

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Konstrukční návrh a analýza elektrického odpojovače

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Josef BALATKA**
Osobní číslo: **E17N0071P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektroenergetika**
Název tématu: **Konstrukční návrh a analýza elektrického odpojovače**
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Zpracujte teoretický úvod orientovaný na elektrické odpojovače.
2. Proveďte základní konstrukční návrh odpojovače zadaných parametrů.
3. Proveďte analýzu vybraných konstrukčních uzlů elektrického odpojovače.
4. Zhodnoťte možnosti optimalizace analyzovaných částí odpojovače.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Havelka, O.: Elektrické přístroje, SNTL Praha.
2. Vostracký, Z.: Spínací přístroje velmi vysokého napětí, SNTL Praha.
3. Havelka, O., Vávra, Z., Svoboda, D.: Podklady a příklady pro navrhování elektrických přístrojů, VUT Brno.

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Jan Sedláček, Ph.D.

Nové technologie - výzkumné centrum

Datum zadání diplomové práce:

5. října 2018

Termín odevzdání diplomové práce:

30. května 2019



Prof. Ing. Zdesek Pernutka, Ph.D.
děkan



Doc. Ing. Karel Noháček, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 5. října 2018

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na návrh a analýzu odpojovače ZVN pro jmenovitý proud 5000 A. V úvodní části se práce zabývá seznámením s odpojovači, vysvětlením jejich funkce, dělením podle různých kritérií a popisem jejich způsobů testování. Dále se práce podrobněji zabývá základním konstrukčním návrhem horizontálního odpojovače na hladině 420 kV. Na navrženém odpojovači je provedena mechanická analýza v programu SolidWorks a následně jsou zde zhodnoceny možnosti optimalizace odpojovače.

Klíčová slova

Horizontální odpojovač, konstrukční návrh, výpočetní analýza, proudová dráha, mechanická analýza, optimalizace.

Abstract

The master thesis is focused on design and analysis of EHV disconnector for rated current 5000 A. In the first part the thesis deals with disconnectors, explanation of their function, division according to various criteria and description of their testing methods. Furthermore, the thesis describes in detail the basic design of a horizontal 420 kV disconnector. Mechanical analysis in SolidWorks software is performed on the designed disconnector, and the possibilities of disconnector optimization are evaluated then.

Key words

Horizontal disconnector, construction plan, computational analysis, current path, mechanical analysis, optimalization.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 29.5.2019

Bc. Josef Balatka

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Janu Sedláčkovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
1 SEZNÁMENÍ S ODPOJOVAČI	12
1.1 DEFINICE, FUNKCE	12
1.2 DĚLENÍ ODPOJOVAČŮ	13
1.3 NORMÁLNÍ A ZVLÁŠTNÍ PRACOVNÍ PODMÍNKY	15
1.3.1 Normální pracovní podmínky	16
1.3.2 Zvláštní pracovní podmínky.....	16
1.4 CHARAKTERISTICKÉ HODNOTY	16
1.5 TYPOVÉ ZKOUŠKY	18
1.6 KUSOVÉ ZKOUŠKY	22
2 KONSTRUKČNÍ NÁVRH ODPOJOVAČE	23
2.1 URČENÍ IZOLAČNÍ PODPĚRKY	23
2.2 URČENÍ IZOLAČNÍ VZDÁLENOSTI V ODPOJOVACÍ DRÁZE.....	26
2.3 NÁVRH PROUDOVÉ DRÁHY	27
2.3.1 Návrh ramen odpojovače.....	27
2.3.2 Oteplení proudové dráhy.....	29
2.4 NÁVRH PŘÍVODNÍ HLAVICE	32
2.4.1 Návrh kuželíkového ložiska.....	32
2.4.2 Návrh přitlačné pružiny kontaktu	35
2.5 NÁVRH KONTAKTNÍ HLAVICE.....	36
2.5.1 Návrh kontaktní síly.....	37
2.5.2 Návrh kontaktních palců.....	38
2.5.3 Návrh ploché pružiny.....	40
2.6 KONTROLA MECHANICKÉHO NAMÁHÁNÍ PROUDOVÉ DRÁHY	41
2.6.1 Výpočet tíhy těles, namáhání vlivem větru a námrazy	42
2.6.2 Výpočet elektrodynamické síly.....	46
2.6.3 Výpočet ohybových momentů.....	47
2.6.4 Kontrola dovoleného namáhání v ohybu	48
3 MECHANICKÁ ANALÝZA	49
3.1 TVORBA MODELU	49
3.2 MECHANICKÁ ANALÝZA NAVRŽENÉHO ODPOJOVAČE	51
3.2.1 Výsledky analýzy.....	53
3.3 OPTIMALIZACE NAVRŽENÉHO ODPOJOVAČE	55
3.3.1 Úprava stávajícího ramene.....	55
3.3.2 Mechanická analýza optimalizovaného odpojovače.....	55
3.3.3 Návrh ramene tvářeného z plechu	56
3.3.4 Mechanická analýza ramene odpojovače tvářeného z plechu	58
4 MOŽNOSTI OPTIMALIZACE NAVRŽENÉHO ODPOJOVAČE	60
4.1 MOŽNOSTI OPTIMALIZACE TRUBKOVÉHO RAMENE.....	60
4.2 RAMENO TVÁŘENÉ Z PLECHU	60
4.3 RAMENO Z PASOVINY	61
4.4 KONTAKTNÍ HLAVICE	61
4.5 PŘÍVODNÍ HLAVICE.....	61
ZÁVĚR	62
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	63
PŘÍLOHY	64

Seznam symbolů a zkratek

α ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$)	.... součinitel přestupu tepla z povrchu vodiče
γ ($\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$)	..... měrná elektrická vodivost
$\Delta\vartheta$ (K)	..... oteplení
μ (-)	..... korekční činitel
μ_0 ($\text{H}\cdot\text{m}^{-1}$)	..... permeabilita vakua
ρ ($\Omega\cdot\text{m}$), ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	měrný elektrický odpor, hustota
φ (-)	..... korekční činitel
σ (Pa), ($\text{A}\cdot\text{mm}^{-2}$)	normálové napětí, proudová hustota
τ (Pa)	..... smykové napětí
Ψ (-)	..... činitel změny průřezu
ω ($\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$)	..... úhlová rychlost
A (m^2)	..... ochlazovací plocha
a (m)	..... hloubka vniku
c ($\text{J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$)	..... měrná objemová tepelná kapacita
c (m)	..... délka odpojovací dráhy
d_1, d_2 (mm)	..... průměr
d_1, d_2 (m)	..... rozměry vypočtené z přeskokového napětí při spínacím impulsu a při atmosférickém impulsu
E (J), (Pa)	..... max. dovolená energie, modul pružnosti v tahu
F (N)	..... síla
f_r (Hz)	..... jmenovitý kmitočet
G (Pa)	..... modul pružnosti ve smyku
g ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	..... tíhové zrychlení
h (m)	..... výška
I_k (A)	..... jmenovitý krátkodobý výdržný proud
I_p (A)	..... jmenovitý dynamický výdržný proud
I_r (A)	..... jmenovitý proud
k (-)	..... koeficient souč. povrchového zhuštění
k_{pa} (-)	..... konstanta pro atmosférický impuls
k_{ps} (-)	..... konstanta pro spínací impuls
l (m)	..... délka

M (N·m)	moment
m (kg)	hmotnost
m (-)	konstanta závislá na druhu styku
n (-)	počet kontaktů v kontaktní hlavici
p (Pa), (-)	tlak, počet kuželíků v přívodní hlavici
Q (J)	teplo
R (Ω), (m)	činný odpor vodiče, vnější poloměr
r (m)	vnitřní poloměr
S (mm ²)	průřez, plocha
t (m)	tloušťka ledu
t_k (s)	doba zkratu
U_c (V)	jmenovité výdržné napětí při spínacím impulsu
U_p (V)	jmenovité výdržné napětí při atmosférickém impulsu
U_r (V)	jmenovité napětí
U_s (V)	maximální úbytek napětí na stykovém odporu
U_{sv} (V)	maximální úbytek napětí na stykovém odporu
V (m ³)	objem materiálu
W_o (m ³)	průřezový modul v ohybu
x (m)	rozměr
y (m), (mm)	rozměr, průhyb pružiny

Úvod

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na návrh a analýzu horizontálního odpojovače na napěťové hladině 420 kV se jmenovitým proudem 5000 A.

Text je rozdělen do čtyř částí. V první části se práce zabývá seznámením s odpojovači, vysvětlením jejich funkce, rozdělením podle různých kritérií a popisem jejich způsobů testování. Druhá část se podrobně věnuje konstrukčnímu návrhu horizontálního odpojovače. Tato část práce obsahuje výpočet izolačních vzdáleností, návrh proudové dráhy, návrh přívodní hlavice, návrh kontaktní hlavice a výpočet mechanických poměrů. V třetí části této práce je vytvořen model navrženého odpojovače v programu SolidWorks. Na vytvořeném modelu je provedena mechanická analýza levého ramene odpojovače. Výsledky analýzy jsou zhodnoceny a podle nich je provedena optimalizace. Pro srovnání více variant je provedena úprava stávajícího trubkového ramene na rameno z ohýbaného plechu, na kterém je také provedena mechanická analýza. V poslední části jsou zhodnoceny různé možnosti optimalizace navrženého odpojovače.

1 Seznámení s odpojovači

1.1 Definice, funkce

Odpojovač je spínací elektrický přístroj s téměř nulovou spínací schopností, dokáže sepnout jen velmi malé kapacitní proudy. Nevypíná zkraty, ale musí být navržen tak, aby nedošlo k jeho poškození, či otevření při průchodu zkratovým proudem. Kvůli absenci zhášecí komory jím lze manipulovat pouze v bezproudovém stavu. Jeho hlavní funkcí je bezpečné izolační oddělení částí elektrické sítě, čímž umožňuje provádět rekonfiguraci topologie sítě respektive spínací stanice. Na odpojené a uzemněné části sítě může pracovník bezpečně provádět opravu nebo revizi. K přeskoku v odpojovací dráze nesmí dojít ani při nebezpečném zvýšení napětí na živém úseku, které může být způsobeno například atmosférickým přepětím. Pokud dojde k přepětí, které překračuje jeho izolační pevnost, musí dojít k přeskoku na zem. Kvůli zvýšení bezpečnosti je izolační hladina odpojovačů o 15% vyšší než u ostatních spínacích přístrojů. Odpojovače jsou nejvyužívanější na hladinách vysokého až zvláště vysokého napětí, kdežto na hladině nízkého napětí jsou odpojovače používány méně. [1]

Odpojovač může být v poloze zapnuto nebo vypnuto, jejich rozdíl musí být dle klasické definice patrný na první pohled. Výjimku tvoří zapouzdrěná provedení. Vzhledem k tomu, že je odpojovač dálkově ovládaný přístroj, musí být spolehlivě hlášena jeho poloha. [2]

Kvůli větším nárokům na ochranu osob pracujících na odpojených částech vedení se odpojovače dále upravují a dělí na přípojnicové a vývodové: [1]

- Přípojnicový odpojovač provádí změny v rozvodně, bývá opatřen jedním nebo dvěma uzemňovači. [1]
- Vývodový odpojovač slouží k vyvedení výkonu z rozvodny, na straně vedení je opatřen uzemňovačem. Lze také využít samostatný uzemňovač pro možnost zapojení z druhé strany a s ohledem na kapacitu vedení. [1]

Uzemňovač je tvořen uzemňovacím nožem, který bývá součástí těchto odpojovačů. Po odpojení odpojovače dochází navíc k uzemnění. Uzemněn může být kterýkoli kontakt odpojovače. Pro větší bezpečnost se využívá blokování mezi přístroji, například právě

mezi odpojovačem a uzemňovačem. Je-li odpojovač v poloze vypnuto a zároveň je zajištěn uzemňovačem, nesmí dojít k jeho sepnutí. Jakmile je odpojovač sepnut, nesmí dojít k sepnutí uzemňovače. Spínat a vypínat odpojovač lze jen tehdy, když je uzemňovač v poloze vypnuto. Blokování bývá mechanické u ručně ovládaných odpojovačů. U dálkově ovládaných odpojovačů, například s tlakovzdušným pohonem, může být blokování i elektrické, pneumatické nebo kombinované. [1] Pohyb kontaktů odpojovače i uzemňovače je velmi pomalý. Doba odpojení i zapojení překračuje několik sekund. [2]

1.2 Dělení odpojovačů

Odpojovače můžeme dělit mnoha různými způsoby, ať už podle způsobu odpojení, podle umístění nebo podle druhu pohonu.

Podle pohybu nožových kontaktů:

- horizontální odpojovač – je dnes nejčastějším používaným typem

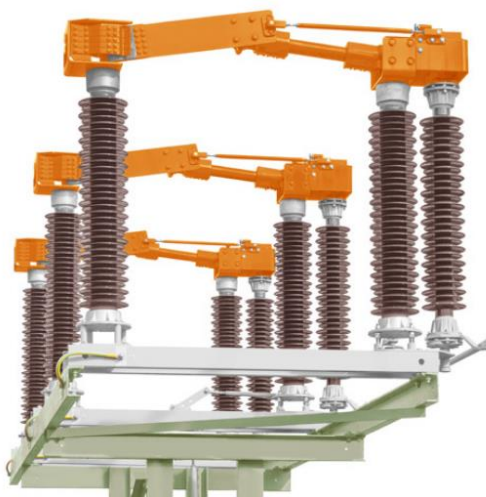


Obr. 1.1. Horizontální odpojovač 123kV [3]

- vertikální odpojovače – dále se dělí na pantografický, sklápěcí a nožový



Obr. 1.2. Pantografický odpojovač [3]



Obr. 1.3. Sklápěcí odpojovač [3]



Obr. 1.4. Nožový odpojovač [3]

Další provedení odpojovačů jsou velmi specifická a bývají vyráběny na přání zákazníka. [3]

Podle umístění odpojovače:

- vnitřní – **nn, vn**
- venkovní – **vn, vvn, zvn**

Odpojovače umístěné uvnitř a venku se od sebe liší převážně použitými materiály, konstrukcí izolace, protikorozní ochranou a utěsněním ložisek. [1]

Podle řazení pólů:

- za sebou – kýlové
- vedle sebe
- šikmé – pantografický odpojovač

Podle počtu pólů:

- jednopólové
- dvoupólové
- trojpólové
- vícepólové

Podle typu pohonu kontaktů:

- ruční pohon
- strojní pohon – může být řešen např. elektromotorem nebo stlačeným vzduchem
- jiný pohon

Podle uzemnění hlavního obvodu:

- bez zemního nože
- s jedním zemním nožem
- se dvěma zemními noži

1.3 Normální a zvláštní pracovní podmínky

Normální a zvláštní pracovní podmínky jsou definovány normou ČSN EN 62 271-1, jejíž názvem je Společná ustanovení pro vysokonapěťová spínací a řídicí zařízení. [4]

1.3.1 Normální pracovní podmínky

- Okolní teplota nesmí překročit $+40\text{ °C}$ a zároveň denní průměr této teploty nesmí přesáhnout $+35\text{ °C}$.
- Nejnižší teplota okolí je normou definována na tři části -5 °C , -15 °C a -25 °C .
- Nadmořská výška umístění odpojovače nepřesahuje 1000 m.
- Znečištění vzduchu je minimální, vzduch neobsahuje prach, kouř, nebo sůl.
- Dovolena vrstva ledu a námrazy je rozdělena normou do tří tříd. Třída 1 (1 mm), třída 10 (10 mm) a třída 20 (20 mm).
- Tlak větru nesmí přesáhnout 700 Pa, tato hodnota odpovídá rychlosti větru 34 m/s.
- Důležité je uvažovat kondenzaci nebo déšť, rychle měnící se teplotu a vliv slunečního záření (za jasného dne v poledne $1000\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$)
- Zanedbávají se vibrace, které vytváří vnější vlivy. [4]

1.3.2 Zvláštní pracovní podmínky

Použití odpojovače v podmínkách jiných než v normálních je možné, ale pouze na základě dohody mezi odběratelem a výrobcem zařízení. Musí být definována nadmořská výška, vibrace, stupeň znečištění, teplota a vlhkost okolí. [4]

1.4 Charakteristické hodnoty

Charakteristické hodnoty odpojovačů jsou definovány normou ČSN EN 62 271-102.

1.4.1 Jmenovité napětí

Je to nejvyšší napětí sítě, pro kterou je odpojovač navržen. Hodnota jmenovitého napětí je volena z normalizovaných řad. Značí se U_r . [5]

1.4.2 Jmenovitá izolační hladina

Tato hladina je určena pomocí jmenovitého krátkodobého výdržného střídavého napětí trvajícím jednu minutu s průmyslovým kmitočtem proti zemi, mezi póly, v odpojovací dráze a také jmenovitým výdržným napětím při impulsu vytvořeném atmosférickými jevy. [5]

1.4.3 Jmenovitý kmitočet

Normou definované hodnoty jmenovitého kmitočtu jsou 16 a 2/3 Hz, 25 Hz, 50 Hz a 60 Hz. Běžná hodnota jmenovitého kmitočtu v České republice je 50 Hz. Jmenovitý kmitočet se značí f_r . [5]

1.4.4 Jmenovitý proud

Je to efektivní hodnota proudu, kterou odpojovač musí přenášet nepřerušovaně za daných podmínek použití a funkce. Značí se I_r . [5]

1.4.5 Dovolené oteplení

Při oteplení jakékoliv části odpojovače při maximální okolní teplotě +40 °C nesmí dojít k převýšení hodnoty oteplení, která je definována normou ČSN EN 62 271-1. Norma dále definuje podmínky pro tyto zkoušky. [5]

1.4.6 Jmenovitý krátkodobý výdržný proud

Je to efektivní hodnota proudu, kterou odpojovač může přenášet v zapnutém stavu po definovanou dobu a za daných podmínek. Tento proud určuje tepelnou odolnost proudové dráhy a značí se I_k . [5]

1.4.7 Jmenovitý dynamický výdržný proud

Je to okamžitá maximální hodnota první půlvlny zkratového proudu, který odpojovač přeneseme bez poškození v zapnutém stavu a za daných podmínek. Normalizovaná hodnota tohoto proudu je definována jako 2,5 násobek jmenovitého krátkodobého proudu. Tento proud určuje, jakou má proudová dráha mechanickou pevnost. Dále určuje mechanickou pevnost podpěrek. Značí se I_p . [5]

1.4.8 Jmenovitá doba zkratu

Jmenovitá doba zkratu je doba, po kterou je zapnutý odpojovač schopný přenášet jmenovitý krátkodobý proud. Norma udává hodnotu doby zkratu 1 s, ale pokud je to nezbytné, je možné volit tuto dobu kratší nebo delší než 1 s. Doporučené hodnoty doby zkratu jsou 0,5 s, 2 s a 3 s. Jmenovitá doba zkratu se značí t_k . [5]

1.5 Typové zkoušky

Typové zkoušky slouží k ověření vlastností odpojovačů, zařízení je pohánějící a dalších pomocných zařízení. Typové zkoušky se provádějí na nejvýše čtyřech zkušebních vzorcích daného odpojovače, pokud není příslušnou normou IEC stanoveno jinak. Důvodem testování tolika kusů je ten, aby si uživatel byl jistý, že testovaný odpojovač opravdu reprezentuje jím zakoupený odpojovač. Všechny kusy daného typu odpojovače musí přesně odpovídat výkresové dokumentaci. Každý kus tedy musí být reprezentativním a musí na něm být provedena minimálně jedna typová zkouška. Každá jednotlivá zkouška musí být prováděna na plně smontovaném zařízení. Na začátku zkoušky musí být zařízení ve stavu novém a čistém. Zařízení může být i starší, avšak musí být opět uvedené do původního stavu. Toto uvedení do původního stavu se provádí podle daných norem IEC. [5]

1.5.1 Zkoušky elektrické pevnosti izolace

Povrch izolace musí být před zkouškou důkladně očištěn. Pokud izolace zařízení bude vystavena volně na vzduchu, je nutno při zkoušce využít korekční činitel K_t . Pokud se provádí zkoušky za sucha u zařízení, která budou vystavena volně na vzduchu, je nezbytné uvažovat korekční činitel vlhkosti. U venkovních zařízení se dále provádí zkouška za deště, při které je izolace postříkována vodou s požadovaným odporem. [5] [6]

Zkouška pomocí střídavého výdržného napětí

Napětí na zařízení musí být postupně zvyšováno až do hodnoty zkušebního napětí. Toto napětí musí být na zařízení přiloženo po určitou dobu, poté musí být rychle sníženo, ne však odpojeno, aby nedošlo k nežádoucímu přechodnému ději. [6] Pokud nedojde k žádnému průraznému výboji na zařízení, lze jej považovat za vyhovující. [5]

Zkouška pomocí impulsního napětí

Při této zkoušce je na zařízení přiloženo patnáct po sobě jdoucích impulsů s předdefinovaným výdržným napětím. Pokud na zařízení s neobnovující se izolací nedojde k průraznému výboji, lze jej považovat za vyhovující. Na zařízení s obnovující se izolací jsou povoleny dva průrazné výboje z patnácti. [5]

1.5.2 Zkouška rádiového rušení

Tato zkouška je prováděna na zařízeních o napěťové hladině 123 kV a vyšší. Provádí se v zapnutém a ve vypnutém stavu. V zapnutém stavu se zkušební napětí přiloží mezi svorky a uzemněnou kostru. Ve stavu vypnutém se zkušební napětí přiloží mezi jednu svorku a svorky zbylé, které jsou spojeny s uzemněnou kostrou. Při měření musí být základní rám uzemněn. Testované zařízení musí být suché a čisté, jeho teplota musí odpovídat teplotě okolí. V měřícím obvodu se používá kmitočet 0,5 MHz. Samotné měření se provádí postupným zvyšováním napětí na hodnotu $1,1 U_r$, na této hladině se udržuje po dobu pěti minut. Potom se napětí snižuje na hodnotu $0,3 U_r$. Celý postup se zopakuje. Při posledním snižování hodnoty napětí se z naměřených hodnot sestaví graf rádiového rušení v závislosti na napětí. Vzniklou křivku nazýváme charakteristikou rádiového rušení. Zařízení je vyhovující, pokud rádiové rušení na maximální hodnotě napětí nepřekročí hladinu $2500 \mu\text{V}$. [5]

1.5.3 Měření elektrického odporu

Na zařízení je prováděno měření elektrického odporu hlavního obvodu z důvodu srovnání odporu zařízení po typové zkoušce oteplením a ostatních zařízení po kusových zkouškách. Odpor je měřen stejnosměrným proudem tím způsobem, že se měří úbytek napětí nebo přímo elektrický odpor. Odpor je měřen mezi svorkami každého pólu proudem o hodnotě mezi 50 A a jmenovitým proudem. Změřené hodnoty úbytku napětí nebo odporu se musí uvádět do protokolu o typových zkouškách. Dále zde musí být uvedeny podmínky zkoušek, jako je proud a teplota okolí. [5]

1.5.4 Zkoušky oteplení

Zkouška oteplení hlavních obvodů je prováděna na novém zařízení s čistými kontakty. Musí být prováděna v uzavřené místnosti, kde neproudí vzduch. U zařízeních, které je možné instalovat v různých polohách, se zkouška provádí v té nejnejpříznivější. Tato zkouška je prováděna při jmenovitém proudu I_r a jmenovitém kmitočtu s tolerancí 2 %. Teplota je měřena teploměry nebo termoelektrickými články, které jsou umístěny na nejteplejších místech. Aby bylo možné zjistit tepelnou časovou konstantu, musí se hodnoty odečítat v časových intervalech předepsaných příslušnou normou. Během zkoušky se počítá s okolní teplotou v rozsahu od $+10 \text{ }^\circ\text{C}$ do $+40 \text{ }^\circ\text{C}$, pokud tomu tak není,

je nutné počítat s korekcí. Oteplení částí zařízení nesmí přesáhnout hodnoty pro ně stanovené, pokud jsou tyto hodnoty překročeny, nelze zařízení označit za vyhovující. [5]

1.5.5 Zkoušky krátkodobým a dynamickým výdržným proudem

Při této zkoušce jsou hlavní a uzemňovací obvody prověřeny jestli jsou schopny odolat jmenovitému krátkodobému výdržnému proudu a jmenovitému dynamickému výdržnému proudu. Tyto proudy jsou vysvětleny výše v kapitole 1.4.6 a 1.4.7. Zkouška probíhá při jakékoliv teplotě okolí a vhodném napětí za jmenovitého kmitočtu, který může mít odchylku až 10 %. Odpojovač musí být zkoušen kompletně smontovaný i s pohonem a to v té nejnepríznivější poloze pohonu a kontaktů. Zařízení je zkoušeno i v zapnuté poloze, musí mít nové a čisté kontakty. Při zkoušce krátkodobým výdržným proudem musí tento proud procházet zařízením po dobu, která odpovídá jmenovité době zkratu t_k . Při zkoušce dynamickým výdržným proudem musí být doba měření delší než 0,3 s. Zařízení musí být schopno přenášet tyto proudy bez výrazné mechanické deformace, oddálení kontaktů nebo hoření oblouku. Při této zkoušce je dovoleno přesáhnout definované hodnoty oteplení zařízení. Po absolvování zkoušky musí být zařízení schopno normálního provozu, tedy musí přenášet jmenovitý proud bez přesáhnutí definované hodnoty oteplení. Pro uzemňovače, které nejsou součástí odpojovače, platí stejné požadavky. [5]

1.5.6 Zkouška elektromagnetické kompatibility

Tato zkouška je prováděna pouze u sekundární techniky, hlavní zařízení je testováno pomocí zkoušky rádiového rušení, viz kapitola 1.5.2. Provádí se u uzemňovačů, které mají schopnost zapínat do zkratu. Tyto uzemňovače se testují sérií zapnutí za sebou. Při zapínání zkratu nesmí uzemňovač vykazovat zvýšené známky namáhání. Během zkoušky se měří hodnota indukovaného napětí, ta nesmí překročit hodnotu napětí 1,6 kV. Po této zkoušce musí být zařízení ve stejném stavu jako před ní. [5]

1.5.7 Zkouška mechanické trvanlivosti

Během zkoušky mechanické trvanlivosti dochází k 1000 spínacím cyklům při poloviční jmenovité hodnotě statického namáhání působící na daný odpojovač.

Zkouška probíhá v beznapětovém stavu hlavního obvodu. Spínací cyklus znamená dosažení polohy zapnuto a vypnuto. V průběhu zkoušky je povoleno mazání otočných částí, žádný další zásah povolen není. Po této zkoušce nesmí jevit části odpojovače větší známky opotřebení. [5]

1.5.8 Ověření funkce v obtížných podmínkách ledu a námrazy

V některých klimatických podmínkách může vrstva ledu a námrazy být tak velká, že velice stěžuje funkci odpojovače a uzemňovače. Podle normy jsou stanoveny tři třídy velikosti ledu a námrazy, třída 1 dovoluje maximálně 1 mm ledu a námrazy, třída 10 dovoluje maximálně 10 mm ledu a námrazy a třída 20 dovoluje maximálně 20 mm ledu a námrazy. Z toho se poslední dvě třídy řadí mezi obtížné podmínky. Tato zkouška je prováděna jen, pokud výrobce udává správnou funkci i při těchto obtížných podmínkách. Zařízení může být testováno pouze kompletně smontované. Odpojovač se testuje ze zapnuté i z vypnuté polohy. Pomocí skrápění se na odpojovači vytvoří potřebná vrstva průhledného ledu. To může probíhat buď ve speciální komoře, ve které je teplota vzduchu okolo $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, nebo také venku. Po vytvoření potřebné vrstvy ledu se zařízení nechá 4 hodiny v konstantní teplotě, díky tomu budou mít všechny části zařízení stejnou teplotu. Odpojovač s ručním pohonem se může považovat za vyhovující, pokud se dosáhne plně zapnuté a vypnuté polohy bez jakéhokoliv poškození, které by mohlo ovlivnit jeho funkci. Odpojovač se strojním pohonem se může považovat za vyhovující, pokud je možné jej na poprvé plně ovládat tak, že je dosaženo plně polohy zapnuto a vypnuto. Při tom musí být pohon napájen jmenovitým napětím, nebo natlakován na provozní tlak. [5]

1.5.9 Ověření funkce při mezních teplotách

Tato zkouška se provádí pouze u odpojovačů pro venkovní použití, uživatel si o ni musí zažádat. Sepnutý odpojovač je společně s pohonem umístěn do zkušební komory. Při měření za minimální teploty okolí se teplota sníží na danou hodnotu podle třídy odpojovače. Tato teplota se udržuje po dobu 12 hodin. Při měření za maximální teploty se teplota vzduchu postupně zvyšuje na hodnotu $40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tato teplota se udržuje nejméně 4 hodiny. Po těchto zkouškách musí být odpojovač schopen tří po sobě jdoucích spínacích cyklů. Tyto cykly musí být schopen provést za minimální i maximální spotřebované energie. Hodnoty těchto energií předepisuje příslušná norma. [5]

1.6 Kusové zkoušky

Těmito zkouškami jsou odhalovány vady materiálu a vady způsobené ve výrobě. Nesmí při nich dojít ke zhoršení vlastností a spolehlivosti testovaného zařízení. Kusové zkoušky jsou realizovány na každém vyrobeném kusu. Provádějí se již ve výrobním podniku. Protokoly o kusových zkouškách se běžně nevydávají, pokud nedojde mezi výrobcem a uživatelem zařízení k dohodě. Mezi tyto zkoušky se řadí například zkouška elektrické pevnosti izolace a měření elektrického odporu, které jsou popsány výše. Dále sem patří zkouška mechanické funkce, která je prováděna pro ověření, zda odpojovač nebo uzemňovač plní svou funkci za podmínek, které mu předepisuje příslušná norma. Tato zkouška se provádí v beznapěťovém stavu hlavního obvodu a ověřuje se správná zapínací a vypínací funkce konkrétního odpojovače nebo uzemňovače. [5]

2 Konstrukční návrh odpojovače

Úkolem této diplomové práce bylo navrhnout horizontální odpojovač zadaných parametrů. Odpojovač byl navrhován pro jmenovitý proud 5000 A a odpovídající hodnoty zkratového proudu. Proud byl zvolen po konzultaci s výrobcem odpojovačů firmou SERW, která se setkává s poptávkami na odpojovač s těmito parametry.

Tab. 2.1. Zadané parametry navrhovaného odpojovače

Jmenovité napětí U_r	420 kV
Jmenovitá izolační hladina	
Jm. výdržné napětí při spínacím impulsu U_c :	
proti zemi a ve vypínací dráze	1050 kV
v odpojovací dráze	1245 kV
Jm. výdržné napětí při atmosférickém impulsu U_p :	
proti zemi a mezi póly	1425 kV
ve vypínací a v odpojovací dráze	1365 kV
Jmenovitý kmitočet f_r	50 Hz
Jmenovitý proud I_r	5 kA
Jmenovitý krátkodobý výdržný proud I_k	80 kA
Jmenovitý dynamický výdržný proud I_p	200 kA
Jmenovitá doba zkratu t_k	1 s
Minimální mechanická životnost	3000 cyklů
Pracovní prostředí	venkovní

2.1 Určení izolační podpěrky

Izolační podpěrky nesou proudovou dráhu. Jsou vyráběny z elektrotechnického porcelánu, který má vysokou mechanickou a elektrickou pevnost. Vzhledem ke skutečnosti, že izolační podpěrky jsou normalizované, bude v této diplomové práci počítána pouze minimální výška této podpěrky a následně její předpokládané mechanické

zatížení. Výška horní a dolní příruby izolační podpěrky je zvolena dle normy ČSN IEC 273. Průměr příruby je taktéž zvolen dle normy. [7]

Zvolené hodnoty:

- výška horní příruby $h_h = 100$ mm
- výška dolní příruby $h_d = 100$ mm
- průměr příruby $D_p = 240$ mm

Návrh výšky podpěrky ze zkušebních napětí

Výška izolátorové podpěrky je určena minimální izolační vzdáleností vůči zemi. Ta se vypočítá ze zkušebních napětí, které jsou dané normou. Při výpočtu se vychází z podobnosti rozložení elektrického pole na tyčovém jiskřišti. Přesné hodnoty přeskokových napětí lze zjistit pouze na prototypu. Pro napěťovou hladinu 420 kV je předepsána zkouška spínacím impulsem 200/2000 μ s a atmosférickým impulsem 1,2/50 μ s. Je uvažována nejnepříznivější polarita napětí, kterou je kladná polarita proti zemi. Dále jsou popsány vztahy mezi doskokem d a přeskokovým napětím [7] :

- 1) Spínací impuls 200/2000 μ s, kladný hrot proti uzemněnému hrotu:

$$U_c = 253 + 0,343 \cdot d \text{ (kV; mm)} \quad \text{pro } d = 2000 \text{ až } 4000 \text{ mm} \quad (2.1)$$

- 2) Atmosférický impuls 1,2/50 μ s, kladný hrot proti uzemněnému hrotu:

$$U_p = 45 + 0,57 \cdot d \text{ (kV; mm)} \quad \text{pro } d \geq 300 \text{ mm} \quad (2.2)$$

$$U_p = 148 + 0,545 \cdot d \text{ (kV; mm)} \quad \text{pro } d = 2000 \text{ až } 4000 \text{ mm} \quad (2.3)$$

Výdržná napětí jsou dána normou ČSN EN 62 271-1. Jmenovité výdržné napětí při spínacím impulsu proti zemi U_c a jmenovité výdržné napětí při atmosférickém impulsu proti zemi U_p jsou uvedeny v tabulce 2.1. Dále je nutné odvodit hodnotu přeskokových napětí pomocí konstant:

- Konstanta pro spínací impuls: $k_{ps} = 1,15$
- Konstanta pro atmosférický impuls: $k_{pa} = 1,20$ až $1,25$ (volím $k_{pa} = 1,23$)

$$U_{c200/2000} = U_c \cdot k_{ps} = 1050 \cdot 1,15 = 1207,5 \text{ kV} \quad (2.4)$$

$$U_{p1,2/50} = U_p \cdot k_{pa} = 1425 \cdot 1,23 = 1752,75 \text{ kV} \quad (2.5)$$

Po úpravě rovnic (2.1), (2.2) a (2.3) a následném dosazení přeskokových napětí platí:

$$d_1 = \frac{U_{c200/2000}}{0,343} - \frac{253}{0,343} = \frac{1207,5}{0,343} - \frac{253}{0,343} = 2782,799 \text{ mm} \quad (2.6)$$

d_1 ... minimální izolační vzdálenost proti zemi vypočtená z přeskokového napětí při spínacím impulsu

$$d_2 = \frac{U_{p1,2/50}}{0,57} - \frac{45}{0,57} = \frac{1752,75}{0,57} - \frac{45}{0,57} = 2996,053 \text{ mm} \quad (2.7)$$

$$d_2 = \frac{U_{p1,2/50}}{0,545} - \frac{148}{0,545} = \frac{1752,75}{0,545} - \frac{148}{0,545} = 2944,495 \text{ mm} \quad (2.8)$$

d_2 ... minimální izolační vzdálenost proti zemi vypočtená z přeskokového napětí při atmosférickém impulsu

Pro určení minimální izolační vzdálenosti proti zemi se vychází z větší z hodnot d_1 a d_2 . Touto hodnotou je minimální izolační vzdálenost proti zemi vypočtená z přeskokového napětí při atmosférickém impulsu $d_2 = 2996,053 \text{ mm}$. Vzhledem k této hodnotě volím izolační vzdálenost proti zemi $d = 3000 \text{ mm}$. Izolátor bude sestaven ze tří dílů, z nichž každý bude mít délku 1000 mm . V tomto skládaném izolátoru bude použito vnitřních přírub, proto se při výpočtu celkové výšky izolátoru počítá pouze se čtyřmi přírubami místo šesti viz (2.9).

Celková výška izolátorové podpěrky:

$$h = d + 2 \cdot h_h + 2 \cdot h_d = 3000 + 2 \cdot 100 + 2 \cdot 100 = 3400 \text{ mm} \quad (2.9)$$

2.2 Určení izolační vzdálenosti v odpojovací dráze

Hlavní podmínkou při výpočtu izolačních vzdáleností je, aby v případě působení přepětí na rozpojený odpojovač došlo k přeskoku mezi fází a zemí a nikoliv v odpojovací dráze. Jmenovité výdržné napětí při spínacím impulsu v odpojovací dráze U_c a jmenovité výdržné napětí při atmosférickém impulsu v odpojovací dráze U_p jsou uvedeny v tabulce 2.1. Dále je nutné odvodit hodnotu přeskokových napětí pomocí konstant:

- Konstanta pro spínací impuls: $k_{ps} = 1,15$
- Konstanta pro atmosférický impuls: $k_{pa} = 1,20$ až $1,25$ (volím $k_{pa} = 1,23$)

Dosazením do vzorců (2.4) a (2.5) získáme hodnoty přeskokových napětí:

$$U_{c200/2000} = U_c \cdot k_{ps} = 1245 \cdot 1,15 = 1431,75 \text{ kV}$$

$$U_{p1,2/50} = U_p \cdot k_{pa} = 1365 \cdot 1,23 = 1678,95 \text{ kV}$$

Po úpravě rovnic (2.1), (2.2) a (2.3) a následném dosazení přeskokových napětí platí:

$$d_1 = \frac{U_{c200/2000}}{0,343} - \frac{253}{0,343} = \frac{1431,75}{0,343} - \frac{253}{0,343} = 3436,589 \text{ mm} \quad (2.10)$$

d_1 ... minimální délka odpojovací dráhy vypočtená z přeskokového napětí při spínacím impulsu

$$d_2 = \frac{U_{p1,2/50}}{0,57} - \frac{45}{0,57} = \frac{1678,95}{0,57} - \frac{45}{0,57} = 2866,579 \text{ mm} \quad (2.11)$$

$$d_2 = \frac{U_{p1,2/50}}{0,545} - \frac{148}{0,545} = \frac{1678,95}{0,545} - \frac{148}{0,545} = 2809,083 \text{ mm} \quad (2.12)$$

d_2 ... minimální délka odpojovací dráhy vypočtená z přeskokového napětí při atmosférickém impulsu

Pro určení minimální délky odpojovací dráhy se vychází z větší z hodnot d_1 a d_2 . Touto hodnotou je minimální délka odpojovací dráhy vypočtená z přeskokového napětí při spínacím impulsu $d_1 = 3436,589$ mm. Délka odpojovací dráhy byla po konzultaci zvolena podle uvedeného požadavku firmy ČEPS, která požaduje délku $c = 3700$ mm.

2.3 Návrh proudové dráhy

Proudová dráha odpojovače se skládá z přívodních hlavice, ramen odpojovače, kontaktní hlavice a kontaktního roubíku. Je nesena dvěma otočnými izolátory, které jsou uloženy na patních ložiskách. K převodu proudu mezi pevnou částí a otočným ramenem dochází v přívodní hlavici pomocí odpružených valivých kuželíků. Přívodní hlavice jsou dále spojeny s rameny odpojovače, na jejichž koncích je připevněna kontaktní hlavice a kontaktní roubík. Rameno odpojovače může být vyrobeno ze standardních profilů (trubka, pasovina apod.) nebo v závislosti na dostupné technologii například dle vlastního návrhu z ohýbaného polotovaru – plechu. Kontaktní hlavice je tvořena několika páry odpružených kontaktů. Přesný počet kontaktů je určen podle velikosti proudu procházejícího proudovou dráhou a mechanického namáhání kontaktních míst. Kontakty jsou vyráběny z mědi, která je kvůli zlepšení vlastností postříbřena. [8]

2.3.1 Návrh ramen odpojovače

Ramena odpojovače se navrhují na jmenovitý proud, který musí být přenesen, aniž by oteplení ramene překročilo povolenou mez dle ČSN EN 62271-1 tabulka 3. Dále se navrhují na krátkodobý zkratový proud, jehož oteplení nesmí způsobit strukturální změny v materiálu ramen, respektive změny vlastností materiálu. Ramena odpojovače, jež navrhují, budou tvořena hliníkovou trubkou na konci zploštělou. Tato varianta je častěji používána pro odpojovače větších rozměrů, tedy pro větší proudové zatížení. [8] [9]

Dimenzování na působení jmenovitého proudu

Aby byl materiál ramene hospodárně využit, je dobré volit tloušťku stěny s ohledem na omezení vlivu skinefektu. Výpočet hloubky vniku pro hliník:

$$a_{Al} = \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \gamma_{Al} \cdot \mu_0}} = \sqrt{\frac{2}{(2 \cdot \pi \cdot 50) \cdot (2,86 \cdot 10^7) \cdot (4 \cdot \pi \cdot 10^{-7})}} = 0,013 \text{ m} \quad (2.13)$$

$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ (rad·s⁻¹) ... úhlová rychlost

$\gamma_{Al} = 2,86 \cdot 10^7$ (S·m⁻¹) ... měrná elektrická vodivost hliníku při 60°C

$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ (H·m⁻¹) ... permeabilita vakua

Výpočet minimálního průřezu ramene:

$$S_{min} = \frac{I_r}{\sigma_{dov}} = \frac{5000}{1,5} = 3333,333 \text{ mm}^2 \quad (2.14)$$

$I_r = 5000 \text{ (A)}$... jmenovitý proud

$\sigma_{dov} = 1,5 \text{ (A}\cdot\text{mm}^{-2})$... zvolená dovolená proudová hustota

Výpočet rozměrů ramene (hliníkové trubky):

Uvažována je trubka o tloušťce stěny o hodnotě hloubky vniku pro hliník.

$$S = \pi \cdot (R^2 - r^2) \quad (2.15)$$

$$R = a_{Al} + r \quad (2.16)$$

$R \text{ (mm)}$... vnější poloměr trubky

$r \text{ (mm)}$... vnitřní poloměr trubky

Úpravou a dosazením rovnic (2.15) a (2.16) dostaneme:

$$S = \pi \cdot ((a_{Al} + r)^2 - r^2) \quad (2.17)$$

$$\frac{S}{\pi} = a_{Al}^2 + 2 \cdot a_{Al} \cdot r - r^2 + r^2 \quad (2.18)$$

$$r' = \frac{\frac{S_{min}}{\pi} - a_{Al}^2}{2 \cdot a_{Al}} = \frac{\frac{3333,333}{\pi} - 13^2}{2 \cdot 13} = 34,309 \text{ mm} \Rightarrow d_2' = 68,618 \text{ mm} \quad (2.19)$$

$$R' = a_{Al} + r' = 13 + 34,309 = 47,309 \text{ mm} \Rightarrow d_1' = 94,618 \text{ mm} \quad (2.20)$$

$d_2' \text{ (mm)}$... vypočtený vnitřní průměr trubky

$d_1' \text{ (mm)}$... vypočtený vnější průměr trubky

Skutečné rozměry trubky volím podle rozměrů vyráběných firmou Alupa viz [10].

Zvolil jsem trubku z elektrovedného hliníku 130x10 EN AW-1050.

$r = 55 \text{ (mm)}$... skutečný vnitřní poloměr trubky

$R = 65 \text{ (mm)}$... skutečný vnější poloměr trubky

$d_2 = 110 \text{ (mm)}$... skutečný vnitřní průměr trubky

$d_1 = 130 \text{ (mm)}$... skutečný vnější průměr trubky

Výpočet skutečného průřezu trubky:

$$S_{skut} = \frac{\pi}{4} \cdot (d_1^2 - d_2^2) = \frac{\pi}{4} \cdot (130^2 - 110^2) = 3769,911 \text{ mm}^2 \quad (2.21)$$

Výpočet skutečné proudové hustoty:

$$\sigma_{skut} = \frac{I_r}{S_{skut}} = \frac{5000}{3769,911} = 1,326 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2} \quad (2.22)$$

Navržené rozměry trubky vyhovují dle vypočteného průřezu, kde platí $S_{\min} < S_{skut}$. Dále byla vypočtena hodnota proudové hustoty, která taktéž vyhověla a platí $\sigma_{dov} > \sigma_{skut}$.

2.3.2 Oteplení proudové dráhy

Oteplení je zvýšení teploty materiálu oproti teplotě okolního prostředí. Oteplení odpojovacího ramene způsobují ztráty výkonu, vznikající při provozu. Tyto ztráty jsou převážně Jouleovy, které vznikají průchodem proudu materiálem. Pokud prochází vodičem s odporem R elektrický proud I , tak v něm vznikají tepelné ztráty $dQ = R \cdot I^2 \cdot dt$ v jakémkoli okamžiku dt . Tepelné ztráty se dělí na dvě části, z nichž jedna část je odvedena ochlazovací plochou vodiče do okolí. Ta je rovna $\alpha_0 \cdot A \cdot dt$. Druhá část tepelných ztrát v materiálu zůstává a otepluje jej o $d\theta$. Ta určuje vztah $c \cdot V \cdot d\theta$. Z toho vyplývá: [1]

$$R \cdot I^2 dt = \alpha_0 \cdot A \cdot \Delta\theta dt + c \cdot V d\theta \quad (2.23)$$

R (Ω) ... činný odpor vodiče

I (A) ... jmenovitý proud

$\alpha_0 = 12$ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$) ... součinitel přestupu tepla z povrchu vodiče

A (m^2) ... velikost ochlazovací plochy

$\Delta\theta$ ($^\circ\text{C}$) ... okamžité oteplení tělesa vůči okolí

c ($\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$) ... měrná objemová tepelná kapacita

V (m^3) ... objem materiálu ramene

Oteplení ramene procházejícím jmenovitým proudem

Pokud prochází konstantní proud vodičem dostatečně dlouho, dostane se vodič do teplotně ustáleného stavu. V tomto stavu platí $\Delta\theta/dt = 0$ a $\Delta\theta = \Delta\theta_\infty$. Z toho vyplývá: [1]

$$R \cdot I^2 = \alpha_0 \cdot A \cdot \Delta\theta_\infty \quad (2.24)$$

Pokud se materiál dostane do ustáleného stavu a dosáhne oteplení povrchu $\Delta\theta_\infty$, nastane za určitých podmínek tepelná rovnováha. Tedy veškeré teplo, které vznikne ve vodiči, se přeneše jeho povrchem do okolí. S ohledem na bezpečnost a spolehlivost zařízení nesmí hodnota oteplení překročit povolenou mez, kterou určuje příslušná norma s ohledem na typ materiálu a jeho použití. [1]

Výpočet činného odporu vodiče:

$$R = k \cdot \rho_{Al} \cdot \frac{l}{S_{skut}} = 1,03 \cdot 3,5 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{1}{3769,911 \cdot 10^{-6}} = 9,56 \cdot 10^{-6} \Omega \quad (2.25)$$

Výpočet velikosti ochlazovací plochy:

$$A = \pi \cdot d_1 \cdot l = \pi \cdot 130 \cdot 10^{-3} \cdot 1 = 0,408 \text{ m}^2 \quad (2.26)$$

Úpravou rovnice (2.24) získáme:

$$\Delta\theta_\infty = \frac{R \cdot I^2}{\alpha_0 \cdot A} = \frac{9,56 \cdot 10^{-6} \cdot 5000^2}{12 \cdot 0,408} = 48,78 \text{ }^\circ\text{C} \quad (2.27)$$

R (Ω) ... činný odpor vodiče

I (A) ... jmenovitý proud

$\alpha_0 = 12$ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$) ... součinitel přestupu tepla z povrchu vodiče

$k = 1,03$ (-) ... koeficient součinitele povrchového zhuštění

$\rho_{Al} = 3,5 \cdot 10^{-8}$ ($\Omega \cdot \text{m}$) ... měrný odpor hliníku při teplotě 60°C

A (m^2) ... velikost ochlazovací plochy

Oteplení ramene procházejícím zkratovým proudem

Zkratový proud prochází ramenem odpojovače jen velmi krátkou dobu, v tomto případě 1 s. Z tohoto důvodu se nemusí uvažovat odvod tepla do okolí. Veškeré teplo se tady akumuluje v rameni odpojovače a tím mu zvyšuje teplotu. Tomuto jevu se říká adiabatický ohřev. Průchodem zkratového proudu nesmí dojít ke zvýšení teploty ramene nad povolenou mez. Pokud k tomu dojde, dochází k rekrystalizaci materiálu, což je nežádoucí jev a počítá se s $\alpha_0 = 0$ a rovnice přejde do tvaru: [1]

$$R \cdot I^2 \cdot dt = c \cdot V \cdot d\vartheta \quad (2.28)$$

Výpočet objemu materiálu ramene:

$$V = S_{skut} \cdot l = 3769,911 \cdot 10^{-6} \cdot 1 = 3,77 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \quad (2.29)$$

Integrací za vstupních podmínek $t = 0$, $\Delta\vartheta = \Delta\vartheta_{kd} = 0$ dostaneme velikost krátkodobého oteplení $\Delta\vartheta_{kd}$ za dobu t_k : [1]

$$\Delta\vartheta_{kd} = \frac{R \cdot I_k^2 \cdot t_k}{c_{Al} \cdot V} = \frac{9,56 \cdot 10^{-6} \cdot 80000^2 \cdot 1}{2,38 \cdot 10^6 \cdot 3,77 \cdot 10^{-3}} = 6,821 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2.30)$$

$I_k = 80$ (kA) ... jmenovitý krátkodobý výdržný proud

$t_k = 1$ (s) ... jmenovitá doba zkratu

$c_{Al} = 2,38 \cdot 10^6$ (J·m⁻³·K⁻¹) ... měrná objemová tepelná kapacita hliníku

Celkové oteplení ramene

Nejhorší případ, který může nastat je, když po velmi dlouhé době, po kterou procházel vodičem jmenovitý proud, dojde ke zkratu a tedy k účinku obou proudů, jmenovitého i krátkodobého. Poté je výsledná teplota ramene součtem teploty okolí, hodnoty oteplení způsobené procházejícím jmenovitým proudem a hodnoty oteplení způsobené procházejícím krátkodobým proudem. Teplota okolí je uvažována 40 °C. [1]

$$\Delta\vartheta_c = \Delta\vartheta_\infty + \Delta\vartheta_{kd} = 48,78 + 6,821 = 55,601 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2.31)$$

$$\vartheta_c = \vartheta_0 + \Delta\vartheta_c = 40 + 55,601 = 95,601 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2.32)$$

$\Delta\vartheta_c$ (°C) ... celkové oteplení ramene

$\Delta\vartheta_{\infty}$ (°C) ... oteplení jmenovitým proudem

$\Delta\vartheta_{kd}$ (°C) ... oteplení krátkodobým proudem

ϑ_c (°C) ... celková teplota odpojovacího ramene

$\vartheta_0 = 40$ (°C) ... teplota okolí

Oteplení pro jmenovitý proud dosahovalo 48,78 °C. Tato hodnota vyhovuje při srovnání s normativním požadavkem na maximální oteplení použitých postříbřených kontaktů 65 °C. Předpokladem je, že oteplení ramene nesmí být vyšší, aby nedocházelo k šíření tepla z ramene do kontaktní hlavice.

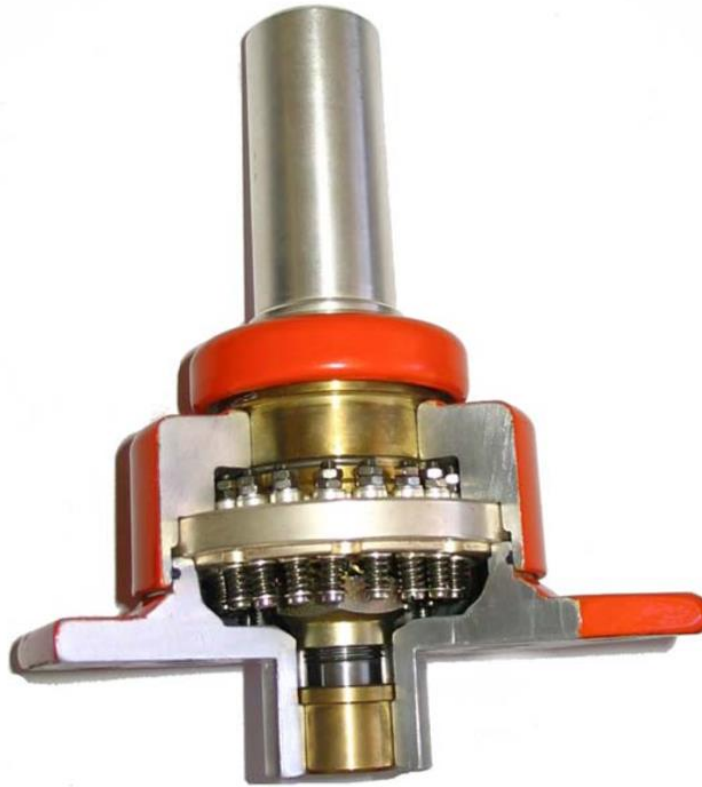
Celkové oteplení ramene je dle výpočtu 55,601 °C. Po přičtení této hodnoty celkového oteplení k uvažované hodnotě okolí vyšla celková hodnota teploty odpojovacího ramene 95,601 °C. Materiálem ramene je hliník a jeho dovolená teplota je do 200 °C. Po srovnání těchto hodnot je zřejmé, že navržené rameno vyhovuje na oteplení, které způsobuje jmenovitý i krátkodobý proud. Rozdíl mezi dovolenou teplotou hliníku a celkovou teplotou ramene je značný, avšak musíme brát v úvahu i oteplení kontaktními spoji, které ve výpočtu není uvažováno. Proto jisté naddimenzování není na škodu.

2.4 Návrh přívodní hlavice

Přívodní hlavice je místo, kde dochází k přechodu proudu z pevné přívodní svorky na otočnou část odpojovače. Proud do přívodní hlavice přivádí přívodní vodič, který je šrouby uchycen k pevné přívodní svorce [9]. Přívodní hlavice může být řešena různě. V této práci se budu zabývat návrhem typu hlavice s odpruženými valivými kuželíky, který využívá firma SERW.

2.4.1 Návrh kuželíkového ložiska

Kuželíkové ložisko je umístěno v přívodní hlavici viz obr. 2.1. Je to otočný kontakt, který zajišťuje přechod proudu. Kuželíkové ložisko je složeno z několika párů kuželíků. Kuželíkový pár k sobě přitlačuje pružina, vytvářející dostatečný kontaktní tlak. [11] Jednotlivé kuželíky jsou vytvořeny z mědi a jejich povrch je postříbřen. Pro toto kuželíkové ložisko volím 20 párů kuželíků. Tento počet je pro přechod proudu dostatečný a je ověřen v další části práce.



Obr. 2.1. Přívodní hlavice s kuželíkovým ložiskem [3]

Při návrhu otočného kontaktu se vychází ze tří kritérií pro velikost stykového odporu:

- 1) Kritérium dodržení maximálního úbytku napětí U_s na kontaktu při procházejícím jmenovitém proudu:

$$R_{s1} = \frac{U_s}{\frac{I_r}{p}} = \frac{20 \cdot 10^{-3}}{\frac{5000}{40}} = 1,6 \cdot 10^{-4} \Omega \quad (2.33)$$

$U_s = 20$ (mV) ... maximální úbytek napětí na stykovém odporu

$p = 40$ (ks) ... celkový počet kuželíků

- 2) Kritérium nesvaření kontaktů při procházejícím jmenovitém dynamickém proudu:

Vlivem působení elektrodynamických sil může dojít k odskočení kontaktů a vytvoření oblouku, který dokáže natavit materiál kontaktů a po dosednutí je svařit.

$$R_{s2} = \frac{k \cdot U_{sv}}{\frac{I_p}{p}} = \frac{10 \cdot 0,35}{\frac{200 \cdot 10^3}{40}} = 7 \cdot 10^{-4} \Omega \quad (2.34)$$

$k = 10$ (-) ... empirická konstanta

$U_{sv} = 0,35$ (V) ... maximální úbytek napětí na stykovém odporu

3) Kritérium nesvaření kontaktů při procházejícím krátkodobém výdržném proudu:

Když proud prochází kontaktní úžinou, může dojít k ohřátí místa kontaktu nad teplotu tavení materiálu kontaktů a ty se svaří.

$$R_{s3} = \frac{k \cdot E}{\left(\frac{I_k}{p}\right)^2 \cdot t_k} = \frac{10 \cdot 200}{\left(\frac{80 \cdot 10^3}{40}\right)^2 \cdot 1} = 5 \cdot 10^{-4} \Omega \quad (2.35)$$

$k = 10$ (-) ... empirická konstanta

$E = 200$ (J) ... maximální dovolená energie, která se ztratí na úžinovém odporu

Přítlačná síla se vypočítá z minimální hodnoty stykového odporu R_s . Tou je v tomto případě hodnota stykového odporu $R_{s1} = 1,6 \cdot 10^{-4} \Omega$, tedy hodnota vypočítána z kritéria dodržení maximálního úbytku napětí U_s na kontaktu, při procházejícím jmenovitým proudem. Vycházím ze vztahu:

$$R_s = \frac{k_n}{\left(\frac{F_k}{F_1}\right)^m} \quad (2.36)$$

$R_s = R_{s1} = 1,6 \cdot 10^{-4} (\Omega)$... minimální stykový odpor

$k_n = 8 \cdot 10^{-4} (\Omega)$... zvolená konstanta respektující vlastnosti materiálu a poměry v místě styku, $k_n = (3,8-12) \cdot 10^{-4} \Omega$

F_k (N) ... kontaktní síla

$F_1 = 1$ (N) ... konstanta dosazována kvůli souhlasu jednotek

$m = 0,5$ (-) ... konstanta volena dle druhu styku, $m = (0,5-0,7)$

Rovnici pro výpočet velikosti kontaktní síly získáme úpravou rovnice (2.36):

$$F_k = F_1 \cdot \sqrt[m]{\frac{k_n}{R_s}} = 1 \cdot \sqrt[0,5]{\frac{8 \cdot 10^{-4}}{1,6 \cdot 10^{-4}}} = 25 \text{ N} \quad (2.37)$$

Valivé kuželíky navrhuji pod úhlem zkosení 45° . Jejich výsledná síla se tedy určí geometrickým součtem dvou sil, které svírají úhel 90° :

$$F_p = \sqrt{F_k^2 + F_k^2} = \sqrt{25^2 + 25^2} = 35,355 \text{ N} \quad (2.38)$$

Pro ověření minimálního průřezu pro přenos proudu vypočtu celkový průřez všech kuželíků. Průřez jednoho kuželíku je vypočten jako plocha vertikálního řezu kuželíkem vedená v jeho ose:

$$S_{kuž} = p \cdot a \cdot b = 40 \cdot 10 \cdot 10 = 4000 \text{ mm}^2 \quad (2.39)$$

$S_{kuž}$ (mm²) ... celkový průřez všech kuželíků

$a = 10$ (mm) ... výška kuželíku

$b = 10$ (mm) ... střední šířka kuželíku

Minimální průřez vypočtený z proudového zatížení vyšel 3333,333 mm² viz vztah (2.14). Celkový průřez všech kuželíků vyšel 4000 mm², tato hodnota vyhovuje ověření na minimální průřez.

2.4.2 Návrh přitlačné pružiny kontaktu

Výslednou přitlačnou sílu mezi párem kuželíků zajišťuje vinutá pružina. Materiál této pružiny je korozivzdorná ocel. Volím parametry pružiny:

$d = 1,5$ (mm) ... průměr drátu pružiny

$D = 15$ (mm) ... průměr pružiny

$N = 5$ (-) ... počet závitů

$F_p = 35,355$ (N) ... přitlačná síla na kontakt

Výpočet stlačení přitlačné pružiny:

$$y = \frac{8 \cdot N \cdot D^3 \cdot F_p}{d^4 \cdot G} = \frac{8 \cdot 5 \cdot (15 \cdot 10^{-3})^3 \cdot 35,355}{(1,5 \cdot 10^{-3})^4 \cdot 8 \cdot 10^4 \cdot 10^6} = 11,785 \text{ mm} \quad (2.40)$$

$G = 8 \cdot 10^4$ (MPa) ... modul pružnosti ve smyku

Namáhání ve smyku:

$$\tau = \frac{\varphi \cdot d \cdot y \cdot G}{\pi \cdot D^2 \cdot N} \quad (2.41)$$

Korekční činitel φ :

$$\varphi = \frac{D - 0,25 \cdot d}{D - d} + \frac{0,615 \cdot d}{D} = \frac{15 - 0,25 \cdot 1,5}{15 - 1,5} + \frac{0,615 \cdot 1,5}{15} = 1,145 \quad (2.42)$$

Dosazením do vztahu (2.41) dostaneme:

$$\tau = \frac{\varphi \cdot d \cdot y \cdot G}{\pi \cdot D^2 \cdot N} = \frac{1,145 \cdot (1,5 \cdot 10^{-3}) \cdot (11,78 \cdot 10^{-3}) \cdot 8 \cdot 10^4}{\pi \cdot (15 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 5} = 458 \text{ MPa} \quad (2.43)$$

Dovolené namáhání:

$$\tau_{dov} = \frac{\sigma_{dov}}{1,4 \cdot \mu} = \frac{2350}{1,4 \cdot 1,5} = 1119,048 \text{ MPa} \quad (2.44)$$

τ_{dov} (MPa) ... dovolené smykové napětí

$\sigma_{dov} = 2350$ (MPa) ... dovolené normálové napětí

$\mu = 1,5$ (-) ... korekční činitel

Navržená pružina vyhovuje kontrole na dovolené namáhání, je tedy splněna podmínka $\tau \leq \tau_{dov}$. Namáhání ve smyku vyšlo téměř poloviční, než je dovolená hodnota smykového napětí ($458 \leq 1119,048$).

2.5 Návrh kontaktní hlavice

Kontaktní hlavice společně s kontaktním roubíkem, který je umístěn na druhém rameni, slouží k přenosu proudu z jednoho ramene na druhé. Kontaktní hlavice je uchycena na konci ramene pomocí šroubů. Skládá se z kontaktních palců, které dělí proudovou dráhu na více paralelních cest. Kontaktní palce jsou na konci zahnuté směrem ven a jejich délka se liší podle umístění na kontaktní hlavici. Při pohledu od přívodní hlavice ramene jsou všechny kontakty na levé straně delší než na pravé. Je to kvůli správnému navedení kontaktního roubíku do kontaktní hlavice. Na každém kontaktním palci je pružina, která vytváří dostatečný kontaktní přítlak. Dále kontaktní hlavici tvoří kryt, který chrání kontaktní doteky před atmosférickými vlivy.

2.5.1 Návrh kontaktní síly

Materiálem kontaktních palců a kontaktního roubíku je měď. Povrch těchto kontaktních částí je postříbřen. Při návrhu kontaktní síly se tedy postupuje stejně, jako při návrhu kontaktů v přívodní hlavici viz kapitola 2.4.1. Pro zadané zatížení odpojovače volím 18 kontaktů v kontaktní hlavici.

Při návrhu kontaktní síly se vychází ze tří kritérií pro velikost stykového odporu:

- 1) Kritérium dodržení maximálního úbytku napětí U_s na kontaktu při procházejícím jmenovitém proudu:

$$R_{s1} = \frac{U_s}{\frac{I_r}{n}} = \frac{20 \cdot 10^{-3}}{\frac{5000}{18}} = 7,2 \cdot 10^{-5} \Omega \quad (2.45)$$

$U_s = 20$ (mV) ... maximální úbytek napětí na stykovém odporu

$n = 18$ (ks) ... celkový počet kontaktů v kontaktní hlavici

- 2) Kritérium nesvaření kontaktů při procházejícím jmenovitým dynamickým proudu:

Vlivem působení elektrodynamických sil může dojít k odskočení kontaktů a vytvoření oblouku, který dokáže natavit materiál kontaktů a po dosednutí je svařit.

$$R_{s2} = \frac{k \cdot U_{sv}}{\frac{I_p}{n}} = \frac{10 \cdot 0,35}{\frac{200 \cdot 10^3}{18}} = 31,5 \cdot 10^{-5} \Omega \quad (2.46)$$

$k = 10$ (-) ... empirická konstanta

$U_{sv} = 0,35$ (V) ... maximální úbytek napětí na stykovém odporu

- 3) Kritérium nesvaření kontaktů při procházejícím krátkodobém výdržném proudu:

Když proud prochází kontaktní úžinou, může dojít k ohřátí místa kontaktu nad teplotu tavení materiálu kontaktů a ty se svaří.

$$R_{s3} = \frac{k \cdot E}{\left(\frac{I_k}{n}\right)^2 \cdot t_k} = \frac{10 \cdot 200}{\left(\frac{80 \cdot 10^3}{18}\right)^2 \cdot 1} = 10,1 \cdot 10^{-5} \Omega \quad (2.47)$$

$k = 10$ (-) ... empirická konstanta

$E = 200$ (J) ... maximální dovolená energie, která se ztratí na úžinovém odporu

Přítlačná síla se vypočítá z minimální hodnoty stykového odporu R_s , tou je v tomto případě hodnota stykového odporu $R_{s1} = 7,2 \cdot 10^{-5} \Omega$. Tedy hodnota vypočítána z kritéria dodržení maximálního úbytku napětí U_s na kontaktu, při procházejícím jmenovitém proudu. Vycházím ze vztahu (2.36):

$$R_s = \frac{k_n}{\left(\frac{F_k}{F_1}\right)^m}$$

$R_s = R_{s1} = 7,2 \cdot 10^{-5} (\Omega)$... minimální stykový odpor

$k_n = 8 \cdot 10^{-4} (\Omega)$... zvolená konstanta respektující vlastnosti materiálu a poměry
v místě styku, $k_n = (3,8-12) \cdot 10^{-4} \Omega$

F_k (N) ... kontaktní síla

$F_1 = 1$ (N) ... konstanta dosazována kvůli souhlasu jednotek

$m = 0,5$ (-) ... konstanta volena dle druhu styku, $m = (0,5-0,7)$

Rovnici pro výpočet velikosti kontaktní síly získáme úpravou rovnice (2.36):

$$F_k = F_1 \cdot \sqrt[m]{\frac{k_n}{R_s}} = 1 \cdot \sqrt[0,5]{\frac{8 \cdot 10^{-4}}{7,2 \cdot 10^{-5}}} = 124 \text{ N} \quad (2.48)$$

2.5.2 Návrh kontaktních palců

Počet kontaktních palců pro kontaktní hlavici se jmenovitým proudem 5000 A, jsem zvolil 18, tedy 9 párů kontaktů umístěných nad sebou. Materiálem kontaktního palce je měď, povrch palce je postříbřen. Výšku kontaktního palce volím 26 mm a šířku 8 mm. Při výpočtu je omezen odvod tepla prouděním a vychází se z předpokladu, že se na chlazení podílí pouze polovina plochy kontaktního palce. V kontaktním palci vzniká teplo průchodem jmenovitého proudu, to se musí odvést společně s polovinou tepla, které vzniká Jouleovými ztrátami na stykovém odporu R_s . Délka delšího palce se vypočte jako 1,5 násobek průměru příruby, tedy $l_{dp} = 1,5 \cdot 240 = 360$ mm. Délku kratšího palce volím $l_{kp} = 320$ mm.

Oteplení procházejícím jmenovitým proudem

Pro kontrolu oteplení procházejícím jmenovitým proudem vycházím ze vztahu (2.24). Je zde brán ohled na dovolené oteplení. K levé části rovnice je přičten příspěvek kontaktu a vzniká:

$$\frac{R_s \cdot I_r^2}{2} + R \cdot I_r^2 = \alpha_0 \cdot A \cdot \Delta\vartheta \quad (2.49)$$

$R_s = R_{s1} = 7,2 \cdot 10^{-5} \text{ (}\Omega\text{)}$... minimální stykový odpor

$I_r = 5000 \text{ (A)}$... jmenovitý proud

$R \text{ (}\Omega\text{)}$... odpor kontaktního palce

$\alpha_0 = 12 \text{ (W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}\text{)}$... součinitel přestupu tepla z povrchu vodiče

$A \text{ (m}^2\text{)}$... velikost ochlazovací plochy

$\Delta\vartheta = 65 \text{ (}^\circ\text{C)}$... dovolené normativní oteplení kontaktů ze stříbra na vzduchu

Úpravou rovnice (2.49) vzniká:

$$\frac{R_s \cdot \left(\frac{I_r}{n}\right)^2}{2} \cdot \frac{\rho_{Cu} \cdot \left(\frac{I_r}{n}\right)^2}{x' \cdot y} = \alpha_0 \cdot (x' + y) \cdot \Delta\vartheta \quad (2.50)$$

$x' \text{ (mm)}$... minimální šířka kontaktního palce

$y = 26 \text{ (mm)}$... zvolená výška kontaktního palce

Po dosazení a vyřešení rovnice (2.50) vychází minimální šířka palce $x' = 7,259 \text{ mm}$, zvolená hodnota $x = 8 \text{ mm}$ tedy vyhovuje kontrole oteplení procházejícím jmenovitým proudem.

Oteplení procházejícím zkratovým proudem

Pro kontrolu oteplení procházejícím zkratovým proudem vycházím ze vztahu pro adiabatický ohřev vodiče:

$$R \cdot I^2 \cdot dt = c \cdot V \cdot d\vartheta \quad (2.51)$$

Úpravou rovnice (2.51) vzniká:

$$x'' = \sqrt{\frac{\rho_{Cu} \cdot \left(\frac{I_k}{n}\right)^2 \cdot t}{c_{Cu} \cdot \Delta\vartheta \cdot y^2}} = \sqrt{\frac{2,1 \cdot 10^{-8} \cdot \left(\frac{80 \cdot 10^3}{18}\right)^2 \cdot 1}{3,4 \cdot 10^6 \cdot 145 \cdot (26 \cdot 10^{-3})^2}} = 1,116 \text{ mm} \quad (2.52)$$

$V \text{ (m}^3\text{)}$... objem materiálu palce

$x'' \text{ (mm)}$... minimální šířka kontaktního palce

$\rho_{Cu} = 2,1 \cdot 10^{-8} \text{ (}\Omega \cdot \text{m)}$... měrný odpor mědi při teplotě 60 °C

$I_k = 80 \text{ (kA)}$... jmenovitý krátkodobý výdržný proud

$c_{Cu} = 3,4 \cdot 10^6 \text{ (J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}\text{)}$... měrná objemová tepelná kapacita mědi

$\Delta\vartheta = 145 \text{ (}^\circ\text{C)}$... rekrystalizace mědi nastává při 250 °C, max. teplota okolí je

40 °C a max. dovolené oteplení je 65°C $\Rightarrow \Delta\vartheta = 250 - 40 - 65$

Minimální šířka kontaktního palce vyšla $x'' = 1,116 \text{ mm}$, zvolená hodnota $x = 8 \text{ mm}$ tedy vyhovuje kontrole oteplení procházejícím zkratovým proudem.

Ověření na minimální průřez

Celkový průřez všech kontaktních palců:

$$S_{pal} = x \cdot y \cdot n = 8 \cdot 26 \cdot 18 = 3744 \text{ mm}^2 \quad (2.53)$$

$x = 8 \text{ (mm)}$... šířka kontaktního palce

$y = 26 \text{ (mm)}$... výška kontaktního palce

$n = 18 \text{ (ks)}$... celkový počet kontaktních palců

Minimální průřez vyšel $S_{min} = 3333,333 \text{ mm}^2$ viz vztah (2.14). Celkový průřez všech kontaktních palců vyšel $S_{pal} = 3744 \text{ mm}^2$, vypočtená hodnota vyhovuje na ověření minimálního průřezu a platí tedy podmínka $S_{min} \leq S_{pal}$.

2.5.3 Návrh ploché pružiny

Při výpočtu ploché pružiny vycházím ze znalosti přítláčné kontaktní síly $F = 124 \text{ N}$, která byla vypočtena vztahem (2.48). Materiálem pružiny bude konstrukční ocel. Kontaktní pružina je přišroubována na kontaktní palec a působí na něj přítláčnou silou,

proto volím výšku pružiny stejnou jako je výška kontaktního palce, tedy $b = 26 \text{ mm}$.
Dále volím délku pružiny $l_{pr} = 280 \text{ mm}$. Výpočet maximálního ohybového momentu:

$$M_{omax} = F \cdot l_{pr} = 124 \cdot 0,28 = 34,72 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (2.54)$$

Konstrukční ocel má pevnost v tahu $\sigma_{pt} = 400 \text{ MPa}$, z té se vypočte napětí v ohybu:

$$\sigma_{po} = \frac{\sigma_{pt}}{1,4 \cdot \mu} = \frac{400 \cdot 10^6}{1,4 \cdot 1,5} = 190,476 \text{ MPa} \quad (2.55)$$

$\mu = 1,5$ (-) ... koeficient bezpečnosti (tabulková hodnota)

Vztah pro výpočet modulu průřezu v ohybu:

$$\frac{M_{max}}{W_o} \leq \sigma_{po} \quad (2.56)$$

$$W_o = \frac{b \cdot h'^2}{6} \Rightarrow h' \geq \sqrt{\frac{6 \cdot M_{max}}{b \cdot \sigma_{po}}} = \sqrt{\frac{6 \cdot 34,72}{0,026 \cdot 190,476 \cdot 10^6}} = 6,486 \text{ mm} \quad (2.57)$$

$h = 6,5$ (mm) ... zvolená šířka pružiny

Výpočet průhybu pružiny:

$$y = \frac{2 \cdot l_{pr}^2 \cdot \sigma_{po} \cdot \Psi}{3 \cdot h \cdot E} = \frac{2 \cdot 0,28^2 \cdot 190,476 \cdot 10^6 \cdot 1}{3 \cdot 6,5 \cdot 10^{-3} \cdot 22 \cdot 10^{10}} = 6,962 \text{ mm} \quad (2.58)$$

$E = 22 \cdot 10^{10}$ (Pa) ... modul pružnosti v tahu oceli

$\Psi = 1$ (-) ... zvolený činitel změny průřezu

2.6 Kontrola mechanického namáhání proudové dráhy

Mechanické namáhání ramen proudové dráhy se dělí na namáhání ohybem působícím ve svislé rovině a v rovině vodorovné. Ve svislé rovině působí na ramena jejich vlastní tíha a tíha všech součástí umístěných na rameni. Dále na rameno působí tíha námrazy, jejíž tloušťku definuje příslušná norma jako 0,02 m. Namáhání ramene na ohyb v rovině vodorovné vzniká působením elektrodynamických sil a větru, uvažuje se nejnepříznivější případ a to působení na bok odpojovače.

Kontrola namáhání bude provedena na rameni nesoucím kontaktní hlavici z důvodu většího tíhového zatížení. Druhé rameno počítáno nebude, jelikož je na konci zatíženo kontaktním roubíkem, který je značně lehčí než kontaktní hlavice.

2.6.1 Výpočet tíhy těles, namáhání vlivem větru a námrazy

Tíha levého ramene

Nejprve je nutné spočítat délku ramene:

$$l_r = \frac{c}{2} - D_p - (k \cdot D_p) = \frac{3,7}{2} - 0,24 - (1,125 \cdot 0,24) = 1,34 \text{ m} \quad (2.59)$$

$c = 3,7$ (m) ... délka proudové dráhy

$D_p = 0,240$ (m) ... průměr příruby

$k = 1,125$ (-) ... velikost kont. hlavice volím 1,5 násobek průměru příruby a místo styku je 0,75 velikosti kont. hlavice, tedy $k=1,5 \cdot 0,75$

Objem levého ramene:

$$V_r = \frac{\pi}{4} \cdot (d_1^2 - d_2^2) \cdot l_r = \frac{\pi}{4} \cdot (0,13^2 - 0,11^2) \cdot 1,34 = 5,05 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \quad (2.60)$$

$d_1 = 130$ (mm) ... vnější průměr trubky ramene

$d_2 = 110$ (mm) ... vnitřní průměr trubky ramene

Hmotnost levého ramene:

$$m_r = \rho_{Al} \cdot V_r = 2700 \cdot 5,05 \cdot 10^{-3} = 13,64 \text{ kg} \quad (2.61)$$

$\rho_{Al} = 2700$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) ... hustota hliníku

Síla působící na levé rameno:

$$F_r = m_r \cdot g = 13,64 \cdot 9,81 = 133,8 \text{ N} \quad (2.62)$$

$g = 9,81$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$) ... tíhové zrychlení

Tíha hlavních kontaktů

Nejprve je nutné spočítat objem delšího a kratšího palce, které se sečtou a vynásobí počtem kontaktních párů pro zjištění celkového objemu palců:

$$V_{dp} = x \cdot y \cdot l_{dp} = 8 \cdot 10^{-3} \cdot 26 \cdot 10^{-3} \cdot 360 \cdot 10^{-3} = 7,49 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \quad (2.63)$$

$$V_{kp} = x \cdot y \cdot l_{kp} = 8 \cdot 10^{-3} \cdot 26 \cdot 10^{-3} \cdot 320 \cdot 10^{-3} = 6,66 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \quad (2.64)$$

$$V_p = (V_{dp} + V_{kp}) \cdot \frac{n}{2} = (7,49 + 6,66) \cdot 10^{-5} \cdot \frac{18}{2} = 1,27 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \quad (2.65)$$

$x = 8$ (mm) ... šířka kontaktního palce

$y = 26$ (mm) ... výška kontaktního palce

$l_{dp} = 360$ (mm) ... délka delšího kontaktního palce

$l_{kp} = 320$ (mm) ... délka kratšího kontaktního palce

$n = 18$ (mm) ... počet hlavních kontaktů

Hmotnost hlavních kontaktů:

$$m_p = \rho_{Cu} \cdot V_p = 8960 \cdot 1,27 \cdot 10^{-3} = 11,41 \text{ kg} \quad (2.66)$$

$\rho_{Cu} = 8960$ (kg·m⁻³) ... hustota mědi

Síla působící na hlavní kontakty:

$$F_p = m_p \cdot g = 11,41 \cdot 9,81 = 111,9 \text{ N} \quad (2.67)$$

Tíha pružin hlavních kontaktů:

Objem pružin hlavních kontaktů:

$$V_{pr} = n \cdot h \cdot b \cdot l_{pr} = 18 \cdot 6,5 \cdot 26 \cdot 280 \cdot 10^{-9} = 8,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \quad (2.68)$$

$n = 18$ (ks) ... počet pružin, stejný jako počet kont. palců

$h = 6,5$ (mm) ... šířka pružiny

$b = 26$ (mm) ... výška pružiny

$l_{pr} = 280$ (mm) ... délka pružiny

Hmotnost pružin hlavních kontaktů:

$$m_{pr} = \rho_{ocel} \cdot V_{pr} = 7830 \cdot 8,5 \cdot 10^{-4} = 6,67 \text{ kg} \quad (2.69)$$

$\rho_{ocel} = 7830 \text{ (kg}\cdot\text{m}^{-3})$... hustota oceli

Síla působící na pružiny hlavních kontaktů:

$$F_{pr} = m_{pr} \cdot g = 6,67 \cdot 9,81 = 65,43 \text{ N} \quad (2.70)$$

Tíha krytu kontaktní hlavice:

Objem krytu kontaktní hlavice:

$$V_{kr} = x_{kr} \cdot y_{kr} \cdot l_{kr} = 2 \cdot 735 \cdot 365 \cdot 10^{-9} = 5,37 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \quad (2.71)$$

$x_{kr} = 2 \text{ (mm)}$... šířka krytu kontaktní hlavice

$y_{kr} = 735 \text{ (mm)}$... celková výška krytu kontaktní hlavice

$l_{kr} = 365 \text{ (mm)}$... délka krytu kontaktní hlavice

Hmotnost krytu kontaktní hlavice:

$$m_{kr} = \rho_{Al} \cdot V_{kr} = 2700 \cdot 5,37 \cdot 10^{-4} = 1,45 \text{ kg} \quad (2.72)$$

$\rho_{Al} = 2700 \text{ (kg}\cdot\text{m}^{-3})$... hustota hliníku

Síla působící na kryt kontaktní hlavice:

$$F_{kr} = m_{kr} \cdot g = 1,45 \cdot 9,81 = 14,21 \text{ N} \quad (2.73)$$

Tíha ostatních součástí:

Hmotnost ostatních součástí, jako jsou šrouby, podložky, matice a Cupalové podložky odhaduji na $m_o = 1,5 \text{ kg}$.

Síla působící na ostatní součásti:

$$F_o = m_o \cdot g = 1,5 \cdot 9,81 = 14,72 \text{ N} \quad (2.74)$$

Namáhání ramene tlakem větru:

Plocha ramene, na níž působí boční vítr:

$$S_{rv} = d_1 \cdot l_r = 130 \cdot 10^{-3} \cdot 1340 \cdot 10^{-3} = 0,174 \text{ m}^2 \quad (2.75)$$

Síla větru působící na rameno:

$$F_{rv} = S_{rv} \cdot p_v = 0,174 \cdot 700 = 121,94 \text{ N} \quad (2.76)$$

$p_v = 700 \text{ (Pa)}$... tlak větru o rychlosti $34 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (normální pracovní podmínky)

Namáhání krytu kontaktní hlavice tlakem větru:

Plocha krytu kontaktní hlavice, na níž působí boční vítr:

$$S_{kr} = y_{krv} \cdot l_{kr} = 281 \cdot 10^{-3} \cdot 365 \cdot 10^{-3} = 0,103 \text{ m}^2 \quad (2.77)$$

$y_{krv} = 281 \text{ (mm)}$... výška krytu kontaktní hlavice

Síla větru působící na bok kontaktní hlavice:

$$F_{kv} = S_{kr} \cdot p_v = 0,103 \cdot 700 = 72,1 \text{ N} \quad (2.78)$$

Namáhání ramene námrazou:

Plocha ramene:

$$S_r = \pi \cdot d_1 \cdot l_r = \pi \cdot 130 \cdot 10^{-3} \cdot 1340 \cdot 10^{-3} = 0,547 \text{ m}^2 \quad (2.79)$$

Objem námrazy:

$$V_{lr} = S_r \cdot t = 0,547 \cdot 0,02 = 0,011 \text{ m}^3 \quad (2.80)$$

$t = 0,02 \text{ (m)}$... maximální tloušťka ledu (třída 20)

Hmotnost námrazy:

$$m_{lr} = \rho_{led} \cdot V_{lr} = 917 \cdot 0,011 = 10,1 \text{ kg} \quad (2.81)$$

$\rho_{led} = 917 \text{ (kg} \cdot \text{m}^{-3})$... hustota ledu

Síla působící na rameno vlivem námrazy:

$$F_{lr} = m_{lr} \cdot g = 10,1 \cdot 9,81 = 99,1 \text{ N} \quad (2.82)$$

Namáhání krytu kontaktní hlavice námrazou:

Výpočet celkové plochy povrchu:

$$S_{kr'} = y_{kr} \cdot l_{kr} = 735 \cdot 10^{-3} \cdot 365 \cdot 10^{-3} = 0,268 \text{ m}^2 \quad (2.83)$$

$y_{kr} = 735$ (mm) ... celková výška krytu kontaktní hlavice

$l_{kr} = 365$ (mm) ... délka krytu kontaktní hlavice

Objem námrazy:

$$V_{lkr} = S_{kr'} \cdot t = 0,268 \cdot 0,02 = 5,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \quad (2.84)$$

Hmotnost námrazy:

$$m_{lkr} = \rho_{led} \cdot V_{lkr} = 917 \cdot 5,4 \cdot 10^{-3} = 4,9 \text{ kg} \quad (2.85)$$

Síla působící na kryt kontaktní hlavice vlivem námrazy:

$$F_{lkr} = m_{lkr} \cdot g = 4,9 \cdot 9,81 = 48,3 \text{ N} \quad (2.86)$$

2.6.2 Výpočet elektrodynamické síly

V trojfázové soustavě na sebe odpojovače vzájemně působí elektrodynamickou silou. V rozvodně bývají umístěny vedle sebe. Síla působící na střední odpojovač je větší, než na odpojovač krajní, z tohoto důvodu bude počítána pouze síla na střední odpojovač.

Pro výpočet elektrodynamické síly je nutné vypočítat vzdálenost mezi odpojovači:

$$a = l_{ph} + l_{kr} + l_r + d = 480 + 365 + 1340 + 3000 = 5185 \text{ mm} \quad (2.87)$$

$l_{ph} = 480$ (mm) ... celková délka přívodní hlavice ($l_{ph}=D_p+l_0$)

$l_0 = 240$ (mm) ... délka objímky

$d = 3000$ (mm) ... výška izolátorové podpěrky

Výpočet elektrodynamické síly působící na střední odpojovač:

$$\begin{aligned}
 F_{ed} &= 3,464 \cdot \frac{(l_r + l_0 + 0,75 \cdot l_{dp})}{a} \cdot I^2 \cdot 10^{-7} = \\
 &= 3,464 \cdot \frac{(1340 + 240 + 0,75 \cdot 365) \cdot 10^{-3}}{5185 \cdot 10^{-3}} \cdot (2 \cdot 10^5)^2 \cdot 10^{-7} = 4944 \text{ N} \quad (2.88)
 \end{aligned}$$

2.6.3 Výpočet ohybových momentů

Pro výpočet ohybových momentů je třeba určit, zda namáhání působící na rameno působí spojitě na celém rameni, nebo pouze v jednom místě. Pokud namáhání ramene působí spojitě na celé rameno, tak se působíště této síly nachází v polovině ramene.

Výpočet ohybových momentů působících ve svislém směru:

Ve svislém směru působí na rameno tíhové síly a síly způsobené námrazou.

$$\begin{aligned}
 M_{os} &= \frac{F_r \cdot l_r}{2} + F_p \cdot \left(\frac{l_{dp} + l_{kp}}{4} + l_r \right) + F_{pr} \cdot \left(\frac{l_{pr}}{2} + l_r \right) + F_{kr} \cdot \left(\frac{l_{kr}}{2} + l_r \right) + \frac{F_{lr} \cdot l_r}{2} + \\
 &F_{lkr} \cdot \left(\frac{l_{kr}}{2} + l_r \right) = \frac{133,8 \cdot 1,34}{2} + 111,9 \cdot \left(\frac{0,36 + 0,32}{4} + 1,34 \right) + 65,4 \cdot \\
 &\left(\frac{0,28}{2} + 1,34 \right) + 14,2 \cdot \left(\frac{0,365}{2} + 1,34 \right) + \frac{98,5 \cdot 1,34}{2} + 48,3 \cdot \left(\frac{0,365}{2} + 1,34 \right) \\
 &= 516,5 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (2.89)
 \end{aligned}$$

Výpočet ohybových momentů působících ve vodorovném směru:

$$\begin{aligned}
 M_{ov} &= \frac{F_{rv} \cdot l_r}{2} + F_{kv} \cdot \left(\frac{l_{kr}}{2} + l_r \right) + F_{ed} \cdot \frac{l_r + (0,75 \cdot l_{dp})}{2} \\
 &= \frac{121,9 \cdot 1,34}{2} + 71,8 \cdot \left(\frac{0,365}{2} + 1,34 \right) + 4944 \cdot \frac{1,34 + (0,75 \cdot 0,36)}{2} \\
 &= 4170,8 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (2.90)
 \end{aligned}$$

Celkový ohybový moment působící na rameno odpojovače:

Celkový ohybový moment je maximální moment, který může působit na rameno odpojovače při těch nejnepríznivějších podmínkách, které se ještě řadí do normálních pracovních podmínek viz 1.3.1. Je to vektorový součet momentu působícího svisle a momentu působícího vodorovně.

$$M_o = \sqrt{M_{os}^2 + M_{ov}^2} = \sqrt{516,5^2 + 4170,8^2} = 4202,6 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (2.91)$$

2.6.4 Kontrola dovoleného namáhání v ohybu

Jak již bylo zmíněno, kontrolu dovoleného namáhání v ohybu provedu pouze pro levé rameno, protože je na jeho konci umístěna kontaktní hlavice, která jej zatěžuje více, než kontaktní roubík pravé rameno.

Výpočet průřezového modulu v ohybu:

$$W_o = \frac{\pi}{32} \cdot \frac{(d_1^4 - d_2^4)}{d_1} = \frac{\pi}{32} \cdot \frac{(0,13^4 - 0,11^4)}{0,11} = 1,05 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \quad (2.92)$$

Výpočet mechanického namáhání v ohybu:

$$\sigma_v = \frac{M_o}{W_o} = \frac{4202,6}{1,05 \cdot 10^{-4}} = 40 \text{ MPa} \leq \sigma_{dov} \quad (2.93)$$

Dovolené namáhání pro hliník je $\sigma_{dovAl} = 130 \text{ MPa}$. Mechanické namáhání navrženého levého ramene vyšlo $\sigma_v = 40 \text{ MPa}$, rameno tedy kontrole vyhovělo. Základní dokumentace navrženého odpojovače je uvedena v přílohách.

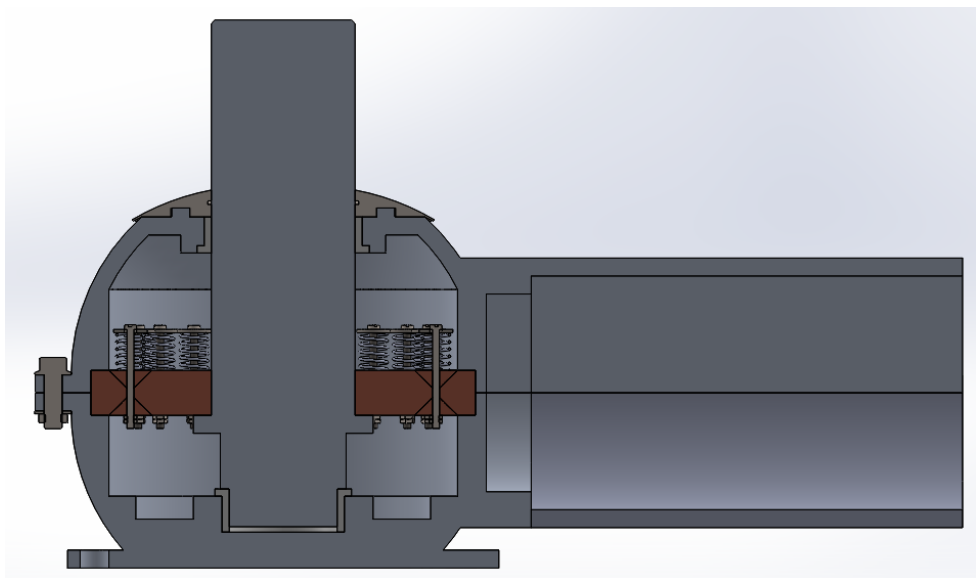
3 Mechanická analýza

Na navrženém odpojovači jsem následně provedl mechanickou analýzu ramene nesoucího kontaktní hlavici. Model odpojovače jsem se rozhodl vytvořit v programu SolidWorks s doplňkovým modulem Simulation. Síly, kterými jsem zatěžoval rameno odpojovače, jsem již vypočetl v kapitole 2.6.

3.1 Tvorba modelu

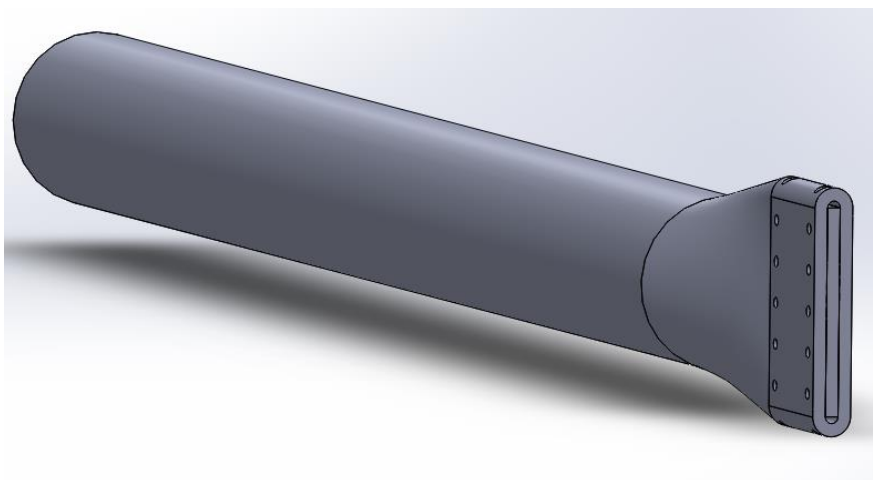
Model odpojovače jsem vytvořil v programu SolidWorks. Je to strojírenský 3D CAD software, který nabízí objemové i plošné modelování. Díky němu je možné pracovat s neomezeně velkými sestavami, z kterých lze jednoduše získat výrobní výkresy. SolidWorks má velice příjemné uživatelské prostředí, snadno a přehledně se ovládá. Ovládání je díky SWIFT technologii jednodušší a rychlejší, tato technologie minimalizuje počet manuálních zásahů při opakujících se úkonech. [12]

První navrženou součástí je přívodní hlavice s kuželíkovým ložiskem. Tvar hlavice jsem zvolil kulovitý. Přívodní hlavice je složena ze dvou částí, spodní a vrchní část. Sílu stěny přívodní hlavice volím 10 mm. Uchytení ramene tvoří objímka, jejíž vrchní část je součástí přívodní hlavici, spodní částí je rameno pevně staženo šrouby. Uvnitř přívodní hlavice se nachází kontaktní čep, jehož průřez jsem zvolil podle průřezu ramene odpojovače, kuželíkové ložisko, spodní a vrchní kluzné ložisko. Vrchní část přívodní hlavice chrání ocelový kryt. Model přívodní hlavice v řezu je vidět na obrázku 3.1.



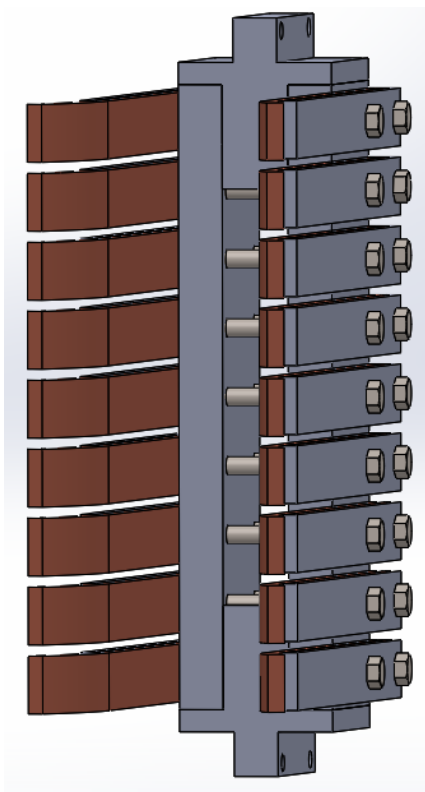
Obr. 3.1. Model přívodní hlavice v řezu

Jako další část jsem vytvořil model ramene odpojovače, které je na konci zploštělé, z důvodu lepšího uchycení kontaktní hlavice. Mezi zploštělou částí trubky jsem vložil destičku z hliníku pro větší mechanickou pevnost této části. Bude zde šrouby uchycena kontaktní hlavice a bez výztuhy zploštělé části by mohlo dojít k již nechtěné deformaci. Rameno s výztuhou je na obrázku 3.2.

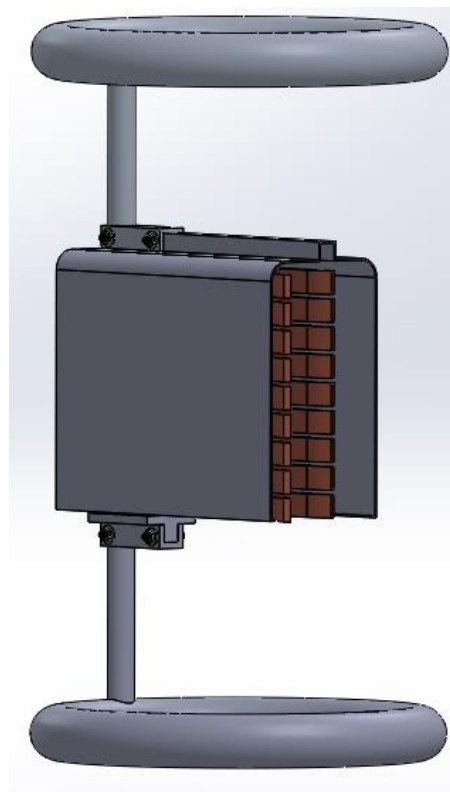


Obr. 3.2. Rameno odpojovače s výztuhou

Pro sestavení kontaktní hlavice je ideální, když se kontaktní palce uchytí přímo na zploštělou část ramene. Tuto variantu jsem ovšem nemohl sestavit z důvodu velkého počtu kontaktních palců.



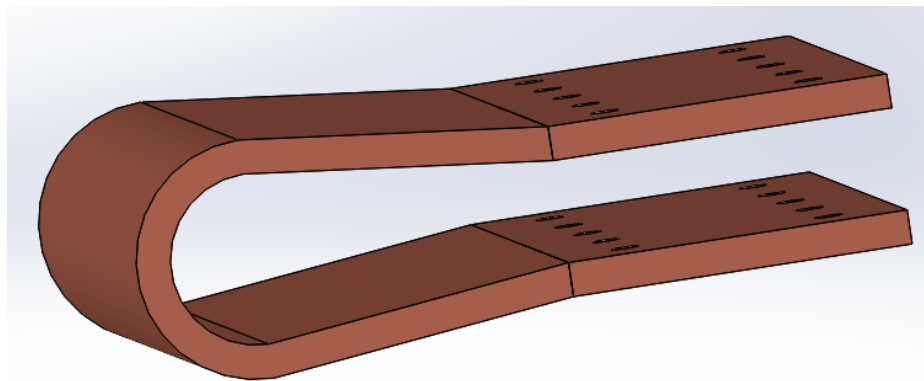
Obr. 3.3. Kontaktní hlavice bez krytu



Obr. 3.4. Kompletní kontaktní hlavice

Aby se všechny palce mohly uchytit, musel jsem vytvořit hliníkovou desku, na které budou palce uchyceny. Na každém kontaktním palci, ať už delším nebo kratším, je uchycena kontaktní pružina, která vytváří dostatečný tlak na kontakty. Mezi desky, které drží palce, jsem vytvořil výztuhu, aby nedošlo k jejich zborcení. Na horní výztuze bude uchycen kryt kontaktní hlavice a stínící kruh pro homogenizaci elektrického pole. Dolní výztuha drží pouze spodní stínící kruh. Na obrázku 3.3 je zobrazena kontaktní hlavice bez krytu a na obrázku 3.4 je zobrazena kompletní kontaktní hlavice.

Druhé rameno je sestaveno ze stejné zploštělé trubky a pevného kontaktu. Ten je vytvořen z měděné desky, jejíž povrch je postříbřen. Měděná deska je ohnuta do požadovaného tvaru viz obrázek 3.5.



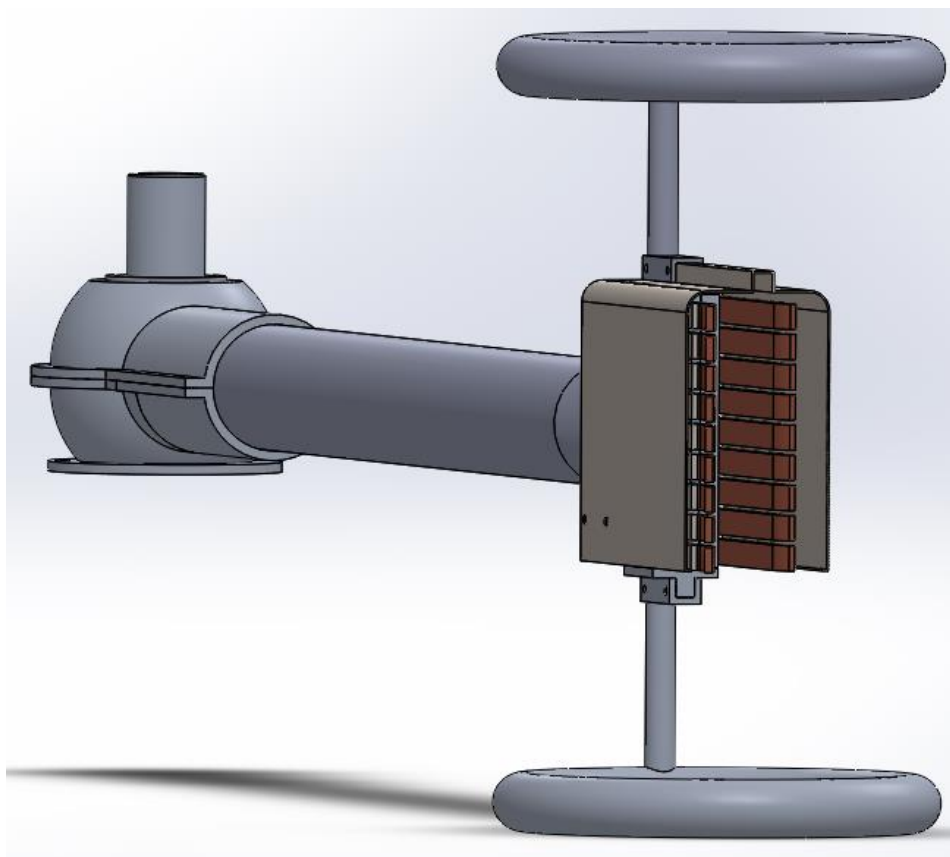
Obr. 3.5. Kontaktní roubík

V mechanické analýze uvažuji opět pouze rameno s kontaktní hlavicí, z tohoto důvodu je kompletní odpojovač včetně šroubových částí zobrazen v příloze 1.

3.2 Mechanická analýza navrženého odpojovače

Jak již bylo zmíněno, mechanická analýza byla provedena v programu SolidWorks s doplňkovým modulem Simulation. Díky tomuto modulu si může konstruktér předem ověřit chování, bezpečnost a kvalitu výrobku a dále jej vylepšit. Jako první se v nabídce analýz nachází statická analýza, kterou dále aplikuji na navržený odpojovač. Lze zde také ověřit dynamické vlastnosti mechanismů, provést analýzu frekvenční a teplotní. Pro konstruktéry může být užitečná pádová a únavová zkouška, která se v tomto modulu také nachází. Dále lze v tomto programu provést analýzu proudění tekutin a plynů. [13][14]

Popis tvorby modelu jsem nastínil v předchozí kapitole, nyní vysvětlím postup statické analýzy odpojovače. Pro zjednodušení analýzy budu levé rameno odpojovače uvažovat bez šroubových spojů a krytu přívodní hlavice, která na mechanické namáhání ramene nemá téměř žádný vliv viz obrázek 3.6. V analýze uvažuji globální pevný kontakt, tedy všechny dotýkající se součásti pevně spojeny.



Obr. 3.6. Levé rameno navrženého odpojovače

Nejprve bylo nutné vytvořit výpočetní síť, tj. nastavit jemnost podle velikosti dílů a spustit generaci sítě, obr. viz příloha 2. Po vytvoření sítě jsem přiřadil jednotlivým dílům materiál. Uchycení odpojovače jsem zvolil jako fixní na spodní plochu přívodní hlavice, která je pevně spojena s přírubou podpěrného izolátoru. Dále bylo potřeba do programu zadat zatížení ramene. Výpočet sil zatěžujících rameno je v kapitole 2.6, tyto síly je možné vidět v tabulce 3.1.

Tab. 3.1. Síly zatěžující levé rameno odpojovače

Síla větru působící na rameno:	$F_{rv} = 121,9 \text{ N}$
Síla větru působící na bok kontaktní hlavice:	$F_{kv} = 72,1 \text{ N}$
Síla působící na rameno vlivem námrazy:	$F_{lr} = 99,1 \text{ N}$
Síla působící na kryt kontaktní hlavice vlivem námrazy:	$F_{lkr} = 48,3 \text{ N}$
Elektrodynamická síla:	$F_{ed} = 4944 \text{ N}$

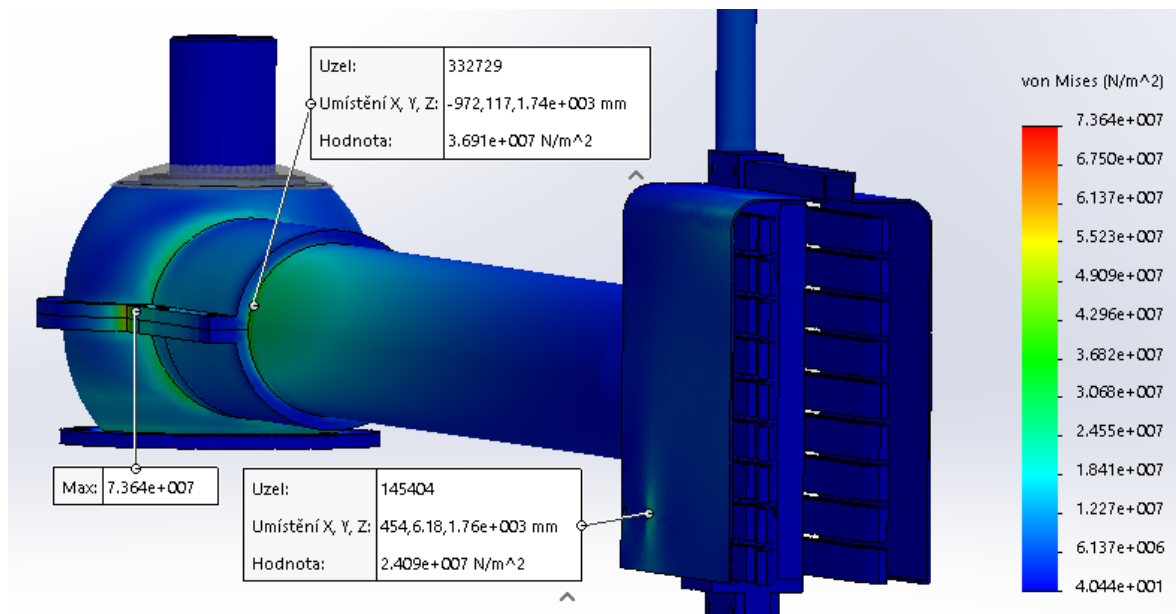
Tíhové síly od jednotlivých dílů odpojovače není nutné do programu zadávat, stačí zadat pouze tíhové zrychlení $g = 9,81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ a program si ze známých objemů a zadaného materiálu výsledné síly dopočte. Po zadání všech zatížení na příslušné plochy zbývá jen spustit iterační řešič.

3.2.1 Výsledky analýzy

Výsledkem statické analýzy je mechanické napětí v analyzované součásti a výsledné posunutí.

Mechanické napětí:

Výsledné rozložení mechanického napětí je zobrazeno na obrázku 3.7.



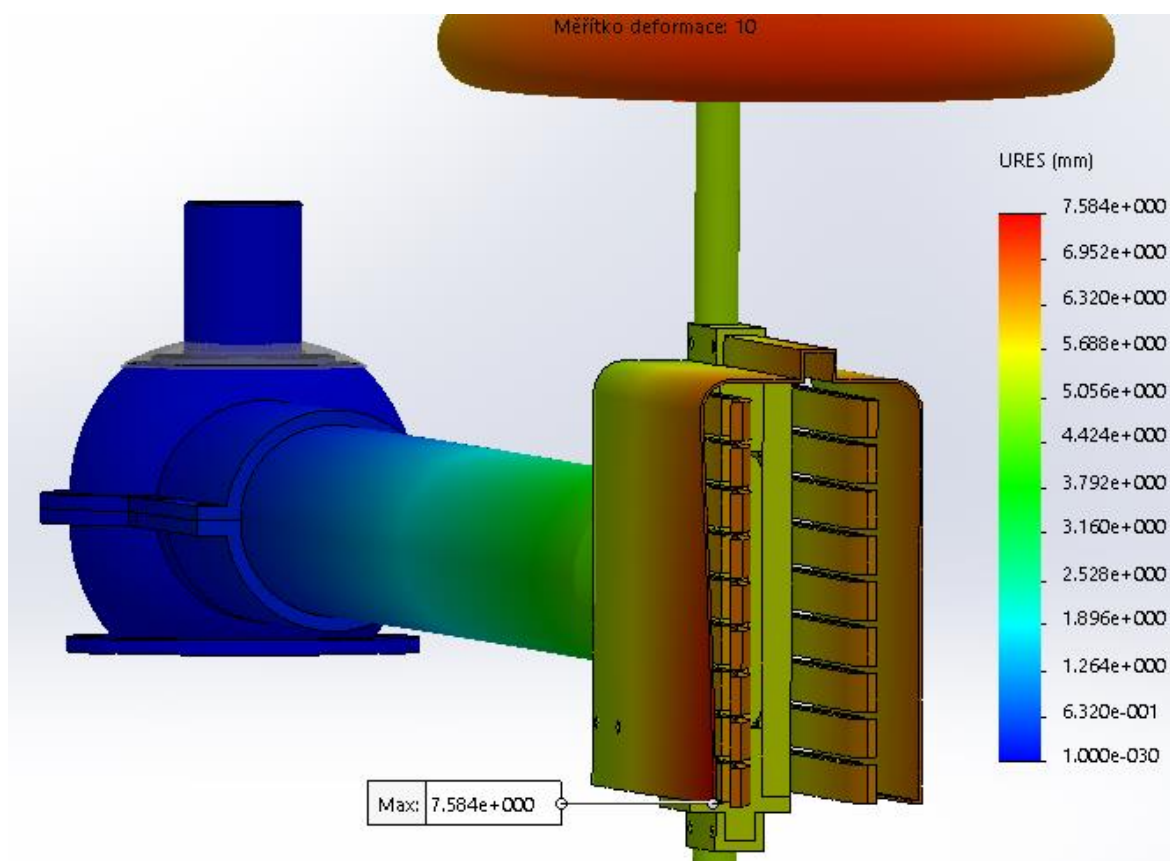
Obr. 3.7. Rozložení mechanického napětí na levém rameni

Nejvyšší mechanické napětí 73,6 MPa vychází v místě spojení přívodní hlavice a objímky, takto vysoká hodnota proti ostatním vychází z důvodu špatného zvolení šroubového spoje právě v tomto místě, tím došlo k oslabení materiálu a zvýšení mechanického napětí. Na rameni vychází nejvyšší mechanické napětí v místě výstupu z objímky, toto napětí vyšlo 36,9 MPa. Tato hodnota odpovídá výslednému namáhání $\sigma = 40 \text{ MPa}$ vypočtenému v kapitole 2.6.4. Další vybraná součást, kde dochází ke zvýšenému napětí, je kryt kontaktní hlavice. Zde vzniká zvýšené napětí v místě dotyku krytu a jeho výztuhy. Nejvyšší hodnota napětí krytu je 24,1 MPa. Dovolená hodnota mechanického napětí pro hliník, z něhož je vyrobeno rameno a přívodní hlavice

je $\sigma_{\text{dovAl}} = 130 \text{ MPa}$. Pro ocel z které je vyroben kryt kontaktní hlavice je dovolené namáhání vyšší a to $\sigma_{\text{dovocel}} = 200 \text{ MPa}$. Z toho vyplývá, že rameno odpojovače je vyhovující a maximální dovolené napětí materiálů nebylo překročeno.

Výsledné posunutí:

Výsledné posunutí, které vzniká účinkem zatěžujících sil, je zobrazeno na obrázku 3.8. Největší posunutí je u krytu kontaktní hlavice, kde případně může hrozit dotyk kontaktních palců a deformovaného krytu kontaktní hlavice.



Obr. 3.8. Posunutí levého ramene odpojovače účinkem zatěžujících sil

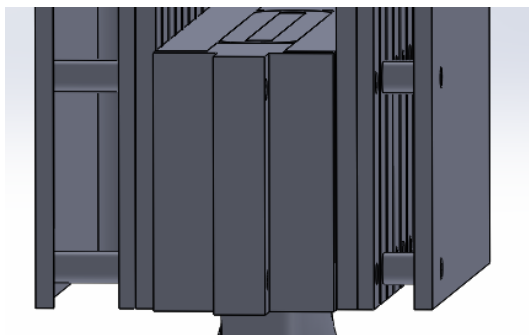
Největší výsledné posunutí $x_1 = 7,58 \text{ mm}$ vychází dle předpokladu na spodním rohu krytu kontaktní hlavice. Tudiž se kryt přiblíží při uvažovaném zatížení k palcům o cca 8 mm, kdy zůstane zachována dostatečná vůle a k dotyku těchto částí tedy nemůže dojít.

3.3 Optimalizace navrženého odpojovače

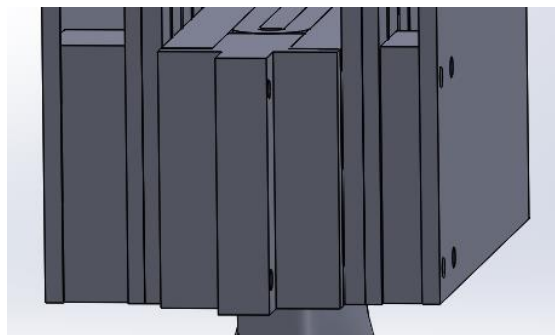
3.3.1 Úprava stávajícího ramene

Za účelem snížení napětí v materiálu navrženého odpojovače jsem provedl jeho úpravu. Tato úprava se týkala místa působení nejvyššího napětí, kde jsem přesunul místo pro šroubový spoj o 2 cm dále od místa, kde přechází přívodní hlavice v objímku. Dále jsem optimalizoval kryt kontaktní hlavice, kde jsem upravil výztuhu mezi pružiny a krytem pro snížení mechanického napětí.

Úpravu výztuh mezi kryt kontaktní hlavice a pružiny jsem zvolil z válcovitého tvaru na masivní obdélníkovou destičku, která by měla vytvořit dostatečnou plochu na podepření a vyztužení krytu viz obrázek 3.9. a 3.10.

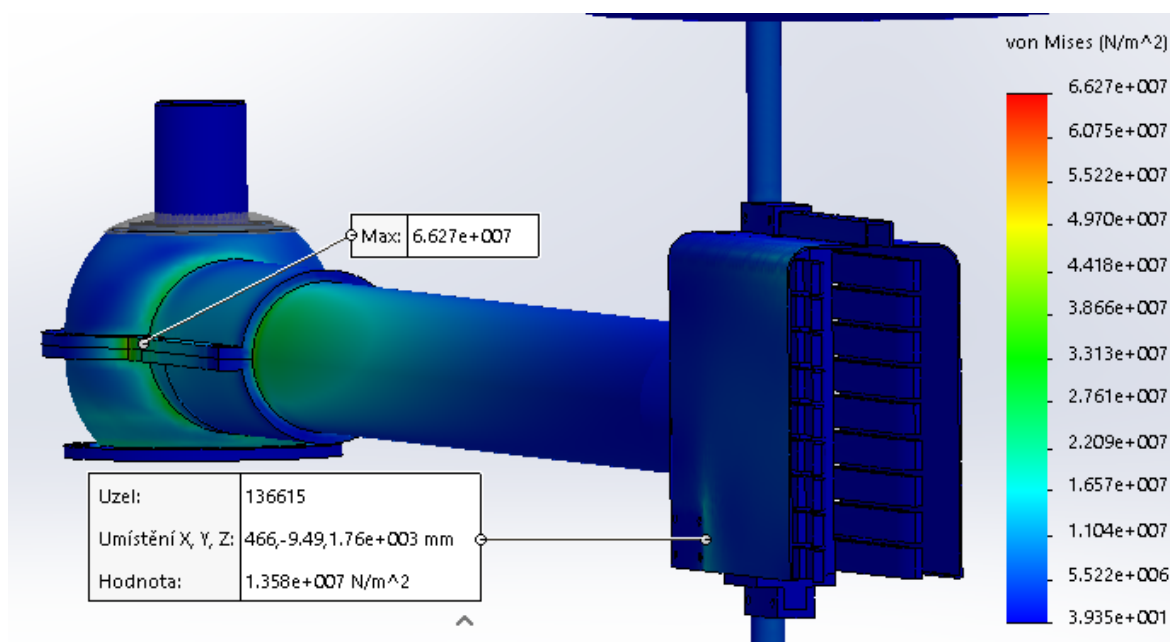


Obr. 3.9. Původní výztuha krytu



Obr. 3.10. Nová výztuha krytu

3.3.2 Mechanická analýza optimalizovaného odpojovače

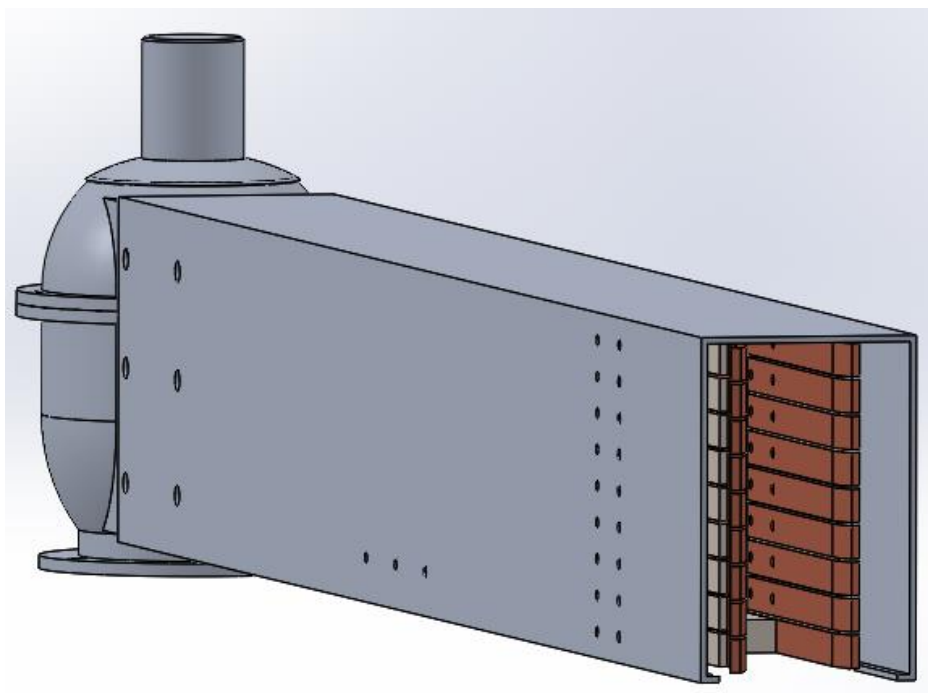


Obr. 3.11. Rozložení mechanického napětí na optimalizovaném rameni odpojovače

Výsledné rozložení mechanického napětí na optimalizovaném rameni odpojovače je zobrazeno na obrázku 3.11. Optimalizací se podařilo snížit nejvyšší mechanické napětí z hodnoty 73,6 MPa na hodnotu 66,3 MPa, tedy o 7,3 MPa a to pouze přesunutím místa šroubového spoje. Na krytu kontaktní hlavice kleslo mechanické napětí z 24,1 MPa na hodnotu 13,6 MPa, tedy o 10,5 MPa.

3.3.3 Návrh ramene tvářeného z plechu

Pro možné srovnání dvou různých variant jsem se rozhodl vytvořit odpojovač s ramenem vytvořeným z ohýbaného hliníkového plechu. Abych mohl zachovat stejný průřez, jako u předchozí varianty, zvolil jsem tloušťku plechu 5 mm. Kontaktní hlavice bude součástí ramene. Aby se jednotlivé palce s pružinami daly uchytit uvnitř ramene, musel jsem zvolit jeho výšku 270 mm. Dále jsem upravil uchycení a výšku přívodní hlavice a vytvořil výztuhy mezi kontakty a střed ramene. Model ramene z ohýbaného plechu je zobrazen na obrázku 3.12.



Obr. 3.12. Model ramene z ohýbaného hliníkového plechu

Abych mohl provést výpočet mechanické analýzy pomocí programu SolidWorks, bylo zapotřebí spočítat síly zatěžující toto rameno.

Výpočet síly působící na rameno tlakem větru:

$$F'_{rv} = p_v \cdot l'_r \cdot v'_r = 700 \cdot 1,975 \cdot 0,265 = 366,4 \text{ N} \quad (3.1)$$

$p_v = 700 \text{ (Pa)}$... tlak větru o rychlosti $34 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (normální pracovní podmínky)

$l'_r = 1,975 \text{ (m)}$... délka ramene z ohýbaného plechu

$v'_r = 0,265 \text{ (m)}$... výška ramene z ohýbaného plechu

Výpočet síly namáhající rameno vlivem námrazy:

Plocha ramene:

$$S'_r = (l'_r + 2 \cdot v'_r) \cdot x'_r = (1,975 + 2 \cdot 0,265) \cdot 0,173 = 1,39 \text{ m}^2 \quad (3.2)$$

$x'_r = 0,173 \text{ (m)}$... šířka ramene z ohýbaného plechu

Objem námrazy:

$$V'_{lr} = S'_r \cdot t = 1,39 \cdot 0,02 = 0,028 \text{ m}^3 \quad (3.3)$$

$t = 0,02 \text{ (m)}$... maximální tloušťka ledu (třída 20)

Hmotnost námrazy:

$$m'_{lr} = \rho_{led} \cdot V'_{lr} = 917 \cdot 0,028 = 25,46 \text{ kg} \quad (3.4)$$

$\rho_{led} = 917 \text{ (kg} \cdot \text{m}^{-3})$... hustota ledu

Síla působící na rameno vlivem námrazy:

$$F'_{lr} = m'_{lr} \cdot g = 25,46 \cdot 9,81 = 249,8 \text{ N} \quad (3.5)$$

Síly zatěžující rameno:

Výpočet elektrodynamické síly zde není uveden, z důvodu shodné velikosti této síly s předchozí variantou. Výpočet této síly je popsán v kapitole 2.6.2.

Tab. 3.2. Síly zatěžující levé rameno odpojovače z ohýbaného plechu

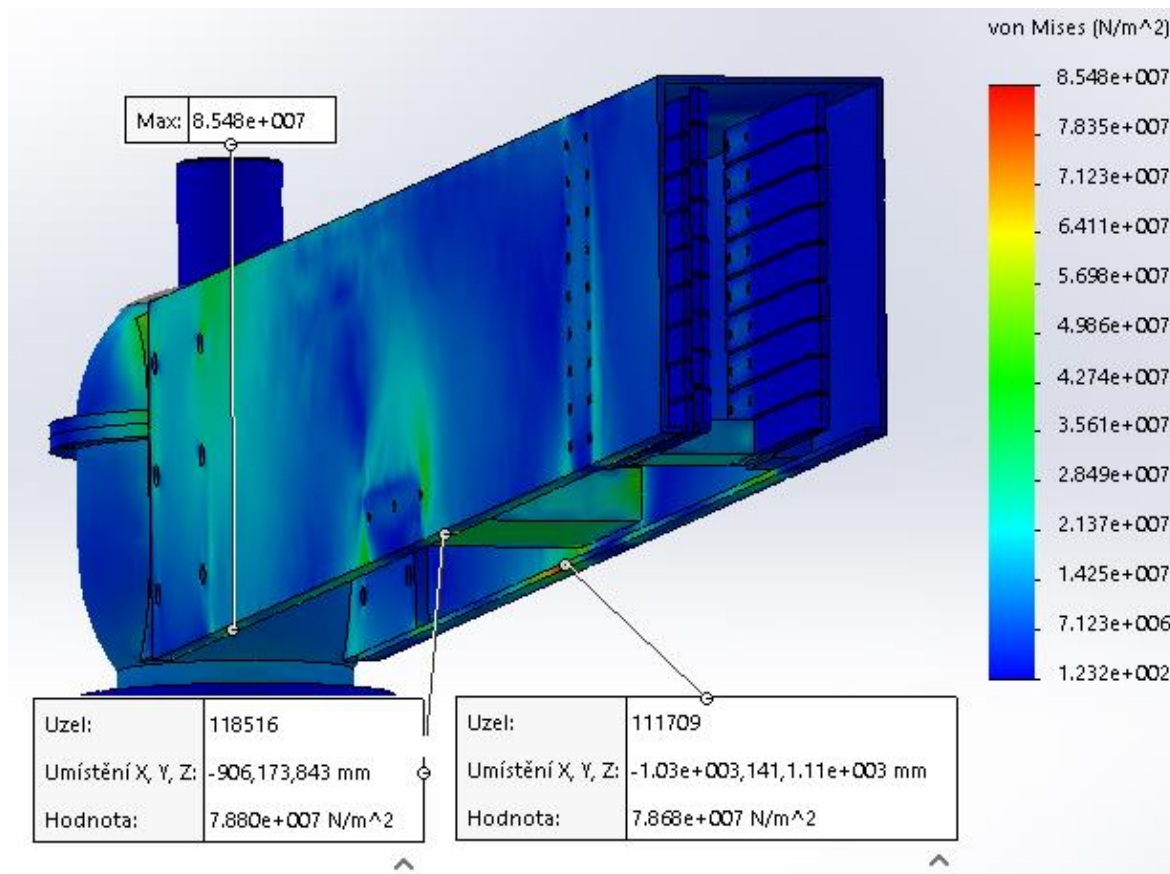
Síla větru působící na rameno:	$F'_{rv} = 366,4 \text{ N}$
Síla působící na rameno vlivem námrazy:	$F'_{lr} = 249,8 \text{ N}$
Elektrodynamická síla:	$F_{ed} = 4944 \text{ N}$

3.3.4 Mechanická analýza ramene odpojovače tvářeného z plechu

Mechanická analýza levého ramene odpojovače z ohýbaného plechu byla vytvořena stejným způsobem jako v předchozí kapitole. Síly zatěžující rameno jsou v tabulce 3.2.

Mechanické napětí:

Výsledné rozložení mechanického napětí je zobrazeno na obrázku 3.13.



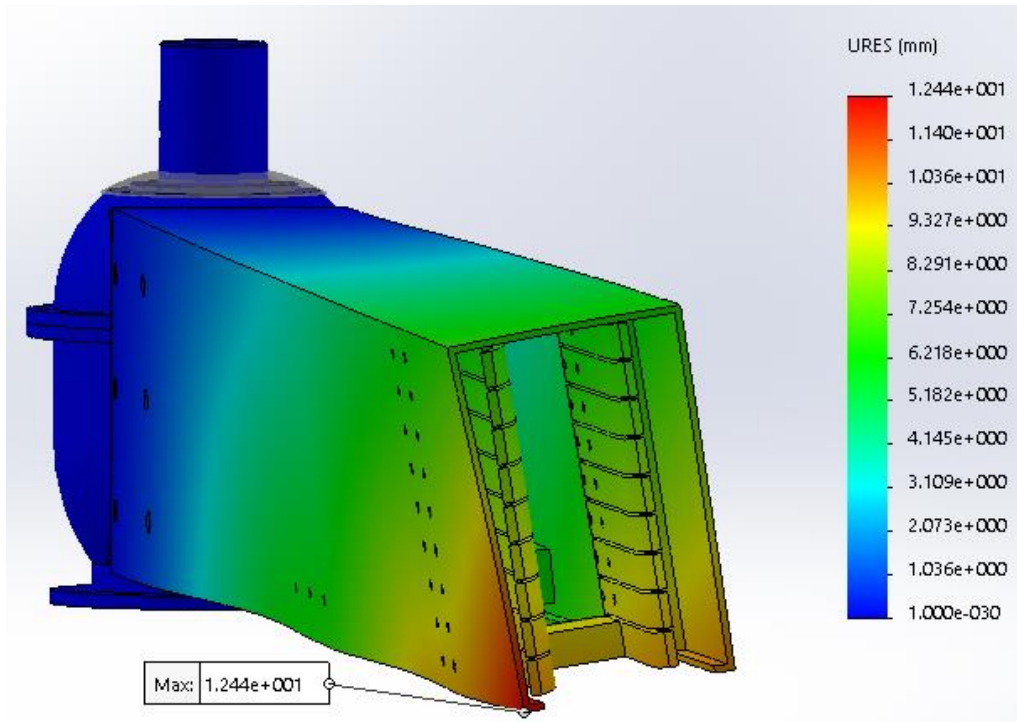
Obr. 3.13. Rozložení mechanického napětí na rameni z ohýbaného plechu

Nejvyšší mechanické napětí vyšlo ve spodní části uchycení ramene k přívodní hlavici. Toto napětí má hodnotu 85,5 MPa. Další místo zvýšeného namáhání se nachází v polovině spodního záhybu, který slouží pro zpevnění ramene odpojovače. Zde se pohybuje napětí okolo 79 MPa. V tomto rameni na rozdíl od předchozích verzí vzniká velké mechanické napětí. Rozdíl největších napětí s verzí před optimalizací vychází 11,9 MPa a s verzí po optimalizaci dokonce 19,2 MPa. Takto velké mechanické napětí vzniká z důvodu menší tuhosti zvoleného profilu a větších rozměrů ramene a tudíž většího namáhání vlivem větru a námrazy. Dovolená hodnota mechanického napětí pro hliník,

z něhož je vyrobeno rameno, je $\sigma_{\text{dovAl}} = 130$ MPa. Dovolené mechanické napětí nebylo překročeno a tedy i toto rameno je vyhovující.

Výsledné posunutí:

Výsledné posunutí, vznikající účinkem zatěžujících sil, je zobrazeno na obrázku 3.14.



Obr. 3.14. Výsledné posunutí ramene z ohýbaného plechu

Největší výsledné posunutí $x_{1'} = 12,44$ mm vychází ve stejném místě jako u varianty ramene s trubkou a to v dolním rohu konce ramene. U této varianty však vyšla hodnota největšího posunutí o 4,86 mm vyšší. Tudíž se konec ramene přiblíží při uvažovaném zatížení k palcům o cca 9 mm, kdy zůstane zachována dostatečná vůle. K dotyku těchto částí tedy také nemůže dojít.

4 Možnosti optimalizace navrženého odpojovače

V této kapitole jsou zhodnoceny a porovnány řešené varianty odpojovacího ramene a uvedeny některé další možnosti optimalizace navrženého odpojovače.

Bylo by dobré provést teplotní analýzu na navrženém odpojovači, která by ukázala oteplení jednotlivých částí odpojovače. Z výsledků by se dalo určit nadměrné oteplení jednotlivých dílů a to snížit zvětšením ochlazovacích ploch těchto dílů. Na tuto analýzu jsem se však neorientoval.

4.1 Možnosti optimalizace trubkového ramene

Rameno odpojovače vytvořené z trubky jsem se pokusil optimalizovat a snížit mechanické napětí v materiálu již v kapitole 3.3.1 a 3.3.2. Narazil jsem na problém nevhodně umístěných šroubových míst, kde docházelo k velké koncentraci napětí. Úpravou a přesunutím těchto míst se mi podařilo napětí v materiálu snížit o 7,3 MPa. Dále se mi podařilo úpravou a zesílením stávajících výztuh snížit mechanické napětí v krytu kontaktní hlavice o 10,5 MPa.

4.2 Rameno tvářené z plechu

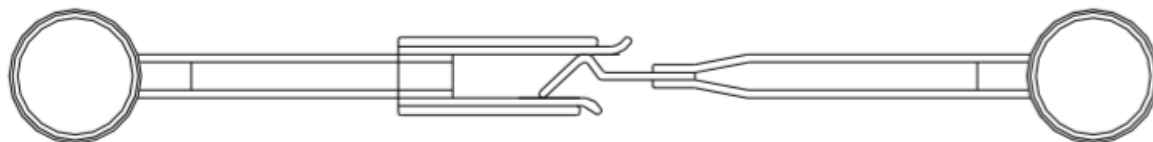
Dále se nabízí možnost použít místo ramene trubkového rameno z ohýbaného plechu, tuto variantu jsem namodeloval v programu SolidWorks a ověřil mechanické vlastnosti při zatížení. Podrobný popis modelu a výsledky analýzy jsou v kapitole 3.3.3 a 3.3.4. Jelikož jsem se snažil zachovat průřez stejný jako u ramene trubkového, zvolil jsem tloušťku plechu ramene 5 mm. Pro lepší mechanické vlastnosti by bylo vhodnější volit tloušťku plechu alespoň 6-7 mm.

Výsledky analýzy ukázaly, že z mechanického hlediska je vhodnější použít trubkové rameno, než rameno z ohýbaného plechu. Na toto rameno totiž působí značné síly vlivem větru a vlivem námrazy a to z důvodu velkých rozměrů. Při návrhu rozměrů ramene jsem byl limitován kontaktními palci, které jsou v této variantě uchyceny uvnitř ramene a to tak tvoří kryt, který již není potřeba navrhovat.

Z hlediska vyrobitelnosti se rameno z ohýbaného plechu jeví jako lepší a jednodušší. Není zde potřeba tolik dílů pro sestavení kontaktní hlavice. Ta je zde součástí ramene na rozdíl od původní verze, tím pádem tato varianta bude i levnější.

4.3 Rameno z pasoviny

Jednou z možností je také nahradit trubkové rameno ramenem z pasoviny, ty by tvořily dvě paralelní cesty proudové dráhy viz obrázek 4.1. Tato varianta bude podobná verzi s ramenem z ohýbaného plechu, její výroba bude ovšem mnohem jednodušší. Jednotlivé pásy budou muset mít dostatečný průřez, aby nahradily chybějící vrchní část. Z mechanického hlediska bude tato varianta horší než předchozí varianty. Zatížení tohoto ramene vlivem větru bude stejné jako u ramene z ohýbaného plechu, jen zatížení vlivem námrazy bude přibližně o třetinu nižší.



Obr. 4.1. Odpojovač s ramenem z pasoviny [8]

4.4 Kontaktní hlavice

Úpravou a vytvořením kontaktní hlavice z profilu by se trubka ramene nemusela na konci ploštit. Kontaktní hlavice by mohla být přivařena na konci ramene. Tato varianta se jeví jako jednodušší na výrobu.

Pro zajištění potřebného kontaktního tlaku jsem zvolil pružiny listové. Mohla by být použita varianta s vinutými pružinami, ale muselo by dojít k menším úpravám hlavice.

4.5 Přívodní hlavice

Mnou navržená varianta přívodní hlavice vede na tlakové lití hliníku. To je finančně náročná varianta z hlediska potřebných forem. Pro zjednodušení by mohla být přívodní hlavice válcového tvaru. Může být svařována z jednotlivých dílů, které by byly vyrobeny z běžně dostupných profilů. Tato výrobní metoda je mnohem dostupnější a také levnější.

Jako pohyblivý kontakt jsem v přívodní hlavici zvolil kuželíkové ložisko. Místo kuželíků se dá použít ploštěné měděné pletivo, tato varianta se mi jeví jako méně efektivní.

Závěr

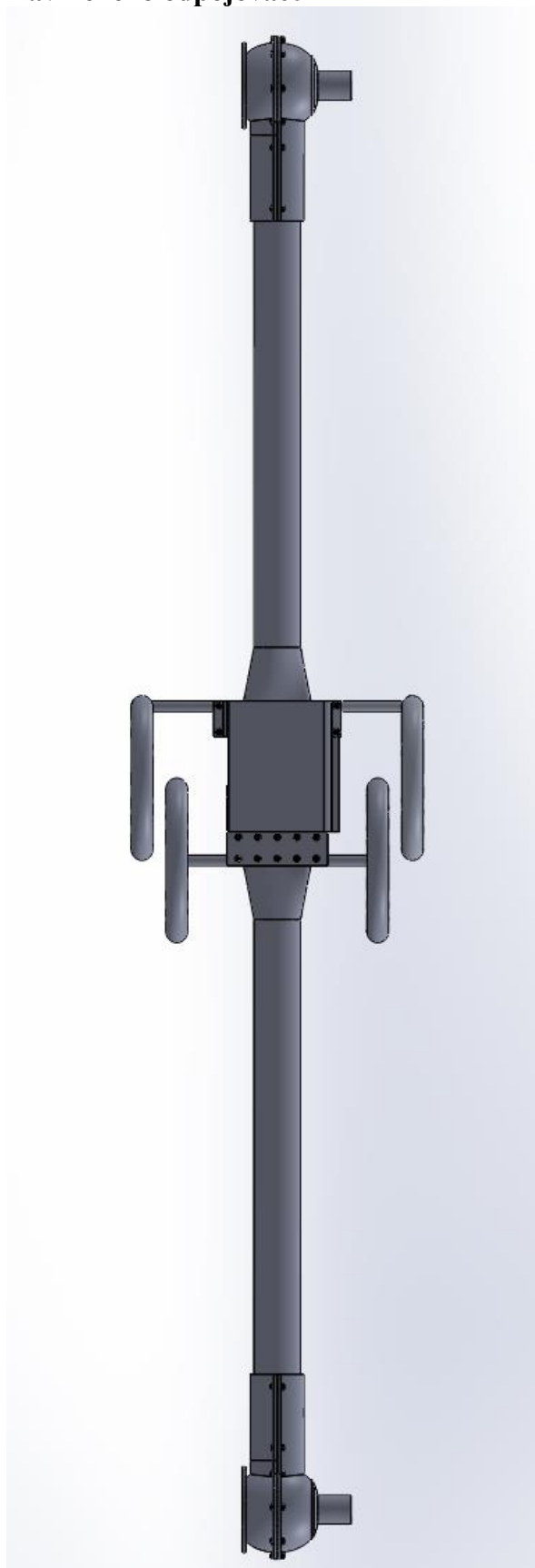
V této diplomové práci jsem se zabýval seznámením s odpojovači, uvedl jsem vysvětlení jejich funkce, dělení podle různých kritérií a popis zkoušek. Cílem této práce byl základní konstrukční návrh horizontálního odpojovače na hladině 420 kV, s navýšením jmenovitého proudu na 5 000 A, s odpovídajícím zvýšením hodnot zkratových proudů. Tato varianta ještě na našem trhu není a je již poptávána ze strany zákazníků. Na navrženém odpojovači jsem provedl mechanickou analýzu v programu SolidWorks. Analytickým výpočtem jsem zjistil hodnotu mechanického namáhání ramene odpojovače $\sigma_v = 40$ MPa, kterou jsem následně ověřil pomocí numerické mechanické analýzy, kde vyšla hodnota $\sigma = 36,9$ MPa. Podle výsledků analýzy a rozložení mechanického napětí jsem provedl dílčí konstrukční úpravy navrženého odpojovače. Úpravami se mi podařilo omezit hodnoty maximálního mechanického napětí. Pro možné srovnání dvou různých variant jsem vytvořil model ramene odpojovače tvářeného z plechu. Na tomto modelu jsem opět provedl mechanickou analýzu. Výsledky analýzy ukázaly, že z mechanického hlediska je navržené trubkové rameno jednoznačně lepší, než rameno tvářené z plechu. V rameni tvářeného z plechu totiž vzniká velké mechanické napětí z důvodu menší tuhosti zvoleného profilu a větších rozměrů ramene. V poslední části práce jsem zhodnotil a porovnal řešené varianty odpojovacího ramene a uvedl některé další možnosti optimalizace navrženého ramene.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Havelka, O. a kol.: *Elektrické přístroje*. Praha, SNTL, 1985.
- [2] Bárta, K., Vostracký, Z. a kol.: *Spínací přístroje VVN*. Praha, SNTL, 1983.
- [3] SERW, s.r.o. [online]. *Vysoké napětí*. ©2019. [cit. 2019-01-20] Dostupné z: <https://www.serw.cz/cs/vysoke-napeti>
- [4] ČSN EN 62271-1. *Vysokonapěťová spínací a řídicí zařízení – Část 1: Společná ustanovení*. Praha: Český normalizační institut, 2009.
- [5] ČSN EN 62271-102. *Vysokonapěťová spínací a řídicí zařízení – Část 102: Odpojovače a uzemňovače střídavého proudu na napětí nad 1000 V*. Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [6] ČSN IEC 60-1. *Technika zkoušek vysokým napětím – Část 1: Obecné definice a požadavky na zkoušky*. Praha: Český normalizační institut, 2011.
- [7] Veverka, A.: *Technika vysokých napětí*. Praha, SNTL, 1982.
- [8] Kadera, Martin: *Optimalizace proudové dráhy a inovace konstrukčního řešení odpojovače VVN*. Plzeň, 2003. Disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta elektrotechnická.
- [9] Kolář, Libor: *Návrh horizontálního odpojovače 245kV se zaměřením na kontaktní systém*. Plzeň, 2008. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta elektrotechnická.
- [10] ALUPA, s.r.o. [online]. *Přehled sortimentu*. ©2019. [cit. 2019-02-15] Dostupné z: <https://www.alupa.cz/hlinik/hlinikove-trubky/kat-IG00000101.html>
- [11] Cigánek, L.: *Elektrické přístroje spínací, ochranné a řídicí*. Praha, SNTL, 1956.
- [12] DASSAULT SYSTÉMES SOLIDWORKS, Corp. [online]. *3D CAD*. ©2019. [cit. 2019-4-20] Dostupné z: <https://www.solidworks.com/category/3d-cad>
- [13] TOP TECH, s.r.o. [online]. *Simulation Premium*. ©2017. [cit. 2019-04-25] Dostupné z: <https://www.top-tech.cz/produkty/simulace-cae/pevnostni-analyzy/simulation-premium>
- [14] SOLIDVISION, s.r.o. [online]. *SolidWorks Simulation*. ©2019. [cit. 2019-04-20] Dostupné z: <https://www.solidvision.cz/solidworks-simulation/>

Přílohy

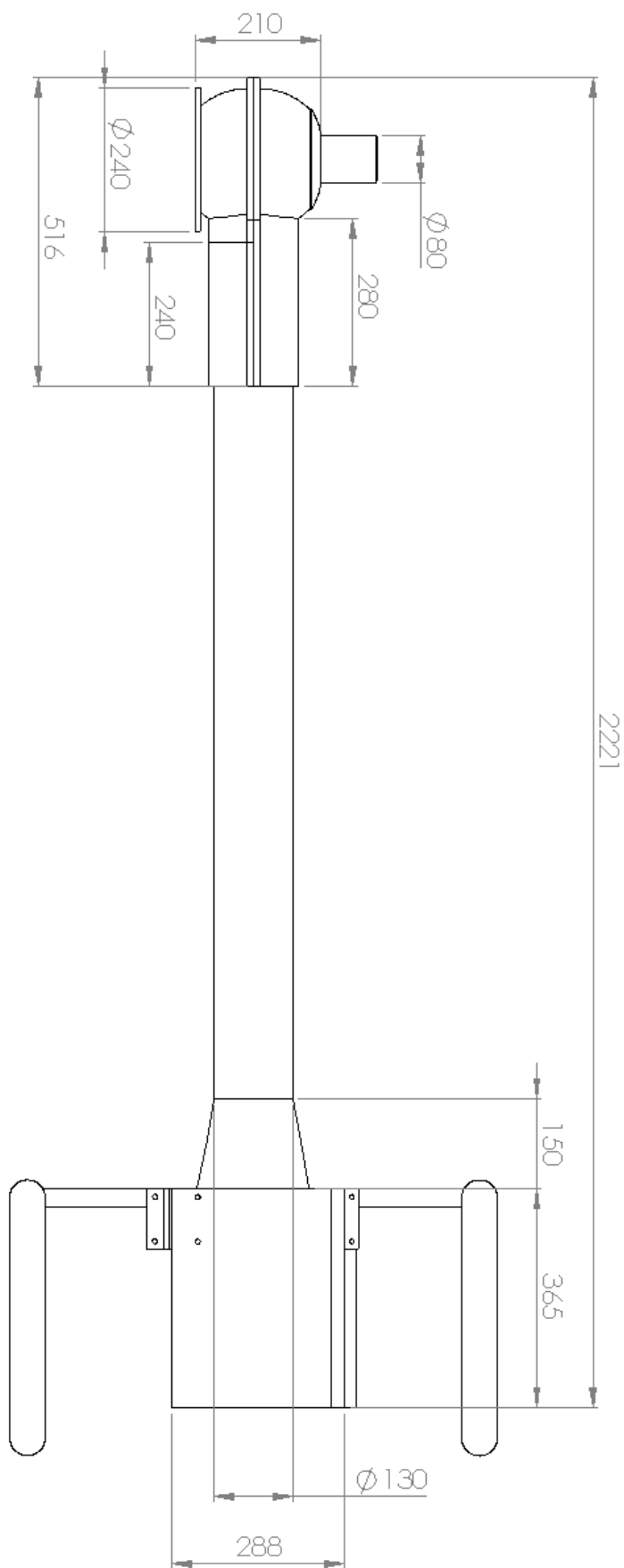
Příloha 1 – 3D model navrženého odpojovače



Příloha 2 – Výpočetní síť levého ramene odpojovače



Příloha 3 – Základní rozměrový náčrt levého ramene



Příloha 4 – Základní rozměrový náčrt kontaktní hlavice