



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

NÁVRH TRAKČNÍHO ODPOJOVAČE NA 25 KV

DESIGN OF A 25 KV TRACTION DISCONNECTOR

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Martin Buchta

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. David Šimek

BRNO 2022

Diplomová práce

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

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Bc. Martin Buchta

ID: 186038

Ročník: 2

Akademický rok: 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

Návrh trakčního odpojovače na 25 kV

POKyny PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Nastudujte problematiku odpojovačů včetně normativních požadavků.
2. Proveďte návrh jednopólového trakčního odpojovače na 25 kV včetně výkresové dokumentace.
3. Sestrojte přístroj dle provedeného návrhu a proveďte ověření parametrů přístroje zkoušením dle příslušných norem.
4. Kriticky zhodnoťte navržený přístroj s ohledem na ekonomická a funkční hlediska.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] HAVELKA, Otto. Stavba elektrických přístrojů I. 2. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1988.
- [2] HAVELKA, Otto. Elektrické přístroje I. 3. vyd. Brno: Rektorát Vysokého učení technického v Brně, 1982.
- [3] HAVELKA, Otto, Dalibor SVOBODA a Zdeněk VÁVRA. Podklady a příklady pro navrhování elektrických přístrojů I. Brno: Vysoké učení technické, 1985.

- [4] ČSN EN 62271-1 ED.2 (354205)

Vysokonapěťová spínací a řídicí zařízení - Část 1: Společná ustanovení pro spínací a řídicí zařízení střídavého proudu. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.

- [5] ČSN EN IEC 62271-102 ed. 2 (354210)

Vysokonapěťová spínací a řídicí zařízení - Část 102: Odpojovače a uzemňovače střídavého proudu. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019.

Termín zadání: 7.2.2022

Termín odevzdání: 22.5.2022

Vedoucí práce: Ing. David Šimek

doc. Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.

předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá návrhem trakčního odpojovače pro napětí 25 kV střídavých a jmenovitý proud 800 A. Výsledkem má být konkurenceschopný odpojovač, který bude schopen případné aplikace na tuzemskou železnici a má disponovat parametry, které jiní zdejší výrobci v současné době nenabízí. Jedná se například o elektrickou pevnost nebo velikost jmenovitého proudu, která je ekonomickou variantou pro většinu železničních tratí v České republice. Podle navržené výkresové dokumentace byl daný odpojovač sestaven a poté byly vybrané parametry odpojovače odzkoušeny. Byly provedeny například zkoušky elektrické pevnosti, zkratové zkoušky, zkouška trvalým proudem, apod. Vypočtené a naměřené hodnoty byly spolu porovnány. Navržený odpojovač byl na základě výsledků zkoušek a samotné stavby finančně a technicky zhodnocen. Na závěr byly navrženy některé vhodné úpravy.

Klíčová slova

Odpojovač; izolační vzdálenosti; elektrodynamické síly; oteplení proudovodné dráhy; zkoušky elektrické pevnosti; oteplovací zkouška; zkratové zkoušky.

Abstract

This diploma thesis deals with the design of a traction disconnector for 25 kV AC and a rated current of 800 A. The result should be a competitive disconnector that is capable of potential applications on domestic railways and should have parameters that other local manufacturers do not currently offer. This is, for example, electrical strength or the size of the rated current, which is an economic option for most railway lines in the Czech Republic. According to the proposed drawing documentation, the disconnector was assembled and then the selected disconnector parameters were tested. For example, electrical strength tests, short-circuit tests, constant current tests, etc. were performed. The calculated and measured values were compared together. The designed disconnector was financially and technically evaluated on the basis of test results and the construction itself. Finally, some appropriate adjustments were proposed.

Keywords

Disconnector; insulation distances; electrodynamic forces; current path heating; electrical strength tests; temperature rise test; short-circuit tests.

Bibliografická citace

BUCHTA, Martin. *Návrh trakčního odpojovače na 25 kV*. Brno, 2022. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/142391>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce David Šimek.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	<i>Martin Buchta</i>
VUT ID studenta:	<i>186038</i>
Typ práce:	<i>Diplomová práce</i>
Akademický rok:	<i>2021/22</i>
Téma závěrečné práce:	<i>Návrh trakčního odpojovače na 25 kV</i>

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne: 20. května 2022

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Davidu Šimkovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další praktické a cenné rady při zpracování mé diplomové práce. Dále děkuji panu elektrotechnikovi Stanislavu Benešovi ze zkušebny elektrických lokomotiv z pracoviště DKV Brno – Maloměřice za odbornou pomoc k tématu diplomové práce.

V Brně dne: 20. května 2022

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	10
SEZNAM TABULEK.....	12
ÚVOD	13
1. ZADANÉ PARAMETRY ODPOJOVAČE	14
2. NÁVRH IZOLAČNÍCH VZDÁLENOSTÍ	16
2.1 MINUTOVÁ ZKOUŠKA 50 Hz.....	16
2.2 RÁZOVÁ ZKOUŠKA 1,2/50 μ s.....	17
3. ROZMĚRY PROUDOVODNÉ DRÁHY ODPOJOVAČE	19
3.1 STANOVENÍ PRŮŘEZU PROUDOVODNÉ DRÁHY	19
3.2 STANOVENÍ ROZMĚRŮ NOŽŮ ODPOJOVAČE.....	20
3.2.1 Výpočet délky nože	21
3.3 CELKOVÉ ROZMĚRY NOŽE	23
3.4 STANOVENÍ ROZMĚRŮ PRAPORCŮ ODPOJOVAČE.....	23
3.4.1 Celkové rozměry praporce	24
4. ROZBOR ELEKTRODYNAMICKÝCH SIL PŮSOBÍCÍCH NA PROUDOVODNOU DRÁHU.....	25
4.1 VÝPOČET MINIMÁLNÍ PŘÍTLAČNÉ SÍLY NA JEDEN KONTAKT	25
4.2 ELEKTRODYNAMICKÉ SÍLY PŮSOBÍCÍ NA ODPOJOVAČ PŘI PRŮCHODU ZKRATOVÉHO PROUDU.	26
4.2.1 Síly působící v kontaktní úžině odpojovače.....	27
4.2.2 Síla působící mezi noži odpojovače.....	28
4.2.3 Vliv rezonančního jevu na sílu působící mezi noži odpojovače	30
4.2.4 Síla působící v L-ohybu v kombinaci praporec – nůž	32
4.2.5 Vertikální působení síly v L-ohybu praporec – nůž.....	32
4.2.6 Horizontální působení síly v L-ohybu praporec – nůž	33
4.3 KONEČNÁ BILANCE SIL V KONTAKTU	34
5. VÝPOČET USTÁLENÉHO OTEPLENÍ ČÁSTÍ PROUDOVODNÉ DRÁHY PŘI JMENOVITÉM PROUDU	35
5.1 VÝPOČET PARAMETRŮ NÁHRADNÍHO TEPELNÉHO SCHÉMATU PRAPORCE	36
5.1.1 Koeficient zhuštění proudnic praporce	37
5.1.2 Vliv skinefektu na odpor praporce	37
5.1.3 Střední délka proudnice praporce.....	38
5.1.4 Elektrický odpor praporce	38
5.1.5 Chladivost praporce.....	38
5.1.6 Chladicí plochy praporce.....	39
5.1.7 Fiktivní chladicí obvod praporce	40
5.1.8 Parametry náhradního tepelného schématu praporce.....	41
5.2 VÝPOČET PARAMETRŮ NÁHRADNÍHO TEPELNÉHO SCHÉMATU NOŽE	41
5.2.1 Koeficient zhuštění proudnic nože	42
5.2.2 Vliv skinefektu na odpor nože	42
5.2.3 Délka střední proudnice nože	42

5.2.4	<i>Elektrický odpor nože.....</i>	42
5.2.5	<i>Chladicí plochy nože.....</i>	43
5.2.6	<i>Chladivost nože.....</i>	44
5.2.7	<i>Fiktivní chladicí obvod nože</i>	44
5.2.8	<i>Parametry náhradního tepelného schématu nože</i>	44
5.2.9	<i>Chladicí části nože bez proudu</i>	45
5.3	VÝPOČET PARAMETRŮ NÁHRADNÍHO TEPELNÉHO SCHÉMATU PŘÍVODU.....	46
5.3.1	<i>Délka střední proudnice přívodu</i>	46
5.3.2	<i>Elektrický odpor přívodu</i>	46
5.3.3	<i>Chladivost přívodu.....</i>	47
5.3.4	<i>Chladicí plocha přívodu.....</i>	48
5.3.5	<i>Fiktivní chladicí obvod přívodu</i>	48
5.3.6	<i>Parametry náhradního tepelného schématu přívodu</i>	48
5.3.7	<i>Celkové konečné oteplení přívodu ve vzdálenosti l_m</i>	49
5.4	VÝPOČET PARAMETRŮ NÁHRADNÍHO TEPELNÉHO SCHÉMATU ŠROUBOVÉHO SPOJE NA PŘÍVODU	49
5.4.1	<i>Plocha styku šroubového spoje</i>	49
5.4.2	<i>Činitel přestupu tepla šroubového spoje.....</i>	49
5.4.3	<i>Kontaktní síla šroubového spoje.....</i>	49
5.4.4	<i>Elektrický odpor šroubového spoje.....</i>	50
5.4.5	<i>Parametry náhradního tepelného schématu šroubového spoje.....</i>	50
5.5	VÝPOČET PARAMETRŮ NÁHRADNÍHO TEPELNÉHO SCHÉMATU PRACOVNÍHO KONTAKTU.....	51
5.5.1	<i>Plocha kontaktu</i>	51
5.5.2	<i>Činitel přestupu tepla kontaktu</i>	51
5.5.3	<i>Elektrický odpor kontaktu</i>	51
5.5.4	<i>Parametry náhradního tepelného schématu kontaktu.....</i>	51
5.6	NÁHRADNÍ JEDNOŘADOVÁ TEPELNÁ SÍŤ ODPOJOVAČE	52
5.6.1	<i>Toková metoda</i>	52
5.6.2	<i>Metoda elektrotepelné analogie.....</i>	53
5.7	OTEPLENÍ JEDNOTLIVÝCH ČÁSTÍ ODPOJOVAČE.....	55
6.	MECHANISMUS ODPOJOVAČE	57
6.1	VÝPOČET TÍHY NOŽE	57
6.2	VÝPOČET TÍHY IZOLÁTORU S DRŽÁKY	58
6.3	VÝPOČET TÍHY PÁKA ODPOJOVAČE	58
6.4	VÝPOČET POTŘEBNÉHO MOMENTU K OVLÁDÁNÍ ODPOJOVAČE	58
7.	KONTROLA IZOLAČNÍCH VZDÁLENOSTÍ.....	60
7.1	ZAPNUTÝ ODPOJOVAČ	60
7.2	VYPNUTÝ ODPOJOVAČ	61
8.	TYPOVÉ ZKOUŠKY VYBRANÝCH PARAMETRŮ.....	62
8.1	ZKOUŠKY ELEKTRICKÉ PEVNOSTI ODPOJOVAČE	62
8.1.1	<i>Zkouška krátkodobým střídavým výdržným napětím.....</i>	63
8.1.2	<i>Zkouška impulsním napětím.....</i>	64
8.2	OTEPLOVACÍ ZKOUŠKA ODPOJOVAČE.....	67
8.2.1	<i>Zkouška trvalým proudem.....</i>	68
8.2.2	<i>Zkouška stavu měřením odporu kontaktů a spojů hlavního obvodu.....</i>	72
8.3	ZKOUŠKA KRÁTKODOBÝM A DYNAMICKÝM VÝDRŽNÝM PROUDEM	73
8.3.1	<i>Zkouška krátkodobým výdržným proudem</i>	73

8.3.2	<i>Zkouška dynamickým výdržným proudem.....</i>	75
8.3.3	<i>Zkouška stavu měřením odporu kontaktů a spojů hlavního obvodu.....</i>	78
8.3.4	<i>Zkouška síly potřebné k vypnutí odpojovače.....</i>	79
9.	STAVBA A ZHODNOCENÍ ODPOJOVAČE	82
9.1	FINANČNÍ ZHODNOCENÍ ODPOJOVAČE	82
9.1.1	<i>Finanční zhodnocení základny odpojovače.....</i>	83
9.1.2	<i>Finanční zhodnocení proudovodné dráhy.....</i>	84
9.1.3	<i>Finanční zhodnocení nosných a ovládacích prvků odpojovače</i>	86
9.1.4	<i>Finanční zhodnocení izolátorů a spojovacího materiálu</i>	88
9.1.5	<i>Celkové náklady na odpojovač včetně dokončovacích prací</i>	89
9.2	TECHNICKÉ ZHODNOCENÍ.....	92
9.2.1	<i>Zvýšení odolnosti vůči impulsnímu napětí odpojovací dráze.</i>	92
9.2.2	<i>Korekce napěťové odolnosti v zapnuté poloze</i>	93
9.2.3	<i>Zvýšení odolnosti proti svaření kontaktu při dynamickém výdržném proudu</i>	93
10.	ZÁVĚR.....	95
	POUŽITÁ LITERATURA.....	98
	SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	100
	SEZNAM PŘÍLOH.....	102

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Ukázka vlevo odpojovač firmy IVEP, a.s. a vpravo vlastní konstrukce [14]	14
3.1	Nákres proudovodné dráhy v rozepnutém stavu	21
3.2	Nákres proudovodné dráhy v sepnutém stavu	22
3.3	Nákres jednoho nože odpojovače	23
3.4	Nákres praporce odpojovače	24
4.1	Nákres čelního pohledu na nože odpojovače	27
4.2	Nákres čelního pohledu na nože odpojovače s úžinovou a kontaktní silou	28
4.3	Nákres kompletní proudovodné dráhy odpojovače	29
4.4	Nákres pohledu na proudovodnou dráhu shora s přitažlivou silou dvou nožů	29
4.5	Nákres základní bilance sil v pracovním kontaktu odpojovače	30
4.6	Průběh vlivu vzdálenosti rozpěrek nožů odpojovače na vlastní kmitočet nožů	31
4.7	Nákres proudovodné dráhy pro vertikální síly v L-ohybu praporec – nůž	32
4.8	Nákres proudovodné dráhy pro horizontální síly v L-ohybu praporec – nůž	33
4.9	Nákres konečné bilance sil v pracovním kontaktu odpojovače	34
5.1	Nákres praporce odpojovače pro výpočet oteplení	37
5.2	Nákres praporce odpojovače pro stanovení chladících ploch	40
5.3	Nákres nože pro výpočet jeho oteplení	41
5.4	Nákres čelního pohledu na nože pro stanovení zastínění	43
5.5	Nákres chladících částí nože pro výpočet jejich oteplení	45
5.6	Nákres přívodu odpojovače pro výpočet jeho oteplení	46
5.7	Náhradní jednořadová tepelná síť odpojovače pro výpočet tokovou metodou přívodu	52
5.8	Náhradní jednořadová tepelná síť s elektrotepelnou analogií v programu SIMULINK	54
6.1	Nákres odpojovače pro stanovení momentu pohonu	57
7.1	Nákres odpojovače pro kontrolu izolačních vzdáleností v zapnutém stavu	60
7.2	Nákres odpojovače pro kontrolu izolačních vzdáleností ve vypnutém stavu	61
8.1	Odpojovač při napěťové zkoušce při měření společné hodnoty (sepnutý stav) s vyznačením míst připojení na zkušební napětí	62
8.2	Odpojovač při napěťové zkoušce při měření hodnot v odpojovací dráze (vypnutý stav) s vyznačením míst připojení na zkušební napětí	63
8.3	Průběh napětí při zkoušce výdržným napětím vlevo společná hodnota (sepnutý stav) vpravo v odpojovací dráze (vypnutý stav)	64
8.4	Průběh napětí do průrazu při zkoušce výdržným napětím vlevo společná hodnota (sepnutý stav), vpravo v odpojovací dráze (vypnutý stav)	64
8.5	Průběh impulsního napětí při zkoušce v odpojovací dráze (vypnutý stav) vlevo – nože jsou kladná elektroda, vpravo – nože jsou záporná elektroda	65
8.6	Průběh impulsního napětí při zkoušce společné hodnoty (sepnutý stav) vlevo – nože jsou kladná elektroda, vpravo – nože jsou záporná elektroda	66
8.7	Průběh impulsního napětí při průrazu vlevo v odpojovací dráze (vypnutý stav) – nože jsou kladná elektroda, vpravo ve společné hodnotě (sepnutý stav) – nože jsou záporná elektroda	66
8.8	Umístění a označení teplotních sond na proudovodné dráze odpojovače	68
8.9	Fotografie umístění a označení teplotních sond na vlevo šroubové spojení, vpravo u hlavního kontaktu	69
8.10	Fotografie kompletního pracoviště při zkoušce trvalým proudem	69
8.11	Průběh oteplení θ šroubového spojení 1 odpojovače v závislosti na čase t . Při jmenovitém proudu $I_n = 800 \text{ A}$	70

8.12	Průběhy oteplení Θ hlavního kontaktu 1 odpojovače v závislosti na čase t . Při jmenovitém proudu $I_n = 800 \text{ A}$	70
8.13	Průběh teploty okolí ϑ_0 v blízkosti odpojovače v průměrné výšce proudovodné dráhy v závislosti na čase t v době měření ustálených hodnot oteplení	71
8.14	Průběh proudu odpojovačem a napětí na odpojovači v době prvních 0,4 s při zkoušce krátkodobým výdržným proudem s náhradní dobou zkratu $t_{k-náhradní} = 3 \text{ s}$	74
8.15	Průběh proudu odpojovačem a napětí na odpojovači v době konce zkoušky krátkodobým výdržným proudem s náhradní dobou zkratu $t_{k-náhradní} = 3 \text{ s}$	75
8.16	Fotografie připojení a zajištění měřeného odpojovače během zkoušky dynamickým výdržným proudem.....	76
8.17	Snímky pořízené rychlokamerou - vlevo před působením elektrodynamických sil, vpravo účinek elektrodynamických sil způsobených U-smyčkou celého zkušného obvodu	76
8.18	Průběh proudu odpojovačem a napětí na odpojovači při samostatné zkoušce dynamickým výdržným proudem s dobou zkratu $t_k = 300 \text{ ms}$	77
8.19	Detail začátku průběhu proudu odpojovačem a napětí na odpojovači v při samostatné zkoušce dynamickým výdržným proudem s dobou zkratu $t_k = 300 \text{ ms}$	77

SEZNAM TABULEK

1.1	Zadané hodnoty parametrů trakčního odpojovače.....	14
2.1	Zadané hodnoty UNi a Ud přejaté z normy ČSN EN 50152-2 ed. 3 pro jmenovité napětí soustavy $Un = 25$ kV v kategorii přepětí 4 s vyššími požadavky na izolační systém [9].....	16
2.2	Izolační vzdálenosti pro minutovou zkoušku: oranžová – společná hodnota, zelená – v odpojovací dráze.....	17
2.3	Izolační vzdálenosti pro impulsní zkoušku: oranžová – společná hodnota, zelená – v odpojovací dráze.....	18
3.1	Izolační vzdálenosti navrhovaného odpojovače.....	19
4.1	Hodnoty materiálových konstant potřebných pro stanovení dostatečné přitlačné síly.....	25
4.2	Vlastní kmitočet nožů a příslušný koeficient vlivu harmonických k_r [3].....	31
5.1	Hodnoty maximálního oteplení části odpojovače přejaté z normy ČSN EN 62271-1 ed. 2 – Část 1 – Tabulka 14 [8].....	35
5.2	Přehled elektrotepelné analogie pro vybrané veličiny [5].....	54
5.3	Hodnoty vypočtených oteplení části odpojovače a porovnání s maximální dovolenou hodnotou oteplení pro konkrétní část odpojovače.....	55
6.1	Tabulka maximálních limitů hmotnosti pro občasné manipulace z nařízení vlády č. 361/2007 Sb. § 28 až 30 § [13].....	59
8.1	Hodnoty zkušebního krátkodobého střídavého výdržného napětí Ud pro navrhovaný odpojovač ...	63
8.2	Hodnoty zkušebního jmenovitého impulsního napětí UNi pro navrhovaný odpojovač.....	65
8.3	Dovolené a dosažené hodnoty průrazného napětí pro krátkodobé výdržné napětí průmyslového kmitočtu Ud a jmenovité impulsní napětí UNi [9].....	67
8.4	Hodnoty naměřených oteplení části odpojovače a porovnání s povolenými a vypočtenými hodnotami oteplení pro konkrétní části odpojovače [8].....	71
8.5	Hodnoty odporů kontaktů před a po měření trvalým proudem na vybraných dvojicích míst odpojovače v místech teplotních sond.....	72
8.6	Hodnoty odporů před a po měření krátkodobým a dynamickým výdržným proudem mezi začátkem a koncem pólu odpojovače.....	78
8.7	Hodnoty síly pro vypnutí odpojovače před a po měření krátkodobým a dynamickým výdržným proudem na posledním distančním válečku mezi noži.....	79
8.8	Hodnoty síly pro vypnutí odpojovače při návrhu a poté změřené přepočtem po sestrojení a normativní hodnoty těchto sil [7].....	80
9.1	Porovnání průměrné životnosti různých povrchových úprav u vybraných firem a ceny při aplikaci na základnu odpojovače (březen 2022) [14], [16], [17].....	83
9.2	Rozpočtový list pro základnu odpojovače, včetně práce při teoretické sazbě 280 Kč/hod bez DPH (březen 2022).....	84
9.3	Rozpočtový list pro části proudovodné dráhy odpojovače, včetně práce při teoretické sazbě 280 Kč/hod bez DPH (březen 2022).....	85
9.4	Rozpočtový list pro nosné a ovládací části odpojovače, včetně práce při teoretické sazbě 280 Kč/hod bez DPH (březen 2022).....	87
9.5	Parametry vybraného podpěrného izolátoru Pl 250-4 od firmy KUVAG GmbH & Co KG.....	89
9.6	Rozpočtový list pro izolátory a spojovací materiál odpojovače (březen 2022).....	89
9.7	Rozpočtový list pro celkové náklady odpojovače včetně práce při teoretické sazbě 280 Kč/hod bez DPH (březen 2022).....	90
9.8	Rozpočtový list pro celkové náklady odpojovače rozdělené na materiál a samotnou práci při teoretické sazbě 280 Kč/hod bez DPH (březen 2022).....	91
9.9	Přehled parametrů podobných odpojovačů nabízených na trhu (březen 2022) [15], [18], [23].....	91

ÚVOD

Tato práce zachycuje kompletní průběh návrhu, analytického ověření, stavbu, oživení a ověření některých parametrů na zkušebně. Na závěr nechybí i kritické zhodnocení jak po stránce finanční, tak po stránce technické. Celá práce může sloužit jako návod pro návrh odpojovače anebo jako přehled potřebných kroků a úskalí, které souvisí s návrhem takového přístroje.

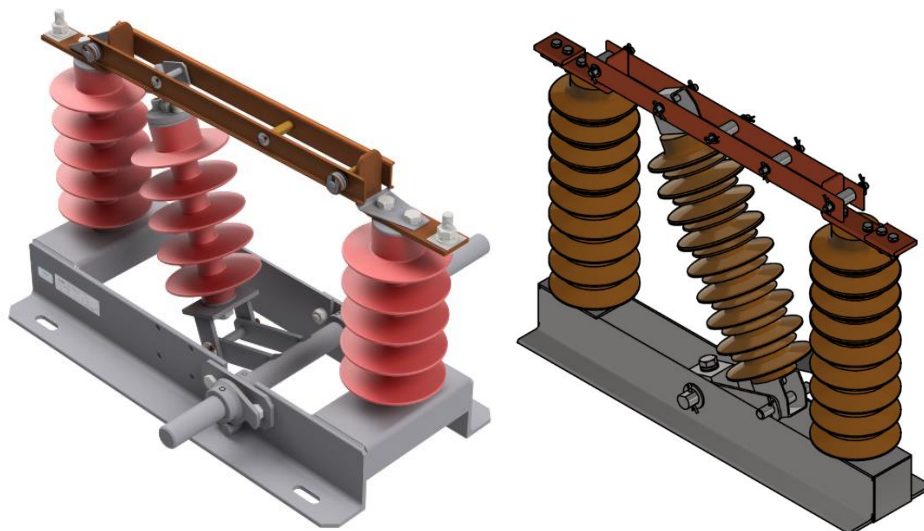
Konkrétním cílem této diplomové práce je provést návrh trakčního vysokonapěťového odpojovače na napětí 25 kV a proud 800 A. Je třeba, aby veškerý návrh byl v souladu s příslušnými normami, jako například ČSN EN 62271-1 ed. 2 nebo ČSN EN 50152-2 ed. 3 – Pevná trakční zařízení. Odpojovač musí splňovat příslušné izolační vzdálenosti, mechanickou odolnost při průchodu zkratového proudu a výsledná oteplení jednotlivých částí musí splňovat normou stanovená kritéria. Dále musí odpojovač svou mechanickou konstrukcí jevit známky schopnosti spolehlivého provozu za normálních venkovních podmínek. Výsledný produkt má být svou konstrukcí a cenou konkurenceschopným na trhu trakčních odpojovačů, kde je v současné době skoro jediným dodavatelem firma DRIBO, spol. s r.o. [12]

Pro provozní spolehlivost, dostatečnou živostnost, ale i finanční rentabilitu, byl proveden kritický výběr vhodných a dobře dostupných materiálů a komponentů. Samotné ověření správného návrhu odpojovače bylo provedeno jak analyticky, tak u některých parametrů i pomocí zkoušky na postaveném navrženém odpojovači. Navržený odpojovač splňuje parametry blízké západním produktům dodávaných pro železnice okolních států Evropy.

Diplomová práce je členěna do deseti základních částí. Kapitola 1. shrnuje zadané parametry a výběr vhodného typu odpojovače. Kapitoly 2., 3., 4., a 5. obsahují samotný návrh a výpočetní ověření zadaných parametrů s ohledem na izolační vzdálenosti, zkratovou odolnost a dovolené oteplení části odpojovače. Po analytickém ověření parametrů následuje mechanický návrh v kapitole 6. a vytvoření výkresové dokumentace, která je samostatnou přílohou. Na výsledném návrhu je v kapitole 7. provedena kontrola izolačních vzdáleností. Výsledky zkoušek na odpojovači a vyhodnocení výsledků je uvedeno v kapitole 8. Následuje kapitola 9., která obsahuje průběh stavby a finanční zhodnocení, a to postupně u každého většího celku odpojovače, a nakonec i celého odpojovače. Tato kapitola obsahuje i technické zhodnocení a návrhy na úpravy, a to na základě poznatků z průběhu stavby a poté i ze samotných zkoušek. V poslední kapitole 10. je provedeno shrnutí celého průběhu diplomové práce a dosažení cílů.

1. ZADANÉ PARAMETRY ODPOJOVAČE

Jedná se o trakční jednopólový odpojovač na 25 kV střídavých. Typ bude jednoduchý pákový, což je doposud nepoužívanější provedení odpojovače, nejčastěji pro VN hladinu.



Obrázek 1.1 Ukázka vlevo odpojovač firmy IVEP, a.s. a vpravo vlastní konstrukce [14]

Proudovodné nože jsou na jedné straně uchyceny čepem, který umožňuje pohyb po kružnici. Prostřední část, která ovládá pohyb nožů, může být v menších napětích izolační tyč, u větších napětích již izolátor. Pomocí velmi jednoduchého pákového mechanismu je pohyb této části převeden na nože, které se pohybují po kružnici, a dojde tak k rozepnutí obvodu. Výhodami je bezesporu cena, spolehlivost, jednoduchost a univerzálnost. Nevýhodou může být potřebný volný prostor a také hmotnost.

Tabulka 1.1 Zadané hodnoty parametrů trakčního odpojovače

Odpojovač na vysoké napětí			
Jmenovitý trvalý proud	I_r	800	[A]
Jmenovité napětí	U_n	25	[kV]
Efektivní ustálená hodnota zkratového proudu	I_k''	32	[kA]

Zvolený jmenovitý trvalý proud byl vybrán z normy ČSN EN 60059 – Normalizované hodnoty proudu IEC. Návrh odpojovače by měl být v souladu s normou ČSN EN 62271-1 ed. 2 – Vysokonapěťová spínací a řídicí zařízení – Část 1: Společná ustanovení pro spínací a řídicí zařízení střídavého proudu. Dále také s normou ČSN EN 50152-2 ed. 3 – Pevná trakční zařízení – Zvláštní požadavky na střídavá spínací zařízení střídavého proudu – Část 2: Odpojovače, uzemňovače a spínače se jmenovitým napětím nad 1 kV. Z těchto norem vyplývají z pohledu návrhu izolačních vzdáleností důležité informace o hodnotě krátkodobého výdržného napětí průmyslového kmitočtu

U_d a jmenovitého impulzního napětí U_{Ni} . Tyto hodnoty jsou detailněji definovány v normě pro pevná trakční zařízení ČSN EN 50152-2 ed. 3. Pro tento odpojovač byla vybrána kategorie přepětí 4 a zároveň hodnoty s vyšším požadavkem na izolační systém, které se používají v zemích s vyšším počtem zařízení v nadmořské výšce do 2000 m bez přidavného korekčního činitele pro nadmořskou výšku. [7], [8], [9], [10]

2. NÁVRH IZOLAČNÍCH VZDÁLENOSTÍ

V této kapitole dostane odpojovač své první rozměry, na základě kterých je možné již vytvořit první odhad celkové velikosti navrhovaného odpojovače. Konstruktor nesmí zapomenout, že navržené izolační vzdálenosti je potřeba dodržet i v místě instalace. V případě tohoto drážního odpojovače je vzdálenost od cizích vodivých částí v okolí odpojovače řešena ukotvením u samotného vrcholu trakčního sloupu, takže nejbližší cizí vodivou částí je samotná základna odpojovače.

Tabulka 2.1 Zadané hodnoty U_{Ni} a U_d přejaté z normy ČSN EN 50152-2 ed. 3 pro jmenovité napětí soustavy $U_n = 25$ kV v kategorii přepětí 4 s vyššími požadavky na izolační systém [9]

	Krátkodobé výdržné napětí průmyslového kmitočtu U_d :	Jmenovité impulzní napětí U_{Ni} :
	[kV]	[kV]
Společná hodnota $U_{p-společná}$	95	250
V odpojovací dráze $U_{p-odpoj.dráha}$	110	290

2.1 Minutová zkouška 50 Hz

Při návrhu izolačních vzdáleností je důležité nalézt takovou vzdálenost pomocí empirických vztahů, aby izolace odolala krátkodobému výdržnému napětí průmyslového kmitočtu U_d . Nejdříve provedeme výpočet pro společnou hodnotu $U_{d-společná} = 95$ kV. Indexy p ($U_p, U_{p-společná}, \text{atd.}$) u napětí značí vypočtená napětí pomocí empirických vzorců. Pro každou konfiguraci musí platit podmínka $U_p \geq U_d$. Hledá se taková vzdálenost d , pro kterou bude podmínka splněna [1], [2], [3], [20]

Pro konfiguraci **hrot-hrot**

$$U_p \approx 3,4 d + 14 (1 - e^{-0,25 \cdot d}), \text{ platí pro } 1 \text{ cm} < d < 150 \text{ cm.} \quad (2.1)$$

Pro konfiguraci **hrot- uzemněný hrot**

$$U_p \approx 3,7 d + 19 (1 - e^{-0,3 \cdot d}), \text{ platí pro } 1 \text{ cm} < d < 250 \text{ cm.} \quad (2.2)$$

Pro konfiguraci **hrot- uzemněná rovina**

$$U_p \approx 3,5 d + 15 (1 - e^{-0,3 \cdot d}), \text{ platí pro } 1 \text{ cm} < d < 150 \text{ cm.} \quad (2.3)$$

Pro **povrchovou cestu**

$$U_p \approx 3,5 d + 25 (1 - e^{-0,1 \cdot d}), \text{ platí pro } 1 \text{ cm} < d < 100 \text{ cm.} \quad (2.4)$$

Obdobně se provede výpočet a ověření podmínky i pro výpočet pro izolační vzdálenosti v odpojovací dráze $U_{d-odpoj.dráha} = 110$ kV.

Tabulka 2.2 Izolační vzdálenosti pro minutovou zkoušku: oranžová – společná hodnota, zelená – v odpojovací dráze

	Minutová zkouška výdržným napětím U_d [kV] a frekvenci $f = 50$ Hz.			
[cm]	hrot-hrot	hrot-uzemněný hrot	hrot-uzemněná rovina	Povrchová cesta
20,5	83,6	94,8	86,7	83,3
21	85,3	96,7	88,5	84,9
21,5	87,0	98,5	90,2	86,6
22	88,7	100,4	92,0	88,2
22,5	90,4	102,2	93,7	89,9
23	92,2	104,1	95,5	91,5
23,5	93,9	105,9	97,2	93,1
24	95,6	107,8	99,0	94,7
24,5	97,3	109,6	100,7	96,3
25	99,0	111,5	102,5	97,9
25,5	100,7	113,3	104,2	99,5
26	102,4	115,2	106,0	101,1
26,5	104,1	117,0	107,7	102,7
27	105,8	118,9	109,5	104,3
27,5	107,5	120,7	111,2	105,9
28	109,2	122,6	113,0	107,5
28,5	110,9	124,4	114,7	109,1
29	112,6	126,3	116,5	110,6
29,5	114,3	128,1	118,2	112,2
30	116,0	130,0	120,0	113,8

Příklad výpočtu při $d = 29$ cm pro povrchovou cestu a ověření podmínky izolačního napětí v odpojovací dráze $U_{p-odpoj.dráha} \geq U_{d-odpoj.dráha}$

$$3,5 \cdot 29 + 25 \cdot (1 - e^{-0,1 \cdot 29}) \geq 110,6 \text{ kV}$$

110,6 kV $\geq$ 110 kV podmínka je splněna.

2.2 Rázová zkouška 1,2/50 μ s

Pro výpočet izolačních vzdáleností budeme postupovat stejně jako v předchozí zkoušce, avšak respektujeme hodnoty pro zkoušku rázovou vlnou. Indexy p (U_p , $U_{p-společná}$, atd.) u napětí značí vypočtená napětí pomocí empirických vzorců. Nejdříve provedeme výpočet pro společnou hodnotu $U_{Ni-společná} = 250$ kV. Stejně vzorce platí i pro hodnoty v odpojovací dráze $U_{Ni-odpojo dráha} = 290$ kV. Obecně tedy pro vypočtené hodnoty U_p platí [1], [2], [3], [20]

Pro konfigurace **hrot – uzemněný hrot**

$$U_p \approx 6,7 d + 25 (1 - e^{-0,25 \cdot d}) , \text{ platí pro } 1 \text{ cm} < d < 40 \text{ cm} \quad (2.5)$$

$$U_p \approx 75 + 5,56 d , \text{ platí pro } 40 \text{ cm} < d < 250 \text{ cm}. \quad (2.6)$$

Pro konfigurace **hrot – uzemněná rovina**

$$U_p \approx 5,5 d + 15 (1 - e^{-0,25 \cdot d}) , \text{ platí pro } 1 \text{ cm} < d < 40 \text{ cm} \quad (2.7)$$

$$U_p \approx 40 + 5 d , \text{ platí pro } 40 \text{ cm} < d < 250 \text{ cm}. \quad (2.8)$$

Pro **povrchovou cestu**

$$U_p \approx 5,6 d + 20 (1 - e^{-0,1 \cdot d}) , \text{ platí pro } 1 \text{ cm} < d < 100 \text{ cm}. \quad (2.9)$$

Jak lze ze znázorněných vztahů vidět, je třeba od vzdálenosti $d = 40 \text{ cm}$ využít upravený tvar vzorce.

Tabulka 2.3 Izolační vzdálenosti pro impulsní zkoušku: oranžová – společná hodnota, zelená – v odpojovací dráze

d	Zkouška impulsním napětím U_{Ni} [kV] s dobou čela a půl týlu 1,2/50 μs		
[cm]	hrot-uzemněný hrot	hrot-uzemněná rovina	Povrchová cesta
34	252,8	202,0	209,7
34,5	256,1	204,7	212,6
35	259,5	207,5	215,4
38	279,6	224,0	232,4
38,5	282,9	226,7	235,2
39	286,3	229,5	238,0
39,5	289,6	232,2	240,8
40	293,0	235,0	243,6
40,5	300,2	242,5	246,5
41	303,0	245,0	249,3
41,5	305,7	247,5	252,1
42	308,5	250,0	254,9
42,5	311,3	252,5	257,7
43	314,1	255,0	260,5
47	336,3	275,0	283,0
47,5	339,1	277,5	285,8
48	341,9	280,0	288,6
48,5	344,7	282,5	291,4
49	347,4	285,0	294,3
49,5	350,2	287,5	297,1
50	353,0	290,0	299,9

3. ROZMĚRY PROUDOVODNÉ DRÁHY ODPOJOVAČE

Při návrhu odpojovače se nadále počítá s kritičtějšími vzdálenostmi pro zkoušku impulsním napětím s parametrem 1,2/50 μ s. Tyto vzdálenosti totiž plně vyhovují i minutové zkoušce s frekvencí 50 Hz. Dále se počítá s tím, že při jakékoli manipulaci, respektive odpojení odpojovače, dojde na straně zátěže k uzemnění, aby bylo pracoviště (v tomto případě trolejové vedení) zabezpečeno proti úrazu elektrickým proudem. Tedy veškeré části odpojovače na straně zátěže včetně samotné základny jsou uzemněny. Nebereme tudíž v potaz konfiguraci hrot – hrot. Následuje tabulka s potřebnými izolačními vzdálenostmi pro dimenzování hlavních rozměrů odpojovače na trakční napětí $U_n = 25$ kV.

Tabulka 3.1 Izolační vzdálenosti navrhovaného odpojovače

	Min. izolační vzdálenost hrot – uzemněný hrot	Min. izolační vzdálenost hrot – uzemněná rovina	Min. izolační vzdálenost povrchová cesta
	[cm]	[cm]	[cm]
Společná hodnota	34	42	41,5
V odpojovací dráze	40	50	48,5

3.1 Stanovení průřezu proudovodné dráhy

První odhad průřezu měděných pásovin se určuje podle praxí doporučené hodnoty proudové hustoty σ v rozmezí 2–4 A mm⁻². Jiná hodnota proudové hustoty by byla při návrhu transformátoru, elektromotoru apod. [3], [20]

$$S_{max} = \frac{I_r}{\sigma_{min}} = \frac{800}{2} = 400 \text{ mm}^2, \quad (3.1)$$

$$S_{min} = \frac{I_r}{\sigma_{max}} = \frac{800}{4} = 200 \text{ mm}^2, \quad (3.2)$$

Při návrhu je dále postupováno pomocí iteračního procesu s cílem docílit ustáleného oteplení všech částí proudovodné dráhy odpojovače pod normou dané hodnoty – viz ČSN EN 62271-1 ed. 2 – Tabulka 14. Nejkritičtější jsou kontakty. Je tedy potřeba volit výšku nože co největší s ohledem na kontaktní plochu, ale zároveň se značnými elektrodynamickými silami při průchodu zkratového proudu. Ten nám zase působí hlavně na tloušťku nože odpojovače. V neposlední řadě je vhodné volit takový průřez, který je standardně dostupný u většiny dodavatelů hutního materiálu z neželezných kovů. Pro výpočet byla prozatím zvolena firma ALMS spol. s r.o. sídlící v Brně. Měděné ploché tyče, které tato firma dodává, mají označení EN CW004A a splňují normu ČSN EN 13601. Měď a slitiny mědi - Tyče a dráty z mědi pro všeobecné použití v elektrotechnice.

Po iteračním procesu byly pro praporce a nože zvoleny následující průřezy. Pro praporce byl zvolen rozměr průřezu 50×10 mm. Tento rozměr musí umožnit dostatečnou plochu na chlazení kontaktů jak s přívodem, tak i s nožem, dále stabilitu pro uchycení nožů a uchycení k izolátoru, a taktéž musí být schopen snést síly působící na L-ohyby. Tloušťka musí být vhodná pro vytvoření dostatečné kontaktní plochy s nožem.[8], [22]

$$S_{praporec} = a_{praporec} b_{praporec} = 50 \cdot 10 = 500 \text{ mm}^2, \quad (3.3)$$

Pro nože byl zvolen rozměr průřezu 50×5 mm. Z výše uvedených důvodů musí tento rozměr snést jak elektrodynamické působení proudu, tak i tepelné působení proudu. Rozměr nože musí počítat s nerovnoměrným proudovým rozdělením na oba nože z důvodu různých kontaktních odporů, jež se budou za svou životnost měnit. Rozměr je zároveň zvolen tak, že umožňuje nouzově zastoupit vedení proudu druhého nože, například z důvodu silné oxidace jedné strany praporce.

$$S_{nůž} = a_{nůž} b_{nůž} = 50 \cdot 5 = 250 \text{ mm}^2. \quad (3.4)$$

Rozměr přívodního vodiče byl zjištěn z normy ČSN EN 60947-1 ed. 4 – Spínací a řídicí přístroje nízkého napětí – Část 1: Všeobecná ustanovení, Tabulka 11 – Zkušební měděné pásy pro zkušební proudy od 400 A do 3150 A včetně. Pro přívody s proudem 800 A slouží dva měděné pásy o rozměru 60×5 mm, což dává dohromady rozměr 60×10 mm. [11]

$$S_{přívod} = a_{přívod} b_{přívod} = 60 \cdot 10 = 600 \text{ mm}^2. \quad (3.5)$$

Skutečné proudové hustoty jednotlivých částí proudovodné dráhy tedy budou

$$\sigma_{praporec} = \frac{I_r}{S_{praporec}} = \frac{800}{500} = 1,6 \text{ A mm}^{-2}, \quad (3.6)$$

$$\sigma_{nože} = \frac{I_r}{2 S_{nůž}} = \frac{800}{2 \cdot 250} = 1,6 \text{ A mm}^{-2}, \quad (3.7)$$

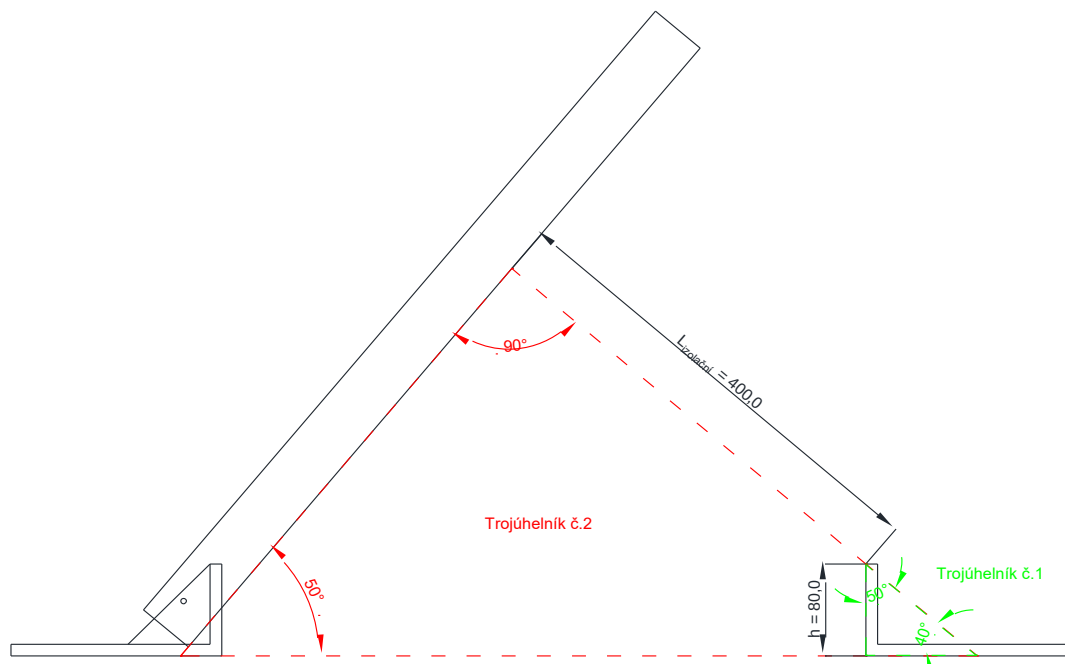
$$\sigma_{přívod} = \frac{I_r}{S_{přívod}} = \frac{800}{600} = 1,3 \text{ A mm}^{-2}, \quad (3.8)$$

3.2 Stanovení rozměrů nožů odpojovače

Nože odpojovače tvoří pohyblivou část proudovodné dráhy, která musí v odpojené dráze být v takové vzdálenosti, aby byla v jakémkoli místě od odpojeného praporce splněna minimální izolační vzdálenost. Musí být schopen přenášet jmenovitý proud, a to při splnění maximálního oteplení pro daný materiál. Bližší hodnoty dovoleného oteplení stanovuje norma ČSN EN 62271-1 ed. 2 – Tabulka 14. Dále tyto nože musí odolávat značným elektrodynamickým silám při průchodu zkratového proudu. [8]

3.2.1 Výpočet délky nože

Pro dimenzování délky nože použijeme konfiguraci minimální izolační vzdálenosti hrot – uzemněný hrot. To představuje minimální vzdálenost mezi hranou otevřeného nože s osou otáčení na praporci na straně zdroje a hranou praporce na straně zátěže. Pro správný výpočet délky nože je potřeba stanovit vhodný úhel otevření odpojeného odpojovače. Z technické praxe není vhodné, aby úhel otevření byl větší než 60° . Na většině komerčně dostupných odpojovačů, jež jsou ovládány ručně, je použit úhel 50° – 55° . Pro tento odpojovač byl zvolen úhel otevření $\alpha = 50^\circ$.



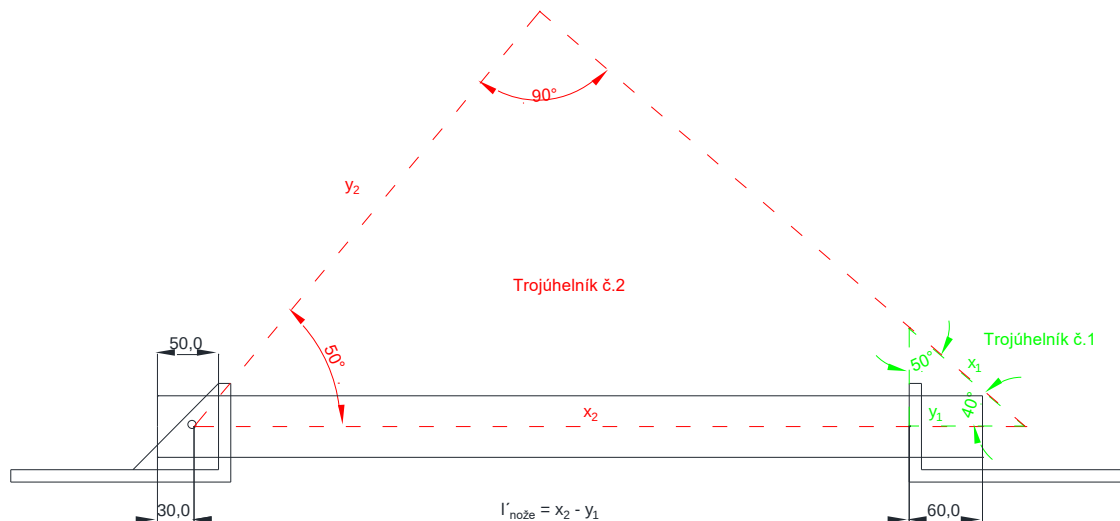
Obrázek 3.1 Návrh proudovodné dráhy v rozepnutém stavu

Na obrázku je načrtnuta podoba bokorysu navrhovaného odpojovače. Otevřený, tedy odpojený stav nám vytvoří trojúhelník viz obrázek. Pravoúhlou odvěsnu, která vychází z nože směrem k odpojenému praporci, je potřeba umístit do místa, jež je z celé délky nože nejbližší k tomuto praporci. Právě zde je nutné pohlídat minimální vzdálenost v odpojovací dráze při konfiguraci hrot – uzemněný hrot $L_{izolační} = 40$ cm. Tato minimální délka musí být mezi nožem a odpojeným praporcem. Vzniklá pravoúhlá odvěsna končící až v místech vodorovné, tedy sepnuté polohy viz obrázek. Takto lze načrtnout pravoúhlý trojúhelník č.2, ve kterém známe díky zadanému úhlu otevření $\alpha = 50^\circ$ i třetí zbývajících úhel a dále známe částečnou délku protilehlé odvěsny k úhlu otevření. Zbylou část délky této odvěsny je potřeba vypočítat pomocí pravoúhlého trojúhelníku č.1 a z pravidel o podobnosti trojúhelníků.

Jak lze z náčrtku trojúhelníku č.1 vidět, mezi hranou odpojeného praporce, která je nejbližší k odpojeným nožům, a vodorovnou rovinou, jež slouží jako přepona trojúhelníku č.2, je přesně výška praporce $h = 8$ cm. Díky znalosti jedné odvěsny a alespoň jednoho

úhlu lze vypočítat přeponu označenou jako x_1 . Vypočítaná přepona v trojúhelníku č. 1 slouží pro výpočet celkové délky odvěsny trojúhelníku č.2.

Délka této odvěsny se tedy skládá ze součtu minimální izolační vzdálenosti $L_{izolační}$ a přepony trojúhelníku č.1 označené jako x_1 – viz obrázek, pokud jsou k dispozici u trojúhelníku č.1 a č.2 všechny úhly a alespoň jedna délka strany a je možné využít goniometrických funkcí k výpočtu již všech zbylých stran.



Obrázek 3.2 Náskres proudovodné dráhy v sepnutém stavu

Na tomto obrázku sepnutého odpojovače jsou okótované délky nože. Přenesení načrtnutých trojúhelníků do osy nože je možné díky vypočtení všech stran trojúhelníků č.1 a č.2 z předchozího obrázku. Ostatní rozměry jsou zvolené kvalifikovaným odhadem, a to s ohledem na technologii pozdější výroby, stabilitu nožů a v neposlední řadě na chlazení kontaktů. Následující výpočet délky nožů vychází z obrázku, na kterém byly trojúhelníky přemístěny do osy sepnutého nože.

a) Trojúhelník č.1 – výpočet délek zbývajících stran

$$\cos \alpha = \frac{h}{x_1} \Rightarrow x_1 = \frac{h}{\cos \alpha} = \frac{0,08}{\cos 50^\circ} = 124 \text{ mm}, \quad (3.9)$$

$$\tan \alpha = \frac{y_1}{h} \Rightarrow y_1 = \tan \alpha \cdot h = \tan 50^\circ \cdot 0,08 = 95 \text{ mm}, \quad (3.10)$$

b) Trojúhelník č.2 – výpočet délek zbývajících stran ze znalosti přepony x_1

$$\sin \alpha = \frac{L_{izolační} + x_1}{x_2} \Rightarrow x_2 = \frac{L_{izolační} + x_1}{\sin \alpha} = \frac{0,4 + 0,124}{\sin 50^\circ} = 684 \text{ mm}, \quad (3.11)$$

$$\tan \alpha = \frac{L_{izolační} + x_1}{y_2} \Rightarrow y_2 = \frac{L_{izolační} + x_1}{\tan \alpha} = \frac{0,4 + 0,124}{\tan 50^\circ} = 440 \text{ mm}, \quad (3.12)$$

c) Výpočet samotné délky nože

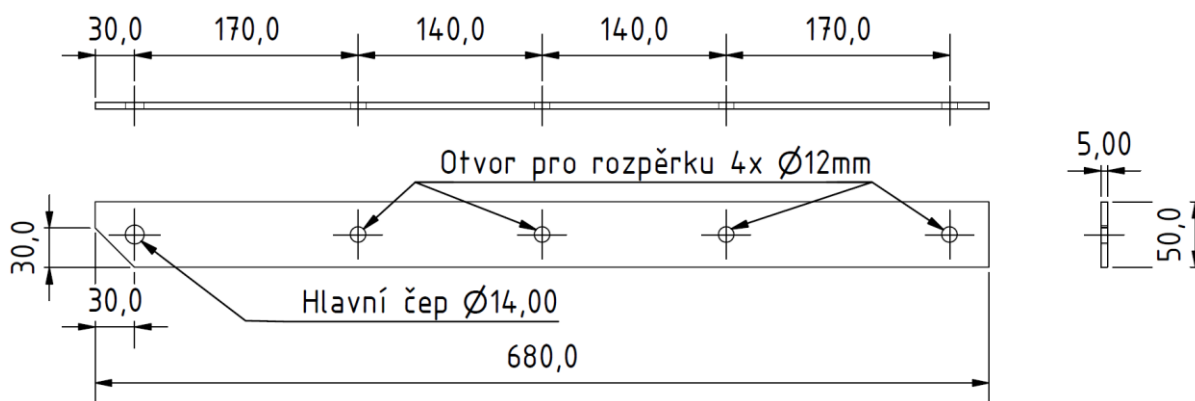
$$l'_{nože} = x_2 - y_1 = 0,684 - 0,095 = 589 \text{ mm}, \quad (3.13)$$

$$l_{nože} = l'_{nože} + 60 + 30 = 589 + 60 + 30 = 679 \text{ mm}$$

Ze znalosti potřebných rozměrů je možné určit konečnou délku nože s drobným zaokrouhlením na nejbližší vyšší desítky, tudíž celková délka jednoho nože $l_{nože} = 680 \text{ mm}$.

3.3 Celkové rozměry nože

Z výše uvedených výpočtů délky nože a stanovení průřezu nože je na jeden nůž zvolena plochá elektrovodná měděná tyč o délce $l_{nůž} = 680 \text{ mm}$ s výškou $a_{nůž} = 50 \text{ mm}$ a tloušťkou $b_{nůž} = 5 \text{ mm}$.



Obrázek 3.3 Náskres jednoho nože odpojovače

3.4 Stanovení rozměrů praporců odpojovače

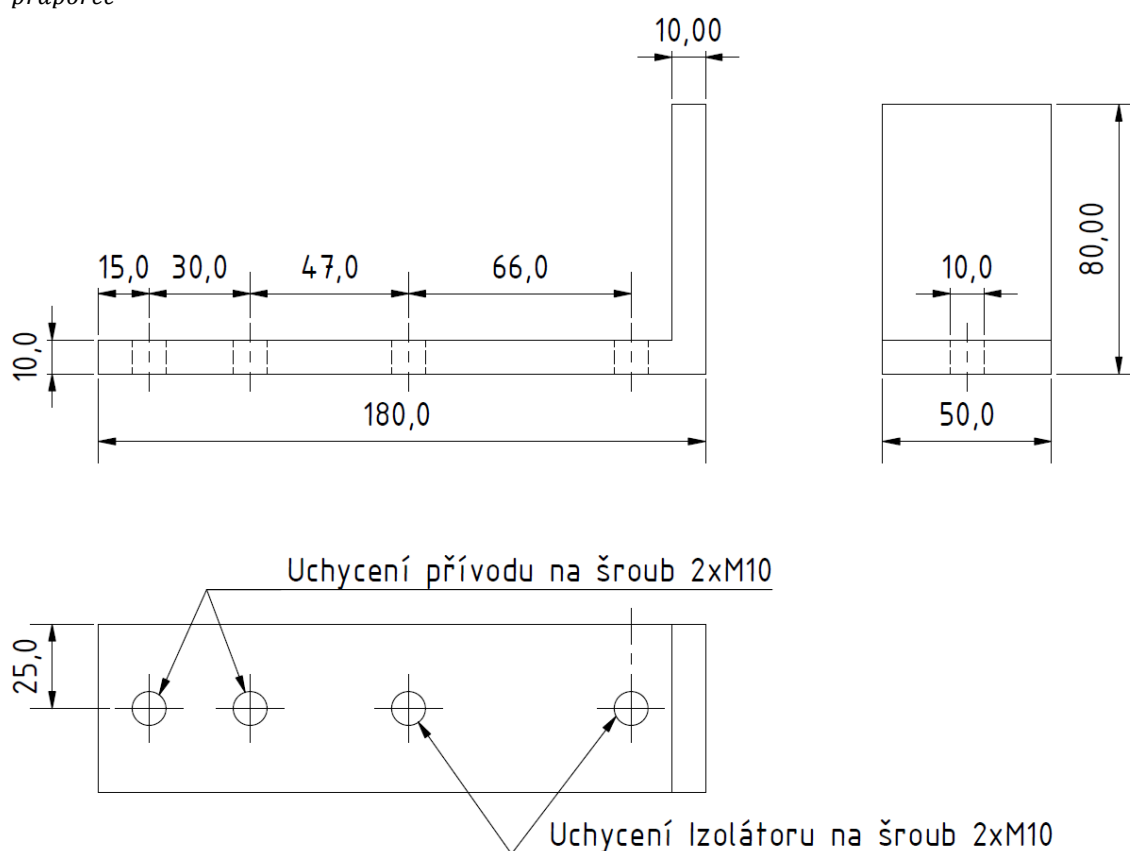
Praporce tvoří část mezi přívodem a nožem odpojovače. Jsou pevně zajištěny na dvou podpůrných izolátorech, jež jsou připevněny k samotné základně odpojovače. Zároveň jeden z praporců tvoří základnu pro osu otvírání kontaktních nožů. Praporce musí odolávat elektrodynamickým silám v L-ohybech a dále tepelnému působení jmenovitého trvalého proudu. Respektive svými rozměry musí být schopni uchladit se na normou stanovené maximální dovolené oteplení. Praporce budou z čisté mědi, avšak bude provedeno lokální postříbření v místě kontaktu s noží.

Vodorovná délka praporce je zvolena z respektování rozměru zvoleného izolátoru, rozměru přívodního vodiče a v neposlední řadě s ohledem na prostor pro vytvoření základy pro osu otáčení nožů odpojovače. Pro výrobní jednoduchost jsou oba praporce svými rozměry totožné. Pro uchycení izolátoru a přívodního vodiče budou použity šrouby M10.

Svislá výška praporce je zvolena s ohledem na přesah výšky praporce o 10 mm nad výšku nože v zavřené poloze. Tento přesah slouží pro odvod tepla z kontaktů, dále pro vytvoření dostatečné náběžné hrany obou nožů a také jako rezervní kontaktní část v případě nedokonalého uzavření odpojovače. Tentýž přesah 10 mm byl symetricky zvolen i pod výšku nože. Nakonec je nutné počítat s 10 mm jako manipulační prostor pro vytvoření pravého úhlu.

3.4.1 Celkové rozměry praporce

Z výše uvedených důvodů byla zvolena vodorovná délka $l_{praporec} = 180 \text{ mm}$, výška praporce $h_{praporec} = 80 \text{ mm}$, šířka praporce $a_{praporec} = 50 \text{ mm}$ a tloušťka praporce $b_{praporec} = 10 \text{ mm}$.



Obrázek 3.4 Náskres praporce odpojovače

4. ROZBOR ELEKTRODYNAMICKÝCH SIL PŮSOBÍCÍCH NA PROUDOVODNOU DRÁHU.

V této kapitole je vypočítána většina potřebných hodnot sil působících na jednotlivé části proudovodné dráhy a i na samotný kontakt. Tyto výpočty jsou důležité pro ověření zvolení vhodných rozměrů proudovodné dráhy. Pro potřeby tohoto výpočtu již bylo nutné blíže stanovit rozměry praporce.

4.1 Výpočet minimální přitlačné síly na jeden kontakt

Nejprve je pro další rozbor elektrodynamických sil nutné stanovit z tabulek materiálové konstanty a hodnoty veličin, které budou potřebné i nadále pro výpočet sil působících. Materiálem proudovodné dráhy je čistá měď. Výjimku bude tvořit kontaktní místo, které bude lokálně postříbřeno. Z tabulky 2-3 vysokoškolská skripta *Elektrické přístroje – podklady a příklady pro navrhování*, Bohuslav Bušov, str.35; (dále skripta E) [3]-*Vlastnosti vodičů na mezi měknutí a svaření* byly odečteny tyto hodnoty.

Tabulka 4.1 Hodnoty materiálových konstant potřebných pro stanovení dostatečné přitlačné síly

Materiál	Napětí na mezi měknutí	Napětí na mezi svaření	Poměrový činitel	Tvrдость	Poznámky
	U_m	U_{sv}	C_k	H	
	[V]	[V]	[-]	[MPa]	
Cu - Měď	0,12	0,43	1,16	550	H – Alms spol. s.r.o.
Ag - Stříbro	0,09	0,37	1,16	550	Lokální postříbření

V tabulce je možné porovnat hodnoty pro měď a pro stříbro. Pro odpojovač bylo zvoleno lokální postříbření v místě kontaktů, a tedy bude výpočet přitlačné síly proveden pro materiál stříbro.

Nejprve je nutné provést výpočet odporu na mezi měknutí. Tato hodnota se počítá při průchodu jmenovitého trvalého proudu a udává hranici, kdy už může dojít k měknutí materiálu a tím ke zhoršení stykové plochy a zvýšení náchylnosti na silové působení. Výpočet stykového odporu na mezi měknutí R_{sm} pro jeden kontakt v kontaktním páru (poloviční proud):

$$R_{sm} = \frac{U_M}{2 \cdot \frac{I_r}{2}} = \frac{0,09}{2 \cdot \frac{800}{2}} = 112,5 \mu\Omega \rightarrow 1 \text{ kontakt}, \quad (4.1)$$

Dále je nutné vypočítat odpor na mezi svaření. Tato hodnota se počítá při průchodu zkratového proudu a udává hranici, kdy může nastat svaření kontaktů, což má za následek obtížné odpojení, potažmo zničení kontaktní plochy. Odpojovač musí snést průchod

zkratového proudu do doby, než zareaguje příslušná ochrana v obvodu, a poté musí být schopen v nezátíženém stavu bez problému rozpojit proudovodnou dráhu obvodu. Výpočet stykového odporu na mezi svaření R_{sv} pro jeden kontakt v kontaktním páru (poloviční proud):

$$R_{sv} = \frac{U_{sv}}{c_k \frac{I_k}{2}} = \frac{2 \cdot 0,37}{1,16 \cdot \frac{32000}{2}} = 19,94 \mu\Omega \rightarrow 1 \text{ kontakt}, \quad (4.2)$$

Pro výpočet velikosti přitlačné síly F_{min} je potřeba určit exponent n . Tento exponent je v případě přímkového dotyku třecích kontaktů v rozmezí 0,7 – 0,8, kdy nižší hodnota odpovídá tvrdšímu materiálu a vyšší měkčímu materiálu. Pro náš návrh budeme kritičtější a zvolíme nižší hodnotu tedy $n = 0,7$. Dále je třeba určit materiálovou konstantu k . Ta se v případě stříbra nachází v rozmezí $3 \cdot 10^{-4} - 6 \cdot 10^{-4}$. Kdy dolní mez ($3 \cdot 10^{-4}$) se užívá tam, kde jsou kontakty častým pohybem čištěny, a ještě k tomu jsou v ochranném prostředí (olej nebo plyn SF_6). Horní mez ($6 \cdot 10^{-4}$) je naopak užívána v případech, kdy se jedná o velmi zřídka spínaný kontakt, na který působí další okolní vlivy jako vyšší teplota, vyšší relativní vlhkost apod. V případě trakčního odpojovače, u kterého se nepředpokládá časté vypínání a který bude po celou svou životnost vystaven působení počasí a dalších vlivů, musíme počítat právě s touto horní mezí. Je tedy zvoleno $k = 6 \cdot 10^{-4}$. Z tabulky 2-2 (skripta E; str.27). [1], [2], [3], [20]

Výpočet minimální přitlačné síly F_{min} pro jeden kontakt v kontaktním páru

$$F_{min} = \left(\frac{k}{R_{sv}} \right)^{\frac{1}{n}} = \left(\frac{6 \cdot 10^{-4}}{19,94 \cdot 10^{-6}} \right)^{\frac{1}{0,7}} = 129,4 \text{ N}, \quad (4.3)$$

Pro přitlačnou sílu je v této části návrhu vhodné zvolit bezpečnostní konstantu $k_1 = 1,4$. Tím vynásobíme vypočtenou velikost minimální přitlačné síly a získáme námi zvolenou přitlačnou sílu F_p . Jedná se o proces, kdy musíme do výpočtu vnést reálné podmínky provozování odpojovače. Pro přitlačnou sílu F_p na jeden kontakt v kontaktním páru platí:

$$F_p = k_1 F_{min} = 1,4 \cdot 129,4 \doteq 181 \text{ N}, \quad (4.4)$$

4.2 Elektrodynamické síly působící na odpojovač při průchodu zkratového proudu.

Pro potřeby následujících výpočtů elektrodynamických sil při zkratu je třeba provést výpočet vrcholové hodnoty zkratového proudu ze známé efektivní hodnoty ustáleného zkratového proudu. Pro výpočet této hodnoty je třeba vnést do výpočtu poznatky z praxe. Tedy rozdíl mezi praktickou a teoretickou hodnotou je dán existencí různých vlivů jako odporu vedení, vzdáleností vlastního zdroje atd. Na zkušebnách se při testech používá zavedená kompromisní hodnota mezi teoretickou a praktickou velikostí.

Výpočet teoretické vrcholové hodnoty zkratového proudu

$$I_{p \max - \text{teoretická}} = 2,54 I_k'' = 2,54 \cdot 32000 = 81,28 \text{ kA}, \quad (4.5)$$

Výpočet vrcholové hodnoty zkratového proudu nastavované při zkoušení ve zkušebně pro frekvenci 50 Hz

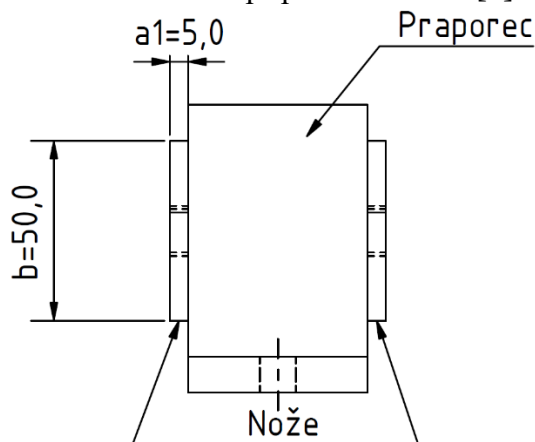
$$I_{p \max - \text{zkušebna}} = 2,5 I_k'' = 2,5 \cdot 32000 = 80 \text{ kA}, \quad (4.6)$$

Dále tedy bude počítáno s hodnotou, na kterou se daný odpojovač bude zkoušet na zkušebně. Tedy nadále bude platit:

$$I_{p \max} = I_{p \max - \text{zkušebna}} = 80 \text{ kA}$$

4.2.1 Síly působící v kontaktní úžině odpojovače

Kontakt není dokonalý a bude obsahovat tzv. úžiny, kterých je pouze omezené množství na určitou plochu kontaktu. Toto množství se s každým pohybem mění, protože třením se povrch kontaktu mění, a tudíž vznikají nebo zanikají kontaktní plošky. Tyto malé kontaktní plošky (úžiny) zapříčiní zakřivení (zhuštění) proudnic, což vyvolá sílu působící na samotné kontakty. Tato úžinová síla F_u působí proti přítlačné síle F_p a má za následek odpuzování kontaktů. Je tedy zřejmé, že musí platit $F_p > F_u$. V různých publikacích je tato síla pojmenovaná jako Holmova síla podle švédského fyzika a elektrotechnika pana Ragnara Holma, který je autorem kvalitně zpracované knihy zabývající se elektrickými kontakty. Riziko vzniká právě při průchodu zkratového proudu, kdy může dojít k odskoku kontaktu, a tím k vytažení oblouku a následně k měknutí či svaření materiálu případně oxidaci. [2]



Obrázek 4.1 Nákres čelního pohledu na nože odpojovače

Z rozměru nože vyplývá: $a_1 = 5 \text{ mm}$; $b = 50 \text{ mm}$. Počet úžin n vychází z empirického vzorce

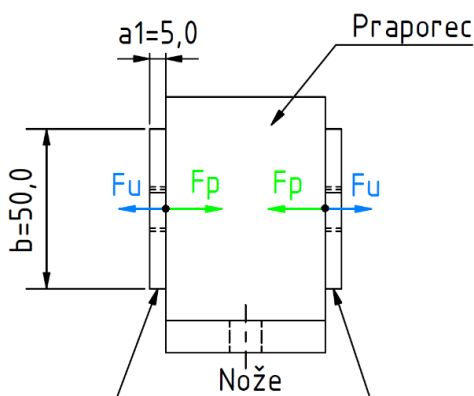
$$n = \frac{b}{2 a_1} = \frac{50}{2 \cdot 5} = 5, \quad (4.7)$$

Dále je nutné vypočítat, jaký průměr budou mít úžiny v kontaktní ploše. Průměr kontaktní úžiny vychází z průměru idealizované kruhové stykové plošky. Průměr d_n závisí na velikosti přitlačné síly F_p , tvrdosti H použitého materiálu proudovodné dráhy a dále i na předpokládaném počtu úžin n vzniklých na dané ploše kontaktu. [1], [2], [3], [20]

$$d_n = \sqrt{\frac{4 F_p}{n \pi H}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 181}{4 \cdot \pi \cdot 550 \cdot 10^6}} = 3,75 \cdot 10^{-4} \text{ m}, \quad (4.8)$$

Úžinová neboli odpudivá síla F_u v jednom kontaktu jednoho kontaktního páru platí [3]

$$\vec{F}_u = n 10^{-7} \left(\frac{i_d}{2 n}\right)^2 \ln\left(\frac{2 a_1}{d_n}\right) = 5 \cdot 10^{-7} \cdot \left(\frac{80000}{2 \cdot 5}\right)^2 \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot 5 \cdot 10^{-3}}{3,75 \cdot 10^{-4}}\right) = 113,3 \text{ N}, \quad (4.9)$$

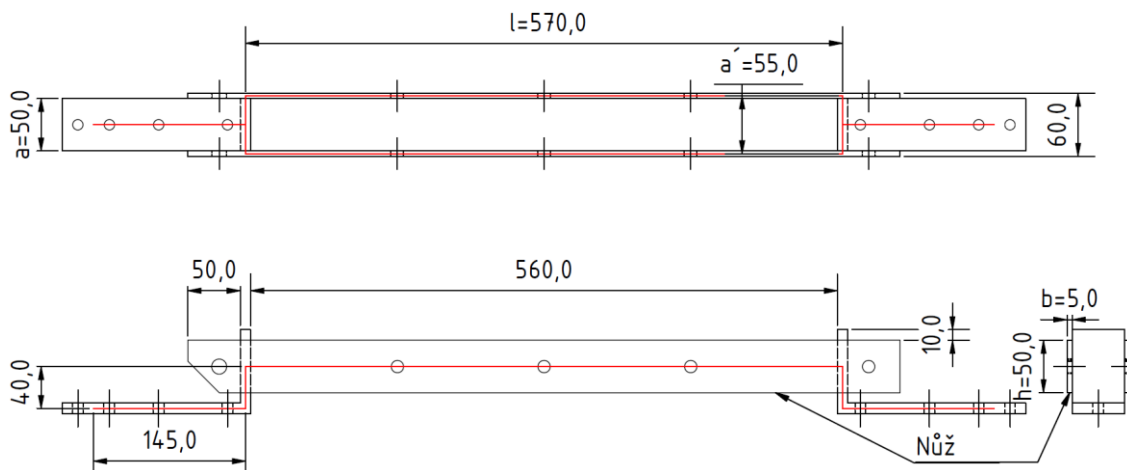


Obrázek 4.2 Nákres čelního pohledu na nože odpojovače s úžinovou a kontaktní silou

Výsledná hodnota této síly je menší než navržená přitlačná síla. Je však důležité si ji při zkoušení navrhnutého odpojovače pohlídat, protože rozhodně není zanedbatelná.

4.2.2 Síla působící mezi noži odpojovače

Okolo každého vodiče, jenž je protékáný proudem, vzniká magnetické pole. Máme-li dva vodiče, jež jsou souběžně vedle sebe, začnou tato pole na sebe působit. V tomto případě se jedná o dva rovnoběžné vodiče se shodným průřezem, délkou a stejným směrem působení proudu. Použitím Flemingova pravidla levé ruky je možné zjistit, že síly působí k vzájemnému přiblížení obou nožů. Tato síla tak pomáhá zvětšit kontaktní přitlačnou sílu. [2], [3], [4], [20]



Obrázek 4.3 Náskres kompletní proudovodné dráhy odpojovače

Do výsledného vzorce pro výpočet síly je potřeba zanést reálnou délku vodiče a reálný průřez vodiče. K tomuto účelu slouží takzvaný činitel zmenšení síly k_d vlivem omezené délky $l_{praporec-proud} = 0,57$ m oproti nekonečně dlouhému vodiči. Z obrázku je jasné, že rozměr a je dán použitou pásovinou na praporec. Přičemž a' je osová vzdálenost dvou na sebe působících nožů. [2], [3]

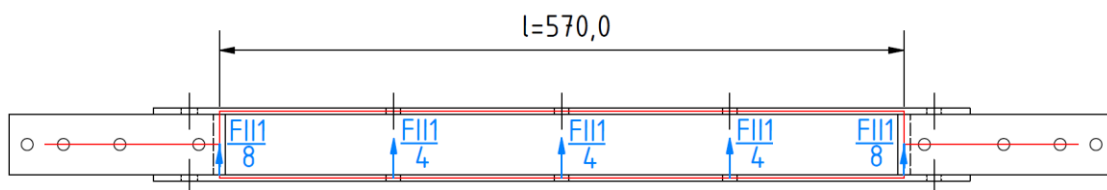
$$k_d = \sqrt{\left(\frac{a'}{l}\right)^2 + 1} - \frac{a'}{l} = \sqrt{\left(\frac{55}{570}\right)^2 + 1} - \frac{55}{570} = 0,91, \quad (4.10)$$

Vzhledem k tomu, že se nejedná o kulatý průřez vodiče, který by nám dovolil použít vztah pro ideální proudové vlákno, musíme zohlednit obdélníkový průřez, a to činitelem průřezu k_p . Pokud platí podmínka, že rozměry $h \gg b$ (viz obrázek), použijeme vztah podle americko-kanadského elektrotechnika pana Herberta Bristola Dwighta pro výpočet činitele průřezu k_p . [2], [3]

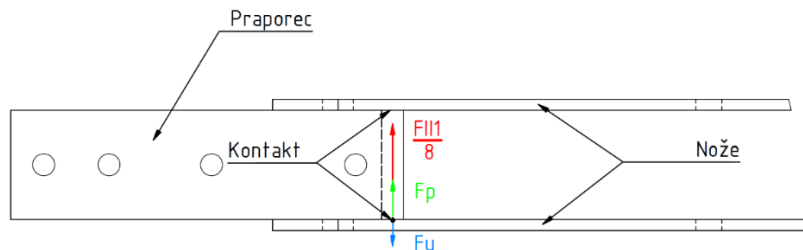
$$k_p = 1 - \frac{0,12}{\frac{a-b}{h+b} + \frac{b}{h}} = 1 - \frac{0,12}{\frac{55-5}{50+5} + \frac{5}{50}} = 0,9, \quad (4.11)$$

Síla působící na dva nože průchodem proudu ve směru přitahování nožů

$$\vec{F}_{||1} = 10^{-7} \left(\frac{i_p}{2}\right)^2 \frac{l}{a} k_p k_d = 10^{-7} \cdot \left(\frac{80000}{2}\right)^2 \cdot \frac{570}{55} \cdot 0,9 \cdot 0,91 = 1358 \text{ N}, \quad (4.12)$$



Obrázek 4.4 Náskres pohledu na proudovodnou dráhu shora s přitažlivou silou dvou nožů



Obrázek 4.5 Nákres základní bilance sil v pracovním kontaktu odpojovače

4.2.3 Vliv rezonančního jevu na sílu působící mezi noži odpojovače

V každé, ať už elektrické nebo zvláště pak mechanické soustavě, se pokoušíme při návrhu vyhnout takzvaným vlastním kmitům použitých materiálů či komponent. V tomto případě se jedná o vlastní kmity nožů. Může se totiž při určité délce nožů mezi rozpěrkami stát, že vlastní kmity budou velmi blízko kmitočtu protékajícího proudu, který vytváří silové účinky popsané v odstavci o silách působících mezi noži. Je tedy vhodné, aby vlastní kmitočet nožů byl co nejvzdálenější od frekvence sítě 50 Hz a také jejich blízkých násobků. Jinak hrozí rezonance soustavy, což má za následek násobení působících sil a v konečném důsledku až devastující účinky. [1], [2], [3]

Pro výpočet vlastních mechanických kmitů nožů je třeba spočítat kvadratický moment setrvačnosti průřezu vodiče k ose kolmé na směr kmitání, kde pro obdélníkový tvar průřezu platí:

$$J_{nůž} = \frac{b h^3}{12} = \frac{0,005 \cdot 0,05^3}{12} = 5,208 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4, \quad (4.13)$$

Dále je potřeba vypočítat tíhu $G_{nůž}$ jednoho nože na jeden metr délky $l_{nůž} = 1 \text{ m}$. Nejprve se vypočte objem jednoho nože $V_{nůž}$

$$V_{nůž} = b h l_{nůž} = 0,005 \cdot 0,05 \cdot 1 = 0,25 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3, \quad (4.14)$$

Hmotnost nože $m_{nůž}$ při hustotě mědi $\rho_{Cu} = 8960 \text{ kg m}^{-3}$

$$m_{nůž} = \rho_{Cu} V_{nůž} = 8960 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3} = 2,24 \text{ kg}, \quad (4.15)$$

Tíha nože $G_{nůž}$

$$G_{nůž} = m_{nůž} g = 2,24 \cdot 9,81 = 21,97 \text{ N m}^{-1}, \quad (4.16)$$

Je třeba znát délku mezi rozpěrkami $l_{rozpěrky} = 0,14 \text{ m}$ a modul pružnosti nože, který je z mědi - $E_{Cu} = 12 \cdot 10^{10} \text{ Pa}$. Nyní je možné určit vlastní mechanický kmitočet $f_{nože}$ [3]

$$f_{nože} = 11,1 \sqrt{\frac{E_{Cu} J_{nůž}}{G_{nůž} l_{rozpěrky}^4}} = \sqrt{\frac{12 \cdot 10^{10} \cdot 5,208 \cdot 10^{-8}}{21,97 \cdot 0,14^4}} = 9550 \text{ Hz}, \quad (4.17)$$

Z vlastního kmitočtu nože lze z tabulky určit takzvaný koeficient vlivu harmonických k_r

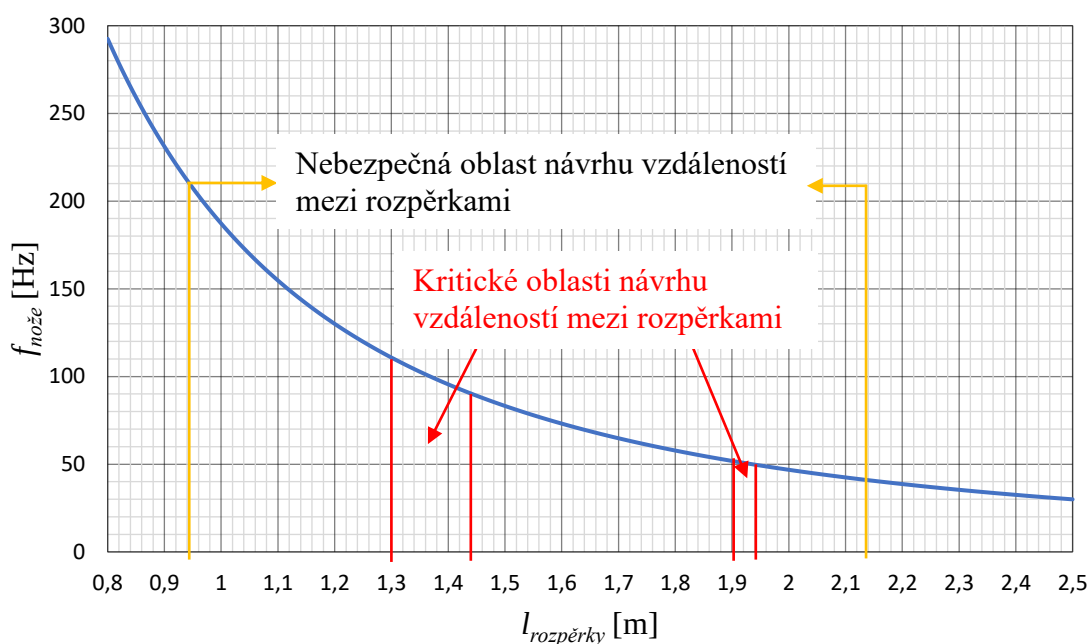
Tabulka 4.2 Vlastní kmitočet nožů a příslušný koeficient vlivu harmonických k_r [3]

Vlastní kmitočet $f_{nože}$ [Hz]	0 - 40	50	70	80	90-110	120	140	160	180	200	nad 200
Koeficient k_r	1	∞	1,3	1,3	∞	1,27	1,2	1,19	1,15	1,1	1,0

Pro hodnotu $f_{nože} = 9550$ Hz je z tabulky určená hodnota $k_r = 1,0$. Tímto koeficientem je násobená síla působící na mezi nožů odpojovače.

$$\vec{F}_{||1\text{vlastní kmitý}} = \vec{F}_{||1} k_r = 1358 \cdot 1,0 = 1358 \text{ N}, \quad (4.18)$$

Vlastní kmitočet nožů tedy nemění velikost sil mezi noži odpojovače. Pro zajímavost byl sestaven graf vlivu vzdálenosti rozpěrek $l_{rozpěrky}$ mezi noži odpojovače na hodnotu vlastního kmitočtu $f_{nože}$. Pro zjednodušení grafu je vyobrazena ta vzdálenost mezi rozpěrkami, která je při návrhu nebezpečná.



Obrázek 4.6 Průběh vlivu vzdálenosti rozpěrek nožů odpojovače na vlastní kmitočet nožů

Z grafu lze pozorovat, že nebezpečné vzdálenosti mezi rozpěrkami začínají až při $l_{rozpěrky} \doteq 0,96$ m. Tato vzdálenost je daleko za celkovou délkou nože. Bylo by tedy možné teoreticky provést i variantu s rozpěrkami pouze na koncích nožů a nehrozilo by nebezpečí rezonance.

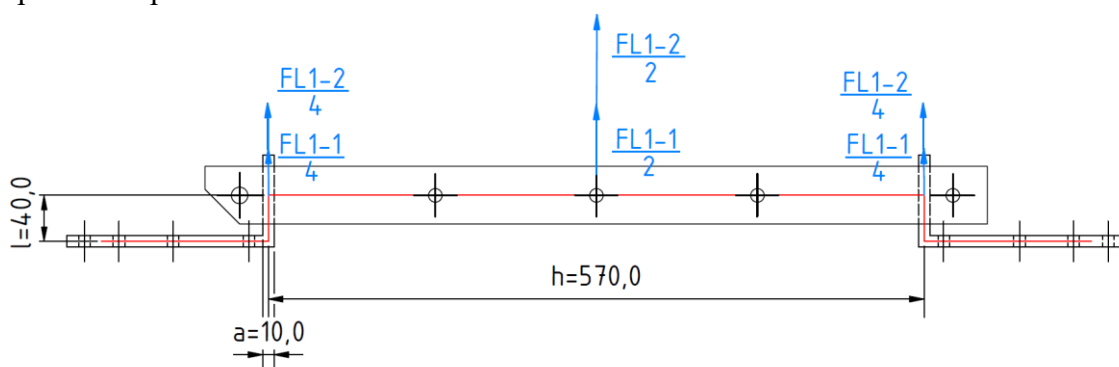
4.2.4 Síla působící v L-ohybu v kombinaci praporec – nůž

Jedná se o sílu, kterou vyvolá proud ve vodiči a působí magnetickým polem sám na sebe. Tyto síly se objevují při každé změně úhlu proudovodné dráhy. V případě odpojovače budeme brát v úvahu jen případy pravoúhlého L-ohybu v kombinaci praporec – nůž, a to jak v horizontálním, tak i ve vertikálním směru. Pro jednoduchou představu si lze představit praporec jako jeden vodič protékáný proudem a nůž jako druhý vodič protékáný proudem. Obě magnetická pole vyvolaná protékajícím proudem jednotlivých vodičů na sebe působí pod úhlem 90° . Tyto síly působí pro rozevření úhlu a získání nejlépe rovného vodiče. Z dvojice praporec – nůž je lépe a stabilněji uchycen právě praporec, takže nás bude zajímat působení těchto sil na nůž. Ve výpočtech je tedy důležité, že praporec bude hrát roli budícího vodiče a pozorovat budeme sílu působící na nůž. Pro velké zjednodušení se bere, že síla je po rameni L-ohybu rozložena rovnoměrně. Pro návrh odpojovače se však tímto zjednodušením nedopustíme velké chyby.

Právě ve vertikálním směru působení dvojice praporec – nůž působí síla na otevření odpojovače, a to zvláště při průchodu zkratového proudu. Je tedy nutné zkontrolovat, jak velká síla bude ve směru otevření odpojovače působit. V případě horizontálního působení dvojice praporec – nůž působí síly na odtažení nože od praporce, tedy proti působení kontaktní síly. [1], [2]

4.2.5 Vertikální působení síly v L-ohybu praporec – nůž

Tyto síly jsou vytvořeny shodně na obou párech kontaktů nožů s praporcem, respektive v obou L-ohybech praporec – nůž. Na jedné straně je síla působící v L-ohybu označena jako $FL1-1$ a síla vybuzená L-ohybem na straně druhé jako $FL1-2$. Na obrázku je znázorněno vertikální působení ve směru otevření odpojovače, což je za provozu, kdy odpojovačem protéká proud, zvláště pak zkratový, nebezpečné. Otevření by mohlo způsobit napálení nebo i svaření kontaktů.



Obrázek 4.7 Nákres proudovodné dráhy pro vertikální síly v L-ohybu praporec – nůž

Místa působení těchto sil jsou umístěna do míst, kde působí síly proti otevření. Jedná se o kontakty, kde působí třecí síla kontaktů, přítlak nožů a nedaleké čepy v proudem neprotékaných částí odpojovače. Dále je to i prostřední část, kde bude působit

ovládací rameno nožů, jehož mechanismus bude při zapnutém odpojovači působit právě proti otevření odpojovače. Pro výpočet síly $FL1-1$ a shodně i pro $FL1-2$ platí [3]

$$FL1-1 = FL1-2 = 2 \cdot 10^{-7} i_p^2 \ln \left(\frac{2l}{a} \cdot \frac{h + \sqrt{h^2 + \frac{a^2}{4}}}{h + \sqrt{h^2 + l^2}} \right) \quad (4.19)$$

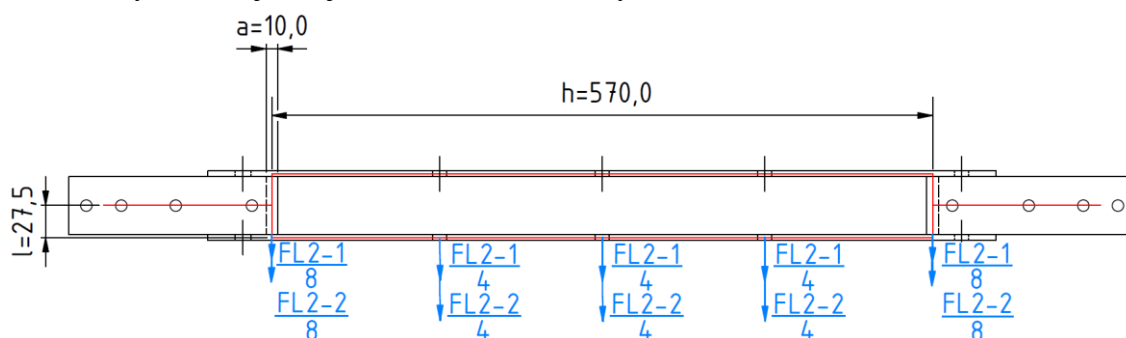
$$= 2 \cdot 10^{-7} \cdot 80000^2 \cdot \ln \left(\frac{2 \cdot 40 \cdot 10^{-3}}{10 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{0,57 + \sqrt{0,57^2 + \frac{10 \cdot 10^{-3}^2}{4}}}{0,57 + \sqrt{0,57^2 + 40 \cdot 10^{-3}^2}} \right) =$$

$$332,5 \text{ N},$$

Z výsledné velikosti této síly a při porovnání rozložení této síly na působišťě (viz obrázek 4.7) je vidět, že se nejedná o kritickou hodnotu, a proti této síle je možné se bránit dostatečným zatížením prostředního čepu, na kterém bude umístěn izolátor, jenž bude pohybovat s noži. Poloha zapnuto bude přes pákový systém mechanicky zajištěna. Nejedná se o hodnotu síly, u které by hrozilo takzvané střížení čepu o průměru 12 mm.

4.2.6 Horizontální působení síly v L-ohybu praporec – nůž

Síly v horizontálním směru odpojovače jsou taktéž shodně vytvořeny na obou stranách odpojovače. Na jedné straně je síla působící v L-ohybu označena jako $FL2-1$ a síla vybuzená L-ohybem na straně druhé jako $FL2-2$. Na obrázku je znázorněno horizontální působení proti směru přibližování nože, a tedy i proti směru přitlačné síly. Je tedy nutné tuto sílu vyčíslit a zjistit, jak moc nám ovlivní výslednou kontaktní sílu.



Obrázek 4.8 Náskres proudovodné dráhy pro horizontální síly v L-ohybu praporec – nůž

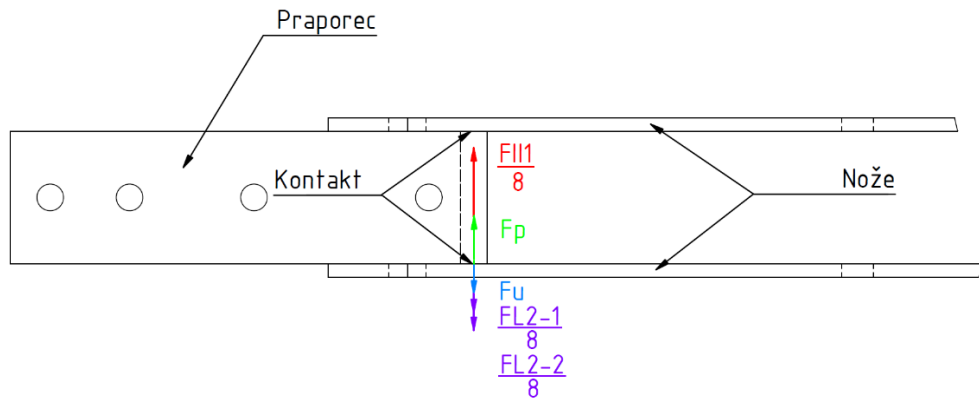
Působišťě těchto sil jsou umístěna do míst, kde působí síly rozpěrek, které udržují konstantní vzdálenost mezi noži. Další působišťem jsou kontakty, kde působí přitlak nožů pomocí nedalekých čepů v proudem neprotékaných částech odpojovače.

Pro výpočet síly $FL2-1$ a shodně i pro druhou stranu $FL2-2$ platí [3]

$$FL2 - 1 = FL2 - 2 = 2 \cdot 10^{-7} i_p^2 \ln \left(\frac{2l}{a} \cdot \frac{h + \sqrt{h^2 + \frac{a^2}{4}}}{h + \sqrt{h^2 + l^2}} \right) = 2 \cdot 10^{-7} \cdot 80000^2 \cdot \ln \left(\frac{2 \cdot 27,5 \cdot 10^{-3}}{10 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{0,57 + \sqrt{0,57^2 + \frac{10 \cdot 10^{-3}^2}{4}}}{0,57 + \sqrt{0,57^2 + 40 \cdot 10^{-3}^2}} \right) = 272,7 \text{ N}, \quad (4.20)$$

4.3 Konečná bilance sil v kontaktu

V této fázi jsou již všechny důležité zdroje elektromagnetických sil vyčísleny, a je tedy možné provést konečnou bilanci těchto sil. Bilance je provedena na jeden kontakt odpojovače. Za normálních podmínek platí tato bilance zcela shodně pro všechny čtyři kontakty na přechodu praporec – nůž (dva vstupní kontakty a dva výstupní).



Obrázek 4.9 Náskres konečné bilance sil v pracovním kontaktu odpojovače

$$\vec{F}_{ip} = \vec{F}_p + \frac{\vec{F}_{II1}}{8} - \vec{F}_U - \frac{\vec{FL2-1}}{8} - \frac{\vec{FL2-2}}{8} = 181 + \frac{1358}{8} - 113,3 - \frac{272,7}{8} - \frac{272,7}{8} = 177,5 \text{ N}, \quad (4.21)$$

$$\vec{F}_{ip} > \vec{F}_{min} \quad 177,5 \text{ N} > 129,4 \text{ N}, \quad (4.22)$$

Podmínka je splněna, nemělo by tedy dojít ke svaření kontaktů. Samotnou finální hodnotu přítláčné síly určí použití pružiny. Vzhledem k povaze této práce nebudou pružiny na rozpěrkách vyráběny na míru a výběr bude směřován na již vyráběné typy.

5. VÝPOČET USTÁLENÉHO OTEPLENÍ ČÁSTÍ PROUDOVODNÉ DRÁHY PŘI JMENOVITÉM PROUDU

Na každém elektrotechnickém zařízení či přístroji je z hlediska návrhu důležité provést kontrolu oteplení při průchodu jmenovitého proudu. Pro každý přístroj, respektive pro materiály použité na stavbu přístroje, existuje v normách příslušná přípustná teplota, kterou může daný materiál dosáhnout při normálním provozu za normálních podmínek. Každé zařízení má v celém řetězci použitých materiálů nejslabší článek a ten určuje nejkritičtější podmínky oteplení. V elektromotorech to je nejčastěji maximální teplota použité izolace vinutí, v kabelech taktéž použitá izolace a v přístrojích typu odpojovač, kde jsou umístěny kontakty, se jedná hlavně o kontaktní místa, aby nedošlo k jejich svaření. Tato teplota musí být ponížena o takovou hodnotu, aby zde vznikla rezerva pro nestandardní situace. Takovou situací může být průchod nadproudu nebo dokonce zkratu. Vykrytí těchto situací by měl být odpojovač schopen po určitou dobu zvládnout bez následku, jakým je například svaření kontaktů nebo narušení povrchu kontaktu, a tím zhoršení přechodového odporu. V neposlední řadě je důležitost hlídání dovoleného oteplení i z hlediska dilatace, a tedy i změna rozměrů proudovodné dráhy.

Z tohoto důvodu je zapotřebí se řídit normou ČSN EN 62271-1 ed. 2 – Část 1: Společná ustanovení pro spínací a řídicí zařízení střídavého proudu, přesněji Tabulka 14. Meze teploty a oteplení pro různé části, materiály a izolace vysokonapěťových spínacích a řídicích zařízení. Pro účely této práce jsou brány hodnoty pro prostředí OG – (oxidační plyny), což jsou reaktivní plyny, které mohou způsobit urychlené stárnutí kontaktů vlivem koroze (z důvodu vlhkosti), nebo vlivem oxidace (z důvodu přítomnosti kyslíku), což právě splňuje klasický vzduch, ve kterém bude tento odpojovač pracovat. [8]

Tabulka 5.1 Hodnoty maximálního oteplení části odpojovače přejaté z normy ČSN EN 62271-1 ed. 2 – Část 1 – Tabulka 14 [8]

Část a materiál	Nejvyšší hodnota	
	Teplota	Oteplení při okolní teplotě vzduchu 40 °C
Kontakty – měděné	75 °C	35 K
Kontakty – stříbrné	115 °C	75 K
Šroubová nebo ekvivalentní spojení, šroubové přívodní svorky – měděné	100 °C	60 K
Šroubová nebo ekvivalentní spojení, šroubové přívodní svorky – stříbrné	115 °C	75 K

Pro úplnost je potřeba dodat, že pokud jakákoli část obsahuje izolaci, je třeba dimenzovat tuto část na dovolenou teplotu daného izolačního materiálu, popř. dané třídy izolačního materiálu. Například pokud by byly přívodní svorky připojené na přívodní kabel, musíme znát materiál izolace použité na kabelu a zjistit dovolenou teplotu této izolace. Dalším hlídaným místem mohou být části přístupné dotyku, na které se taktéž vztahuje maximální oteplení. V tomto případě se jedná spíše o bezpečí obsluhy z hlediska popálení. V případě tohoto odpojovače bude obsluha vždy manipulovat přes dlouhou tyč, která bude přes izolátor ovládat samotnými noži odpojovače.

Zjištění teplot jednotlivých částí odpojovače je iterační proces, kdy na začátku je zvoleno prvotní oteplení, se kterým je počítáno, a v každé části je vypočítán fiktivní oteplení dané části. Tato oteplení jsou poté zasazena do celkové takzvané tepelné sítě. Tato síť se pomocí vypočtených tepelných toků musí vybalancovat co nejblíže k hodnotě celkového tepelného toku 0 W. Poté máme výpočet platný a můžeme z vypočítaných oteplení zjistit konečné oteplení jednotlivých částí. Pokud však nedošlo k vybalancování teplotní sítě, musí se zvolit jiné hodnoty prvotního oteplení, a to buď zvýšením, nebo snížením oteplení. Zde je vhodné použít vhodný software, který tento postup urychlí. Pro výpočet tohoto odpojovače byl zvolen software Excel. Do této práce bude již zanesený závěrečný iterační proces s vyváženou tepelnou sítí.

Ze souboru „*Podklady a příklady k navrhování elektrických přístrojů_revize_2017_1.pdf*“ (dále jen skripta, E) odečteme z tabulky 2-1, str. 27, E, hodnotu pro měrný odpor při 40 °C

$$\rho_{Cu40} = 1,92 \cdot 10^{-8} \Omega m$$

Dále si ještě z této tabulky určíme hodnotu teplotního součinitele

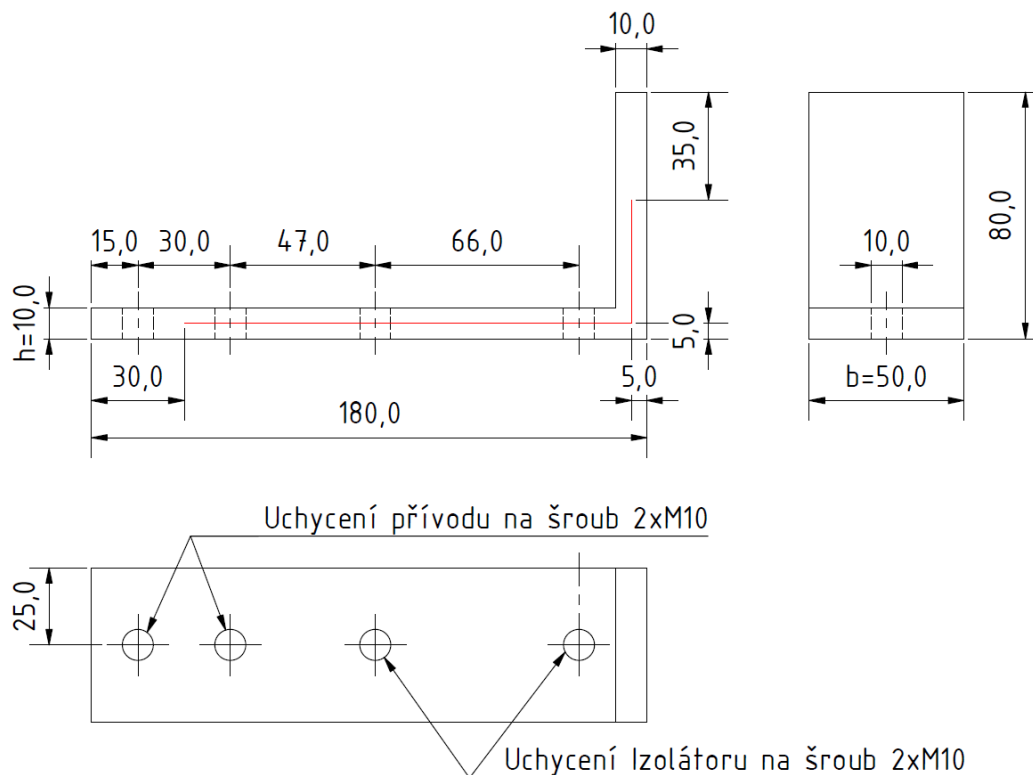
$$\alpha = 3,6 \cdot 10^{-3} K^{-1}$$

Z již provedených iterací vedoucích k vyrovnaní tepelné sítě je zvolené počáteční oteplení $\theta_p = 30,13 K$. Tedy při uvažování nejkritičtější hodnoty teploty okolního vzduchu 40 °C je třeba vypočítat rezistivitu mědi pro teplotu 70,13 °C

$$\begin{aligned} \rho_{Cu70,13} &= \rho_{Cu40} (1 + \alpha \theta_p) = 1,92 \cdot 10^{-8} \cdot (1 + 3,6 \cdot 10^{-3} \cdot \\ 30,13) &= 2,128 \cdot 10^{-8} \Omega m, \end{aligned} \quad (5.1)$$

5.1 Výpočet parametrů náhradního tepelného schématu praporce

Zde bude důležité již určit přesnější typ izolátoru, ke kterému bude daný praporec uchycen, protože kontaktní plocha praporec – izolátor tvoří neochlazující část. V tomto případě byl vybrán izolátor typu PI 250 od firmy KUVAG GmbH & Co KG.



Obrázek 5.1 Náskres praporce odpojovače pro výpočet oteplení

5.1.1 Koeficient zhuštění proudnic praporce

V první části tepelného výpočtu se zohlední vyvrtané otvory v praporci. Každý otvor způsobuje takzvané zhuštění proudnic, což má za následek lokální změny proudové hustoty. V místech zhuštění vlivem vytvořených otvorů pro uchycení přívodů nebo izolátoru dochází ke zvýšení odporu. Je tedy nutné vypočítat takzvaný koeficient zhuštění proudnic. [3]

Pro pomocný poměr $\frac{a}{b}$ šířky praporce $b = 50 \text{ mm}$ a šířky praporce zkrácené o průměr vyvrtaného otvoru d_{M10} platí

$$a = b - d_{M10} = 50 - 10 = 40 \text{ mm}, \quad (5.2)$$

$$\frac{a}{b} = \frac{40}{50} = 0,8, \quad (5.3)$$

Z tohoto poměru je možné odečíst v grafu takzvaný činitel zvýšení odporu, nebo taky koeficient zhuštění. Z obr. 2-5, str. 31, skripta; odečteme pro typ zúžení 4 koeficient zúžení $k_{1\text{šroub}-M10} = 1,2$. Tentýž koeficient zhuštění proudnic vychází i v případě upevnění praporce na izolátor pomocí šroubů velikosti M10.

5.1.2 Vliv skin efektu na odpor praporce

Další vliv na celkový odpor má také skin efekt. Je zde nutné vypočítat takzvaný činitel

povrchového jevu vodiče který má v tomto případě obdélníkový průřez.

Průřez praporce S_p se šířkou 50 mm a tloušťkou 10 mm

$$S_p = 0,01 \cdot 0,05 = 5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2, \quad (5.4)$$

Dále je určen poměr šířky a tloušťky praporce $\frac{b}{h}$

$$\frac{b}{h} = \frac{25}{5} = 5, \quad (5.5)$$

Nakonec je určen pomocný výraz pro určení konečného koeficientu skinefektu.

$$\sqrt{\frac{S_p f}{\rho_{Cu70,13}}} = \sqrt{\frac{5 \cdot 10^{-4} \cdot 50}{2,128 \cdot 10^{-8}}} = 1083,8, \quad (5.6)$$

Oba předchozí výrazy umožní odečíst z grafu pro činitele povrchového jevu pro obdélníkový průřez odpovídající hodnotu pro tento praporec. Z obr. 2-5, str.29, skripta, E je odečten koeficient skinefektu $k_{s-p} = 1,068$. [3]

5.1.3 Střední délka proudnice praporce

Pro konečný výpočet elektrického odporu konkrétního praporce je nutné vypočítat i střední délku proudovodné dráhy neboli délku proudnice l_p

$$l_p = 180 - 30 - 5 + 80 - 35 - 5 = 185 \text{ mm} = 0,185 \text{ m}, \quad (5.7)$$

5.1.4 Elektrický odpor praporce

Po zjištění předchozích koeficientů a střední délky proudnice je možné vypočítat elektrický odpor praporce R_p právě ve střední délce proudovodné dráhy l_p . Vzhledem k tomu, že v místě uchycení měděných přívodů dojde ke zvětšení objemu mědi, zanedbáme v těchto místech vzniklý otvor a vložený šroub M10. Bude tedy počítáno pouze s uchycením izolátoru, kde se nacházejí dva otvory pro šrouby M10 ($n_{M10} = 2$)

$$R_p = \frac{\rho_{Cu70,13}}{S_p} [l_p + b (n_{M10} k_{1\text{šroub-M10}} - n_{M10})] k_{s-p} = \frac{2,128 \cdot 10^{-8}}{125 \cdot 10^{-6}} \cdot [0,185 + 0,05 \cdot (2 \cdot 1,2 - 2)] \cdot 1,065 = 9,32 \cdot 10^{-6} \Omega, \quad (5.8)$$

5.1.5 Chladihost praporce

Každý materiál ze své podstaty umožňuje nejen teplo přijímat, ale i teplo vysílat. Je tedy potřeba zjistit, jak bude daná část odpojovače tepelně reagovat s okolím a jak „silná“ tato reakce bude. Počítáme-li, že oteplení bude o 30,83 K větší, než je okolní teplota vzduchu, je z fyzikálních zákonitostí jasné, že teplo bude z daných částí vysíláno do okolí. Tedy soustava bude teplo odevzdávat do okolí. Ve výpočtech je proto řešeno, jakým způsobem a jak moc „ochotně“ je daný materiál a povrch schopný odevzdávat teplo do okolí.

Pro potřeby výpočtu oteplení je zavedená pomocná veličina takzvaná chladivost, což je celková měrná chladivost materiálu složená z měrných chladivostí zářením a prouděním pro daný materiál.

Měrná chladivost zářením

Nejdříve je potřeba zjistit emisivitu použitého materiálu. Z tabulky 2-8 na straně 49 skript odečteme pro lehce oxidovanou měď hodnotu $E_Z = 0,15$. Výběr této hodnoty je dán tím, že každý výrobce, jenž dává svůj odpojovač na měření do zkušební laboratoře, použije odpojovač s novými, ještě nezoxidovanými měděnými částmi. Tím se co nejvíce přiblíží emisivitě lesklé mědi.

Známe-li emisivitu $E_Z = 0,15$ a teplotu okolí $t_0 = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$, je možné z tabulky 2-10 na straně 52 skriptu E odečíst konkrétní vztah pro výpočet měrné chladivosti zářením, a tím vypočítat konkrétní hodnotu měrné chladivosti zářením α_Z . [3]

$$\alpha_{Zp} = 1,1 + 0,006 \theta_p = 1,1 + 0,006 \cdot 30,13 = 1,281 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}, \quad (5.9)$$

V případě potřeby je možné provést lineární interpolaci ke zjištění vztahu pro jinou emisivitu či jinou počáteční teplotu než pro ty hodnoty, jež jsou uvedené v tabulce.

Měrná chladivost prouděním

Opět z tabulky 2-10 na straně 52 skriptu E lze určit vztah pro měrnou chladivost prouděním, a to pro šířku praporce $b = 50 \text{ mm}$. [3]

$$\alpha_{Kp} = 4,3 + 0,055 \theta_p = 4,3 + 0,055 \cdot 30,13 = 5,957 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}, \quad (5.10)$$

Zde také platí, že pokud by v tabulce nebyl přítomen vzorec pro příslušnou šířku praporce, je nutné provést lineární interpolaci ze vzorců pro nejbližší rozměry.

Celková měrná chladivost

Pro celkovou měrnou chladivost praporce α_{op} platí

$$\alpha_{op} = \alpha_{Kp} + \alpha_{Zp} = 5,957 + 1,281 = 7,238 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}, \quad (5.11)$$

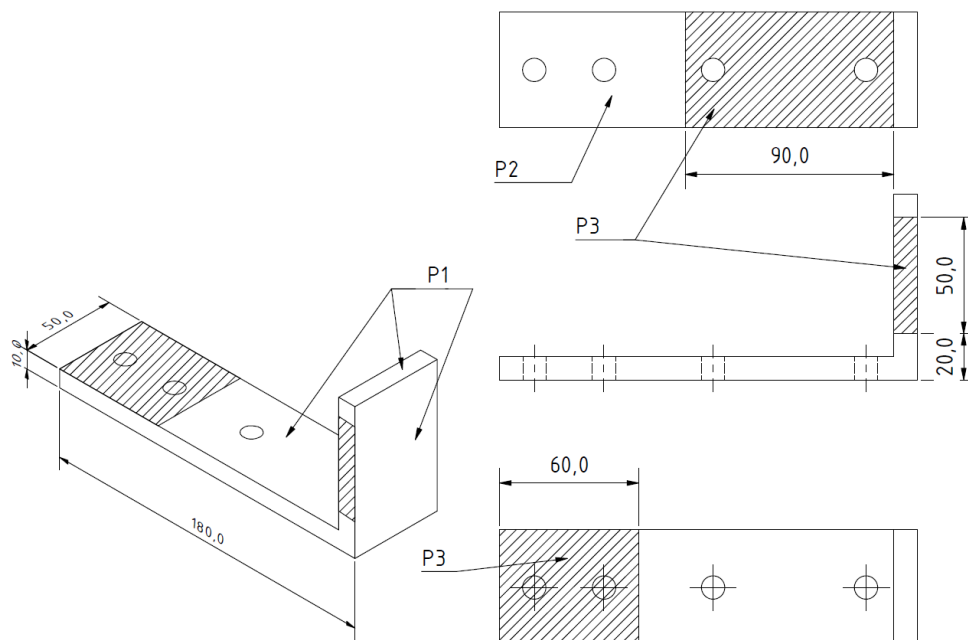
5.1.6 Chladicí plochy praporce

Pro určení chladících povrchů si rozdělíme praporec na tři části, a to na povrchy:

P1 – Volné plochy vrchní či bočních stran praporce bez zakrytí jinými částmi odpojovače nebo se zanedbatelným zakrytím.

P2 – Volná plocha ze spodní strany praporce bez plochy zakryté připevněným izolátorem. Pro jednodušší výpočet byla zvolena čtvercová plocha, i když bude izolátor zakrývat pouze částečnou kruhovou plochu. Důvod, proč se tato spodní plocha počítá samostatně, je účinnost chlazení této plochy, což je cca 2/3 účinnosti chlazení bočních a vrchních ploch.

P3 – Kontaktní plochy přívodu a samotného hlavního kontaktu s noži a nakonec i plocha přiléhající k izolátoru – na těchto plochách se neuplatňuje chlazení zářením a prouděním, protože je tento povrch překrývaný jinou částí odpojovače.



Obrázek 5.2 Náčrso praporce odpojovače pro stanovení chladících ploch

Výpočet ploch P1, P2, P3 (plocha P3 je jen pro informaci)

$$P_1 = 2 \cdot 0,05 \cdot 0,01 + 2 \cdot 0,18 \cdot 0,01 + 2 \cdot (0,08 - 0,01 - 0,05) \cdot 0,01 + 0,08 \cdot 0,05 + (0,08 - 0,01) \cdot 0,05 + (0,18 - 0,01 - 0,06) \cdot 0,05 = 18 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2, \quad (5.12)$$

$$P_2 = 0,18 \cdot 0,05 - 0,09 \cdot 0,05 = 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2, \quad (5.13)$$

$$P_3 = 0,06 \cdot 0,05 + 2 \cdot 0,01 \cdot 0,05 + 0,09 \cdot 0,05 = 8,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2, \quad (5.14)$$

Pro výpočet celkové chladící plochy praporce P_p bude uvažována rezerva 5 %, která pokrývá vliv šroubu a jiných konstrukčních částí, které nám zvětšují tepelně dobře vodivou plochu praporce.

$$P_p = 1,05 \left(P_1 + \frac{2}{3} P_2 \right) = 1,05 \cdot \left(18 \cdot 10^{-3} + \frac{2}{3} \cdot 4,5 \cdot 10^{-3} \right) = 22,05 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2, \quad (5.15)$$

5.1.7 Fiktivní chladicí obvod praporce

Jedná se o veličinu zohledňující střední délku proudnice praporce $l_p = 0,185 \text{ m}$, tedy proud neohřívá praporec v celém objemu rovnoměrně.

$$O_{vp} = \frac{P_p}{l_p} = \frac{22,05 \cdot 10^{-3}}{0,185} = 0,1192 \text{ m}, \quad (5.16)$$

5.1.8 Parametry náhradního tepelného schématu praporce

Pro tuto část odpojovače, kterou prochází el. proud a je tedy zdrojem tepelného příkonu $Q = R \cdot I^2$, se použije náhradní schéma π – článek. Pro parametry náhradního schématu je zapotřebí vypočítat takzvanou podélnou (longitudinální) složku R_{Tl} a příčnou (transversální) složku R_{Tp} . Z tabulky 2-1 na straně 27 skriptu E odečteme pro měď hodnotu tepelné vodivosti $\lambda_{Cu} = 385 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$. [3]

Výpočet parametrů π -článku praporce

$$\beta l_p = l_p \sqrt{\frac{\alpha_{op} O_{VP}}{\lambda_{Cu} S_p}} = 0,185 \cdot \sqrt{\frac{7,238 \cdot 0,1192}{385 \cdot 5 \cdot 10^{-4}}} = 0,3916, \quad (5.17)$$

$$\delta_p = \sqrt{\alpha_{op} O_{VP} \lambda_{Cu} S_p} = \sqrt{7,238 \cdot 0,1192 \cdot 385 \cdot 5 \cdot 10^{-4}} = 0,4075, \quad (5.18)$$

Podélný (longitudinální) tepelný odpor [3]

$$R_{Tlp} = \frac{\sinh(\beta l_p)}{\delta_p} = \frac{\sinh(0,3916)}{0,4075} = 0,9858 \text{ K W}^{-1}, \quad (5.19)$$

Příčný (transversální) tepelný odpor [3]

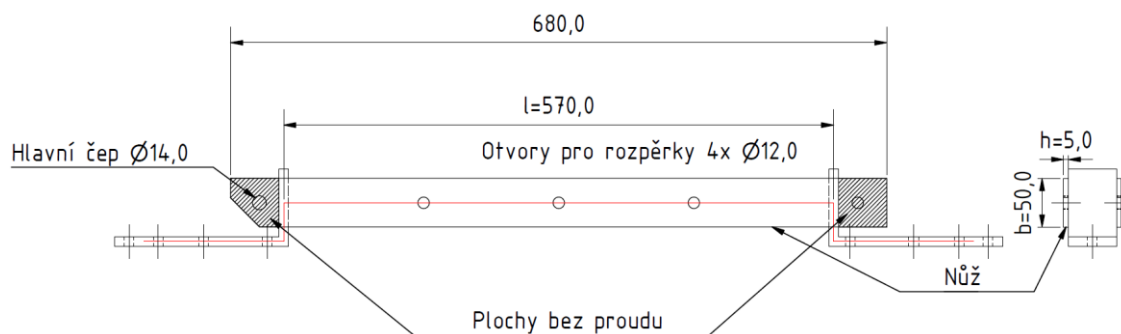
$$R_{Ttp} = \frac{1}{\delta_p \operatorname{tgh}\left(\frac{\beta l_p}{2}\right)} = \frac{1}{0,4075 \cdot \operatorname{tgh}\left(\frac{0,3916}{2}\right)} = 12,69 \text{ K W}^{-1}, \quad (5.20)$$

Fiktivní oteplení [3]

$$\theta_{\infty p} = \frac{R_p I^2}{\alpha_{op} P_p} = \frac{9,32 \cdot 10^{-6} \cdot 800^2}{7,237 \cdot 22,05 \cdot 10^{-3}} = 37,37 \text{ K}, \quad (5.21)$$

5.2 Výpočet parametrů náhradního tepelného schématu nože

Princip výpočtu oteplení této části se nebude nijak zásadně lišit od výpočtu oteplení praporce.



Obrázek 5.3 Náskres nože pro výpočet jeho oteplení

5.2.1 Koeficient zhuštění proudnic nože

Pro pomocný poměr $\frac{a}{b}$ výšky nože $b = 50 \text{ mm}$ a výšky nože zkrácené o průměr vyvrtaného otvoru $d_{\text{čep}} = 12 \text{ mm}$ platí

$$a = b - d_{\text{čep}} = 50 - 12 = 38 \text{ mm}, \quad (5.22)$$

$$\frac{a}{b} = \frac{38}{50} = 0,76, \quad (5.23)$$

Pro tento poměr a typ zúžení 4 vychází z grafu obr.2-5, str.31, skripta, E; koeficient zhuštění $k_{1\text{čep}-12} = 1,24$. [3]

5.2.2 Vliv skinefektu na odpor nože

Průřez nože S_n s výškou nože $b = 50 \text{ mm}$ a tloušťkou $h = 5 \text{ mm}$

$$S_n = b h = 0,05 \cdot 0,005 = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2, \quad (5.24)$$

Dále je určen poměr výšky a tloušťky nože

$$\frac{b}{h} = \frac{50}{5} = 10, \quad (5.25)$$

Nakonec je určen pomocný výraz pro určení konečného koeficientu skinefektu

$$\sqrt{\frac{S_n f}{\rho_{Cu70,13}}} = \sqrt{\frac{2,5 \cdot 10^{-4} \cdot 50}{2,128 \cdot 10^{-8}}} = 766,4, \quad (5.26)$$

Oba předchozí výrazy umožní odečíst z grafu pro činitele povrchového jevu pro obdélníkový průřez odpovídající hodnoty pro tento nůž. Z obr. 2-5, str.29, skripta, E je odečten koeficient skinefektu $k_{s-n} = 1,025$. [3]

5.2.3 Délka střední proudnice nože

Jedná se o délku mezi středy kontaktů l_k

$$l_k = 570 \text{ mm} = 0,57 \text{ m}$$

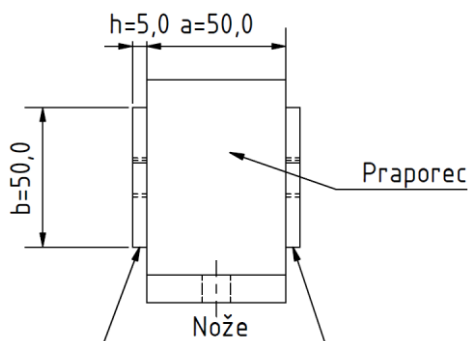
5.2.4 Elektrický odpor nože

Pro výpočet odporu nože R_n budou uvažovány tři otvory $n_{\text{čep}-12} = 3$ pro čep s průměrem $d_{\text{čep}} = 12 \text{ mm}$. V nákresu jsou to ty otvory, které jsou v cestě proudovodné dráhy.

$$R_n = \frac{\rho_{Cu70,13}}{S_n} [l_k + b (n_{\text{čep}-12} k_{1\text{čep}-12} - n_{\text{čep}-12})] k_{s-n} = \frac{2,128 \cdot 10^{-8}}{2,5 \cdot 10^{-4}} \cdot [0,57 + 0,05 \cdot (3 \cdot 1,24 - 3)] \cdot 1,025 = 5,29 \cdot 10^{-5} \Omega, \quad (5.27)$$

5.2.5 Chladící plochy nože

V tomto případě, kdy jsou vedle sebe v poměrně malé vzdálenosti dva nože, vzniká snížení účinnosti chlazení. Vyzařování tepla do prostoru tedy není tak efektivní jako ve volném prostoru bez blízkého jiného předmětu. Je tedy proveden odhad a výpočet takzvaných činitelů zastínění.



Obrázek 5.4 Náskres čelního pohledu na nože pro stanovení zastínění

Činitel zastínění vnějšími předměty k_{z1}

Jedná se o předpoklad umístění odpojovače blízko stěny či sloupu trakčního vedení, odhadem to bude maximálně 10 %, potom [3]

$$k_{z1} = 0,9$$

Činitel vzájemného zastínění vnitřních stěn nože k_{z2}

Vzniká při vzájemné působení dvou rovnoběžných nožů [3]

$$k_{z2} = \frac{b+a-\sqrt{b^2+a^2}}{b} = \frac{50+50-\sqrt{50^2+50}}{50} = 0,586, \quad (5.28)$$

Celkový činitel zastínění vnitřních ploch nože k_z

$$k_z = k_{z1} k_{z2} = 0,9 \cdot 0,586 = 0,527, \quad (5.29)$$

Chladící plochy

P_{n1} – Plocha nacházející se na vnitřní straně nože, tedy na té, jež ovlivňuje druhý nůž. Zanedbáme plochu zakrytou kontaktem s praporcem. Jedná se pouze plochu v aktivní proudovodné dráze nože.

P_{n2} – plocha ostatních vnějších částí nože, které jsou v aktivní proudovodné délce nože

$$P_{n1} = l b = 0,57 \cdot 0,05 = 28,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2, \quad (5.30)$$

$$P_{n2} = 0,57 \cdot 0,05 + 2 \cdot 0,57 \cdot 0,005 = 34,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2, \quad (5.31)$$

Při výpočtu celkové plochy zanedbáme snížení účinnosti chlazení spodní strany, protože se jedná o plochu s malou tloušťkou.

$$P_n = P_{n1} + P_{n2} = 28,5 \cdot 10^{-3} + 34,2 \cdot 10^{-3} = 62,7 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2, \quad (5.32)$$

Celkový činitel zastínění

Na plochu P_{n1} působí pouze zastínění způsobené okolními předměty k_{Z1} a na plochu P_{n2} působí celkové zastínění vnitřních ploch nože k_Z

$$k_{Zn} = \frac{k_Z P_{n1} + k_{Z1} P_{n2}}{P_n} = \frac{0,527 \cdot 28,5 \cdot 10^{-3} + 0,9 \cdot 34,2 \cdot 10^{-3}}{62,7 \cdot 10^{-3}} = 0,731, \quad (5.33)$$

5.2.6 Chladivost nože

Chladivost zářením

Použijeme opět emisivitu pro lehce oxidovanou měď $E_Z = 0,15$ a pro teplotu okolí $t_0 = 40^\circ\text{C}$. Z tabulky 2-10 na straně 52 skriptu E lze odečíst konkrétní vztah pro výpočet měrné chladivosti zářením α_Z . Tato hodnota bude ovlivněna celkovým činitelem zastínění k_{Zn}

$$\alpha_{Zn} = (1,1 + 0,006 \theta_p) k_{Zn} = (1,1 + 0,006 \cdot 30,13) \cdot 0,731 = 0,936 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}, \quad (5.34)$$

Chladivost prouděním

Z tabulky 2-10 na straně 52 skriptu E, pro výšku nože $b = 50 \text{ mm}$ [3]

$$\alpha_{Kn} = 4,3 + 0,055 \theta_p = 4,3 + 0,055 \cdot 30,13 = 5,957 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}, \quad (5.35)$$

Celková měrná chladivost

Pro celkovou měrnou chladivost nože α_{on} platí

$$\alpha_{on} = \alpha_{Kn} + \alpha_{Zn} = 5,957 + 0,936 = 6,893 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}, \quad (5.36)$$

5.2.7 Fiktivní chladicí obvod nože

Pro výpočet fiktivního chladicího obvodu bude uvažována střední délka proudovodné dráhy nože $l_n = 0,57 \text{ m}$.

$$O_{Vn} = \frac{P_n}{l_n} = \frac{62,7 \cdot 10^{-3}}{0,57} = 0,11 \text{ m}, \quad (5.37)$$

5.2.8 Parametry náhradního tepelného schématu nože

Opět se jedná o část, která je zdrojem tepelného příkonu $Q = R I^2$. Tedy i zde budou zjišťovány parametry pro náhradní schéma π – článku. [3]

$$\beta l_n = l_n \sqrt{\frac{\alpha_{on} O_{Vn}}{\lambda_{Cu} S_n}} = 0,57 \cdot \sqrt{\frac{6,893 \cdot 0,11}{385 \cdot 2,5 \cdot 10^{-4}}} = 1,6, \quad (5.38)$$

$$\delta_n = \sqrt{\alpha_{on} O_{Vn} \lambda_{Cu} S_n} = \sqrt{6,893 \cdot 0,11 \cdot 385 \cdot 2,5 \cdot 10^{-4}} = 0,5403, \quad (5.39)$$

Podélný (longitudinální) tepelný odpor [3]

$$R_{Tln} = \frac{\sinh(\beta l_n)}{\delta_n} = \frac{\sinh(1,6)}{0,5403} = 4,396 \text{ K W}^{-1}, \quad (5.40)$$

Příčný (transversální) tepelný odpor [3]

$$R_{Ttn} = \frac{1}{\delta_n \tanh\left(\frac{\beta l_n}{2}\right)} = \frac{1}{0,5403 \cdot \tanh\left(\frac{1,6}{2}\right)} = 2,788 \text{ K W}^{-1}, \quad (5.41)$$

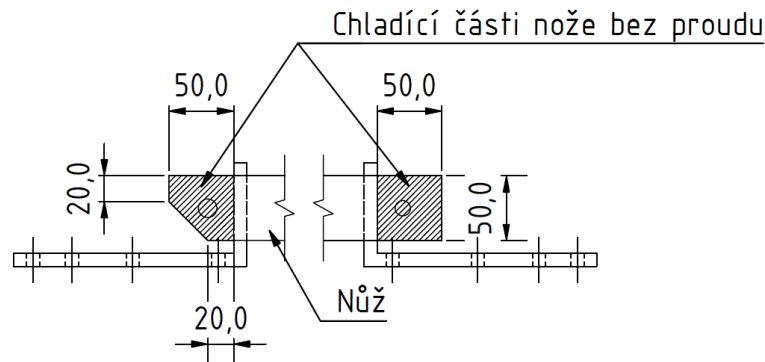
Fiktivní oteplení [3]

Zde je zapotřebí počítat s tím, že v obvodu jsou dva nože paralelně, což znamená poloviční odpor R_n a dvojnásobnou plochu P_n .

$$\theta_{\infty n} = \frac{R_n I^2}{2 \alpha_{on} 2 P_n} = \frac{5,29 \cdot 10^{-5} \cdot 800^2}{2 \cdot 6,893 \cdot 2 \cdot 62,7 \cdot 10^{-3}} = 19,58 \text{ K}, \quad (5.42)$$

5.2.9 Chladicí části nože bez proudu

Tuto část výpočtu jsme v případě praporce zanedbali z důvodu malých rozměrů části, která nebyla v aktivní proudovodné dráze. Nutno podotknout, že zanedbání této části vede ke kritičtějšímu návrhu. V případě nožů se jedná již o nezanedbatelnou část. Tyto chladicí části pomáhají chladit hlavní kontakt pomocí odvodu tepla vedením.



Obrázek 5.5 Náskres chladicích částí nože pro výpočet jejich oteplení

Chladicí plocha

Na straně hlavního čepu je plocha mírně odlišná od protější strany. Pro zjednodušení si však můžeme dovolit tyto plochy sjednotit. Zde započítáme i vliv čepů a uchycení hlavního čepu cca 5 %. Pro chladicí plochu pravé strany jednoho nože platí

$$P_{CH-1 \text{ nůž } P} = 2 \cdot 0,05 \cdot 0,05 + 2 \cdot 0,05 \cdot 0,005 + 0,05 \cdot 0,005 = 5,75 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2, \quad (5.43)$$

Pro chladicí plochu levé strany jednoho nože platí

$$P_{CH-1 \text{ nůž } L} = 2 \cdot \left(0,05 \cdot 0,05 - \frac{0,03 \cdot 0,03}{2}\right) + 2 \cdot 0,02 \cdot 0,005 + 0,05 \cdot 0,005 = 4,55 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2, \quad (5.44)$$

Průměrná chladicí plocha jedné strany dvou nožů se započítáním rezervy

$$P_{CH} = 1,05 \frac{P_{CH-1} n_{\text{ž}} P + P_{CH-1} n_{\text{ž}} L}{2} 2 = 1,05 \cdot \frac{5,75 \cdot 10^{-3} + 4,55 \cdot 10^{-3}}{2} \cdot 2 = 10,82 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2, \quad (5.45)$$

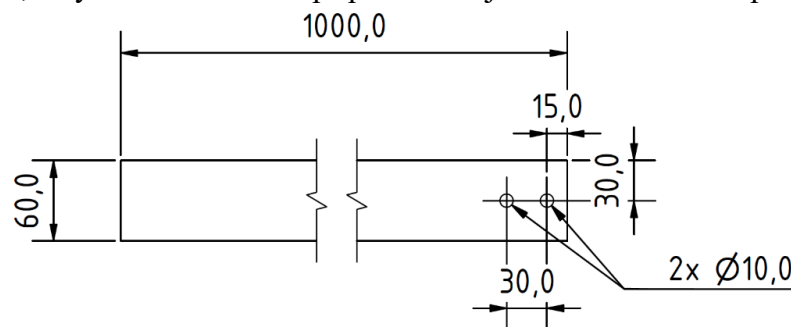
Chladicí odpor nože

Platí pro jednu stranu chladících částí obou nožů, přičemž využijeme již vypočítanou celkovou měrnou chladivost α_{on}

$$R_{TCH} = \frac{1}{P_{CH} \alpha_{on}} = \frac{1}{10,82 \cdot 10^{-3} \cdot 6,893} = 13,42 \text{ K W}^{-1}, \quad (5.46)$$

5.3 Výpočet parametrů náhradního tepelného schématu přívodu

Pro potřeby zkoušení daného odpojovače je nutné připojit normou dané přívody, na kterých se taktéž musí vypočítat dovolené oteplení. Délka přívodu je dle normy 1 m. Dle normy se oteplení přívodů měří 1 m od přípojnicových svorek, respektive šroubů. Pro výpočet oteplení na přívodech zvolíme jiné oteplení, a to vzhledem k tomu, že se jedná již o značnou část přístroje, která bude měřena ve velké vzdálenosti od odpojovače, a výsledkem v tomto případě bude již rovnou reálné oteplení.



Obrázek 5.6 Náskres přívodu odpojovače pro výpočet jeho oteplení

5.3.1 Délka střední proudnice přívodu

Zanedbáme zkrácení střední délky proudnice v místě připojení na odpojovač, a to vzhledem k velké délce přívodu.

$$l_{př} = 1000 \text{ mm} = 1 \text{ m}$$

5.3.2 Elektrický odpor přívodu

Pro výpočet odporu se nemusí uvažovat otvory pro uchycení praporce, protože v místech šroubu je průřez mědi větší než zbytek přívodu. Pro potřeby výpočtu oteplení přívodu je zde nutné zvolit počáteční oteplení přívodu. Po iteracích, které vedly ke správnému zvolení počátečního oteplení, známe hodnotu $\theta_{ppř} = 27,2 \text{ K}$.

Rezistivita při teplotě 67,2 °C

$$\rho_{Cu67,2} = \rho_{Cu40} (1 + \alpha \theta_p) = 1,92 \cdot 10^{-8} \cdot (1 + 3,6 \cdot 10^{-3} \cdot 26,49) = 2,108 \cdot 10^{-8} \Omega \text{ m}, \quad (5.47)$$

Průřez přívodu

$$S_{př} = 0,06 \cdot 0,01 = 6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2, \quad (5.48)$$

Výsledný elektrický odpor přívodu

$$R_{př} = \frac{\rho_{Cu67,2}}{S_{př}} l_{př} = \frac{2,108 \cdot 10^{-8}}{6 \cdot 10^{-4}} \cdot 1 = 3,513 \cdot 10^{-5} \Omega, \quad (5.49)$$

5.3.3 Chladivost přívodu

Výpočet je obdobný jako u přechozích částí odpojovače.

Chladivost zářením

Použijeme opět emisivitu pro lehce oxidovanou měď $\epsilon_z = 0,15$ a také teplotu okolí $t_0 = 40^\circ \text{C}$. Z tabulky 2-10 na straně 52 skriptu E lze odečíst konkrétní vztah pro výpočet měrné chladivosti zářením α_z . Hodnota bude ovlivněna celkovým činitelem zastínění k_{zn} . [3]

$$\alpha_{zpř} = 1,1 + 0,006 \theta_{ppř} = 1,1 + 0,006 \cdot 27,2 = 1,263 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}, \quad (5.50)$$

Chladivost prouděním

Zde, z tabulky 2-10 na straně 52 skriptu E pro šířku přívodu $b = 60 \text{ mm}$, je nutné provést lineární interpolaci dvou vztahů, a to pro $b = 100 \text{ mm}$ a $b = 50 \text{ mm}$ [3]

$$\alpha_{K-100\text{mm}} = 3,7 + 0,046 \theta_{ppř}, \quad (5.51)$$

$$\alpha_{K-50\text{mm}} = 4,3 + 0,055 \theta_{ppř}, \quad (5.52)$$

Aproximace pro první člen rovnice platí:

$$\frac{4,3 - 3,7}{0,1 - 0,05} \cdot (0,1 - b) + 3,7 = \frac{4,3 - 3,7}{0,1 - 0,05} \cdot (0,1 - 0,06) + 3,7 = 4,18$$

Aproximace pro druhý člen rovnice platí:

$$\frac{0,055 - 0,046}{0,1 - 0,05} \cdot (0,1 - b) + 0,046 = \frac{0,055 - 0,046}{0,1 - 0,05} \cdot (0,1 - 0,06) + 0,046 = 0,0532$$

Konečný vztah pro měrnou chladivost prouděním pro šířku přívodu $b = 60 \text{ mm}$.

$$\alpha_{Kpř} = 4,18 + 0,0532 \theta_{ppř} = 4,18 + 0,0532 \cdot 27,2 = 5,627 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}, \quad (5.53)$$

Celková měrná chladivost

Pro celkovou měrnou chladivost přívodu $\alpha_{opř}$ platí:

$$\alpha_{opř} = \alpha_{Kpř} + \alpha_{Zpř} = 5,627 + 1,263 = 6,89 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}, \quad (5.54)$$

5.3.4 Chladicí plocha přívodu

$P_{př1}$ – plocha bočních a vrchních částí přívodu

$$P_{př1} = 1 \cdot 0,06 + 2 \cdot 1 \cdot 0,01 + 2 \cdot 0,06 \cdot 0,01 = 81,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2, \quad (5.55)$$

$P_{př2}$ – plocha spodních částí – Tato plocha má menší efektivitu chlazení, a to cca 2/3 chlazení bočních a vrchních ploch. Zanedbáme na této ploše zakrytou plochu připojeného praporce, avšak nedopustíme se velké chyby, protože se jedná o poměrně malou plochu a šrouby chladicí plochu naopak trochu zvětšují

$$P_{př2} = 1 \cdot 0,06 \cdot \frac{2}{3} = 40 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2, \quad (5.56)$$

Celková chladicí plocha přívodu:

$$P_{př} = P_{př1} + P_{př2} = 81,2 \cdot 10^{-3} + 40 \cdot 10^{-3} = 121,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2, \quad (5.57)$$

5.3.5 Fiktivní chladicí obvod přívodu

Pro výpočet fiktivního chladicího obvodu bude uvažování střední délka proudovodné dráhy přívodu $l_{př} = 1 \text{ m}$

$$O_{Vpř} = \frac{P_{př}}{l_{př}} = \frac{121,2 \cdot 10^{-3}}{1} = 121,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}, \quad (5.58)$$

5.3.6 Parametry náhradního tepelného schématu přívodu

V tomto případě se obvod zjednoduší na takzvané schéma tepelně dlouhé tyče, kde se vzorec výrazně zjednoduší a omezí pouze na výpočet podélného tepelného odporu. [3]

$$\delta_{př} = \sqrt{\alpha_{opř} O_{Vpř} \lambda_{Cu} S_{př}} = \sqrt{6,89 \cdot 121,2 \cdot 10^{-3} \cdot 385 \cdot 6 \cdot 10^{-4}} = 0,437, \quad (5.59)$$

Podélný (longitudinální) tepelný odpor [3]

$$R_{Tlpř} = \frac{1}{\delta_{př}} = \frac{1}{0,437} = 2,288 \text{ K W}^{-1}, \quad (5.60)$$

5.3.7 Celkové konečné oteplení přívodu ve vzdálenosti 1m

V případě přívodu je tato hodnota konečnou hodnotou oteplení a musí se s přesností alespoň ± 1 K shodovat se zadanou počáteční hodnotou oteplení přívodu $\theta_{ppř} = 27,2$ K.

$$\theta_{př} = \frac{\rho_{Cu67,2} I_r^2}{\alpha_{opř} O_{Vpř} S_{př}} = \frac{2,108 \cdot 10^{-8} \cdot 800^2}{6,89 \cdot 121,2 \cdot 10^{-3} \cdot 6 \cdot 10^{-4}} = 27,19 \text{ K}, \quad (5.61)$$

Výsledné oteplení je v toleranci ± 1 K vzhledem ke zvolenému oteplení pro přívod, a je tedy i konečným oteplením přívodu.

5.4 Výpočet parametrů náhradního tepelného schématu šroubového spoje na přívodu

Spoj má obdélníkový tvar styku o rozměrech 60×50 mm a je spojen dvěma šrouby M10 k praporci.

5.4.1 Plocha styku šroubového spoje

Z obdélníkové plochy styku je třeba odečíst dva otvory pro šrouby M10.

$$P_s = 0,06 \cdot 0,05 - 2 \cdot \frac{\pi \cdot 0,01^2}{4} = 2,84 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2, \quad (5.62)$$

5.4.2 Činitel přestupu tepla šroubového spoje

Jedná se o činitel přestupu tepla mezerou v okolí kontaktních stykových plošek. Tento koeficient odečteme z tabulky 2-15, str. 61, skriptu. Uvažujeme $F = 100$ N (šroubový spoj splňuje s velkou rezervou) a rozměr stykové plochy $S > 5 \text{ cm}^2$ a zároveň velikost vzduchové mezery $\delta \leq 0,1$ mm (také šroubový spoj splňuje). Pro tyto hodnoty je v tabulce uvedena hodnota činitele přestupu tepla $c_s = 0,5$. [3]

5.4.3 Kontaktní síla šroubového spoje

Pro zvolené šrouby M10 s třídou pevnosti 5.6 vyplývají z normy ČSN ISO 261 a 262 následující parametry:

- Průměr jádra $d_j = 7,94$ mm
- Maximální dovolené mechanické napětí $\sigma_{max} = 500$ Mpa
- Zvolené mechanické napětí $\sigma_{styk} = 50$ Mpa

Z těchto hodnot je možné vypočítat maximální přítláčnou sílu styku mezi přívodem a praporcem při použití dvou šroubů M10

$$F_{ps} = 2 \frac{\pi d_j^2}{4} \sigma_{styk} = 2 \cdot \frac{\pi (7,94 \cdot 10^{-3})^2}{4} \cdot 50 \cdot 10^6 = 4,95 \text{ kN}, \quad (5.63)$$

Při působení okolních vlivů a malých vibrací může tato síla za provozu poklesnout. Pro kritický návrh snížíme tuto maximální přitlačnou sílu o 50 %. Potom tedy pro přitlačnou sílu styku praporec a přívod platí:

$$F_{ps} = 0,1 F'_{ps} = 0,5 \cdot 4,95 = 2,475 \text{ kN}, \quad (5.64)$$

Pro správné nastavení této přitlačné síly ve styku na fyzickém odpojovači je potřeba znát utahovací moment. Jak je uvedeno i v kapitole 8.2 je určení utahovacího momentu velmi těžké vzhledem k mnoha různým proměnlivým parametrům. Velký vliv má prostředí v provozu, teplota, přesná úprava ploch, závitů atd... Alespoň orientační výpočet utahovacího momentu je proveden pomocí programu MITCalc, který slouží pro většinu strojírenských výpočtů. V Příloha A - je možné zhlédnout jaké všechny proměnné je potřeba pro takovýto výpočet znát. Jak je v kapitole 8.2 uvedeno, pro oteplovací zkoušku byl pomocí programu MITCalc vypočten utahovací moment cca 20 N m.

5.4.4 Elektrický odpor šroubového spoje

Pro tento případ kontaktu použijeme tabulku 2-2 na straně 33 skript E, kde je možné zjistit, že v případě šroubových spojů se jedná druh styku $n = 1$. V případě materiálové konstanty je zvolena dolní mez $k = 6 \cdot 10^{-4}$, což platí pro čistou měď, protože při utahování bude povrch čistý a bude minimálně přípustný vzduchu. Pro odpor styku praporec – přívod platí [3]

$$R_{styk} = \frac{k}{F_{ps}^n} = \frac{6 \cdot 10^{-4}}{2475^1} = 4,04 \cdot 10^{-7} \Omega, \quad (5.65)$$

5.4.5 Parametry náhradního tepelného schématu šroubového spoje

V případě kontaktního styku není k dispozici chladicí plocha, avšak oproti ostatním částem proudovodné dráhy má vyšší tepelný odpor. Na základě těchto poznatků dojde ke zjednodušení na náhradní schéma o tepelném odporu vřazeném do proudovodné dráhy s tepelnou ztrátou rozloženou na koncích tepelného odporu.

Tepelný odpor styku

$$R_{TS1} = \frac{c_1 R_{styk}}{\lambda_{Cu} \rho_{Cu70,13}} = \frac{0,5 \cdot 4,04 \cdot 10^{-7}}{385 \cdot 2,128 \cdot 10^{-8}} = 0,0247 \text{ K W}^{-1}, \quad (5.66)$$

Ztráty ve styku

$$Q_{styk} = R_{styk} I_r^2 = 4,04 \cdot 10^{-7} \cdot 800^2 = 0,26 \text{ W}, \quad (5.67)$$

Tyto ztráty se rovnoměrně rozdělí na oba konce tepelného odporu. Je tedy nutné tuto hodnotu ztrát ve styku rozdělit na dvě části.

$$Q_{styk/2} = \frac{Q_{styk}}{2} = \frac{0,26}{2} = 0,13 \text{ W}, \quad (5.68)$$

5.5 Výpočet parametrů náhradního tepelného schématu pracovního kontaktu

Samotný hlavní pracovní kontakt má šířku 10 mm (tloušťka praporce) a výšku 50 mm (výška nože). V tomto navrhovaném odpojovači bude zvoleno lokální postříbření těchto kontaktů. Je tedy nutné volit v případě výpočtu elektrického odporu materiálové konstanty pro stříbro.

5.5.1 Plocha kontaktu

$$S_k = 0,01 \cdot 0,05 = 5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2, \quad (5.69)$$

5.5.2 Činitel přestupu tepla kontaktu

Koeficient je odečten z tabulky 2-15, str. 61, skripta. Uvažujeme $F = 100 \text{ N}$ ($F_{pmin} = 181 \text{ N}$) a rozměr stykové plochy $S \approx 1 \text{ cm}^2$ a zároveň velikost vzduchové mezery bude maximálně $\delta = 1 \text{ mm}$. Pro tyto hodnoty je v tabulce uvedena hodnota činitele přestupu tepla $c_s = 1$. [3]

5.5.3 Elektrický odpor kontaktu

Opět je použita tabulka 2-2 na straně 33 skript E. Pro přímkový kontakt je druh styku $n = 0,7$ (kritičtější volba). V případě materiálové konstanty volíme horní mez $k = 6 \cdot 10^{-4}$ pro stříbrné kontakty. Je to tak pro málo spínané kontakty, na které působí okolní vzduch. Přítlačná síla v jednom kontaktu byla již určena v předešlé kapitole 3.1 - Výpočet minimální přítlačné síly na jeden kontakt. $F_{pmin} = 181 \text{ N}$. [3]

$$R_{kontakt} = \frac{k}{F_p^n} = \frac{6 \cdot 10^{-4}}{181^{0,7}} = 1,57 \cdot 10^{-5} \Omega, \quad (5.70)$$

5.5.4 Parametry náhradního tepelného schématu kontaktu

Zde taktéž platí případ kontaktu, ve kterém není k dispozici chladicí plocha a je zde vyšší tepelný odpor než v ostatních částech odpojovače. Zjednodušený náhradní obvod se skládá z tepelného odporu, dvou paralelních kontaktů a ztrát v kontaktu, které jsou rozloženy na oba konce tepelného odporu.

Tepelný odpor pro jeden kontakt

$$R_{Tk1} = \frac{c R_s}{\lambda_{Cu} \rho_{Cu70,13}} = \frac{1 \cdot 1,57 \cdot 10^{-5}}{385 \cdot 2,128 \cdot 10^{-8}} = 1,92 \text{ K W}^{-1}, \quad (5.71)$$

Výsledný tepelný odpor pro dva paralelní kontakty

$$R_{Tk} = \frac{R_{Tk1}}{2} = \frac{1,92}{2} = 0,96 \text{ K W}^{-1}, \quad (5.72)$$

Ztráty pro jednom kontaktu

V případě jednoho kontaktu se předpokládá rovnoměrné rozdělení jmenovitého proudu na oba kontakty

$$Q_{kontakt1} = R_{kontakt} \left(\frac{I_r}{2} \right)^2 = 1,57 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{800}{2} \right)^2 = 2,52 \text{ W}, \quad (5.73)$$

Celkové ztráty pro oba kontakty

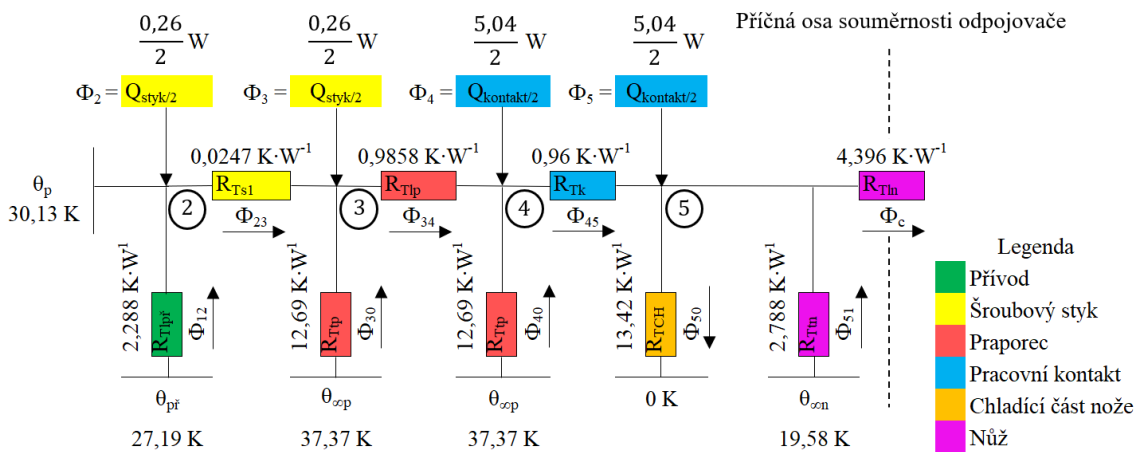
$$Q_{kontakt} = 2 Q_{kontakt1} = 2 \cdot 2,52 = 5,04 \text{ W}, \quad (5.74)$$

5.6 Náhradní jednořadová tepelná síť odpojovače

V této kapitole bude pomocí dvou nejjednodušších metod proveden výpočet maximálních dosažených hodnot oteplení v různých částech přístroje při trvalém proudu $I_r = 800 \text{ A}$.

5.6.1 Toková metoda

V této metodě je počítáno s tepelnými parametry každého dílu. Budeme předpokládat, že každá půlka odpojovače, jež je souměrná podle příčné osy, se chová stejně. Pro ověření správnosti vypočítaných parametrů stačí tedy pouze polovina tepelné sítě odpojovače. Je zde nutno počítat s velkým vlivem zaokrouhlování a i rozdíl „ruční“ početní metody naznačené níže a početní metody pomocí softwaru. Akceptovatelná tolerance výsledného výrazu celkového toku je $\Phi_C = \pm 0,5 \text{ W}$. Celkový tok vyjadřuje, že námi navržená tepelná síť a její parametry jsou vyvážené a zvolené počáteční oteplení pravdivé.



Obrázek 5.7 Náhradní jednořadová tepelná síť odpojovače pro výpočet tokovou metodou přívodu

S pomocí tokové metody ověříme, zda tok $\Phi_C = 0$.

$$\Phi_{12} = \frac{\theta_{př} - \theta_p}{R_{Tlpř}} = \frac{27,19 - 30,13}{2,288} = -1,285 \text{ W}, \quad (5.75)$$

$$\Phi_{23} = \Phi_{12} + \frac{Q_{styk}}{2} = -1,285 + \frac{0,26}{2} = -1,155 \text{ W}, \quad (5.76)$$

Oteplení praporce u šroubového kontaktu s přívodem θ_3

$$\theta_3 = \theta_p - \Phi_{23} R_{Ts1} = 30,13 - (-1,155) \cdot 0,0247 = 30,159 \text{ K}, \quad (5.77)$$

$$\Phi_{30} = \frac{\theta_{\infty p} - \theta_3}{R_{Ttp}} = \frac{37,37 - 30,159}{12,69} = 0,5682 \text{ W}, \quad (5.78)$$

$$\Phi_{34} = \Phi_{30} + \Phi_{23} + \frac{Q_{styk}}{2} = 0,5682 - 1,155 + \frac{0,26}{2} = -0,4568 \text{ W}, \quad (5.79)$$

Oteplení praporce u pracovního kontaktu θ_4

$$\theta_4 = \theta_3 - \Phi_{34} R_{Tlp} = 30,159 - (-0,4568) \cdot 0,9858 = 30,609 \text{ K}, \quad (5.80)$$

$$\Phi_{40} = \frac{\theta_{\infty p} - \theta_4}{R_{Ttp}} = \frac{37,37 - 30,609}{12,69} = 0,5328 \text{ W}, \quad (5.81)$$

$$\Phi_{45} = \Phi_{40} + \Phi_{34} + \frac{Q_{kontakt}}{2} = 0,5328 + (-0,4568) + \frac{5,04}{2} = 2,596 \text{ W}, \quad (5.82)$$

Oteplení nože u pracovního kontaktu θ_5

$$\theta_5 = \theta_4 - \Phi_{45} R_{Tk} = 30,609 - 2,596 \cdot 0,96 = 28,117 \text{ K}, \quad (5.83)$$

$$\Phi_{50} = \frac{\theta_5}{R_{TCH}} = \frac{28,117}{13,42} = 2,0952 \text{ W}, \quad (5.84)$$

$$\Phi_{51} = \frac{\theta_{\infty n} - \theta_5}{R_{Ttn}} = \frac{19,58 - 28,117}{2,788} = -3,0621 \text{ W}, \quad (5.85)$$

$$\Phi_C = \Phi_{45} - \Phi_{50} + \Phi_{51} + \frac{Q_{kontakt}}{2} = 2,596 - 2,0952 + (-3,0621) + \frac{5,04}{2} = -0,0413 \text{ W} \cong 0, \quad (5.86)$$

$\Phi_C \cong 0 \text{ W}$ je obvod vyvážený.

Oteplení přívodu ve vzdálenosti 1 m je uveden v kapitole 5.3.7 $\theta_{př} = 27,19 \text{ K}$. V případě výpočtu oteplení přívodu u šroubového spojení se jedná o počáteční zvolenou hodnotu vedoucí ke správně vyváženému obvodu. V tomto případě to je $\theta_p = 30,13 \text{ K}$.

5.6.2 Metoda elektrotepelné analogie

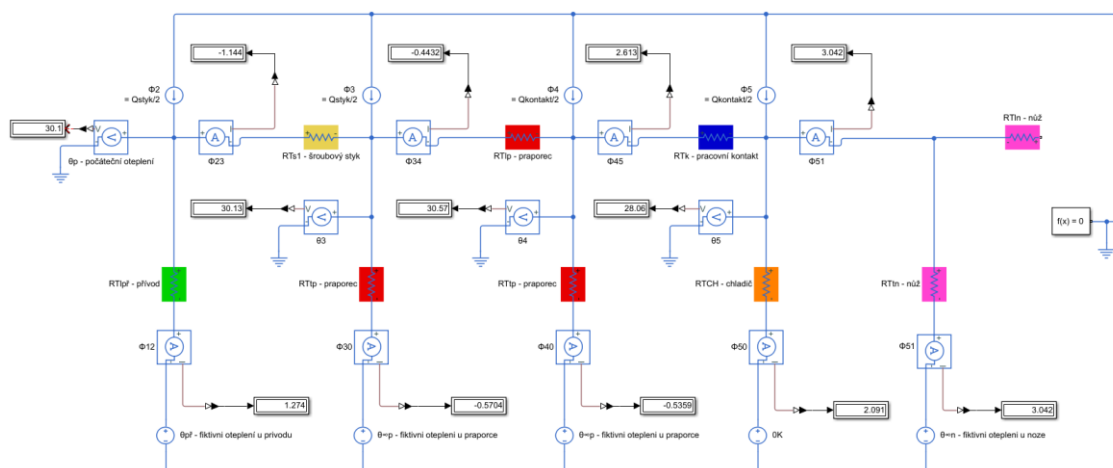
Mezi tepelnými a elektrickými veličinami (stejně tak i magnetickými) existuje elektrotepelná analogie. To nám umožňuje aplikaci již dobře známých pravidel pro výpočet elektrických veličin na výpočet a práci s tepelnými veličinami. S výhodou tak můžeme použít například Ohmův zákon nebo Kirchofovy zákony apod., a to s tepelnými veličinami. Existují různé odborné literatury zabývající se tepelným dimenzováním ať už přístrojů, nebo elektrických obvodů, zvláště pak silnoproudých. Je tedy možné zjistit, jaké existují empiricky a fyzikálně dokázané elektrotepelné analogie. V rámci této práce jsou

zdrojem informací vysokoškolská skripta Doc. Dr. Ing. Miroslava Patočky – *Vybrané statě z výkonové elektroniky – Svazek I – Tepelné jevy, činný výkon; kapitola 2. Tepelné jevy ve výkonové elektronice*. Autor zde vysvětluje, jaké existují elektrotepelné analogie a dokazuje jejich fyzikální podobnost. V následující tabulce jsou uvedeny vybrané elektrotepelné analogie, které autor ve své práci uvádí. [5]

Tabulka 5.2 Přehled elektrotepelné analogie pro vybrané veličiny [5]

Tepelná veličina	Elektrická veličina
Tepelná energie $W, w(t)$ [J]	Elektrický náboj $Q, q(t)$ [C]
Tepelný tok (tepelný výkon, zařivý výkon) $\Phi, P, p(t)$ [W] $P = \frac{W}{t}, p(t) = \frac{dw(t)}{dt}$	Proud $I, i(t)$ [A] $I = \frac{Q}{t}, i(t) = \frac{dq(t)}{dt}$
Termodynamická teplota – měřena vůči absolutní nule $T, T(t)$ [K]	Elektrický potenciál – měřeny vůči absolutnímu nulovému bodu $\varphi, \varphi(t)$ [V]
Oteplení $\Delta T = \theta = \Delta \vartheta = T_2 - T_1 = \vartheta_2 - \vartheta_1$ [K], [°C] $\Delta T(t) = T_2(t) - T_1(t)$	Elektrické napětí $U = \varphi_2 - \varphi_1$ [V] $u(t) = \varphi_2(t) - \varphi_1(t)$
Tepelný odpor, vodivost $R_{\vartheta} = \frac{\Delta T}{P} = \frac{\Delta T(t)}{P(t)}$ [K W ⁻¹] $R_{\vartheta} = \frac{1}{G_{\vartheta}} = \rho_{\vartheta} \cdot \frac{l}{S} = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{l}{S}$	Elektrický odpor, vodivost $R = \frac{U}{I} = \frac{u(t)}{i(t)}$ [Ω] $R = \frac{1}{G} = \rho \cdot \frac{l}{S} = \frac{1}{g} \cdot \frac{l}{S}$

V rámci této metody je s výhodou použit výpočetní program MATLAB, respektive simulační nástroj SIMULINK.



Obrázek 5.8 Náhradní jednořadová tepelná síť s elektrotepelnou analogií v programu SIMULINK

Jak lze z obrázku vidět, tepelné odpory částí odpojovače byly nahrazeny analogicky klasickými ohmickými odpory. Oteplení byla analogicky nahrazena napětovými zdroji zapojenými vůči potenciálu země, popřípadě měření oteplení je prováděno voltmetry zapojenými také vůči potenciálu země. Tepelné ztráty byly analogicky nahrazeny proudovými zdroji a tepelný tok je analogicky měřen ampérmetry. Po zadání všech vypočtených hodnot jednotlivých částí provede SIMULINK výpočet počátečního oteplení (napětí), které splňuje podmínku $\Phi_C = +/ - 0,5 \text{ W}$. V tomto případě vyšlo počáteční oteplení $\theta_p = 30,13 \text{ K}$. Rozdíl mezi oběma metodami je hlavně v zaokrouhlování. Je tedy ověřeno, že předpokládaná elektrotepelná analogie má skutečně opodstatnění například při kontrole tepelné sítě stroje či přístroje.

5.7 Oteplení jednotlivých částí odpojovače

Pro určení oteplení jednotlivých částí odpojovače bude využito výsledků z tokové metody. Pro vyhodnocení je použita ČSN EN 62271-1 ed. 2 – Část 1 - Tabulka 14. a to s hodnotami pro prostředí OG – (oxidační plyny). Tak, jak je uvedeno za začátku této kapitoly, kde je podrobněji vysvětlena problematika dimenzování na dovolené oteplení, je třeba přisoudit příslušné části do jednotlivých kategorií uvedených v normě. [8]

Tabulka 5.3 Hodnoty vypočtených oteplení částí odpojovače a porovnání s maximální dovolenou hodnotou oteplení pro konkrétní část odpojovače

Část a materiál	Kategorie udávaná v normě	Teplota okolního vzduchu 40 °C	
		Vypočítané oteplení	Povolené oteplení
Přívod ve vzdálenosti 1 m – měděný	Šroubová nebo ekvivalentní spojení, šroubové přívodní svorky – měděné	$\theta_{př} = 27,19 \text{ K}$	60 K
Přívod u šroubového kontaktu – měděný		$\theta_p = 30,13 \text{ K}$	60 K
Praporec u šroubového kontaktu – měděný		$\theta_3 = 30,16 \text{ K}$	60 K
Praporec u pracovního kontaktu – postříbřený	Kontakty – stříbrné	$\theta_4 = 30,61 \text{ K}$	75 K
Nůž u pracovního kontaktu – postříbřený		$\theta_5 = 28,12 \text{ K}$	75 K

Další kontrolou musí projít izolační části a povrchy přístupné doteku. Pokud pro jakoukoli část odpojovače platí z tabulky 14. ČSN EN 62271-1 ed. 2 kritičtější hodnota z důvodu, že se jedná o část s předpokládaným dotekem nebo část obsahující izolant třídy s nižším dovoleným oteplením, musí tato část odpojovače splnit kritičtější podmínku.

V případě částí přístupných na dotek se rozlišují ty části, u kterých se během **normálního provozu**:

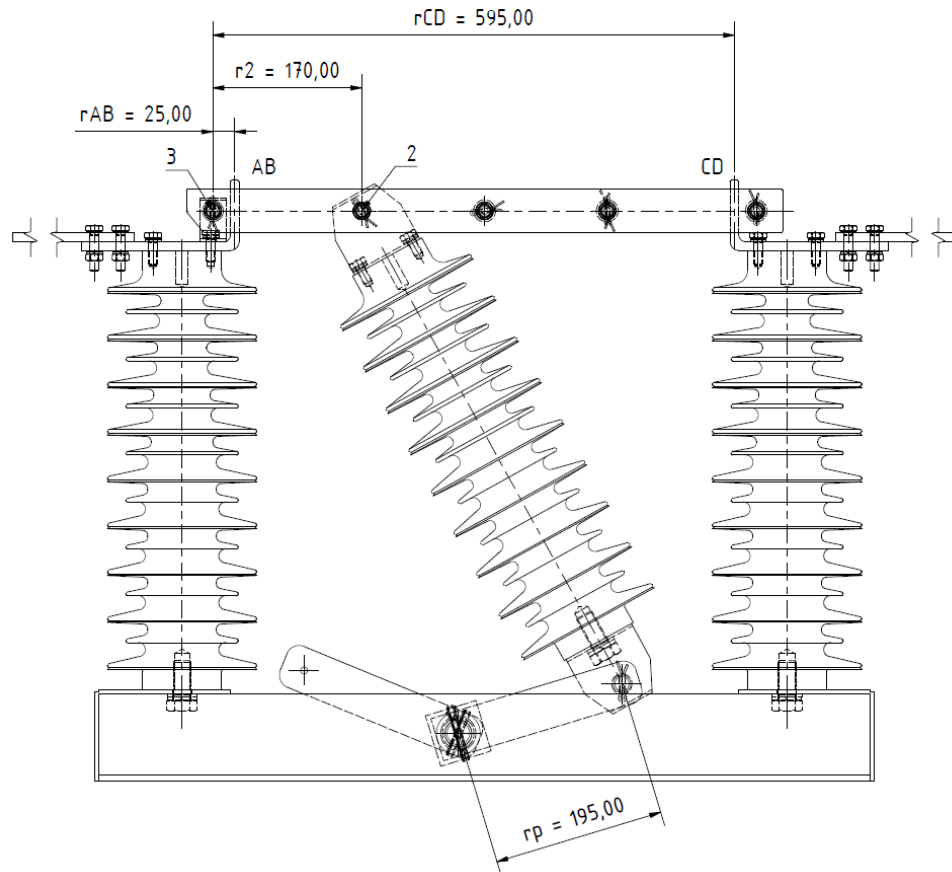
- předpokládá dotyk (kovové pokovené 15 K, kovové nepokovené 15 K, nekovové 25 K) [8]
- předpokládá dotyk, ne však trvalý (kovové pokovené 25 K, kovové nepokovené 30 K, nekovové 40 K) [8]
- není nutný dotyk (kovové pokovené 40 K, kovové nepokovené 40 K, nekovové 50 K) [8]

V běžném provozu od samotné instalace odpojovače se nepředpokládá žádný dotyk, samotná manipulace je zprostředkována soustavou táhel až do standardní výšky nad zemí pro pohodlnou obsluhu bez potřeby žebříku apod. Pro předmětné táhlo by mohlo platit maximální dovolené oteplení pro předpokládaný dotyk, ne však trvalý, pro kovové nepokovené 30 K. Vzhledem k umístění odpojovače na samotném vrcholu sloupu a umístění ovládacího táhla skoro u země, je vzhledem k vypočtenému oteplení tato podmínka splněna. Pokud bychom byli hodně kritičtí a počítali s občasnou údržbou samotného odpojovače, mohli bychom zařadit odpojovač do kategorie, kdy během provozu není nutný dotyk a je třeba splnit příslušná maximální dovolená oteplení pro dané povrchy opět z vypočtených hodnot oteplení. Je jasné, že i zde je norma splněna – všechny kovové části jsou do 40 K. Norma také hovoří o maximálním rozdílu oteplení 5 K mezi svorkami hlavního obvodu a na dočasném spoju vzdáleném 1 m od hlavní svorky. Jedná se o rozdíl teplot mezi místem $\theta_{pr} = 27,19 \text{ K}$ – přívod ve vzdálenosti 1 m a $\theta_p = 30,13 \text{ K}$ – přívod u šroubového kontaktu. Dovolенý maximální rozdíl těchto míst je tedy splněn. Pokud by tato podmínka nebyla splněna, avšak všechny podmínky, které jsou uvedeny v tabulce 14 a jejich vysvětlivkách normy ČSN EN 62271-1 ed. 2 by splněny byly, je možno považovat zkoušku za platnou. [8]

Nakonec je třeba zařadit použitý izolátor do správné třídy izolantu díky tabulce s přehledem přiřazení elektroizolačních materiálů do kategorií z japonského mezinárodního technického měsíčníku „Three Bond Technical News“ z 1.12.1985 s názvem hlavního tématu „Temperature Classes of Electrical Insulators.“ Díky této podrobně zpracované tabulce materiálů je možné určit, že použitý izolátor spadá do teplotní třídy H. Nejvyšší dovolené oteplení dle tabulky 14. ČSN EN 62271-1 ed. 2 je pro tuto kategorii 140 K, což navrhovaný odpojovač s přehledem splňuje. Na závěr je nutno zopakovat, že veškeré udávané hodnoty oteplení jsou vzhledem k teplotě okolí 40 °C. [6], [8]

6. MECHANISMUS ODPOJOVAČE

Nejčastější způsob ovládání drážního odpojovače je pomocí pákového mechanismu, který svede ovládací pohyb podél trakčního sloupu do běžné výšky pro obsluhu ze země.



Obrázek 6.1 Náskres odpojovače pro stanovení momentu pohonu

Při zjišťování tíhy jednotlivých ovládacích částí byl s výhodou využit návrhový program Inventor, ve kterém probíhalo samotné konstruování navrženého odpojovače. Tento program umožňuje nastavení konkrétního materiálu. Po nastavení vlastností materiálu je možné přímo vyčíst vypočtené fyzikální vlastnosti jednotlivých dílů.

6.1 Výpočet tíhy nože

Materiálem je elektrovedná měď označením EN CW004A s hustotou $\rho_{h-cu} = 8960 \text{ kg m}^3$.

Objem jednoho nože s rezervou 10 % (čepy, podložky apod.)

$$V_{nůž+10\%} = 1,1 \cdot 162,2 \cdot 10^{-6} = 178,42 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3, \quad (6.1)$$

Pro výpočet tíhy dvou nožů platí

$$G_{nožů} = 2 \rho_{h-cu} V_{nůž+10\%} g = 2 \cdot 8960 \cdot 178,42 \cdot 10^{-6} \cdot 9,81 = 31,37 \text{ N}, \quad (6.2)$$

6.2 Výpočet tíhy izolátoru s držáky

Materiálem je konstrukční ocel třídy dle ČSN - 11 375 s hustotou $\rho_{h-ocel} = 7850 \text{ kg m}^3$.
Hmotnost izolátoru dle typového výkresu výrobce je $m_{izolátor} = 8,95 \text{ kg}$.

Objem držáků s rezervou 5 % (šrouby, čepy apod.)

$$V_{držáky+5\%} = 1,05 \cdot 104,14 \cdot 10^{-6} = 109,35 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3, \quad (6.3)$$

Tíha izolátoru s držáky

$$G_{izolator+držáky} = (m_{izolátor} + \rho_{h-ocel} V_{držáky+5\%}) g = (8,95 + 7850 \cdot 109,35 \cdot 10^{-6}) \cdot 9,81 = 96,22 \text{ N}, \quad (6.4)$$

6.3 Výpočet tíhy páky odpojovače

Materiálem je konstrukční ocel třídy dle ČSN - 11 375 s hustotou $\rho_{h-ocel} = 7850 \text{ kg m}^3$.

Objem páky odpojovače:

$$V_{páka} = 355,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

Tíha páky odpojovače

$$G_{páka} = \rho_{h-ocel} V_{páka} g = 7850 \cdot 355,6 \cdot 10^{-6} \cdot 9,81 = 27,38 \text{ N}, \quad (6.5)$$

6.4 Výpočet potřebného momentu k ovládání odpojovače

Moment vyvinutý tíhou všech dílců redukováný na hlavní osu

V případě tíhy páky je třeba si uvědomit, že celá tíha nepůsobí na samotném konci poloměru otáčení, ale v celém jeho poloměru otáčení, a tudíž je provedeno „zprůměrování“ $\frac{r_p}{2}$ [3]

$$M_{TI} = (G_{nožů} + G_{izolator+držáky}) r_p + G_{páka} \frac{r_p}{2} = (31,37 + 96,22) \cdot 0,195 + 27,38 \cdot \frac{0,195}{2} = 52,8 \text{ N m}, \quad (6.6)$$

Tření v kontaktech

Přítlačná síla: $F_p = 181 \text{ N}$ / 1 kontakt

součinitel statického tření (tabulková z portálu E-konstrukter) [19]: $f = 0,3$

Výpočet třecí síly v kontaktu

$$F_{tk} = f F_p = 0,3 \cdot 181 = 54,3 \text{ N}, \quad (6.7)$$

Moment vztažený k ose otáčení nožů (k bodu 3)

Pro oba kontakty A, B

$$M_{AB} = 2 F_{tk} r_{AB} = 2 \cdot 54,3 \cdot 0,025 = 2,715 \text{ N m}, \quad (6.8)$$

Pro oba kontakty C, D

$$M_{CD} = 2 F_{tk} r_{CD} = 2 \cdot 54,3 \cdot 0,595 = 64,62 \text{ N m}, \quad (6.9)$$

Síla v ose držáku nože (v bodě 2)

$$F_2 = \frac{M_{AB} + M_{CD}}{r_2} = \frac{2,715 + 64,62}{0,17} = 396,1 \text{ N}, \quad (6.10)$$

Moment na hřídeli (bod 3)

$$M_{TŘ} = F_2 r_p = 396,1 \cdot 0,195 = 77,24 \text{ N m}, \quad (6.11)$$

Moment pohonu

$$M_P = M_{TI} + M_{TŘ} = 52,8 + 77,24 = 130,04 \text{ N m}, \quad (6.12)$$

Konečná podoba pákového systému záleží na konkrétním umístění na sloupu. Dále bude předpokládáno, že samotná páka obsluhy bude mít minimální délku $L_{\text{páka-obsluha}} = 0,6 \text{ m}$. Velmi zjednodušený výpočet potřebné síly při zanedbání dalších dílů pákového systému.

$$F_{\text{obsluha}} = \frac{M_P}{L_{\text{páka-obsluha}}} = \frac{130,04}{0,6} = 216,73 \text{ N}, \quad (6.13)$$

V přepočtu na kilogramy vynaložené pro ovládání

$$m_{\text{ovládání}} = \frac{F_{\text{obsluha}}}{g} = \frac{216,73}{9,81} = 22,09 \text{ kg}, \quad (6.14)$$

Při manipulaci s břemenem, nákladem, zařízením atd. během práce je třeba respektovat hygienické limity pro zvedání břemen, přičemž limity platí i pro přesouvání, pokládání, strkání či tahání břemen. Tyto hodnoty jsou součástí nařízení vlády č. 361/2007 Sb., konkrétně § 28 až §30, jež stanovují podmínky ochrany zdraví při práci. Následuje zjednodušená tabulka pro případ, kdy se počítá s občasnou manipulací, čímž se rozumí manipulace, která souhrnně za osmihodinovou směnu nepřesáhne 30 minut.

Tabulka 6.1 Tabulka maximálních limitů hmotnosti pro občasné manipulace z nařízení vlády č. 361/2007 Sb. § 28 až 30 § [13]

	Limit občasné manipulace
Muži	50 kg
Ženy	25 kg
Těhotné ženy	10 kg
Mladiství chlapci	20 kg
Mladistvé dívky	15 kg

Při použití páky obsluhy o délce 0,6 m (a větší) a při současně dobře nastavené přitlačné síly nožů a namazaných pohyblivých částí je možné, aby tento odpojovač obsluhovaly i ženy.

7. KONTROLA IZOLAČNÍCH VZDÁLENOSTÍ

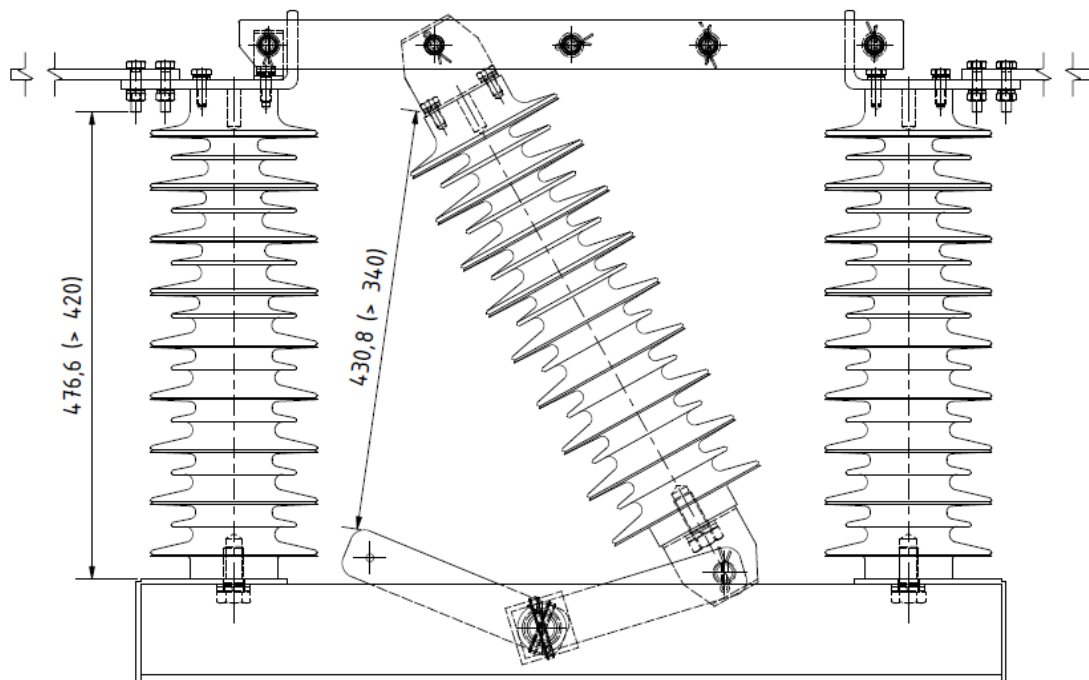
7.1 Zapnutý odpojovač

Izolační vzdálenost mezi šroubem praporce a uzemněnou základnou:

Společná hodnota pro hrot – uzemněná rovina min. 42 cm.

Izolační vzdálenost mezi držákem nožů a uzemněnou ovládací pákou:

Společná hodnota pro hrot – uzemněný hrot min. 34 cm.



Obrázek 7.1 Nákres odpojovače pro kontrolu izolačních vzdáleností v zapnutém stavu

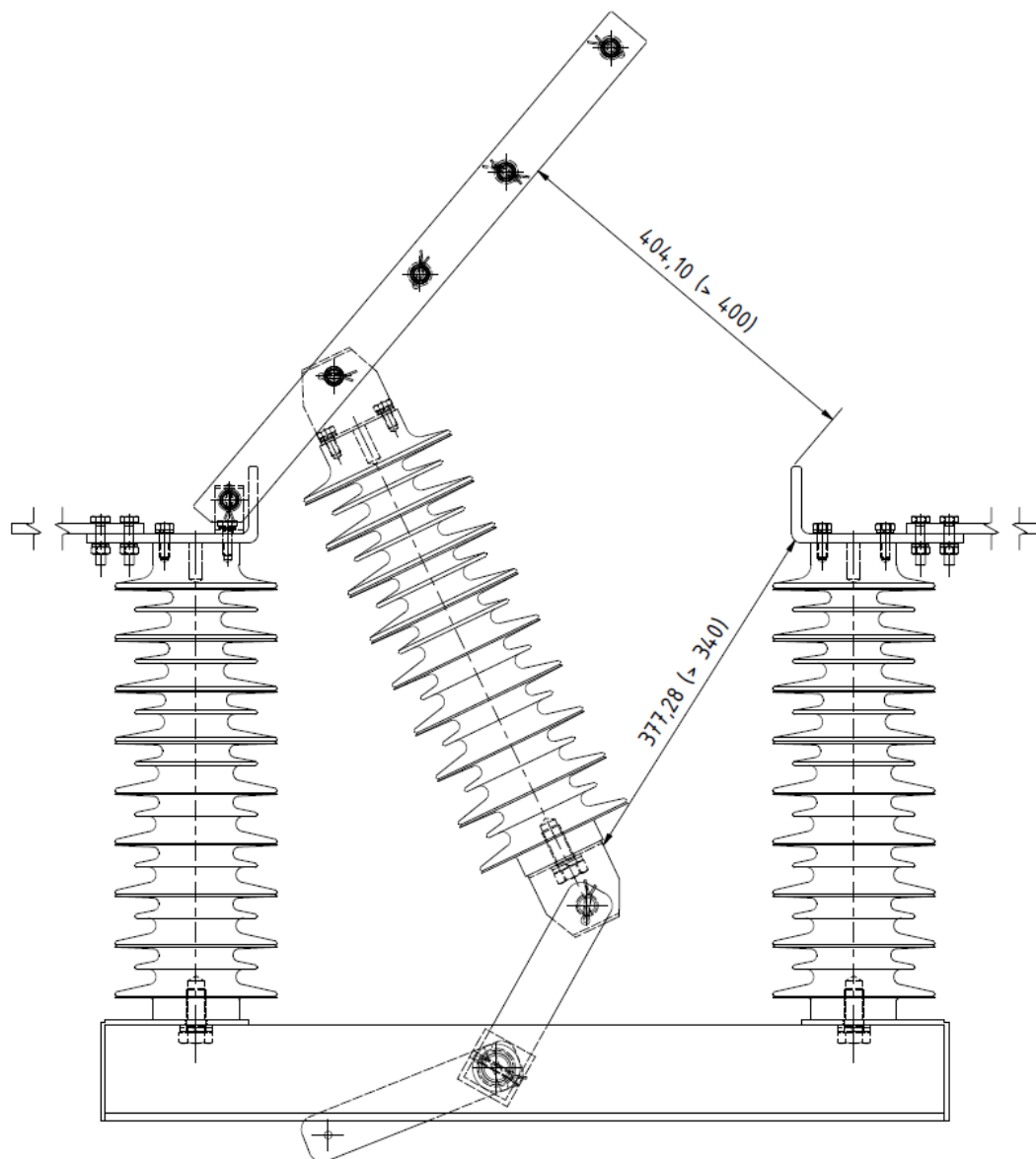
7.2 Vypnutý odpojovač

Izolační vzdálenost mezi praporcem a nožem:

V odpojovací dráze pro hrot – uzemněný hrot min. 40 cm.

Izolační vzdálenost mezi praporcem a uzemněným držákem izolátoru:

Společná hodnota pro hrot – uzemněný hrot min. 34 cm.



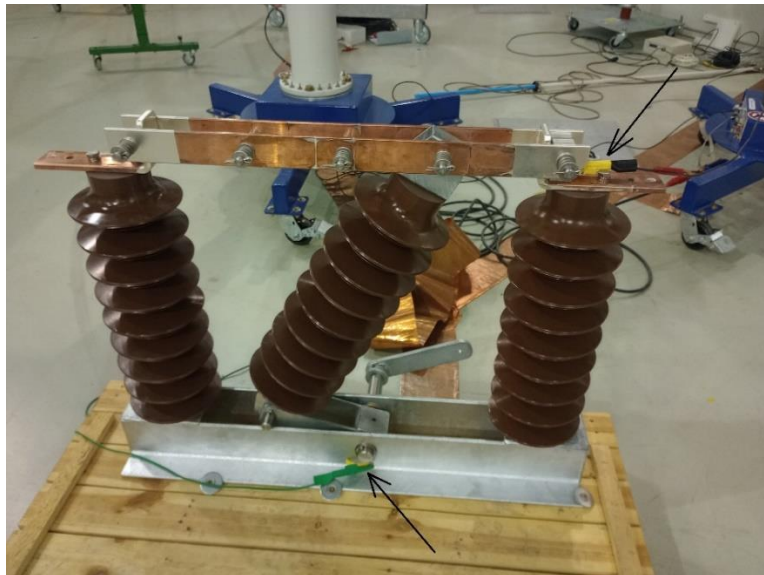
Obrázek 7.2 Náskres odpojovače pro kontrolu izolačních vzdálenosti ve vypnutém stavu

8. TYPOVÉ ZKOUŠKY VYBRANÝCH PARAMETRŮ

Po kompletním sestrojení odpojovače následovaly zkoušky pro ověření zadaných parametrů. Zkoušky probíhaly v prostorách budovy Vědeckotechnického parku profesora Lista v Brně, přesněji v laboratoři vysokého napětí a poté i na zkratovně.

8.1 Zkoušky elektrické pevnosti odpojovače

Průběh zkoušek ověřujících elektrickou pevnost se řídí několika normami, přičemž tou nejdůležitější je ČSN EN 60060-1 - Technika zkoušek vysokým napětím – Část 1: Obecné definice a požadavky na zkoušky. Samotné hodnoty zkušebních napětí pro zkoušky drážních odpojovačů doporučuje norma ČSN EN 50152-2 ed. 3 – Pevná trakční zařízení. Obecné informace o vyhodnocení a některé požadavky na zkoušky obsahuje pak norma ČSN EN IEC 62271-102 ed. 2 - Vysokonapěťová spínací a řídicí zařízení - Část 102: Odpojovače a uzemňovače střídavého proudu. Ostatní společná část pro zkoušení izolačních vlastností pro VN spínací a řídicí zařízení řeší norma ČSN EN 62271-1 ed. 2 - Vysokonapěťová spínací a řídicí zařízení - Část 1: Společná ustanovení pro spínací a řídicí zařízení střídavého proudu. Ověření elektrické pevnosti odpojovače proběhlo dvěma zkouškami. První z nich byla zkouška krátkodobým střídavým výdržným napětím průmyslového kmitočtu 50 Hz a jako druhá se uskutečnila zkouška impulsním napětím. Obě zkoušky proběhly vždy v obou provozních stavech, tedy stavu vypnuto a zapnuto. V poloze zapnuto byla jednou elektrodou samotná proudovodná dráha a druhou elektrodu tvořila základna odpojovače. Testoval se tak případný přeskok vůči zemi.



Obrázek 8.1 Odpojovač při napěťové zkoušce při měření společné hodnoty (sepnutý stav) s vyznačením míst připojení na zkušební napětí

V případě vypnuté polohy byl jednou elektrodou samostatný kontaktní praporec a druhou elektrodou druhý praporec, jehož součástí jsou i kontaktní nože. Základna odpojovače byla v tomto případě „plovoucí“, aby neovlivňovala hodnoty měření napětí v odpojovací dráze.



Obrázek 8.2 Odpojovač při napěťové zkoušce při měření hodnot v odpojovací dráze (vypnutý stav) s vyznačením míst připojení na zkušební napětí

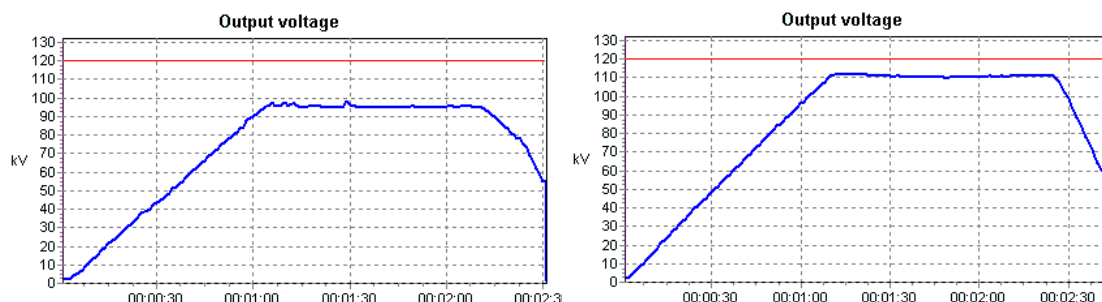
8.1.1 Zkouška krátkodobým střídavým výdržným napětím

Během této zkoušky je po dobu alespoň jedné minuty odpojovač připojen na zdroj střídavého napětí o frekvenci 50 Hz. Nejprve byl odpojovač připojen ke zdroji střídavého napětí, které se zvyšovalo postupně až do normou požadované hodnoty U_d . Zvyšování nesmělo být moc rychlé z důvodu rychlosti odečítání napětí na přístroji, ale zároveň nesmělo být moc pomalé, aby se přístroj zbytečně dlouho nezatěžoval napětím okolo U_d . Po dosažení hodnoty U_d započala samotná zkouška, a to měřením po dobu alespoň 60 s. Po uplynutí této doby se napětí rychle sníží, přičemž přístroj se nesmí odpojit od zdroje napětí z důvodu velkého rizika spínacího přechodného přepětí. Tolerance mezi požadovaným napětím U_d a napětím měřeným během pokusu může dle normy ČSN EN 60060-1 dosahovat $\pm 1 \%$, a to po celou délku zkoušky tedy přesněji po dobu 60 s.[21]

Tabulka 8.1 Hodnoty zkušebního krátkodobého střídavého výdržného napětí U_d pro navrhovaný odpojovač

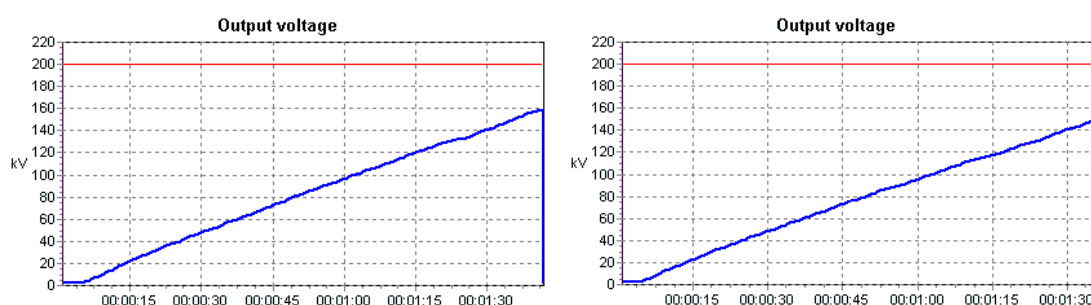
	Krátkodobé výdržné napětí průmyslového kmitočtu U_d
Společná hodnota $U_{d-společná}$ - poloha zapnuto	95 kV
V odpojovací dráze $U_{d-odpoj.dráze}$ - poloha vypnuto	110 kV

V následujících obrázcích je možné vidět průběh zkoušky, jak v poloze zapnuto, tak následně v poloze vypnuto.



Obrázek 8.3 Průběh napětí při zkoušce výdržným napětím vlevo společná hodnota (sepnutý stav) vpravo v odpojovací dráze (vypnutý stav)

Jak je možné z obrázku vidět, zkouška v obou provozních polohách proběhla úspěšně. Pro informativní účely výrobce byla provedena i zkouška taková, kdy střídavé napětí plynule rostlo až do hodnoty samotného průrazu, ať už vůči zemi v poloze zapnuto, tak poté i vůči odpojovací dráze v poloze vypnuto. Na následujících obrázcích je samotný průběh této zkoušky vyobrazen.



Obrázek 8.4 Průběh napětí do průrazu při zkoušce výdržným napětím vlevo společná hodnota (sepnutý stav), vpravo v odpojovací dráze (vypnutý stav)

V poloze zapnuto bylo dosaženo hodnoty zhruba $U_{d\text{-společná}} = 159 \text{ kV}$ a v poloze vypnuto zhruba $U_{d\text{-odpoj.dráze}} = 150 \text{ kV}$. Z dosažených výsledků je možné odvodit, že přístroj má dostatečné rezervy. Tyto rezervy se využijí ve prospěch dlouhodobé spolehlivosti po celou dobu životnosti přístroje. Výrobce musí při návrhu brát na vědomí, že izolátory ztrácí provozem svou izolační schopnost, a to v závislosti na prostředí ve kterém se odpojovač provozuje.

8.1.2 Zkouška impulsním napětím

Jedná se o zkoušku, při které dochází k rychlému nárůstu aperiodického přechodného napětí až do požadované vrcholové hodnoty – tato část je takzvané čelo. Poté dochází pomalejšímu poklesu napětí až k nule – této části se říká tyl. Normy udávají zkoušky s definovanou dobou čela $1,2 \mu\text{s}$ a s dobou půltýlu $50 \mu\text{s}$. Doba půltýlu je doba

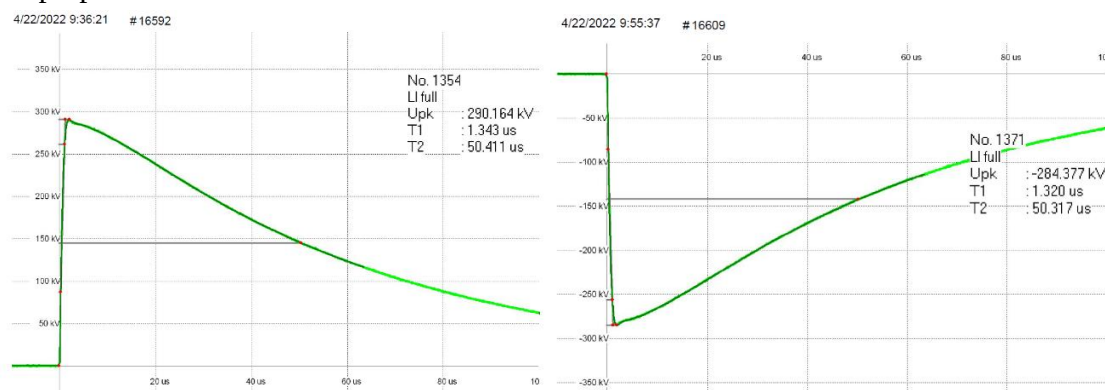
dosažení 50 % hodnoty zkušebního impulsního napětí U_{Ni} . Přístroj byl v obou provozních stavech (zapnuto a vypnuto) a po dohodě s mistry z laboratoře vysokého napětí byl také otestován deseti impulsy pro obě polarity. Během těchto deseti impulsů nesmělo dojít k žádnému průrazu. V případě průrazu by muselo být měření provedeno novou sérií, aby došlo k souběhu deseti po sobě jdoucích úspěšných pokusů. Vzhledem k tomu, že zkouška má charakter jedné púlperiody, je třeba zkoušku provést se stejnými podmínkami i v opačné polaritě opět s deseti po sobě jdoucími úspěšnými pokusy. [21]

Norma ČSN EN 60060-1 povoluje toleranci mezi dosaženým napětím během pokusu a požadovaným napětím $U_{Ni} \pm 3 \%$. V případě doby čela je možná tolerance $\pm 30 \%$ a doba půltýlu může být v toleranci $\pm 20 \%$. Dalšími vlivy, které do zkoušky vstupují, jsou vlivy atmosférických podmínek. Tyto podmínky řeší takzvaný atmosférický korekční činitel K_t . Máme-li určené napětí pro referenční podmínky normy U_{Ni} , je napětí, které je přiloženo během zkoušky, ovlivněno součinem U_{Ni} a K_t . [21]

Tabulka 8.2 Hodnoty zkušebního jmenovitého impulsního napětí U_{Ni} pro navrhovaný odpojovač

	Jmenovité impulsní napětí U_{Ni}
Společná hodnota $U_{Ni-společná}$ - poloha zapnuto	250 kV
V odpojovací dráze $U_{Ni-odpoj.dráha}$ - poloha vypnuto	290 kV

Na následující dvojici obrázků je vidět průběh jednoho z úspěšných pokusů pro obě polarity v odpojovací dráze – poloha vypnuto. V této podobě bylo napětí přiváděno na praporec.



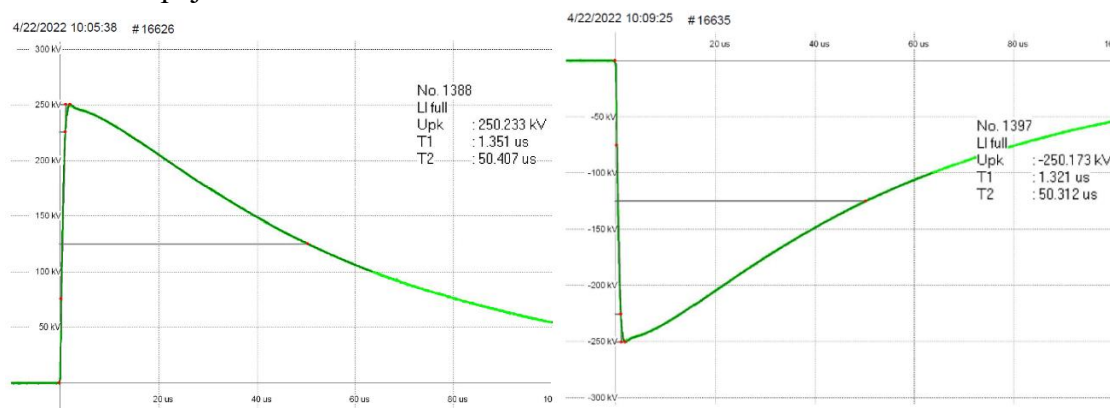
Obrázek 8.5 Průběh impulsního napětí při zkoušce v odpojovací dráze (vypnutý stav) vlevo – nože jsou kladná elektroda, vpravo – nože jsou záporná elektroda

Z obrázků je zřejmé, že při konfiguraci, kdy zápornou elektrodu tvořily nože odpojovače a kladnou elektrodu tvořil samostatný praporec, je dosaženo napětí 284 kV. Vzhledem k změřenému atmosférickému činiteli $K_t = 0,98$ v bezprostředním okolí odpojovače bylo upraveno přikládání zkušební napětí podle normou stanoveného vzorce

$$U_{zkušebna} = U_{Ni-odpoj.dráha} K_t = 290 \cdot 0,98 = 284,2 \text{ kV}, \quad (8.1)$$

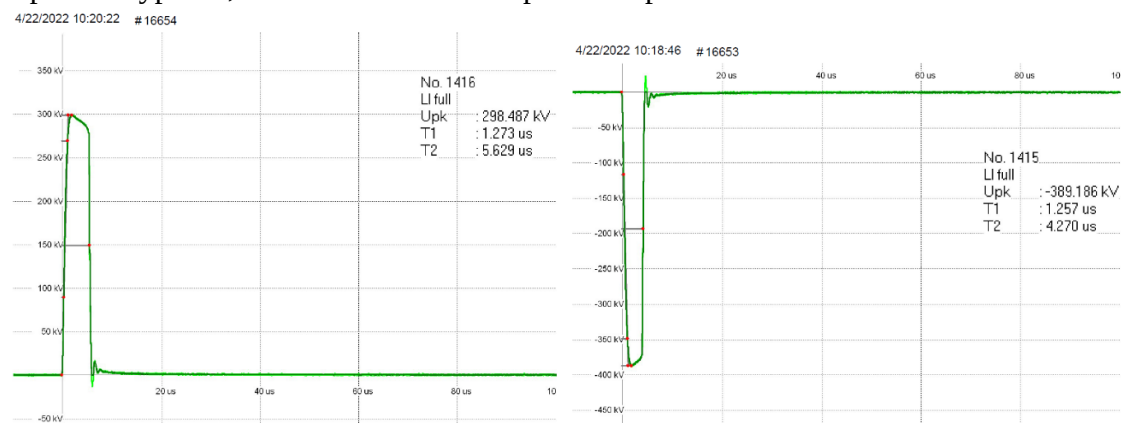
Toto napětí při dané polaritě již bez problému splnil svými deseti po sobě jdoucími úspěšnými pokusy. Na pokusech při opačné polaritě a při pokusech v sepnuté poloze tak nebylo nutné tuto korekci již provádět.

Na další dvojici obrázků je možné vidět jeden z úspěšných pokusů pro obě polarity v poloze vypnuto. V tomto případě bylo napětí přivedeno na proudovodnou dráhu a na základnu odpojovač.



Obrázek 8.6 Průběh impulsního napětí při zkoušce společné hodnoty (sepnutý stav) vlevo – nože jsou kladná elektroda, vpravo – nože jsou záporná elektroda

Na závěr byla provedena série pokusů vedoucích k průrazu, ať už v odpojovací dráze v poloze vypnuto, nebo vůči základně v poloze zapnuto.



Obrázek 8.7 Průběh impulsního napětí při průrazu vlevo v odpojovací dráze (vypnutý stav) – nože jsou kladná elektroda, vpravo ve společné hodnotě (sepnutý stav) – nože jsou záporná elektroda

Průraz je z průběhu jednoznačně vidět useknutím týlu ještě před dosažením 50 % zkoušeného napětí U_{Ni} . Z výsledků napěťových zkoušek vyplývá, že navržený a sestrojený odpojovač plně vyhovuje normativním požadavkům na námi vybranou napěťovou odolnost z Tabulky 1 normy ČSN EN 50152-2 ed. 3. Byly splněny veškeré normativní požadavky na průběh a výsledky zkoušky elektrické pevnosti izolace dle

normy ČSN EN IEC 62271-102 ed. 2 a normy ČSN EN 60060-1. Dále byly nalezeny mezní hodnoty průrazu, které ověřily případnou rezervu přístroje. [7][8][9][21]

Dosažené hodnoty průrazného napětí pro krátkodobé výdržné napětí průmyslového kmitočtu U_d a jmenovité impulsní napětí U_{Ni} :

Tabulka 8.3 Dovolené a dosažené hodnoty průrazného napětí pro krátkodobé výdržné napětí průmyslového kmitočtu U_d a jmenovité impulsní napětí U_{Ni} [9]

	Požadováno normou	Dosaženo průrazu
Společná hodnota $U_{d-společná}$ - poloha zapnuto	95 kV	159 kV
V odpojovací dráze $U_{d-odpoj.dráze}$ - poloha vypnuto	110 kV	150 kV
Společná hodnota $U_{Ni-společná}$ - poloha zapnuto	±250 kV	-389 kV
V odpojovací dráze $U_{Ni-odpoj.dráze}$ - poloha vypnuto	±290 kV	+298 (-290) kV

Je nutné dodat, že dosažené hodnoty jsou velmi orientační. V případě zkoušky výdržným napětím průmyslového kmitočtu bylo průrazné hodnoty dosaženo neustále stoupajícím střídavým napětím až do průrazu, přičemž nebyla provedena minutová zkouška nejbližší nižší hodnoty napětí, při které by ještě nedošlo k průrazu. U měření průrazného impulsního napětí nebylo provedeno měření deseti po sobě jdoucích úspěšných pokusů nejbližší nižší hodnoty impulsního napětí obou polarit. Jak je z napěťových zkoušek impulsním napětím vidět, záleží také na polaritě přiloženého napětí.

8.2 Oteplovací zkouška odpojovače

Průběh oteplovací zkoušky se řídí taktéž normou ČSN EN 62271-1 ed. 2 - Vysokonapěťová spínací a řídicí zařízení - Část 1: Společná ustanovení pro spínací a řídicí zařízení střídavého proudu, a dále normou ČSN EN IEC 62271-102 ed. 2 - Vysokonapěťová spínací a řídicí zařízení - Část 102: Odpojovače a uzemňovače střídavého proudu. Samotná příslušná drážní norma ČSN EN 50152-2 ed. 3 – Pevná trakční zařízení neobsahuje výjimky či dodatky k průběhu této zkoušky pro drážní odpojovače. Před zkouškou a po zkoušce trvalým proudem je nutné provést i zkoušku stavu měření odporů kontaktů a spojů hlavního obvodu: Je požadováno, aby zvýšení odporu před a po této zkoušce nebyl větší jak 20 %.

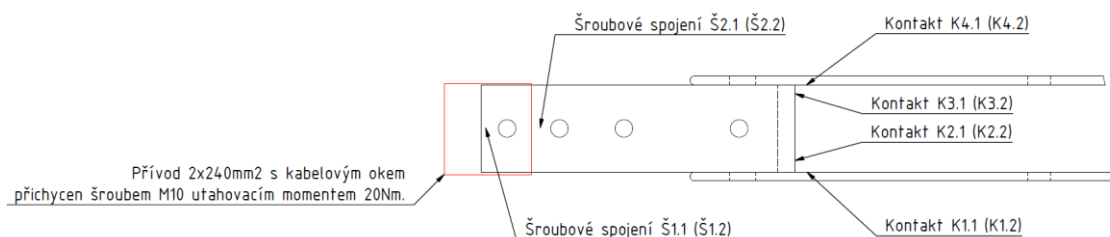
V rámci oteplovací zkoušky je důležité řádně utáhnout šroubové spojení kabelových přívodů na odpojovač. Přesný utahovací moment je velmi těžké určit vzhledem mnoha různých proměnlivých parametrů. Pro přesné určení by muselo být definováno přesně prostředí v provozu, přesná úprava ploch, závitů atd. Pro alespoň orientační výpočet

utahovacího momentu je proveden celkem složitý výpočet pomocí programu MITCalc, který slouží pro většinu strojírenských výpočtů. V Příloha A - Návrh šroubového spoje přívodu odpojovače pomocí programu MITCalc jsou obrázky všech zadaných proměnných pro konkrétní šroubové spojení. Vstupním požadavkem tohoto výpočtu byla osová, respektive přítláčná síla šroubového spoje $F_{ps} = 2,475 \text{ kN}$, která je navržena v kapitole 5.4.3 Kontaktní síla šroubového spoje. Z uvedených výsledných hodnot na konci Příloha A - v části A.5 z výpočtového řádku 8.8 vyplývá orientační utahovací moment $M_{utahovací} = 20 \text{ Nm}$. Tento moment byl nastaven pomocí ručního momentového klíče.

8.2.1 Zkouška trvalým proudem

Průběh zkoušky trvalým proudem, jinak řečeno oteplovací zkoušky, se řídí normou ČSN EN IEC 62271-102 ed. 2 a dále normou ČSN EN 62271-1 ed. 2 - Vysokonapětová spínací a řídicí zařízení - Část 1: Společná ustanovení pro spínací a řídicí zařízení střídavého proudu. Zkouška probíhá v sepnuté poloze odpojovače, kterým během celé zkoušky protéká navržený jmenovitý trvalý proud $I_r = 800 \text{ A}$. Proud navrženým odpojovačem protéká až do doby ustálení hodnot oteplení. Za ustálený stav oteplení odpojovače se považuje stav, ve kterém v době předešlých 60 minut nedošlo ke změně oteplení v měřených místech o více než 1 K. Tuto podmínku musí splnit také teplota místnosti, která po ustálení teploty odpojovače v době předešlých 60 minut nesmí změnit teplotu o více než 1 K. Místnost použitá k oteplovací zkoušce byla dílna společně s malým skladem. Objem místnosti byl cca 125 m^3 . Nevýhoda této místnosti je menší teplotní setrvačnost, tedy rychlejší reakce teploty místnosti na otevírání dveří, přítomnost a práci člověka, manipulaci s různými předměty v blízkosti měřeného přístroje apod. Se zvýšenou opatrností bylo však možné úspěšně dokončit tuto zkoušku a stanovit ustálené oteplení odpojovače. [8]

Nejprve bylo nutné umístit na odpojovač sondy v místech, ve kterých byla výpočtem zjištěna ustálená hodnota oteplení. Celkem bylo nalepeno dvanáct teplotních sond do míst dle následujícího obrázku.



Obrázek 8.8 Umístění a označení teplotních sond na proudovodné dráze odpojovače

Z názorného nákresu je zřejmé, že umístění sond bylo provedeno na obou přívodech a obou párech kontaktů zrcadlově.



Obrázek 8.9 Fotografie umístění a označení teplotních sond na vlevo šroubové spojení, vpravo u hlavního kontaktu

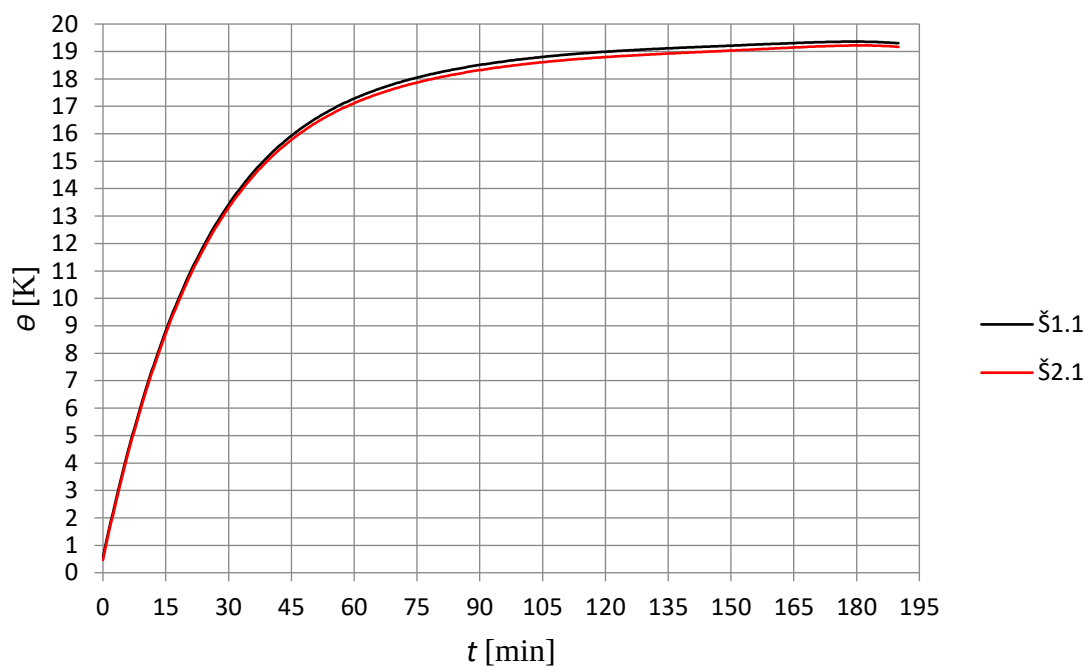
V průběhu měření musel proud splňovat normou stanovené tolerance. Pro proud platí podmínka, že v posledních dvou hodinách měření musí být v toleranci 0 % až +2 % jmenovitého trvalého proudu I_r a pro frekvenci platí tolerance -5 % až +2 %. Zdroj se skládal z autotransformátoru, který napájí proudový transformátor z veřejné sítě. Distribuční síť má povolenou odchylku střední hodnoty frekvence ± 1 %. Podmínka frekvence byla tedy splněna. Proud byl měřen přes proudový adaptér k multimetru s nastaveným převodem $1 \text{ A} = 1 \text{ mV}$. V průběhu celého měření byl proud udržován v rozmezí cca 802-807 A, což splnilo normou stanovenou toleranci. [8]



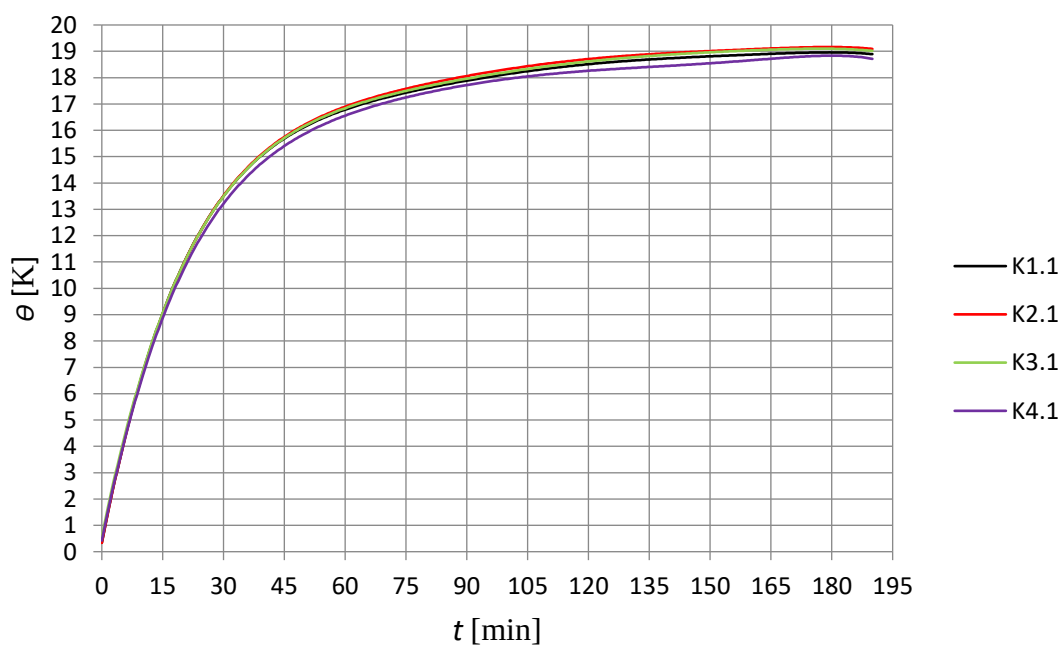
Obrázek 8.10 Fotografie kompletního pracoviště při zkoušce trvalým proudem.

V průběhu měření byly kontrolovány hodnoty oteplení a na základě tendence nárustu teplot byla stanovena doba, od které se měřila přesně jedna hodina. Během této doby musely být splněny výše zmíněné podmínky pro ustálené hodnoty oteplení, ale i teploty

v okolí odpojovače. Z následujících průběhů oteplení na šroubovém spojení a na kontaktu je vidět očekávaný průběh oteplovací zkoušky. Jako časové období pro ověření ustálení hodnot oteplení byla stanovena doba mezi 130. a 190. minutou.

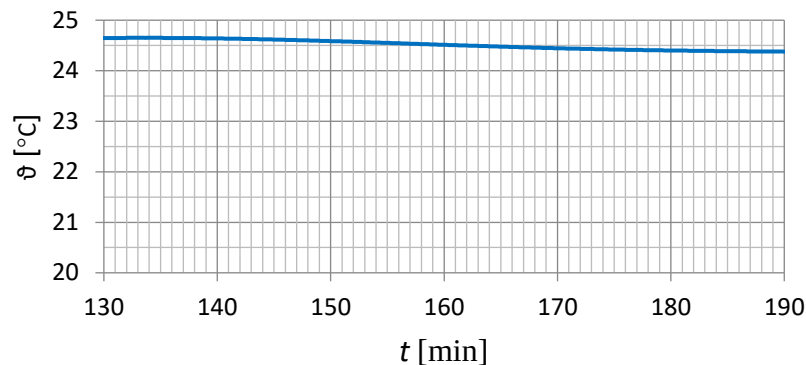


Obrázek 8.11 Průběh oteplení Θ šroubového spojení 1 odpojovače v závislosti na čase t . Při jmenovitém proudu $I_n = 800$ A



Obrázek 8.12 Průběhy oteplení Θ hlavního kontaktu 1 odpojovače v závislosti na čase t . Při jmenovitém proudu $I_n = 800$ A

V době mezi 130. a 190. minutou bylo taktéž nutné pečlivě kontrolovat průběh okolní teploty, která se nesměla změnit o více než 1 K. Teplota se snímala dvěma teplotními čidly v průměrné výšce proudovodné dráhy odpojovače, a to ve vzdálenosti cca 1 m od odpojovače. [8]



Obrázek 8.13 Průběh teploty okolí ϑ_o v blízkosti odpojovače v průměrné výšce proudovodné dráhy v závislosti na čase t v době měření ustálených hodnot oteplení

Z průběhu na Obrázku 8.13 je vidět, že průměrná teplota místnosti splnila normovaný požadavek.

Po ustálení hodnot oteplení jednotlivých částí bylo zjištěno, že největší rozdíl mezi otepleními na jednotlivých částech nedosahuje více než cca 1 K. Tato informace nám dává zpětnou vazbu o dobrém návrhu odpojovače z hlediska teplotní rovnováhy bez velkých teplotních spádů. Pro potřeby porovnání s vypočtenými hodnotami byly naměřené hodnoty oteplení v měřicích bodech vždy zprůměrovány s místy, která měla buď podobné, nebo stejné umístění na protější straně odpojovače. Například oteplení na přívodu Š1.1 bylo zprůměrováno s hodnotou oteplení na přívodu na protější straně Š1.2. apod.

Tabulka 8.4 Hodnoty naměřených oteplení části odpojovače a porovnání s povolenými a vypočtenými hodnotami oteplení pro konkrétní části odpojovače [8]

Část a materiál	Kategorie udávaná v normě	Povolené oteplení	Vypočítané oteplení	Naměřené oteplení
Přívod ve vzdálenosti 1 m – měděný	Šroubová nebo ekvivalentní spojení, šroubové přívodní svorky – měděné	60 K	$\theta_{př} = 27,19$ K	-
Přívod u šroubového spoje – měděný		60 K	$\theta_p = 30,13$ K	19,29 K
Praporec u šroubového spoje – měděný		60 K	$\theta_3 = 30,16$ K	19,44 K
Praporec u pracovního kontaktu – postříbřený	Kontakty – stříbrné	75 K	$\theta_4 = 30,61$ K	18,98 K
Nůž u pracovního kontaktu – postříbřený		75 K	$\theta_5 = 28,12$ K	18,81 K

Z výsledných hodnot je vidět průměrný rozdíl mezi vypočtenou a naměřenou hodnotou oteplení cca 11 K. Tato značná rezerva na straně bezpečnosti je způsobena několika důvody, jako například kritickou volbou bezpečnostních koeficientů, kritického výběru hodnoty emisivity materiálu, materiálovými konstanty, činiteli zastínění atd. Na fyzickém odpojovači je také větší odvod tepla díky různým čepům, držákům, šroubům apod. Samotný návrh odpojovače musí konstruktér dělat dostatečně kriticky, aby udávané parametry platily po co nejdelší dobu, nejlépe po celou předpokládanou životnost 40 let ve venkovním prostředí. Je nutné si uvědomit, že samotná zkouška trvalým proudem probíhala na kompletně novém odpojovači s ideálními hodnotami emisivity, ideálním odporem v kontaktech atd. Po pár týdnech provozu ve venkovním prostředí začne odpojovač oxidovat a svým provozním opotřebením se bude více přibližovat analytickému výpočtu. Výsledná měření tedy splňují očekávání navrženého odpojovače a získaná rezerva je kompromisem mezi životností a cenou.

8.2.2 Zkouška stavu měřením odporu kontaktů a spojů hlavního obvodu

V případě měření odporů kontaktů a spojů hlavního obvodu je podle normy nutné tuto zkoušku provést před zkouškou trvalým proudem i po ní. Rozdíl teplot odpojovače před a po zkoušce nesmí být větší než 10 K. Měří se vždy tři měření, ze kterých se vypočte střední hodnota. Na konci se provede rozdíl středních hodnot odporů před zkouškou a po zkoušce. Zvýšení odporu nesmí být vyšší než 20 %. Norma také dovoluje, že pokud není možné změřit kontakt samostatně, je možné provést měření odporu celého pólu. Pro porovnání bylo provedeno i měření mezi praporcem a blízkým místem za kontaktem. Pro přehlednost byla využita místa podobná těm, kde byly umístěny tepelné sondy. V následující tabulce jsou tedy jako měřicí místa využita místa umístění tepelných sond z kapitoly měření trvalým proudem. [8]

Tabulka 8.5 Hodnoty odporů kontaktů před a po měření trvalým proudem na vybraných dvojicích míst odpojovače v místech teplotních sond

	Měřicí místa					
	Š1.1 – Š1.2		Š1.1 – K1.1		Š1.1 – K4.1	
	$R_{před\ zk.}$ [μΩ]	$R_{po\ zk.}$ [μΩ]	$R_{před\ zk.}$ [μΩ]	$R_{po\ zk.}$ [μΩ]	$R_{před\ zk.}$ [μΩ]	$R_{po\ zk.}$ [μΩ]
Střední hodnota	41,6	42,4	12,33	13,37	18,57	19,83
Zvýšení před a po v %	1,9 %		8,4 %		6,8 %	
	Měřicí místa					
	Š1.2 – K1.2		Š1.2 – K4.2			
	$R_{před\ zk.}$ [μΩ]	$R_{po\ zk.}$ [μΩ]	$R_{před\ zk.}$ [μΩ]	$R_{po\ zk.}$ [μΩ]		
Střední hodnota	12,06	13,37	11,27	12,33		
Zvýšení před a po	10,9 %		9,4 %			

Na samotné měření odporu byla použita Kelvinova metoda. Hodnota měřicího proudu byla nastavena 10 A. Zvýšení hodnoty odporu před a po zkoušce bylo ve všech kombinacích měření do 20 %, a to s dostatečnou rezervou. V případě odpojovače s těmito třecím kontakty je takto malý odpor závislý na stáří, oxidaci, vzdušné vlhkosti a počtu cyklů vypnutí a zapnutí. Každý cyklus zapnutí a vypnutí vyvolá v třecím kontaktu odpojovače očištění kontaktů od oxidu, opalu apod. [8]

8.3 Zkouška krátkodobým a dynamickým výdržným proudem

Hlavním účelem těchto zkoušek je ověření odolnosti proti svaření hlavních kontaktů odpojovače při průchodu zkratovým proudem. Dalším hlídaným jevem je samotné chování přístroje při průchodu zkratu, respektive jeho mechanická odolnost proti dynamickým účinkům zkratového proudu. Přístroj nesmí být po zkoušce znatelně poškozen, například ohnutá proudovodná dráha či jiné části odpojovače. Ověření, zda odpojovač vyhověl zkoušce, spočívá v měření síly potřebné k vypnutí před zkouškou a po zkoušce a také zkouška stavu měřením odporu kontaktů a spojů hlavního obvodu. Před a po zkouškách krátkodobým a dynamickým výdržným proudem nesmí být rozdíl odporu proudovodné dráhy odpojovače větší než 20 %. Zkoušky byly rozděleny na dvě části. Nejprve se uskutečnilo měření krátkodobým výdržným proudem a poté dynamickým výdržným proudem. [8], [10]

8.3.1 Zkouška krátkodobým výdržným proudem

V rámci této zkoušky byly stanoveny tyto zkušební parametry: efektivní ustálená hodnota zkratového proudu $I_k'' = 32 \text{ kA}$ a doba zkratu $t_k = 1 \text{ s}$. Pro vykonání této zkoušky byl zvolen způsob výpočtu náhradní doby zkratu $t_{k\text{-náhradní}}$, pro případ volby menší efektivní ustálené hodnoty zkratového proudu $I_{k\text{-náhradní}}''$ během zkoušek. Jednoduše řečeno, je-li hodnota I_k'' během zkoušky menší, musí se stanovit delší doba zkratu tak, aby hodnoty Jouleových integrálů byly stejné. Při této zkoušce byla efektivní ustálená hodnota zkratového proudu $I_{k\text{-náhradní}}'' = 18,74 \text{ kA}$.

Podmínka použití náhradní doby zkratu

$$I_{k\text{-náhradní}}''^2 t_{k\text{-náhradní}} = I_k''^2 t_k, \quad (8.2)$$

Výpočet náhradní doby zkratu

$$t_{k\text{-náhradní}} = \frac{I_k''^2 t_k}{I_{k\text{-náhradní}}''^2} = \frac{32000^2 \cdot 1}{18740^2} = 2,91 \text{ s}, \quad (8.3)$$

Po stanovení této doby bylo rozhodnuto na zaokrouhlení této doby na dobu 3 s.

Delší doba, tak zvýšila zkušební hodnotu $I''_{k-zkušební}$ pro jmenovitou dobu zkratu $t_k = 1$ s a to následovně

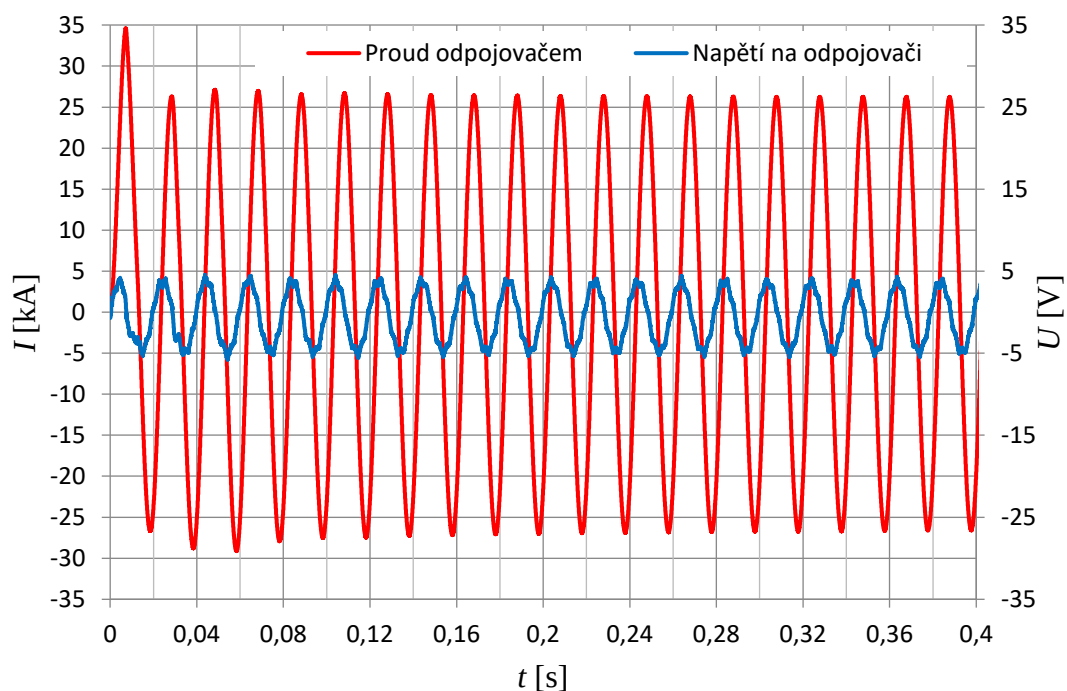
$$I''_{k-zkušební} = \sqrt{\frac{t_{k-náhradní} I''_{k-náhradní}^2}{t_k}} = \sqrt{\frac{3 \cdot 18740^2}{1}} = 32,46 \text{ kA}, \quad (8.4)$$

Pro úspěšné otestování zadaného parametru I''_k odpojovače musí platit, že

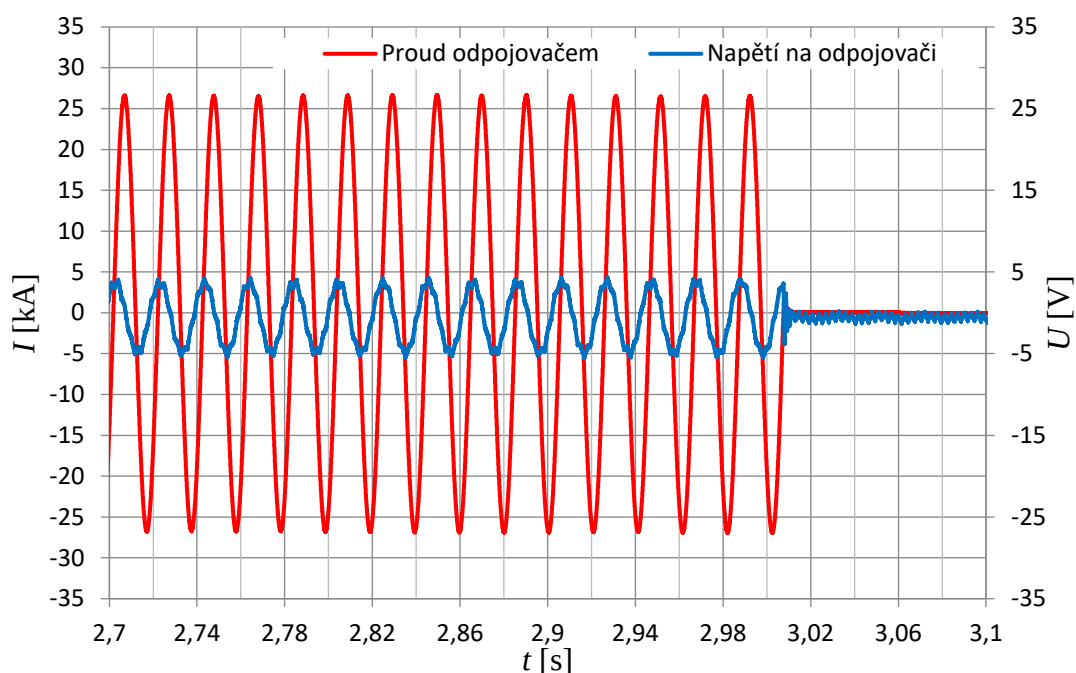
$$I''_{k-zkušební} \geq I''_k, \quad (8.5)$$

$$32,46 \text{ kA} \geq 32 \text{ kA}$$

Jedná se tedy o mírně vyšší hodnotu, než je zadaná efektivní ustálená hodnota zkratového proudu I''_k , což je na straně bezpečnosti zařízení. Zároveň je to i malá rezerva pro konstruktéra. Následují průběhy proudu odpojovačem a napětí mezi přívody na odpojovači během samotné zkoušky. Vzhledem k délce testu jsou zobrazeny dva časové úseky – začátek zkoušky a konec zkoušky. Na samotném začátku je možné si všimnout, že vrcholová hodnota první půlperrody dosahuje 34,6 kA. Po zhruba 10 periodách dojde k ustálení průběhu a vrcholové hodnoty poté dosahují v průměru velikosti 26,3 kA.



Obrázek 8.14 Průběh proudu odpojovačem a napětí na odpojovači v době prvních 0,4 s při zkoušce krátkodobým výdržným proudem s náhradní dobou zkratu $t_{k-náhradní} = 3$ s



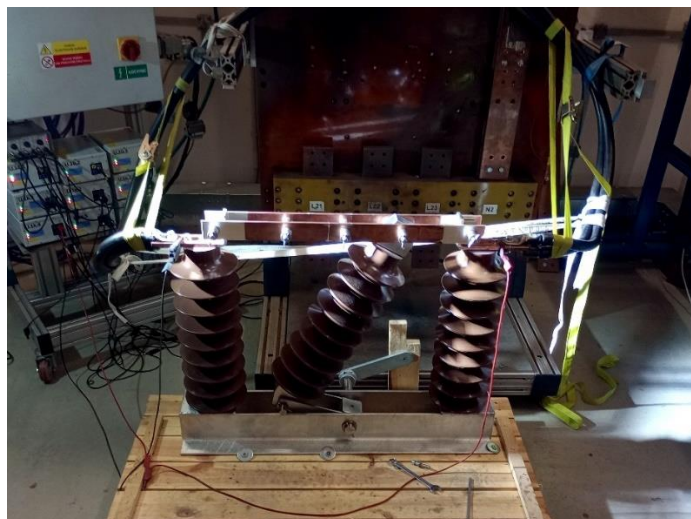
Obrázek 8.15 Průběh proudu odpojovačem a napětí na odpojovači v době konce zkoušky krátkodobým výdržným proudem s náhradní dobou zkratu $t_{k-náhradní} = 3 \text{ s}$

Z uvedených průběhů napětí a proudu je vidět, že odpojovač během zkoušky nejevil známky svaření kontaktů. Vzhledem k tomu, že testy na odpojovači měly proběhnout tak, aby bylo možné tento odpojovač případně využívat, nehledala se konečná hodnota. Povaha zkratových zkoušek je taková, že po nalezení hranice mezi úspěšnou a neúspěšnou zkouškou vede většinou k poškození přístroje. Samotný program vyhodnocující měření na zkoušek vyhodnotil ekvivalentní hodnotu efektivního zkratového výdržného proudu $I''_{k-zkušební} = 32,4 \text{ kA}$ pro dobu zkratu $t_k = 1 \text{ s}$, takže byla potvrzena očekávaná rezerva během zkoušky.

8.3.2 Zkouška dynamickým výdržným proudem

Tato zkouška má ověřit účinek dynamického výdržného proudu na odpojovač zejména z pohledu svaření kontaktů a mechanické odolnosti celé stavby. Mimo jiné je nutné ověřit případné zvýšení odporu kontaktů, potažmo celé proudovodné dráhy odpojovače.

Navrhovaná vrcholová hodnota dynamického zkratového proudu je $I_{p\max} = 80 \text{ kA}$. Norma ČSN EN 62271-1 ed. 2, která definuje průběh této zkoušky, uvádí, že pokud dojde k oddělení zkoušky krátkodobým a dynamickým výdržným proudem, musí mít samostatná zkouška dynamickým výdržným proudem dobu zkratu alespoň $t_k = 300 \text{ ms}$. Na následující fotografii je možné zhlédnout podobu připojení a zajištění zkoušeného odpojovače k transformátoru.



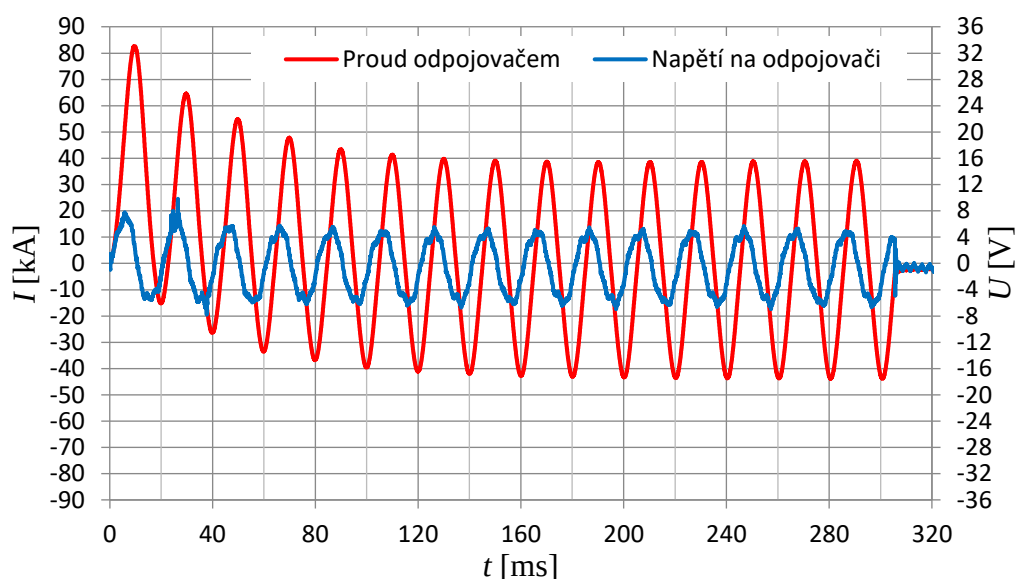
Obrázek 8.16 Fotografie připojení a zajištění měřeného odpojovače během zkoušky dynamickým výdržným proudem

Na fotografii je možné pozorovat pečlivé zajištění kabelových přívodu k odpojovači. Celý zkoušený obvod připojený k transformátoru, tedy odpojovač včetně přívodních kabelů, totiž tvoří U-smyčku se kterou se muselo během zkoušky počítat. Ze záznamu z rychlokamery byl vidět značný vliv elektrodynamických sil způsobených právě touto U-smyčkou. Na následujících snímcích lze vidět, že výsledné elektrodynamické síly byly značné.



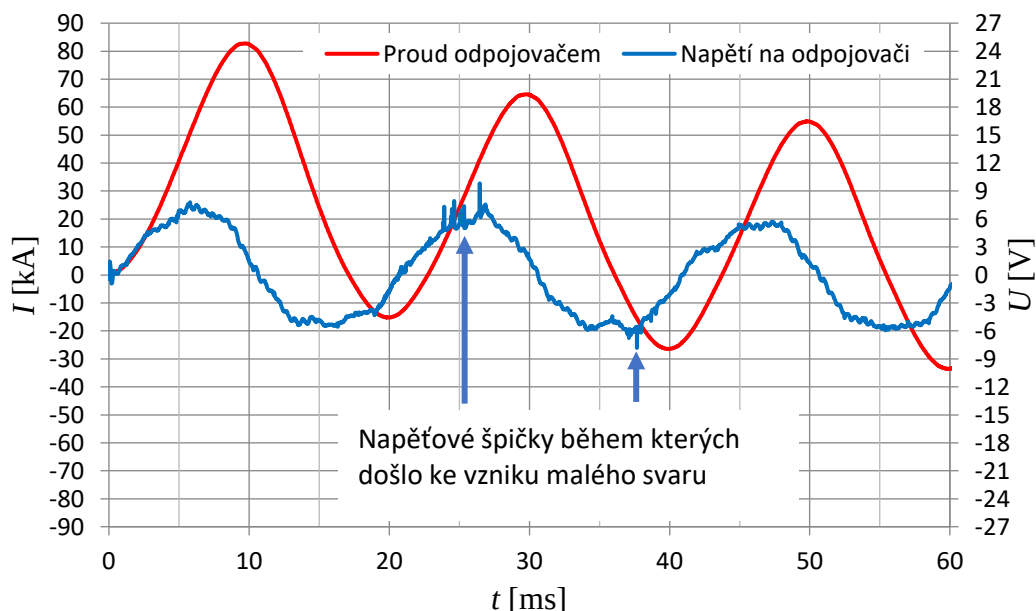
Obrázek 8.17 Snímky pořízené rychlokamerou - vlevo před působením elektrodynamických sil, vpravo účinek elektrodynamických sil způsobených U-smyčkou celého zkušného obvodu

Zkouška probíhala několika pokusy, při kterých se postupně zvyšovala hodnota $I_{p\ max}$. První pokus byl pro 10 % $I_{p\ max}$, následně 50 %, poté 80 % a nakonec celá požadovaná hodnota $I_{p\ max}$. V následujícím průběhu je možné vidět naměřené hodnoty během posledního pokusu. Na začátku zkratu dosahuje vrcholová hodnota první půlperiody 82,74 kA. Po zhruba 10 periodách dojde k ustálení průběhu a vrcholové hodnoty poté dosahují v průměrné velikosti 38,5 kA.



Obrázek 8.18 Průběh proudu odpojovačem a napětí na odpojovači v při samostatné zkoušce dynamickým výdržným proudem s dobou zkratu $t_k = 300$ ms

Z naměřených hodnot je vidět, že zkouška ověřila navrhovanou vrcholovou hodnotu dynamického výdržného proudu $I_{p\max} = 80$ kA, přesněji vrcholová hodnota během zkoušky dosáhla $I_{p\max-zkouška} = 82,74$ kA. Tato rezerva na straně bezpečnosti opět slouží konstruktérovi k potvrzení vhodně navrženého přístroje. Nicméně během této zkoušky došlo k malému svaření na jedné straně odpojovače. Toto svaření je patrné i z následujícího detailu průběhu napětí a proudu během zkoušky dynamickým výdržným proudem.



Obrázek 8.19 Detail začátku průběhu proudu odpojovačem a napětí na odpojovači v při samostatné zkoušce dynamickým výdržným proudem s dobou zkratu $t_k = 300$ ms

Příčin vzniku svaru může být hned několik, avšak podstatnou roli hraje i výše zmiňovaná U-smyčka, kterou tvoří samotný zkušební obvod. Jak lze vidět na obrázku 8.17, došlo v prvních několika desítkách milisekund ke značnému průhybu nožů do stran. Během tohoto pohybu došlo ke tření v kontaktech, což přispělo k malým lokálním zvýšením odporu v kontaktu, a tím výraznému zvýšení teploty. Do průběhu napětí se změny odporu projevila malými napěťovými špičkami. Jedná se právě o doprovodný jev ke vzniku svaru.

Další příčinou mohl být malý kontaktní přitlak či nedostatečně rovný a hladký kontakt. Nutno však podotknout, že norma ČSN EN IEC 62271-102 ed. 2 počítá s těmito následky a umožňuje použití výrazně vyšší síly k „utržení“ svaru. Velikostí síly použité k vypnutí odpojovače se zabývá kapitola 8.3.4, kde jsou rozebrány podmínky pro vyhovění stavu odpojovače po zkoušce s ohledem na vynaloženou sílu k obsluze. Navržený odpojovač vyhověl všem normativním podmínkám, a to i s naměřenou vrcholovou hodnotou dynamického zkratového proudu větší, než na který byl proveden návrh odpojovače.

8.3.3 Zkouška stavu měřením odporu kontaktů a spojů hlavního obvodu

Tak jako u měření trvalým proudem i zde bylo potřeba zkontrolovat odpor kontaktů odpojovače před i po zkoušce a platí i zde stejné podmínky. Tedy rozdíl teplot odpojovače před a po zkoušce při měření odporu nesměl být větší než 10 K. Provedla se vždy tři měření, ze kterých byla vypočtena střední hodnota. Na konci zkratových zkoušek byl vyhodnocen rozdíl středních hodnot odporů před zkouškou a po zkoušce. Zvýšení odporu nesmělo být vyšší než 20 %. Norma umožňuje, že pokud není možné změřit kontakt samostatně, je možné provést měření odporu celého pólu, čehož bylo využito. Pro identifikaci míst přiložení měřících sond je možné využít obrázek 8.8 . [8]

Tabulka 8.6 Hodnoty odporů před a po měření krátkodobým a dynamickým výdržným proudem mezi začátkem a koncem pólu odpojovače

	Měřicí místa Š1.1 – Š1.2	
	$R_{před\ zk.}$	$R_{po\ zk.}$
Střední hodnota	42,5 $\mu\Omega$	47,2 $\mu\Omega$
Zvýšení před a po v %	11,1 %	

Měření proběhlo stejným přístrojem a způsobem, jako bylo popsáno v kapitole 8.2.2. Z výsledků v předchozí tabulce je možné usuzovat, že odpojovač vyhověl normativní podmínce stavu po zkoušce, a to s rezervou cca 9 %. Je možné předpokládat, že by po několika zapnutí a vypnutí odpojovače došlo ke snížení odporu v kontaktech, a tím i ke snížení rozdílu odporu před a po zkoušce. Během několika zapnutí a vypnutí by totiž došlo k odstranění malého opalu po svaru.

8.3.4 Zkouška síly potřebné k vypnutí odpojovače

Normativní doporučení v této oblasti je dle ČSN EN IEC 62271-102 ed. 2 odstavec 6.105.3 - Ruční ovládání vyžadující méně než jednu otáčku až jednu otáčku. V tomto odstavci je uvedeno že: *Síla potřebná pro ovládání odpojovače nebo uzemňovače vyžadující méně než jednu otáčku až jednu otáčku včetně (např. otočná páka) by neměla být větší než 250 N. Je povolena maximální hodnota 450 N během otočení odpovídajícímu nejvýše 15°. Z toho vyplývá, že norma pamatuje na toleranci pro překonání malých svarů způsobených účinky zkratových proudů nebo může tolerance posloužit na překonání námrazy. Jinak řečeno, norma umožňuje takzvané „utržení“ maximální ovládací silou $F_{obsluha\ max} = 450\ N$, avšak jen do pootočení o 15°. Ovládací síla nad tento úhel má být do 250 N.*

Měření proběhlo tahovou vahou, která byla připojena na nejvzdálenější distanční váleček mezi noži od osy otáčení nožů odpojovače. Byla tedy měřena hmotnost $m_{vypnutí}$ potřebná k vypnutí odpojovače. Pro eliminaci chyby měření proběhla vždy tři měření, ze kterých se vždy spočítala střední hodnota. Následně byla vypočítána síla potřebná k vypnutí před zkouškou $F_{vypnutí\ před}$ a obdobně i pro sílu po zkoušce $F_{vypnutí\ po}$ a sílu k překonání svaru $F_{vypnutí\ svar}$ (pro „utržení“ svaru bylo možné vykonat jen jedno měření) [7], [8]

$$F_{vypnutí\ před} = m_{vypnutí\ před} g, \quad (8.6)$$

Tabulka 8.7 Hodnoty síly pro vypnutí odpojovače před a po měření krátkodobým a dynamickým výdržným proudem na posledním distančním válečku mezi noži

	před zkouškou	pro překonání svaru	po zkoušce
	$F_{vypnutí\ před}$	$F_{vypnutí\ svar}$	$F_{vypnutí\ po}$
Střední hodnota síly	79,5 N	137,3 N	81,4 N
Zvýšení před a po v %	1,1 %		

Z naměřené síly $F_{vypnutí\ po}$ po zkoušce můžeme pomocí výpočtů uvedených v kapitole 6.4 provést přepočet na teoretickou sílu potřebnou k ovládání po zkoušce $F_{obsluha\ zkouška\ po}$. Následující postup je zkrácen a více je uvedeno v kapitole 6.4.

Moment v místě 3. distančního válečku M_{dv3} vztažený k ose otáčení nožů (k bodu 3 viz obrázek 6.1)

Pro osu v místě posledního distančního válečku nožů vzdálenou $r_{dv3} = 620\ mm$ od osy otáčení nožů platí

$$M_{dv3} = F_{vypnutí\ po} r_{dv3} = 81,4 \cdot 0,62 = 50,47\ N\ m, \quad (8.7)$$

Síla v ose držáku nože F_2 zkouška po (v bodě 2 viz obrázek 6.1)

$$F_2\ zkouška\ po = \frac{M_{dv3}}{r_2} = \frac{50,47}{0,17} = 296,9\ N, \quad (8.8)$$

Moment na hřídeli $M_{TŘ \text{ zkouška po}}$ (bod 3 viz obrázek 6.1)

$$M_{TŘ \text{ zkouška po}} = F_{2 \text{ zkouška po}} r_p = 296,9 \cdot 0,195 = 57,9 \text{ N m}, \quad (8.9)$$

Moment pohonu $M_P \text{ zkouška po}$ (viz kapitola 6.4)

$$M_P \text{ zkouška po} = M_{TI} + M_{TŘ \text{ zkouška po}} = 52,8 + 57,9 = 110,7 \text{ N m}, \quad (8.10)$$

Jak již v kapitole 6.4 bylo řečeno, konečná podoba pákového systému záleží na konkrétním umístění na sloupu. Je však pravděpodobné, že samotná páka obsluhy bude mít minimální délku. $L_{\text{páka-obsluha}} = 0,6 \text{ m}$. Velmi zjednodušený výpočet potřebné síly při zanedbání dalších dílů pákového systému

$$F_{\text{obsluha zkouška po}} = \frac{M_P \text{ zkouška po}}{L_{\text{páka-obsluha}}} = \frac{110,7}{0,6} = 184,5 \text{ N}, \quad (8.11)$$

V přepočtu na kilogramy vynaložené pro ovládání

$$m_{\text{ovládání po}} = \frac{F_{\text{obsluha zkouška po}}}{g} = \frac{184,5}{9,81} = 18,81 \text{ kg}, \quad (8.12)$$

Tento výpočet vynaložené hmotnosti potřebné na vypnutí odpojovače z naměřené síly na nejvzdálenějším distančním válečku nožů odpojovače je orientační. Celková síla bude v průběhu životnosti výrazně ovlivněna dalšími vlivy, jako je pravidelná údržba, venkovní teplota, vlhkost, četnost používání atd. Obdobným způsobem se provedl i výpočet síly obsluhy před zkouškou $F_{\text{obsluha zkouška před}}$ a síly obsluhy pro překonání svaru $F_{\text{obsluha zkouška svar}}$.

V následující tabulce je možné provést porovnání hodnot sil obsluhy pro ovládání odpojovače nejprve vypočtenou v návrhem a následně naměřenou pomocí přepočtu síly na krajním distančním válečku nožů.

Tabulka 8.8 Hodnoty síly pro vypnutí odpojovače při návrhu a poté změřené přepočtem po sestrojení a normativní hodnoty těchto sil [7]

	Návrh (kapitola 6.)	Naměřená a přepočtená hodnota síly k ovládání		
		před zkouškami	pro překonání malého svaru (do 15° potočení)	po zkratových zkouškách a po překonání svaru
	F_{obsluha}	$F_{\text{obsluha zkouška před}}$	$F_{\text{obsluha zkouška svar}}$	$F_{\text{obsluha zkouška po}}$
Síla pro ovládání odpojovače	216,73 N	183,3 N	250,8 N	184,5 N
Max. síla udávaná v normě	250 N	250 N	450 N	250 N

Je tedy možné zhodnotit, že stav odpojovače po zkouškách splňuje normativní doporučení a svar vzniklý při zkoušce dynamickým výdržným proudem stačilo odstranit silou o cca 200 N menší, než je povoleno. Návrh vykazuje rezervu cca 34 N oproti normě a měření na hotovém odpojovači ukázalo rezervu cca 66 N oproti doporučení normy, což nám také přináší důkaz, že výpočet v kapitole 6.4 byl velice blízko realitě naměřené na zhotoveném odpojovači. Vzniklá rezerva je opět na straně bezpečnosti a je způsobena několika faktory, jako neznalost přesného koeficientu tření v kontaktech, ložiskách atd. Je však na svědomí konstruktéra, aby do výpočtů zanesl kritičtější varianty daného problému. Z povahy prostředí, do kterého je přístroj určen, je jasné, že v provozu bude síla pro ovládání blíže k vyšší hodnotě, která je vypočtena v návrhu mechanismu odpojovače v kapitole 6.4. [7], [8]

9. STAVBA A ZHODNOCENÍ ODPOJOVAČE

9.1 Finanční zhodnocení odpojovače

V rámci samotné realizace byl odpojovač pracovní rozdělen na několik částí – samotná základna odpojovače, proudovodná dráha, části související s pohybem a nakonec samotný spojovací materiál. Při volbě materiálu bylo důležité zohlednit tyto požadavky:

- Mechanická a elektrická životnost nejlépe 40 let, a to ve venkovním prostředí,
- Dostatečná mechanická pevnost při působení elektrodynamických sil v průběhu zkratu,
- Teplotní odolnost a stálost tvaru v rozsahu teplot $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Takto dlouhá životnost vyžaduje pečlivý výběr materiálů a případně i jejich povrchovou úpravu. Dále je velmi důležité brát v úvahu rizika vzniku galvanické koroze při působení dvou materiálů za působení elektrolytu ve formě vzdušné vlhkosti nebo deště. Při galvanické korozi platí, že méně ušlechtilý kov tvoří anodu a ušlechtilejší kov katodu. Dále je potřeba zohlednit, jestli anoda tvoří větší část styčné plochy nebo naopak. Velmi zjednodušeně, ve styku dvou stejně velkých ploch hrozí koroze vždy u méně ušlechtilého kovu. Je-li styk dvou kovů malý, např. plech – šroub, je vždy vhodné, aby menší část tvořila katodu, tedy aby byla z více ušlechtilého materiálu. Tato problematika je velmi důležitá ať už při návrhu samotného přístroje, tak při návrhu vhodného krytu přístroje. V případě mědi je tedy nutné použít materiály s vyšší ušlechtilostí, aby nedocházelo ke korozi důležité proudovodné dráhy. Mezi nejpoužívanější ušlechtilé materiály pro kombinaci s mědí patří například nerez nebo stříbro.

Základna a nosné části samotné konstrukce odpojovače tvoří běžná konstrukční uhlíkatá ocel s označením S235JRG2 (ekvivalent oceli dle značení ČSN – 11 375). Tento materiál byl vybrán nejen díky vyhovujícím vlastnostem co do mechanické a teplotní odolnosti, ale hlavně díky ceně a jeho velmi dobré dostupnosti na trhu s hutním materiálem. Tento materiál však sám o sobě nemá dostatečnou odolnost proti korozi, a tak je potřeba řešit vhodnou povrchovou úpravu.

Následuje příklad cen povrchové úpravy samotné základny odpojovače. Orientační ceny počítají s plochou cca $0,74\text{ m}^2$ a hmotností cca 20 kg. Životnost platí pro korozivní prostředí třídy C4 dle ČSN EN ISO 12944 Nátěrové hmoty - Protikorozní ochrana ocelových konstrukcí ochrannými nátěrovými systémy - Část 2: Klasifikace vnějšího prostředí a je udávána výrobcem či firmou aplikující povrchovou úpravu. [14]

Tabulka 9.1 Porovnání průměrné životnosti různých povrchových úprav u vybraných firem a ceny při aplikaci na základnu odpojovače (březen 2022) [14], [16], [17]

Typ povrchové úpravy	Standardní tloušťka vrstvy (jedna vrstva v případě nátěru či lakování)	Životnost při korozivní třídě C4 (rozlišení dle ČSN EN ISO 12944)	Náklady na povrchovou úpravu včetně přípravných prací, sušení atd. bez DPH
Nátěr základní antikorozní barvou + vrchní barva. (Syntetika) firma CHEMOLAK	100–140 um	5–7 let	90,9 Kč
Práškový lak (Komaxit)	120–190 um	15–25 let	223,1 Kč
Galvanické pozinkování	9–15 um	5–7 let	198,3 Kč
Žárové pozinkování	90–140 um	25–50 let	513,5 Kč

9.1.1 Finanční zhodnocení základny odpojovače

Při projektování samotné základny odpojovače a výběru materiálu byly brány v úvahu tyto podmínky:

- Dostatečná hmotnost pro vytvoření nízkého těžiště celého odpojovače,
- Dostatečná pevnost a tuhost konstrukce při horších povětrnostních podmínkách,
- Výběr jen z normovaných hutních profilů a pásovin,
- Jednoduchá realizace bez složitých kovoobráběčských a svařovacích postupů.

Základna je tvořena dvěma nerovnoramennými L-profilů 100 × 65 mm s tloušťkou 8 mm, které jsou spojeny pomocí pásovin o šířce 100 mm a tloušťce 5 mm. Tyto pásoviny jsou pouze v místech potřebných pro ukotvení krajních podpěrných izolátorů pro praporce a na samotných čelech základny pro potřebnou tuhost základny. Tato konstrukce byla svařena metodou MAG (Metal Active Gas) s CO₂, přesněji způsobem pull (tažením), který je pro začátečníky jednodušší. Po svaření byly do základny vyvrtány otvory dle výkresové dokumentace. Vzhledem k požadované životnosti 40 let byla jako povrchová úprava použita metoda žárového zinku. Otvory pro osazení ložiska hlavní osy byly vyhrubovány a vystruženy do požadovaného rozměru a přesnosti H7 dle soustavy jednotné díry. Jako ložiska hlavní osy byla vybrána přírubová kluzná ložiska ze slinutého bronzu od firmy SKF – PSMF 304020 A51, a to vzhledem k samomazné schopnosti, odolnosti a bezúdržbovosti.

Tabulka 9.2 Rozpočtový list pro základnu odpojovače, včetně práce při teoretické sazbě 280 Kč/hod bez DPH (březen 2022)

Položka	množství	Cena za jednotkové množství bez DPH	Celková cena bez DPH
Válcovaný L-profil – 100 × 65 × 8 mm 9,94 kg/m	1760 mm 17,5 kg	26,6 Kč/kg	465,5 Kč
Řez účtovaný obchodníkem	1 kus	29 Kč/řez	29 Kč
Ocel pásová – 100 × 5 mm 3,93 kg/m	490 mm 1,93 kg	25,4 Kč/kg	49 Kč
Řez účtovaný obchodníkem	1 kus	9 Kč/řez	9 Kč
Žárové zinkování	19,43 kg	26,4 Kč/kg	513,5 Kč
Bronzová ložiska hlavní hřídele	2 kusy	138 Kč/kus	276 Kč
Práce svařování a veškeré kovoobrábění (vrtání, řezání, broušení, frézování atd.)	12 hodin	280 Kč/hodina	3 360 Kč
Celkové náklady na základnu odpojovače	-	-	4 702 Kč

V případě běžně dostupných odpojovačů na trhu se nejčastěji základna skládá z profilů, jež vznikly na ohraňovacím lisu, a to ohnutím předem laserem oříznutého plechu s předem již vyříznutými otvory a tvary. Tento způsob však vyžaduje velice finančně náročné strojní vybavení, jako je CNC laser nebo vodní paprsek a dále CNC ohraňovací lisy apod. Výhodou je však práce s minimální potřebou dodatečného řezání, broušení a vrtání.

9.1.2 Finanční zhodnocení proudovodné dráhy

Při návrhu proudovodné dráhy musel být nejprve proveden průzkum trhu na poli měděných pásovin. Průzkum byl mířen jak na kvalitu, tak na cenu za samotný materiál, řez a za případnou dopravu. Kvalita mědi, respektive její typ, byl ve vše vybraných firmách totožná. Vždy se jednalo o měď s normovým označením EN: Cu-ETP/CW004A. Norma ČSN EN 13601. Měď a slitiny mědi - Tyče a dráty z mědi pro všeobecné použití v elektrotechnice definuje parametry této mědi, s kterými bylo dále při návrhu počítáno. Pro nože odpojovače byla pořízena pásovina s průřezem o rozměrech 5 × 50 mm. Pro samotné praporce byla použita pásovina s průřezem 10 × 50 mm.[22]

Nože byly dle výkresové dokumentace nejprve zkráceny na požadovanou délku na pásové pile. Poté pomocí hrubovací frézy bylo provedeno zešíkmení jedné hrany nože. Dalším krokem bylo vytvoření rádiusu na všech vnějších hranách nože, a to pomocí rádiusové frézy s poloměrem 2 mm. Toto zaoblení je důležité nejen pro hladký náběh nože na praporec, ale i pro eliminaci ostrých hran, jež mohou iniciovat místo vzniku výboje. Jako poslední krok při výrobě nožů bylo provedeno vyvrtání otvorů pro čepy vytvářející pomocí tlačných pružin přítlak na kontakty a stabilizující oba nože v rovnoběžné poloze.

Praporce byly při výrobě nejprve zkráceny s přídavkem 5 cm, a to jak pro samotný ohyb, tak i pro rezervu při práci na ohraňovacím lisu. Zkrácené pásoviny byly na delších stranách zaobleny rádiusovou frézou s poloměrem 2 mm. Následovalo samotné ohnutí praporce do pravého úhlu na ohraňovacím lisu. Poté byly praporce kotoučovou frézou upraveny na požadovaný rozměr a tvar. Všechny zbylé hrany byly taktéž zaobleny na poloměr 2 mm. Nakonec byly do praporců vyvrtány otvory pro uchycení do samotných izolátorů a pro uchycení svorek přívodů.

Při jakémkoli obrábění mědi je potřeba důsledně dodržovat vhodné otáčky a dbát na mazání řezným olejem nebo jiným vhodným prostředkem. Při nedodržení těchto postupů opotřebení hrozí tvorbou nárůstku a ulpívání materiálu na břit vrtáku či frézy. To vede k tvorbě otřepů nebo problémům s kvalitou obrobené plochy. Z hlediska ochrany obrobené plochy před jejím poškrábáním je tedy důležité dobré utváření a odvod třísky. Například při vrtání otvorů byl využit k mazání petrolej a otáčky byly voleny v rozmezí 2000–2500 ot min⁻¹ na stolní či sloupové vrtače.

Zhotovené měděné dílce byly dle návrhu proudovodné dráhy odpojovače lokálně postříbřeny pouze v místech hlavních kontaktů. Postříbření bylo provedeno technickým stříbrem s výslednou tloušťkou vrstvy v rozmezí 10–15 μm. Na postříbřených místech byla provedena ochrana před oxidací stříbra pasivací Evabrite, jež se používá na díly pro elektroprůmysl. Lokální postříbření dílců při nákladech na postříbření a pasivaci cca 0,64 Kč/cm² umožnilo úsporu téměř 900 Kč. Cena za práci spojenou s postříbřením by byla totožná vzhledem k jednodušší přípravě (nemusí se hlídat lokálnost postříbření).

Tabulka 9.3 Rozpočtový list pro části proudovodné dráhy odpojovače, včetně práce při teoretické sazbě 280 Kč/hod bez DPH (březen 2022)

Položka	množství	Cena za jednotkové množství bez DPH	Celková cena bez DPH
Tyč plochá měděná 5 × 50 mm 2,23 kg/m	1380 mm 3,08 kg	252,1 Kč/kg	776,5 Kč
Tyč plochá měděná 10 × 50 mm 4,45 kg/m	620 mm 2,76 kg	252,1 Kč/kg	695,8 Kč
Řez účtovaný obchodníkem	2 ks	33 Kč/řez	66 Kč
Lokální postříbření tloušťky min. 10 μm a pasivace Evabrite	676 cm ²	0,64 Kč/cm ²	432,6 Kč
Práce na postříbření a pasivaci dílů.	2 hodiny	280 Kč	560 Kč
Kovoobráběčské práce (řezání, vrtání, frézování, ohýbání apod.)	8 hodin	280 Kč/hod	2 240 Kč
Celkové náklady na části proudovodné dráhy (praporce a nože)	-	-	4 770,9 Kč

V běžně vyráběných odpojovačích je v případě proudovodné dráhy používána z důvodu pevnosti měď s vyšší pevností, která je na zakázku dané firmy vyrobená ve velkém množství. Případně je měď dodávána v profilovaném tvaru tak, aby byla mechanicky odolnější než obyčejný obdélníkový průřez tyče. Je však problematické sehnat ať už měď s vyšší pevností, či měď ve vhodném profilovaném tvaru v běžném obchodě s hutním materiálem. Jedná se vždy o zakázku pro konkrétní firmu, jež odebere dostatečně velké množství. Příkladem je osvědčená slitina BeCu neboli beryliová měď. Jedná se o měď s příměsí 0,2–2,75 % berylia. Tato měď se vyznačuje vyšší pevností, tepelnou a elektrickou vodivostí, mechanickou odolností a vyšší odolností proti opalu obloukem. Tento materiál je však dodáván pouze na zakázku. Jeho výhodou je možnost spolehlivého odlévání, a je tedy často používán na odlévání tvarově složitějších kontaktů, u nichž by byla jinak velká pracnost obrábění. Jako finančně zajímavé řešení se nabízí využití beryliové mědi pro přesné odlití praporců a nožů, což by znamenalo úsporu práce a výsledné díly by měly lepší fyzikální vlastnosti než standardní používaná měď.

U každého odpojovače je však potřeba zhodnotit, zda se ekonomicky vyplatí raději použít běžně dostupnou měď, nebo zda si odpojovač s danými parametry zaslouží použít lepší typ mědi a zda je svou finanční hodnotou na trhu schopen dostatečně pokrýt finanční náklady.

9.1.3 Finanční zhodnocení nosných a ovládacích prvků odpojovače

U odpojovače bylo potřeba vyřešit i výběr vhodného materiálu pro nosné a ovládací prvky jak z pohledu pevnosti, tak i z pohledu vhodného materiálu či povrchové úpravy. Mezi nosné a ovládací prvky patří: držák nožů na ovládacím izolátoru, držák ovládací páky na ovládacím izolátoru, držák nožů na praporci, hlavní páka a ovládací páka. Pro tyto díly byl opět zvolen materiál s označením S235JRG2 (ekvivalent třídy oceli dle značení ČSN – 11 375) spolu s žárovým pozinkováním. Rozměry byly vždy voleny tak, aby se s minimálními úpravami mohly použít běžně dostupné materiály na trhu. Síla materiálu, ať už v případě plochých tyčí nebo jáklů, byla volena na základě zkušeností z jiných projektů. Bylo mimo jiné potřeba počítat s pohodlným svařováním, pohodlnou obrobiteľností, dostatečnou odolností vůči ohybu a krutu. Veškeré díly byly pomocí pásové pily na kov nejprve zkráceny na požadovanou již konečnou délku obrobku. U některých dílců vyžadující přesnost byl zanechán přídavek cca 1 mm, který byl při frézování využit pro vytvoření rovného a hladkého povrchu. V případě pásovin byly rohy zakulaceny pomocí rádiusové frézy. Svařování ovládací páky probíhalo opět metodou MAG s plynem CO₂. U všech držáků bylo konečného tvaru docíleno pomocí kotoučové frézy. Většina otvorů byla vyvrtána buď na stolní vrtačce s posuvným stolem, nebo na frézce, a to z důvodu požadované přesné souososti.

Mezi ovládací prvky odpojovače jsou dále zařazeny veškeré čepy a osy. Zde bylo nutné přihlídnout ke kontaktu čepů s mědí, což má ve venkovních podmínkách za následek vznik galvanického článku a tím degradaci méně ušlechtilého dílu.

Aspekty rozhodující o výběru materiálu pro osy a čepy:

- Životnost bez povrchové úpravy
- Pevnost materiálu a jakost povrchu bez nutnosti obrábění
- Materiál nevykazující vznik galvanického článku při venkovních podmínkách.

Jako nejvhodnější řešení se stala nerezová ocel přesněji automatová ocel 1.4305 loupaná, která splňuje všechny předešlé podmínky a vykazuje přesnost rozměru v toleranci h9 v již zakoupeném neopracovaném stavu. Použití této oceli usnadnilo celkovou práci a již nevyžaduje žádné povrchové úpravy ani přesné obrábění. Všechny osy byly nařezány na přesné délkové rozměry na pásové pile s přídavkem 1 mm, který sloužil pouze na pohledové srovnání čel na soustruhu. Na všech osách a čepech byly na soustruhu sraženy hrany na cca 2 mm. Otvory na závlačky a pružné čepy byly vyvrtány na stojanové vrtačce s posuvným stolem a strojním svěrákem s prizmatickými čelistmi pro uchycení kulatých obrobků. Průměry čepů a os byly voleny tak, aby běžně dodávané průměry nerezových kulatin nebylo potřeba již nijak upravovat.

Tabulka 9.4 Rozpočtový list pro nosné a ovládací části odpojovače, včetně práce při teoretické sazbě 280 Kč/hod bez DPH (březen 2022)

Položka	množství	Cena za jednotkové množství bez DPH	Celková cena bez DPH
Tyč plochá ocelová 5 × 50 mm 1,96 kg/m	480 mm 0,94 kg	26,3 Kč/kg	24,7 Kč
Tyč plochá ocelová 10 × 50 mm 3,93 kg/m	240 mm 0,94 kg	26,1 Kč/kg	24,5 Kč
Řez účtovaný obchodníkem	2 ks	9 Kč/řez	18 Kč
Tyč čtvercová ocelová 60 × 60 mm 28,26 kg/m	60 mm 1,7 kg	25,8 Kč/kg	43,9 Kč
Řez účtovaný obchodníkem	1 ks	45 Kč/řez	45 Kč
Jakl uzavřeny obdélníkový ocelový 50 × 40 × 3 mm 3,66 kg/m	30 mm 0,11 kg	27,1 Kč/kg	3,0 Kč
Řez účtovaný obchodníkem	1 ks	8,8 Kč/řez	8,8 Kč
Jakl uzavřeny obdélníkový ocelový 80 × 50 × 3 mm 5,8 kg/m	85 mm 0,49 kg	27,1 Kč/kg	13,3 Kč
Jakl uzavřeny obdélníkový ocelový 80 × 40 × 3 mm 5,4 kg/m	85 mm 0,46 kg	27,1 Kč/kg	12,5 Kč
Řez účtovaný obchodníkem	2 ks	20 Kč/řez	40 Kč
Tyč nerezová kruhová tažená (hlazená) Ø12 mm 0,89 kg/m	450 mm 0,4 kg	142,4 Kč/kg	57 Kč
Tyč nerezová kruhová tažená (hlazená) Ø14 mm 1,23 kg/m	110 mm 0,14 kg	135,7 Kč/kg	19 Kč
Řez účtovaný obchodníkem	2 ks	13,3 Kč/řez	26,6 Kč

Tyč nerezová kruhová tažená (hlazená) $\varnothing 20$ mm 2,47 kg/m	130 mm 0,32 kg	138,4 Kč/kg	43,6 Kč
Tyč nerezová kruhová tažená (hlazená) $\varnothing 30$ mm 5,55 kg/m	330 mm 1,83 kg	138,2 Kč/kg	252,9 Kč
Řez účtovaný obchodníkem	2 ks	38,2 Kč/řez	76,4 Kč
Tyč ocelová kruhová tažená (hlazená) $\varnothing 50$ mm 15,4 kg/m	30 mm 0,46 kg	37,6 Kč/kg	17,3 Kč
Řez účtovaný obchodníkem	1 ks	45 Kč/řez	45 Kč
Žárové zinkování	5,1 kg	26,4 Kč/kg	134,6 Kč
Práce veškeré kovoobrábění (řezání, vrtání, frézování, svařování apod.)	12 hodin	280 Kč/hod	3 360 Kč
Celkové náklady na nosné a ovládací části	-	-	4 266 Kč

V případě nosných a ovládacích částí se firmy pokoušejí používat díly tak, aby byly tvarem co nejjednodušší a zároveň aby spolehlivě plnily svou funkci. V některých případech volí pro výrobu dílů i odlévání, zvláště pak u tvarově složitějších dílů, čímž se ušetří i čas. Pro odlévání je však potřeba výroba formy nebo kopyta pro obtisk ve slévárenském písku. Z důvodu nákladnosti výroby formy či kopyta není příliš finančně výhodné využít tento způsob pro prototypové kusy odpojovače.

9.1.4 Finanční zhodnocení izolátorů a spojovacího materiálu

Důležitou součástí samotného odpojovače jsou izolátory, které tvoří izolační oddělení samotné proudovodné dráhy od země, respektive od základy odpojovače. Na samém začátku návrhu byly zvoleny parametry velikosti krátkodobého výdržného napětí průmyslového kmitočtu U_d a jmenovitého impulzního napětí U_{Ni} pro napěťovou hladinu 25 kV dle normy ČSN EN 50152-2 ed. 3. Takový izolátor splňuje dle normy ČSN EN IEC 62271-1 parametry pro hladinu 52 kV. V České republice a v okolních státech je v dnešní době jen málo dodavatelů izolátorů pro napěťovou hladinu 52 kV, tudíž byl výběr omezený. Zásadní parametr z pohledu životnosti u izolátoru je i materiál, přičemž na výběr byl u dodavatelů buď kompozitní nebo keramický.

Keramické izolátory jsou provozně velmi spolehlivé a mají velkou životnost, lépe snášejí teplotní změny a povrch izolátoru nedegraduje tak, jako izolátory s kompozitních materiálů. Jejich nevýhoda je však citlivost na mechanické poškození, problémy se spolehlivým uchycením pouzder se závity, a zvláště pak jejich vysoká hmotnost. Právě hmotnost, která je u keramického izolátoru pro zadané parametry cca 18,6 kg, byla rozhodující.

V případě kompozitního izolátoru je totiž hmotnost pouze 8,95 kg. V případě tří izolátorů pro jednopólový odpojovač se jedná o úsporu téměř 30 kg, což je v případě odpojovače s ručním pohonem a umístěním na sloupu trakčního vedení rozhodující aspekt výběru samotného izolátoru. Dalším kritériem při výběru vhodného izolátoru byla i samotná možnost a způsob upevnění izolátoru k základně a k proudovodné dráze odpojovače. Pro stavbu odpojovače se nejvíce hodí takzvané podpěrné izolátory.

Tabulka 9.5 Parametry vybraného podpěrného izolátoru PI 250-4 od firmy KUVAG GmbH & Co KG

Parametr	Hodnota
krátkodobého výdržného napětí průmyslového kmitočtu	$U_d > 95 \text{ kV}$
Jmenovité impulzní napětí	$U_{Ni} > 250 \text{ kV}$
Odolnost izolátoru v ohybu	$F_{ohyb} > 4 \text{ kN}$
Délka povrchové dráhy mezi horní a spodní podstavou	$l_{povrch.dráha} = 1547 \text{ mm}$
Hmotnost	$m_{izolátor} = 8,95 \text{ kg}$

V případě spojovacího materiálu byly brány v potaz venkovní podmínky, požadovaná životnost, spolehlivost. I zde bylo nutné jakýkoli spojovací materiál ve styku s mědí zvolit tak, aby nedocházelo při vnějších podmínkách ke vzniku galvanického článku. Na většinu spojovacího materiálu byl vybrán nerez a v případě, že nedochází ke kontaktu s mědí, tak i žárový pozink nebo tvrzená ocel.

Tabulka 9.6 Rozpočtový list pro izolátory a spojovací materiál odpojovače (březen 2022)

Položka	množství	Cena za jednotkové množství bez DPH	Celková cena bez DPH
Šrouby, matice, pružné a ploché podložky – Nerez A4, A1 nebo žárový pozink	-	-	184,7 Kč
vymezovací podložky DIN 988 – tvrzená ocel, podložky pro čepy DIN 1440 – nerez A2, závlačky DIN 94 – nerez A2, kolík pružný DIN 1481 – nerez A1	-	-	119,6 Kč
Tlačná pružina z nerezové pružinové oceli.	5 ks	79 Kč/ks	395 Kč
Ložiska kluzné pouzdro s kompozitem PTFE – SKF	6 ks	27 Kč/ks	162 Kč
Izolátory	3 ks	2 330 Kč/ks	6 990 Kč
Celkové náklady na izolátory a spojovací materiál.	-	-	7 851,3 Kč

Firmy vyrábějící odpojovače používají většinou spojovací materiál jak s žárovým pozinkováním, tak i s klasickým galvanickým pozinkováním. V případě potřeby se provádí postříbření spojovacího materiálu skrze kontakt s mědí. Některé firmy však nabízejí také nerezové prvky spojovacího materiálu, jak je tomu u navrženého odpojovače.

9.1.5 Celkové náklady na odpojovač včetně dokončovacích prací

V celkovém souhrnu všech etap prací je možné vidět, že finančně nejnákladnější částí odpojovače jsou jednoznačně izolátory a hned poté náklady na výrobu proudovodné části. Samotné izolátory je totiž nutné brát jako již hotový výrobek, které mají již otestované potřebné parametry a výrobce za ně ručí. Pokud by výrobce odpojovačů vyráběl svou

vlastní řadu izolátorů, značně by si tím snížil náklady na samotný odpojovač. Je však na zvážení, při kolika izolátorech se již vyplatí si je vyrábět vlastní silou. Podobně je tomu i v případě povrchových úprav materiálu, například stříbření proudovodné dráhy, žárové zinkování základny atd. V tomto případě by se vlastní galvanovna vyplatila až při velkém objemu zakázek, ať už vlastních nebo externích. Je tedy obvyklé, že výrobci elektrických a elektronických přístrojů v automobilovém, leteckém či jiném podobném průmyslu mají svou dceřinou společnost, která se živí pokovováním materiálu pro externí dodavatele, a služby pro svou mateřskou společnost tvoří jen malou část celkového obrátu společnosti.

Ze získaných zkušeností z celé stavby odpojovače je možné říct, že minimální vybaveností firmy vyrábějící odpojovač jsou jednoznačně kvalitní obráběcí stroje, jako je soustruh, frézka, stojanová a stolní vrtačka, ohraňovací lis, hydraulický lis, stolní bruska, svařovací invertor pro metodu MAG nebo alespoň MMA (Manual Metal Arc), svařovací stůl a běžné dílenské vybavení potřebné pro běžné kovoobráběcí práce. Problémem v dnešní době může být nedostatek řemeslně schopných lidí na trhu práce. V době vzrůstající automatizace se více uplatňují stroje typu CNC, kde již soustružník není zdaleka takovým soustružníkem jako u klasického manuálního soustruhu.

U CNC strojů je obsluha pouze jakým si „ovládačem“ či „seřizovačem“ a většinu „myšlení“ vyhodnocuje dodávaný software ke strojům. Bohužel CNC stroje nejsou svou složitostí u prvotního nastavování a seřízení vhodné pro kusové či malosériové výroby. Výrobci tuto nectnost řeší unifikací výrobního portfolia. Jako příklad bych uvedl svařovací roboty, kde několik typů odpojovačů, uzemňovačů a odpínačů má totožné základny, u kterých se mění jen rozteč vyvrtaných děr pro konkrétní typ.

Další prostor pro úspory je možné shledat ve velkoodběru materiálu, například mědi, nerezů či spojovacího materiálu.

Tabulka 9.7 Rozpočtový list pro celkové náklady odpojovače včetně práce při teoretické sazbě 280 Kč/hod bez DPH (březen 2022)

Položka	množství	Cena za jednotkové množství bez DPH	Celková cena bez DPH
Celkové náklady na části na základnu odpojovače	-	-	4 702 Kč
Celkové náklady na části proudovodné dráhy (praporce a nože)	-	-	4 770,9 Kč
Celkové náklady na části na nosné a ovládací části odpojovače	-	-	4 266,1 Kč
Celkové náklady na izolátory a spojovací materiál.	-	-	7 851,3 Kč
Práce na konečném sestrojení odpojovače	2 hodiny	280 Kč/hod	560 Kč
Celkové náklady na odpojovač včetně práce	-	-	22 150,3 Kč

Pokud se provede rozdělení na náklady za materiál a náklady za práci je vidět, že cena práce tvoří více jak 30 % celkové ceny za odpojovač. Pro každou firmu je důležité udržovat ve firmě zručné pracovníky, kteří dokážou udržet kvalitu výrobku a zároveň využít pracovní dobu efektivně. Detailní finanční zhodnocení celého procesu výroby odpojovače a případné využití prvků automatizace v této výrobě by vydalo na další diplomovou práci.

Tabulka 9.8 Rozpočtový list pro celkové náklady odpojovače rozdělené na materiál a samotnou práci při teoretické sazbě 280 Kč/hod bez DPH (březen 2022)

Položka	množství	Cena za jednotkové množství bez DPH	Celková cena bez DPH
Celkové náklady za materiál	-	-	12 070,3 Kč
Celkové náklady za práci	36 hodin	280 Kč/hod	10 080 Kč
Celkové náklady na odpojovač včetně práce	-	-	22 150,3 Kč
Zaokrouhlená předpokládaná cena na trhu	-	-	29 000 Kč

Do celkové předpokládané nabízené ceny na trhu s odpojovači je započtena marže cca 24 % na jednom odpojovači. Pro představu následuje tabulka se srovnáním odpojovačů a jejich parametrů na napěťovou hladinu 25 kV / 50 Hz nabízených v České republice a blízkém okolí.

Tabulka 9.9 Přehled parametrů podobných odpojovačů nabízených na trhu (březen 2022) [15], [18], [23]

Parametr	Navržený	IVEP, a.s.	DRIBO, spol s r.o.	R&S SERW
	V1.0	KBE	FTr 25-2000/31,5	FHF B3 25/5
Jmenovitý trvalý proud I_r	800 A	800 A	2000 A	2000 A
Efektivní ustálená hodnota zkratového proudu I_k''	32 kA	20 kA	31,5 kA	31,5 kA
Jmenovitý výdržný dynamický proud $I_{p\ max}$	81 kA	50 kA	80 kA	80 kA
Krátkodobé výdržné napětí průmyslového kmitočtu U_d (Společná hodnota / v odpojovací dráze)	110/95 kV	60/50 kV	110/95 kV	110/95 kV
Jmenovité impulsní napětí U_{Ni} (Společná hodnota / v odpojovací dráze)	290/250 kV	145/125 kV	220/200 kV	290/250 kV

Ostatní výrobci se většinou vůbec nezaměřují na tuto napěťovou hladinu a nemají o oblast drážní dopravy zájem. V jiných případech sice nabízí odpojovač pro tuto napěťovou hladinu, avšak ostatní parametry jsou velmi odlišné od navrženého odpojovače. Nejčastěji mají nižší krátkodobé výdržné a jmenovité impulsní napětí. Z pohledu napěťového dimenzování je na tom totožně pouze jediný výrobce z oslovených výrobců ve střední Evropě, a to firma R&S SERW. Ostatní výrobci drážních odpojovačů buď tyto hodnoty impulsního a výdržného napětí vůbec nenabízí, nebo v případě dvou firem neposkytly informace o svých nabízených výrobcích. [15], [18], [23]

Co se týče cenového srovnání odpojovače s podobnou proudovou zatížitelností, avšak s nižším napěťovým dimenzováním, se pohybují okolo 25 000 Kč (bez DPH). V případě odpojovačů s vyšší proudovou zatížitelností a podobnou nebo totožnou hodnotou výdržného a impulsního napětí se cena na trhu pohybuje okolo 30 000 Kč (bez DPH). Vzhledem k zachování požadavků výrobců jsou ceny orientační a nekonkretizovány k daným výrobcům či výrobkům. Některé firmy i přes žádost o poskytnutí alespoň orientační ceny nebyly ochotny informace poskytnout. Nicméně lze ze získaných informací usuzovat, že navržená cena je na trhu odpojovačů konkurenceschopná.

9.2 Technické zhodnocení

V průběhu stavby, zprovoznění a zkoušek odpojovače byla shledána místa a oblasti, kterými by bylo vhodné se zabývat při úpravách návrhu odpojovače.

9.2.1 Zvýšení odolnosti vůči impulsnímu napětí odpojovací dráze.

Při napěťových zkouškách se ukázalo jako nejslabší místo zkouška impulsním napětí v odpojovací dráze $U_{d-odpoj. dráha} = 290$ kV. Při této zkoušce bylo po několika neúspěšných pokusech nutné odstranit jakékoli ostré hrany vodivých částí v blízkosti mezi odpojenými noži a praporcem. Proběhlo sražení hran na držáku nožů s izolátorem a dále výměna šroubů se šestihrannou hlavou za imbusové šrouby s hlavou kulatou. Další úpravou bylo zakulacení malých hran na konci praporce. Zakulacení proběhlo pomocí pilníku a jemného smirkového papíru.

Dále bylo potřeba odpojovač otevřít na 52° což je o 2° nad navrhovaný úhel otevření odpojovače. Po těchto úpravách již proběhly zkoušky bez problému. Po dobu životnosti odpojovače se opotřebením napěťová odolnost snižuje například vznikem různých nerovností na kontaktních plochách. Je to tedy oblast, ve které by bylo potřeba při přepracování návrhu provést úpravy vedoucí k získání větší napěťové rezervy. Návrhy na úpravy:

- Oblejší tvar praporce – Nejméně technicky a finančně náročné, avšak zisk napěťové rezervy minimální.
- Prodloužení délky nožů – Tato úprava vede k přepracování celého návrhu, přičemž finančně i technicky se jedná o velký zásah. Je zapotřebí uvažovat vliv zvětšení délky nožů z pohledu zkratových proudů. Dále se zvětší

obestavěný prostor, hmotnost a byla by větší i potřebná síla při ručním pohonu. Tato úprava má ale také největší zisk napěťové rezervy.

- Větší úhel otevření – Minimálním zásahem je úprava délky ovládací páky na odpojovači nebo úprava délky zdvihu ovládacího táhla na trakčním sloupu. Technicky i finančně je tato úprava nenáročná, avšak je zapotřebí více síly na ovládání odpojovače.

9.2.2 Korekce napěťové odolnosti v zapnuté poloze

Při zkouškách napěťové odolnosti v zapnuté poloze (společná hodnota), ať už u výdržného nebo impulzního napětí, vyšla výsledná napětí průrazu vyšší než při vypnuté poloze (v odpojovací dráze). Z bezpečnostního hlediska by tomu mělo být naopak. Jedná se o to, aby v případě vysoké přepěťové vlny blížící se k vypnutému odpojovači došlo k průrazu mezi přívodním praporcem a zemí a ne k průrazu v odpojovací dráze. Takto navržený odpojovač přispívá k větší bezpečnosti při práci na trakčním vedení. Návrhy na úpravy:

- Jímací kolík – Pro zkrácení izolační délky mezi proudovodnou dráhou a mezi zemí je možné nainstalovat zemnicí, respektive jímací kolík připevněný k základně odpojovače. Ten svou výškou zkrátí izolační délku a svým tvarem iniciuje vznik výboje právě v tomto místě. Tato úprava je finančně i technicky nenáročná a je vhodné provést nastavitelnou verzi kolíku.

9.2.3 Zvýšení odolnosti proti svaření kontaktu při dynamickém výdržném proudu

Během prvních tří period zkoušky dynamickým výdržným proudem došlo k malému svaru na jedné straně odpojovače. Svar proběhl při zkoušce s vyšší vrcholovou hodnotou dynamického zkratového proudu, než na který byl odpojovač navržen. I tak však neovlivnil tento svar výsledek zkoušky, protože síla potřebná k „utržení“ svaru splnila s velkou rezervou normativní požadavky. I přes to, že lze považovat tuto zkoušku za úspěšnou, je na kritickém posouzení každého konstruktéra, aby navrhnul opatření vedoucí k eliminaci vzniku svaru. Případný vznik dalších svarů výrazně ovlivňuje životnost kontaktů a tím i životnost odpojovače jako celku. Vzhledem k tomu, že svar vznikl až při nejvyšší zkušební hodnotě, jsou následující návrhy na zlepšení spíše doporučující. Návrhy na úpravy:

- Větší přitlačná síla v kontaktech – To je možné uskutečnit zvýšením předpjetí pružin pomocí vymezovacích podložek. Za tímto účelem byl systém pružin v proudovodné dráze také navržen, a je tak možné tuto úpravu aplikovat ihned. Je však problém, že se zvýší síla potřebná k ovládání a úměrně k tomu se zvýší opotřebovávání kontaktů z důvodu vyššího tření. Bylo by tedy nutné nalézt vhodný kompromis mezi výhodami a nevýhodami této úpravy. Tato úprava je nejrealizovatelnější a svou cenou i neekonomičtější.

- Lepší kontaktní plocha – Na samotném praporci možné pozorovat, že v blízkosti kontaktního místa zasahuje nerovnoměrná plocha vzniklá ohybem praporce na ohraňovacím lisu, což vede k nedokonalému doléhání nožů na kontaktní místa na praporci. Odstranění této nedokonalosti by mohlo být provedeno ofrézováním těchto kontaktních ploch do roviny. Realizace nevyžaduje výrazný zásah do návrhu odpojovače, jedná se však o další náklad na práci frézaře. Oproti předešlé úpravě nedochází ke zvýšení opotřebení kontaktů.
- Zvýšení tuhosti nožů v oblasti kontaktu – Na obrázku 8.17 v kapitole 8.3.2 je možné vidět, že nože byly účinky dynamického zkratového proudu v U-smyčce tvořící zkušební obvod znatelně vychýleny, a to na pár desítek milisekund. Tomuto průhybu se může zamezit například instalací takzvaných příložek z vnější strany nožů. Příložky mohou být buď ve formě tvarového plechu, nebo jen čistě rovného plechu. Je však nutné skrze chemické vlastnosti mědi použít buď postrýbřenou ocel, nebo nerezovou ocel. Jinak hrozí v návaznosti na vnějších vlivech vznik galvanického článku, a tím zvýšená koroze. Nejedná se o výrazný zásah do návrhu odpojovače. Nevýhodou je však cena za materiál a následně i práci. U této úpravy je potřeba počítat s rizikem vzniku vířivých proudů v příložkách.

10. ZÁVĚR

Hlavním úkolem diplomové práce bylo navrhnout VN odpojovač pro drážní aplikaci na napětí 25 kV střídavých a proud 800 A, a to s ohledem na veškeré normativní požadavky, které s návrhem odpojovače souvisejí. Dále bylo požadováno jeho samotné sestavení, vyzkoušení vybraných parametrů a nakonec kritické zhodnocení s ohledem na funkční a ekonomická hlediska.

Před zahájením návrhu bylo nutné nastudovat příslušné normativní požadavky, které souvisejí s návrhem a zkoušením drážního odpojovače, například ČSN EN 50152-2 ed. 3 – Pevná trakční zařízení – Zvláštní požadavky na střídavá spínací zařízení střídavého proudu – Část 2: Odpojovače, uzemňovače a spínače se jmenovitým napětím nad 1 kV.

Na základě informací z norem byly vypočteny potřebné izolační vzdálenosti, čímž dostal odpojovač hlavní rozměry. Následovalo stanovení vhodné proudové hustoty empirického doporučeného rozsahu pro tato spínací zařízení. Metodou několika nástřelů a pomocí programové podpory byly vyhodnoceny jako vhodné průřezy s rozměry 50×10 mm pro praporce a 50×5 mm pro nože. Dále byla zvolena vhodná přitlačná síla pracovních kontaktů na $F_p = 181$ N na jeden kontakt v kontaktním páru. Navržená proudovodná dráha byla pomocí analytických metod ověřena na vliv elektrodynamických sil při průchodu zkratu. Výpočetně bylo ověřeno, že výsledná kontaktní síla na jeden kontakt v kontaktním páru bude $\vec{F}_{ip} = 177,5$ N, což je stále dostatečně velká síla oproti minimální síle na mezi svaření $F_{min} = 129,4$ N.

V další kapitole následovalo vyhodnocení oteplení odpojovače průchodem jmenovitého trvalého proudu a následné porovnání výsledných hodnot s normou ČSN EN 62271-1 ed. 2, jež udává maximální dovolené hodnoty oteplení pro jednotlivé části odpojovače. Nejkritičtějšími místy jsou pracovní kontakty, které byly z důvodu maximálního možného oteplení postříbřeny. Postříbření mimo jiné umožnilo i volbu nižší přitlačné síly. Tuto nejkritičtější hodnotu po výpočtech oteplení v jednotlivých částech splnily s rezervou všechny části odpojovače. Dle předpokladu bylo největší oteplení u pracovního kontaktu praporce, a to přesněji $\theta_4 = 30,61$ K.

Následoval návrh mechanické části, který byl proveden tak, aby jednoduchostí byla zajištěna provozní spolehlivost a pokud možno bezúdržbovost. Na pohyblivé prvky byla použita kluzná ložiska, ať už ze slinutého bronzu, nebo ložiska s vrstvou teflonu. Samomazné vlastnosti použitých ložisek zaručují dlouhou provozní spolehlivost.

Po analytickém ověření návrhu a vytvoření kompletní výkresové dokumentace proběhla samotná výroba odpojovače. Na vyrobeném odpojovači bylo provedeno několik zkoušek ověřujících vybrané parametry odpojovače, což umožnilo přímé ověření analytického návrhu. V případě zkoušky impulsním napětím vykazoval odpojovač v případě napětí v odpojovací dráze $U_{Ni} = 290$ kV nestabilní chování. Pro splnění podmínky deseti po sobě jdoucích úspěšných pokusů bez přeskočení bylo nutné zvětšit úhel otevření o 2° na konečných 52° a dále zajistit dokonale kulatý a hladký povrch všech částí

v blízkosti této odpojovací dráhy. Naopak u ostatních napěťových zkoušek vykazoval odpojovač značné rezervy. Například u zkoušky výdržným napětím ve společné hodnotě byla naměřená hodnota přeskočků o 67 % vyšší než doporučuje norma.

Další úspěšnou zkouškou byla zkouška trvalým proudem, ve které se měří oteplení v různých částech odpojovače. I zde byly vypočtené hodnoty oteplení porovnány s naměřenými hodnotami v příslušných místech. Naměřené hodnoty vykazovaly cca o 10 K menší hodnotu než hodnoty vypočtené. Odpojovač tedy plně vyhovuje normativním požadavkům na oteplení částí odpojovače, a to i s dostatečnou rezervou. Tato odchylka mezi měřením a výpočtem, která je na straně bezpečnosti, je způsobena zanesením bezpečnostních koeficientů do návrhu, volbou kritičtějších hodnot materiálových konstant, emisivit, činitelů zastínění a podobně. Pro očekávanou životnost 40 let je třeba do návrhu vnést kritičtější parametry materiálu a okolních podmínek. Jedině tak vznikne rezerva na takzvané přirozené opotřebení přístroje. Samotná zkouška proběhla na kompletně novém a čistém odpojovači, což jsou ideální podmínky, za kterých je provozován odpojovač jen prvních pár týdnů.

V poslední fázi ověřování parametrů proběhly zkratové zkoušky. Při první zkoušce krátkodobým výdržným proudem byla ověřována navrhovaná efektivní hodnota $I_k'' = 32 \text{ kA}$ s dobou zkratu $t_k = 1 \text{ s}$. Zkoušku bylo nutné provést se sníženou efektivní hodnotou a s náhradní dobou zkratu $t_{k-\text{náhradní}} = 3 \text{ s}$, aby bylo dosaženo stejného Jouleova integrálu jako při navrhované efektivní hodnotě výdržného zkratového proudu. Efektivní hodnota během testu dosáhla $I_{k-\text{náhradní}}'' = 18,74 \text{ kA}$, což je ekvivalentní k hodnotě efektivního proudu $I_{k-\text{zkoušební}}'' = 32,4 \text{ kA}$ pro dobu zkratu $t_k = 1 \text{ s}$. Z chování odpojovače během zkoušky a z malé teploty povrchu proudovodné dráhy bylo jasné, že přístroj má značné rezervy. Bylo tak možné uvažovat i o testu s navrhovanou hodnotou efektivního proudu $I_{k-\text{zkoušební}}'' = 32 \text{ kA}$, avšak dobu zkratu prodloužit na $t_k = 3 \text{ s}$, což by znamenalo trojnásobnou hodnotu Jouleova integrálu. Následovala druhá zkratová zkouška dynamickým výdržným proudem o vrcholové hodnotě první půlvlny $I_{p \max} = 80 \text{ kA}$ s dobou zkratu $t_k = 300 \text{ ms}$. Během samotné zkoušky bylo dosaženo vrcholové hodnoty $I_{p \max-\text{zkouška}} = 82,74 \text{ kA}$. U této vrcholové hodnoty došlo k malému svaru, který však svým malým rozsahem plně vyhověl normativním podmínkám pro maximální sílu vynaloženou k ovládnutí odpojovače. Zkratové zkoušky byly nejen úspěšné, ale poukázaly i na malé rezervy na straně bezpečnosti.

V souvislosti se zkratovými zkouškami bylo provedeno i měření síly potřebné k ovládnutí odpojovače v přepočtu na ovládací páku obsluhy. Návrh počítal se silou $F_{\text{obsluha}} = 216,73 \text{ N}$, po obou zkratových zkouškách byla naměřená a přepočtená síla $F_{\text{obsluha zkouška po}} = 184,5 \text{ N}$. Norma udává pro příslušný případ odpojovače sílu $F_{\text{obsluha norma}} = 250 \text{ N}$. Je tedy i zde rezerva pro přirozené opotřebení mechanismu.

V rámci zkratových zkoušek a zkoušky trvalým proudem bylo nutné vždy před a po zkoušce změřit elektrický odpor kontaktů. Vzhledem ke komplikovanosti proudovodné

dráhy nebylo možné provést měření odporu samotného pracovního kontaktu. Norma v těchto případech umožňuje měření celého pólu. Maximální zvýšení odporu kontaktů odpojovače před a po zkoušce bylo o cca 11 % – norma povoluje zvýšení maximálně o 20 %. Je vidět, že odpojovač má dostatečnou rezervu i zde.

Poslední částí diplomové práce je finanční a technické zhodnocení. Z pohledu finančního hlediska je se svou předpokládanou cenou cca 29 000 Kč bez DPH konkurenceschopný (březen 2022). Tato cena zahrnuje marži cca 24 %. Podobné odpojovače, avšak s menší napěťovou odolností, se na trhu pohybují okolo 30 000 Kč.

Technické zhodnocení odpojovače v kapitole 9.2 se zaměřuje na ty části, které se při samotné stavbě či zkouškách ukázaly jako problematické. Jedná se například o větší stabilizaci napěťové odolnosti vůči impulsnímu napětí v odpojovací dráze, nebo třeba lepší koordinaci mezi průraznými hodnotami v odpojovací dráze (vypnuto) a hodnotami ve společné hodnotě (zapnuto) a nakonec i zvýšení odolnosti proti svaření při průchodu dynamického výdržného proudu.

Na závěr je nutné zdůraznit, že návrh byl proveden bez předchozích praktických zkušeností se stavbou takového přístroje a bez jakýchkoli rad a výpomoci z řad firem vyrábějících odpojovače. Na začátku návrhu byly zadány pouze parametry a zvoleno provedení mechanismu typu jednoduché pákové. Většina prací na stavbě probíhala svépomocí. Na konci celé diplomové práce je plně funkční, odzkoušený a konkurenceschopný přístroj vyhovující příslušným normativním požadavkům.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] HAVELKA, Otto. *Stavba elektrických přístrojů I*. 2. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1988.
- [2] HAVELKA, Otto. *Elektrické přístroje I*. 3. vyd. Brno: Rektorát Vysokého učení technického v Brně, 1982.
- [3] BUŠOV, Bohuslav. *Elektrické přístroje - podklady a příklady pro navrhování*. Brno, 2013. Skripta. Vysoké učení technické v Brně, fakulta elektrotechniky a informačních technologií.
- [4] PATOČKA, Miroslav. Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice. V Brně: VUTIMUM, 2011. ISBN 978-80-214-4003-6.
- [5] PATOČKA, Miroslav. *Vybrané statě z výkonové elektroniky svazek 1: Tepelné jevy, Činný výkon*. Brno, 2005. Skripta. Vysoké učení technické v Brně, fakulta elektrotechniky a informačních technologií.
- [6] SHIMIZU, Ohta. Temperature Classes of Electrical Insulators. *Three Bond Technical News, Japan*, 1.12.1985. [online].1985 [cit. 2021-12-23]. Dostupné z: <http://www.threebond.co.jp/en/technical/technicalnews/pdf/tech13.pdf>.
- [7] ČSN EN IEC 62271-102 ed. 2 (354210) *Vysokonapěťová spínací a řídicí zařízení - Část 102: Odpojovače a uzemňovače střídavého proudu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019.
- [8] ČSN EN 62271-1 ed.2 (354205) *Vysokonapěťová spínací a řídicí zařízení - Část 1: Společná ustanovení pro spínací a řídicí zařízení střídavého proudu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.
- [9] ČSN EN 50152-2 ED. 3. *Drážní zařízení - Pevná trakční zařízení - Zvláštní požadavky na střídavou spínací zařízení střídavého proudu - Část 2: Odpojovače, uzemňovače a spínače se jmenovitým napětím nad 1 kV*. 3. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [10] ČSN EN 60059 (330125). *Normalizované hodnoty proudů IEC*. Praha: Český normalizační institut, 2000.
- [11] ČSN EN 60947-1 ED. 4. *Spínací a řídicí přístroje nízkého napětí - Část 1: Všeobecná ustanovení*. 3. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [12] Výrobky schválené pro použití na ŽDC. *Správa železnic* [online]. Praha, 2021, 2021 [cit. 2021-12-07]. Dostupné z: <https://www.spravazeleznic.cz/dodavatele-odberatele/technicke-pozadavky-na-vyrobky-zarizeni-a-technologie-pro-zdc/elektrotechnika/schvalene-vyrobky>
- [13] ČESKÁ REPUBLIKA. *Nařízení vlády č. 361/2007 Sb.: podmínky ochrany zdraví při práci*. Praha: Tiskárna Ministerstva vnitra, p. o., 2007, ročník 2007, číslo 361.

- [14] ČSN EN ISO 12944-2. *Nátěrové hmoty - Protikorozní ochrana ocelových konstrukcí ochrannými nátěrovými systémy - Část 2: Klasifikace vnějšího prostředí*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019.
- [15] Venkovní odpojovače KBE. *IVEP, a.s.* [online]. Brno, 2021 [cit. 2022-01-02]. Dostupné z: <https://www.ivep.cz/cz/produkty/venkovni-odpinace-usecniky-a-odpojovace/venkovni-odpojovace-kbe>
- [16] HOLUŠA, Radim a Ondřej JANČA. Ochrana ocelových konstrukcí nátěrovým systémem Akrylmetal podle revidované normy ISO 12944. *KONSTRUKCE odborný časopis pro stavebnictví a strojírenství* [online]. 22. dubna 2020 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <https://konstrukce.cz/materialy-a-technologie/ochrana-ocelovych-konstrukci-naterovym-systemem-akrylmetal-podle-revidovane-normy-iso-12944-412>
- [17] Nátěry ocelových konstrukcí a výrobků. *Chemolak Trade, spol. s r.o.* [online]. 2022 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <https://www.chemolak.sk/cs/produkty/prumyslove-natery/natery-ocelovych-konstrukci-a-vyrobků/>
- [18] Železniční odpojovače - technická data. *R&S International Holding AG* [online]. [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: https://the-rsgroup.com/wp-content/uploads/2020/02/Fahrleitung_Datenbl%C3%A4tter_Trennschalter_EN_Web.pdf
- [19] KRATINA, Jakub. Součinitel tření: Tabulka hodnot součinitele (koeficientu) smykového tření pro různé kombinace materiálů. *E-konstrukter: Portál pro strojní konstruktéry* [online]. 16.04.2013 [cit. 2022-01-02]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/soucinitel-treni>
- [20] HAVELKA, Otto, Dalibor SVOBODA a Zdeněk VÁVRA. *Podklady a příklady pro navrhování elektrických přístrojů I*. Brno: Vysoké učení technické, 1985
- [21] ČSN EN 60060-1. *Technika zkoušek vysokým napětím - Část 1: Obecné definice a požadavky na zkoušky*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [22] ČSN EN 13601. *Měď a slitiny mědi - Tyče a dráty z mědi pro všeobecné použití v elektrotechnice*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2021.
- [23] Venkovní spínací přístroje pro trakční aplikace. *DRIBO, spol. s r.o.* [online]. [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <http://www.dribo.cz/vyrobní-program/a23-venkovni-spinaci-pristroje-pro-trakcni-aplikace/>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
VUT	Vysoké učení technické v Brně
ČSN	Česká státní norma
EN	Evropská norma
ISO	Mezinárodní organizace pro normalizaci
IEC	Mezinárodní elektrotechnická komise
OG	oxidační plyny
SF6	Fluorid sírový
CO ₂	Oxid uhličitý
Cu	Měď
BeCu	Beryliová měď
MIG	svařování kovů v ochranné atmosféře inertního plynu
MAG	svařování kovů v ochranné atmosféře aktivního plynu
MMA	svařování obalenou elektrodou
M10	metrický závit o průměru 10 mm
SKF	Svenska Kullagerfabriken (Švédský výrobce ložisek)
DPH	daň z přidané hodnoty
VN	vysoké napětí
NN	nízké napětí

Symboly:

U	napětí	[V]
I	proud	[A]
R	odpor	[Ω]
P	plocha	[m ²]
L, l	délka	[m]
d	průměr	[m]
r	poloměr	[m]
S	plocha, průřez	[m ²]
O	obvod	[m]
F	síla	[N]
f	frekvence	[Hz]
R_T, R_t	tepelný odpor	[K W ⁻¹]
t	čas	[s]
T	termodynamická teplota	[K]
ϑ	teplota	[°C]
$\Theta, \Delta\vartheta$	oteplení	[K]

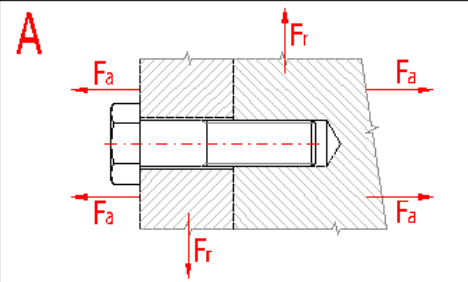
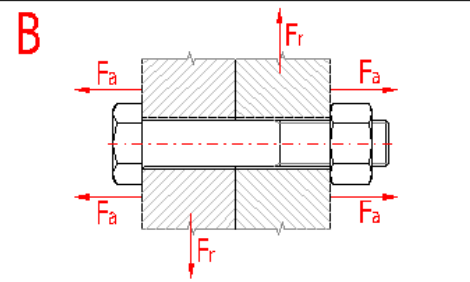
V	objem	$[m^3]$
J	kvadratický moment setrvačnosti	$[m^4]$
m	hmotnost	$[kg]$
G	tíha	$[N\ m^{-1}]$
H	tvrdost	$[MPa]$
C_k	poměrový činitel	$[-]$
k_1	bezpečnostní konstanta	$[-]$
k_p	činitel průřezu	$[-]$
k_r	koeficient vlivu harmonických	$[-]$
k_s	koeficient skinefektu	$[-]$
k_d	činitel zmenšení síly	$[-]$
k_z	činitel zastínění	$[-]$
$k_{Išroub}$	koeficient zúžení	$[-]$
K_T	atmosférický činitel	$[-]$
E_{Cu}	modul pružnosti mědi	$[Pa]$
E_Z	emisivita	$[-]$
α	teplotní součinitel rezistivity	$[K^{-1}]$
α_k	měrná chladihost prouděním	$[W\ m^2\ K^{-1}]$
α_z	měrná chladihost zářením	$[W\ m^2\ K^{-1}]$
α_o	celková měrná chladihost	$[W\ m^2\ K^{-1}]$
λ	měrná tepelná vodivost	$[W\ m^{-1}\ K^{-1}]$
σ	mechanické napětí	$[MPa]$
ρ	rezistivita	$[\Omega\ m]$
ρ_h	hustota	$[kg\ m^3]$
Q	tepelné ztráty	$[W]$
Φ	tepelný tok	$[W]$
δ	podélný tepelný odpor	$[-]$

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA A - NÁVRH ŠROUBOVÉHO SPOJE PŘÍVODU ODPOJOVAČE POMOCÍ PROGRAMU MITCALC	103
--	-----

Příloha A - Návrh šroubového spoje přívodu odpojovače pomocí programu MITCalc

A.1 Obrázek návrhu šroubového spoje odpojovače 1.část

Předeprtý šroubový spoj			
i Výpočet bez chyb.			
Autor	☒	Datum	☐
Martin Buchta		10.05.2022	111-111
Jméno souboru	Odpojovač 25kV.XLSB		
Název projektu	☐		
Šroubové spojení přívodu odpojovače			
Základní informace	☒		
Předeprtý šroubový spoj; Šroub M10 SAE 8.2; L=20; F _{amax} =2475; F _{amin} =2475; F _r =0			
Poznámka	☒		
Comments			
Kapitola vstupních parametrů			
1.0 ☒ Zatížení spoje, základní parametry výpočtu.			
1.1 Jednotky výpočtu	SI Units (N, mm, kW...)		
1.2 Režim zatížení, typ spoje			
1.3 Provedení šroubového spoje	B ... Spojení součástí průchozím šroubem s mat		
1.4 Zatížení šroubového spoje	Zatížení v ose šroubu		
1.5 Průběh zatížení	Statické zatížení		
			
1.6 Zatížení spoje			
1.7 Maximální osová síla	F _{amax}	2475,00	[N]
1.8 Minimální osová síla	F _{amin}	2475,00	[N]
1.9 Maximální radiální síla	F _r	0,00	[N]

A.2 Obrázek návrhu šroubového spoje odpojovače 2.část

Předeprtý šroubový spoj			
i Výpočet bez chyb.			
2.0 ☒ Provozní a montážní parametry spoje.			
2.1 Požadovaný součinitel těsnosti (předpětí) spoje	q_a	0,500	
2.2 Požadovaná bezpečnost proti bočnímu posunutí	q_r	1,000	
2.3 Požadované zbytkové předpětí sevřených částí spoje	F_{2min}	1238,00	☒ [N]
2.4 Požadovaná bezpečnost šroubu na mezi kluzu	n_s	1,500	
2.5 Součinitel tření v závitech	μ_c	0,150	
2.6 Součinitel tření ve stykové ploše hlavy (matice) šroubu	μ_c	0,150	
2.7 Součinitel tření mezi spojovanými plochami	μ_q	0,200	
2.8 Uvažovat přídatná ohybová napětí	Ne		
2.9 Úhlová výchylka kolmosti dosedací plochy hlavy šroubu	δ	0,100	[°]
2.10 Montážní teplota	T_0	20,0	[° C]
2.11 Uvažovat vliv provozní teploty na předpětí spoje	Ne		
2.12 Provozní teplota šroubu	T_b	42,0	[° C]
2.13 Provozní teplota spojovaných částí	T_m	42,0	[° C]
2.14 ☐ Spoj je zatěžován pouze při provozní teplotě			
2.15 Uvažovat snížení montážního předpětí trvalou deformací (sednutím) spoje	Ano		
2.16 Trvalá plastická deformace (sednutí) spoje	ΔL	0,01780	[mm]
2.17 Faktor zavedení provozní síly			
2.18 ☒ Faktor zavedení provozní síly	n	1,000	
2.19 ☐ Vzdálenost působíště provozní síly od hlavy šroubu	L_{F1}	0,000	[mm]
2.20 ☐ Vzdálenost působíště provozní síly od matice	L_{F2}	0,000	[mm]

$n \approx 0,75$ $n \approx 0,5$ $n \approx 0,25$

A.3 Obrázek návrhu šroubového spoje odpojovače 3.část

Předeprtý šroubový spoj			
i Výpočet bez chyb.			
3.0 ☒ Provedení, rozměry a materiál spojovaných částí.			
3.1 Provedení spojovaných částí	A ... Deska		
3.2 Počet sevřených částí	i	2	
3.5 Celková výška sevřených částí	L	20,000	[mm]

3.6	L_i	E	α	p_D	Materiál	EN
Část 1	10,000	130000	17,7	300	Měď ETP CW004A - H065	
Část 2	10,000	130000	17,7	300	Měď ETP CW004A - H065	

A.4 Obrázek návrhu šroubového spoje odpojovače 4.část

Předepjatý šroubový spoj

4.0 ☒ Návrh spojovacího šroubu.

4.1 Typ šroubu, materiálová norma Šrouby z uhlíkových a legovaných ocelí [SAE J429]

4.2 **Předběžný návrh minimálních průměrů závitu** 1/1

	SAE 1	SAE 2	SAE 4	SAE 5	SAE 5.1	SAE 7	SAE 8	SAE 8.1
MC	M8	M6	M5	M5	M5	M4	M4	M4
MF	M8	M8	M8	M8	M8	M8	M8	M8
UNC	5/16	1/4	10 (0.190)	10 (0.190)	10 (0.190)	8 (0.164)	8 (0.164)	8 (0.164)
UNF	5/16	12 (0.216)	8 (0.164)	10 (0.190)	10 (0.190)	8 (0.164)	8 (0.164)	8 (0.164)
UNEF	5/16	12 (0.216)	12 (0.216)	12 (0.216)	12 (0.216)	12 (0.216)	12 (0.216)	12 (0.216)

4.3 **Materiál šroubu**

4.4 Pevnostní třída (material) šroubu SAE 5.2

4.5 Modul pružnosti v tahu E 207000 [MPa]

4.6 Mez pevnosti v tahu R_m 827 [MPa]

4.7 Mez kluzu R_{eL} 634 [MPa]

4.8 Součinitel tepelné roztažnosti α 11,7 [$10^{-6}/^{\circ}\text{C}$]

4.9 Hustota ρ 7850 [kg/m^3]

4.11 **Parametry závitu**

4.12 Typ závitu Metrický závit - hrubý

4.13 Automatický návrh šroubu F_{min} F_{max}

4.14 Velikost závitu M10

4.15 Velký průměr závitu šroubu d 10,0000 [mm]

4.16 Rozteč závitu p 1,5000 [mm]

4.17 Malý průměr závitu šroubu d_r 8,1600 [mm]

4.18 Střední průměr závitu šroubu d_m 9,0260 [mm]

4.19 **Provedení a geometrie šroubu**

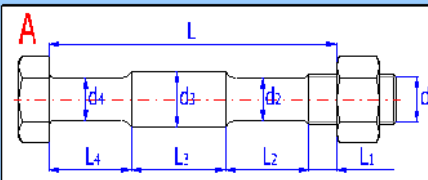
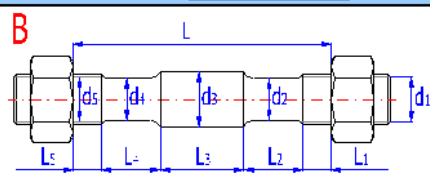
4.20 Typ šroubu A ... Průchozí šroub s hlavou a maticí

4.21 Provedení šroubu Plný šroub

4.22 Provedení hlavy šroubu Šestihránná hlava

4.23 Počet jednotlivých úseků šroubu s rozdílným průřezem i 2

4.24 Celková výška sevřených částí L 20 [mm]

4.25 Úsek šroubu 1 2 3 4 5 6

4.26 Délka úseku L_i 15,000 5,000 0,000 0,000 0,000 0,000 [mm]

4.27 Průměr úseku d_i 8,160 10,000 0,000 0,000 0,000 0,000 [mm]

4.28 Vnitřní průměr dutého šroubu d_h 0,000 [mm]

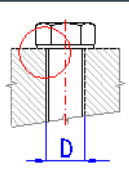
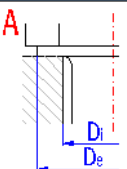
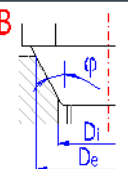
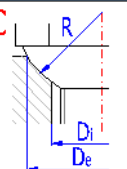
4.29 **Geometrie spoje**

4.30 Provedení dosedacích ploch pod hlavou (maticí) šroubu A ... Mezikružová styková plocha ☒

4.31 Průměr díry pro spojovací šroub D 10,500 [mm]

4.32 Vnější průměr dosedací (stykové) plochy D_e 16,000 [mm]

4.33 Vnitřní průměr dosedací (stykové) plochy D_i 10,500 [mm]

A.5 Obrázek návrhu šroubového spoje odpojovače - výsledek

Předejítý šroubový spoj			
i	Výpočet bez chyb.		
+	Kapitola doplňků		
8.0	☒ Montážní parametry spoje.		
8.1	Montážní předpětí spoje		
8.2	Minimální montážní předpětí	F_{0min}	9436,0 [N] ☒
8.3	Součinitel utahování	α_A	1,90
8.4	Maximální montážní předpětí	F_{0max}	17928,4 [N]
8.5	Utahovací moment		
8.6	Součinitel tření v závitech (min/max)		0,160 0,250
8.7	Součinitel tření ve stykové ploše hlavy (matice) šroubu (min/max)		0,100 0,120
8.8	Minimálně možný utahovací moment	M_{min}	15,4 20,6 [Nm]
8.9	Maximálně možný utahovací moment	M_{max}	29,3 39,1 [Nm]

Pro splnění podmínky $F_{ps} = 2,475 \text{ kN}$ je zapotřebí minimální utahovací moment M_{min} v rozmezí 15,4 až 20,6 N m a to v závislosti na součinitelích uvedených ve výpočtovém řádku 8.6 a 8.7.