.3 je znázorněno jedno zúžení, kterým vede střední délka proudnice. V místě III. se na zúžení podílí jedna díra, a proto lze přímo psát:

$$a = b - \varnothing_1 = 80 - 18 = 62 \text{ mm},$$

$$\frac{a}{b} = \frac{80}{62} = 0,775.$$

Z grafu v literatuře [11], na str. 31, Obr. 2-5 je na základě $\frac{a}{b}$ a typu zúžení určen koeficient zhuštění proudnic od jedné díry:

$$K_1(0,775; \text{charakteristika } 4) = 1,25.$$

4.3.11 Vliv skinefektu SP2

Koeficient reprezentující vliv skinefektu je určen následujícím způsobem:

$$\frac{b}{h} = \frac{80}{16} = 5,$$

$$S = b \cdot h = 80 \cdot 16 = 12,8 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2,$$

$$\sqrt{\frac{S \cdot f}{\rho_{Cu110}}} = \sqrt{\frac{12,8 \cdot 10^{-4} \cdot 50}{23,28 \cdot 10^{-9}}} = 1658.$$

Z grafu v literatuře [11], na str. 29, Obr. 2-3 je na základě $\frac{b}{h}$ a $\sqrt{\frac{S \cdot f}{\rho_{Cu110}}}$ určen koeficient skinefektu k_s :

$$k_s \left(\frac{b}{h}; \sqrt{\frac{S \cdot f}{\rho_{Cu110}}} \right) = 1,23.$$

Vliv jevu blízkosti zde není uvažován, protože byt' lze na části SP2 pohlížet jako na paralelní spojení, tak se jedná o jeden kus materiálu.

4.3.12 Výpočet elektrického odporu SP2

Střední délka proudnice je odečtena na základě obrázku 4.3:

$$l_{stř} = 47,36 \text{ mm} = 0,04736 \text{ m}.$$

Vlivem zhuštění proudnic od děr a vlivem skinefektu je výsledný elektrický odpor spojnice praporců SP2 roven:

$$R_{SP2} = \frac{23,28 \cdot 10^{-9}}{20 \cdot 10^{-4}} \cdot (0,04736 + 0,08 \cdot (1,25 - 1)) \cdot 1,23 = 1,507 \text{ } \mu\Omega.$$

4.3.13 Výpočet měrné chladivosti SP2

Měrná chladivost zářením je stejná pro všechny proudovodné dílce odpojovače a je rovna:

$$\alpha_z = 2,8 + 0,017 \cdot \Delta\vartheta_z = 2,8 + 0,017 \cdot 70 = 3,99 \text{ } Wm^{-2}K^{-1}.$$

V literatuře [11], na str. 52, Tab. 2-10 není uveden vzorec pro měrnou chladivost prouděním pro šířku 80 mm, proto je výsledný vzorec lineárně aproximován:

$$\text{pro } 100 \text{ mm: } \alpha_K = 3,7 + 0,046 \cdot \Delta\vartheta_z,$$

$$\text{pro } 50 \text{ mm } \alpha_K = 4,3 + 0,055 \cdot \Delta\vartheta_z.$$

Výsledný vzorec pro šířku 80 mm:

$$\alpha_K = \left(3,7 + \frac{4,3-3,7}{50} \cdot (100 - 80) \right) + \left(0,046 + \frac{0,055-0,046}{50} \cdot (100 - 80) \right) \cdot \Delta\vartheta_z,$$

$$\alpha_K = 3,94 + 0,0496 \cdot \Delta\vartheta_z = 3,94 + 0,0496 \cdot 70 = 7,412 \text{ } Wm^{-2}K^{-1}.$$

Výsledná měrná chladivost spojnice praporců SP2 je rovna:

$$\alpha_c = \alpha_z + \alpha_K = 3,99 + 7,412 = 11,402 \text{ } Wm^{-2}K^{-1}.$$

4.3.14 Výpočet chladicí plochy SP2

Chladicí plocha spojnice praporců SP2 je ohraničena střední délkou proudnice a je z části zakryta praporcem, který je ze spodu připevněn dvěma šrouby. Zde je zavedena chladicí plocha P_1 , která v sobě zahrnuje horní stranu SP2 a plocha P_2 zahrnující boční a spodní část SP2 s odečtením plochy zakryté praporcem:

$$P_1 = 80 \cdot 40 = 3200 \text{ } mm^2,$$

$$P_2 = 40 \cdot 16 + 80 \cdot 40 - 45 \cdot 40 = 2040 \text{ } mm^2.$$

Efektivní chladicí plocha P_2 je uvažována ze $\frac{2}{3}$ s ohledem na kvalitu chlazení daných částí, pro celkovou plochu platí:

$$P = P_1 + \frac{2}{3} \cdot P_2 = 3200 + \frac{2}{3} \cdot 2040 = 0,00456 \text{ } m^2.$$

4.3.15 Výpočet náhradního schématu SP2

Pro velikost chladicího obvodu navýšenou o 5 % s respektováním plochy šroubu platí:

$$O_v = 1,05 \cdot \frac{P}{l_{stř}} = 1,05 \cdot \frac{0,00456}{0,04736} = 0,101 \text{ m.}$$

Parametry náhradního schématu jsou rovny:

$$\beta \cdot l_{stř} = l_{stř} \cdot \sqrt{\frac{\alpha_C \cdot 2 \cdot O_v}{\lambda_{Cu} \cdot 2 \cdot S}} = 0,04736 \cdot \sqrt{\frac{11,402 \cdot 2 \cdot 0,101}{385 \cdot 2 \cdot 12,8 \cdot 10^{-4}}} = 0,072,$$

$$\delta = \sqrt{\alpha_C \cdot 2 \cdot O_v \cdot \lambda_{Cu} \cdot 2 \cdot S} = \sqrt{11,402 \cdot 2 \cdot 0,101 \cdot 385 \cdot 2 \cdot 12,8 \cdot 10^{-4}} = 1,507,$$

$$R_{Tl} = \frac{\sinh \beta \cdot l_{stř}}{\delta} = \frac{\sinh 0,072}{1,507} = 48,10 \text{ mKW}^{-1},$$

$$R_{Tt} = \frac{1}{\delta \cdot \operatorname{tgh} \frac{\beta \cdot l_{stř}}{2}} = \frac{1}{1,507 \cdot \operatorname{tgh} \frac{0,072}{2}} = 18,325 \text{ KW}^{-1},$$

$$\Delta\vartheta_{\infty} = \frac{\frac{R_{SP2} \cdot I^2}{2}}{\alpha_C \cdot 2 \cdot 1,05 \cdot P} = \frac{\frac{1,507 \cdot 10^{-6} \cdot 4000^2}{2}}{11,402 \cdot 2 \cdot 1,05 \cdot 0,00456} = 110,434 \text{ K.}$$

4.3.16 Uvážení konce SP2 jako chladiče

Velikost chladivé plochy konce spojnice praporců je stejnou měrou snížena vlivem připojení praporce jako u SP2. Jelikož se jedná o stejný dílec, tak měrné chladivosti jsou shodné s SP2.

Pro chladivé plochy P_1 a P_2 platí:

$$P_1 = 80 \cdot 40 + 80 \cdot 16 = 4480 \text{ mm}^2,$$

$$P_2 = 40 \cdot 16 + 80 \cdot 40 - 45 \cdot 40 = 2040 \text{ mm}^2.$$

Efektivní chladicí plocha P_2 , ve které je zahrnuta spodní část a bok spojnice praporců SP2, je uvažována ze $\frac{2}{3}$ s ohledem na kvalitu chlazení daných částí a teplo stoupající z praporce, pro celkovou plochu platí:

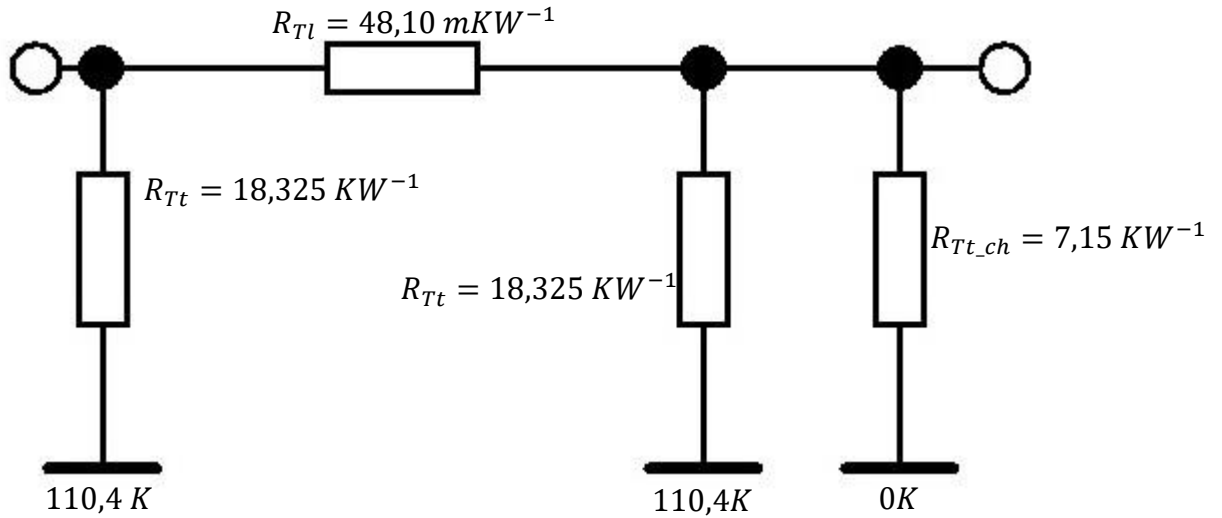
$$P_{ch} = P_1 + \frac{2}{3} \cdot P_2 = 4480 + \frac{2}{3} \cdot 2040 = 0,00613 \text{ m}^2.$$

Příčný odpor chladiče SP2 je s uvážením nárůstu chladicí plochy vlivem šroubu o 5 % roven:

$$R_{Tt_ch} = \frac{1}{\alpha_C \cdot 2 \cdot 1,05 \cdot P_{ch}} = \frac{1}{11,402 \cdot 2 \cdot 1,05 \cdot 0,00613} = 7,151 \text{ KW}^{-1}.$$

4.3.17 Kompletní tepelné schéma SP2

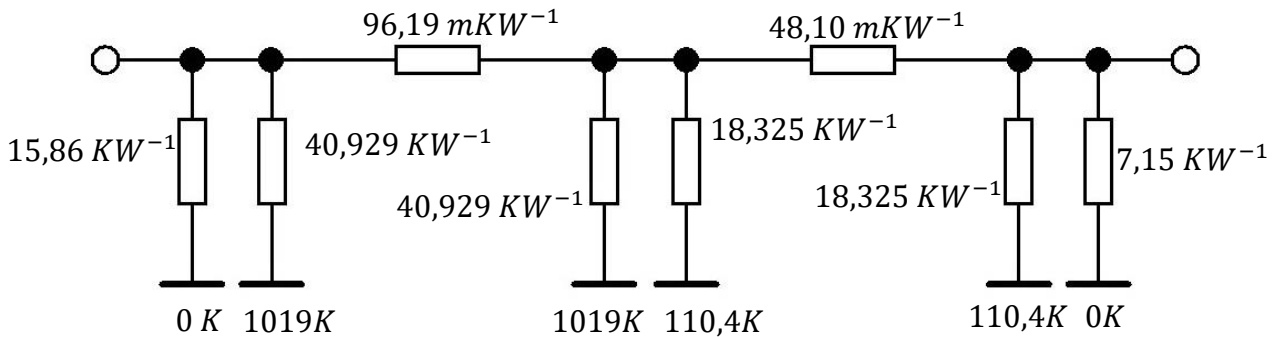
Na základě vypočtených hodnot z přecházejících podkapitol je sestaveno tepelné schéma spojnice praporců SP2:



Obrázek 4.5 Kompletní tepelné schéma SP2

4.3.18 Kompletní tepelné schéma přívodní svorky

Na základě obrázků 4.4 a 4.5 je sestaveno tepelné schéma přívodní svorky:



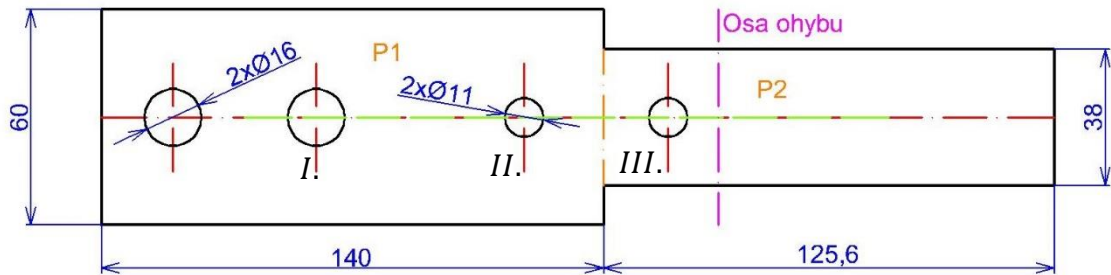
Obrázek 4.6 Kompletní tepelné schéma přívodní svorky

4.4 Výpočet náhradního schématu praporce

Na obrázku 4.7 je zjednodušený náčrt rozvinutého praporce odpojovače se skokovou změnou průřezu a zanedbáním zaoblení hran. Praporec má tloušťku 10 mm a je ohnut do pravého úhlu v naznačené ose. Jelikož je řešeno pouze oteplení, tak tato zjednodušení nezanášejí znatelnou chybu. Pokud by byl takto nakreslený praporec vyroben nastávalo by v místě skokové změny průřezu k vyšší proudové hustotě než při pozvolném přechodu.

Praporec je v náhradním schématu nahrazen dvěma π -čláčky, každý pro jeden průřez proudovodné dráhy. Praporec P1 má na svém vstupu chladič ohraničený střední délkou

proudnic (zelená úsečka), chladič praporce P2 je naopak na jeho konci. Mezi dvěma π -články praporce je vřazen chladič, který reprezentuje ocelový U-profil, ke kterému je připevněna pevná část kontaktního nože.



Obrázek 4.7 Praporec a jeho schématické rozdělení

4.4.1 Určení koeficientu zhuštění proudnic P1

Na obrázku 4.7 jsou pro praporec P1 patrná dvě zúžení od děr o průměru 16 mm a 11 mm:

Bod I.:

$$a = b - \varnothing_1 = 60 - 16 = 44 \text{ mm},$$

$$\frac{a}{b} = \frac{44}{60} = 0,733.$$

Z grafu v literatuře [11], na str. 31, Obr. 2-5 je na základě $\frac{a}{b}$ a typu zúžení určen koeficient zhuštění proudnic od jedné díry.

$$K_1(0,733; \text{charakteristika } 4) = 1,3$$

Bod II.:

$$a = b - \varnothing_1 = 60 - 11 = 49 \text{ mm},$$

$$\frac{a}{b} = \frac{49}{60} = 0,82.$$

Z grafu v literatuře [11], na str. 31, Obr. 2-5 je na základě $\frac{a}{b}$ a typu zúžení určen koeficient zhuštění proudnic od jedné díry.

$$K_2(0,82; \text{charakteristika } 4) = 1,18.$$

4.4.2 Skinefekt a jev blízkosti P1

Proud tekoucí praporce odpojovače způsobí zvýšení odporu vlivem skinefektu, jelikož jsou dva paralelní praporce blízko sebe, tak i jevem blízkosti.

Koeficient zvýšení odporu vlivem skinefektu pro praporec P1 je vypočten jako:

$$\frac{b}{h} = \frac{60}{10} = 6,$$

$$S = b \cdot h = 60 \cdot 10 = 6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2,$$

$$\sqrt{\frac{S \cdot f}{\rho_{Cu110}}} = \sqrt{\frac{6 \cdot 10^{-4} \cdot 50}{23,28 \cdot 10^{-9}}} = 1135.$$

Z grafu v literatuře [11], na str. 29, Obr. 2-3 je na základě $\frac{b}{h}$ a $\sqrt{\frac{S \cdot f}{\rho_{Cu110}}}$ určen koeficient skinefektu k_s :

$$k_s \left(\frac{b}{h}; \sqrt{\frac{S \cdot f}{\rho_{Cu110}}} \right) = 1,07.$$

Koeficient zvýšení odporu vlivem jevu blízkosti se pro praporec P1 vypočte jako:

$$\frac{a}{d} = \frac{70+60}{60} = 2,16.$$

Z grafu v literatuře [11], na str. 30, Obr. 2-4 je na základě $\frac{a}{d}$ a $\sqrt{\frac{S \cdot f}{\rho_{Cu110}}}$ určen koeficient jevu blízkosti k_{bl} :

$$k_{bl} \left(\frac{a}{d}; \sqrt{\frac{S \cdot f}{\rho_{Cu110}}} \right) = 1,03.$$

4.4.3 Výpočet elektrického odporu jednoho praporce P1

Z obrázku 4.7 je odečtena střední délka proudnice praporce P1:

$$l_{stř} = 0,1 \text{ m}.$$

Při uvážení všech vlivů na zvýšení odporu praporce P1, se odpor jednoho praporce vypočte jako:

$$R_{P1} = \frac{23,28 \cdot 10^{-9}}{6 \cdot 10^{-4}} \cdot (0,1 + 0,06 \cdot (1,3 + 1,18 - 2)) \cdot 1,07 \cdot 1,03 = 5,51 \mu\Omega.$$

4.4.4 Výpočet měrné chladivosti P1

Měrná chladivost záření je stejná pro všechny proudovodné dílce odpojovače a je rovna: $\alpha_Z = 2,8 + 0,017 \cdot \Delta\vartheta_Z = 2,8 + 0,017 \cdot 70 = 3,99 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$.

V literatuře [11], na str. 52, Tab. 2-10 není uveden vzorec pro měrnou chladivost prouděním pro šířku praporce 60 mm, proto je výsledný vzorec lineárně aproximován:

$$\text{pro } 100 \text{ mm: } \alpha_K = 3,7 + 0,046 \cdot \Delta\vartheta_Z,$$

$$\text{pro } 50 \text{ mm } \alpha_K = 4,3 + 0,055 \cdot \Delta\vartheta_Z.$$

Výsledný vzorec pro šířku 60 mm:

$$\alpha_K = \left(3,7 + \frac{4,3-3,7}{50} \cdot (100 - 60) \right) + \left(0,046 + \frac{0,055-0,046}{50} \cdot (100 - 60) \right) \cdot \Delta\vartheta_Z,$$

$$\alpha_K = 4,18 + 0,0532 \cdot \Delta\vartheta_Z = 4,18 + 0,0532 \cdot 70 = 7,904 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}.$$

Výsledná měrná chladivost praporce P1 je rovna:

$$\alpha_C = \alpha_Z + \alpha_K = 3,99 + 7,904 = 11,894 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}.$$

4.4.5 Výpočet chladící plochy P1

Chladící plocha praporce P1 je ohraničena střední délkou proudnice a je z části zakryta spojnicí praporečů a z části ocelovým U-profilem. Pod U-profilem je nosný izolátor, který je nahrazen jako chladivá plocha.

Je zavedena chladící plocha P_1 , kterou činí horní strana a vnější bok praporce P1, a chladící plocha P_2 , která obsahuje dolní stranu a vnitřní bok praporce P1:

$$P_1 = 60 \cdot 100 + 10 \cdot 100 - 40 \cdot 45 - \frac{1}{2} \cdot 65 \cdot 37 = 3997,5 \text{ mm}^2,$$

$$P_2 = 60 \cdot 100 + 10 \cdot 100 = 7000 \text{ mm}^2.$$

Efektivní chladicí plocha P_2 je uvažována ze $\frac{2}{3}$ s ohledem na kvalitu chlazení daných částí, pro celkovou plochu platí:

$$P = P_1 + \frac{2}{3} \cdot P_2 = 3997,5 + \frac{2}{3} \cdot 7000 = 0,0087 \text{ m}^2.$$

4.4.6 Výpočet náhradního schématu P1

Pro velikost chladicího obvodu platí:

$$O_v = \frac{P}{l_{stř}} = \frac{0,0087}{0,1} = 0,087 \text{ m}.$$

Parametry náhradního schématu jsou rovny:

$$\beta \cdot l_{stř} = l_{stř} \cdot \sqrt{\frac{\alpha_C \cdot 2 \cdot O_v}{\lambda_{Cu} \cdot 2 \cdot S}} = 0,1 \cdot \sqrt{\frac{11,894 \cdot 2 \cdot 0,087}{385 \cdot 2 \cdot 6 \cdot 10^{-4}}} = 0,211,$$

$$\delta = \sqrt{\alpha_C \cdot 2 \cdot O_v \cdot \lambda_{Cu} \cdot 2 \cdot S} = \sqrt{11,894 \cdot 2 \cdot 0,087 \cdot 385 \cdot 2 \cdot 6 \cdot 10^{-4}} = 0,976,$$

$$R_{Tl} = \frac{\sinh \beta \cdot l_{stř}}{\delta} = \frac{\sinh 0,211}{0,976} = 218,06 \text{ mKW}^{-1},$$

$$R_{Tt} = \frac{1}{\delta \cdot \operatorname{tgh} \frac{\beta \cdot l_{stř}}{2}} = \frac{1}{0,976 \cdot \operatorname{tgh} \frac{0,211}{2}} = 9,740 \text{ KW}^{-1},$$

$$\Delta\vartheta_{\infty} = \frac{R_{P1} \cdot I^2}{\alpha_C \cdot 2 \cdot P} = \frac{5,51 \cdot 10^{-6}}{11,894 \cdot 2 \cdot 0,0087} \cdot 4000^2 = 213,817 \text{ K}.$$

4.4.7 Uvážení začátku P1 jako chladiče

Měrné chladivosti chladiče praporce P1 na straně spojnice praporců jsou stejné jako pro praporec P1. Chladivá plocha je z části zastíněna spojnicí praporců SP2.

Pro chladivé plochy P_1 a P_2 platí:

$$P_1 = 40 \cdot 10 + 40 \cdot 60 - 40 \cdot 45 = 1000 \text{ mm}^2,$$

$$P_2 = 40 \cdot 10 + 60 \cdot 10 - 40 \cdot 60 = 3400 \text{ mm}^2.$$

Efektivní chladicí plocha P_2 , ve které je zahrnuta spodní část, vnitřní bok a čelo praporce P1, je uvažována ze $\frac{2}{3}$ s ohledem na kvalitu chlazení:

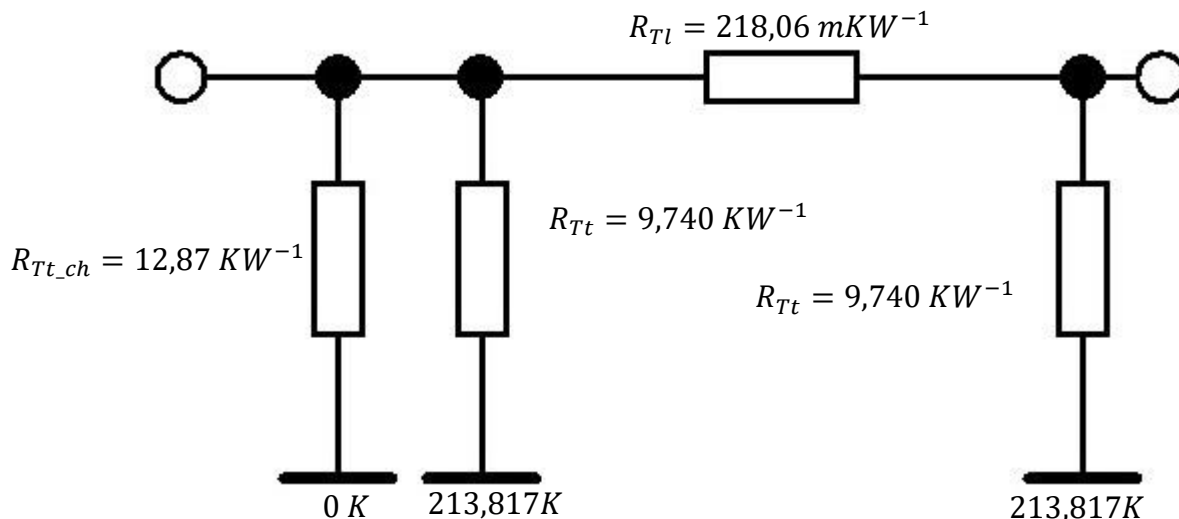
$$P_{ch} = P_1 + \frac{2}{3} \cdot P_2 = 1000 + \frac{2}{3} \cdot 3400 = 0,0033 \text{ m}^2.$$

Pro příčný odpor chladiče P1 platí:

$$R_{Tt_ch} = \frac{1}{\alpha_C \cdot 2 \cdot P_{ch}} = \frac{1}{11,894 \cdot 2 \cdot 0,0033} = 12,87 \text{ KW}^{-1}.$$

4.4.8 Kompletní tepelné schéma P1

Na základě vypočtených hodnot z přecházejících podkapitol je sestaveno tepelné schéma praporce P1:



Obrázek 4.8 Kompletní tepelné schéma P1

4.4.9 Určení koeficientu zhuštění proudnic P2

Na obrázku 4.7 je praporec P2 zúžen v jednom místě dírou o průměru 11 mm:

Bod III.:

$$a = b - \varnothing_1 = 38 - 11 = 27 \text{ mm},$$

$$\frac{a}{b} = \frac{27}{38} = 0,711.$$

Z grafu v literatuře [11], na str. 31, Obr. 2-5 je na základě $\frac{a}{b}$ a typu zúžení určen koeficient zhuštění proudnic od jedné díry.

$$K_1(0,711; \text{charakteristika } 4) = 1,35$$

4.4.10 Skinefekt a jev blízkosti P2

Koeficient zvýšení odporu vlivem skinefektu pro praporec P2 je vypočten jako:

$$\frac{b}{h} = \frac{38}{10} = 3,8,$$

$$S = b \cdot h = 38 \cdot 10 = 3,8 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2,$$

$$\sqrt{\frac{S \cdot f}{\rho_{Cu110}}} = \sqrt{\frac{3,8 \cdot 10^{-4} \cdot 50}{23,28 \cdot 10^{-9}}} = 903.$$

Z grafu v literatuře [11], na str. 29, Obr. 2-3 je na základě $\frac{b}{h}$ a $\sqrt{\frac{S \cdot f}{\rho_{Cu110}}}$ určen koeficient skinefektu k_s :

$$k_s \left(\frac{b}{h}; \sqrt{\frac{S \cdot f}{\rho_{Cu110}}} \right) = 1,04.$$

Koeficient zvýšení odporu vlivem jevu blízkosti se pro praporec P2 vypočte jako:

$$\frac{a}{d} = \frac{92+38}{38} = 3,41.$$

Z grafu v literatuře [11], na str. 30, Obr. 2-4 je na základě $\frac{a}{d}$ a $\sqrt{\frac{S \cdot f}{\rho_{Cu110}}}$ určen koeficient jevu blízkosti k_{bl} :

$$k_{bl} \left(\frac{a}{d}; \sqrt{\frac{S \cdot f}{\rho_{Cu110}}} \right) = 1,01.$$

Vliv jevu blízkosti pro praporec P2 je zanedbatelný, nárůst odporu praporce o 1 % se výrazně neprojeví.

4.4.11 Výpočet elektrického odporu jednoho praporce P2

Z obrázku 4.7 je odečtena střední délka proudnice praporce P2 s uvážením dosednutí nožů:

$$l_{stř} = 0,0796 \text{ m.}$$

Při zanedbání vlivu blízkosti na zvýšení odporu praporce P2, se odpor jednoho praporce vypočte jako:

$$R_{P1} = \frac{23,28 \cdot 10^{-9}}{3,8 \cdot 10^{-4}} \cdot (0,0796 + 0,038 \cdot (1,35 - 1)) \cdot 1,04 = 5,92 \mu\Omega.$$

4.4.12 Výpočet měrné chladivosti P2

Měrná chladivost zářením je stejná pro všechny proudvodné dílce odpojovače a je rovna: $\alpha_z = 2,8 + 0,017 \cdot \Delta\vartheta_z = 2,8 + 0,017 \cdot 70 = 3,99 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$.

V literatuře [11], na str. 52, Tab. 2-10 není uveden vzorec pro měrnou chladivost prouděním pro šířku praporce 38 mm, proto je výsledný vzorec lineárně aproximován:

$$\text{pro } 50 \text{ mm: } \alpha_K = 4,3 + 0,055 \cdot \Delta\vartheta_z,$$

$$\text{pro } 10 \text{ mm } \alpha_K = 6 + 0,09 \cdot \Delta\vartheta_z.$$

Výsledný vzorec pro šířku 38 mm:

$$\alpha_K = \left(4,3 + \frac{6-4,3}{40} \cdot (50 - 38) \right) + \left(0,055 + \frac{0,09-0,055}{40} \cdot (50 - 38) \right) \cdot \Delta\vartheta_z,$$

$$\alpha_K = 4,81 + 0,0655 \cdot \Delta\vartheta_z = 4,81 + 0,0655 \cdot 70 = 9,395 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}.$$

Výsledná měrná chladivost praporce P2 je rovna:

$$\alpha_C = \alpha_z + \alpha_K = 3,99 + 9,395 = 13,385 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}.$$

4.4.13 Výpočet chladící plochy P2

Chladící plocha praporce P2 je ohraničena střední délkou proudnice a je z části kontaktními noži a z části ocelovým U-profilem.

Je zavedena chladící plocha P_1 , kterou činí horní a dolní strana praporce P2, a chladící plocha P_2 , která zahrnuje boky praporce P2 s odečtením ploch, které jsou zakryty kontaktními noži:

$$P_1 = 2 \cdot 79,6 \cdot 38 - \frac{1}{2} \cdot 65 \cdot 37 = 4847,1 \text{ mm}^2,$$

$$P_2 = 79,6 \cdot 10 - 2 \cdot 30 \cdot 10 = 992 \text{ mm}^2.$$

Efektivní chladící plocha P_2 je uvažována ze $\frac{2}{3}$ s ohledem na kvalitu chlazení daných částí, pro celkovou plochu platí:

$$P = P_1 + \frac{2}{3} \cdot P_2 = 4847,1 + \frac{2}{3} \cdot 992 = 6114,3 \text{ mm}^2.$$

4.4.14 Výpočet náhradního schématu P2

Pro velikost chladicího obvodu platí:

$$O_v = \frac{P}{l_{stř}} = \frac{0,0055}{0,0796} = 0,069 \text{ m.}$$

Parametry náhradního schématu jsou rovny:

$$\beta \cdot l_{stř} = l_{stř} \cdot \sqrt{\frac{\alpha_C \cdot 2 \cdot O_v}{\lambda_{Cu} \cdot 2 \cdot S}} = 0,1 \cdot \sqrt{\frac{13,385 \cdot 2 \cdot 0,069}{385 \cdot 2 \cdot 3,8 \cdot 10^{-4}}} = 0,200,$$

$$\delta = \sqrt{\alpha_C \cdot 2 \cdot O_v \cdot \lambda_{Cu} \cdot 2 \cdot S} = \sqrt{13,385 \cdot 2 \cdot 0,069 \cdot 385 \cdot 2 \cdot 3,8 \cdot 10^{-4}} = 0,736,$$

$$R_{Tl} = \frac{\sinh \beta \cdot l_{stř}}{\delta} = \frac{\sinh 0,200}{0,736} = 273,87 \text{ mKW}^{-1},$$

$$R_{Tt} = \frac{1}{\delta \cdot \operatorname{tgh} \frac{\beta \cdot l_{stř}}{2}} = \frac{1}{0,736 \cdot \operatorname{tgh} \frac{0,200}{2}} = 13,61 \text{ KW}^{-1},$$

$$\Delta\theta_{\infty} = \frac{R_{P2} \cdot I^2}{\alpha_C \cdot 2 \cdot P} = \frac{5,92 \cdot 10^{-6}}{2} \cdot 4000^2}{13,385 \cdot 2 \cdot 0,0055} = 321,17 \text{ K.}$$

4.4.15 Uvážení začátku P2 jako chladiče

Chladič na konci praporce P2 má stejně měrně chladivosti jako praporec P2.

Pro chladivé plochy P_1 a P_2 platí:

$$P_1 = 2 \cdot 46 \cdot 38 + 38 \cdot 10 = 3876 \text{ mm}^2,$$

$$P_2 = 2 \cdot 46 \cdot 10 - 2 \cdot 30 \cdot 10 = 320 \text{ mm}^2.$$

Efektivní chladicí plocha P_2 , ve které jsou zahrnuty boky s odečtením plochy zakryté kontaktními noži, je uvažována ze $\frac{2}{3}$ s ohledem na kvalitu chlazení:

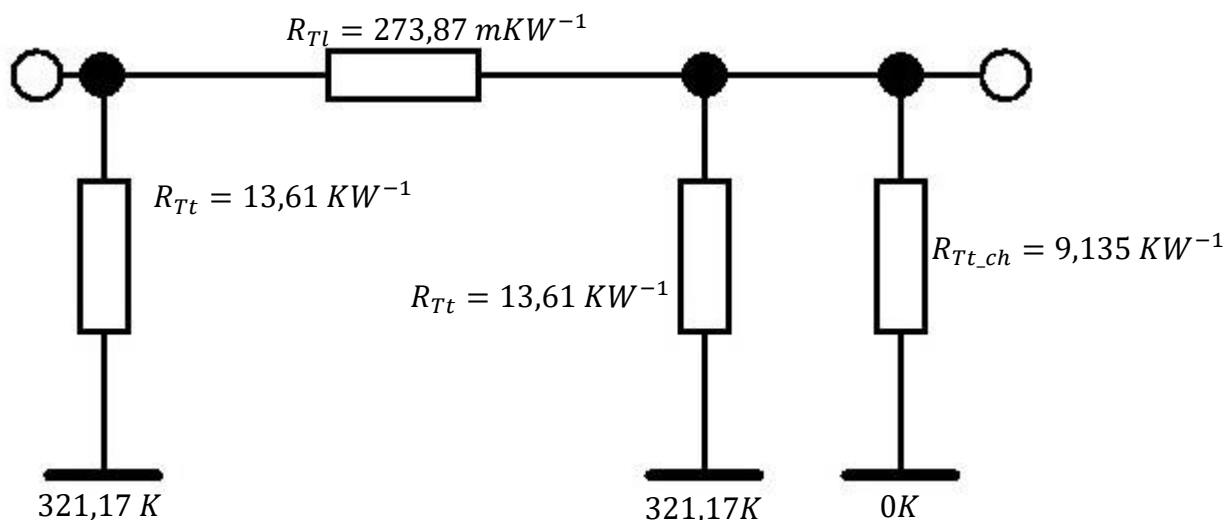
$$P_{ch} = P_1 + \frac{2}{3} \cdot P_2 = 3876 + \frac{2}{3} \cdot 320 = 0,0041 \text{ m}^2.$$

Pro příčný odpor chladiče P2 platí:

$$R_{Tt_ch} = \frac{1}{\alpha_C \cdot 2 \cdot P_{ch}} = \frac{1}{13,385 \cdot 2 \cdot 0,0041} = 9,135 \text{ KW}^{-1}.$$

4.4.16 Kompletní tepelné schéma SP2

Na základě vypočtených hodnot z přecházejících podkapitol je sestaveno tepelné schéma prapore P2:

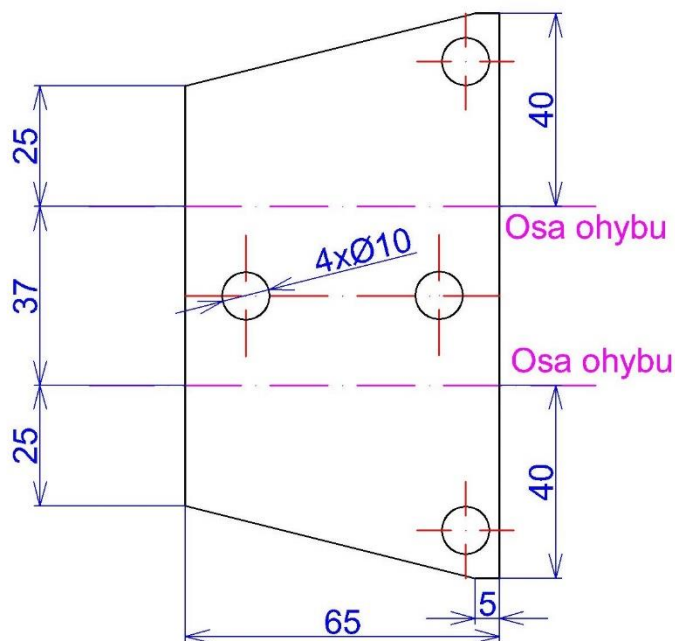


Obrázek 4.9 Kompletní tepelné schéma P2

4.4.17 Uvážení ocelového U-profilu jako chladiče

U-profil slouží jako uchycení kloubu kontaktního nože na straně pevného kontaktu. Všechny ocelové dílce jsou vyrobeny z nerezové oceli 17240, která je nemagnetická. Jelikož má ocel několikanásobně menší vodivost než elektrotechnická měď a nevznikají v ní žádné feromagnetické ztráty, jsou ocelové dílce uvažovány pouze jako chladiče.

Na obrázku 4.10 je vyobrazen daný U-profil v rozvinutém stavu o tloušťce 3 mm.



Obrázek 4.10 Rozvinutý U-profil

Emisivita oceli 17240 je uvažována $E_z = 0,7$. V literatuře [11], na str. 52, Tab. 2-10 není uveden vzorec měrné chladivosti zářením pro emisivitu 0,7 při teplotě okolí 40 °C, proto je výsledný vzorec lineárně aproximován:

$$E_z = 0,8: \alpha_z = 5,6 + 0,034 \cdot \Delta\vartheta_z,$$

$$E_z = 0,4: \alpha_z = 2,8 + 0,017 \cdot \Delta\vartheta_z.$$

Výsledný vzorec α_z pro $E_z = 0,1$:

$$\alpha_z = \left(5,6 + \frac{5,6-2,8}{0,4} \cdot (0,7 - 0,8) \right) + \left(0,034 + \frac{0,034-0,017}{0,4} \cdot (0,7 - 0,8) \right) \cdot \Delta\vartheta_z.$$

Při odhadu činitele stínění protější stěny U-profilu $N = 0,7$ je měrná chladivost zářením rovna:

$$\alpha_z = 0,7 \cdot (4,9 + 0,02975 \cdot 70) = 4,888 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

Šířka U-profilu pro určení měrné chladivosti se určuje jen obtížně, uvažovaná šířka je nejmenší šířka v rozvinutém stavu, která je rovna 87 mm. V literatuře [11], na str. 52, Tab. 2-10 není uveden vzorec pro měrnou chladivost prouděním pro šířku praporce 87 mm, proto je výsledný vzorec lineárně aproximován:

$$\text{pro } 100 \text{ mm: } \alpha_K = 3,7 + 0,046 \cdot \Delta\vartheta_z,$$

$$\text{pro } 50 \text{ mm } \alpha_K = 4,3 + 0,055 \cdot \Delta\vartheta_z.$$

Výsledný vzorec pro šířku 87 mm:

$$\alpha_K = \left(3,7 + \frac{4,3-3,7}{50} \cdot (100 - 87) \right) + \left(0,046 + \frac{0,055-0,046}{50} \cdot (100 - 87) \right) \cdot \Delta\vartheta_z,$$

$$\alpha_K = 4,18 + 0,0532 \cdot \Delta\vartheta_z = 3,856 + 0,0483 \cdot 70 = 7,240 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}.$$

Výsledná měrná chladivost U-profilu je rovna:

$$\alpha_c = \alpha_z + \alpha_K = 4,888 + 7,240 = 12,128 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}.$$

Chladivé plochy určíme z obrázku 4.10. Plocha P_1 zahrnuje vnější svislé stěny zmenšené o plochu přiložených kontaktních nožů a dno U-profilu se zahrnutím ploch šroubového spojení. Plocha P_2 je součtem vnitřních svislých stěn a obvodu U-profilu.

$$P_1 = 5831,35 \text{ mm}^2,$$

$$P_2 = 4887,1 \text{ mm}^2.$$

$$P_{ch} = P_1 + \frac{2}{3} \cdot P_2 = 5831,35 + \frac{2}{3} \cdot 4887,1 = 0,0091 \text{ m}^2.$$

Tepelný odpor jednoho U-profilu je roven:

$$R_{Tt_ch} = \frac{1}{\alpha_c \cdot P_{ch}} = \frac{1}{12,128 \cdot 0,0091} = 9,072 \text{ KW}^{-1}.$$

Mezi praporcem a samotným uchycením kloubu je vzduchová mezera, která vytváří přechodový tepelný odpor. Součinitel tepelné vodivosti pro vzduch při teplotě 20 °C je roven $0,026 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$.

Součinitel tepelné vodivosti pro vzduch je závislý na teplotě $0,0002 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ na 5 K, proto pro teplotu vzduchu 110 °C platí:

$$\lambda_{vz90} = \lambda_{vz20} + \frac{\Delta\vartheta_z}{5} \cdot 0,0002 = 0,026 + \frac{90}{5} \cdot 0,0002 = 0,0296 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}.$$

Styčná plocha U-profilu a praporce je rovna:

$$S = 65 \cdot 37 = 24,05 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2.$$

Odpor přestupu tepla přes vzduchovou mezeru o šířce 100 μm je roven:

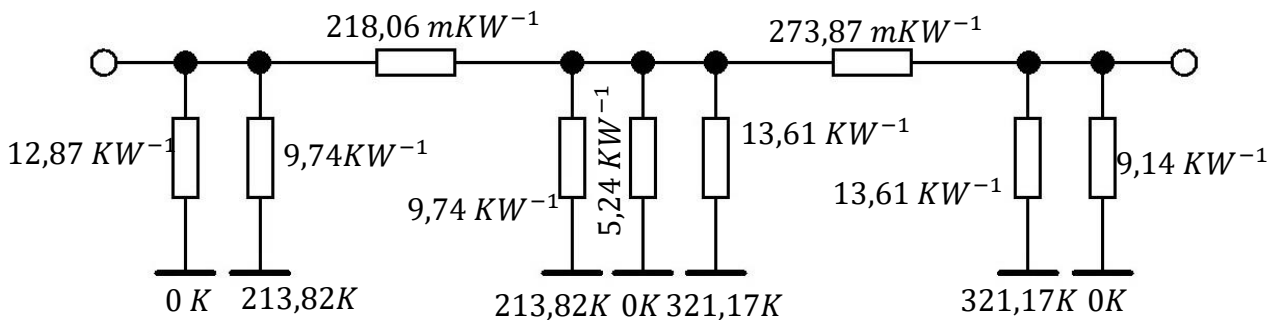
$$R_{ST} = \frac{1}{\lambda_{vz90}} \cdot \frac{\delta}{s} = \frac{1}{0,0296} \cdot \frac{100 \cdot 10^{-6}}{24,05 \cdot 10^{-4}} = 1,404 \text{ KW}^{-1}.$$

Celkový tepelný odpor U-profilu s uvážením stykového odporu:

$$R_{Tt_chU} = \frac{R_{Tt_ch} + R_{ST}}{2} = \frac{9,072 + 1,404}{2} = 5,238 \text{ KW}^{-1}.$$

4.4.18 Kompletní tepelné schéma praporce na straně pevného kontaktu

Na základě obrázků 4.8, 4.9 a příčného odporu U-profilu je sestaveno tepelné schéma praporce na straně pevného kontaktu:

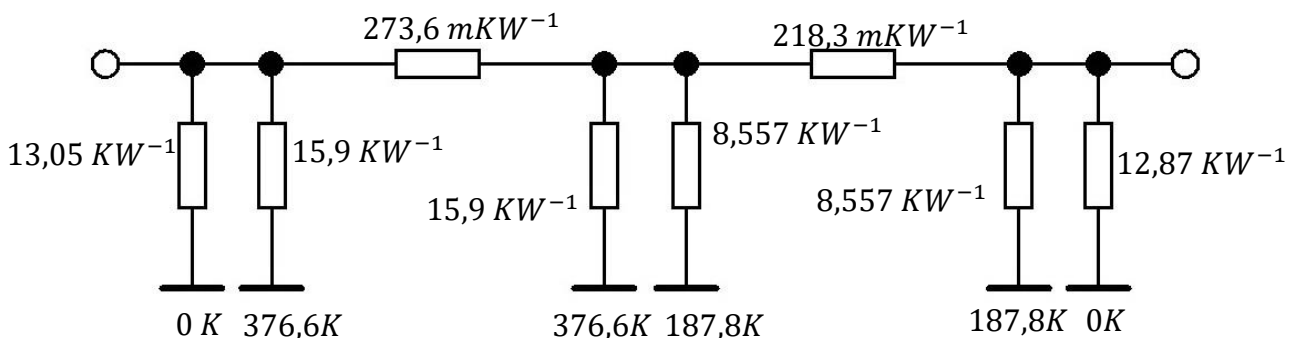


Obrázek 4.11 Kompletní tepelné schéma praporce na straně pevného kontaktu

4.4.19 Praporec na straně pohyblivého kontaktu

Praporec na straně pohyblivého kontaktu je konstrukčně identický s praporcem u pevného kontaktu. Jedinými rozdíly jsou absence U-profilu a uvážení činitele stínění 0,7 pro praporec P2, protože je zastíněn ocelovou stříškou, která chrání pohyblivý kontakt před zamrznutím.

Postup výpočtu je stejný jako v podkapitolách 4.4.1 až 4.4.16, tepelné schéma praporce na straně pohyblivého kontaktu je na obrázku 4.12.

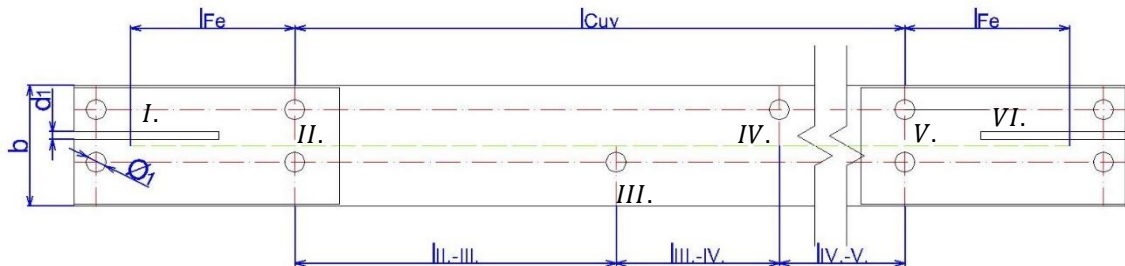


Obrázek 4.12 Kompletní tepelné schéma praporce na straně pohyblivého kontaktu

4.5 Výpočet náhradního schématu kontaktního nože

Na obrázku 4.13 je náčrt jednoho kontaktního nože s obecnými kótami o tloušťce h . Na jednu fázi připadají 4 kontaktní nože, které jsou vůči sobě paralelně. Mezi jednotlivými noži jsou v naznačených dírách připevněny distanční válečky, které zvyšují mechanickou pevnost a v tepelném schématu jsou uvažovány jako chladiče. Pohyblivý kontakt (na pravé straně nože) je chráněn stříškou, která je ze stejného materiálu jako ocelový U-profil u praporce. Stříška slouží k tomu, aby při instalacích odpojovače v nízkých teplotách okolí nedocházelo k zamrznutí pohyblivého kontaktu, v tepelném schématu je nahrazena jako chladič. Kontaktní nůž je v tepelném schématu nahrazen jedním π -článkem a řadou chladičů jak na jeho koncích, tak podél proudovodné dráhy. Proto je během výpočtu podélný tepelný odpor poměrově rozdělen na více částí.

Na přání firmy IVEP a.s. je následující výpočet pro sestavu kontaktních nožů proveden pouze obecně s číselnými výsledky, protože si firma nepřeje uvádět citlivé informace z výkresové dokumentace kontaktního nože.



Obrázek 4.13 Kontaktní nůž a jeho schématické rozdělení

4.5.1 Určení koeficientu zhuštění proudnic kontaktního nože

Na obrázku 4.13 jsou znázorněna čtyři zúžení v bodech I.-VI. Vlivem děr nebo zúžení průřezu nože:

Bod I. a bod VI.:

$$a = b - d_1.$$

Z grafu v literatuře [11], na str. 31, Obr. 2-5 na str. 31 je na základě $\frac{a}{b}$ a typu zúžení určen koeficient zhuštění proudnic od jedné díry.

$$K_1 \left(\frac{a}{b}; \text{charakteristika 1} \right) = 1,02 = K_6$$

Bod II až bod V.:

$$a = b - \varnothing_1.$$

Z grafu v literatuře [11] na str. 31 je na základě $\frac{a}{b}$ a typu zúžení určen koeficient zhuštění proudnic od jedné díry.

$$K_3 \left(\frac{a}{b}; \text{charakteristika 4} \right) = 1,18 = K_4,$$

$$K_2^2 = K_5^2 = K_3^2 = 1,18^2 = 1,392.$$

4.5.2 Skinefekt a jev blízkosti kontaktního nože

Proud tekoucí kontaktními noži způsobí zhuštění proudnic blíže k povrchu nože, toto zhuštění má za následek zvýšení elektrického odporu. Koeficient zvýšení odporu vlivem skinefektu pro kontaktní nůž se vypočte obdobně jako v předchozích kapitolách, kde se průřez vypočte jako:

$$S = b \cdot h.$$

Z grafu v literatuře [11], na str. 29, Obr. 2-3 na str. 29 je na základě $\frac{b}{h}$ a $\sqrt{\frac{S \cdot f}{\rho_{Cu110}}}$ určen koeficient skinefektu k_s :

$$k_s \left(\frac{b}{h}; \sqrt{\frac{S \cdot f}{\rho_{Cu110}}} \right) = 1,03.$$

Z grafu v literatuře [11], na str. 30, Obr. 2-4 na str. 30 je na základě $\frac{c}{h}$, kde c značí osovou vzdálenost dvou nožů, a $\sqrt{\frac{S \cdot f}{\rho_{Cu110}}}$ určen koeficient jevu blízkosti k_{bl} :

$$k_{bl} \left(\frac{a}{d}; \sqrt{\frac{S \cdot f}{\rho_{Cu110}}} \right) = 1,03.$$

4.5.3 Výpočet elektrického odporu jednoho kontaktního nože

Z obrázku 4.13 je odečtena střední délka proudnice nože $l_{stř}$ (zelená čára). Při uvážení všech vlivů na zvýšení elektrického odporu kontaktní nože, se odpor jednoho v nich vypočte:

$$R_N = \frac{\rho_{Cu110}}{S} \cdot (l_{stř} + b \cdot (2 \cdot K_1 + 2 \cdot K_2 + 2 \cdot K_3^2 - n)) \cdot k_s \cdot k_{bl} = 59,16 \mu\Omega.$$

4.5.4 Výpočet měrné chladivosti kontaktního nože

Materiál nože je shodný s ostatními dílci proudvodné dráhy, tudíž vzorec pro výpočet měrné chladivosti bude stejný, nicméně je nutné brát v potaz odlišný koeficient zastínění.

Činitel stínění okolními předměty je s rezervou odhadnut na $k_{z1} = 0,8$. Činitel vzájemného stínění vnitřních ploch je vypočten pomocí výšky nože h a osové vzdálenosti dvou nožů c :

$$k_{z2} = \frac{h+c-\sqrt{c^2+h^2}}{h} = 0,45.$$

Pro koeficient celkového stínění vnitřních ploch platí:

$$k_n = k_{z1} \cdot k_{z2} = 0,8 \cdot 0,45 = 0,36.$$

Dále je nutné vypočíst chladicí plochu vnitřní strany nože $P_{n1} = 0,039m^2$, kde je od obdélníkové plochy vnitřní strany nože ohraničené střední délkou proudnice odečteno zúžení nože a plochy zakryté distančními válečky. Pro vnější plochu kontaktního $P_{n2} = 0,034m^2$ platí, že je od obdélníkové plochy vnější strany nože ohraničené střední délkou proudnice odečtena plocha ocelových příložek a ploch zakrytých distančními válečky.

Pro výsledný činitel stínění platí:

$$k_{zn} = \frac{k_n \cdot P_{n1} + k_{z1} \cdot P_{n2}}{P_{n1} + P_{n2}} = \frac{0,36 \cdot 0,039 + 0,8 \cdot 0,034}{0,039 + 0,034} = 0,565.$$

Měrná chladivost zářením je určena z:

$$\alpha_z = k_{zn} \cdot (2,8 + 0,017 \cdot \Delta\vartheta_z) = 0,565 \cdot (2,8 + 0,017 \cdot 70) = 2,25 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}.$$

Měrná chladivost prouděním pro kontaktní nůž je stejná jako pro praporec P1, protože mají stejnou šířku:

$$\alpha_K = 4,18 + 0,0532 \cdot \Delta\vartheta_z = 4,18 + 0,0532 \cdot 70 = 7,904 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}.$$

Výsledná měrná chladivost kontaktního nože je rovna:

$$\alpha_c = \alpha_z + \alpha_K = 2,25 + 7,904 = 10,157 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}.$$

4.5.5 Výpočet náhradního schématu kontaktního nože

Pro velikost chladícího obvodu platí:

$$O_v = \frac{P_{n1} + P_{n2}}{l_{stř}} = \frac{0,039 + 0,034}{l_{stř}} = 0,110 \text{ m}.$$

Parametry náhradního schématu jsou rovny:

$$\beta \cdot l_{stř} = l_{stř} \cdot \sqrt{\frac{\alpha_c \cdot 4 \cdot O_v}{\lambda_{Cu} \cdot 4 \cdot S}} = l_{stř} \cdot \sqrt{\frac{10,157 \cdot 4 \cdot 0,110}{385 \cdot 4 \cdot S}} = 2,077,$$

$$\delta = \sqrt{\alpha_c \cdot 4 \cdot O_v \cdot \lambda_{Cu} \cdot 4 \cdot S} = \sqrt{10,157 \cdot 4 \cdot 0,110 \cdot 385 \cdot 4 \cdot S} = 1,434,$$

$$R_{Tl} = \frac{\sinh \beta \cdot l_{stř}}{\delta} = \frac{\sinh 2,077}{1,434} = 2,738 \text{ KW}^{-1},$$

$$R_{Tt} = \frac{1}{\delta \cdot \tanh \frac{\beta \cdot l_{stř}}{2}} = \frac{1}{1,434 \cdot \tanh \frac{2,077}{2}} = 0,897 \text{ KW}^{-1},$$

$$\Delta\vartheta_\infty = \frac{R_N \cdot I^2}{\alpha_c \cdot 4 \cdot P} = \frac{59,16 \cdot 10^{-6} \cdot 4000^2}{10,157 \cdot 4 \cdot (0,039 + 0,034)} = 79,438 \text{ K}.$$

4.5.6 Uvážení konců nože jako chladičů

Měděné konce nože, které nejsou protékány proudem, slouží jako chladič. Při určování měrné chladivosti zářením jsou uvažovány stejné koeficienty zastínění vnější a vnitřních ploch jako v přechozí podkapitole. Vnitřní strana 4 konců nože je rovna $P_{ch1} = 5,04 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ a vnější strana s boky nože odpovídá $P_{ch2} = 2,46 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ po odečtení ploch zakrytých ocelovými příložkami a distančními válečky. Výsledný činitel stínění konců nožů je roven:

$$k_{zn} = \frac{k_n \cdot P_{ch1} + k_{z1} \cdot P_{ch2}}{P_{ch1} + P_{ch2}} = \frac{0,36 \cdot 5,04 \cdot 10^{-3} + 0,8 \cdot 2,46 \cdot 10^{-3}}{5,04 \cdot 10^{-3} + 2,46 \cdot 10^{-3}} = 0,504.$$

Měrná chladivost zářením je určena z:

$$\alpha_z = k_{zn} \cdot (2,8 + 0,017 \cdot \Delta\vartheta_z) = 0,504 \cdot (2,8 + 0,017 \cdot 70) = 2,012 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}.$$

Měrná chladivost prouděním pro konce kontaktního nože je stejná jako pro praporec P1, protože mají stejnou šířku:

$$\alpha_K = 4,18 + 0,0532 \cdot \Delta\vartheta_z = 4,18 + 0,0532 \cdot 70 = 7,904 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}.$$

Výsledná měrná chladivost kontaktního nože je rovna:

$$\alpha_c = \alpha_z + \alpha_K = 2,012 + 7,904 = 9,916 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}.$$

Tepelný odpor konců nože je roven:

$$R_{Tt_ch} = \frac{1}{\alpha_C \cdot (P_{ch1} + P_{ch2})} = \frac{1}{9,916 \cdot (5,04 \cdot 10^{-3} + 2,46 \cdot 10^{-3})} = 13,438 \text{ KW}^{-1}.$$

V $\frac{3}{4}$ délky konce nože je dvojice dvou distančních válečků se stykovým odporem, které slouží v tepelném schématu jako chladiče. Tepelný odpor konce nože rozdělíme na dva odpory v sérii v poměru 4:1:

$$\frac{3}{4} \cdot R_{Tt_ch} = \frac{3}{4} \cdot 13,438 = 10,08 \text{ KW}^{-1},$$

$$\frac{1}{4} \cdot R_{Tt_ch} = \frac{1}{4} \cdot 13,438 = 3,36 \text{ KW}^{-1}.$$

Distanční váleček je pomyslně rozdělen na polovinu a každé polovině válečku je přiřazen jeden stykový odpor. \varnothing_v značí průměr válečku a d_1 je délka válečku tudíž, je chladivá plocha jedné poloviny jednoho válečku rovna:

$$P_{chv1/2} = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot \varnothing_v \cdot d_1 = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot 0,014 \cdot 0,038 = 8,36 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2.$$

Pro výpočet měrné chladiivosti zářením je uvažován koeficient celkového stínění vnitřních ploch $k_n = 0,36$.

Měrná chladiivost zářením se vypočte podle stejného vzorce jako pro U-profil pro násobeným koeficientem celkového stínění vnitřních ploch k_n :

$$\alpha_Z = k_n \cdot (4,9 + 0,02975 \cdot \Delta\vartheta_Z) = 0,36 \cdot (4,9 + 0,02975 \cdot 70) = 2,512 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1}.$$

Šířka válečku pro určení měrné chladiivosti prouděním se určuje jen obtížně, uvažovaná šířka je obvod válečku, který je roven 44 mm. V literatuře [11], na str. 52, Tab. 2-10 není uveden vzorec pro měrnou chladiivost prouděním pro šířku válečku 44 mm, proto je výsledný vzorec lineárně aproximován:

$$\text{pro } 50 \text{ mm } \alpha_K = 4,3 + 0,055 \cdot \Delta\vartheta_Z,$$

$$\text{pro } 10 \text{ mm: } \alpha_K = 6 + 0,09 \cdot \Delta\vartheta_Z.$$

Výsledný vzorec pro šířku 44 mm:

$$\alpha_K = \left(4,3 + \frac{6-4,3}{40} \cdot (50 - 44) \right) + \left(0,055 + \frac{0,09-0,055}{40} \cdot (50 - 44) \right) \cdot \Delta\vartheta_Z,$$

$$\alpha_K = 4,555 + 0,6025 \cdot \Delta\vartheta_Z = 4,555 + 0,6025 \cdot 70 = 8,773 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1}.$$

Výsledná měrná chladiivost válečku je rovna:

$$\alpha_C = \alpha_Z + \alpha_K = 2,512 + 8,773 = 11,284 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1}.$$

Tepelný odpor jedné poloviny válečku:

$$R_{Tt_chv1/2} = \frac{1}{\alpha_C \cdot P_{chv1/2}} = \frac{1}{11,284 \cdot 8,36 \cdot 10^{-4}} = 106,05 \text{ KW}^{-1}.$$

Odpor přestupu tepla přes vzduchovou mezeru mezi válečkem a koncem nože se vypočte obdobně jak u U-profilu. Součinitel tepelné vodivosti pro vzduch je roven:

$$\lambda_{vz90} = 0,0296 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}.$$

Styčná plocha válečku a konce nože je rovna:

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,014^2}{4} = 1,54 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2.$$

Odpor přestupu tepla přes vzduchovou mezeru o šířce 100 μm je roven:

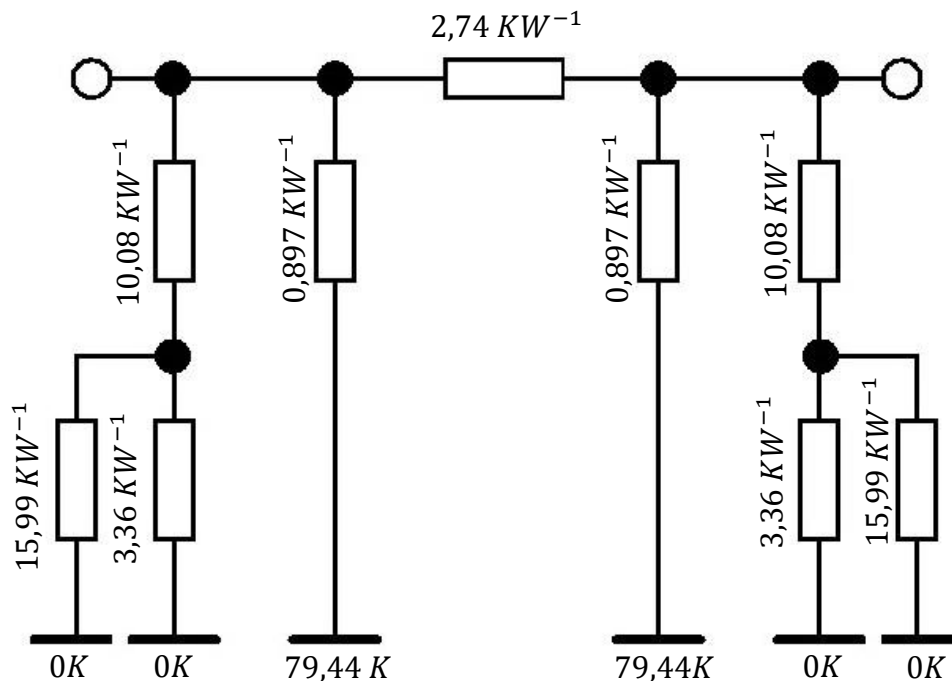
$$R_{ST} = \frac{1}{\lambda_{vz90}} \cdot \frac{\delta}{S} = \frac{1}{0,0296} \cdot \frac{100 \cdot 10^{-6}}{1,54 \cdot 10^{-4}} = 21,95 \text{ KW}^{-1}.$$

Celkový tepelný odpor polovin válečků s uvážením stykového odporu je paralelní kombinací 8 těchto dvou odporů v sérii:

$$R_{Tt_chc} = \frac{R_{Tchv1/2} + R_{ST}}{8} = \frac{106,05 + 21,95}{8} = 15,99 \text{ KW}^{-1}.$$

4.5.7 Dosavadní tepelné schéma kontaktního nože

Na základě vypočtených hodnot z přecházejících podkapitol je sestaveno dosavadní tepelné schéma nože:



Obrázek 4.14 Dosavadní tepelné schéma nože

4.5.8 Uvážení ocelových příložek jako chladiče

Ocelové příložky z nemagnetické oceli jsou nahrazeny jako chladiče, chladivá plocha jedné příložky s respektováním výřezu a zvětšení plochy o 10 % vlivem šroubů je rovna $P_{chFe} = 9,4 \cdot 10^{-3} m^2$.

Měrná chladiivost zářením se vypočte stejně jako v případě U-profilu, ale koeficient zastínění je uvažován pro vnější plochy nože $k_{z1} = 0,8$:

$$\alpha_z = k_{z1} \cdot (4,9 + 0,02975 \cdot \Delta\vartheta_z) = 0,8 \cdot (4,9 + 0,02975 \cdot 70) = 5,586 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1}.$$

Šířka ocelové příložky je 58 mm. V literatuře [11], na str. 52, Tab. 2-10 není uveden vzorec pro měrnou chladiivost prouděním pro šířku 58 mm, proto je výsledný vzorec lineárně aproximován:

$$\text{pro } 100 \text{ mm: } \alpha_K = 3,7 + 0,046 \cdot \Delta\vartheta_z,$$

pro 50 mm $\alpha_K = 4,3 + 0,055 \cdot \Delta\vartheta_z$.

Výsledný vzorec pro šířku 58 mm:

$$\alpha_K = \left(3,7 + \frac{4,3-3,7}{50} \cdot (100 - 58) \right) + \left(0,046 + \frac{0,055-0,046}{50} \cdot (100 - 58) \cdot \Delta\vartheta_z \right),$$

$$\alpha_K = 4,204 + 0,0536 \cdot \Delta\vartheta_z = 4,204 + 0,0536 \cdot 70 = 7,953 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}.$$

Výsledná měrná chladivost ocelové příložky je rovna:

$$\alpha_C = \alpha_Z + \alpha_K = 5,586 + 7,953 = 13,539 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}.$$

Tepelný odpor jedné ocelové příložky:

$$R_{Tt_chFe} = \frac{1}{\alpha_C \cdot P_{chFe}} = \frac{1}{13,539 \cdot 9,4 \cdot 10^{-3}} = 7,855 \text{ KW}^{-1}.$$

Odpor přestupu tepla přes vzduchovou mezeru mezi válečkem a koncem nože se vypočte obdobně jak u U-profilu. Součinitel tepelné vodivosti tepla pro vzduch je roven: $\lambda_{vz90} = 0,0296 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$.

Styčná plocha nože a příložky je rovna obdélníkové styčné ploše příložky s odečtením plochy zúžení:

$$S = 7,368 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2.$$

Odpor přestupu tepla přes vzduchovou mezeru o šířce 100 μm je roven:

$$R_{ST} = \frac{1}{\lambda_{vz90}} \cdot \frac{\delta}{S} = \frac{1}{0,0296} \cdot \frac{100 \cdot 10^{-6}}{7,368 \cdot 10^{-3}} = 0,459 \text{ KW}^{-1}.$$

Celkový tepelný odpor ocelové příložky a stykového odporu se vypočte jako paralelní kombinace 4 součtů těchto odporů:

$$R_{Tt_chc} = \frac{R_{Tt_chFe} + R_{ST}}{4} = \frac{7,855 + 0,459}{4} = 2,078 \text{ KW}^{-1}.$$

Pro lepší interpretaci reality je odpor ocelové příložky dále rozdělen na dva paralelní odpory. Jeden, z nichž je umístěn do místa styku kontaktního nože, a praporec a druhý, který je umístěn do zúžení Bod II.

Pro dva paralelní odpory platí:

$$R_{Tt_chc1} = 2 \cdot R_{Tt_chc} = 2 \cdot 2,078 = 4,157 \text{ KW}^{-1}.$$

Podélný odpor nože R_{Tl} je rozdělen v poměru délky ocelových příložek a čisté mědi proudovodné dráhy dle obrázku 4.13:

$$l_{Fe} : l_{Cuv} : l_{Fe},$$

$$R_{Tl1} = R_{Tl3} = \frac{l_{Fe}}{l_{Fe} + l_{Cuv} + l_{Fe}} \cdot R_{Tl} = 0,155 \cdot 2,738 = 0,426 \text{ KW}^{-1},$$

$$R_{Tl2} = R_{Tl} - 2 \cdot R_{Tl1} = 2,738 - 2 \cdot 0,426 = 1,887 \text{ KW}^{-1}.$$

4.5.9 Uvážení distančních válečků jako chladiče

V bodech zúžení II. až V. jsou mezi noži umístěny distanční ocelové válečky dvou velikostí, které pro účely tepelného schématu slouží jako chladiče. Počet válečků i jejich délka se pro různé body liší. Z kapitoly 4.5.6 je již spočítaný stykový odpor pro distanční válečky $R_{ST} = 21,95 \text{ KW}^{-1}$ a příčný tepelný odpor jedné poloviny válečku o délce 38 mm $R_{Tt_chv1/2} = 106,05 \text{ KW}^{-1}$. Zbývá tedy určit tepelný odpor delších válečků o

průměru $d_2 = 82$ mm, které jsou umístěny mezi dvěma dvojicemi nožů a následně pro každý bod vyčíslit paralelní kombinaci dílčích tepelných odporů.

Polovina chladicí plochy delšího z válečků:

$$P_{chvd1/2} = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot \varnothing_v \cdot d_2 = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot 0,014 \cdot 0,082 = 3,61 \cdot 10^{-4} m^2.$$

Pro výpočet měrné chladivosti zářením je uvažován koeficient stínění vnějších ploch: $k_{z1} = 0,8$.

Měrná chladivost zářením se vypočte podle stejného vzorce jako pro U-profil pronásobeným činitelem stínění vnějších ploch k_{z1} :

$$\alpha_Z = k_{z1} \cdot (4,9 + 0,02975 \cdot \Delta\vartheta_Z) = 0,8 \cdot (4,9 + 0,02975 \cdot 70) = 5,586 Wm^{-2}K^{-1}.$$

Pro výpočet měrné chladivosti prouděním, je využit lineárně aproximovaný vzorec z kapitoly 4.5.6:

$$\alpha_K = 4,555 + 0,6025 \cdot \Delta\vartheta_Z = 4,555 + 0,6025 \cdot 70 = 8,773 Wm^{-2}K^{-1}.$$

Výsledná měrná chladivost delšího válečku je rovna:

$$\alpha_C = \alpha_Z + \alpha_K = 5,586 + 8,773 = 14,359 Wm^{-2}K^{-1}.$$

Tepelný odpor jedné poloviny delšího válečku:

$$R_{Tt_chvd1/2} = \frac{1}{\alpha_C \cdot P_{chvd1/2}} = \frac{1}{14,359 \cdot 3,61 \cdot 10^{-4}} = 38,62 KW^{-1}.$$

Pro sériová spojení tepelných odporů polovin válečků a stykového odporu platí:

$$R_{Tt_chv1/2+ST} = 106,05 + 21,95 = 127,99 KW^{-1},$$

$$R_{Tt_chvd1/2+ST} = 106,05 + 21,95 = 60,57 KW^{-1}.$$

V místech zúžení II., IV. a V. jsou umístěny dva kratší a jeden delší váleček, výsledný tepelný odpor je roven:

$$R_{Tt_ch I.} = R_{Tt_ch IV.} = R_{Tt_ch V.} = \left(\frac{4}{R_{Tt_chv1/2+ST}} + \frac{2}{R_{Tt_chvd1/2+ST}} \right)^{-1} = \left(\frac{4}{127,99} + \frac{2}{60,57} \right)^{-1} = 15,56 KW^{-1}.$$

Tepelný odpor v místě zúžení III. je tvořen dvěma kratšími válečky:

$$R_{Tt_ch III.} = \left(\frac{4}{R_{Tt_chv1/2+ST}} \right)^{-1} = \left(\frac{4}{127,99} \right)^{-1} = 32,00 KW^{-1}.$$

Tyto tepelné odpory dále dělá podélný odpor $R_{Tl2} = 1,887 KW^{-1}$, dle poměru délek:

$$l_{II.-III.} : l_{III.-IV.} : l_{IV.-V.},$$

$$R_{Tl2_1} = \frac{l_{II.-III.}}{l_{II.-III.} + l_{III.-IV.} + l_{IV.-V.}} \cdot R_{Tl2} = 0,323 \cdot 1,887 = 0,6099 KW^{-1},$$

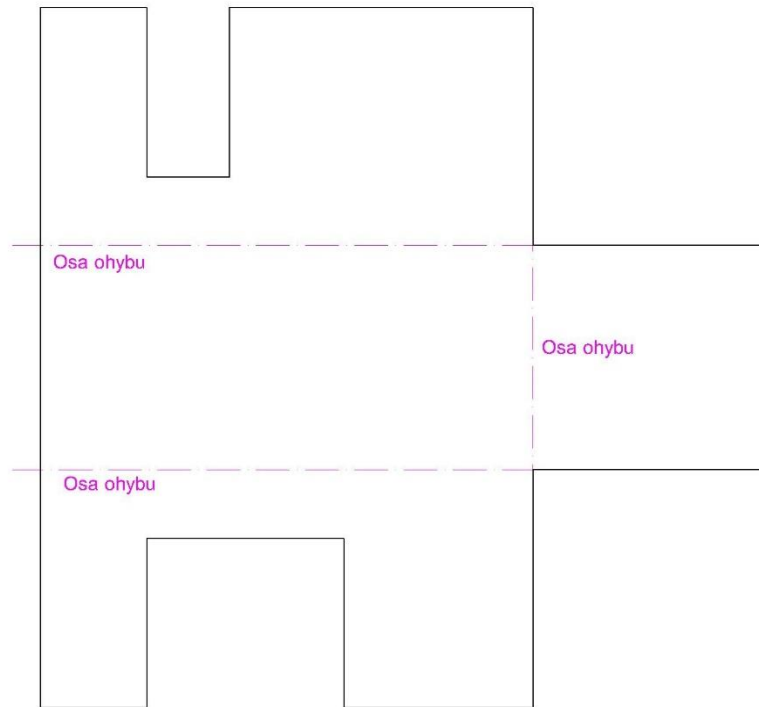
$$R_{Tl2_2} = \frac{l_{III.-IV.}}{l_{II.-III.} + l_{III.-IV.} + l_{IV.-V.}} \cdot R_{Tl2} = 0,177 \cdot 1,887 = 0,3336 KW^{-1},$$

$$R_{Tl2_3} = R_{Tl2} - R_{Tl2_1} - R_{Tl2_2} = 1,887 - 0,6099 - 0,3336 = 0,9434 KW^{-1}.$$

4.5.10 Uvážení stříšky nad pohyblivým kontaktem jako chladiče

Stříška pohyblivého kontaktu je ze stejné oceli jako U-profil a slouží k ochraně pohyblivého kontaktu před zamrzáním.

Na obrázku 4.15 je přibližně vyobrazena daná stříška v rozvinutém stavu, kde jsou naznačeny osy ohybu stříšky, kde se materiál ohýbá o 90°.



Obrázek 4.15 Rozvinutá stříška

Měrná chladivost zářením se určí dle stejného vzorce jako pro U-profil, vnitřní strana stříšky je zastíněna noži odpojovače a samotnými vnitřními strana obecně, je proto uvažován činitel stínění $N = 0,7$:

$$\alpha_z = N \cdot (4,9 + 0,02975 \cdot \Delta\vartheta_z) = 0,7 \cdot (4,9 + 0,02975 \cdot 70) = 4,888 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}.$$

Šířka stříšky se těžko určuje, s ohledem na zúžení je uvažována šířka 200 mm. V literatuře [11], na str. 52, Tab. 2-10 pro měrnou chladivost prouděním pro šířku 200 mm platí vzorec:

$$\alpha_K = 3,3 + 0,035 \cdot \Delta\vartheta_z = 3,3 + 0,035 \cdot 70 = 5,750 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}.$$

Výsledná měrná chladivost ocelové příložky je rovna:

$$\alpha_C = \alpha_z + \alpha_K = 4,888 + 5,750 = 10,638 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}.$$

Chladivá plocha P_{ch1} pro vnější strany a chladivá plocha P_{ch2} pro vnitřní strany a hrany jsou rovny:

$$P_{ch1} = 48,73 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2,$$

$$P_{ch2} = 48,54 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2.$$

Pro celkovou chladivou plochu platí při uvažování efektivit $\frac{2}{3}$ pro chladící plochu

P_{ch2} :

$$P_{chc} = P_{ch1} + \frac{2}{3} \cdot P_{ch2} = 48,73 \cdot 10^{-3} + \frac{2}{3} \cdot 48,54 \cdot 10^{-3} = 81,09 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2.$$

Tepelný odpor jedné stříšky:

$$R_{Tt_ch} = \frac{1}{\alpha_c \cdot P_{chc}} = \frac{1}{10,638 \cdot 81,09 \cdot 10^{-3}} = 1,16 \text{ KW}^{-1}.$$

Odpor přestupu tepla přes vzduchovou mezeru mezi nožem a stříškou se vypočte obdobně jak u U-profilu. Součinitel tepelné vodivosti tepla pro vzduch je roven: $\lambda_{vz90} = 0,0296 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

Styčná plocha nože a stříšky je rovna:

$$S = 8,8 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2.$$

Odpor přestupu tepla přes vzduchovou mezeru o šířce 100 μm je roven:

$$R_{ST} = \frac{1}{\lambda_{vz90}} \cdot \frac{\delta}{S} = \frac{1}{0,0296} \cdot \frac{100 \cdot 10^{-6}}{8,8 \cdot 10^{-4}} = 3,84 \text{ KW}^{-1}.$$

Celkový tepelný odpor ocelové stříšky a stykového odporu se vypočte jako paralelní kombinace 2 součtů těchto odporů:

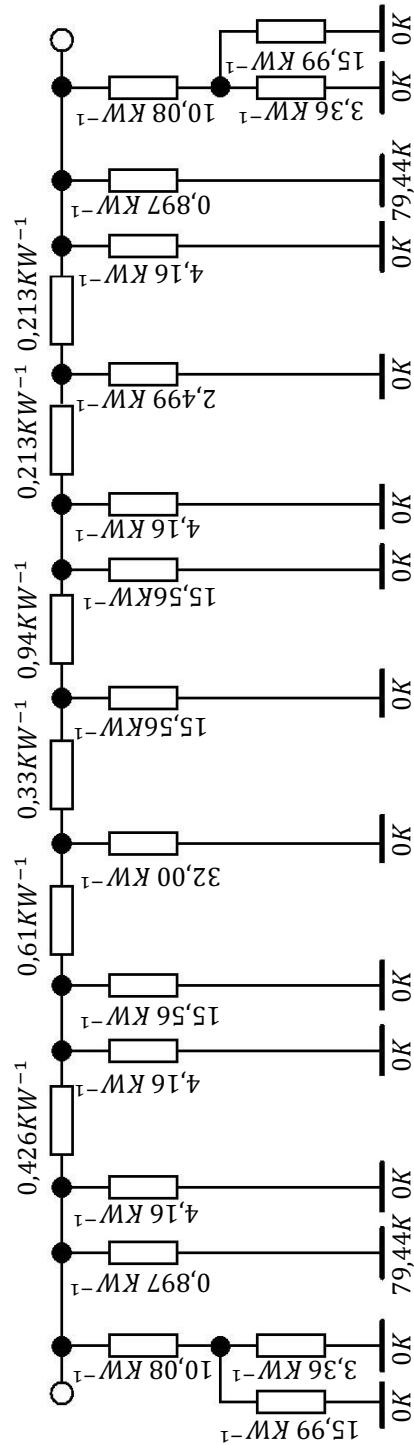
$$R_{Tt_chc} = \frac{R_{Tt_ch} + R_{ST}}{2} = \frac{1,16 + 3,84}{2} = 2,499 \text{ KW}^{-1}.$$

Ocelová stříška je k noži připojena v jedné polovině délky podélného odporu R_{Tl3} , proto je tento podélný odpor rozdělen poměrově na:

$$R_{Tl3_1/2} = \frac{1}{2} \cdot R_{Tl3} = \frac{1}{2} \cdot 0,426 = 0,213 \text{ KW}^{-1}.$$

4.5.11 Kompletní schéma tepelné schéma kontaktního nože

Na základě vypočtených hodnot z přecházejících podkapitol a obrázku 4.14 je sestaveno kompletní tepelné schéma nože:



Obrázek 4.16 Kompletní tepelné schéma nože

4.6 Výpočet náhradního schématu kontaktního pracovního styku

Kontaktní styk je realizován pomocí 4 kontaktních nožů dopadajících na dva paralelní praporce. Přítlačná síla v místě kontaktního styku je dána součtem působení dílčích sil jako: přítlačná síla od pružin, úžinová síla, síly působící mezi vodiči jedné a více fází, síla mezi praporcem a kontaktním nožem. Z rovnice rovnosti sil v kontaktním styku při nominálním proudu 4000 A vychází zvýšení přítlačné síly jen ve stovkách mN, proto je toto navýšení přítlačné síly zanedbáno a je počítáno pouze s přítlačnou silou pružin v místě kontaktního styku.

4.6.1 Výpočet parametrů tepelného schématu kontaktního pracovního styku

Je uvažována střední hodnota přítlačné síly pružiny 270 N, pro přítlačnou sílu v kontaktním styku od dvou pružin platí:

$$F_p = 2 \cdot 270 = 540 \text{ N.}$$

V literatuře [11], na str. 33, Tab. 2-2 je odečtena materiálová konstanta k pro kontaktní styk a z téže strany je určen exponent n popisující druh kontaktního styku. Elektrický odpor v jednom přímkovém styku se vypočte jako:

$$R_S = \frac{k}{F_p^n} = \frac{6 \cdot 10^{-4}}{540^{0,7}} = 7,34 \mu\Omega.$$

Pro určení tepelného odporu kontaktního styku je z literatury [11], na str. 61, v Tab. 2-15 odečten činitel přestupu tepla mezerou v okolí kontaktních stykových plošek c . Pro plochu kontaktního styku S a šířku vzduchové mezery δ platí:

$$S = 60 \cdot 2 = 1,2 \text{ cm}^2,$$

$$\delta = 0,1 \text{ mm},$$

$$c(S; \delta) = 0,8.$$

Tepelný odpor jednoho kontaktního místa se vypočte jako:

$$R_{TK1} = \frac{c \cdot R_S}{\lambda_{Cu} \cdot \rho_{Cu110}} = \frac{0,8 \cdot 7,34 \cdot 10^{-6}}{385 \cdot 23,28 \cdot 10^{-9}} = 0,655 \text{ KW}^{-1}.$$

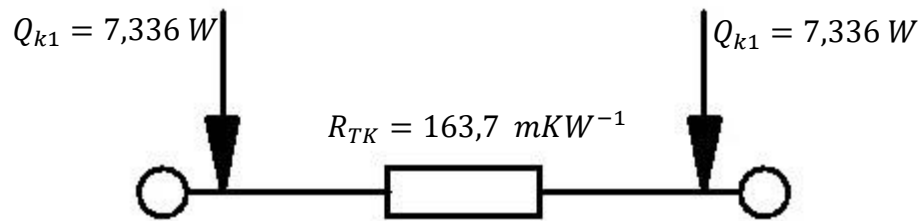
V kontaktním styku odpojovače jsou 4 tato kontaktní místa paralelně, proto je jejich výsledný tepelný odpor roven:

$$R_{TK} = \frac{R_{TK1}}{4} = \frac{0,655}{4} = 163,7 \text{ mKW}^{-1}.$$

Tepelné ztráty vznikající v pracovním styku jsou rovny:

$$Q_{k1} = R_S \cdot \left(\frac{I}{4}\right)^2 = 7,34 \cdot 10^{-6} \cdot \left(\frac{4000}{4}\right)^2 = 7,336 \text{ W}.$$

4.6.2 Kompletní tepelné schéma kontaktního pracovního styku



Obrázek 4.17 Kompletní tepelné schéma kontaktního pracovního styku

4.7 Výpočet náhradního schématu šroubového kontaktního styku praporce a spojnice praporců

Přítláčnou sílu ve dvou paralelních kontaktních stycích zajišťuje dvojice šroubů M 16.

4.7.1 Výpočet přítláční síly šroubu M16

Pro normovaný šroub M16 ISO 8765 je odečteno stoupání $R = 2$ mm, průměr jádra $d_j = 13,271$ mm, průměr stoupání $d_s = 14,503$ mm. Koeficient tření pro styk ocel/ocel bez maziva je roven $f = 0,2$.

Třecí úhel šroubu je roven:

$$\gamma = \arctg f = \arctg 0,2 = 0,197 \text{ rad.}$$

Z dostupných hodnot je určen úhel stoupání:

$$\varphi = \arctg \frac{R}{\pi \cdot d_s} = \arctg \frac{2}{\pi \cdot 14,503} = 0,044 \text{ rad.}$$

Teoretická přítláčná síla jednoho šroubu při dotažení momentem 80 Nm je rovna:

$$F_{p1} = \frac{2 \cdot M_n}{d_s \cdot \text{tg}(\gamma + \varphi)} = \frac{2 \cdot 80}{14,503 \cdot 10^{-3} \cdot \text{tg}(0,197 + 0,044)} = 44,84 \text{ kN.}$$

Při uvážení otláčení měděných ploch při tepelném rozpínání mědi a šroubů je předpokládáno s rezervou snížení přítláčné síly na 10 %. Pro přítláčnou sílu od obou šroubů potom platí:

$$F_p = 0,1 \cdot 2 \cdot F_{p1} = 0,1 \cdot 2 \cdot 44,84 = 8967 \text{ N.}$$

4.7.2 Výpočet parametrů náhradního schématu šroubového kontaktního styku praporce a spojnice praporců

Obdobně jako v podkapitole 4.6.1 je v literatuře [11], na str. 33, Tab. 2-2 je odečtena materiálová konstanta k pro kontaktní styk a je určen exponent n popisující druh kontaktního styku. Elektrický odpor v jednom plošném styku se vypočte jako:

$$R_{S1} = \frac{k}{F_p^n} = \frac{6 \cdot 10^{-4}}{8967^1} = 66,91 \text{ n}\Omega.$$

Pro dva identické paralelní elektrické odpory ve styku platí:

$$R_S = \frac{R_{S1}}{2} = \frac{66,91}{2} = 33,45 \text{ n}\Omega.$$

Obdobně jako v podkapitole 4.6.1 je pro určení tepelného odporu kontaktního styku je z literatury [11], na str. 61, v Tab. 2-15 odečten činitel přestupu tepla mezerou v okolí kontaktních stykových plošek c . Pro plochu kontaktního styku S a šířku vzduchové mezery δ platí:

$$S = 2 \cdot \left(80 \cdot 45 - 2 \cdot \frac{\pi \cdot 1,8^2}{4} \right) = 61,8 \text{ cm}^2,$$

$$\delta = 0,1 \text{ mm},$$

$$c(S; \delta) = 0,5.$$

Výsledný tepelný odpor dvou paralelních styků se vypočte:

$$R_{TK} = \frac{c \cdot R_S}{\lambda_{Cu} \cdot \rho_{Cu110}} = \frac{0,5 \cdot 33,45 \cdot 10^{-9}}{385 \cdot 23,28 \cdot 10^{-9}} = 1,87 \text{ mKW}^{-1}.$$

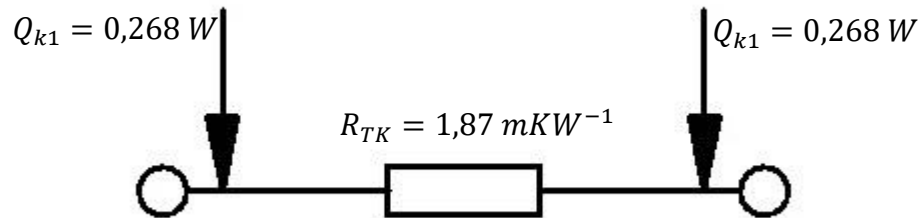
Tepelné ztráty vznikající v šroubovém kontaktním styku jsou rovny:

$$Q_k = R_S \cdot I^2 = 33,45 \cdot 10^{-9} \cdot 4000^2 = 0,535 \text{ W}.$$

Do náhradního tepelného schématu jsou z každé strany podélného odporu R_{TK} přiveden tepelný tok:

$$Q_{k1} = \frac{Q_k}{2} = \frac{0,535}{2} = 0,268 \text{ W}.$$

4.7.3 Kompletní tepelné schéma šroubového kontaktního styku praporce a spojnice praporců



Obrázek 4.18 Kompletní tepelné schéma šroubového kontaktního styku praporce a spojnice praporců

4.8 Výpočet náhradního schématu šroubového kontaktního styku přívodních vodičů a spojnice praporců

Přítlačnou sílu na přívodu vyvozuje pro 4 přívodní pásoviny 9 šroubů M16. Výpočet přítlačné síly jednoho šroubu je shodný s podkapitolou 4.7.1, pro 9 šroubů se stejnou přepokládanou rezervou je výsledná přítlačná síla rovna:

$$F_p = 0,1 \cdot 9 \cdot F_{p1} = 0,1 \cdot 2 \cdot 44,84 = 40,35 \text{ kN}.$$

4.8.1 Výpočet parametrů náhradního schématu šroubového kontaktního styku přírodních vodičů a spojnice praporců

Elektrický odpor v jednom plošném styku se vypočte jako stejně jako v podkapitole 4.7.2:

$$R_{S1} = \frac{k}{F_p^n} = \frac{6 \cdot 10^{-4}}{(40,35 \cdot 10^3)^1} = 14,87 \text{ n}\Omega.$$

Pro čtyři identické paralelní elektrické odpory ve styku platí:

$$R_S = \frac{R_{S1}}{4} = \frac{14,87}{4} = 3,71 \text{ n}\Omega.$$

Obdobně jako v podkapitole 4.6.1 je pro určení činitele přestupu tepla mezerou v okolí kontaktních stykových plošek c . Pro plochu kontaktního styku S a šířku vzduchové mezery δ platí:

$$S = 4 \cdot \left(80 \cdot 45 - 9 \cdot \frac{\pi \cdot 1,8^2}{4} \right) = 408,4 \text{ cm}^2,$$

$$\delta = 0,1 \text{ mm},$$

$$c(S; \delta) = 0,5.$$

Výsledný tepelný odpor čtyř paralelních styků se vypočte:

$$R_{TK} = \frac{c \cdot R_S}{\lambda_{Cu} \cdot \rho_{Cu110}} = \frac{0,5 \cdot 3,71 \cdot 10^{-9}}{385 \cdot 23,28 \cdot 10^{-9}} = 207 \text{ }\mu\text{KW}^{-1}.$$

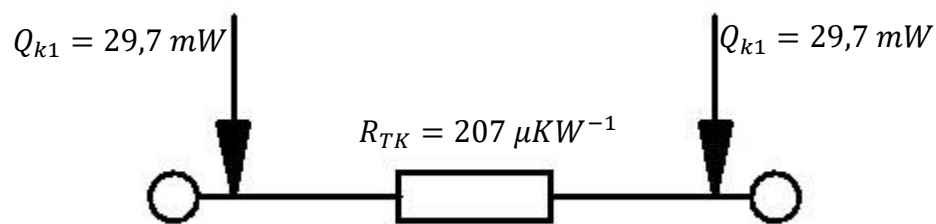
Tepelné ztráty vznikající v šroubovém kontaktním styku jsou rovny:

$$Q_k = R_S \cdot I^2 = 3,71 \cdot 10^{-9} \cdot 4000^2 = 59,4 \text{ mW}.$$

Do náhradního tepelného schématu jsou z každé strany podélného odporu R_{TK} přiveden tepelný tok:

$$Q_{k1} = \frac{Q_k}{2} = \frac{59,4}{2} = 29,7 \text{ mW}.$$

4.8.2 Kompletní tepelné schéma šroubového kontaktního styku přírodních vodičů a spojnice praporců



Obrázek 4.19 Kompletní tepelné schéma šroubového kontaktního styku přírodních vodičů a spojnice praporců

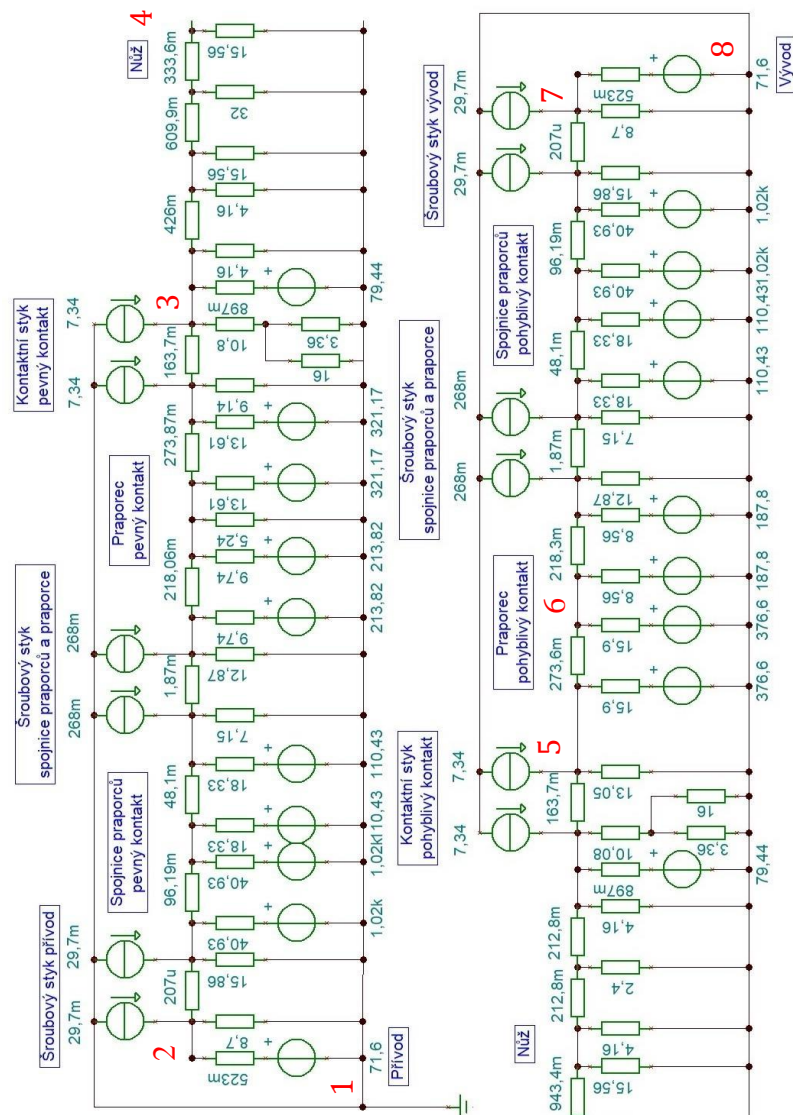
4.9 Kompletace tepelného schématu

Celé tepelné schéma nebo jednořadová tepelná síť je vytvořena sériovým spojením dílčích tepelných schémat vypočítaných v rámci kapitoly 4 v tomto pořadí:

- 1) Přívodní vodič,
- 2) Šroubový kontaktní styk přívodních vodičů a spojnice praporců,
- 3) Spojnice praporců,
- 4) Šroubový kontaktní styk spojnice praporců a praporce,
- 5) Praporec na straně pevného kontaktu,
- 6) Kontaktní pracovní styk,
- 7) Kontaktní nůž,
- 8) Kontaktní pracovní styk,
- 9) Praporec na straně pohyblivého kontaktu,
- 10) Šroubový kontaktní styk spojnice praporců a praporce,
- 11) Spojnice praporců,
- 12) Šroubový kontaktní styk přívodních vodičů a spojnice praporců,
- 13) Přívodní vodič.

5. VÝPOČET USTÁLENÉHO OTEPLENÍ ODPOJOVAČE

Při výpočtu ustáleného oteplení tepelného schématu odpojovače je využito analogií tepelných a elektrických schémat. Tepelné odpory lze nahradit elektrickými. Tepelné potenciály na koncích příčných tepelných odporů jsou nahrazeny napěťovými potenciály (zdroji) a zdroje tepelného toku v kontaktních a pracovních stycích jsou nahraditelné proudovými zdroji. Výstupem z ekvivalentního elektrického schématu jsou napěťové potenciály v uzlech schématu. Napětí v uzlech jsou úměrná vypočteným oteplením přístroje v daných bodech. Kompletní náhradní elektrické schéma 1. iterace je na obrázku 5.1. Nákres i výpočet byl realizován pomocí softwaru TINA-TI od společnosti Texas Instruments.



Obrázek 5.1 Kompletní elektrické schéma odpojovače

Metoda třetí hodnoty je vhodná pro řešení bez tepelného schématu bez výpočetní techniky. Při výpočtu analogického elektrického schématu je použita modifikovaná metoda třetí hodnoty.

Modifikace spočívá v tom, že po prořešení 1. iterace elektrického schématu jsou napětí v uzlech (oteplení uzlů) využita k přesnějšimu odhadu oteplení daného dílčího schématu. Pokud je oteplení součástky po 1. iteraci $\Delta\vartheta_{i1_prům}$, které je aritmetickým průměrem oteplení uzlů příslušejících dané součástce, odlišné od předpokládaného oteplení v přechozí kapitole, je zvoleno nové vstupní oteplení do 2. iterace výpočtu. Pro oteplení $\Delta\vartheta_{i1_vstup} < \Delta\vartheta_{i1_prům}$ je do další iterace voleno oteplení dle rovnice $\Delta\vartheta_{i1_vstup} < \Delta\vartheta_{i2_vstup} < \Delta\vartheta_{i1_prům}$ a pro oteplení $\Delta\vartheta_{i1_vstup} > \Delta\vartheta_{i1_prům}$ je do další iterace voleno oteplení dle rovnice $\Delta\vartheta_{i1_vstup} < \Delta\vartheta_{i1_prům} < \Delta\vartheta_{i2_vstup}$. Po vypočtení oteplení uzlů sítě v 2. iteraci je dispozici již dostatek dat pro interpolaci nebo extrapolaci následujícím způsobem.

Pro každou součástku lze psát dvě lineární rovnice:

$$\Delta\vartheta_{i2_prům} = \Delta\vartheta_{i2_vstup} \cdot k + q,$$

$$\Delta\vartheta_{i1_prům} = \Delta\vartheta_{i1_vstup} \cdot k + q.$$

Pro směrnice k a posunutí přímky q platí:

$$k = \frac{\Delta\vartheta_{i1_prům} - \Delta\vartheta_{i2_prům}}{\Delta\vartheta_{i1_vstup} - \Delta\vartheta_{i2_vstup}},$$

$$q = \Delta\vartheta_{i2_prům} - \Delta\vartheta_{i2_vstup} \cdot k.$$

Cílem je dosáhnout stejného oteplení na vstupu do 3. iterace jako na výstupu z programu TINA-TI $\Delta\vartheta_{i3_vstup} = \Delta\vartheta_{i3_prům}$:

$$\Delta\vartheta_{i3_vstup} = \frac{q}{1-k}.$$

Tímto způsobem lze analogicky získat vstupní oteplení pro všechny části tepelného schématu pro následující interpolace. Výstupní oteplení jistě nebudou identická, protože celá tepelná síť je provázaná a jsou prováděny změny ve všech jejich schématech.

Porovnáním vstupních a výstupních hodnot 3. iterace lze získat představu o přesnosti volby vstupního oteplení. Hodnoty vypočtené programem TINA-TI ve 3. iteraci se liší od vstupních hodnot jen v rámci desetin kelvinů, což je dostatečně přesné. Literatura uvádí, že přijatelný rozdíl je buď 5 % nebo 1 K.

V tabulce 5.1 jsou uvedeny hodnoty oteplení uzlů ekvivalentního elektrického schématu po 3. iteraci pro vybrané uzly, ve kterých byla během zkoušky trvalým proudem ve zkušebně IVEP a.s. měřena teplota.

Tabulka 5.1 Vypočítané hodnoty oteplení v označených bodech dle obrázku 5.1

Označení vypočteného bodu	U_{TINA} (V)	$\Delta\theta_{TINA}$ (K)
1 - Přívodní vodič (1 m od přístroje)	71,3	71,3
2 - Šroubový spoj přívodní svorky (na straně pásoviny)	83,4	83,4
3 - Pracovní kontakt nepohyblivý	75,4	75,4
4 - Střed nože	56,9	56,9
5 - Praporec P2 (u pohyblivého kontaktu)	72,1	72,1
6 - Praporec P2 (plocha izolátoru)	82,1	82,1
7 - Šroubový spoj vývod (na straně pásoviny)	82,7	82,7
8 - Vývodní vodič (1 m od přístroje)	71,3	71,3

6. SROVNÁNÍ USTÁLENÝCH OTEPLENÍ A PODMÍNKY PANUJÍCÍ PŘI ZKOUŠCE

Výsledky zkoušky trvalým proudem měření firmou IVEP a.s. jsou uvedeny v protokolu, který jako výkresová dokumentace kontaktního nože, podléhá utajení. V následující kapitole tedy nebudou uvedeny přesné číselné hodnoty ustáleného oteplení, ale proběhne pouze srovnání s hodnotami vypočtených ustálených oteplení z tabulky 5.1.

6.1 Interpretace vypočtených hodnot ustáleného oteplení

Vypočtené hodnoty ustáleného oteplení vybraných uzlů odpojovače KBE 38kV, 4000 A v tabulce 5.1 jsou skutečné hodnoty pro idealizované tepelné schéma vypočtené a zkonstruované v kapitole 4. Na základě dovolených hodnot ustáleného oteplení z tabulky 2.1 odpojovač nevyhověl, protože vypočtené ustálené oteplení přesáhlo dovolených 75 K v bodech 2, 3 a 7. Podpěrný izolátor odpojovače je typu E, oteplení v místě styku izolátoru s proudovodnou dráhou (bod 6) je vyšší než připouští norma a pravděpodobně by došlo ke zrychlené degradaci izolačního materiálu.

Během výpočtu byla zavedena řada zjednodušujících předpokladů, interpretací a úvah, aby bylo možné komplexní realitu převést do prvků jednořadového tepelného schématu. Nejmarkantnější faktory pro každý dílec jsou:

1. přívodní vodič – sloučení pásovin, odhad činitele stínění pro měrnou chladivost zářením a velikost chladicí plochy pásovin s ohledem na stoupání tepla,
2. spojnice praporců – určení střední délky proudnice a rozdělení širší části spojnice praporců na dva paralelní dílce SP2,
3. praporec – zjednodušení geometrie praporce a U-profilu, nepřesné určení chladicí plochy,
4. kontaktní nůž – interpretace zúžení na koncích nože, určení činitele stínění vnitřních a vnějších ploch, výpočet měrné chladivosti prouděním pro distanční válečky a stříšku,
5. kontaktní styk – uvažování střední hodnoty přítláčné síly pružiny, odečtení materiálové kontakty k a druhu kontaktního styku n ,
6. šroubový styk – velikost přítláčné síly s ohledem na otláčení, odečtení materiálové kontakty k a druhu kontaktního styku n .

Výpočet ustáleného oteplení proběhl pro odpojovač umístěný v horizontální poloze, odpojovače KBE se mohou instalovat i v poloze vertikální, což by výsledné hodnoty oteplení jen zvýšilo vlivem stoupajícího horkého vzduchu z dílců odpojovače na spodní straně.

6.2 Skutečné podmínky zkoušky trvalým proudem

Zkouška trvalým proudem odpojovače KBE probíhala trojpólově proudem 4000 A do ustálení změny oteplení 1 K za 1 hodinu. Zařízení bylo zkoušeno v horizontální poloze. Teplota okolí se pohybovala od 18 °C do 20 °C a byla měřena v dostatečné vzdálenosti od odpojovače. Teplota byla snímána na každém pólu v bodech uvedených v tabulce 5.1 termočlánky. Přívodní vodiče na straně pevného kontaktu byly čtyři lana normovaného průřezu a vodičem na straně pohyblivého kontaktu byla jedna pásovina normovaného průřezu.

Podmínky panující během zkoušky se ve všem neshodují s nejhorsími možnými podmínkami dle normy uvedené v kapitole 2.3.1 a s podmínkami uvažovanými pro výpočet parametrů náhradních schémat v kapitole 4.

6.3 Srovnání vypočtených a naměřených hodnot ustáleného oteplení

Dle interních norem firmy IVEP a.s. nesmí oteplení žádné části odpojovače v horizontální poloze přístroje přesáhnout 65 K. Důvodem pro toto zpřísnění je, že výrobce nedokáže zaručit, v jaké poloze si zákazník odpojovač nainstaluje. Během zkoušky je přístroj instalován ve vodorovné poloze a bez dalších zdrojů tepla v jeho okolí. Zákazník může odpojovač nainstalovat do polohy svislé, do jedné z například kobek rozvodny, kde je omezené proudění vzduchu a řada dalších zdrojů tepla. Proto lze na zpřísnění dovoleného oteplení pohlížet jako na určitou rezervu pro výrobce.

Změřené oteplení během zkoušky přesáhlo dovolené oteplení stanovené normou, takže ani na zkušebně přístroj nevyhověl.

Velikosti naměřených a vypočtených ustálených oteplení v jednotlivých bodech jsou velice blízká. Výpočet je možné považovat za přesný, pokud se vypočtené a naměřené hodnoty neliší více než o 10 %. Což platí pro všechny měřené body na odpojovači kromě šroubového spoje a přilehlého vodiče na vývodu odpojovače, kde se hodnoty liší o 13 %. Všechna vypočtená ustálená oteplení jsou vyšší než při zkoušce, což je velkou výhodou, protože již při návrhu je uvažována určitá rezerva. Jen oteplení ve středu kontaktního nože vyšlo výpočtem nižší než při zkoušce, nůž je v náhradním schématu přechlazen vlivem uvažování moc velkých chladících ploch distančních válečků a jejich měrné chladivosti prouděním.

Při srovnávání výsledků je nutné brát v potaz rozdílnou teplotu okolí při zkoušce a při výpočtu, která ovlivní v prvé řadě měrný odpor mědi, který se pro teplotu okolí 20 °C a ustálené oteplení 70 K sníží o 7 % oproti uvažovanému měrnému odporu v kapitole 4, což vede k menším Jouleovým ztrátám v celé proudovodné dráze. Oproti tomu mírně poklesne měrná chladivost záření, což sníží odvod tepla záření do okolí, tento typ přestupu tepla je vůči proudění minoritním faktorem.

Dalším velkým rozdílem jsou odlišné přívodní vodiče, při výpočtu paralelní kombinace pásovin zakryla skoro celou plochu spojnice praporeců a zhoršila její odvod tepla. Na druhou stranu větší průřez lépe odváděl teplo, ale teplo odváděné ze spodní pásoviny zahřívalo pásovinu z horní strany přívodní svorky. Oteplení přívodních lan při zkoušce je hodně blízké oteplení paralelních pásovin ve výpočtu. Pásovina na vývodu je při zkoušce odpojovače výrazně chladnější než paralelní pásoviny ve výpočtu, protože není zakryta taková plocha svorky vývodu, která se může svým povrchem lépe chladit, a pásovina při zkoušce se rovnoměrně ochlazuje celým svým povrchem.

7. NÁVRH KONSTRUKČNÍCH ŘEŠENÍ

Cílem této kapitoly je přednést návrhy konstrukčních řešení a hypotézy, aby odpojovač KBE 38 kV zatížený jmenovitým proudem 4000 A uspěl při zkoušce trvalým proudem. V následujících podkapitolách jsou diskutována jednotlivá řešení, která samy o sobě nemusejí mít tak markantní vliv na oteplení tohoto odpojovače. Kombinací jednotlivých řešení již pravděpodobně lze dosáhnout požadovaného snížení oteplení odpojovače KBE.

7.1 Nátěr odpojovače

Jednou z možností posílení chlazení odpojovače, je jeho povrch natřít matnou tmavou barvou (např. černou). Emisivita natřených částí by vzrostla pro matně černý nátěr až na $\epsilon_z = 0,97$, čímž by výrazně vzrostla měrná chladivost zářením a posílil by se odvod tepla zářením do okolí.

Nevýhodou tohoto řešení je vznik tepelného odporu na vrstvě barvy samotné a taktéž tepelný odpor vzduchové vrstvy mezi povrchem odpojovače a naneseným nátěrem. Oba tyto odpory povedou ke snížení odvodu tepla zářením.

7.2 Změna průřezu proudovodné dráhy

Zvýšení průřezu proudovodné dráhy, ať už šířky b nebo výšky h , má za následek pokles činného odporu proudovodné dráhy a tím pádem i snížení Jouleova tepla, který by se muselo odvést povrchem odpojovače do okolí nebo by se v něm uložilo a způsobilo další nárůst teploty. Dále by se v nejužším místě odpojovače (část praporce P2) zlepšila proudová hustota, která je v tomto provedení nad doporučených 4 A/mm^2 .

Nevýhodou nárůstu průřezu je změna koeficientu skinefektu a jevu blízkosti, kdy by při určitých volbách průřezů mohlo dojít ke zvýšení činného odporu těmito dvěma vlivy. Dále by mimo jiné musela proběhnout kontrola a zkouška izolačních vzdáleností a odolnosti vůči dynamickým účinkům zkratových proudů.

7.3 Větší přítlak v kontaktním styku

Větší přítlačná síla v kontaktním styku sníží stykový odpor v kontaktech a taktéž budou menší tepelné ztráty v kontaktním styku, které jsou ve srovnání se šroubovými spoji o jeden až dva řády vyšší. Vyšší přítlačné síly může být dosaženo použitím pružin s vyšší tuhostí nebo přidáním třetí pružiny do kontaktního styku.

Nevýhodou může být konstrukční úprava kontaktního nože při použití další pružiny, kdy nemusí být v aktuální konfiguraci dostatek prostoru pro třetí pružinu.

7.4 Volba odlišného kontaktního styku

Aktuální kontaktní styk je přímkový třecí, s rostoucím proudovým zatížením se častěji volí odlišné druhy kontaktního styku. Volbou například růžicového kontaktu je výsledný tepelný odpor paralelní kombinací n tepelných odporů růžice. Dále by se jednalo v ideálním případě o plošný styk, který by dále snížil elektrický odpor jednoho styku, což by vedlo k menším tepelným ztrátám a menšímu tepelnému odporu.

Nevýhodou je celková konstrukční změna provedení pracovních kontaktů, která je časově a finančně nákladné.

Jednalo by se ve své podstatě o nový model odpojovače, z navrhovaných řešení je to jedno z posledních.

7.5 Orientace a tvar proudovodné dráhy

U širších horizontálně uložených pásovin (konstrukčních prvků) dochází ke špatnému proudění a kumulaci teplého vzduchu ve středu spodní plochy. Tato nevýhoda by odpadla při vertikálním uložení pásovin, které by byly stejně dobře chlazeny při instalaci přístroje v horizontální i vertikální poloze. Další možností je použití kruhových či trubkových průřezů, u kterých je lepší rozložení proudové hustoty a nižší vliv skinefektu.

Nevýhodou je markantní snížení mechanické pevnosti pro vertikální uložení pásoviny, při působení zkratového proudu by mohlo dojít k překročení mezních namáhání. Musel by být proveden výpočet a zkouška na ověření dostatečných izolačních vzdáleností a odolnosti vůči dynamickým účinkům zkratových proudů.

I při této konstrukční úpravě lze hovořit o novém modelu odpojovače.

7.6 Aktivní chlazení

U elektrických strojů velkých výkonů je jednou z možností chlazení nechat trubkové vinutí statoru protékat vodou nebo plynem. U elektrických přístrojů se tohoto konstrukčního řešení zatím v praxi nevyužívá, ale mohlo by se jednat o jednu z cest, která se v budoucnu bude aplikovat.

Aktivní chlazení se u venkovních přístrojů neinstaluje, a proto toto konstrukční řešení nemůže být ani doporučeno.

8. ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo seznámit se se spínacími přístroji firmy IVEP, a.s, prostudovat normy příslušné odpojovačům, vypočítat ustálené oteplení odpojovače KBE 3D 38 kV, 4000 A a srovnat firemní výsledky zkoušky s výpočtem a navrhnout opatření na snížení oteplení odpojovače.

První tři kapitoly shrnují portfolio firmy IVEP, a.s., vybrané informace z norem pro spínací techniku a odpojovače a teoretický úvod do problematiky oteplení. Vybrané informace z norem se týkají definic pracovních podmínek, jmenovitých hodnot spojených s odpojovači a detailního popisu zkoušky trvalým proudem, z níž následně vychází výpočet ustáleného oteplení a s jejímiž výsledky jsou vypočtená oteplení srovnávána.

V rámci čtvrté kapitoly jsou vypočtena náhradní tepelná schémata jednotlivých dílců odpojovače KBE 3D 38 kV, 4000 A pro nejhorší možné normální pracovní podmínky definované normou.

V páté kapitole je na základě analogií tepelných a elektrických schémat sestaveno kompletní elektrické schéma odpojovače viz. obrázek 5.1. Pomocí softwaru TINA-TI a iteračního výpočtu jsou vypočtena ustálená oteplení uzlů jednořadové tepelné sítě uvedená v tabulce 5.1.

V šesté kapitole je provedeno vyhodnocení výsledků výpočtu a zkoušky trvalým proudem a srovnání daných výsledků. Dále jsou v této kapitole uvedeny hlavní domnělé faktory, které způsobily odchylky při výpočtu ustáleného oteplení, a skutečné podmínky panující při zkoušce. Výpočtem nelze nikdy přesně dosáhnout naměřených hodnot, lze se k nim pouze přiblížit. Výpočet ustáleného oteplení je během vývoje přístroje nezbytný, ale přesné hodnoty lze získat až provedením experimentální zkoušky.

Sedmá kapitola obsahuje řadu konstrukčních řešení, které vedou ke snížení ustáleného oteplení. Jednotlivá řešení se liší jak proveditelností, tak celkovými náklady na realizaci. Každé řešení s sebou nese řadu nevýhod, které negativně ovlivní jiné aspekty přístroje. Návrh elektrického přístroje je komplexní problematikou a nelze na něj pohlížet jen z jednoho úhlu pohledu.

LITERATURA

- [1] MINISTERSTVO SPRAVEDLNOSTI. *Výpis z obchodního rejstříku IVEP, a.s.*. Online. Dostupné z: <https://or.justice.cz/ias/ui/rejstrik-firma.vysledky?subjektId=171303&typ=PLATNY>. [cit. 2023-11-13]
- [2] COMERTO. *IVEP a.s.*. Online. Dostupné z: <https://www.ivep.cz/cz>. [cit. 2023-11-13]
- [3] HAVELKA, Otto. *Elektrické přístroje*. Praha: SNTL, 1985.
- [4] *Izolátor*. Online. In: Wikipedie. Stránka byla naposledy editována 23.9.2023 v 17:43. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Izolátor>. [cit. 2023-11-18]
- [5] SKUPINA ČEZ. *Vnitřní rozvodny*. Online. Simopt, s.r.o., © 2020. Dostupné z: <https://www.svetenergie.cz/cz/energetika-zblizka/distribuce-elekriny/distribuce-elektricke-energie-podrobne/vnitri-rozvodny/vyklad> [cit. 2023-11-18]
- [6] SEL. *Fault Location, Isolation, and Service Restoration (FLISR)*. Online. Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., © 2023. Dostupné z: <https://selinc.com/solutions/p/flisr/#overview>. [cit. 2023-11-18]
- [7] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUEBNICTVÍ [ÚNMZ]. ČSN EN 62271-1 ed. 2, *Vysokonapěťová spínací a řídicí zařízení – Část 1: Společná ustanovení pro spínací a řídicí zařízení střídavého proudu*. Česká agentura pro standardizaci, 2018.
- [8] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUEBNICTVÍ [ÚNMZ]. ČSN EN 62271-102 ed. 2, *Vysokonapěťová spínací a řídicí zařízení – Část 102: Odpojovače a uzemňovače střídavého proudu*. Česká agentura pro standardizaci, 2019.
- [9] BUŠOV, Bohuslav. *Tepelné účinky proudu*. PPTX. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně. [cit. 2024-01-08]
- [10] BUŠOV, Bohuslav. *Výpočet ustáleného oteplení elektrického přístroje*. PPTX. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně. [cit. 2024-01-08]
- [11] HAVELKA, Otto. *Podklady a příklady pro navrhování elektrických přístrojů I.*. Brno: Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně, 1985.

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
VUT	Vysoké učení technické v Brně
VN	vysoké napětí
EJF	Elektrotechnické závody Julia Fučíka
IEC	Mezinárodní elektrotechnická komise
EMC	elektromagnetická kompatibilita

Symboly:

U_r	jmenovité napětí	(V)
U_d	jmenovité krátkodobé střídavé výdržné napětí průmyslového kmitočtu	(V)
U_p	jmenovité výdržné napětí při atmosférickém impulsu	(V)
I_r	jmenovitý proud	(A)
I_k	jmenovitý krátkodobý výdržný proud	(A)
t_k	jmenovitá doba trvání zkratu	(s)
I_p	jmenovitý dynamický výdržný proud	(A)
dQ	Jouleovo teplo v elementu vodiče	(J)
dQ_o	teplo odvedené povrchem elementu vodiče	(J)
dQ_s	teplo spotřebované na zvýšení teploty elementu vodiče	(J)
R	elektrický odpor	(Ω)
I	elektrický proud	(A)
α_i	součinitel přestupu tepla	($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$)
A	povrch vodiče	(m^2)
c	objemová tepelná kapacita	($\text{Wm}^{-3}\text{K}^{-1}$)
V	objem vodiče	(m^3)
$\Delta\vartheta(t)$	okamžité oteplení	(K)
$\Delta\vartheta_m$	ustálené (maximální) oteplení	(K)
t	čas průchodu proudem	(s)
τ	časová konstanta	(s)
R_ϑ	elektrický odpor vodiče při teplotě ϑ	(Ω)
ρ_ϑ	rezistivita při teplotě ϑ	($\Omega\text{mm}^2\text{m}^{-1}$)
ρ_{ref}	rezistivita při referenční teplotě	($\Omega\text{mm}^2\text{m}^{-1}$)
α	teplotní součinitel odporu	(K^{-1})
$\Delta\vartheta$	oteplení oproti referenční hodnotě	(K)

l	délka vodiče	(m)
S	průřez vodiče	(m)
k_p	činitel skinefektu	(-)
k_{bl}	činitel blízkosti	(-)
R_{gTl}	podélný tepelný odpor	(KW ⁻¹)
R_{gTt}	příčný tepelný odpor	(KW ⁻¹)
$\Delta\vartheta_{\infty}$	oteplení vnějšího konce příčného odporu	(K)
Φ	tepelný tok	(W)
f	frekvence	(Hz)
$l_{stř}$	délka střední proudnice	(m)
E_Z	emisivita tělesa	(-)
P_i	chladicí povrch	(m ²)
O_v	velikost chladicího obvodu	(m)
λ_i	součinitel tepelné vodivosti	(Wm ⁻¹ K ⁻¹)
β	koeficient beta	(m ⁻¹)
δ	koeficient delta	(WK ⁻¹)
γ	třecí úhel	(rad)
φ	úhel stoupání	(rad)
F_p	přítlačná síla	(N)
Q_k	tepelné ztráty	(W)
$\Delta\vartheta_{i_vstup}$	vstupní oteplení do i-té iterace	(K)
$\Delta\vartheta_{i_prům}$	průměr i-tých oteplení uzlů dílce	(K)
K	směrnice	(-)
Q	posunutí přímky	(K)