

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

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

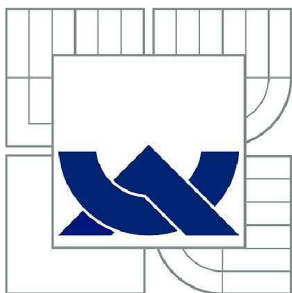
NÁVRH ODPOJOVAČE NA VYSOKÉ NAPĚTÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

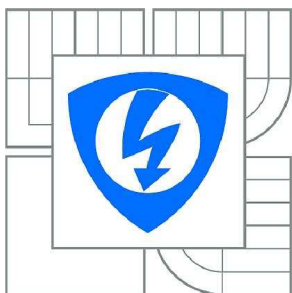
RADEK HRUBÝ

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

**ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A
ELEKTRONIKY**

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

NÁVRH ODPOJOVAČE NA VYSOKÉ NAPĚTÍ

DESIGN OF HV DISCONNECTOR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

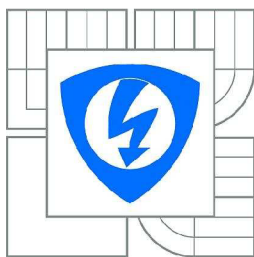
RADEK HRUBÝ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. ZDENĚK VÁVRA, CSc.

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Radek Hrubý

ID: 106477

Ročník: 3

Akademický rok: 2009/2010

NÁZEV TÉMATU:

Návrh odpojovače na vysoké napětí

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Provedte rozbor všeobecných podmínek pro konstrukční návrh.
2. Vypracujte metodický návod pro návrh izolace odpojovače.
3. Vytvořte metodický návod pro návrh proudové dráhy včetně připojovacích svorek a ověření na mechanické namáhání elektrodynamickými silami.
4. Vypracujte metodický návod pro návrh ovládacího mechanismu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle doporučení vedoucího

Termín zadání: 1.10.2009

Termín odevzdání: 27.5.2010

Vedoucí práce: doc. Ing. Zdeněk Vávra, CSc.

doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Následující práce je zaměřena na návrh odpojovače na vysoké napětí. Je proveden krátký teoretický rozbor stavebních směrnic přístroje. Navazuje návrh izolačního systému přístroje podle empirických vzorců. V dalším je rozebráno dimenzování proudové dráhy odpojovače. Pro proudovou dráhu jsou vypočteny působící elektrodynamické síly. Oteplení proudové dráhy je simulováno počítačovým programem ANSYS, tato simulace zahrnuje 3D model přístroje a určení materiálových a tepelných konstant. V poslední řadě je uveden výpočet potřebného momentu na hřídeli odpojovače. Tento výpočet je zjednodušen. Výstupem jest náčrt přístroje a 3D model použitý pro simulaci oteplení.

ABSTRACT

Below is the text focuses on the design of high-voltage disconnecter. It made a brief theoretical analysis of construction equipment directives. Proposal follows the insulation system apparatus according to empirical formulas. Hereafter, we discuss the design of current track isolators. For the flow path are calculated electrodynamic forces acting. Warming current path is simulated by a computer program ANSYS, this simulation includes 3D device model and determine the material and thermal constants. Finally it is shown calculating the required torque on the shaft of the disconnecter. This calculation is simplified. The output is a 3D sketch of the device model used to simulate warming.

KLÍČOVÁ SLOVA

3D model odpojovače; elektrodynamické síly; izolace; krátkodobé oteplení; moment pohonu; odpojovač na vysoké napětí; proudová dráha; proudové rozložení; oteplení

KEY WORDS

3D model of disconnecter; current distribution; current way; electrodynamic forces; high voltage disconnecter; insulation; short-time warming; temperature rise; torque of shaft

Bibliografická citace práce:

HRUBÝ, R. *Návrh odpojovače na vysoké napětí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 45 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Zdeněk Vávra, CSc.

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Doc. Ing. Zdeňku Vávrovi, CSc. a Ing. Jiřímu Valentovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne

Podpis autora

Obsah

Seznam obrázků	8
Seznam tabulek	9
1. Úvod.....	10
2. Stavební směrnice odpojovače na vysoké napětí	10
3. Podmínky pro konstrukční návrh	11
3.1 Podmínky návrhu izolace	11
3.2 Podmínky návrhu proudové dráhy	13
3.3 Podmínky návrhu pohonu	14
4. Charakteristické hodnoty pro návrh konstrukce.....	16
4.1 Hodnoty napětí	16
4.2 Hodnoty proudů.....	17
5. Návrh izolace odpojovače	17
5.1 Izolace mezi póly	17
5.2 Izolace v odpojovací dráze	18
5.3 Izolace mezi živými částmi a zemí	19
6. Návrh proudové dráhy.....	20
6.1 Průřez přípojovacího pásu.....	20
6.2 Průřez kontaktního roubíku.....	21
6.3 Průřez pohyblivého kontaktu	21
6.4 Stykový (přechodový) odpor kontaktů a tlak.....	22
6.5 Elektrodynamické síly.....	23
6.6 Návrh přítlačné pružiny.....	27
6.7 Krátkodobé oteplení	29
7. Počítačový model odpojovače.....	32
7.1 Okrajové podmínky, materiálové a teplotní konstanty	33
7.2 Oteplení proudové dráhy	35
7.3 Rozložení proudu	36
8. Výpočet momentu ovládacího mechanismu.....	37
9. Závěr.....	42
Příloha	44
Seznam součástí na náčrtu.....	44
Použitá literatura	45

Seznam obrázků

Obrázek 1: Znázornění pohybu odpojovače.....	15
Obrázek 2: Rozdělení pohonů [3]	15
Obrázek 3: Kontakt nože odpojovače s roubíkem.....	22
Obrázek 4: Znázornění síly F mezi nožem a praporcem.....	25
Obrázek 5: Znázornění působení síly záhybu proudu	27
Obrázek 6: Celková zkratová charakteristika odpojovače	31
Obrázek 7: 3D model odpojovače	33
Obrázek 8: Oteplení proudové dráhy s připojovacím vodičem.....	35
Obrázek 9: Detail oteplení proudové dráhy	35
Obrázek 10: Detail oteplení kontaktu.....	36
Obrázek 11: Rozložení proudu.....	36
Obrázek 12: Proudové rozložení v oblasti kontaktu	37
Obrázek 13: Rozměry mechanického systému	38
Obrázek 14: Vzdálenosti rozpěrek a těžiště	39
Obrázek 15: Znázornění změny třetího poloměru	40
Obrázek 16: Znázornění sil při začátku vsouvání nože.....	41

Seznam tabulek

Tabulka 1: Klasifikace odpojovačů podle ČSN 62271-102	11
Tabulka 2: Hodnoty zkušebních napětí podle ČSN EN 62271-102.....	16
Tabulka 3: Parametry izolační podpěry odpojovače	19
Tabulka 4: Přeskokové napětí po povrchu izolátoru pro zvolené délky	20
Tabulka 5: Vzdálenost koordinačních hrotů podle přeskokového napětí	20
Tabulka 6: Výchozí hodnoty pro výpočet pružiny	28
Tabulka 7: Dovolené oteplení	30
Tabulka 8: Mezní proudy pro zvolené časy zkratu	31
Tabulka 9: Úbytky napětí podle zvolených nadproudů	32
Tabulka 10: Moment tíhy nožů podle úhlu rozevření	41
Tabulka 11: Štítek odpojovače	43

1. Úvod

Moje práce bude zaměřena na návrh odpojovače na vysoké napětí podle zadaných vstupních hodnot. Provedu krátký rozbor konstrukčních podmínek odpojovače. Zaměřím se především na podmínky návrhu izolačního systému a proudové dráhy. Systém pohonu kontaktního systému bude rozebrán jen informativně.

V další části budou uvedeny výpočty izolačních vzdáleností, proudové dráhy a potřebného momentu pohonu. Proudovou dráhu následně ověřím výpočty na dynamické účinky procházejícího poruchového proudu. Tepelné účinky proudu se pokusím simulovat na počítačovém modelu pomocí simulačního programu ANSYS. Pro návrh pohonu vypočítám jeho potřebný moment za použití zjednodušeného postupu a doporučím typ pohonu. Celý výpočetní postup provedu podle [4].

Výstupem bude zjednodušený počítačový model odpojovače a výkresová dokumentace mnou navrženého odpojovače, podle zadaných vstupních charakteristických hodnot.

2. Stavební směrnice odpojovače na vysoké napětí

Odpojovač je elektrické zařízení, které slouží ke spínání obvodu nebo části distribuční sítě nebo jiného elektrického zařízení bez zátěže (neprochází zatěžovací proud). Má dva provozní stavy a to, vypnuto a zapnuto. Tyto dva stavy musí být dobře viditelné nebo u zapouzdřených odpojovačů musí být spolehlivě signalizovány. Odpojovač je dostatečně mechanicky pevný a elektricky odolný elektrický přístroj a provedením musí odpovídat normě ČSN EN 62271-102.

Jeho konstrukce musí trvale přenášet jmenovitý proud a oteplení způsobené tímto proudem nesmí překročit stanovenou mez normou ČSN EN 62271-102. Při průchodu zkratového proudu musí být zaručena mechanická odolnost celé konstrukce odpojovače vůči elektrodynamickým silám. Ani oteplení způsobené zkratovým proudem nesmí překročit stanovenou mez.

Izolace mezi živými částmi a neživými částmi musí být dostatečná, aby vydržela příslušné napěťové zkoušky. Tyto zkoušky udává norma ČSN 62271-102 pro příslušné napěťové hladiny.

Pohon musí být navržen tak, aby odpojovač mohl spolehlivě měnit zapnutou a vypnutou polohu. Ke změně těchto stavů smí dojít jenom konáním obsluhy a stavy musí být dobře viditelné nebo spolehlivě signalizovány.

Provedení odpojovačů je mnoho. Jejich název se často odvozuje od druhu pohyblivého kontaktu nebo jeho pohybu. Některá provedení odpojovačů jsou kombinována s uzemňovačem (uzemňovací odpojovač), který má na každém pólu uzemňovací nože a jejich pohyb je vázán na činnost pohyblivých kontaktů. V mé práci se budu zabývat provedením jako odpojovač na vysoké napětí.

Častá provedení odpojovačů:

- Nožové
- Rotační (otáčivé)
- Sklápěcí – tímto provedením se v mé práci budu zabývat
- Nůžkové (pantografické) – s tímto provedením se běžně setkáváme u tramvají nebo v trakčních sítích u lokomotiv
- Přepojovače – podobají se nožovým odpojovačům, lze nimi oddělně spínat dva nebo více nezátížených obvodů.
- Zkratovač – je to uzemňovač s mžikovým pohybem do zapnuté polohy se zaručenou zapínací schopností. Často se tento zvláštní druh odpojovače používá jako bezpečnostní zařízení ve vstupních polích rozvaděčů nn a vn.

3. Podmínky pro konstrukční návrh

Podmínky pro konstrukční návrh úzce souvisí s daným použitím odpojovače. Jelikož je moje práce zaměřena na standardní odpojovač třídy M0 pro vnitřní použití, nebudu uvažovat atmosférické vlivy na jeho konstrukci. Budu uvažovat stabilní provozní okolní podmínky jako je stálá okolní teplota a neměnné okolní prostředí. Kdyby byl odpojovač provozován v blízkosti jiného silnoproudého zařízení vyznačující se vysokou provozní teplotou, musím tento předpoklad zahrnout při ověřování konstrukce na tepelné účinky procházejícího proudu, tuto skutečnost však v mé práci uvažovat nebudu.

Další podmínky souvisí s provozními hodnotami napětí a proudu, na které musí být konstrukce odpojovače dimenzována. Zejména systém izolace musí vydržet napěťové namáhání a konstrukční provedení musí snést proudové namáhání, které způsobuje oteplování konstrukce a vznik elektrodynamických sil. A v neposlední řadě je to poháněcí systém nožů odpojovače. Musí být zaručena spolehlivá změna provozních stavů odpojovače. Tuto spolehlivost, co se počtu spínacích cyklů týče, definuje norma ČSN 62271-102 mechanickou trvanlivostí odpojovače.

Třída	Typ odpojovače	Počet spínacích cyklů
M0	Standardní odpojovač (normální mechanická trvanlivost)	1000
M1	Odpojovač určený pro použití s vypínačem stejné třídy (zvýšená elektrická trvanlivost)	2000
M2	Odpojovač určený pro použití s vypínačem stejné třídy (zvýšená elektrická trvanlivost)	10000

Tabulka 1: Klasifikace odpojovačů podle ČSN 62271-102

3.1 Podmínky návrhu izolace

Izolace odpojovače na vysoké napětí musí být provedena tak, aby nedošlo k jejímu znehodnocení při jeho provozu a spolehlivě odolávala napěťovému zatížení. Izolace musí odolat jak normálnímu tak i poruchovému stavu na vedení. Tyto podmínky simulují napěťové zkoušky prováděné ve zkušebnách. Provedená izolace vyhovuje, když nedojde k přeskoku při

jednominutové zkoušce střídavým a zkoušce rázovým napětím. Hodnoty těchto napětí se liší v závislosti na provozní napěťové hladině.

Izolace odpojovače musí vydržet napěťové namáhání:

- Mezi živými částmi různých fází
- Mezi živými částmi a zemním potenciálem
- Mezi rozepnutými kontakty, tj. v odpojovací dráze

Jednotlivé póly odpojovače jsou umístěny na podpěrných izolátorech. Při napěťových zkouškách mezi živými a neživými částmi, je to právě izolátor, který musí vydržet napěťové namáhání. Při návrhu toho izolátoru musíme navíc zohlednit povrchové napětí, které působí podél celého obvodu izolátoru. Nesmí dojít k přeskoku napětí mezi pólem odpojovače a zemí a následkem toho projít proud do země. Povrchové napětí je však nebezpečné při nepříznivých atmosférických podmínkách jako je déšť nebo mlha, kdy se mění izolační vlastnosti okolí. Tento fakt je při mém použití odpojovače irelevantní.

Hodnoty zkušebních napětí udává příslušná státní norma. Najdeme zde hodnoty zkušebních napětí předepsaných jak v odpojovací dráze a mezi živými částmi různých fází tak i mezi fází a zemí.

Odpojovač má dvě nejčastější provedení:

1. Nezapouzdřený

Toto provedení je nejčastější, používá se pro venkovní i vnitřní prostory a při návrhu musíme počítat s účinky prostředí na jeho izolaci. Zde bývá nejčastěji použit jako izolant vzduch pro izolaci v odpojovací dráze, pevné izolanty jsou použity pro izolaci proti zemi. Požadovaných izolačních vlastností docílíme správným uspořádáním celého odpojovače. Na toto provedení budu dimenzovat mnou navrhovaný odpojovač, s tím že použití bude pro vnitřní prostory.

2. Zapouzdřený

Toto provedení odpojovače se používá v zapouzdřených rozvodnách. Při zapouzdření celého odpojovače můžeme použít jiné izolační médium a tím podle potřeby měnit rozměry celého odpojovače. Zde se nejčastěji používá jako izolant SF₆.

Při návrhu vhodné izolace je potřeba dbát na co nejlepší využití izolantů. To znamená, pokusit se, o co největší přiblížení k rovnoměrnému elektrickému poli. Izolace je namáhána intenzitou elektrického pole, tato veličina se udává v kV/mm. Hodnota intenzity elektrického pole, při které dojde k průrazu (u pevných izolantů) nebo přeskoku (u kapalné nebo plynné izolace) se nazývá ELEKTRICKÁ PEVNOST IZOLANTU. Jenomže tato vlastnost materiálu není konstantní. Závisí na řadě okolností, jako je teplota, mechanické namáhání, tvar a doba přiloženého napětí, objem izolantu atd. Po ujasnění materiálu izolace, v mém případě vzduch o relativně stálých vlastnostech díky použití odpojovače ve vnitřních prostorách, můžeme určit velikost přeskového (průrazného) napětí podle vztahu:

$$U_p = E_0 \cdot \eta \cdot d \cdot k \quad (2.1)$$

Kde: E_0 – vnitřní elektrická pevnost izolantu [kV/mm]

η – koeficient využití elektrického pole

d – doskok [mm]

k – souhrnný koeficient $k < 1$ (respektuje vliv vodivých i nevodivých nečistot, vliv materiálu, drsnosti elektrod atd.)

U_p – přeskokové nebo průrazné napětí [kV]

Po určení přeskokového napětí je potřeba zjistit výdržné napětí U_v . Tímto napětí můžeme izolant namáhat v normálním provozu ale i při provádění napěťových zkoušek. Nejdeme ho v příslušné státní normě. Požadavky na izolaci jsou dány izolačními hladinami. Dodržením těchto hladin získáme rozměry odpojovače.

3.2 Podmínky návrhu proudové dráhy

Proudová dráha je jednou ze základních částí elektrického přístroje. Je to soustava prvků, které vedou elektrický proud. Funkcí proudové dráhy u odpojovače je přenášet provozní i přechodné proudy. Odpojovač má dvě části proudové dráhy, a to:

- Nepohyblivé části, tj. například svorky nebo připojovací praporce
 - Zajišťují přívod a vývod proudu z odpojovače
- Pohyblivé části (póly), které tvoří kontakty odpojovače
 - Zajišťují vypnutí a zapnutí přístroje

Tyto dvě části odpojovače je nutné uvažovat při návrhu proudové dráhy, tedy neuvažovat jenom funkci elektrickou ale i funkci mechanickou. Z toho vyplývá, že proudová dráha je namáhána tepelně i mechanicky. Proto je žádoucí zvolit vhodné materiály pro její realizaci.

Při návrhu proudové dráhy vycházíme z hodnoty jmenovitého proudu. Předběžně zvolíme proudovou hustotu 1,5 – 4 A/mm², z tohoto předpokladu vypočteme minimální průřez proudové dráhy. Tento minimální průřez obvykle představuje pohyblivý kontakt (kontakty). Pokud průřez vychází příliš velký, volíme paralelní uspořádání, kde se procházející proud rozdělí na polovinu. Takto navrženou proudovou dráhu ověřujeme na tepelné a silové účinky procházejícího proudu.

Jak bylo uvedeno v úvodu, proudová dráha odpojovače musí být navržena tak, aby spolehlivě přenášela jmenovitý a poruchový proud tekoucí přístrojem. Tento proud vyvolá oteplení použitého vodiče, které závisí na použitém materiálu a prostředí, v němž bude přístroj pracovat. Ustálená hodnota teploty nesmí překročit stanovenou mez normou ČSN EN 62271-102.

Oteplení vytvořené procházejícím proudem by se mělo blížit 95% dovolené hodnoty. V tomto případě je proudová dráha navržena ekonomicky. Přestoupí-li tuto hodnotu, je nutno provést opravu konstrukce:

- Zvětšit kontaktní tlak
- Zlepšit ochlazovací podmínky

Když nelze realizovat ani jedno, je nutné navrhnout vyšší průřez vodiče.

Procházející proud má dále za následek vznik elektrodynamických sil, které způsobují mechanické namáhání. Na toto namáhání musí být dimenzovány podpěrné izolátory a přípojovací svorky. Uvažujeme vždy největší možné namáhání, které může nastat, toto se nejčastěji děje při průchodu zkratového proudu.

U odpojovače musíme uvažovat rovnoběžné uspořádání vodičů. Při tomto uspořádání roste velikost elektrodynamických sil s kvadrátem proudu. Dále sledujeme vliv rezonance na velikost této síly. Proto je nutné kontrolovat vlastní kmitočet dílců proudové dráhy. Pro zjednodušení předpokládáme konfiguraci jako nosník na dvou podpěrách.

Pokud se vlastní kmitočet dílců blíží kmitočtům 50 nebo 100 Hz je nutné změnit, buď průřez vodiče, nebo rozteče podpěr. U odpojovače tyto úpravy nejsou obvykle možné, proto se využívá vyztužení nožů ocelovými příložkami nebo rozpěrnými čepy.

Nedílnou součástí proudové dráhy jsou kontakty. Při navrhování kontaktu musíme věnovat velkou pozornost použitému materiálu. Rozhodující pro volbu materiálu kontaktu je jeho elektrická vodivost, mechanická pevnost, odolnost proti otěru, chemická stálost, povrchová korozivost atd. Správného materiálu většinou docílíme správnou kombinací několika materiálů. U odpojovače se nejčastěji setkáváme s plošným kontaktem.

Nejdůležitějším kritériem, podle kterého se kontakty posuzují, je přechodový odpor styku. Tento odpor má vliv na velikost tepelných ztrát na styku, tedy na velikost oteplení kontaktů. Toto oteplení je rozhodující, protože oteplení v kontaktech je největší v celé proudové dráze odpojovače. Udává nám celkovou zkratovou charakteristiku odpojovače.

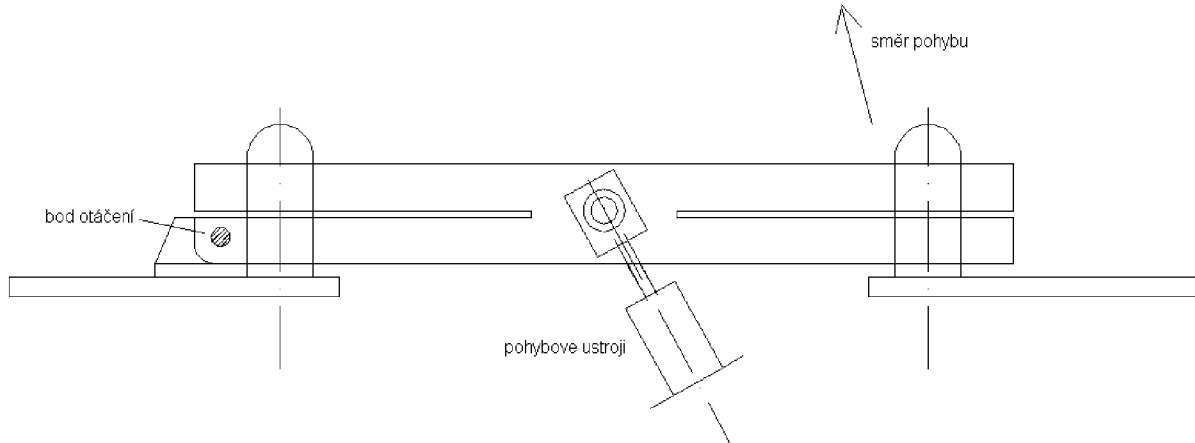
Velikost odporu je dána velikostí přitlačné síly, teplotou a úbytkem napětí na kontaktním styku. Při zvyšování teploty se vlivem strukturálních změn v materiálu kontaktů začne zmenšovat přechodový odpor. S dalším zvyšováním teploty dojde ke svaření kontaktů. Teploty na mezi měknutí a svaření kontaktních materiálů převádíme na velikost v daných bodech a tyto hodnoty jsou rozhodující při stanovení stykového odporu pro daný kontaktní materiál a příslušný proud.

Situace svaření kontaktů může nastat při průchodu zkratového proudu. Který má za následek vyvolání elektrodynamických sil, které výrazně mění přitlačnou sílu mezi kontakty. Tato síla může způsobit zvětšení nebo zmenšení přitlačné síly. Pro systém kontaktů je žádoucí, aby konstrukce odpojovače, byla provedena jako tzv. adynamická, tj. aby se přitlačná síla vlivem působení elektrodynamických sil zvyšovala.

3.3 Podmínky návrhu pohonu

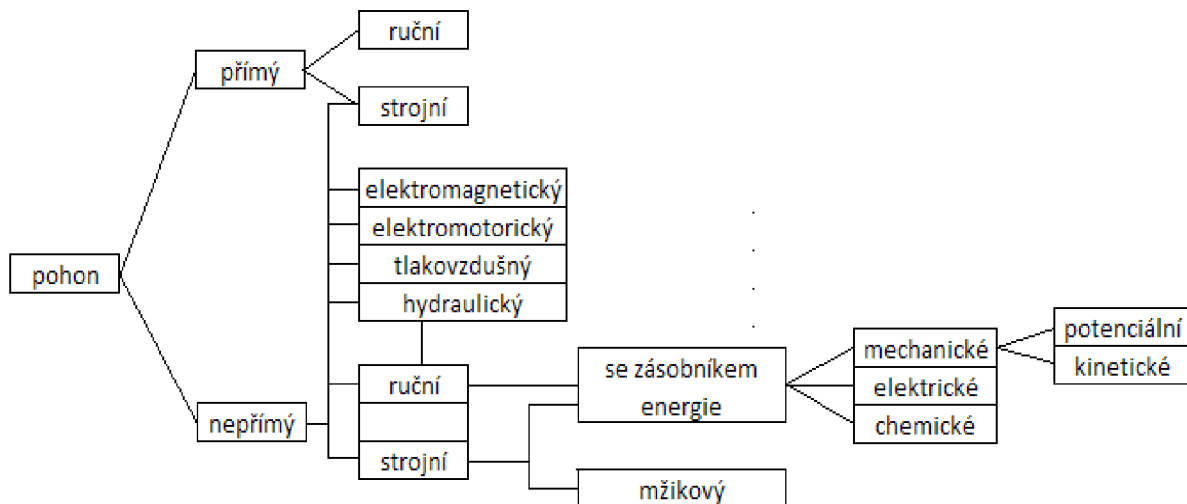
Pohon umožňuje odpojovači měnit zapnutou a vypnutou polohu. Použitý pohon je spojen s vhodným mechanismem, který způsobí oddálení kontaktů. Jako pohon se nejčastěji

využívá přímý strojní pohon elektromotorický, tlakovzdušný nebo hydraulický. Působením pohonu se díky pohybovému ústrojí nůž odpojovače pohybuje se zapnuté do vypnuté polohy nebo naopak. Pohyb koná kolem bodu otáčení, jak je naznačeno šipkou.



Obrázek 1: Znárodnění pohybu odpojovače

Možných pohonů je mnoho, přičemž z uvedeného rozdělení se pro odpojovače nepoužívají elektromagnetické a chemické pohony. Pohon se navrhuje podle potřeb zákazníka. Ten si sám určí, jaký typ pohonu nejlépe vyhovuje jeho potřebám. Pohony se dodávají přímo výrobcem a vhodný typ nebo provedení si může často vybírat z poskytnutých katalogů.



Obrázek 2: Rozdělení pohonů [3]

Při návrhu je však nutné určit velikost momentu potřebného ke správné funkci odpojovače. Nebo při použití tlakových pohonů je nutno znát velikost tlaku, který je nutný ke změně polohy odpojovače. K těmto výpočtům je potřeba znát celkovou váhu pohybujícího se soustrojí dráhu, po které pohyb koná a také délku ramena soustrojí mezi pohonem a odpojovačem.

4. Charakteristické hodnoty pro návrh konstrukce

V bakalářském projektu byl zpracován metodický postup výpočetního návrhu odpojovače. Pro účely této práce byl zvolen modelový příklad návrhu odpojovače pro charakteristické hodnoty.

4.1 Hodnoty napětí

Hodnoty napětí jsou dány napěťovou hladinou sítě, ve které bude odpojovač provozován. K tomu je podle normy IEC 60694 přiřazeno nejvyšší dovolené provozní napětí, při kterém může v dané síti odpojovač pracovat. Dále k tomuto napětí norma určuje hodnoty napěťových zkoušek, na které musí být izolace navržena. Hodnoty zkušebních napětí uvádí tabulka 2 a jejich znalost je nezbytná pro další výpočty.

Takže hodnoty, ze kterých budu vycházet, jsou následující:

- a) Jmenovité napětí: $U_r = 22kV$
- b) Nejvyšší dovolené napětí: $U_{rn} = 24kV$
- c) Jmenovité krátkodobé střídavé výdržné napětí
 - Mezi póly a mezi pólem a zemí: $U_d = 50kV$
 - V odpojovací dráze: $U_{d;odp} = 60kV$
- d) Jmenovité výdržné napětí při atmosférickém impulsu
 - Mezi póly jednotlivých fází: $U_p = 95kV$
 - Mezi pólem a zemí: $U_{p;L-Z} = 125kV$
 - V odpojovací dráze: $U_{p;odp} = 145kV$

Jmenovité napětí U_n [kV](efektivní hodnota)	Jmenovité krátkodobé střídavé výdržné napětí U_d [kV](efektivní hodnota)		Jmenovité výdržné napětí při atmosférickém impulsu U_p [kV] (vrcholová hodnota)	
	společná hodnota	v odpojovací dráze	společná hodnota	v odpojovací dráze
7,2	20	23	40	46
			60	70
12	28	32	60	70
			75	85
24	50	60	95	110
			125	145
36	70	80	145	165
			170	195
123	185	210	450	520
	230	265	550	630
145	230	265	550	630
	275	315	650	750

Tabulka 2: Hodnoty zkušebních napětí podle ČSN EN 62271-102

4.2 Hodnoty proudů

Velikost procházejícího proudu odpojovačem je dána jeho jmenovitou hodnotou. Pro různé hodnoty proudu jsou konstruovány odpojovače s příslušnými vlastnostmi proudové dráhy. Směrodatná hodnota proudu pro výpočet je pro odpojovač hodnota poruchového proudu, například zkratového. Je důležité znát nejen velikost, ale i dobu průchodu zkratového proudu.

Při návrhu odpojovače jsou směrodatné tři druhy proudy:

Jmenovitý proud – je hodnota proudu, který musí odpojovač za jakýchkoli okolností trvale přenášet.

Jmenovitý krátkodobý výdržný proud – je hodnota proudu přiřazená odpojovači výrobcem, kterou je tento přístroj schopen po určenou dobu (krátkodobé zpoždění) bez poškození přenášet. V případě střídavého proudu je to efektivní hodnota střídavé složky předpokládaného zkratového proudu.

Jmenovitý dynamický výdržný proud – je to maximální hodnota proudu při první periodě zkratového proudu.

Hodnoty, ze kterých budu vycházet pro návrh proudové dráhy odpojovače:

- a) Jmenovitý proud: $I_r = 630A$
- b) Jmenovitý krátkodobý výdržný proud: $I_k = 15kA$
- c) Doba zkratu: $t = 1s$

5. Návrh izolace odpojovače

Pro návrh izolace vycházíme z empirických vztahů pro jednotlivé konfigurace elektrod a pro jednotlivé zkoušky. Mezi živými částmi, tj. mezi jednotlivými fázemi použijí jako izolant vzduch. V odpojovací dráze bude použit rovněž vzduch. Mezi fází a zemí bude použito izolačních podpěrek z epoxidové pryskyřice.

5.1 Izolace mezi póly

Pole mezi jednotlivými póly odpojovače, se nejvíce podobá konfiguraci elektrod dvou izolovaných hrotů. Empirický vzorec pro přeskovové napětí U_p je následující:

$$U_p \approx 3,4d + 14(1 - e^{-0,25d}) \quad (4.1)$$

Uvažujeme-li zkušební napětí střídavé zkoušky výdržným napětím 50kV a zanedbáme-li exponenciální člen, získáme přibližnou hodnotu doskovové vzdálenosti d' mezi póly odpojovače.

$$d' = \frac{U_d - 14}{3,4} = \frac{50 - 14}{3,4} = 10,59cm \quad (4.2)$$

To je však díky zanedbání exponenciálního členu hodnota orientační a potřebujeme tedy provést její korekci. Tu provedeme dosazením hodnoty d' do rovnice 4.1. A zjistíme tak velikost přeskovového napětí U_p' .

$$U_p' \approx 3,4d' + 14(1 - e^{-0,25d'}) = 3,4 \cdot 10,59 + 14(1 - e^{-0,25 \cdot 10,59}) = 49,1kV \quad (4.3)$$

Tedy známe hodnotu přeskokového napětí při vzdálenosti pólů 10,59cm. Když tuto hodnotu porovnáme s hodnotou napětí při střídavé zkoušce, zjistíme, že je menší. To znamená, že vzdálenost nevyhovuje při střídavé zkoušce a je potřeba její hodnotu zvětšit tak, aby vyšlo přeskokové napětí větší než 50kV. Proto její hodnotu zvětším na $d'' = 11cm$ a provedu další výpočet podle 4.1.

$$U_p' \approx 3,4d'' + 14(1 - e^{-0,25d''}) = 3,4 \cdot 11 + 14(1 - e^{-0,25 \cdot 11}) = 50,51kV \quad (4.4)$$

Tato vzdálenost by tedy podle konfigurace elektrod jako dva izolované hroty dostačovala z hlediska krátkodobého zkušebního střídavého rázového napětí. Výsledek ještě překontrolujeme vzorcem pro konfiguraci elektrod jako kladný hrot – uzemněný hrot, protože je vhodnější pro rázovou zkoušku.

$$U_p \approx 6,7d'' + 25(1 - e^{-0,25d''}) = 6,7 \cdot 11 + 25(1 - e^{-0,25 \cdot 11}) = 97,11kV \quad (4.5)$$

Zjistíme tedy, že i podle této konfigurace elektrod vzdálenost d'' pólu odpojovače vyhovuje z hlediska zkoušky střídavým rázovým napětím. Tato vzdálenost by vyhověla i při zkoušce atmosférickým impulsem. Jenomže uvedené vztahy udávají jen poloviční průrazné napětí. Musíme proto vzdálenost mezi póly ještě zvětšit, tak aby přeskokové napětí vyšlo alespoň 110% ze zkušební napětí atmosférickým impulsem. Z tohoto důvodu upravuji vzdálenost pólů odpojovače na $d''' = 12,5cm$. Přeskokové napětí je tedy potom následující.

$$U_p \approx 6,7d''' + 25(1 - e^{-0,25d'''}) = 6,7 \cdot 12,5 + 25(1 - e^{-0,25 \cdot 12,5}) = 107,7kV \quad (4.6)$$

Tato hodnota napětí představuje 113,4% z hodnoty udávané normou ČSN IEC 60694 pro jmenovité výdržné napětí při atmosférickém impulsu. Dala by se tedy hodnota vzdálenost 12,5cm považovat za nejmenší vzdálenost mezi póly odpojovače, při které nedojde k přeskoku napětí mezi živými částmi jednotlivých fází.

Musíme však ještě uvážit homogenitu pole. U odpojovače elektrody nepředstavují ostré hrany ale plošky, není tedy elektrické pole extrémně nehomogenní a vzdálenost 12,5 cm mezi živými částmi by opravdu mohla být minimálně nutná. Norma však doporučuje vzdálenost 25cm mezi živými částmi. To je více, jak o 100% větší hodnota, než jsem určil výpočtem z empirických vztahů. Proto upravím minimální vzdálenost živých částí odpojovače na konečných $d = 15cm$.

5.2 Izolace v odpojovací dráze

Z předchozích výpočtů lze konstatovat, že stačí vycházet z hodnoty napětí pro jmenovité výdržné napětí při atmosférickém impulsu. Pro výpočet tedy stačí určit vzdálenost pro největší možné napětí, které se na odpojovači může objevit a to je právě hodnota napětí při zkoušce výdržným napětím při atmosférickém impulsu a to je pro můj případ 145kV.

Odpojovací dráha v rozepnuté poloze představuje konfiguraci dvou neuzemněných hrotů. Tuto konfiguraci však nemáme popsánu žádným empirickým vzorcem. Proto použiji empirického vzorce pro přeskokové napětí mezi jednotlivými póly odpojovače a to konfiguraci kladný hrot – uzemněný hrot. Jako výchozí vzdálenost použiji již známou

minimální hodnotu mezi živými částmi 15 cm. Přeskokové napětí potom bude mít následující hodnotu.

$$U_p \approx 6,7d' + 25(1 - e^{-0,25d'}) = 6,7 \cdot 15 + 25(1 - e^{-0,25 \cdot 15}) = 124,92kV \quad (4.7)$$

Tato hodnota napětí odpovídá hodnotě impulsního napětí při rázové zkoušce a je tedy nevyhovující. Proto provedu zvětšení vzdálenosti v odpojovací dráze na 20cm. Této hodnotě odpovídá přeskokové napětí 158,8kV. Takže hodnotu 20cm v odpojovací dráze považuji za použitelnou pro konstrukci mého odpojovače.

5.3 Izolace mezi živými částmi a zemí

Při hledání minimální vzdálenosti mezi živými částmi a zemí vycházím ze vzorce pro konfiguraci hrotů kladný hrot – uzemněná rovina při rázové pevnosti. U výrobce naleznou vyráběné izolační podpěrky, pro které následně provedu výpočet přeskokového napětí. Tím ověříme její možnost použití pro odpojovač. Konkrétně nás zajímá její celková výška. Tato hodnota potom představuje nejmenší možnou dráhu, po které může k přeskoku napětí.

Izolační podpěru volím od firmy MEFUKA CZ, s.r.o. Vyráběné izolátory jsou zhotoveny z epoxidové pryskyřice. Pro svůj odpojovač volím podpěrku typu 20AN, ta má následující parametry:

Typ	U _r	U _d	U _p	F	H
20AN	25kV	50kV	125kV	5000N	210mm

Tabulka 3: Parametry izolační podpěry odpojovače

- Kde:
- U_r – jmenovité napětí [kV]
 - U_d – Jmenovité krátkodobé střídavé výdržné napětí [kV]
 - U_p – Jmenovité výdržné napětí při atmosférickém impulsu [kV]
 - F – síla, kterou můžeme izolátor namáhat v radiálním směru [N]
 - H – celková výška izolační podpěry [mm]

$$U_p \approx 5,5H + 15(1 - e^{-0,25H}) = 5,5 \cdot 21 + 15(1 - e^{-0,25 \cdot 21}) = 130,42kV \quad (4.8)$$

Podle výpočtu můžeme vidět, že přeskokové napětí kolmo přes izolátor vyhovuje z hlediska zkušebnímu napětí při atmosférickém impulsu. Musíme však ještě uvážit nepříznivost zkoušky jmenovitým výdržným střídavým napětím, kdy je izolátor namáhám při povrchu, právě díky času, po který je napětí přikládáno. Vycházíme tedy z délky izolátoru při povrchu. Tuto hodnotu výrobce přímo neuvádí, proto ji musím vypočítat nebo přibližně určit. Výpočet za mých okolností, kdy neznám výšku jednoho žebra, neznám poloměr při náběhu na další žebro, není možný. Proto musím délku přibližně určit.

Při určování budu vycházet z celkové výšky izolátoru. V následující tabulce jsou uvedeny přeskoková napětí pro mnou určené délky povrchu izolátoru H_{zv} . Vycházet budu ze

vzorce:
$$U_p \approx 3H_{zv} + 25(1 - e^{-0,1H_{zv}}) \quad (4.9)$$

H=21cm	105%H	110%H	115%H	120%H	125%H	130%H	135%H	140%H
H _{vz} [cm]	22,05	23,1	24,15	25,2	26,25	27,3	28,35	29,4
U _p [kV]	88,39	91,82	95,22	98,59	101,94	105,27	108,58	111,88

Tabulka 4: Přeskokové napětí po povrchu izolátoru pro zvolené délky

Z tabulky lze vidět, že při délce povrchu izolátoru jen o 5% větší než je jeho výška, je přeskokové napětí 143%, zkušebního napětí. Je tedy jisté, že délka povrchu izolátoru je větší a tudíž vyhovuje. Takže lze konstatovat, že mnou vybraný podpěrný izolátor vyhovuje z hlediska napěťového namáhání.

Podpěrky musíme chránit před účinky případného obloukového výboje. Tuto ochranu provádíme pomocí přeskokových hrotů, někdy nazývaných jako koordinační hroty. Tyto hroty tvoří nejslabší místo celé izolace pólu odpojovače proti zemi. Jejich vzdálenost určíme podle napěťových zkoušek. Zvolím si vzdálenost, provedu výpočet přeskokového napětí a z následující tabulky 5 vyberu nejvhodnější hodnotu vzdálenosti koordinačních hrotů d_k . Budu přitom vycházet z empirických vzorců pro konfiguraci hrot – uzemněný hrot.

Pro střídavou zkoušku je to vzorec: $U_{d;př} \approx 3,7 \cdot d_k + 19(1 - e^{-0,3d_k})$ (4.10)

Pro zkoušku impulsním napětím je to vzorec: $U_{p;př} \approx 6,7d_k + 25(1 - e^{-0,25d_k})$ (4.11)

d _k	14,00	14,50	15,00	15,50	16,00
U _{d;př}	70,52	72,40	74,29	76,17	78,04
U _{p;př}	118,05	121,48	124,91	128,33	131,74

Tabulka 5: Vzdálenost koordinačních hrotů podle přeskokového napětí

Podle tabulky 5, tedy zvolíme vzdálenost koordinačních hrotů 15,5cm. Tato vzdálenost odpovídá i z hlediska dodržení nejvyšší izolační hladiny.

6. Návrh proudové dráhy

Při návrhu vhodného vodiče pro proudovou dráhu vycházíme ze zvolené proudové hustoty. Navrhnout musíme připojovací pás, představující pevný kontakt, vodič nože odpojovače, představující pohyblivý kontakt odpojovače a kontaktní roubík, představující kontakt mezi připojovacím pásem a pohyblivým kontaktem. Vodiče připojovacího pásu a pohyblivého kontaktu budou zhotoveny z polotvrdé elektrovedné mědi. Kontaktní roubík bude zhotoven z tvrdé elektrovedné mědi, pro lepší mechanické vlastnosti bude postříbřen. Následně musíme provést kontrolu na oteplení vodičů a také na elektrodynamické síly, které vyvolá procházející proud. Tyto síly namáhají kontakty, připojovací vodiče, podpěrné izolátory, v případě provedení paralelní proudové dráhy, působí i mezi paralelními vodiči.

6.1 Průřez připojovacího pásu

Vycházíme ze jmenovitého procházejícího proudu. Ten je v mém případě $I_n = 630A$. Když zvolím proudovou hustotu $\sigma_{pp} = 2A/mm^2$, minimální průřez připojovacího pásu je tedy:

$$S_{přip} = \frac{I_n}{\sigma} = \frac{630}{2} = 315mm^2 \quad (5.1)$$

Zvolíme tedy průřez pásu 40x10mm. Musíme přepočítat proudovou hustotu:

$$\sigma' = \frac{I_n}{S_{zvol}} = \frac{I_n}{a \cdot b} = \frac{630}{40 \cdot 10} = 1,57 \text{ A/mm}^2 \quad (5.2)$$

Nyní máme průřez pásu, který bude odvádět a přivádět proud procházející odpojovačem. Hodnota se zdá být přijatelná. Můžeme provést korekci proudové dráhy vytvořením otvorů do vodiče. Proudové zatížení se tím zvětší, ale na druhou stranu se bude z vodiče lépe odvádět teplo vytvořené procházejícím proudem. Ale bude to mít ještě jednu zápornou vlastnost, a to snížení mechanické odolnosti proti elektrodynamickým silám působících mezi vodiči.

6.2 Průřez kontaktního roubíku

Kontaktní roubík je válcového průřezu. Počáteční proudovou hustotu volím $\sigma_{kr} = 2 \text{ A/mm}^2$. Minimální průřez se zvolenou proudovou hustotou vychází na 315 mm^2 . Na základě toho, tedy poloměr roubíku volím 11 mm . Proudová hustota je následující:

$$\sigma_{kr} = \frac{I_n}{S_{kr}} = \frac{I_n}{\pi \cdot (r_{kr}^2 - r_s^2)} = \frac{630}{\pi \cdot (11^2 - 5,25^2)} = 2,15 \text{ A/mm}^2 \quad (5.3)$$

Což představuje rozumnou hodnotu. Musíme uvažovat, že kontaktní roubík představuje styk s pohyblivým kontaktem. Takže se zde důsledkem průchodu proudu bude vytvářet teplo a negativně tím působit na vlastnosti kontaktu. Technicky vzato je zde tedy menší proudová hustota žádoucí. A jelikož představuje pohyblivý kontakt, opatřím jeho povrch postříbřením pro zlepšení jak vlastností mechanických, tak i elektrických.

Roubíkem bude procházet šroub M10, který ho bude mechanicky spojit s přípojovacím praporcem. Je tedy zřejmé, že se tím značně zmenšuje průřez roubíku a tedy i proudová hustota. V roubíku je však značně nehomogenní rozložení proudu, takže by průřez mohl být dostačující.

6.3 Průřez pohyblivého kontaktu

Pohyblivý kontakt jednoho pólu vodiče budou tvořit dva rovnoběžné vodiče. Procházející proud se tedy rozdělí na polovinu. Proudovou hustotu si zvolím stejnou jako v předchozím případě, tedy $\sigma_{pk'} = 2 \text{ A/mm}^2$. Výpočtem získáme minimální průřez jednoho vodiče nože odpojovače:

$$S_{min;nože} = \frac{I_n}{2 \cdot \sigma_{pk'}} = \frac{630}{2 \cdot 2} = 157,5 \text{ A/mm}^2 \quad (5.3)$$

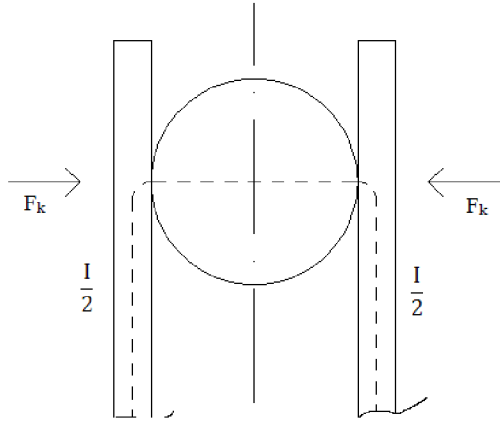
Dále, si jako v minulých výpočtech zvolím průřez, který pro nůž odpojovače použiji. Pro jeden paralelní nůž jednoho pólu odpojovače tedy volím průřez $35 \times 5 \text{ mm}^2$. Takže reálné proudové zatížení pro jeden z paralelní dvojice vodiče pólu odpojovače je tedy:

$$\sigma_{pk} = \frac{I_n}{2 \cdot S_{nože}} = \frac{630}{2 \cdot 175} = 1,8 \text{ A/mm}^2 \quad (5.4)$$

Hodnota zatížení proudové dráhy je přijatelná. Při použití rozpěrek mezi paralelními vodiči bude stoupat, a proto je její nízká počáteční hodnota žádoucí.

6.4 Stykový (přechodový) odpor kontaktů a tlak

U odpojovače máme tři typy kontaktu. Jeden typ je pevný plošný, který přivádí a odvádí proud z odpojovače. Druhý typ je kluzný přímkový kontakt, který se nachází na straně odpojovače, kde je připevněn nůž odpojovače a je zde osa otáčení. A třetí typ je také přímkový kontakt, ale na rozdíl od druhého typu zde dochází k úplnému oddálení.



Obrázek 3: Kontakt nože odpojovače s rouбіkem

Nyní budeme věnovat pozornost třetímu typu. V mém případě musím určit proud, který přes kontakt bude procházet. Tím že volím paralelní proudovou dráhu, je to polovina celkového procházejícího proudu. Z tohoto a vlastností materiálu následně určím přechodový odpor kontaktu a přítláčnou sílu na kontakt. Podle obrázku 3 představuje toto provedení kontaktu přímkový styk, sice to z tohoto pohledu není zřejmé, ale musíme vzít v úvahu výšku kontaktního rouбіku a vodiče pohyblivého

kontaktního rouбіku. Na obrázku je vyznačen směr přítláčné síly F_k . Její velikost určím z následujících výpočtů.

$$\text{Proud kontaktem: } I_{kon} = \frac{I_n}{2} = \frac{630}{2} = 315A \quad (5.5)$$

$$\text{Přechodový odpor kontaktu: } R_{kon} \approx \frac{U_{m\check{e}k}}{2 \cdot I_{kon}} = \frac{0,12}{2 \cdot 315} = 1,9 \cdot 10^{-4} \Omega \quad (5.6)$$

Kde $U_{m\check{e}k}$ představuje tabelovanou hodnotu napětí na mezi měknutí mědi.

$$\text{Přítláčná síla: } F_{k1} \approx \left(\frac{k_{Cu}}{R_{kon}} \right)^{\frac{1}{n}} = \left(\frac{8 \cdot 10^{-4}}{1,9 \cdot 10^{-4}} \right)^{\frac{1}{0,7}} = 7,8N \quad (5.7)$$

Kde n je činitel kontaktního styku, pro přímkový styk $n=0,7$. k_{Cu} je činitel druhu materiálu, volím z dolní části rozmezí $(6 - 50) \cdot 10^{-4}$ hodnotu $k_{Cu} = 8 \cdot 10^{-4}$.

Předchozí výpočty přechodového odporu a přítláčné síly odpovídají bezporuchovému chodu odpojovače. Konstrukce však musí odolat i poruchovému stavu, kdy odpojovačem poteče zkratový proud a hrozí svaření kontaktů. Následující výpočty platí pro rázový zkratový proud $34kA$.

$$\text{Proud kontaktem: } I_{kon; zkr} = \frac{I_p}{2} = \frac{34}{2} = 17 kA \quad (5.8)$$

$$\text{Přechodový odpor kontaktu: } R_{kon; svař} = \frac{U_{svař}}{2 \cdot I_{kon; zkr}} = \frac{0,43}{2 \cdot 17 \cdot 10^3} = 1,265 \cdot 10^{-5} \Omega \quad (5.9)$$

Kde $U_{svař}$ představuje tabelovanou materiálovou hodnotu napětí na mezi svaření. Což je převedená hodnota z teploty svaření nebo měknutí materiálu.

$$\text{Přítláčná síla: } F_{k2} = \left(\frac{k_{Cu}}{R_{kon; svař}} \right)^{\frac{1}{n}} = \left(\frac{8 \cdot 10^{-4}}{1,265 \cdot 10^{-5}} \right)^{\frac{1}{0,7}} = 374,1 = 375N \quad (5.10)$$

Hodnota F_{k2} představuje nejmenší potřebnou přitlačnou sílu na kontakty, která má zásadní vliv přechodový odpor kontaktů. Další vlivy na přechodový odpor mají oteplení kontaktů a úbytek napětí na kontaktech.

Je důležité podotknout, že výpočet může být zavádějící. Při výpočtu totiž předpokládám rovnoměrné rozložení proudů do paralelních proudových drah, a protože uvažuji, že horní a dolní styk mají obdobný charakter. Hodnota bude platit i pro kontakt druhého typu, kde je nůž odpojovače ve styku s roubíkem a má charakter kluzného kontaktu, avšak nedochází k jejich úplnému oddálení. Konečnou přitlačnou sílu určíme při výpočtu elektrodynamických sil, působících na kontakty.

Co se týče kontaktu připojovacího pásu a přívodního vodiče je výpočet obdobný. Rozdílný je fakt, že se proud nerozdělí a celý teče jedním kontaktem, jak do odpojovače tak i z něj. Kontakt není kluzný ale pevný, takže činitel kontaktního styku nabývá hodnoty $n=1$. Nebude opatřen žádnou povrchovou úpravou. Za těchto předpokladů je výpočet následující.

$$\text{Přechodový odpor kontaktu: } R_{m\check{e}k;p\acute{a}su} \approx \frac{U_{m\check{e}k}}{2 \cdot I_n} = \frac{0,12}{2 \cdot 630} = 9,524 \cdot 10^{-5} \Omega \quad (5.11)$$

$$\text{Přítlačná síla: } F_{k;p\acute{a}su} = \left(\frac{k_{Cu}}{R_{m\check{e}k;p\acute{a}su}} \right)^{\frac{1}{n}} = \left(\frac{8 \cdot 10^{-4}}{9,524 \cdot 10^{-5}} \right)^{\frac{1}{1}} = 8,4N \quad (5.12)$$

Při průchodu poruchového proudu bude síla větší.

$$\text{Přechodový odpor: } R_{sva\check{r};p\acute{a}su} \approx \frac{U_{sva\check{r}}}{2 \cdot I_n} = \frac{0,43}{2 \cdot 34 \cdot 10^3} = 6,3 \cdot 10^{-6} \Omega \quad (5.13)$$

$$\text{Přítlačná síla: } F_{k2;p\acute{a}su} = \left(\frac{k_{Cu}}{R_{sva\check{r};p\acute{a}su}} \right)^{\frac{1}{n}} = \left(\frac{8 \cdot 10^{-4}}{6,3 \cdot 10^{-6}} \right)^{\frac{1}{1}} = 126,5 = 130N \quad (5.14)$$

Pro získání co nejmenšího přechodového odporu provedu korekci zvýšením síly o 60%, přitlačná síla vychází po zaokrouhlení $210N$. Tuto přitlačnou sílu musí vyvinout spojovací šrouby, kterými bude připevněn vodič přivádějící proud z a do odpojovače, aby byl dodržen přechodový odpor.

6.5 Elektrodynamické síly

Při určování velikosti elektrodynamických sil vycházíme ze jmenovité krátkodobé hodnoty proudu. Tento jev nastává při zapnutí poruchového proudu v nejnepříznivější okamžik, tj. při amplitudě I_d první asymetrické vlny a jeho hodnota je:

$$I_d = 1,8 \cdot \sqrt{2} \cdot I_k = 1,8 \cdot \sqrt{2} \cdot 15 \cdot 10^3 = 38,2 \cdot 10^3 A \quad (5.15)$$

$$\text{A jeho efektivní hodnota jest: } I_{d,ef} = 1,67 \cdot I_k = 1,67 \cdot 15 \cdot 10^3 = 25,1 \cdot 10^3 A \quad (5.16)$$

Je to vlastně nejhorší případ namáhání elektrodynamickými silami, které musí konstrukce odpojovače bez problémů snést. Dále musíme znát délku na sebe působících vodičů a jejich rozměry. Délku určíme z rozteče izolátorů jednoho pólu odpojovače, kterou volím $340mm$, rozměry vodičů mám z předchozích výpočtů. Musíme však uvažovat ještě přesah nožů za kontaktními roubíky, kde budou přitlačné pružiny a na jedné ze stran musíme uvažovat ještě ložisko nože, což představuje osu otáčení pohyblivého kontaktu. Délku nože to nezmění, protože pružiny a ložiska budou pod sebou.

Elektrodynamické síly mezi vodiči nože odpojovače působí tak, že se vodiče přitahují. Hrozí tedy jejich deformace. Vodiče proto mívají mezi sebou rozpěrky. Ty jednak drží nože odpojovače u sebe a jednak zamezují jejich deformaci. Jedna rozpěrka je pro pohon a musí být otočná kolem své osy. Další rozpěrky se používají pro dodržení pevnostních podmínek, tak aby díky působícím elektrodynamickým silám nedošlo k ohnutí nebo poškození vodičů nože odpojovače.

Síla mezi rovnoběžnými vodiči nože odpojovače bez ocelových rozpěrek počítaná pro délku vodiče $l=340\text{mm}$ mezi kontakty a vzdálenost vodičů $a'=27\text{mm}$:

$$F_r = 10^{-7} \cdot \frac{I_d^2}{2} \cdot \left[1 - \sqrt{\left(\frac{l}{a'}\right)^2 + 1} - 1 \right] = 10^{-7} \cdot \frac{(38,2 \cdot 10^3)^2}{2} \cdot \left[\sqrt{\left(\frac{34}{2,7}\right)^2 + 1} - 1 \right]$$

$$= 848,7\text{N} \quad (5.17)$$

Jestliže budeme předpokládat rozpěrku pro pohon v jedné třetině délky tj. $l=113,3\text{mm}$ mezi kontaktem a druhou rozpěrku, jako redukci účinků elektrodynamických sil v druhé třetině délky mezi kontakty, tak síla mezi odpojovači bude následující (osová vzdálenost l vodičů je stejná):

$$F_r = 10^{-7} \cdot \frac{I_d^2}{2} \cdot \left[1 - \sqrt{\left(\frac{l}{a'}\right)^2 + 1} - 1 \right] = 10^{-7} \cdot \frac{(38,2 \cdot 10^3)^2}{2} \cdot \left[\sqrt{\left(\frac{11,3}{2,7}\right)^2 + 1} - 1 \right]$$

$$= 241\text{N} \quad (5.18)$$

Druhá hodnota je tedy zřejmě bezpečnější, z hlediska účinků elektrodynamických sil. Vybavím proto paralelní proudovou dráhu podle určených kritérií ocelovými rozpěrami.

Dále musím provést kontrolu na vlastní kmitočet vodičů. Jestliže by se vlastní kmitočet vodiče blížil k 50 nebo 100Hz musím provést úpravu proudové dráhy změnou průřezu vodiče nebo změnit rozteče rozpěr. Výpočet se provádí podle následujícího vzorce:

$$f_o = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot J}{m_l \cdot l^4}} \quad (5.19)$$

Kde: - E je modul pružnosti materiálu vodiče $E_{Cu}=130\text{GPa}$.

- J je kvadratický moment průřezu vodiče $J = \frac{1}{12} \cdot b^3 \cdot h = \frac{1}{12} \cdot 0,005^3 \cdot 0,035 = 3,65 \cdot 10^{-10}\text{m}^4$

- m_l je hmotnost vodiče na jeden metr délky $m_l = \rho_{Cu} \cdot l \cdot b \cdot h = 8960 \cdot 1 \cdot 0,005 \cdot 0,035 = 1,568\text{kg}$

- l je délka mezi rozpěrami nože odpojovače $l=0,113\text{m}$.

Dosazením těchto hodnot do vzorce 5.19 určíme vlastní kmitočet vodičů.

$$f_o = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{130 \cdot 10^9 \cdot 3,65 \cdot 10^{-10}}{1,568 \cdot 0,113^4}} = 68,6\text{Hz} \quad (5.20)$$

Vlastní kmitočet vodičů se neblíží 50Hz ani 100Hz, proto považuji z tohoto hlediska můj návrh pohyblivého kontaktu a rozteče rozpěrek za vyhovující.

Další silou, na kterou musíme brát zřetel, je síla v úžině kontaktu roubíku a nože odpojovače. Tato síla působí proti kontaktnímu styku, takže může působit negativně na přítlačnou sílu kontaktů a tudíž na jejich přechodový (stykový) odpor. Jejich velikost je dána počtem stykových míst a jejich rozložení podél stykové povrchy. Výpočet určuje jenom jejich přibližnou velikost velikostí řádu.

Musíme, tedy zjistit počet stykových míst n . Budeme předpokládat počet stejných kruhových plošek, kolik se vejde proudových úžin na délku povrchového styku příslušného kontaktu. Výpočet je tedy následující.

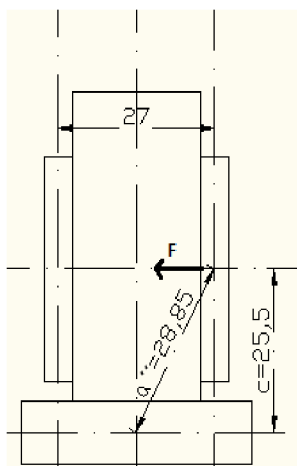
$$n = \text{entier} \frac{b}{2 \cdot h} = \text{entier} \frac{35}{2 \cdot 5} = 3 \quad (5.21)$$

Tedy určím průměr každé z těchto plošek:

$$d_n = \sqrt{\frac{4 \cdot F_{k2}}{n \cdot \pi \cdot H}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 375}{3 \cdot \pi \cdot 5 \cdot 10^8}} = 0,564 \text{mm} \quad (5.22)$$

Když znám průměr a počet styku, můžu vypočítat odpudivou elektrodynamickou sílu, kterou vyvolá rázový zkratový proud v úžině kontaktu. Musím však uvažovat, že jedním kontaktem poteče polovina tohoto proudu, protože se rozdělí do paralelních drah. Úžinová odpudivá síla pro jeden kontakt nože odpojovače s roubíkem se tedy vypočítá následně.

$$F_u \approx 10^{-7} \cdot \left(\frac{I_d}{2 \cdot n}\right)^2 \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot h}{d_n}\right) = 10^{-7} \cdot \left(\frac{38,2 \cdot 10^3}{2 \cdot 3}\right)^2 \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot 5}{0,564}\right) = 11,7 \text{N} \quad (5.23)$$



Obrázek 4: Znárodnění síly F mezi nožem a praporcem

Za další je nutné dbát na přitažlivou sílu, která působí mezi nožem odpojovače a přívodním pásem. Délku přívodu volím 1m, což odpovídá podmínkám pro oteplovací zkoušku. Ostatní vzdálenosti jsou patrné z obrázku 4. Síla nepůsobí kolmo, ale pod úhlem, který svírá osa nože odpojovače a osa přívodního pásu. Je tedy nutné znát tuto souosou vzdálenost. Způsob jejího určení je opět znázorněn na obrázku 4. Vzdálenosti, které z obrázku nevyplývají, jsou délka nože mezi kontaktem a rozpěrkou $n=11,3 \text{cm}$ a tato délka zvětšená o délku praporce od osy roubíku $s=18,8 \text{cm}$.

Výpočet je tedy následující:

$$F' = 10^{-7} \cdot \frac{I_d^2}{2} \cdot \left[1 - \sqrt{\left(\frac{s-n}{a''}\right)^2 + 1} - \sqrt{\left(\frac{-n}{a''}\right)^2 + 1} + \sqrt{\left(\frac{s}{a''}\right)^2 + 1} \right] \quad (5.24)$$

$$F' = 10^{-7} \cdot \frac{(38,2 \cdot 10^3)^2}{2} \cdot \left[1 - \sqrt{\left(\frac{18,8 - 11,3}{2,885}\right)^2 + 1} - \sqrt{\left(\frac{-11,3}{2,885}\right)^2 + 1} + \sqrt{\left(\frac{18,8}{2,885}\right)^2 + 1} \right] \quad (5.25)$$

$$F' = 69,4$$

Takže síla F , která působí mezi praporcem a roubíkem je:

$$F = \frac{F' \cdot \sin(\alpha)}{2} = \frac{F' \cdot c}{2 \cdot a''} = \frac{60,83 \cdot 25,5}{2 \cdot 28,85} = 31N \quad (5.26)$$

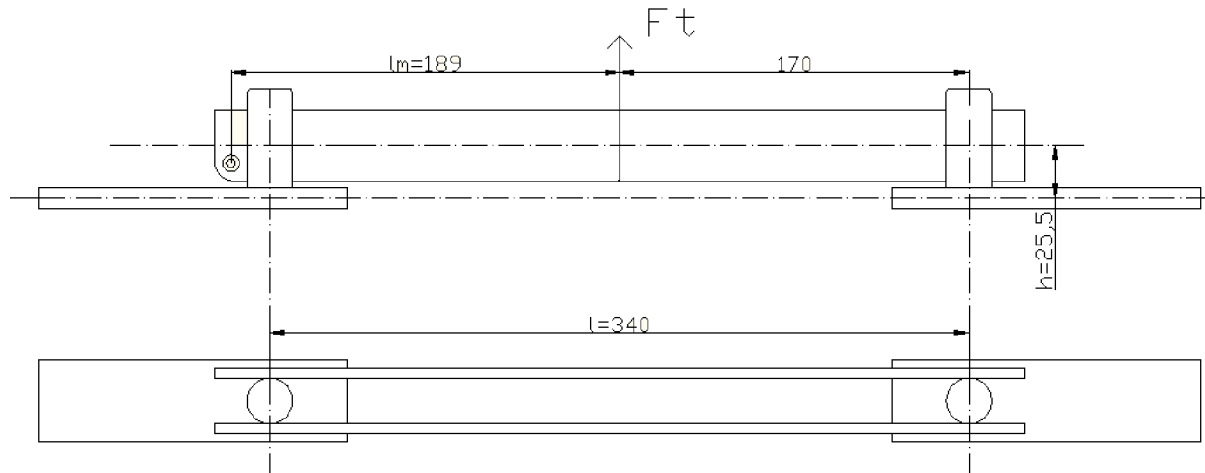
V této fázi výpočtu máme síly, které působí na kontaktní systém pohyblivého kontaktu. Můžeme tedy určit výslednou elektrodynamickou sílu v kontaktech nože odpojovače. Nestačí však sledovat jen síly na kontakty. Je zde ještě síla, která působí tak, že nože odpojovač má tendenci vyskočit ze zapnuté polohy. Nyní však budu věnovat pozornost výsledné elektrodynamické síle.

Pro výpočet výsledné elektrodynamické síly F_c budu uvažovat směr přítlaku na kontakty. Takže ve výpočtu bude síla, působící mezi rovnoběžnými noži kladná, síla úžiny proudu záporná a síla mezi praporcem a roubíkem kladná.

$$F_c = 0,5F' - F_u + F = 241 - 12 + 31 = 260N \quad (5.27)$$

Takže teď znám sílu, která bude působit na jeden kontakt při průchodu zkratového proudu. V předchozích výpočtech jsem vypočítal potřebnou přítlačnou sílu, při které budou kontakty mimo nebezpečí svaření nebo změknutí z hlediska přechodového odporu. Budu vycházet ze síly, kterou jsem si určil, jako potřebnou, při výpočtu přechodového odporu na mezi svaření, protože je větší než síla na mezi měknutí. Dodatečnou přítlačnou sílu, kterou budou vytvářet pružiny na kontaktech, určím odhadem na $200N$. Takže potom na jeden kontakt bude působit síla $F_k = F_c + F_{odh} = 260 + 200 = 460N$. Což představuje přibližně o 23% větší přítlačnou sílu, než jsem spočítal jako minimální potřebnou. Z toho důvodu by mohla být dostačující.

Poslední silou, kterou u nože odpojovače sledujeme, je síla, která působí pro vypnutí odpojovače ze zapnuté polohy. Síla bývá poměrně vysoká a je důležité s ní počítat při návrhu pohonu pro odpojovač. Bývá nazývána síla záhybu proudové dráhy. Výpočet je však mírně nepřesný, protože neuvažujeme délku přívodních vodičů, které by sílu zvýšili. Tedy výpočet nám poskytne o něco větší hodnotu, to je z hlediska bezpečnosti vždy přijatelné. Situace působení síly je zřejmá ze zjednodušeného obrázku 5.



Obrázek 5: Znázornění působení síly záhybu proudu

Z obrázku lze vyčíst osová délka mezi kontaktními roubíky, tedy délka l . Dále vzdálenost osy horizontální osy odpojovače od připojovacího praporce h . Co na obrázku znázorněné není, je průměr roubíku, potřebného pro výpočet síly. Průměr byl určen v předchozím a hodnota je nezměněna. Ještě je to vzdálenost působíště síly od osy otáčení kontaktního systému. V poslední řadě je to směr působení vyvolané elektrodynamické síly od záhybu proudu. Můžu tedy provést výpočet síly.

$$F_t = 2 \cdot 2 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{I_d^2}{2} \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot l}{a} - 1\right) \cdot \frac{\sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + h^2} + h}{\sqrt{l^2 + h^2} + h}$$

$$F_t = 2 \cdot 10^{-7} \cdot (38,2 \cdot 10^3)^2 \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot 34}{2,1} - 1\right) \cdot \frac{\sqrt{\left(\frac{2,1}{2}\right)^2 + 2,55^2} + 2,55}{\sqrt{34^2 + 2,55^2} + 2,55} = 145,7 \text{ N} \quad (5.28)$$

Teď známe působící sílu. Její hodnota je v porovnání s jinými elektrodynamickými silami, působícími v proudové dráze, relativně velká. To má za následek její nepříznivé účinky. Síla vyvolává moment, který se snaží změnit odpojovači polohu na vypnutou. Moment je následující.

$$M_{vyp} = F_t \cdot l_m = 145,7 \cdot 0,189 = 27,5 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (5.29)$$

Je jasné, že samovolné vypnutí v důsledku tohoto momentu je nepřijatelné. Řešení tohoto problému je hned několik. Například provést přítlačné pružiny, tak aby třecí síla na kontaktním roubíku zamezila samovolnému vypnutí. Tento způsob je však nevyhovující. Zvýšený přítlačný styk by měl negativní vliv na povrch kontaktů a takto navržená pružina by měla velké rozměry. Daleko jednodušší je provést blokování zapnuté polohy.

6.6 Návrh přítlačné pružiny

Jak bylo uvedeno, přítlačná pružina zvyšuje kvalitu kontaktního styku, tím že snižuje přechodový odpor. Tuto skutečnost popisuje vztah podle [5].

$$R_s = k_n \cdot \left(\frac{F_k}{F_1}\right)^{-n} \quad (5.30)$$

Tento jev je důležitý zejména při průchodu zkratového proudu, kdy se během krátké doby kontakt prudce zahřívá. Hrozí jeho teplotní znehodnocení při překročení teploty 300°C nebo dokonce jeho svaření. Tím že zajistíme dostatečnou přitlačnou sílu vypočítanou podle 5.10, neměla by hodnota přechodového odporu dosáhnout kritické hodnoty a tím teplotně znehodnotit kontaktní styk. Pro výpočet použiji postup výpočtu podle [6].

Pro moje provedení odpojovače navrhnu pružinu, která musí vyvinout sílu $F_k = 200\text{N}$ na jeden kontakt. Pro lepší rozložení přitlačné síly, budou na jeden kontakt tlačit dvě pružiny. Jedna pružina tedy musí vyvinout sílu $P_9 = 100\text{N}$.

V prvním kroku výpočtu zvolím poměr A' středního průměru pružiny ve stavu volném D'_s ku průměru drátu pružiny d' .

$$A' = \frac{D'_s}{d'} \quad (5.31)$$

Poté pro tento zvolený průměr vypočítám Wahlův korekční součinitel φ' .

$$\varphi' = \frac{A' - 0,25}{A' - 1} + \frac{0,615}{A'} \quad (5.32)$$

Dále musíme stanovit dovolené namáhání ve smyku τ'_D . V tabulce 3-1 v [6] najdeme mez pevnosti v tahu pro různé průměry použitého drátu pružiny. V mém případě to bude $\sigma_{pt} = 2000\text{MPa}$. Z tohoto stanovím dovolené namáhání $\tau'_D = 0,4 \cdot \sigma_{pt} = 800\text{MPa}$. Hodnota $0,4$ je podle [4] tehdejší normou doporučený přepočtový koeficient vycházející z činitele bezpečnosti.

V dalším kroku vypočítáme průměr drátu pružiny.

$$d' = \sqrt{\frac{8 \cdot P_9 \cdot D'_s \cdot \varphi'}{\pi \cdot \tau'_D}} \quad (5.33)$$

Z vypočtených hodnot korekčního součinitele a průměru drátka pružiny podle zvoleného poměru A zvolím nejvhodnější vypočtený d' . V tabulce 3-1 v [6] najdu k jeho hodnotě nejbližší vyšší normalizovaný průměr drátka d a vypočítám střední průměr pružiny ve stavu volném D_s .

$$D_s = A \cdot d \quad (5.34)$$

V následující tabulce 6 jsou provedeny výpočty podle předešlých rovnic 5.32 a 5.33, pro určené dovolené namáhání ve smyku, které jsou výchozí pro návrh pružiny.

A'	φ'	d'
4	1,40375	1,34
6	1,2525	1,55
8	1,184018	1,74
10	1,144833	1,91

Tabulka 6: Výchozí hodnoty pro výpočet pružiny

Z těchto hodnot zvolím průměr d' nejvhodnější pro můj případ. Jelikož pružina bude na vodícím čepu průměru 8mm , což představuje její vnitřní průměr, volím hodnotu

vypočteného průřezu $d' = 1,55$, aby vedení pružiny bylo přesné. K této hodnotě je podle tabulek nejbližší vyšší $d = 1,6$. Velikost středního průměru pružiny je následující.

$$D_s = D_2 + 1 + 1 + d = 8 + 1 + 1 + 1,6 = 10,6\text{mm} \quad (5.35)$$

Počáteční poměr a korekční součinitel, tedy změni svoji velikost.

$$A = \frac{D_s}{d} = \frac{10,6}{1,6} = 6,63 \quad \varphi = \frac{A-0,25}{A-1} + \frac{0,615}{A} = \frac{6,63-0,25}{6,63-1} + \frac{0,615}{6,63} = 1,23$$

Následně musíme pro tyto rozměry pružiny vypočítat namáhání a tím ověřit její pevnostní podmínku $\tau_D < \tau_D'$.

$$\tau_D = \frac{8 \cdot P_9 \cdot A \cdot \varphi}{\pi \cdot d^2} = \frac{8 \cdot 100 \cdot 6,63 \cdot 1,23}{\pi \cdot 1,6^2} \cong 811\text{MPa} \quad (5.36)$$

To je hodnota podle podmínky nevyhovující. Ale v tabulce 3-1 v [6] je uvedena tolerance 5% pro namáhání. Při uvažování této tolerance pružina ještě vyhovuje.

Dále je nutno určit počet závitů n pružiny a její délku při stlačeném a klidovém stavu. Vycházíme ze stlačení jednoho závitu pružiny f_9 ($n=1$).

$$f_9 = \frac{8 \cdot n \cdot D_s^3 \cdot P_9}{G \cdot d^4} = \frac{8 \cdot 1 \cdot 0,0106^2 \cdot 100}{8,2 \cdot 10^{10} \cdot 0,0016^4} = 1,77\text{mm} \quad (5.37)$$

Kde G je modul pružnosti ve smyku pro ocel.

Počet závitů volím 4 a dva závěrné závity k tomu. Takže celkově bude mít pružina $z=6$ závitů. Spočítáme tedy stlačenou délku pružiny L_9 .

$$L_9 = k \cdot z \cdot d = 1,24 \cdot 6 \cdot 1,6 = 11,90\text{mm} \quad (5.38)$$

Kde k je zvětšovací koeficient délky pružiny, protože závity pružiny se nesmí navzájem dotýkat, volívá se v rozmezí o 15-30% větší. V mém případě volím zvětšení o 24%.

Délka pružiny ve volném stavu L_0 .

$$L_0 = L_9 + n \cdot f_9 = 11,90 + 4 \cdot 1,77 \cong 19\text{mm} \quad (5.39)$$

Z volné délky pružiny určím stoupání jednotlivých závitů pružiny s .

$$s = \frac{L_0 - n_z \cdot d}{n} = \frac{19 - 2 \cdot 1,6}{6} = 2,63\text{mm} \quad (5.40)$$

Mám tedy pružinu, která bude vyvíjet kontaktní přítlak. Při montáži odpojovače, se musí pružina pomocí šroubu na konci vodícího čepu a podložek stlačit na délku L_9 . Při této délce by měla na kontakty tlačit požadovanou silou 100N. Jeden pól odpojovače bude mít těchto pružin osm. Na každý kontaktní styk nože odpojovače a kontaktního roubíku dvě pružiny.

6.7 Krátkodobé oteplení

Na počítačovém modelu bude simulováno provozní oteplení nikoli oteplení krátkodobé, které vyvolá zkratový proud. Proto je nutné toto krátkodobé oteplení určit výpočtem a určit, zda z toho hlediska návrh proudové dráhy vyhovuje.

Krátkodobé oteplení je nutné sledovat na části konstrukce, která má nejmenší průřez kolmý na směr proudu. Proto provedu výpočet průřezu pro jednotlivé dílce, konkrétně to bude

vypínací nůž, přívodní praporec a kontaktní roubík. Pro výpočet budu vycházet z předpokladu, že zkratový proud teče odpojovačem po teplotním ustálení díky průchodu proudu provozního, tudíž v nejhorším možném případě.

Výpočet průřezu přívodního praporce. Zde bude nejslabší průřez v místě jeho oslabení šroubem M10. Takže pro výpočet platí:

$$S_p = 10 \cdot (40 - 10,5) = 295\text{mm}^2 \quad (5.41)$$

Výpočet průřezu vypínacího nože. Zde je průřez oslaben ocelovou rozpěrkou průměru 8mm. Tudíž bude výpočet následující:

$$S_n = 5 \cdot (35 - 8) = 135\text{mm}^2 \quad (5.42)$$

A konečně výpočet kontaktního roubíku, který bude stejně jako praporec oslaben šroubem M10. Pro jeho průřez bude platit:

$$S_k = \pi(11^2 - 5,25^2) = 293,5\text{mm}^2 \quad (5.43)$$

Z předchozích výpočtů je zřejmé, že nejkritičtější z hlediska krátkodobého oteplení bude nůž odpojovače. Podle modelu oteplení se teplota nože odpojovače po ustálení pohybuje mezi 51,4 a 52,2 °C. S ohledem na bezpečnost zvolím referenční teplotu 53°C. Je-li teplota okolí 20°C, oteplení je poté jejich rozdíl, a ten činí $\Delta t=33^\circ\text{C}$. Z tabulky 7 určím dovolené oteplení. Nůž je podle tabulky kovová část ve styku s izolantem třídy B, tudíž je jeho dovolené provozní oteplení 90°C. Takže dovolené oteplení zkratovým proudem jest $\Delta t' = 90 - 33 = 57^\circ\text{C}$. Přepočteno na stupně Kelvina $\Delta T = 326,15\text{K}$.

Součásti	Nejvyšší teplota (při teplotě okolí nejvýše +40°C)
Kontakty	
- Stříbrné	65
- Měděné, plátované stříbrem	65
- Měděné, postříbřené	50
- Měděné, nepostříbřené	40
Svorky, k nimž se vnější přívody připojují šrouby nebo svorníky	45
Kovové části ve styku s izolanty třídy:	
- Y: neimpregnované papíry	50
- A: impregnované materiály	60
- B: ve vzduchu	90
- F: odolnější pojiva	115
- Smalt olejový	80

Tabulka 7: Dovolené oteplení

Nyní přistoupím k výpočtu. Jako první zjistím odpor mědi při oteplení $\Delta t=33^\circ\text{C}$.

$$\rho_{33} = \rho_{40}(1 + \alpha_{40} \cdot \Delta t) = 1,92 \cdot 10^{-8} \cdot (1 + 0,0036 \cdot 33) = 2,15 \cdot 10^{-8}\Omega \cdot m \quad (5.44)$$

Kde ρ_{40} je měrný elektrický odpor při 40°C, $\alpha_{40}[\text{K}^{-1}]$ je teplotní součinitel odporu.

Následně z poměru teplotních součinitelů a měrných elektrických odporů zjistím teplotní součinitel α_n pro moje oteplení.

$$\frac{\alpha_{40}}{\alpha_n} = \frac{\rho_{40}}{\rho_{33}} \Rightarrow \alpha_n = \alpha_{40} \cdot \frac{\rho_{40}}{\rho_{33}} = 0,0036 \cdot \frac{1,92 \cdot 10^{-8}}{2,15 \cdot 10^{-8}} = 0,0032 K^{-1} \quad (5.45)$$

Pro výpočet dále určím pomocnou veličinu K pro dobu trvání zkratu I_s .

$$K = \frac{\Delta T}{t_k + \alpha_n \cdot t_k \cdot \Delta T} = \frac{326,15}{1 + 0,0032 \cdot 1 \cdot 326,15} \cong 159,6 \quad (5.46)$$

Z těchto hodnot vypočteme krajní proud I_{k2} pro čas I_s .

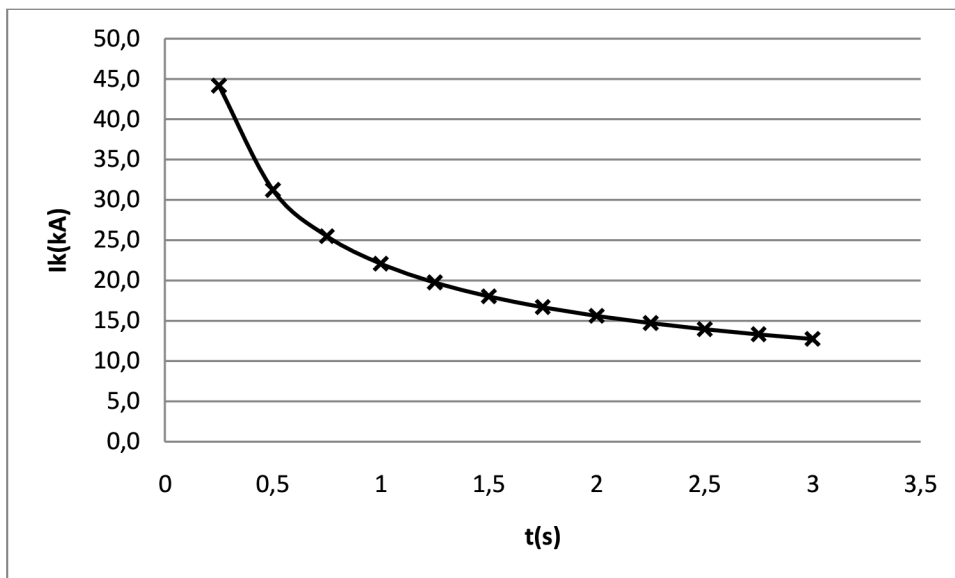
$$I_{k2} = S_n \cdot \sqrt{\frac{K \cdot c_{cu}}{\rho_{33}}} = 135 \cdot 10^{-6} \cdot \sqrt{\frac{159,6 \cdot 3,4 \cdot 10^6}{2,15 \cdot 10^{-8}}} = 21447 A \quad (5.47)$$

Kde $c_{cu} [W \cdot s \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}]$ je měrné teplo.

Když za dobu t_k dosadím různé časy, po který by procházel zkratový proud, zjistím celkovou zkratovou charakteristiku odpojovače. V tabulce 8 je proveden výpočet pro zvolené časy a jim odpovídající velikosti mezních proudů. Zkratová charakteristika je na obrázku 6.

$t_k(s)$	0,25	0,5	0,75	1	1,25	1,5	1,75	2	2,25	2,5	2,75
K	638,4	319,2	212,8	159,6	127,7	106,4	91,2	79,8	70,9	63,8	58,0
$I_k(kA)$	44,1	31,2	25,5	22,1	19,7	18,0	16,7	15,6	14,7	14,0	13,3

Tabulka 8: Mezní proudy pro zvolené časy zkratu



Obrázek 6: Celková zkratová charakteristika odpojovače

Takže mezní proud by I_{k2} ohřál nůž odpojovače nad dovolenou teplotu během doby I_s . Podle zadaného krátkodobého zkratového proudu $15kA$ tedy konstrukce odpojovače vyhověla z hlediska krátkodobého oteplení proudové dráhy. Proto, abych mohl konstatovat, že celá konstrukce vyhověla na účinky krátkodobého oteplení, musím zjistit krátkodobé oteplení v kontaktech. To provedu výpočtem úbytku napětí na kontaktech.

Kontakt představuje přímkový styk a výsledná elektrodynamická síla působící na kontakty je kladná, nemělo by dojít k jejich svaření při žádném nadproudu. Pro ověření tvrzení provedu výpočet podle vzorce 5.48 pro úbytek napětí na kontaktech. Počítat budu s několika nadproudy podle tabulky 8.

$$U_k = \frac{N \cdot k \cdot I_k}{[F_k + F_{k2} \cdot \left(\frac{I_k}{I_{kn}}\right)^2]^n} \quad (5.48)$$

Kde $N = 2$ je počet paralelních drah, $k = 8 \cdot 10^{-4}$ je činitel druhu materiálu, I_k je mnou zvolený proud, $F_k = 200N$ je přitlačná síla pružin, $F_{k2} = 260N$ je výsledná elektrodynamická síla působící na kontaktní styk, $I_{kn} = \frac{I_k}{2}$ je proud jedním kontaktem, $n = 0,7$ je charakteristická hodnota přímkového styku.

I_k [A]	10000	15000	20000	25000	30000	35000	38200	40000
U_k [V]	0,109326	0,16399	0,218653	0,273316	0,327979	0,382642	0,417627	0,437305

Tabulka 9: Úbytky napětí podle zvolených nadproudů

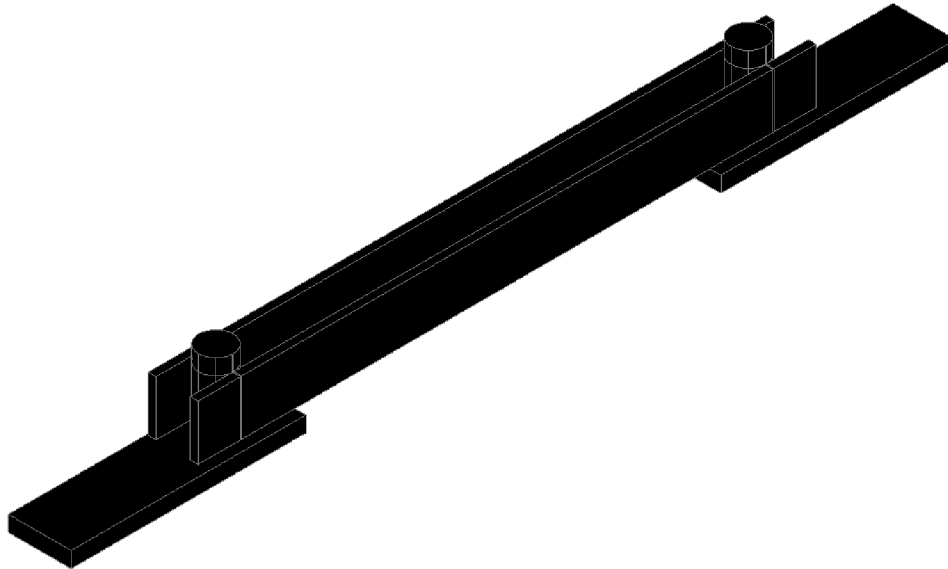
Podle tabulky nedojde při průchodu zkratového proudu ke znehodnocení kontaktů svařením. Ke svaření kontaktů by došlo při úbytku napětí $0,43V$. Překročení této hodnoty nastává při proudu cca $40kA$, na který už mnou navržený odpojovač není dimenzován.

Na základě těchto dvou výpočtů můžu konstatovat, že mnou navržený odpojovač na vysoké napětí vyhovuje z hlediska krátkodobého oteplení zkratovým proudem.

7. Počítačový model odpojovače

Pomocí výpočetní techniky byla provedena, ve spolupráci s panem Ing. Jiřím Valentou Ph.D., simulace odpojovače na vysoké napětí na tepelné účinky jmenovitého proudu. Dříve se oteplení počítalo pomocí metody náhradních tepelných schémat. Dnešní výpočetní technika umožňuje rychlejší a přesnější řešení podobných úkolů. Simulace byla provedena v prostředí programu ANSYS.

Bohužel simulovat odpojovač se všemi díly, jako jsou pružiny, šrouby, rozpěry, čepy atd., by trvalo daleko delší dobu a myslím si, že provedení by bylo o hodně složitější, možná i nerealizovatelné. Proto jsem musel vyhotovit počítačový zjednodušený 3D model odpojovače. Na modelu jsou pouze přípojovací praporce, kontaktní roubíky a nože odpojovače. Model znázorňuje obrázek 7.



Obrázek 7: 3D model odpojovače

Na obrázku 3D modelu chybí přípojovací vodič, jehož délku uvažuji 1m na každé straně. To proto, aby se z přípojovacího praporce odpojovače odvádělo teplo kondukcí. V prostředí ANSYS byla vytvořena síť elementárních plošek, pro které následně byly vypočteny náležité veličiny. Aby simulace mohla proběhnout, bylo zapotřebí zjistit několik materiálových a teplotních konstant a zadat okrajové podmínky.

7.1 Okrajové podmínky, materiálové a teplotní konstanty

Bez správně určených okrajových podmínek, materiálových a teplotních konstant by simulace nemohla proběhnout, nebo by její výsledky nepřesné. Všechny konstanty jsem určil podle [3] a [4].

Okrajové podmínky byly zadány po konzultaci s panem Valentou následující:

1. Teplota okolí: 20°C
2. Teplota při okraji přípojovacího vodiče: 50°C

Použité materiálové konstanty jsou následující:

1. Součinitel tepelné vodivosti mědi při 20°C : $\lambda_{Cu} = 393,6\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
2. Součinitel tepelné vodivosti vzduchu při 20°C : $\lambda_{vz} = 0,025\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
3. Měrný elektrický odpor mědi při 20°C : $\rho_{Cu} = 0,0178 \cdot 10^{-6}\Omega\text{m}$

Všechny tyto konstanty mění svoje hodnoty se změnou teploty. S touto změnou ANSYS nepočítá, považuje je za konstantní. Ale jejich větší změna je při větších teplotních rozdílech. Takových rozdílů si myslím, že moje simulace nedosáhla.

Další konstantou, kterou bylo nutno zjistit, je teplotní součinitel prostupu tepla. Tato konstanta závisí na mnoha parametrech, které ovlivňují její velikost a její přesné určení je těžké, takřka nemožné. Pro zjištění se užívá podobnostních čísel, jako je Nusseltovo číslo, ze kterého se součinitel prostupu tepla α určuje a Rayleighovo číslo, podle jeho velikosti určíme

Nusseltovo číslo. Obě tyto čísla jsou dány rozměry tělesa, které samovolným prouděním sdílí teplo s okolím. Dále je určují materiálové konstanty jako je teplotní součinitel objemové roztažnosti nebo kinematická viskozita. Protože je součinitel přestupu tepla dán rozměry plochy, bylo zapotřebí vypočítat pro každou plochu 3D modelu jiných součinitel. Vzorově určím součinitel prostupu tepla pro výšku nože odpojovače.

Začnu výpočtem Rayleighova čísla podle vzorce:

$$Ra = \frac{\gamma \cdot \Delta T \cdot g \cdot L^3}{\nu \cdot \lambda} \quad (7.1)$$

Kde:

- γ je teplotní součinitel objemové roztažnosti pro vzduch při 20°C , $\gamma = 3,672 \cdot 10^3 \text{K}^{-1}$ podle tabulky D-12 z [4]
- ΔT je teplotní rozdíl, pro můj případ volím maximální dovolené oteplení 90°C podle tabulky 7, $\Delta T = 90 + 273,15 = 363,15\text{K}$
- g je tíhové zrychlení, $g = 9,81 \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
- L je charakteristický rozměr plochy, pro plochu nože odpojovače na výšku je to jeho tloušťka, $L = 0,035\text{m}$
- ν je kinematická viskozita vzduchu pro nadmořskou výšku 500m.n.mř. $\nu = 0,151 \cdot 10^4 \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ podle tabulky D-8 z [3]
- λ je součinitel tepelné vodivosti pro vzduch při teplotě 20°C $\lambda_{vz} = 0,025 \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ podle tabulky D-12 z [4]

Po dosazení vyjde Rayleighovo číslo:

$$Ra = \frac{3,672 \cdot 10^3 \cdot 363,15 \cdot 9,81 \cdot 0,035^3}{0,151 \cdot 10^4 \cdot 0,025} = 14,86 \quad (7.2)$$

Podle velikosti Rayleighova čísla potom vypočítáme Nusseltovo číslo. To vypočítáme podle vztahu:

$$Nu = k \cdot Ra^n \quad (7.3)$$

Kde konstanty k a n určíme podle velikosti Rayleighova čísla. Pokud hodnota Rayleighova čísla je v intervalu $10^{-3} < Ra < 5 \cdot 10^2 \Rightarrow k = 1,18$; $n = \frac{1}{8}$ pokud je intervalu $5 \cdot 10^2 < Ra < 2 \cdot 10^7 \Rightarrow k = 0,54$; $n = \frac{1}{4}$

Podle těchto intervalů platí:

$$Nu = 1,18 \cdot Ra^{\frac{1}{8}} = 1,18 \cdot 14,86^{\frac{1}{8}} = 1,65 \quad (7.4)$$

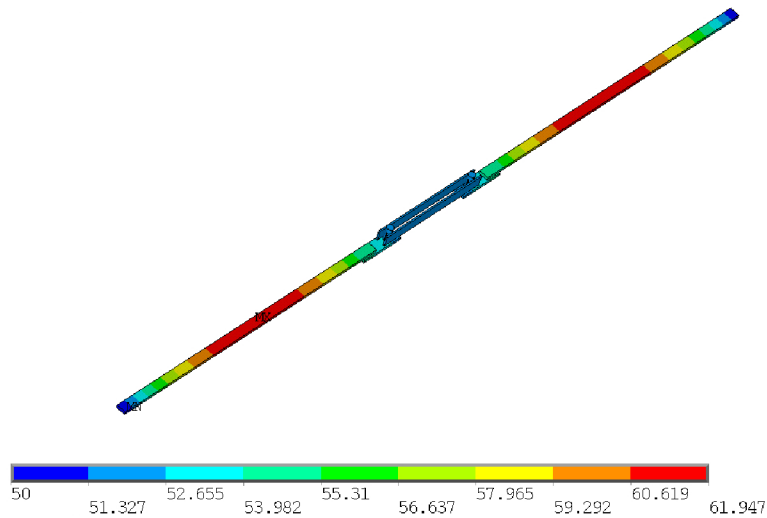
Nyní můžeme provést výpočet součinitele prostupu tepla. Jak bylo uvedeno, počítá se z Nusseltova čísla podle vztahu:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda} \Rightarrow \alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{L} = \frac{1,65 \cdot 0,025}{0,035} = 1,2 \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \quad (7.5)$$

Obdobným výpočtem jsem určil součinitele prostupu tepla pro všechny potřebné plochy. Poté jsem jejich hodnoty přiřadil odpovídajícím plochám a byla provedena simulace. Její výsledky budou v následujícím textu.

7.2 Oteplení proudové dráhy

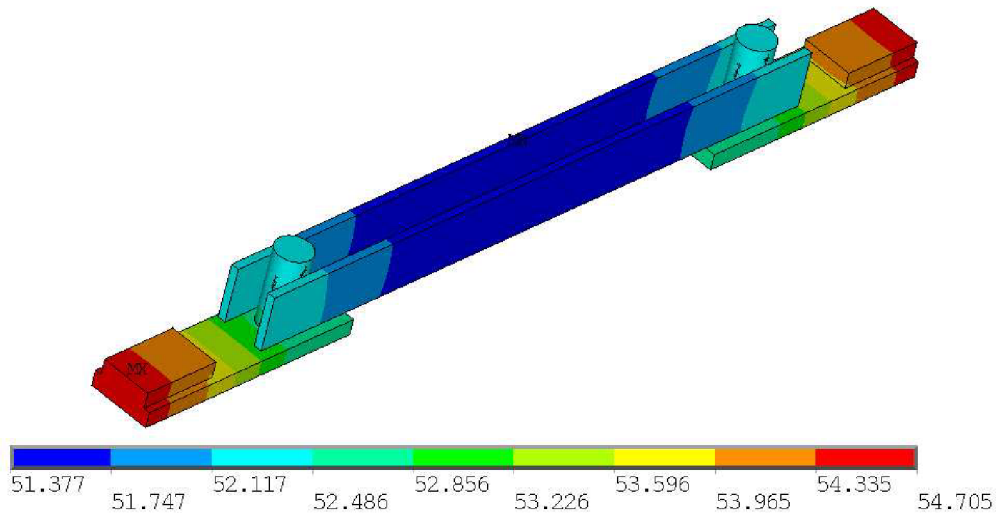
Model odpojovače byl virtuálně zatížen jmenovitým proudem $630A$. Na obrázku 8 je vidět výsledek simulace.



Obrázek 8: Oteplení proudové dráhy s přípojovacím vodičem

Na obrázku lze vidět zadání okrajové teploty $50^{\circ}C$ na koncích přípojovacího vodiče. Je fyzikálně správně největší oteplení přibližně v prostředku přípojovacího pásu, protože se nemá kam teplo kondukcí odvádět. Pro znázornění odvodu tepla z přípojovacího praporce to má dobrý výsledek.

Na dalším obrázku je detail oteplení proudové dráhy odpojovače.

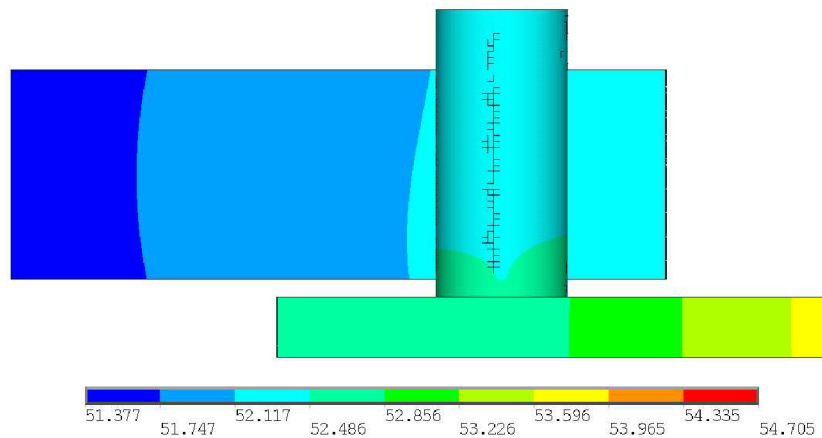


Obrázek 9: Detail oteplení proudové dráhy

Na obrázku 9 je přiblížena konstrukce proudové dráhy. Při provedení detailu ANSYS změnil i barvy pro znázornění teplot, ale s porovnáním s obrázkem 8, je na proporci stejná teplota. Kontakt přípojovacího vodiče a praporce by měl být znázorněn jako zdroj tepla, právě díky kontaktnímu přechodu. Bohužel tato skutečnost se nasimulovat nepodařila a na modelu

není vidět. Co zase naopak lze vidět je, že při rozdělení proudu do paralelní dráhy se budou jednotlivé nože méně oteplovat.

Na dalším obrázku bude detail oteplení kontaktu.



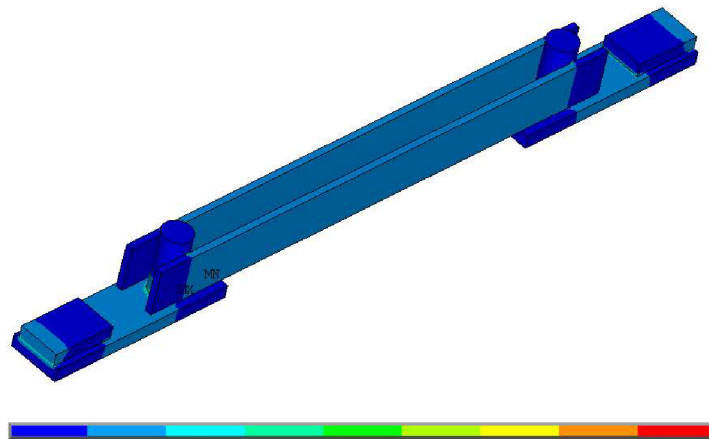
Obrázek 10: Detail oteplení kontaktu

Oteplení kontaktu se opět nepodařilo fyzikálně správně nasimulovat. Opět by kontakt měl v proudové dráze být vidět jako větší tepelný zdroj. Což, jak je vidět na obrázku 10, není pravda. To že se tato skutečnost u kontaktu praporce a roubíku neprojevila, může mít za následek dobrou tepelnou vodivost mědi. Všechno vytvořené teplo je odvedeno do celé konstrukce. Tato skutečnost je však málo pravděpodobná. Spíš se dá konstatovat, že simulace v tomto ohledu není reálná.

Jinak považuji simulaci, za použitelnou, jako ověření proudové dráhy na tepelné účinky procházejícího proudu. Na stupnicích lze vždy vidět teplotu, kterou jednotlivé části odpojovače mají. Protože na jednotlivých dílcích odpojovače jsou šroubové spoje, pro které je menší dovolené oteplení podle tabulky 6. Takže, na základě modelu oteplení konstatuji, že proudová dráha vyhovuje z hlediska provozního oteplení.

7.3 Rozložení proudu

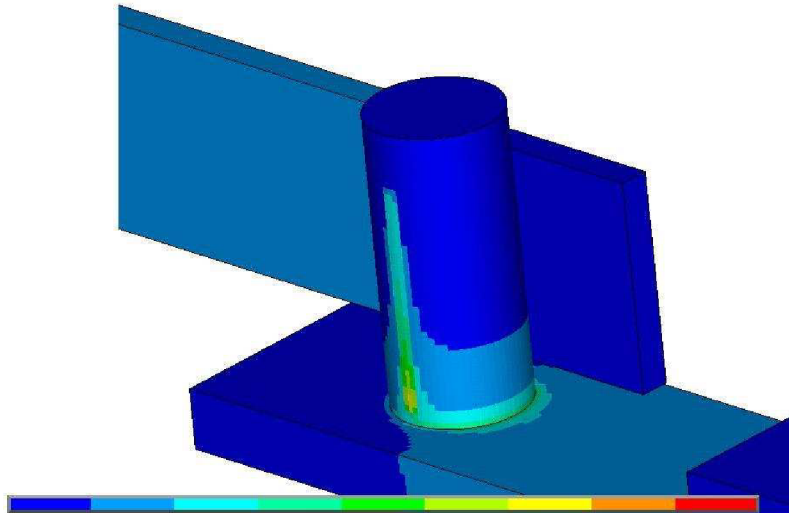
Výsledkem simulace je i rozložení proudu v konstrukci odpojovače. Sice to z hlediska konstrukčního návrhu není důležité, ale určitě je to zajímavé z hlediska fyzikálního.



Obrázek 11: Rozložení proudu

Jak lze vidět na obrázku 11, proud poteče odpojovačem nejkratší možnou cestou. Například proudová hustota v noži odpojovače za osou kontaktu je minimální, stejně tak u připojovacího praporce u vrcholu kontaktního roubíku. Toto se dá pokládat za fyzikálně správný model.

Zajímavější bude proudové rozložení v oblasti kontaktu.



Obrázek 12: Proudové rozložení v oblasti kontaktu

Největší hustotu proudu lze opět pozorovat v oblasti kontaktního styku. Hlavně tedy ve spodní části přechodu mezi nožem odpojovače a kontaktním roubíkem. Je zajímavé, že ANSYS tuto skutečnost nasimuloval fyzikálně správně. Opravdu je zde větší proudová hustota. Tudíž jsou zde větší Jouleovy ztráty a tím pádem větší zdroj tepla. Bohužel ale v simulaci oteplení se tato skutečnost nepodařila zobrazit.

Je důležité podotknout, že skutečné rozložení proudu je odlišné. To je z důvodu zanedbání skinefektu. Kdy největší proudová hustota je při povrchu vodičů. Zahnutí této skutečnosti by mělo za následek značné zkomplikování simulace. Navíc pro představu o proudovém rozložení má, podle mého názoru, tento model slušnou vypovídací hodnotu.

8. Výpočet momentu ovládacího mechanismu

Pohon odpojovače působí na hřídel jednoduchého mechanismu složeného z páky a táhla. Táhlo je nutné provést z izolačního materiálu, bude totiž spojeno se živými částmi odpojovače. Táhlo je spojeno čepem s ocelovou rozpěrkou nože odpojovače. Páka, která je na hřídeli vykoná otočení o 90° . Z tohoto důvodu bych z uvedených pohonů zvolil elektromotorický nebo tlakovzdušný.

Výpočtem určím nejmenší potřebný ovládací moment na hřídeli trojpolového odpojovače. Při výpočtu musím znát montážní polohu. Tu budu pro svoje provedení odpojovače uvažovat na svislé stěně s osou otáčení dole. Je nutné si pro začátek uvést, jaké síly a momenty budou během pohybu kontaktů působit a v jakém smyslu.

Probíhá-li oddalování kontaktů odpojovače, působí pouze třecí síly ve spodním a horním kontaktu. V prvním okamžiku vypínání je tedy moment tíhy nožů nulový. Jak se nože

odpojovače oddalují, tento moment roste, ale svou orientací snižuje potřebný moment na ovládací hřídeli. Po vysunutí nožů z horního kontaktu už působí tření jenom ve spodním kontaktu, které ale není konstantní a mění se styčnou plochou. Výpočet si zjednoduším při uvažování změny momentu při pohybu nožů, tím že budu uvažovat jeho střední velikost.

Při zapínání pohyblivých kontaktů odpojovače je situace odlišná. Během přibližování nožů ke kontaktním roubíkům je potřeba překonat klesající moment tíhy nožů a tření ve spodním kontaktu. Při dalším pohybu nastává situace, kdy potřebujeme největší moment na hřídeli. Je totiž potřeba zasunout nože na kontaktní roubík. Zde nastává problém rozevření nožů pro horní kontakt a překonávat tření v obou kontaktech, v této chvíli je potřeba největší moment pohonu. Tíha nožů, je pak stejně malá jako na začátku vypínání.

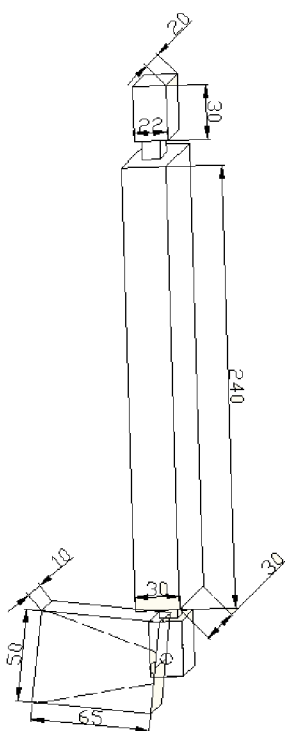
Pro výpočet je v první části důležité znát hmotnost jednotlivých dílců, které konají pohyb.

Tíha dvou měděných nožů jednoho pólu odpojovače. Výpočet provedu pro plný materiál bez děr, jako kompenzaci tíhy spojovacího materiálu.

$$F_{nožů} = 2 \cdot V_1 \cdot \rho_{Cu} \cdot g = 2 \cdot (0,035 \cdot 0,005 \cdot 0,394) \cdot 8900 \cdot 9,81 = 12N \quad (8.1)$$

Kde $V_1[m^3]$ je objem jednoho nože, $\rho[kg \cdot m^{-3}]$ hustota mědi, $g[m \cdot s^{-2}]$ tíhové zrychlení.

Pokračovat budu tíhou mechanického systému kontaktů odpojovače. Výpočet bude značně zjednodušen. Zjednodušení bude mít za následek větší hmotnost, než je reálná, ale toto zjednodušení je přípustné z hlediska spolehlivosti funkce pohonu. Hlavice táhla budu uvažovat jako plné ocelové kvádry a táhlo jako plný kvádr. Tento předpoklad by měl spolehlivě pokrýt i spojovací materiál. Táhlo odpojovače bude spojeno se živou částí odpojovače, takže musí být vyrobeno z izolačního materiálu. Pro svůj návrh volím epoxidovou pryskyřici s uhelnými vlákny. Výpočet tíhy páky bude též zjednodušen na jeden kvádr, spojovací materiál vyplní zbytek. Rozměry jsou znázorněny na obrázku 13.



Pro tíhu hlavic táhla platí:

$$F_{hl} = 2 \cdot 0,02 \cdot 0,03 \cdot 0,022 \cdot \rho_{ocel} \cdot g = 2 \cdot 0,02 \cdot 0,03 \cdot 0,022 \cdot 7800 \cdot 9,81 = 2N \quad (8.2)$$

Kde ρ_{ocel} je měrná hmotnost oceli.

Pro tíhu táhla platí:

$$F_{th} = 0,24 \cdot 0,03^2 \cdot \rho_{epox} \cdot g = 0,24 \cdot 0,03^2 \cdot 2 \cdot 1850 \cdot 9,81 = 7,8N \quad (8.3)$$

Kde ρ_{epox} je měrná hmotnost epoxidové pryskyřice s uhelnými vlákny.

Pro tíhu páky platí:

$$F_{páky} = 0,01 \cdot 0,065 \cdot 0,05 \cdot \rho_{ocel} \cdot g = 0,01 \cdot 0,065 \cdot 0,05 \cdot 7800 \cdot 9,81 = 2,5N \quad (8.4)$$

Takže celková tíha mechanického systému jest:

$$F_{mech} = F_{hl} + F_{th} + F_{páky} = 2 + 7,8 + 2,5 = 12,3N \quad (8.5)$$

Obrázek 13: Rozměry mechanického systému

Dalším dílcem jsou ocelové rozpěrky. Na jednom pólu jich je 6. Z toho 4 jsou použity jako vodící čepy pro pružiny, do výpočtu budu uvažovat 2 z nich. A další dvě jsou pro lepší mechanické vlastnosti mezi noži pólu, ty budu uvažovat též.

$$F'_{rozp} = \left(2 \cdot \frac{\pi \cdot d_{mech}^2}{4} \cdot l_{mech} \cdot \rho_{ocel} \cdot g \right) + \left(2 \cdot \frac{\pi \cdot d_{pruž}^2}{4} \cdot l_{pruž} \cdot \rho_{ocel} \cdot g \right) =$$

$$\left(2 \cdot \frac{\pi \cdot 0,008^2}{4} \cdot 0,0385 \cdot 7800 \cdot 9,81 \right) + \left(2 \cdot \frac{\pi \cdot 0,008^2}{4} \cdot 0,0628 \cdot 7800 \cdot 9,81 \right) = 0,8N \quad (8.6)$$

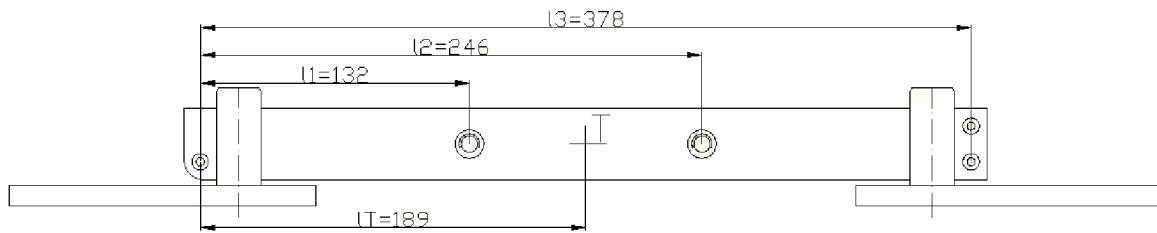
Kde $d_{mech}[m]$ a $d_{pruž}[m]$ je průměr rozpěrek, $l_{mech}[m]$ je délka rozpěrky zlepšující mechanické vlastnosti, $l_{pruž}[m]$ délka rozpěrky použité jako vodící čep.

Hodnotu zvýším o 50% na spojovací materiál a pružiny, takže $F_{rozp} = F'_{rozp} \cdot 1,5 = 1,2N$.

Tedy tedy známe hmotnosti jednotlivých dílců. Můžeme z nich tedy určit momenty. Musíme však dbát na rameno, na kterém budou momenty působit. Takže moment nože odpojovače budu uvažovat od osy otáčení do těžiště, znázornění na obrázku 14.

$$M_{nožů} = 3 \cdot F_{nožů} \cdot l_T = 3 \cdot 12 \cdot 0,189 = 6,8 N \cdot m \quad (8.7)$$

Momenty rozpěrek budu uvažovat jednotlivě od osy otáčení jak je vidět na obrázku 13. Celkový jejich moment je tedy následující.



Obrázek 14: Vzdálenosti rozpěrek a těžiště

$$M_{rozp} = \left(\frac{\pi \cdot d_{mech}^2}{4} \cdot \rho_{ocel} \cdot g \right) \cdot (l_1 + l_2 + 2l_3)$$

$$= \left(\frac{\pi \cdot 0,008^2}{4} \cdot 7800 \cdot 9,81 \right) \cdot (0,132 + 0,246 + 2 \cdot 0,378)$$

$$= 4,4 N \cdot m \quad (8.8)$$

Celkový výsuvný moment působí na páku na hřídeli, pro zjednodušení budu uvažovat působení tíhy mechanismu, rozpěrek a nožů taktéž na páce hřídele. V mém případě je délka hřídele $l_{táhla}=300mm$. Takže celkový moment, působící na vysunutí nožů je následující.

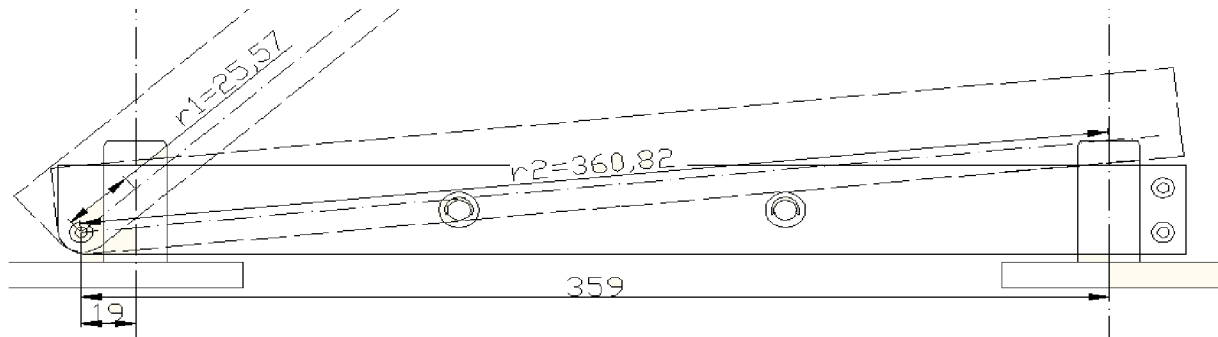
$$M_{vysun} = M_{rozp} + M_{nožů} + F_{mech} \cdot l_{táhla} = 4,4 + 6,7 + 12,3 \cdot 0,3 = 14,8 N \cdot m \quad (8.9)$$

Tento moment vyvolá síla v ose táhla $F_{vysun}[N]$.

$$F_{vysun} = \frac{M_{vysun}}{l_{táhla}} = \frac{14,8}{0,3} = 49,3N \quad (8.10)$$

Na začátku této kapitoly jsem zmiňoval třecí sílu v kontaktech. Tato síla působí v každé kontaktní dvojici a na rameni tření vyvolává třecí moment, tento moment ale není po

celou dobu pohybu nožů konstantní, budu tedy uvažovat jeho krajní velikosti. U horního styku se mění poloměr tření jen nepatrně, ale musím tuto změnu uvažovat. U spodního kontaktu se poloměr mění více. Jejich změna a velikost je zřejmá z obrázku 15.



Obrázek 15: Znázornění změny třecího poloměru

Velikost třecí síly určím pomocí přitlačné síly pružin a koeficientu tření mědi. Přitlačnou sílu mám $F_k = 200N$ a součinitel tření mědi je $f = 0,35$. Takže třecí síla bude:

$$F_t = F_k \cdot f = 200 \cdot 0,35 = 70N \quad (8.11)$$

Což na ose otáčení s uvažováním krajních poloměrů tření vyvolá moment M_t , který bude působit na jeden pól odpojovače.

$$\begin{aligned} M_t &= 2 \cdot (M_{tr1} + M_{tr2}) = 2 \cdot F_t \cdot (r_1 + r_2) = 2 \cdot 70 \cdot (0,02557 + 0,361) \\ &= 54,1N \cdot m \quad (8.12) \end{aligned}$$

Tento moment vyvolá sílu v táhle $F_{táh}$, která bude přemáhat tření.

$$F_{táh} = \frac{M_t}{l_{táhla}} = \frac{54,1}{0,3} = 180N \quad (8.13)$$

Nyní se budu zabývat ovládacím momentem trojpólové jednotky. K tomu aby se nože posunuly po pevném kontaktu, potřebují počáteční sílu $F_{táh}$. Tato síla se během pohybu nepatrně zmenšuje, jak roste z nulové velikosti moment nože a pomáhá tím pohybu vlastní tíhou. Když se nůž vysune z pevného horního kontaktu, nastalo otočení vůči původní poloze o úhel α_1 a musím zjistit velikost tíhy nože v ose táhla při tomto pootočení. Velikost úhlu určím odměřením z výkresu, je tedy $\alpha_1 = 7^\circ$. Tomuto pootočení odpovídá tíha nože v ose táhla:

$$F_{7^\circ} = \frac{M_{vysun}}{l_{táhla}} \cdot \sin \alpha_1 = \frac{14,8}{0,3} \cdot \sin 7 = 6N \quad (8.14)$$

Teď můžu určit celkový vypínací moment na hřídeli odpojovače při pohybu po horním kontaktu. Potřebuji k tomu znát délku páky, která je spojená s táhlem. Tuto délku opět odměřím z výkresu, $r_k = 64,5mm$. Vypínací moment na začátku pohybu tedy bude:

$$M_{vyp0} = 3 \cdot F_{táh} \cdot r_k = 3 \cdot 180 \cdot 0,0645 = 34,83N \cdot m \quad (8.15)$$

Jeho hodnota bude klesat až na velikost při úhlu α_1 :

$$M_{vyp7^\circ} = 3 \cdot r_k \cdot (F_{táh} - F_{7^\circ}) = 3 \cdot 0,0645 \cdot (180 - 6) = 33,7N \cdot m \quad (8.16)$$

Když dojde k vysunutí nožů z horního kontaktu, působí už jen tření ve spodním kontaktu, proti němuž působí moment rostoucí tíhou nožů. Při úhlu vysunutí horního kontaktu o desetinu zvětšeném $\alpha_2 = \alpha_1 + 0,1 = 7,1^\circ$ to bude moment:

$$\begin{aligned} M_{t,max} &= 3 \cdot (M_{tr1} - M_{vysun} \cdot \sin 7,1^\circ) = 3 \cdot (2 \cdot F_t \cdot r_1 - 14,8 \cdot \sin 7,1^\circ) = \\ &= 3 \cdot (2 \cdot 70 \cdot 0,02557 - 14,8 \cdot \sin 7,1^\circ) = 10,74 - 5,48 \\ &= 5,26 N \cdot m \quad (8.17) \end{aligned}$$

Moment vyvolaný tíhou nožů na táhlu poroste podle vztahu 8.18 až do své maximální hodnoty při úplném rozevření. Jeho hodnoty jsou v tabulce 10.

$$M_t = 3 \cdot F_{vysun} \cdot l_{táhla} \cdot \sin \alpha = 3 \cdot 49,3 \cdot 0,3 \cdot \sin \alpha \quad (8.18)$$

$\alpha(^{\circ})$	7,1	10	15	20	25	30	35	40	42
$M_t(Nm)$	5,48	7,70	11,48	15,18	18,75	22,19	25,45	28,52	29,69

Tabulka 10: Moment tíhy nožů podle úhlu rozevření

Když do vzorce 8.18 dosadíme za M_t hodnotu M_{tr1} a upravíme ho pro určení α , dostaneme úhel rozevření α_{sam} , po kterém by nůž odpojovače mohl dokončit pohyb svojí tíhou. Takže výpočet je následující:

$$\alpha_{sam} = \sin^{-1} \left(\frac{M_t}{3 \cdot F_{vysun} \cdot l_{táhla}} \right) = \sin^{-1} \left(\frac{10,74}{3 \cdot 49,3 \cdot 0,3} \right) = 14^\circ \quad (8.19)$$

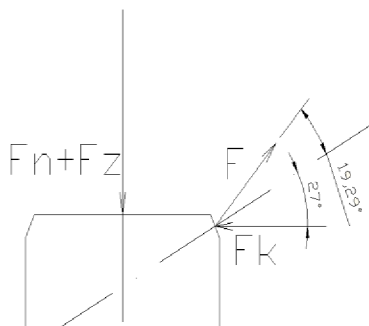
Nyní se zaměřím na opačný děj, a to zapínání. Výpočet bude opačný. Zapínací moment na hřídeli je dán největším momentem nožů a momentem tření na dolním styku.

$$M_{zap1} = M_{t,42^\circ} + M_{tr1} = 29,69 + 10,74 = 40,4 N \cdot m \quad (8.20)$$

A během zapínání bude klesat na velikost:

$$M_{zap2} = M_{t,7,1^\circ} + M_{tr1} = 5,48 + 10,74 = 16,2 N \cdot m \quad (8.21)$$

Teď jsme před začátkem vsouvání nožů na kontaktní roubík. Zde potřebujeme největší moment z celého cyklu, takže výsledek bude směrodatný pro celý pohon. Při dotyku nože a roubíku působí hned tři druhy odporů, znázorněno na obrázku 16:



Obrázek 16: Znázornění sil při začátku vsouvání nože

1. Moment tíhy nožů $M_{vyp7^\circ} = 33,7 N \cdot m$
2. Odpor kontaktního tlaku $F_k = 200 N$, který působí pod úhlem zkosení $\beta = 27^\circ$ náběhové plošky
3. Odpor tření mědi F po mědi $f = 0,35$, charakterizující vliv tření, který je dán úhlem $\varphi = \tan^{-1}(f) = 19,29^\circ$.

Kontaktní tlak a vliv tření lze sloučit, pak velikost zasouvací síly je:

$$F_z = 2 \cdot F_k \cdot \tan(\beta + \varphi) = 2 \cdot 200 \cdot \tan(20 + 19,29) = 327,3N \quad (8.22)$$

Tato síla působí na rameni $r_3=356mm$, takže výsledný moment na hřídeli je:

$$M_c = 3 \cdot F_z \cdot \frac{r_3}{l_{táhlá}} \cdot r_k + M_{vyp7^\circ} = 3 \cdot 327,3 \cdot \frac{0,365}{0,3} \cdot 0,0645 + 33,7 = 110,8 \\ \cong 115N \cdot m \quad (8.23)$$

Tuto vypočtenou hodnotu považuji za minimálně nutnou. Jelikož bylo ve výpočtech použito značného zjednodušování, není to hodnota skutečná a reálná hodnota může být vyšší i nižší. Při použití pohonu vyvíjející tento moment, by odpojovač měl spolehlivě měnit zapnutou a vypnutou polohu.

9. Závěr

Provedl jsem návrh odpojovače na vysoké napětí podle zadaných charakteristických hodnot. Konstrukční návrh je v souladu s normou ČSN EN 62271-102. Postup strukturou odpovídá [6].

Při návrhu systému izolace a izolačních vzdáleností jsem vycházel z empirických vzorců pro přeskokové napětí. Protože jsem provedl výpočet s dostatečným zvětšením všech vzdáleností z bezpečnostních důvodů, považuji systém izolace za mírně předimenzovaný. Za to více odolný proti napěťovému namáhání. Vybral jsem izolační podpěru pro odpojovač, která následně vyhověla podle výpočtu přeskokových napětí.

Návrh proudové dráhy jsem provedl metodou proudové hustoty, kdy jsem zvolil její hodnotu a poté k ní zvolil odpovídající průřez. Proudové hustoty jsou při přepočtení na zvolený průřez ze spodní části dovoleného intervalu $1,5 - 4 \text{ A/mm}^2$.

Dále jsem z přechodových odporů zjistil přítlačné síly na kontakty. Vycházel jsem z tabelovaných hodnot úbytků napětí na mezi svaření kontaktů.

Vypočítal jsem elektrodynamické síly, vyvolané procházejícím proudem, působící na kontakt odpojovače a z nich určil přídatnou přítlačnou sílu na jeden kontakt. Podle této přídatné síly jsem následně navrhnul přítlačnou pružinu.

Pro ověření tepelných účinků proudu jsem použil moderní výpočetní techniku, konkrétně prostředí programu ANSYS. Simulace se úplně nezdařila, neprojevalo se oteplení kontaktů. Jinak považuji model za fyzikálně správný. A hodnoty oteplení беру za přijatelné. Pro ověření na krátkodobé oteplení jsem provedl výpočet pro nejslabší průřez proudové dráhy a oteplení v kontaktech jsem ověřil podle úbytku napětí.

V poslední řadě jsem provedl výpočet momentu pohonu, pro montáž odpojovače na svislé stěně. Výpočet byl zjednodušen hlavně při určování tíhy jednotlivých dílců. Ale i přes toto zjednodušení považuji výsledek za přijatelný.

Všechny rozměry mnou navržených dílců jsou znázorněny na náčrtu celého odpojovače a zakótovány. Důležité dílce jsou vypsány v seznamu součástí v příloze.

Podle normy ČSN EN 62271-102, musí odpojovač mít štítek s charakteristickými hodnotami. I v mém návrhu proto uvedu štítkové hodnoty v tabulce 11. Pochopitelně neuvádím výrobce, typ, výrobní číslo ani rok výroby. Předpokládám totiž, že moje práce bude brána pouze jako teoretický postup a odpojovač nebude realizován.

	Zkratka	Jednotka	Hodnota
Jmenovité napětí	U_r	kV	22
Jmenovité výdržné napětí při atmosférickém impulsu	U_p	kV	125
Jmenovitý proud	I_r	A	630
Jmenovitý krátkodobý výdržný proud	I_k	kA	15
Jmenovitá doba zkratu	t_k	s	1

Tabulka 11: Štítek odpojovače

Příloha

Seznam součástí na náčrtu

Pozice na výkresu	Název (rozměr)	Počet kusů
1	Nůž odpojovače	6
2	Táhlo pohonu	3
3	Klika pohonu	3
4	Nosný rám	1
5	Podpěrný izolátor	6
6	Hřídel pohonu	1
7	Připojovací pás s kontaktem	6

Použitá literatura

- [1] ČSN EN 62271-102 *Vysokonapěťová spínací a řídicí zařízení - Část 102: Odpojovače a uzemňovače střídavého proudu na napětí nad 1000V.* (2003).
- [2] Hrubý, R. (2010). *Návrh odpojovače na vysoké napětí.* Brno: Vysoké ušení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [3] Raček, J. (2007). *Technická mechanika, Mechanika tekutin a termomechanika.* Brno: VUT Brno, FEKT.
- [4] Raček, J. (2008). *Technická mechanika, Úlohy z mechaniky tekutin a termomechaniky.* Brno: VUT Brno, FEKT.
- [5] Vávra, Z. *Stavba elektrických strojů a přístrojů, Část 1 Stavba elektrických přístrojů.* Brno.
- [6] Vávra, Z., Havelka, O., & Svoboda, D. (1985). *Podklady a příklady pro navrhování elektrických přístrojů.* Brno: Ediční středisko Brno.