

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2021

Bc. Lukáš Pala



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

NÁVRH STYKAČE VN PRO TRAKČNÍ ÚČELY

DESIGN OF MV CONTACTOR FOR RAILWAY APPLICATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Lukáš Pala

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Valenta, Ph.D.

BRNO 2021

Diplomová práce

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

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Bc. Lukáš Pala

ID: 195407

Ročník: 2

Akademický rok: 2020/21

NÁZEV TÉMATU:

Návrh stykače VN pro trakční účely

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Provedte rešerši literatury a nastudujte požadavky příslušných norem.
2. Vypracujte metodiku návrhu stykače s konkrétními parametry.
3. Navrhněte základní konstrukční části daného přístroje včetně mechanismu.
4. Návrh přístroje zkontrolujte na silové a tepelné účinky jmenovitých proudů a izolační vzdálenosti.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Havelka, O. a kol.: Elektrické přístroje, SNTL, 1985

[2] Havelka, O. a kol.: Podklady a příklady pro navrhování elektrických přístrojů I, VUT v Brně, 1985

[3] ČSN EN 60947-4-1 ed.4

[4] ČSN EN 60077-2 ed.2

Termín zadání: 8.2.2021

Termín odevzdání: 24.5.2021

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

doc. Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor semestrální práce nesmí při vytváření semestrální 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

V úvodu práce je analyzován systém trakčního obvodu, s různými druhy elektrických přístrojů. Jsou popsány výkonové elektrické obvody v trakci, jejich zátěže a typy používaných stykačů. Normativní požadavky kladené na stykače používané v trakci shrnuje kapitola drážních norem. Následuje literatura věnující se teorii spínání proudu a konstrukci reálných elektrických přístrojů. Na jejich základě je zpracována metodika projektování VN stykače v trakci podle požadavků uživatele a norem. Praktický návrh stykače se zaměřuje na výpočet a numerickou simulaci elektrodynamických sil, simulaci oteplení a mechanismus přístroje.

Klíčová slova

trakční stykač, VN stykač, magnetický vypínač, drážní normy, magnetické vyfukování oblouku, elektrodynamické síly, simulace oteplení, ANSYS Icepak

Abstract

In the introduction a traction circuit is analyzed with different types of electric devices. The thesis describes power railway electric circuits, their loads and types of used contactors. Railway standards chapter summarizes requirements of standards for railway contactors. Follows literature focusing on power current switching and power switching devices design. Based on previous, a design procedure is developed for railway MV contactor in accordance with end-user and standards requirements. Thesis closes with pre-designing a railway contactor by calculating electrodynamic forces, heatflow and mechanical components.

Keywords

traction contactor, MV contactor, magnetic circuit breaker, railway standards, magnetic blowout, electrodynamic forces, heatflow simulation, ANSYS Icepak

Bibliografická citace:

PALA, Lukáš. Návrh stykače VN pro trakční účely. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/134797>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce Jiří Valenta.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	<i>Lukáš Pala</i>
VUT ID studenta:	<i>195407</i>
Typ práce:	<i>Diplomová práce</i>
Akademický rok:	<i>2020/21</i>
Téma závěrečné práce:	<i>Návrh stykače VN pro trakční účely</i>

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

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

V Brně dne: 24. května 2021

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce panu Ing. Jiřímu Valentovi, Ph.D. z Ústavu výkonové elektrotechniky a elektroniky (UVEE) za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc, cenné rady a věnovaný čas při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne **24. května 2021**

.....
podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	1
SEZNAM TABULEK.....	2
ÚVOD	3
1. TRAKČNÍ OBVOD	4
1.1 TRAKČNÍ MĚNIČE	4
1.2 ELEKTRICKÉ PŘÍSTROJE.....	6
1.3 TRAKČNÍ MOTORY.....	7
2. STYKAČE V TRAKCI.....	9
2.1 LINKOVÝ STYKAČ	9
2.2 TRAKČNÍ STYKAČ.....	10
2.3 OSTATNÍ STYKAČE	11
3. DRÁŽNÍ NORMY.....	12
4. TEORIE SPÍNÁNÍ PROUDU	15
4.1 STEJNOSMĚRNÝ OBLOUK.....	15
4.2 STŘÍDAVÝ OBLOUK	16
4.3 KONSTRUKCE MAGNETICKÝCH VYPÍNAČŮ	17
5. PROJEKT VN STYKAČE PRO TRAKCI.....	19
5.1 ZÁKLADNÍ INFORMACE	19
5.2 NAPĚTÍ, IZOLACE.....	20
5.3 PROUDY, SÍLY, OTEPLENÍ.....	21
5.3.1 <i>Kontakty</i>	21
5.3.2 <i>Elektrodynamické síly</i>	22
5.3.3 <i>Oteplení</i>	22
5.4 ZHÁŠEDLO.....	23
5.5 MECHANISMUS.....	24
5.5.1 <i>Elektromagnet</i>	25
5.6 KRYT.....	26
6. NÁVRH STYKAČE.....	28
6.1 ZHÁŠENÍ OBLOUKU	28
6.2 NAPĚTÍ A IZOLACE.....	30
6.3 PROUDOVEDNÁ DRÁHA.....	31
6.3.1 <i>Kontakty</i>	31
6.4 ELEKTRODYNAMICKÉ SÍLY – ANALYTICKÝ VÝPOČET.....	31
6.4.1 <i>Síla v kontaktní úžině</i>	32
6.4.2 <i>Síly v záhybech kontaktního můstku</i>	32
6.5 ELEKTRODYNAMICKÉ SÍLY – NUMERICKÁ SIMULACE.....	36
6.5.1 <i>Geometrie modelu simulace elektrodynamických sil</i>	38
6.5.2 <i>Fyzikální vlastnosti materiálů</i>	39
6.5.3 <i>Výsledky simulace sil</i>	40
6.6 MECHANISMUS.....	41

6.6.1	<i>Kontaktní pružina</i>	41
6.6.2	<i>Vypínací pružiny</i>	42
6.6.3	<i>Elektromagnet</i>	44
6.7	KONSTRUKCE PŘÍSTROJE	49
6.8	OTEPLENÍ –NUMERICKÝ VÝPOČET.....	52
6.8.1	<i>Nastavení simulace</i>	52
6.8.2	<i>Výsledky simulace oteplení</i>	55
6.8.3	<i>Simulace proudění vzduchu</i>	62
6.9	OVĚŘENÍ VZDUŠNÝCH VZDÁLENOSTÍ A POVRCHOVÝCH CEST.....	65
7.	ZÁVĚR	68
	LITERATURA	69
	SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK	71
	SEZNAM ODKAZOVANÝCH NOREM	74
	SEZNAM PŘÍLOH	75

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1	Blokové schéma trakčního obvodu lokomotivy Škoda 109E [2].....	5
Obr. 1.2	Trakční obvod jednotky ř. 680 [9]	8
Obr. 2.1	Trakční obvod ř. 383 se znázorněním stykačů jednoho hlavního měniče [10]	9
Obr. 2.2	Příslušenství VN stykače řady CP firmy Schaltbau [11]	10
Obr. 4.1	Stejnoseměrný obvod s obloukem [13]	16
Obr. 4.2	Oscilogram vypínání střídavého proudu se znázorněním intervalů [13]	17
Obr. 4.3	Oblouk ve štěrbině zhašecí komory [13]	18
Obr. 4.4	Vyfukovací soustava magnetického vypínače [13]	18
Obr. 5.1	Zjednodušené schéma postupu určení VN izolačních vzdáleností	21
Obr. 5.2	Tahový přebytek elektromagnetu [21].....	26
Obr. 5.3	Zjednodušené vývojové kroky při návrhu stykače	27
Obr. 6.1	Prvotní koncept kontaktního ústrojí se zhašecími komorami	30
Obr. 6.2	Geometrické rozměry navrhovaného kontaktního ústrojí	32
Obr. 6.3	Rozměry pro rovnoběžné úseky [16].....	33
Obr. 6.4	Rozměry pro výpočet sil od zalomených vodičů a nespojitých úseků [16]	34
Obr. 6.5	Rozměry pro U-záhyb [16].....	35
Obr. 6.6	Závislost stykového odporu na přítlaku	36
Obr. 6.7	Geometrie jedné kontaktní destičky (vlevo) a detail jedné náhradní úžiny (vpravo).....	37
Obr. 6.8	Model proudovodné dráhy pro výpočet elektrodynamických sil.....	39
Obr. 6.9	Statické tahové charakteristiky různých kotev pro 543 závitů a buzení 8,16 A.....	45
Obr. 6.10	Rozměry magnetického obvodu a 3D pohled na komolé jádro (v popředí) a kotvu.....	46
Obr. 6.11	Průběhy velikosti sil navrhovaného mechanismu	48
Obr. 6.12	Navrhovaný stykač v řezu podélnou osou přístroje	49
Obr. 6.13	Obrysová rozměry a vnější pohled na kompletní přístroj	50
Obr. 6.14	Pohyblivé komponenty mechanismu stykače s pružinami.....	51
Obr. 6.15	Zobrazení ploch s náhradním budícím proudem elektromagnetu na drátěném modelu	53
Obr. 6.16	Okrajové podmínky Stationary představující stěny s nulovým tepelným tokem.....	54
Obr. 6.17	Znázornění tepelných ztrát v proudovodných částech stykače	56
Obr. 6.18	Povrchová teplota pohledem skrz rovinu symetrie	57
Obr. 6.19	Povrchová teplota na vnějších krytech	58
Obr. 6.20	Detail zvýšeného oteplení horní poloviny přístroje	59
Obr. 6.21	Rozmístění měřicích bodů na vnějších krytech	60
Obr. 6.22	Rozmístění měřicích bodů uvnitř přístroje	61
Obr. 6.23	Proudění vzduchu pohledem skrz rovinu symetrie	63
Obr. 6.24	Proudění vzduchu pohledem na vnější části	64
Obr. 6.25	Náčrt rovin řezu přístrojem.....	65
Obr. 6.26	Řez A-A'	66
Obr. 6.27	Řez B-B'.....	66
Obr. 6.28	Řez C-C'.....	67

SEZNAM TABULEK

Tab. 6.1 Vstupní parametry konkrétního VN stykače.....	28
Tab. 6.2 Určené parametry pro návrh izolace	30
Tab. 6.3 Parametry kontaktního materiálu.....	31
Tab. 6.4 Fyzikální vlastnosti materiálů v projektu.....	40
Tab. 6.5 Výsledky výpočtu elektrodynamických sil	40
Tab. 6.6 Parametry odporových pružin ve stykači.....	44
Tab. 6.7 Použité hodnoty emisivity v simulaci oteplení	55
Tab. 6.8 Hodnoty teploty v měřicích bodech.....	61
Tab. 6.9 Porovnání nasimulovaných teplot s mezními normovanými	62
Tab. 6.10 Změřené velikosti vzdušných vzdáleností a povrchových cest.....	67

ÚVOD

S rozvojem elektromobility, urbanismu a rostoucí ekologičností dopravy vzrůstají nároky na transportní vozidla nákladní i osobní dopravy, a to z hlediska kvantitativního i kvalitativního. Roste počet elektrických silničních i kolejových vozidel s rostoucími nároky na bezúdržbovost, nízké náklady a spolehlivost. To vyžaduje inovativní postupy a hledání nových řešení stávajících technických systémů vozidel. Porozuměním fyzikálních jevů a konstrukčními postupy lze snižovat cenu, rozměry, hmotnost, zvyšovat spolehlivost, zatížitelnost a doplňovat tyto přístroje o dodatečné funkce. Jedním ze zařízení jsou drážní stykače spínající výkonové proudy na vysokém napětí v trakčních obvodech kolejových hnacích vozidel. Tato práce se věnuje návrhu konkrétního výkonového stykače pro použití v trakčním obvodu železničních lokomotiv. Fyzikální jevy popsané v literatuře jsou důležitým výchozím bodem projektování stykače a jsou následovány příklady praktických řešení. Stykač je třeba navrhovat v souladu s mnohými normativními, uživatelskými, ekonomickými a v poslední době rozvíjejícími ekologickými požadavky. Požadavky pak vytvářejí ucelený soubor vstupních parametrů pro konstruktéra navrhujícího částí přístroje. Znalost těchto informací a orientace v nich je důležitá nejen pro vývoj samotných stykačů a ostatních přístrojů, ale také při projektování nadsystémů, ve kterých se tyto přístroje provozují.

1. TRAKČNÍ OBVOD

Hnací vozidla elektrické trakce lze rozdělit do několika kategorií, a to podle jízdní dráhy, přívodu energie, účelu, stavby mechanické části, proudové soustavy, druhů trakčních pohonů, zdroje energie apod. V této práci je věnována pozornost hnacím vozidlům elektrickým a motorovým s elektrickým trakčním pohonem.

Zdrojem energie je u těchto vozidel elektřina z trolejového vedení, naftový motor, plynová turbína, akumulátor nebo setrvačnick. Energie je z trolejového vedení nebo alternátoru rozváděna, dále přeměňována a dopravena k elektrickým trakčním motorům napojeným přes převodovku na hnací dvojkolí. Silový elektrický obvod vedoucí od zdroje energie k trakčním motorům se nazývá trakční obvod.

U hnacích vozidel jsou kladeny významné provozní požadavky týkající se výstupního výkonu trakčních motorů. Kromě nutnosti práce ve všech čtyřech kvadrantech momentové charakteristiky pohonu je zde i požadavek na plynulý rozjezd, udržování rychlosti, náhlé zastavení, plynulé zpomalení, protiskluzová ochrana a další požadavky. To vše je nutné splnit při velkých výkyvech okolních teplot, změně kvality elektrické energie v trakčním vedení, znečištění, mechanických rázech atp.

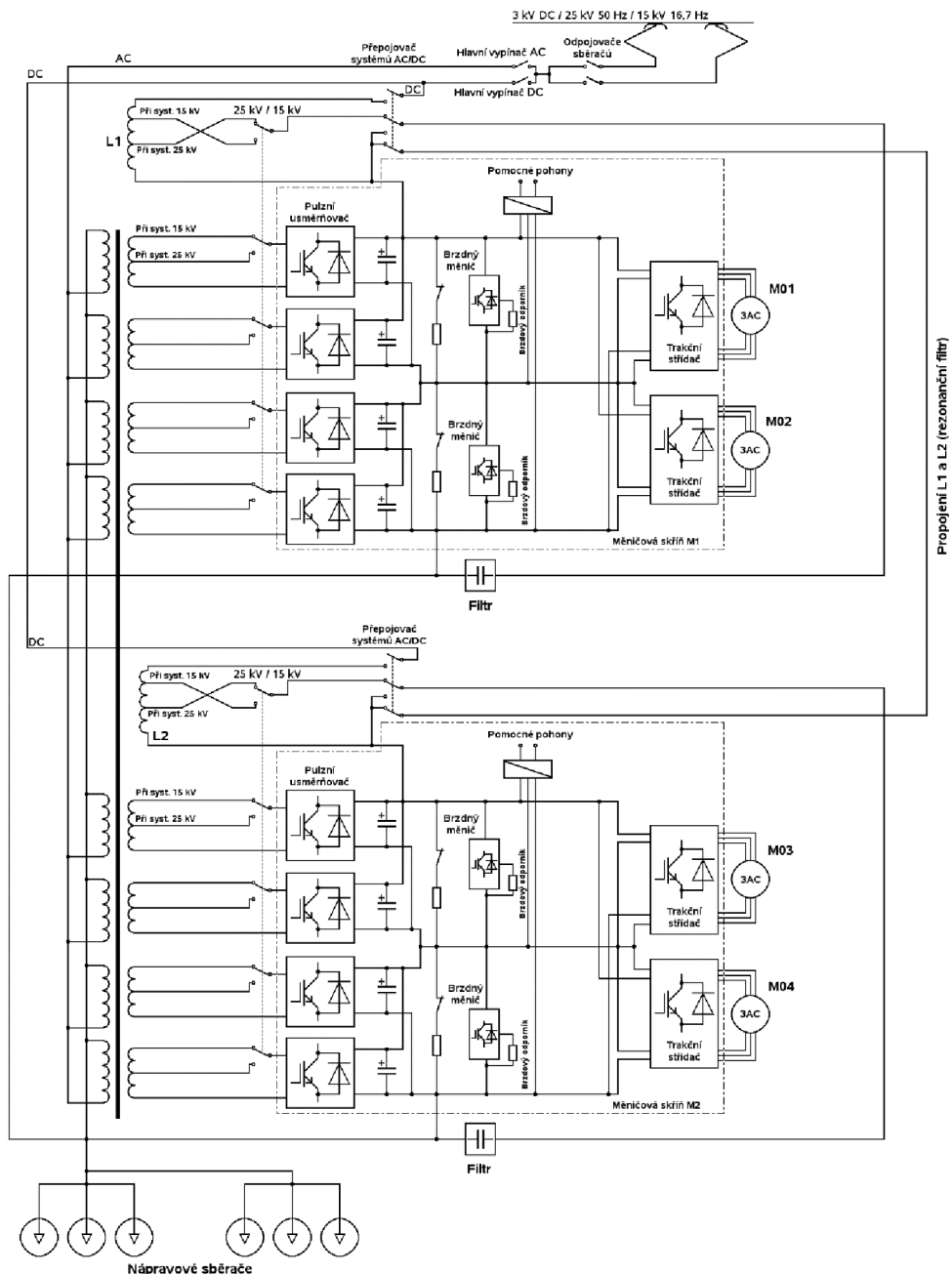
1.1 Trakční měniče

Druh trakčního měniče je jedním z třídících znaků elektrických a motorových hnacích vozidel. Trakční měnič kvalitativně přeměňuje dodávanou elektrickou energii, kterou jsou napájeny trakční motory. Mezi zařízení k tomu používaná patří například transformátory, usměrňovače, střídače, odporníky, tlumivky, šuntovací odpory.

Pro splnění požadavku na plynulý rozjezd a brzdění používají trakční měniče stupňové řízení výkonu. U starších lokomotiv s odporovou regulací výkonu k tomu účelu slouží odporník s odstupňovanými vývody (např. řada 150 „*banán*“). Spínáním stupňů pomocí stykačů je docílena postupná, ale ztrátová regulace výkonu. Podobného principu je využito u střídavých lokomotiv s regulací přepínáním odboček transformátoru (ř. 240 „*laminátka*“).

Plynulejší regulace výkonu lze docílit použitím pulzních tyristorových měničů. Tyristory řízené pulzní šířkovou modulací PWM mění svorkové napětí trakčních motorů v malých skocích bez použití ztrátových odporů. Jedna z prvních čs. tyristorových lokomotiv je ř. 363 „*eso*“, u které jsou úrovně frekvence 33 1/3, 100, 300 a 100 Hz. Lokomotiva Siemens ES64U2 „*Taurus*“ má frekvenčních úrovní ještě více a rozjezd je doprovázen akustickým projevem vzestupné tónové stupnice. Zpětné trakční proudy z tyristorové regulace při nedostatečném filtrování však mohou způsobovat rušení vyššími harmonickými a omezovat spolehlivost zabezpečovacích zařízení (jako se tak stalo např. při testech ř. 680 „*Pendolino*“ na českých tratích [1]).

Nejplynulejší regulace výkonu v trakčních měničích je realizována pomocí IGBT tranzistorů. Neustálé zdokonalování této technologie umožňuje použití tranzistorů v obvodech s vyšším napětím, menší ztráty a vysokou rychlost spínání. Tranzistory řízené PWM mění frekvenci a střidu zcela plynule a již nedochází k charakteristickým stupňovitým akustickým projevům. Jedna z nejmodernějších lokomotiv současnosti ř. 383 „Vectron“ využívající tuto technologii disponuje trvalým výkonem 6400 kW a maximální rychlostí 200 km/h.



Obr. 1.1 Blokové schéma trakčního obvodu lokomotivy Škoda 109E [2]

1.2 Elektrické přístroje

Spínací elektrické přístroje spínají a rozpínají provozní i zkratové proudy v široké škále proudů a napětí. Na rozdíl od přístrojů používaných ve stabilních průmyslových EZ, musí být přístroje používané v trakci odolné vůči zvýšeným mechanickým rázům, znečištění, výkyvům teplot a změnám nadmořské výšky.

Hnací vozidla odebírající trakční proud z trolejového vedení jsou vybavena sběrači. Elektrické parametry se mění podle druhu napájecí sítě. Některé vícesystémové lokomotivy (např. ř. 383) disponují 4 typy sběračů – jeden pro každou napěťovou soustavu – 1,5 kV, 3 kV, 15 kV, 25 kV [3]. Sběrače pro stejnosměrný proud mají větší plochu a počet smykadel a vyšší přítlak k troleji oproti střídavým sběračům, kde jsou odebírané proudy nižší. Materiál smykadel pro stejnosměrný proud v sobě také obsahuje více uhlíku. Konstrukčně lze rozlišit dva typy sběračů – pantograf (dvouramenný, nůžkový) a polopantograf (jednoramenný). Na nové lokomotivy se přibližně od 70. let montují pouze polopantografy kvůli jejich menší hmotnosti i momentu setrvačnosti, a tedy lepšímu udržování kontaktu s trolejí. Samotný sběrač v sobě nezahrnuje funkci odpojovače, tu obstarávají jiné k tomu určené odpojovače, přepojovače, uzemňovače [4] [5].

Hlavní vypínač slouží k vypínání poruchových zkratových proudů i prostému zapnutí/vypnutí soupravy. Podobně jako jiná vysokonapěťová zařízení je umístěn v kobce, do které je přístup umožněn pouze po odpojení od zdroje napětí a uzemnění soupravy. Vypínač je v trakčním obvodu zapojen za sběračem a odpojovačem. U většiny vozidel je hlavní vypínač koncipován jako tlakovzdušný vypínač na střídavý proud. Nacházejí uplatnění i vypínače s magnetickým vyfukováním oblouku. Po sepnutí je vypínač udržován v sepnutém stavu přídržným obvodem, jehož odpojení nastává při poklesu napětí v troleji, nebo popudu některé z ochran. Dvousystémové (AC/DC) lokomotivy jsou vybaveny dvěma druhy vypínačů se vzájemným blokováním. Po zvednutí sběrače je napětí přivedeno do indikačního obvodu, jehož relé nedovolí sepnout nesprávný vypínač [5].

Stykače jsou široce zastoupeny v trakčním obvodu. Zajišťují spínání trakčních měničů, přepínání směru jízdy, přepínání stupňů odporů i slouží jako vypínače trakčních motorů v případě nadproudu. Detailněji o těchto přístrojích v následující kapitole.

Malé ochranné přístroje obvodů NN přístupných obsluze ve hnacích vozidlech a laikům v osobních vozech jsou téměř shodné s přístroji instalovanými v rozvaděčích NN stabilních zařízení. Elektrické parametry jsou velice podobné (např. vypínací schopnost jističů dosahuje 6 a 10 kA podobně jako u MCB). Montují se na DIN lišty, avšak od jističů ve stacionárních EZ se liší hlavně vyšší požární a mechanickou odolností kvůli rázům [6].

1.3 Trakční motory

Elektromotory pohánějící hnací dvojkolí se nazývají trakční motory. Jsou jimi vybaveny vozidla elektrické (zdrojem proudu je trolej) i dielelektrické trakce (zdrojem je trakční alternátor). Princip, kdy je výkon z prvotního zdroje (generátor v síti, alternátor, setrvačnický) přenášén elektrickým obvodem do trakčního elektromotoru se nazývá elektrický přenos výkonu a je v dnešní době dominantním technickým řešením pohonu trakčních vozidel díky své spolehlivosti, univerzálnosti a nízkým ztrátám. Existuje ale i několik řad stále provozovaných vozidel, které disponují např. mechanickým (ř. 700 až 703), hydromechanickým (ř. 842, 810) či hydrodynamickým (ř. 710, 725, 726, 854) přenosem výkonu [5], [7].

Trakční motory mohou být uloženy ve skříně lokomotivy, častěji však v rámu podvozku, kde lze motory uložit dvěma způsoby. Tlapové uložení spočívá v použití motoru s upravenou kostrou, která v sobě zahrnuje převod nalisovaný na hřídeli rotoru a nálitky pro ložisková pouzdra. Motor je „tlapově“ zavěšen přímo na dvojkolí a na druhé straně odpruženě zavěšen na rámu podvozku. Výhodou tohoto uložení je jednoduchá konstrukce, na druhou stranu je vhodné pouze pro vozidla s nižší rychlostí do 100 km/h a dochází k většímu působení na kolejový svršek hmotami motoru. S rozvojem lehčích (oproti stejnosměrným) asynchronních trakčních motorů získává tlapové uložení opět na oblibě, např. moderní lokomotivy Siemens ES64F a Bombardier TRAXX s max. rychlostí 140 resp. 160 km/h používají 4-pólové asynchronní tlapově uložené trakční motory [8].

Kolejová hnací vozidla s vyšší konstrukční rychlostí mají trakční motory uloženy zcela odpruženě na rámu podvozku. Točivý moment je z odpruženého motoru přenášén přes převodovku dutým nebo kloubovým hřídelem na dvojkolí, na kterém již nespočívá hmota motoru.

Podle konstrukce a elektrického zapojení lze rozdělit trakční motory do mnoha skupin: stejnosměrné se sériovým, derivačním, kompaundním a cizím buzením, střídavé asynchronní, synchronní, jednofázové, třífázové. Dříve nejčastěji používaným typem je stejnosměrný komutátorový motor. Vysoký záběrný moment a snadné napájení stejnosměrným proudem jsou hlavní přednosti tohoto stroje. V konstrukci s cizím buzením se k těmto vlastnostem přidává tvrdá zatěžovací charakteristika díky možnosti nezávislé regulace buzení.

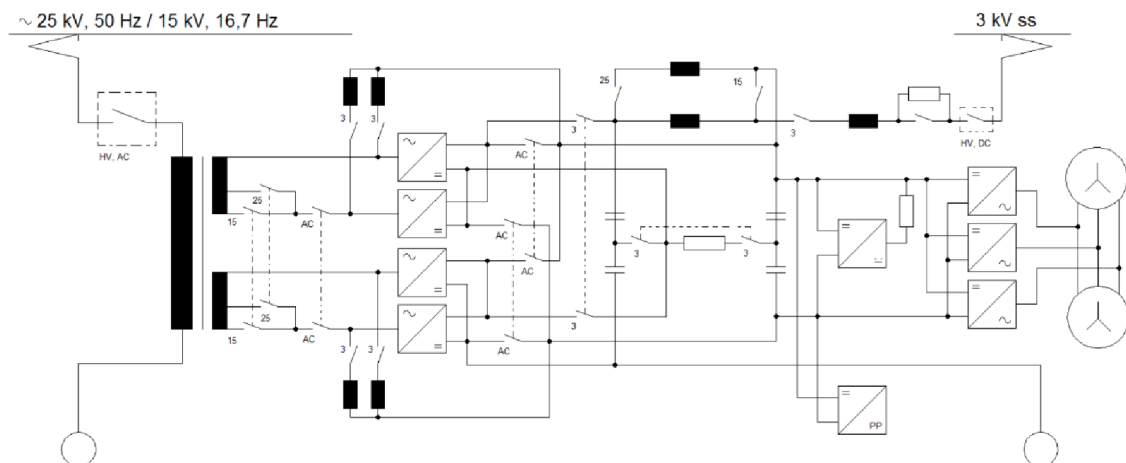
Stejnosemnými sériově buzenými trakčními motory jsou vybaveny třeba stejnosměrné lokomotivy řady 150/151, kde se jedná o typ AL 4741 Flt. Regulace výkonu je provedena pomocí odporů v obvodu kotvy motorů chlazených proudem vzduchu z ventilátorů. Trakční motory jsou zapojeny do dvou motorových skupin, každá v jednom podvozku a lze je řadit sériově a sérioparalelně [5].

Vícesystémové lokomotivy pokročilejší konstrukce řady 363 jsou vybaveny stejnosměrnými motory s cizím buzením typu Al 4562 FiR. Výkon je řízen pomocí pulzních tyristorových měničů, kde jsou dva měniče zapojeny paralelně a napájejí jednu

motorovou skupinu sestavenou ze dvou sériově zapojených motorů v jednom podvozku. Takto je celý pohon trvale zapojen sérioparalelně. Řízení buzení obstarává samostatný pulzní měnič napájející společně všechna čtyři buzení zapojená do série [5].

Nevýhodou stejnosměrných trakčních motorů je zejména nutnost údržby komutátorů a hmotnost celého stroje. Pro lepší komutaci proudu a provoz při zvlněném (usměrněném) proudu jsou vybaveny kompenzačními a komutačními vynutími a pomocnými póly, které zvyšují hmotnost a rozměry celého stroje. Řešení těchto překážek nabídly s příchodem výkonných polovodičových prvků asynchronní motory s kotvou nakrátko.

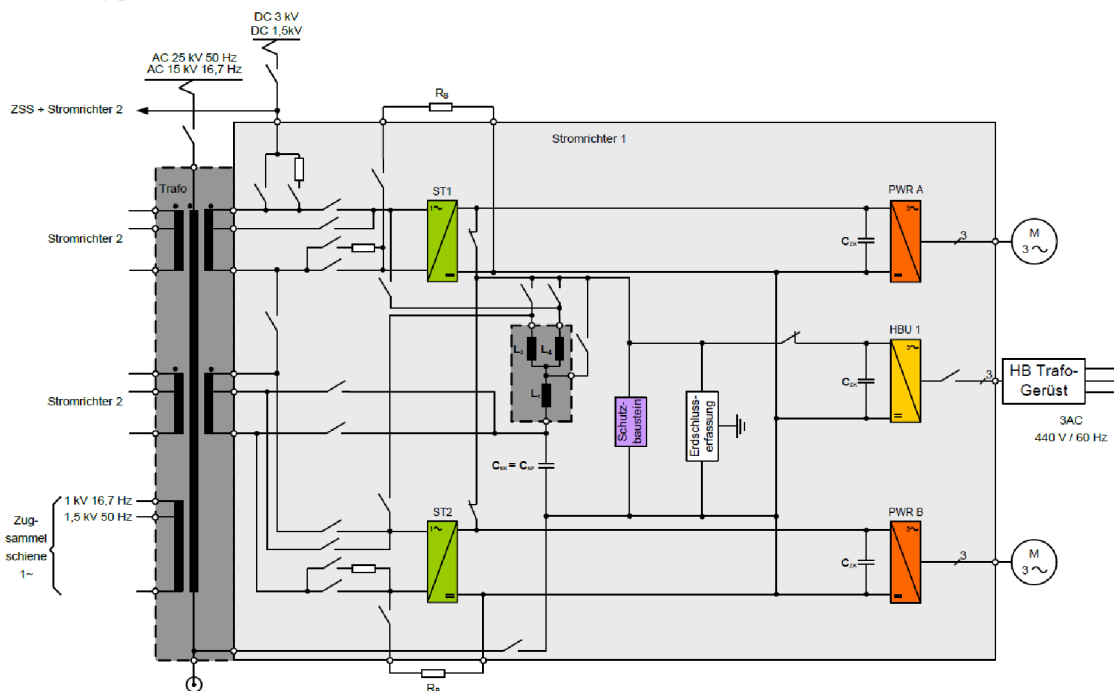
Asynchronní motory musí být pro svou funkci napájeny střídavým proudem. U malých jednofázových lokomotiv může tento požadavek splnit regulovaný transformátor, ale výkonnější moderní lokomotivy používají třífázové motory napájené střídačem. Napájení trakčních motorů je řešeno individuálně nebo skupinově. Výzbroj vícesystémové lokomotivy řady 380 „*messerschmitt*“ (podle továrního označení Škoda 109E) je tvořena trakčním transformátorem, čtyřkvadrantovými měniči, stejnosměrnými meziobvody a napěťovými střídači s IGBT tranzistory. Každý ze čtyř trakčních motorů typu ML 4550 K/6 je napájen samostatným střídačem. Vinutí je zapojeno do dvojité hvězdy [2], [5]. Naproti tomu vícesystémová jednotka řady 680 je vybavena osmi asynchronními trakčními motory typu MTA 6/550, každý hnací vůz (4 z celkových 7) je osazen dvěma motory napájenými skupinově z jednoho měniče osazeného tyristory GTO [9].



Obr. 1.2 Trakční obvod jednotky ř. 680 [9]

2. STYKAČE V TRAKCI

V trakčním obvodu se využívají stykače pro spínání odporových, induktivních i kombinovaných zátěží podobně jako v průmyslu. Vysoké spínané výkony vyžadují robustní řešení kontaktního mechanismu s ohledem na okolní podmínky. Stykače se v trakci využívají na spínání stupňů odporníků, trakčních měničů, vlakového topení, ale také slouží jako nadproudová ochrana a v některých vozidlech městské dráhy jako hlavní vypínač.



Obr. 2.1 Trakční obvod ř. 383 se znázorněním stykačů jednoho hlavního měniče [10]

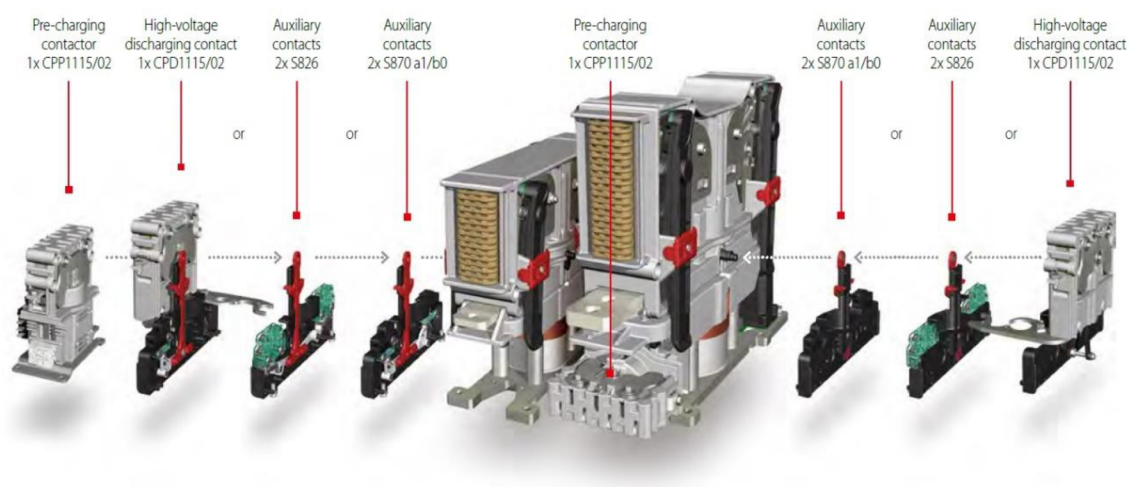
2.1 Linkový stykač

Spínání hlavních obvodů a měničů pro trakční pohony provádí vysokonapěťový linkový stykač. V některých publikacích se uvádí jako hlavní stykač, popř. u tramvají je místo velkého hlavního vypínače použit linkový stykač kvůli nižšímu napětí v troleji. Linkové stykače jsou ovládány řídicím systémem v kombinaci s maximálním relé fungujícím jako nadproudová ochrana. Vyrábějí se i provedení jako přepojovače přepínající mezi napájecími systémy – např. mezi sběračem pro 3kV síť a sekundární vinutí trakčního transformátoru napájeného ze sítě 15 nebo 25 kV.

Z hlediska normy ČSN EN 60077-2 se zařazují jako součástky kategorie A2 (spínací přístroje pro trakční obvod). Konstruují se pro střídavý i stejnosměrný proud pro použití ve vícesystémových vozidlech. Dřívější konstrukce byly elektropneumatické s elektromagnetickým ventilem. Dnešní nové konstrukce jsou již čistě elektromagneticky ovládané. Zhášení oblouku je prováděno magnetickým principem se zhášecí cívkou.

Spínací mechanismus je nejčastěji můstkový, popř. pákový. Linkové stykače se vyrábějí v jednopólovém provedení, mohou se vyskytnout i výrobkové řady ve vícepólovém provedení kvůli druhotnému použití jako trakční stykače.

Jmenovité napětí U_n těchto stykačů v železniční trakci se pohybuje v hodnotách 1500 a 3000 V a jmenovité pracovní napětí U_e je pak 1800 a 3600 V kvůli toleranci sítě. Proudová zatížitelnost tepelným proudem I_{th} se pohybuje ve stovkách ampér. Jako příslušenství se linkové stykače doplňují o pomocné, přednabíjecí a vybíjecí kontakty. Přednabíjecí kontakty spolu s přednabíjecím rezistorem zmenšují proudovou špičku při zapínání měničů se vstupními filtry.



Obr. 2.2 Příslušenství VN stykače řady CP firmy Schaltbau [11]

2.2 Trakční stykač

Někdy jsou tímto termínem označovány všechny stykače v trakčním obvodu. Zde je pojednáno o stykačích trakčních motorů spínajících kotevní (DC motory) nebo satorové vinutí (ASM) trakčních motorů. V trakčním obvodu slouží jako spínače nadproudové ochrany trakčních motorů pro případ zkratu nebo jiného selhání v motoru, popř. ochrana motoru vůči selhanému měniči. Ve starších lokomotivách s odporovou regulací nebo s přepínatelným transformátorem sloužily k vzájemnému přepínání stejnosměrných trakčních motorů do sériového, sérioparalelního nebo paralelního zapojení.

Podobně jako linkové jsou trakční stykače motorů tříděny do kategorie A2. Pro starší stejnosměrné aplikace se vyrábějí jednopólové nebo dvoupólové elektromagneticky ovládané přístroje jako náhrady za elektropneumatické typy. Stykače pro asynchronní nebo synchronní motory jsou pak vždy třípólové. Jmenovité napětí se rovněž pohybuje v hodnotách 1500 a 3000 V jako u linkových stykačů. Proudové zatížení se pohybuje v řádu stovek až tisíců ampér a např. stykače pro synchronní

motory s PM jsou dimenzovány na frekvenci do 400 Hz, oproti max. 60 Hz u linkových stykačů [12].

2.3 Ostatní stykače

Mezi další stykače používané v trakci patří přednabíjecí, vybíjecí, odporníkové, kombinační, šuntovací, stykače pomocných pohonů, vlakového topení, elektrodynamické brzdy (EDB) a malé instalační stykače.

Přednabíjecí a vybíjecí VN stykače slouží k omezení nabíjecích a vybíjecích proudových špiček měničových filtrů. Konstruují se s opalovacími kontakty v jednopólovém nebo dvoupólovém provedení podle potřeby zákazníka.

U hnacích vozidel s odporovou regulací výkonu se používají odporníkové stykače k postupnému vyřazování rozjezdových odporníků z kotevního obvodu stejnosměrných trakčních motorů. Šuntovací stykače jsou v těchto vozidlech používány k zeslabování buzení motorů. Postupným spínáním šuntovacích rezistorů paralelně k budicímu vinutí je dosaženo poklesu napětí na vinutí, zeslabení buzení a tím zvýšení otáček stejnosměrného motoru. Hnací vozidla s asynchronními motory již tyto stykače nemají.

Výkonové stykače pomocných pohonů jako jsou ventilátory, kompresory, čerpadla jsou nedílnou součástí výzbroje starších i novějších vozidel. Spínané zátěže jsou ale na nižší napětí, a tak lze použít výkonový stykač na nízké napětí palubní trojfázové sítě 440 VAC. Tyto stykače jsou konstrukčně podobné s průmyslovými stykači a jsou také konstruovány dle normy ČSN EN 60947-4-1, navíc však vyhovují i požadavkům drážních norem. Podobně se postupuje u ostatních přístrojů jako jsou jističe a instalační stykače s napětím do 1000 VAC, resp. 1500 VDC.

VN stykače se dále používají u zátěží jako je vlakové topení a elektrodynamická brzda. Vytápění soupravy a napájení dalších vozů u soupravy s více vozy obstarávají vysokonapěťové kabely, které rozvádějí vysoké napětí do všech osobních vozů. Elektrodynamická brzda je typem elektrické brzdy, kde jsou trakční motory vybuzeny do generátorického režimu a energie je mařena přes pulzní měnič ve výkonových odpornících. Moderní lokomotivy disponují i elektrorekuperační brzdou (ERB), která vrací vybrzděnou energii zpět do sítě. Na stejnosměrných soustavách je její použití však omezeno kvůli následnému nadměrnému zvýšení napětí v troleji. Z toho důvodu je strojvedoucím místo ERB použita v těchto traťových úsecích EDB.

3. DRÁŽNÍ NORMY

Technické normy drážních vozidel jsou rozsáhlou disciplínou zahrnující strojírenství, požární bezpečnost, elektrotechniku, EMC i informační techniku. V této kapitole jsou popsány požadavky drážních norem na elektrické přístroje používané v trakci a odlišnosti oproti normám průmyslovým. Normy se sice věnují problematice všech druhů přístrojů, avšak pozornost bude věnována hlavně požadavkům na VN stykače. Pro drážní vozidla provozovaná v ČR platí převzaté evropské a mezinárodní normy EN a IEC, ale také neharmonizované ČSN normy.

- **ČSN 34 5145 ed.2:** Názvosloví pro elektrická trakční zařízení

Tato norma se věnuje názvosloví jako jsou obecné termíny, pevná trakční zařízení, pohyblivá trakční zařízení a provoz trakčních zařízení. Věnuje se definici veličin, metodám ochrany uzemněním, elektrických obvodů, vedení a jeho geometrie a další.

- **ČSN 36 2255:** Elektrické přístroje hnacích vozidel

Stanovuje vlastnosti, provedení a rozsahy zkoušek kontaktních přístrojů pro spínání nezatížených obvodů, zatížených obvodů, řídicích přístrojů, dále elektrická relé, přístroje pro kontrolu baterií, odporníky a DC pojistky do 600 V včetně.

Norma udává pracovní podmínky, při kterých by měly přístroje být schopné pracovat. Jedná se o nadmořskou výšku nepřesahující 1200 m, pokud není udáno jinak a okolní teplotu -30°C až $+40^{\circ}\text{C}$. Dále se uvažuje mechanické chvění s danou amplitudou a frekvencí a namáhání vzniklá náhlou změnou rychlosti vozidla ve směru jízdy odpovídají max. zrychlení 3g. Přístroje musí být schopny pracovat při vychýlení o 9° od normální pracovní polohy ve všech směrech. K požadavkům na provoz při kolísání provozovacího napětí se norma odkazuje na ČSN 34 1500. Pro stanovení povrchových cest a vzdušných vzdáleností se norma odkazuje na ČSN 34 0130, která již není platná – byla zrušena k 07/2001 bez náhrady. Této problematice se věnuje převzatá norma ČSN EN 50124-1 ed.2. Mezní hodnoty oteplení částí přístrojů jsou v normě ČSN 36 2255 uvedeny také, avšak shodují se s požadavky normy ČSN EN 60077-2, ve které jsou tabulky mezních hodnot oteplení podrobnější. Všechny přístroje musí mít na kostře ochrannou svorku, pokud se nejedná o přístroje s jmenovitým napětím nejvýše rovným bezpečnému malému napětí. Norma definuje pro stykače nejmenší I_{min} a nejvyšší I_{max} proud, který stykač musí bezpečně vypnout na hodnotu $0,2I_n$, resp. $1,2I_n$ při maximálním napětí, pokud není dohodnuto jinak. Nakonec jsou v normě uvedeny druhy zkoušek a jejich postupy.

- **ČSN EN 50124-1 ed.2:** Drážní zařízení – Koordinace izolace – Část 1: Základní požadavky – Vzdušné vzdálenosti a povrchové cesty pro všechna elektrická a elektronická zařízení

Stanovuje požadavky na vzdušné vzdálenosti, povrchové cesty a koordinaci izolace zajišťující zvýšenou ochranu zařízení. Definiuje čtyři kategorie přepětí (OV), podle kterých je určeno metodou 1 jmenovité impulzní napětí U_{Ni} , což je hodnota přiřazená výrobcem charakterizující odolnost izolace proti přechodným přepětím. Metoda 2 bere v úvahu pracovní špičkové napětí. Norma určuje také způsob určení jmenovitého izolačního napětí U_{Nm} – hodnota výdržného napětí charakterizující trvalou odolnost izolace. Pro posouzení vlivu znečištění norma stanovuje sedm stupňů znečištění (PD) - PD1 až PD4B, z nichž dva jsou určeny pro pevná trakční zařízení. Odolnost izolantu proti plazivým proudům je porovnávána indexem CTI s ohledem na vznik vodivých cest vlivem eroze, kontaminace nebo jinému poškození povrchu izolantu. V normě jsou uvedeny tabulky pro určení výše uvedených hodnot napětí, povrchových cest a vzdušných vzdáleností, stejně jako zkušebních hodnot napětí pro dielektrické zkoušky.

- **ČSN EN 50125-1 ed.2:** Drážní zařízení – Podmínky prostředí pro zařízení – Část 1: Drážní vozidla a jejich zařízení

Uvádí podmínky prostředí vyskytující se v Evropě. Zahrnuje parametry jako jsou nadmořská výška, teplota, vlhkost vzduchu, pohyb vzduchu, déšť, sníh a kroupy, led, sluneční záření, atmosférické výboje, znečištění, a to pro drážní vozidla a jejich zařízení. Na rozdíl od české normy ČSN 36 2255 podrobněji rozřazuje nadmořské výšky do 4 tříd, stejně jako teplotu. V několika oblastech se norma odkazuje na další normy, především na ČSN EN 60721-3-5 klasifikující klimatické podmínky, biologické, chemické a další vlivy na pozemní vozidla.

- **ČSN EN 60077-1 ed.2:** Drážní zařízení – Elektrická zařízení drážních vozidel – Část 1: Obecné provozní podmínky a obecná pravidla

Tato norma definuje požadavky na elektrická zařízení instalovaná ve výkonových, pomocných, řídicích a indikačních obvodech drážních vozidel. Při definici parametrů týkajících se izolačních napětí, vzdušných vzdáleností a povrchových cest se odkazuje na IEC 62497-1, která nebyla převzata do soustavy evropských norem (uvedeno v předmluvě normy 60077-1). V Evropě i ČR se místo ní používá ČSN EN 50124-1 ed.2. Podobně v případě podmínek prostředí se používá ČSN EN 50125-1 místo odkazované IEC 62498-1. Norma se dále odkazuje na jiné normy v oblastech EMC, vibrací, požární ochranu, krytí a v závěru norma uvádí typy zkoušek a jejich metodiku.

- **ČSN EN 60077-2 ed.2:** Drážní zařízení – Elektrická zařízení drážních vozidel – Část 2: Elektrotechnické součástky – Obecná pravidla

V této normě jsou tříděny přístroje podle různých kritérií, především provozní četnosti (C1, C2, C3) a kategorie součástek (A1, A2, A3, A4, B). Norma konkretizuje obecná pravidla v ČSN EN 60077-1 pro součástky používané v drážních vozidlech. Dokument se používá pro stanovení doplňujících zvláštních požadavků pro drážní zařízení v případě, že mají vlastní průmyslovou normu výrobku. Ohledně konstrukčních požadavků se odkazuje na ČSN EN 60077-1. Jsou stanoveny provozní charakteristiky s počty spínacích cyklů podle kategorie součástek a provozní četnosti.

- **ČSN EN 61373 ed.2:** Drážní zařízení – Zařízení drážních vozidel – Zkoušky rázy a vibracemi

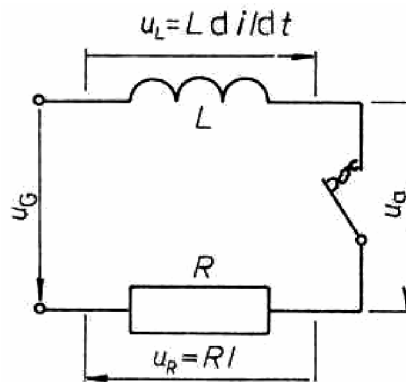
Třídí zařízení a součásti podle montáže – na skříň, podvozek nebo nápravu a stanovuje referenční a kontrolní body pro provedení zkoušek. Uvádí hodnoty efektivních hodnot a kmitočtových rozsahů zrychlení, kterým jsou zařízení podrobena ve všech třech osách. Norma definuje parametry a zkoušky specifické pouze pro drážní vozidla a značně se odkazuje na soubor norem ČSN EN 60068: Zkoušení vlivů prostředí.

4. TEORIE SPÍNÁNÍ PROUDU

Elektrické přístroje pro spínání proudu jsou elektromechanická zařízení uzpůsobená k zapínání, vedení, vypínání a bezpečnému odpojení proudů v elektrických obvodech. Stykače se řadí do kategorie provozních přístrojů, tzn. že jsou schopny vypínat provozní proudy a mírné nadproudy při vysoké četnosti spínání. To klade specifické požadavky na schopnosti stykačů vypínat stejnosměrné i střídavé proudy. Z hlediska zachování provozuschopnosti a odolnosti přístroje je z dynamických jevů mnohem náročnější proces vypínání. Při zapínání se oblouk také vyskytuje, nicméně po dosednutí kontaktů je uhašen. Vedení proudu má vliv na oteplení přístroje a izolační schopnosti mezikontaktního prostoru jsou určujícím faktorem bezpečnosti přístroje v rozepnutém stavu. V následující kapitole budou probrány základy principů zhašení oblouků stejnosměrných i střídavých, včetně konstrukce vypínačů schopných vypínat oba typy proudů.

4.1 Stejnosměrný oblouk

Ve stejnosměrném obvodu vzniká oblouk po oddálení kontaktů přístroje vlivem tepelné ionizace částic v mezikontaktním prostoru. Průchod proudu způsobuje ohřívání kontaktů, zvyšování teploty oblouku, pokles jeho odporu a obloukového napětí. Takto způsobená ionizace je oslabována deionizačními procesy jako je rekombinace, chlazení oblouku a pohyb elektrod. Při pouhém oddálení kontaktů na vzdálenost odpojovací dráhy tedy zpravidla nemusí dojít ke zhasnutí oblouku, jelikož stejnosměrný obvod neustále přivádí další energii podporující ionizaci částic neboli oblouk je ve stabilním stavu. Aby došlo k úspěšnému uhasnutí oblouku, a tedy vypnutí obvodu, musí deionizační procesy převážit nad ionizačními. Mezi způsoby, jak toho dosáhnout patří snižování napětí zdroje, zapojení předřadného odporu nebo zvětšování odporu oblouku. V praxi použitelný je pouze princip zvětšování odporu oblouku vlivem jeho chlazení, zvětšování délky a pohybu. Se zvětšování odporu se obloukové napětí zvyšuje, oblouk se dostává do labilního stavu, kde rekombinace částic převládá a proud klesá k nule [13].



Obr. 4.1 Stejnoseměrný obvod s obloukem [13]

Stejnoseměrný obvod na obrázku lze podle 2. Kirchhoffova zákona charakterizovat následující rovnicí:

$$u_G = Ri + L \frac{di}{dt} + u_a \text{ [V]}. \quad (1)$$

Matematické vyjádření obloukového napětí pro malé proudy formulovala Ayrtonová jako závislost napětí na délce oblouku a materiálových konstantách. Úpravou rovnice dostaneme její pozměněný tvar

$$u_a = \alpha + \beta l + \frac{\gamma + \delta l}{I} = u_e + El \text{ [V]}, \quad (2)$$

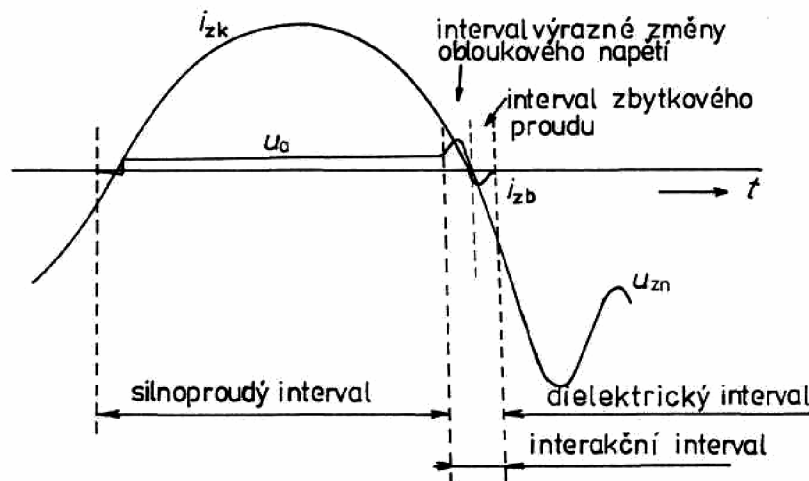
kde l je délka oblouku [m], I proud obvodem [A], $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ konstanty materiálu elektrod a prostředí, ve kterém oblouk hoří, u_e celkový úbytek na obou elektrodách a těle oblouku [V] a E gradient chlazení oblouku [Vm^{-1}].

Z upravené rovnice jsou patrné principiální způsoby zhasení oblouku. Zvětšení napěťových úbytků lze dosáhnout rozčleněním oblouku na několik úseků. Intenzita chlazení je zvýšena dotykem oblouku s chladnými izolačními stěnami. Prodlužováním délky oblouku je také zvyšováno obloukové napětí [14]. Tyto principy se využívají při konstrukcích stejnosměrných vypínačů s magnetickým vyfukováním oblouku do zhasací komory. Jednou z kategorií stejnosměrných vypínačů jsou rychlovypínače s omezovací schopností, které jsou charakteristické rychlým oddalováním kontaktů ještě před špičkou proudu a rychlým nárůstem odporu oblouku [13].

4.2 Střídavý oblouk

Ve střídavém obvodu jsou napětí a proud periodickými funkcemi času, a tak dochází k periodickému zapalování a uhasinání oblouku. Na začátku půlperiody stoupá napětí mezi kontakty s napětím zdroje až do okamžiku zapalovací špičky. V tu chvíli se zapálí oblouk a mezikontaktní napětí klesá. Proud se mění s růstem napětí zdroje až do konce půlperiody, kdy se objeví zhasací špička nepřímo úměrná rychlosti poklesu proudu a dosahující svého maxima v blízkosti průchodu proudu nulou. Během zapalování

oblouku musí být napětí mezi kontakty dostatečně velké, aby dodávaný výkon pokryl nejen tepelné ztráty výboje, ale také došlo k dostatečné ionizaci a zapálení oblouku. Při poklesu proudu jsou poměry opačné, jelikož ve výbojové dráze je větší počet ionizovaných částic schopných účastnit se vedení proudu. Velikost zhášecí špičky je úměrná intenzitě zhášení oblouku a u vypínačů s cizí zhášecí energií může docházet k usekávání proudu a tím ke značným zhášecím přepětím [13].



Obr. 4.2 Oscilogram vypínání střídavého proudu se znázorněním intervalů [13]

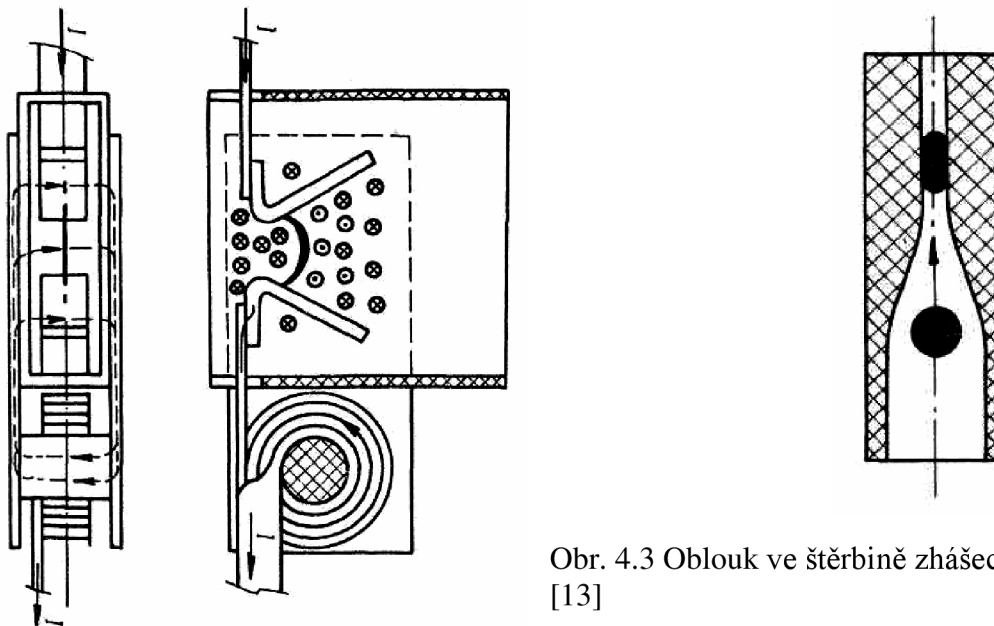
Zhášecí principy platné pro stejnosměrné vypínače jako je magnetické vyfukování lze použít i při vypínání střídavého proudu. Střídavé vypínače lze ale konstruovat i s jinými zhášedly díky samovolnému periodickému průchodu proudu nulou a tím příznivějším podmínkám pro zhášení oblouku. Mezi nejrozšířenější vypínače na střídavý proud patří tlakovzdušné, SF₆ plynové, vakuové, mezi staršími exempláři se ještě vyskytují máloolejové. Druh zhášedla je vybírán podle napěťové hladiny, vypínaného proudu a zamýšlené kompaktnosti a ceny vypínače.

4.3 Konstrukce magnetických vypínačů

Magnetické vypínače využívají ke zhášení vlastní energii oblouku a prostředí, proto jsou zařazovány mezi vypínače s vlastní zhášecí energií. Nevýhodou těchto vypínačů je ale výskyt kritických proudů, při kterých vypínaný obvod nemusí disponovat dostatečnou energií pro zhášení oblouku. Značná délka oblouku a intenzivní chlazení také způsobují nejvyšší obloukové napětí ze všech typů vypínačů. Vypínání probíhá přirozeným způsobem radiální výměnou částic a pro střídavé obvody není magnetický vypínač tak výkonný jako jiné typy [13].

Základem principu, který těmto vypínačům dal jméno, je interakce oblouku a vnějšího magnetického pole působícího v mezikontaktní dráze. Vnější pole je generováno zhášecí cívku nebo permanentními magnety. Cívka je navinuta na jádře obklopujícím kontakty pólovými nástavci. Vektor magnetického pole zhášecí cívky

vstupuje do mezikontaktního prostoru kolmo na směr proudu. Smysl vinutí cívky je orientován tak, aby interakcí s vlastním magnetickým polem oblouku docházelo k zeslabování výsledného pole v prostoru nad obloukem, tedy směrem ke zhášecí komoře. Takto vzniká elektrodynamická síla pohybující obloukem do zhášecí komory. Kontakty jsou protaženy v rozevírající se opalovací růžky, po kterých se oblouk pohybuje až do okamžiku přeskočení oblouku na vodící elektrody. Ty odvádějí oblouk do zhášecí komory tvořené u stejnosměrných vypínačů izolačním roštem nebo výkonnější izolační štěrbinovou komorou.



Obr. 4.3 Oblouk ve štěrbině zhášecí komory [13]

Obr. 4.4 Vyfukovací soustava magnetického vypínače [13]

Izolační štěrbinová komora je schopna zhášení stejnosměrných i střídavých proudů díky intenzivnímu chlazení oblouku ve štěrbině. Chladné izolační stěny odvádí teplo oblouku, čímž zvyšují jeho odpor a obloukové napětí. Štěrba se směrem nahoru zužuje a deformuje tělo oblouku, což přispívá k lepšímu chlazení a rekombinaci částic.

Po uhasnutí oblouku je vysoké riziko znovuzapálení oblouku vlivem vysokého přepětí v obvodu (obzvláště ve stejnosměrném) a zbytkové vodivosti okolního vzduchu nasyceného ionizovanými částicemi. Z toho důvodu jsou větší zhášecí komory shora opatřeny tlumiči zabraňujícími zapalování oblouku nad přístrojem. Mezikontaktní prostor je také vystaven riziku znovuzapálení, což je nutné řešit odvodem plynů mimo výbojovou dráhu. Konstruktivní řešení spočívá např. v sestrojení malého vzduchového pístu s tryskou. Při vypínání pohybuje mechanismus pístem stlačujícím vzduch, který je tryskou uvolňován do mezikontaktního prostoru. Ionizované částice jsou odvedeny proudem vzduchu. Dalším řešením jsou ventilační kanály ve štěrbinách zhášecí komory. Prudká expanze plynů žene ionizované částice skrz kanály směrem ven z komory, aby nemohly zpětně expandovat do mezikontaktního prostoru [13].

5. PROJEKT VN STYKAČE PRO TRAKCI

Tato kapitola pojednává o metodice návrhu VN stykače pro použití v trakci. Postupy zde popsané vycházejí z drážních norem a poznatků získaných při výuce předmětu *Stavba a výroba elektrických přístrojů* vyučovaném na FEKT.

5.1 Základní informace

Projektování VN stykače pro trakci začíná shromážděním základních informací o umístění, typu provozu a jmenovitých hodnotách napětí a proudu stykače.

Základním parametrem je charakter spínaného proudu – střídavý nebo stejnosměrný. Stykače používané v trakci v drtivé většině případů pracují na stejnosměrné napěťové hladině, ať už přímo v troleje, z usměrňovače nebo střídače. Ryze střídavé VN stykače jsou používány v obvodech u trakčního transformátoru k přepínání odboček. Zhášení střídavého oblouku je však snazší díky periodickému průchodu proudu nulou, kde jsou podmínky pro zhášení nejpříznivější. Kvůli tomu jen návrh zhášedla stejnosměrného stykače, kde k tomuto jevu nedochází, náročnější. V praxi se stykače VN konstruují i pro dvojitý provoz se stejnosměrným i střídavým proudem (přepojovače, linkové stykače, ...), kde limitujícím faktorem je opět schopnost zhášecí komory vypínat stejnosměrný oblouk.

Hlavním elektrickým parametrem je jmenovité napětí přístroje U_n . K této hodnotě se pak vztahují další dílčí napětí, podle kterých je dimenzována izolace, vzdušné vzdálenosti, povrchové cesty. Jedná se také o třídící hodnotu při volbě stykače do obvodu trakční výzbroje. V současné době používané VN stykače v železničních hnacích vozidlech mají jmenovité napětí nejčastěji 1500 V nebo 3000 V. Vyrábějí se však i s napětími 1200 V, 750 V, 600 V i nižší pro vozidla městské dráhy.

Proudové zatížení určované hodnotou jmenovitého pracovního proudu I_r určuje přenášený výkon. K této hodnotě se vztahují zkušební proudy, dimenzování proudovodné dráhy a zhášedla.

Mezi další základní parametry patří provozní četnost zohledňující náročnost provozu stykače. Podle toho je pak stykač podroben stanovenému počtu spínacích cyklů při zkouškách. Návrh izolace se odvíjí od zařazení stykače do kategorie přepětí v obvodu a stupně znečištění.

5.2 Napětí, izolace

Po určení jmenovitého napětí přístroje lze přistoupit k určení ostatních napětí charakterizujících VN stykač. Mezi ně patří:

- **jmenovité pracovní napětí** – U_r

- hodnota napětí, k níž se vztahují příslušné zkoušky a kategorie užití
- pro zařízení napájené z trakčního vedení se jedná o nejvyšší trvalé napětí trakčního vedení podle Tabulky 1 z normy ČSN EN 50163 (místo nezavedené IEC 60850)
- pro zařízení napájené z trakčního transformátoru je rovno efektivní hodnotě napětí na svorkách vinutí, pokud je transformátor napájen jmenovitým pracovním napětím

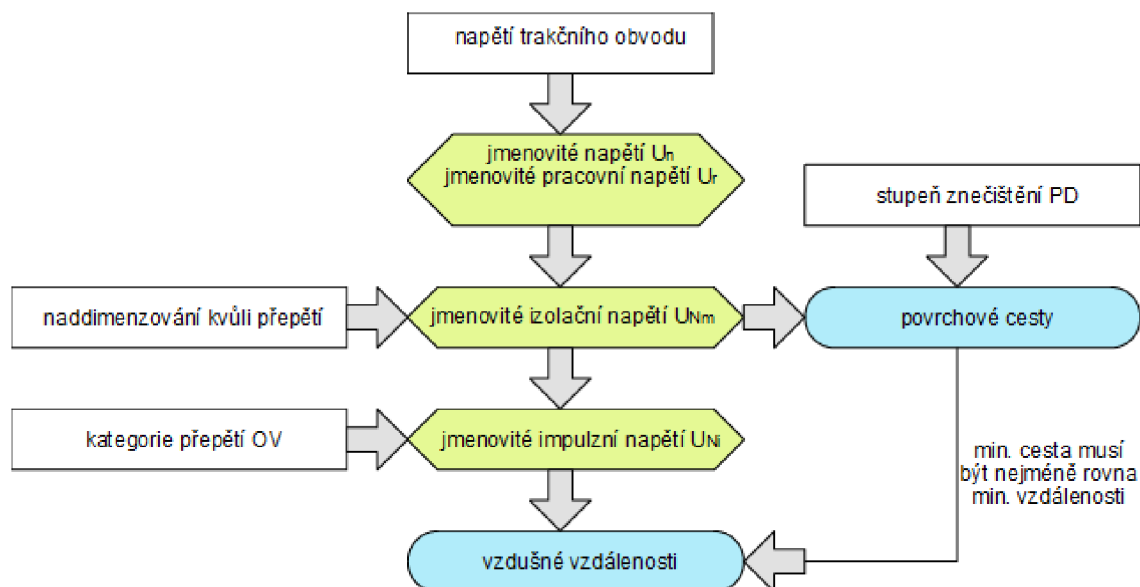
- **jmenovité izolační napětí** – U_{Nm}

- hodnota výdržného napětí charakterizující trvalou odolnost izolace
- je vyšší nebo rovno pracovnímu napětí
- výrobcem může být stanoveno na vyšší hodnotu, pokud se uvažuje přepětí (např. Schaltbau ve svých katalozích uvádí 4800 V místo 3600 V z tabulky v normě [11])

- **jmenovité impulzní napětí** – U_{Ni}

- hodnota impulzního napětí charakterizující odolnost izolace proti přechodným dějům
- určuje se pomocí dvou metod podle toho, jestli je přepětí řízené nebo neřízené
- výsledná hodnota je odečtena z tabulky v normě ČSN EN 50124-1

Po stanovení uvedených hodnot napětí je možno přistoupit k návrhu izolace. V normě ČSN EN 50124-1 je k tomu účelu sestaven názorný postup, kde po určení izolačního napětí následuje volba typu izolace z hlediska bezpečnosti. Vyhodnocuje se nebezpečí úrazu elektrickým proudem a je navržena pracovní, základní, přídatná, zesílená nebo dvojitá izolace. Z určené kategorie přepětí a stupně znečištění je následně zvoleno impulzní napětí, minimální vzdušné vzdálenosti a povrchové cesty. V případě, že se přístroj bude provozovat v nadmořské výšce vyšší než 2000 m.n.m., jsou vzdušné vzdálenosti zvětšeny korekčním činitelem. Při určování minimálních povrchových cest platí, že cesta musí být minimálně rovna vzdušné vzdálenosti dané tabulkou v normě.



Obr. 5.1 Zjednodušené schéma postupu určení VN izolačních vzdáleností

5.3 Proud, síly, oteplení

Norma ČSN EN 60077-2 dále definuje hodnoty proudů:

- **jmenovitý pracovní proud** – I_r
 - proud stanovený výrobcem s ohledem na jmenovité pracovní napětí a kmitočet
 - s proudem se uvádí časová konstanta, popř. účinník v pracovních podmínkách
- **krátkodobý výdržný proud** – I_{cw}
 - proud, který přístroj vydrží v sepnuté poloze bez poškození po stanovenou dobu za předepsaných podmínek užití a funkce
- **smluvený tepelný proud s krytem** – I_{the}
 - maximální hodnota zkušební proud, která má být použita pro zkoušky oteplení
 - norma ještě rozlišuje tepelný proud bez krytu I_{th}
 - jeho hodnota je větší nebo rovna hodnotě jmenovitého pracovního proudu

Uvedené hodnoty proudu stanovuje výrobce dle uvážení a požadavků uživatele. Používá je při dimenzování proudovodné dráhy přístroje a výpočtu oteplení. Určením proudové hustoty lze vypočítat potřebný průřez proudovodné dráhy a vybrat vhodný rozměr z nabídky vyráběných pasovin.

5.3.1 Kontakty

Konstrukce kontaktního systému je důležitou částí stykače ovlivňující především jeho životnost a oteplení. Hlavním parametrem kontaktního spojení je přechodový odpor generující tepelné ztráty při průchodu proudu. Jak je vysvětleno v [13] a [15],

přechodový odpor je tvořen úžinovým odporem a odporem cizích vrstev, které ale nelze spolehlivě určit, proto se používá empirický vztah

$$R_s = \frac{k}{F^n} [\Omega], \quad (3)$$

kde je R_s stykový odpor [Ω], k činitel povrchu materiálu kontaktů [ΩN], F přitlačná síla [N] a n činitel druhu kontaktního styku [-].

Neznámou veličinou je zde přitlačná síla, kterou získáme ze vztahu uvedeného výše při znalosti mezního stykového odporu na mezi svaření nebo měknutí (menší z nich), který lze opět vypočítat z definovaných proudů a materiálových konstant uvedených v [13]. Mechanismus kontaktů se odvíjí od druhu kontaktního styku, který může být čelní, třecí, valivý, bodový, přímkový nebo plošný.

5.3.2 Elektrodynamické síly

V dalším kroku je nutné ověřit odolnost proudovodné dráhy proti silovým účinkům nadproudů. Základním parametrem pro jejich určení je stanovení krátkodobého výdržného proudu I_{cw} , jenž určuje výrobce buďto z řady proudů podle ČSN EN 60059 nebo zvolí specifické hodnoty vzhledem k použití a vlastnostem zařízení. Důležitějším parametrem však je nárazový výdržný proud i_p udávající maximální hodnotu proudu v počátku zkratu. Jeho určení závisí na charakteru vypínaného proudu. Střídavý nárazový zkratový proud lze popsat vztahem

$$i_p = \kappa\sqrt{2}I_{cw} [A], \quad (4)$$

kde je κ součinitel nárazového zkratového proudu [-] a I_{cw} krátkodobý výdržný proud [A].

Činitel κ je veličina závislá na poměrech reaktancí a rezistivit v obvodu. V nejnejpříznivějším případě dosahuje nárazový zkratový proud až 2,54násobku I_{cw} . Hodnota I_{cw} byla přímo dosazena za efektivní hodnotu počátečního rázového zkratového proudu I_k . Při navrhování stykačů na DC i AC proud je dostačující dimenzovat proudovodnou dráhu na účinky střídavého proudu. Tomuto předpokladu přidává skutečnost, že střídavý proud vyvolává tepavé elektrodynamické síly proměnného průběhu, které střídavě namáhají mechanické součásti.

Zhodnocení elektrodynamických sil sestává z výpočtu sil v jednotlivých úsecích proudovodné dráhy (záhyby, rovnoběžné úseky, Holmova síla v kontaktním styku, ...) a porovnání s přitlačnou silou mechanismu. Vztahy potřebné pro výpočet lze dohledat v literatuře [13], [15], [16].

5.3.3 Oteplení

VN stykač pro trakci musí být dimenzován tak, aby při oteplovací zkoušce smluveným tepelným proudem I_{th} nebyly překročeny hodnoty oteplení jeho částí stanovené normou ČSN EN 60077-1 ed.2 a ČSN EN 60077-2 ed.2. Ve fázi návrhu lze empirickými vztahy

vypočítat oteplení jednotlivých částí pomocí tepelného schématu nebo komplexní simulací využívající metodu konečných prvků MKP.

Při výpočtu oteplení z tepelného schématu je přístroj rozdělen na jednotlivé mechanické části jako jsou přívodní kabely, svorky, přívodní pas k můstku, kontakt, můstek. Tyto části poté tvoří tepelné zdroje a tepelné odpory, které spoluvytváří náhradní tepelné schéma přístroje. Každý tepelný zdroj a odpor je třeba pak spočítat pomocí dílčích výpočtů, při známých parametrech jako je proud, rezistivita, zhuštění proudnic, skinefekt, rozměry, plocha, materiálové konstanty, termodynamické konstanty a další. Po sestavení náhradního tepelného schématu je vhodné schéma přenést do výpočetního programu pro simulaci elektrických obvodů a vytvořit elektrické schéma, kde jsou tepelné zdroje a odpory nahrazeny elektrickými. Získané napěťové potenciály reprezentují hodnoty oteplení v daných částech přístroje. Ty jsou poté porovnány s hodnotami mezního oteplení z normy. Pokud některá z hodnot nevyhoví, nebo má malou rezervu, je nutné přístroj předimenzovat, rozšířit, přidat chladičí povrchy nebo změnit materiály.

Ve specifikaci výrobku musí být uvedena třída okolní teploty, při které bude přístroj pracovat. Norma ČSN EN 60077-1 ed.2 stanovuje celkem 7 tříd okolního vzduchu (různé části Evropy, tropické oblasti, extrémní). Pokud není výrobcem zařízení stanoveno jinak, používá se teplotní třída T1 pro střední Evropu. Třídy okolní teploty definují rozsahy teplot vzduchu vně vozidla, uvnitř přístrojové skříně a teplotu uvnitř krytu. Dílčím parametrem teplotní třídy je maximální teplota okolního vzduchu (T_a). Pro třídu teploty vzduchu T1 to je 40 °C vně vozidla, 50 °C uvnitř přístrojové skříně a 70 °C uvnitř krytu. Tabulka z normy ČSN EN 60077-2 ed. 2 uvádí max. hodnoty oteplení částí přístroje pro obě maximální teploty. Tím se drážní norma odlišuje od průmyslové ČSN EN 60947-1 ed.4, kde jsou mezní hodnoty oteplení uvedeny pouze pro teplotu okolního vzduchu nepřesahující 40°C. Referenční teplota (T_r) představuje trvalou teplotu, při níž jsou účinky na stárnutí materiálu ekvivalentní účinkům provozní teploty v průběhu životnosti zařízení. Je obvykle vyšší než aritmetický průměr provozních teplot za čas životnosti. Může se použít při výpočtech životnosti materiálů a spolehlivosti [18]. Používají se dvě hodnoty: 25 °C pro vnější umístění a 55 °C pro vnitřní umístění, které korespondují s teplotami vzduchu 40 °C resp. 70 °C.

5.4 Zhášedlo

Nejnáročnější částí návrhu VN stykače je konstrukce zhášedla. Jelikož je většina takových přístrojů stavěna na stejnosměrný proud, je nutné tomu přizpůsobit zhášedlo. Vypínání stejnosměrného proudu je náročným procesem, jelikož proud nikdy neprochází nulou a vlivem indukčnosti obvodu dochází k přepětím. Používaným způsobem zhášení je magnetické vyfukování oblouku do zhášecí komory, jenž lze jako jeden z mála použít pro vypínání stejnosměrných i střídavých proudů.

Principem magnetického vyfukování je pohyb oblouku, prodlužování a jeho odvod do zhášecí komory, kde je v případě kovové komory rozdělen na více úseků a intenzivně chlazen stěnami komory u štěrbinové. K tomu slouží geometrické tvarování proudovodné dráhy, zhášecí cívky, pólové nástavce, popř. permanentní magnety vytvářející vnější magnetické pole, vodící elektrody a další. Konstruktor volí rozměry zhášecí komory, počet žeber, jejich druh (kovové, izolační) a tvarování. Vzhledem k obtížně uchopitelné fyzikální disciplíně, jakou je zhášení oblouku, jsou k dispozici pouze empirické vztahy a návrh zhášedla je pak náročnou vývojovou a experimentální prací. V literatuře lze dohledat vztah pro výpočet potřebné zhášecí délky oblouku odvozený z rovnice Herthy Ayrtonové (rovnice 2.88 v [14]):

$$l_{zh} \geq \frac{U - L \frac{di}{dt} - Ri - u_e}{E} [m] \quad (5)$$

kde je U napětí zdroje [V], L indukčnost obvodu [H], R odpor obvodu [Ω], i proud obvodem [A], u_e napěťové úbytky na elektrodách [V] a E gradient oblouku (intenzita chlazení) [Vm^{-1}].

Vypínání stejnosměrného oblouku s sebou nese nepříznivý jev těsně před uhasnutím oblouku. Tehdy je pokles proudu nejrychlejší a vzniká vysoké přepětí dosahující i vyšších hodnot, než je napětí zdroje, což je v trakci nežádoucí. Dle ČSN EN 60077-2 ed.2 nesmí vrcholová oblouková napětí překročit jmenovité impulzní napětí zařízení U_{Ni} ani 3násobek jmenovitého izolačního napětí U_{Nm} .

Tento nedostatek se řeší úpravou zhášecí komory tak, aby v konečné fázi vypínání oblouku blízko nuly proudu byla intenzita zhášení menší, čímž je přepětí omezeno. Tím je o něco prodloužena doba hoření oblouku, což má však negativní dopady kvůli tepelným účinkům na materiál kontaktů [14]. Vzniká tak protichůdný požadavek na intenzitu zhášení oblouku při vypínání stejnosměrného proudu a vyžaduje značné úsilí při vývoji.

5.5 Mechanismus

Úkolem mechanismu stykače je uvádět do pohybu hlavní kontaktní ústrojí a oddalovat kontakty od sebe nebo je přibližovat. Musí tak činit s dostatečnou rychlostí, a odolností vůči mechanickým rázům vyskytujícím se v drážních vozidlech. Zdrojem energie pro uvedení mechanismu může být elektrický obvod elektromagnetu nebo tlak vzduchu na píst. Pneumatické stykače se dnes vyrábějí zřídka a jsou zastoupeny hlavně ve starších vozidlech. Většina nových stykačů je konstruovaná s elektromagnetickým pohonem mechanismu, kde elektromagnet při zapínání uvádí do pohybu kontaktní můstek nebo páku s pohyblivým kontaktem, přičemž překonává odpor vypínacích a kontaktních pružin. Některé stykače jako jsou přepínače a kombinační stykače mohou v sobě obsahovat spínací (NO) i rozpínací (NC) kontakty, což je třeba zohlednit při uspořádání pružin a kotvy elektromagnetu.

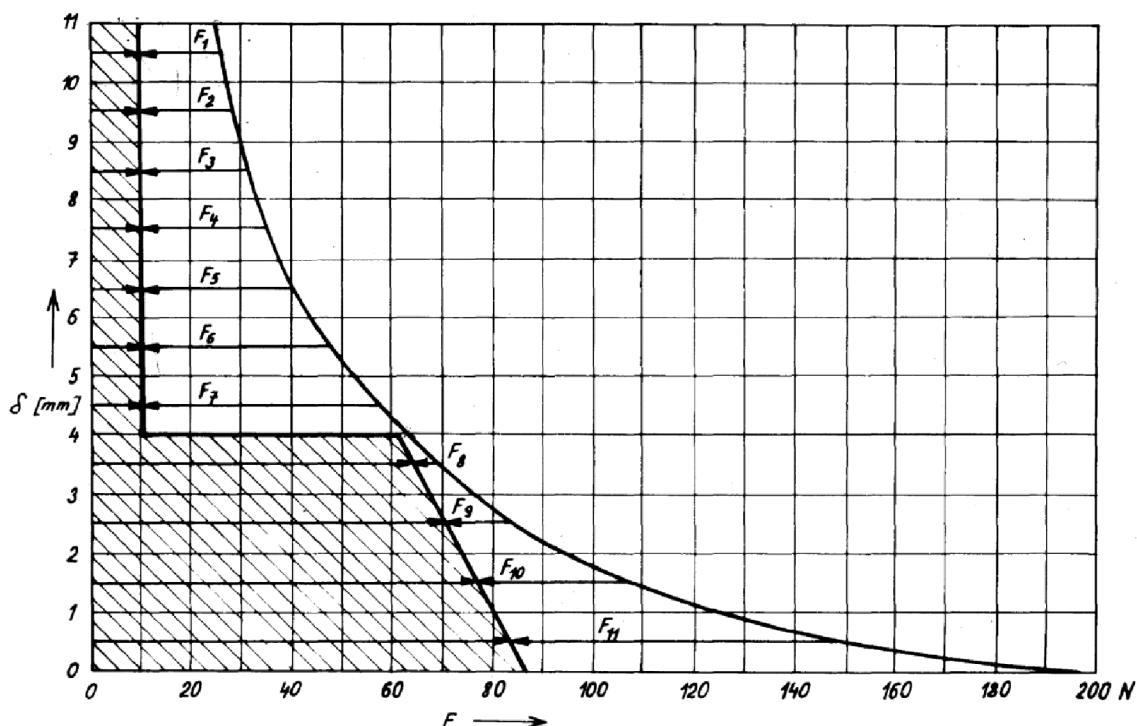
Požadavky normy ČSN EN 60077-1 ed.2 na ovládací obvody se týkají především rozsahů napětí pro řídicí obvody a mezní hodnoty tlaku vzduchu pro pneumatické ovládací obvody. Norma definuje pro elektrické řídicí obvody tři kategorie podle zdroje napájení – baterie s udržovacím nabíjením, baterie bez nabíjení a jiný zdroj jako dynamo, alternátor nebo měnič. Každá kategorie je charakterizována minimálním, jmenovitým pracovním a maximálním napětím pro řídicí obvod každého zařízení používaného v trakci. Jmenovité hodnoty stejnosměrných ovládacích obvodů jsou uvedeny řadou 24 V, 72 V a 110 V, na základě dohody mezi výrobcem zařízení a uživatelem však mohou být použita další napětí, např. 36 V a 48 V. Cívky elektromagnetů musejí vyhovět požadavkům na oteplení, nesmí u nich dojít k odchýlení funkce při krátkodobém kolísání napětí, nesmí dojít k poškození při přepětí a jejich funkci nesmí ovlivnit zvlnění napájecího napětí.

Nejdříve je zvolen typ mechanismu – můstkový, pákový, roubíkový nebo jiný. Vstupním parametrem při návrhu elektromagnetu je přítlačná síla kontaktů spolu s bezpečnostním koeficientem a minimální vzdušnou vzdáleností. Konstruktor navrhne kontaktní pružiny udržující dostatečný přítlak v zapnutém stavu a vypínací pružiny určené k rozepnutí obvodu při vypnutí. Následně je navrhován elektromagnet skládající se z jádra, kotvy, kostry pro vinutí a samotného vinutí.

5.5.1 Elektromagnet

Posuzování vhodného řešení elektromagnetu se děje prostřednictvím srovnání jeho statické tahové charakteristiky se součtovým diagramem kontaktních a vypínacích pružin. Sepnutím řídicího obvodu je vytvářena přítažná síla pro překonání vypínací pružiny držící můstek ve vypnuté poloze. Během dotyku kontaktů je výhodné, aby přebytek tahové síly odečtením kontaktní síly pružiny od tahové síly elektromagnetu byl co nejmenší příp. nulový. Překonávání větší odporové síly během dosedávání kontaktů snižuje rázy v přístroji a prodlužuje životnost [18].

Na obrázku níže je ilustrován přebytek tahové síly na příkladu z literatury. Celkový zdvih elektromagnetu je 11 mm a pracovní zdvih kontaktní pružiny je 4 mm. To znamená, že kotva elektromagnetu urazí vzdálenost 7 mm, než se kontakty můstku a pevného pasu dotknou. Pak elektromagnet malou silou stlačuje kontaktní pružinu, tím zvyšuje kontaktní přítlak a snižuje stykový odpor. Po úplném přitažení kotvy působí na můstek přítlačná síla kolem 86,5 N a kotva elektromagnetu je k jádru přitahována silou $200 - 86,5 = 113,5$ N.

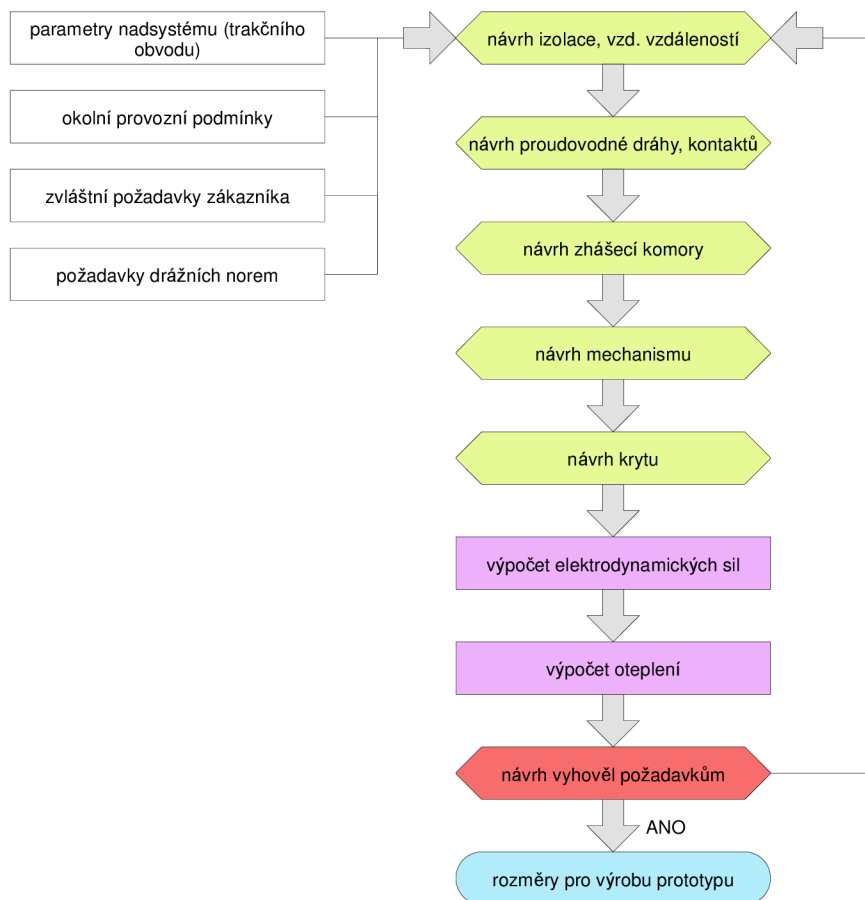


Obr. 5.2 Tahový přebytek elektromagnetu [18]

V literatuře [18], [19] jsou k dispozici analytické i empirické vztahy pro návrh elektromagnetu střídavého i stejnosměrného. V této práci byly využity možnosti numerické simulace, jelikož lze ověřit statickou tahovou charakteristiku pro geometricky různorodé magnetické obvody.

5.6 Kryt

Části přístroje je třeba uložit do izolačního krytu, který je nosnou částí stykače. Obklopuje proudovodnou dráhu, elektromagnet, zhášecí komoru a z jeho vnější části vystupují svorky hlavního a ovládacího obvodu. Kryt slouží také jako ochrana obsluhy před úrazem elektrickým proudem, proto musí jeho neživé kovové části (třeba litinová základna) obsahovat svorku pro připojení ochranného vodiče a musí být dostatečně izolovány od samotných živých částí. Navrhovaný kryt se skládá z přepážek, drážek, stěn a děr, které navrhuje konstruktér v souladu s požadavky norem na minimální vzdušné vzdálenosti a povrchové cesty. Materiály jsou vybírány s ohledem na jejich teplotní třídu a porovnávací index odolnosti proti plazivým proudům (CTI). V dnešní době se při výběru plastů i dalších materiálů klade stále větší důraz na ekologičnost daného materiálu. Je také požadována recyklovatelnost materiálů po skončení technické doby života zařízení.



Obr. 5.3 Zjednodušené vývojové kroky při návrhu stykače

Vývoj nového přístroje je obecně iterační proces s několika přepočty a změnami konstrukce. Nemalé prostředky vynaložené ve fázi vývoje na odstranění potenciálních problémů se však pozitivně promítnou v menším počtu zkoušek, které jsou časově i ekonomicky nákladné a menších nákladech na změny konstrukce po vyrobení prototypu. Nový přístroj před svým uvedením na trh projde zpravidla několika cykly „vývoj-zkratovna“. Po úspěšně dokončené fázi technického vývoje přichází ekonomická optimalizace nákladů a složitosti výroby, která si opět může vynutit konstrukční změny přístroje, což si vyžádá opětovné výpočty a zkoušky na zkratovně. Míra snižování výrobních nákladů používáním levnějších materiálů se odvíjí od kvantity vyrobených kusů. Menší přístroje pro rezidenční aplikace vyráběné v milionových sériích je vhodné co nejvíce zlevnit, zato u větších přístrojů na vysoké a vyšší napětí s kusovou výrobou je rozhodující životnost a spolehlivost. Do druhé skupiny se řadí i zařízení pro drážní vozidla. Technická doba života vozidel se pohybuje v řádu desítek let a modernizací je možné jejich životnost i prodloužit.

6. NÁVRH STYKAČE

V následujícím oddíle se práce věnuje návrhu konkrétního stykače pro použití v trakci. Navrhovaným přístrojem je stykač na stejnosměrný proud pro spínání brzdných rezistorů EDB. Z důvodu zjednodušení návrhu je uvažován jednopólový přístroj, i když skutečný stykač by byl pravděpodobně ve dvoupólovém provedení. Vstupní parametry jsou voleny dle inspirace po prostudování katalogových údajů drážních stykačů firmy Schaltbau.

Přístroj bude zapojen v trakčním obvodu vícesystémové elektrické lokomotivy určené pro těžkou nákladní a rychlíkovou vozbu. Hnací vozidlo bude provozováno v Evropě na hlavních tratích a koridorech s nadmořskou výškou nepřesahující 2000 m.n.m. v oblastech střední a západní Evropy. Stykač se umístí do vysokonapěťové kobky trakční výzbroje chlazenou proudem vzduchu z ventilátoru. Jmenovité napětí palubní sítě je 24 VDC napájené ze systému baterie s udržovacím nabíjením.

Jmenovité napětí trakčního obvodu je 3000 V. Spínaná zátěž je odporová, velmi mírně induktivní a stykač je navrhován na smluvený tepelný proud 400 A. Hodnota krátkodobého výdržného proudu je s ohledem na zkratové poměry požadována 5 kA.

Tab. 6.1 Vstupní parametry konkrétního VN stykače

jmenovité napětí U_n	3000 V
smluvený tepelný proud s krytem I_{the}	400 A
krátkodobý výdržný proud I_{cw}	5 kA
provozní četnost dle ČSN EN 60077-2	C3 (silná provozní četnost)
kategorie součástek dle ČSN EN 60077-2	A2 (spínací přístroje pro trakční obvod)
kategorie přepětí dle ČSN EN 50124-1	OV3 (rozvodné soustavy)
stupeň znečištění dle ČSN EN 50124-1	PD3 (strojovna, filtrovaná ventilace)
třída teploty vzduchu dle ČSN EN 60077-1	T1 (střední Evropa)
nadmořská výška do 2000 m.n.m.	není třeba korekce vzdušných vzdáleností dle ČSN EN 50124-1
kategorie zdroje napájení řídicích obvodů dle ČSN EN 60077-1	VC1 (baterie s udržovacím nabíjením)

6.1 Zhášení oblouku

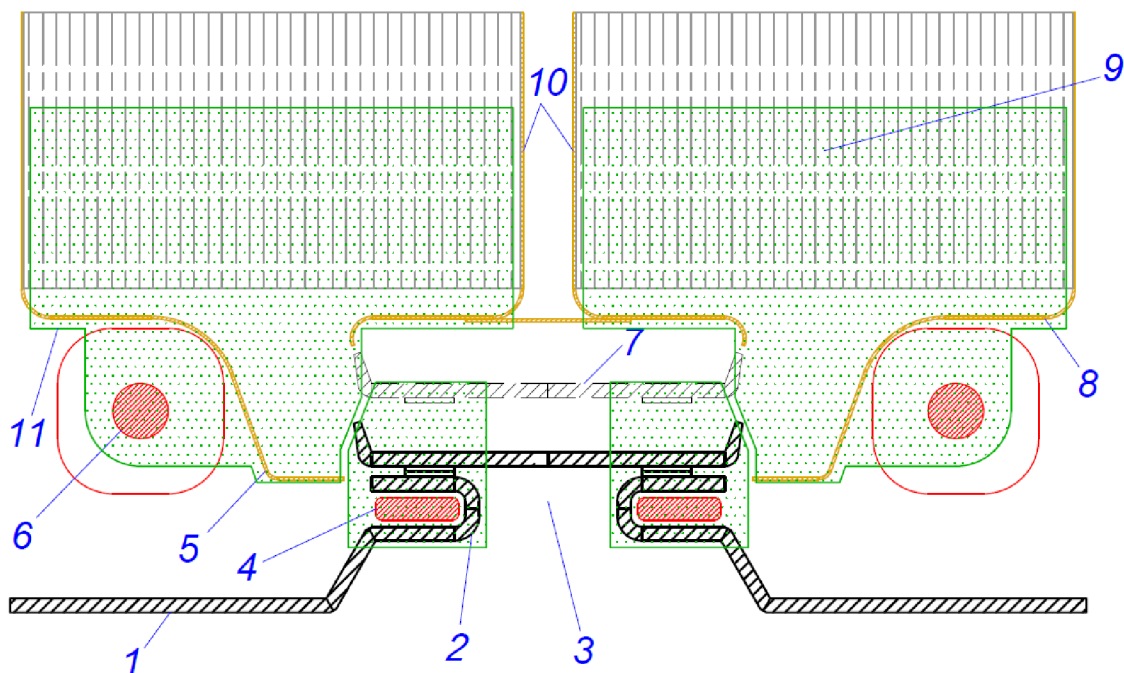
Celkovou konstrukci přístroje bezesporu zásadně ovlivňuje princip zhášení oblouku. Konkrétní VN stykač pro použití v trakci, který je popisován v této práci by měl obsahovat zhášecí komoru uzpůsobenou ke zhášení stejnosměrných oblouků. Prostředky, jak toho dosáhnout jsou uvedeny v literatuře [13], [16], kde je uvedeno několik možných principů. Stykač bude využívat principu magnetického vyfukování oblouku do zhášecí komory. Samotná zhášecí komora však k úspěšnému zhasnutí

oblouku nestačí a je potřeba dílčích úprav a dodatečných součástí. Prostředky, jak toho dosáhnout, tedy jsou:

- tvarování proudovodné dráhy
- opalovací růžky
- zhášecí cívky s pólovými nástavci
- roštová izolační komora

Na základě teoretického základu magnetického zhášení a studia reálných přístrojů [11] byl navržen koncept konstrukce na obrázku Obr. 6.1. Proudovodná dráha je tvarována do U záhybů (2) pro vytvoření magnetického pole pohybujícího s obloukem při vypínání. Uvnitř záhybů jsou zasazena feromagnetická jádra (4) napojená na pólové nástavce z magneticky měkké oceli. Magnetické pole mezi nástavci působí kolmo na nákresnu při jakémkoli směru proudu. Pro vzájemně opačné směry proudu stykačem jsou totiž i orientace magnetických polí opačné a výsledná magnetická síla působí na oblouk vždy ve stejném směru, totiž ven do zhášecí komory (9) mimo mezikontaktní prostor (3). Oblouk následně přeskakuje z přívodní proudovodné dráhy (1) na vnější vodící elektrodu (5). V sérii s ní je zapojena zhášecí cívka (6) s magnetickým jádrem a pólovými nástavci (11). Vzniklé magnetické pole urychluje pohyb oblouku a pohybuje s ním do zhášecí komory. V této chvíli se oblouk dotýká vodící elektrody a kontaktního můstku (7), který je mechanismem nadzvednut do vypnuté polohy znázorněné přerušovanou čarou. V magnetickém poli je oblouk dále přesouván až přeskočí na vnitřní vodící elektrodu (10). Vodící elektrody pak uvádějí oblouk do zhášecí komory, kde je oblouk natahován do značné délky a intenzivně chlazen chladnými stěnami do chvíle, než kompletně uhasne. Podobný proces bude probíhat u oblouku vzniklého na druhém páru kontaktů. Ke konci vypínacího procesu již budou oba oblouky vedeny vodícími elektrodami ve zhášecích komorách v magnetickém poli mezi pólovými nástavci zhášecích cívek.

Materiálem proudovodné dráhy bude elektrotechnická měď Cu 99,9 E postříbřená. Vodící elektrody budou zhotoveny z měděného plechu tloušťky 1 mm bez povrchové úpravy. Zhášecí komory budou izolační roštové z tepelně odolného materiálu, ideálním materiálem je keramika kvůli větší mechanické pevnosti než teflon nebo sklo.



Obr. 6.1 Prvotní koncept kontaktního ústrojí se zhašecími komorami

6.2 Napětí a izolace

Postup pro určení hodnot napětí je shodný s Obr. 5.1. Jmenovité napětí přístroje je 3000 V, čemuž odpovídá jmenovité pracovní napětí 3600 V, v souladu s nejvyšším trvalým napětím trakčního obvodu (podle ČSN EN 50163 ed.2). Jmenovité izolační napětí je stanoveno na 4800 V, vzhledem k možnému přepětí v obvodu. Jmenovité impulzní napětí je určeno podle Metody 1 uvedené v ČSN EN 50124-1, která v souladu s kategorií OV3 a hodnotou izolačního napětí U_{Nm} uvádí v Tabulce A.2 hodnotu jmenovitého impulzního napětí 25 kV. Tabulka A.3 ve výše uvedené normě pak stanovuje minimální vzdušnou vzdálenost při uvedeném impulzním napětí a znečištění PD3 na 33 mm (při navrhování konstrukce bude naddimenzováno na 40 mm). Jako izolační materiál bude zvolen plast, který je řazen do materiálové skupiny II, tedy s indexem CTI v intervalu hodnot (400;600). Minimální povrchové cesty pro tyto parametry uvádí norma 14 mm/kV, čemuž při izolačním napětí 4800 V odpovídá 67,2 mm.

Tab. 6.2 Určené parametry pro návrh izolace

jmenovité pracovní napětí U_r	3600 V
jmenovité izolační napětí U_{Nm}	4800 V
jmenovité impulzní napětí U_{Ni}	25 kV
minimální vzdušná vzdálenost	33 mm
minimální povrchová cesta	67,2 mm
izolační materiál	termoplast mat. skupiny II

6.3 Proudovodná dráha

Průřez proudovodné dráhy je volen s ohledem na proudovou hustotu, která je volena v rozmezí 2-4 A.mm⁻²:

$$S_{min} = \frac{I_{th}}{\sigma_{max}} = \frac{400}{4} = 100 \text{ mm}^2, \quad (6)$$

$$S_{max} = \frac{I_{th}}{\sigma_{min}} = \frac{400}{2} = 200 \text{ mm}^2. \quad (7)$$

V katalogu plochých vodičů byla vybrána měděná pasovina 30x5 mm, jež dává průřez 150 mm² a proudovou hustotu 3 A.mm⁻². Konfigurace stykače je navržena jako můstkový typ se dvěma kontaktními styky.

6.3.1 Kontakty

Jako materiál kontaktů je zvolen kompozit AgSnO₂ 88/12 s parametry uvedenými níže [20]. Je uvažován čelní plošný styk v kontaktu s více korodovaným povrchem.

Tab. 6.3 Parametry kontaktního materiálu

napětí na mezi měknutí: U_{SM}	0,09 V
napětí na mezi svaření: U_{SV}	0,37 V
činitel změny měrného odporu úžiny: C_k	1,16 [-]
tvrdost materiálu: H	400 MPa
materiálová konstanta pro Ag-Ag: k	$6 \cdot 10^{-4} \Omega\text{N}$
součinitel druhu styku pro čelní plošný: n	1 [-]

Stykové odpory na mezi měknutí a svaření se vypočítají podle vztahů

$$R_{SM} = \frac{U_{SM}}{2 \cdot I_{the}} = \frac{0,09}{400} = 0,1125 \text{ m}\Omega, \quad (8)$$

$$R_{SS} = \frac{U_{SV}}{C_k \cdot I_{cw}} = \frac{0,37}{1,16 \cdot 5000} = 0,064 \text{ m}\Omega. \quad (9)$$

Odpor na mezi svaření je menší a je tedy použit pro výpočet přitlačné síly v kontaktu

$$F_{Pmin} \geq \left(\frac{k}{R_{SS}} \right)^{\frac{1}{n}} = \left(\frac{6 \cdot 10^{-4}}{64 \cdot 10^{-6}} \right)^{\frac{1}{1}} = 9,38 \text{ N}. \quad (10)$$

6.4 Elektrodynamické síly – analytický výpočet

Výpočet elektrodynamických sil v této kapitole je soustředěn na síly v kontaktních úžinách a geometrických změnách směru proudu – rovnoběžné úseky, L-záhyby, U-záhyby. Pro detailnější výpočet všech elektrodynamických sil lze ještě uvažovat menší síly působící při změně průřezu proudovodné dráhy, vlivem blízkosti

feromagnetického materiálu, při změně indukčnosti obvodu nebo lze započítat i opravné činitele respektující vliv rezonance k_r , rozložení proudu ve vodiči k_p a délky a vzájemného uspořádání vodičů k_d , ale tyto korekce nebudou v práci uvažovány [13].

6.4.1 Síla v kontaktní úžině

Kontaktní styk tvoří kvádr kompozitu AgSnO_2 s rozměry 18x26x2 mm. Náhradní průměr kulové úžiny stanovíme jako geometrický střed rozměrů A, B

$$D_i = \sqrt{AB} = \sqrt{18 \cdot 26} = 21,63 \text{ mm}. \quad (11)$$

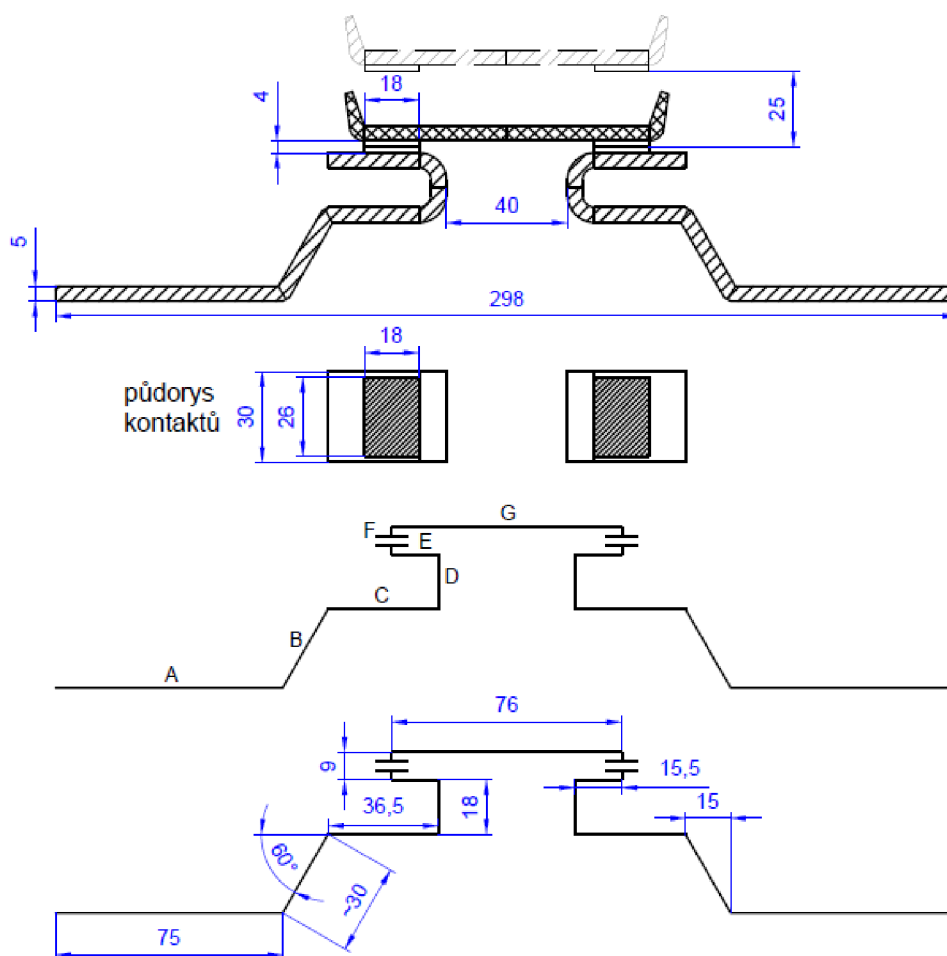
Průměr idealizované kruhové dotykové plošky d_u pro AgSnO_2 je

$$d_u = \sqrt{\frac{4 \cdot F_{Pmin}}{\pi \cdot H}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 9,38}{\pi \cdot 4 \cdot 10^8}} = 0,173 \text{ mm} \quad (12)$$

a odpudivá síla ve dvou úžinách F_u pak bude

$$F_u = -2 \cdot 10^{-7} I_{cw}^2 \ln \frac{D_i}{d_u} = 10^{-7} 5000^2 \ln \frac{21,63}{0,173} = -24,149 \text{ N}. \quad (13)$$

6.4.2 Síly v záhybech kontaktního můstku



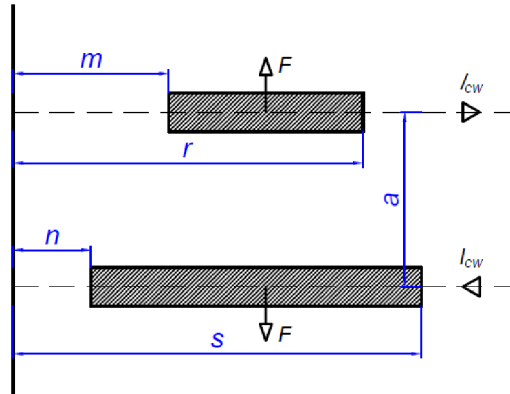
Obr. 6.2 Geometrické rozměry navrhovaného kontaktního ústrojí

Přitažlivá síla F_{MA} mezi můstkem a dlouhým přívodním pasem je podle [15] pro hodnoty $r = 187$ mm, $m = 111$ mm, $s = 75$ mm, $n = 0$ mm, $a = 44$ mm

$$F_{MA} = 2 \cdot 10^{-7} I_{cw}^2 \left[\sqrt{\left(\frac{r-n}{a}\right)^2 + 1} - \sqrt{\left(\frac{s-r}{a}\right)^2 + 1} - \sqrt{\left(\frac{m-n}{a}\right)^2 + 1} + \sqrt{\left(\frac{s-m}{a}\right)^2 + 1} \right] = 2 \cdot 10^{-7} \cdot 5000^2 \left[\sqrt{\left(\frac{187}{44}\right)^2 + 1} - \sqrt{\left(\frac{75-187}{44}\right)^2 + 1} - \sqrt{\left(\frac{111}{44}\right)^2 + 1} + \sqrt{\left(\frac{75-111}{44}\right)^2 + 1} \right] = 1,048 \text{ N.} \quad (14)$$

Odpudivá síla F_{MB} mezi můstkem a zalomeným přívodem pod úhlem $\alpha = 60^\circ$, je podle [16], viz Obr. 6.4 Rozměry pro výpočet sil od zalomených vodičů a nespojitých úseků pro $h = 61,199$ mm, $m = 31,199$ mm, $l = 81,4$ mm, $n = 5,4$ mm roven

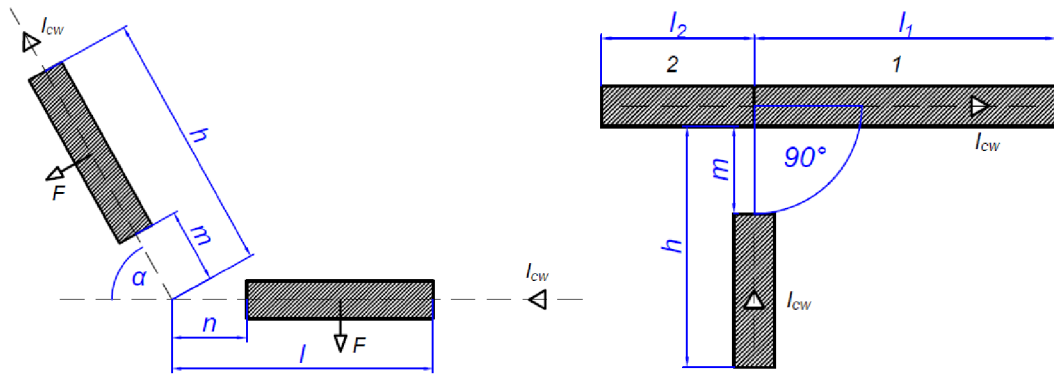
$$F_{MB} = -2 \cdot 10^{-7} \frac{I_{cw}^2}{\sin \alpha} \left[\ln \left(\frac{\sqrt{n^2+h^2+2nh \cdot \cos \alpha} + n \cdot \cos \alpha + h}{\sqrt{l^2+h^2+2lh \cdot \cos \alpha} + l \cdot \cos \alpha + h} \cdot \frac{\sqrt{l^2+m^2+2lm \cdot \cos \alpha} + l \cdot \cos \alpha + m}{\sqrt{n^2+m^2+2nm \cdot \cos \alpha} + n \cdot \cos \alpha + m} \right) - \cos \alpha \cdot \ln \left(\frac{\sqrt{n^2+h^2+2nh \cdot \cos \alpha} + h \cdot \cos \alpha + n}{\sqrt{l^2+h^2+2lh \cdot \cos \alpha} + h \cdot \cos \alpha + l} \cdot \frac{\sqrt{l^2+m^2+2lm \cdot \cos \alpha} + m \cdot \cos \alpha + l}{\sqrt{n^2+m^2+2nm \cdot \cos \alpha} + m \cdot \cos \alpha + n} \right) \right] = -0,8826 \text{ N.} \quad (15)$$



Obr. 6.3 Rozměry pro rovnoběžné úseky [16]

Přitažlivá síla F_{MC} mezi můstkem a krátkým přívodním pasem je pro $r = 97$ mm, $m = 21$ mm, $n = 0$ mm, $s = 36,5$ mm, $a = 27$ mm

$$F_{MC} = 2 \cdot 10^{-7} I_{cw}^2 \left[\sqrt{\left(\frac{r-n}{a}\right)^2 + 1} - \sqrt{\left(\frac{s-r}{a}\right)^2 + 1} - \sqrt{\left(\frac{m-n}{a}\right)^2 + 1} + \sqrt{\left(\frac{s-m}{a}\right)^2 + 1} \right] = 2 \cdot 10^{-7} \cdot 5000^2 \left[\sqrt{\left(\frac{97}{27}\right)^2 + 1} - \sqrt{\left(\frac{36,5-97}{27}\right)^2 + 1} - \sqrt{\left(\frac{21}{27}\right)^2 + 1} + \sqrt{\left(\frac{36,5-21}{27}\right)^2 + 1} \right] = 5,808 \text{ N.} \quad (16)$$



Obr. 6.4 Rozměry pro výpočet sil od zalomených vodičů a nespojitých úseků [16]

Odpudivou sílu F_{MD} nespojitých kolmých úseků lze vypočítat za použití vztahu uvedeného výše pro výpočet síly F_{MB} zjednodušeného při uvažování úhlu $\alpha = 90^\circ$, $n = 0$ mm. Úsek 1 vytváří sílu F_{MD1} odpudivou proti kontaktní pružině pro $h = 27$ mm, $m = 9$ mm, $l = 60,5$ mm

$$F_{MD1} = -10^{-7} I_{cw}^2 \ln \left(\frac{h}{m} \cdot \frac{\sqrt{l^2 + m^2} + m}{\sqrt{l^2 + h^2} + h} \right) = -10^{-7} \cdot 5000^2 \ln \left(\frac{27}{9} \cdot \frac{\sqrt{60,5^2 + 9^2} + 9}{\sqrt{60,5^2 + 27^2} + 27} \right) = -2,035 \text{ N.} \quad (17)$$

Naproti tomu v úseku 2 přitažlivá síla F_{MD2} zvětšuje kontaktní přitlak pro $h = 27$ mm, $m = 9$ mm, $l = 15,5$ mm

$$F_{MD2} = +10^{-7} I_{cw}^2 \ln \left(\frac{h}{m} \cdot \frac{\sqrt{l^2 + m^2} + m}{\sqrt{l^2 + h^2} + h} \right) = +10^{-7} \cdot 5000^2 \ln \left(\frac{27}{9} \cdot \frac{\sqrt{15,5^2 + 9^2} + 9}{\sqrt{15,5^2 + 27^2} + 27} \right) = 0,822 \text{ N.} \quad (18)$$

Celková síla působící na obou stranách můstku je

$$F_{MD} = 2(F_{MD1} + F_{MD2}) = 2(-2,035 + 0,822) = -2,426 \text{ N.} \quad (19)$$

Odpudivá síla F_{ME} mezi můstkem a krátkým rovnoběžným úsekem je pro $r = 76$ mm, $m = n = 0$ mm, $s = 15,5$ mm, $a = 9$ mm

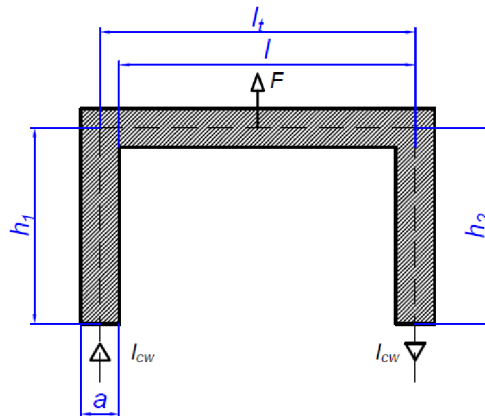
$$F_{ME} = -2 \cdot 10^{-7} I_{cw}^2 \left[\sqrt{\left(\frac{r-n}{a}\right)^2 + 1} - \sqrt{\left(\frac{s-r}{a}\right)^2 + 1} - \sqrt{\left(\frac{m-n}{a}\right)^2 + 1} + \sqrt{\left(\frac{s-m}{a}\right)^2 + 1} \right] = -2 \cdot 10^{-7} \cdot 5000^2 \left[\sqrt{\left(\frac{76}{9}\right)^2 + 1} - \sqrt{\left(\frac{15,5-76}{9}\right)^2 + 1} + \sqrt{\left(\frac{15,5}{9}\right)^2 + 1} \right] = -13,494 \text{ N.} \quad (20)$$

Odpudivá síla F_{MF} pravouhlého U záhybu mezi můstkem a přilehlými kolnými úseky je vypočítána pro $a' = 18$ mm, $h_1 = h_2 = h = 9$ mm, $l_1 = 76$ mm. Jelikož je kontaktní úžina menší než rozměr kontaktu, je šířka zmenšena odhadnutým činitelem zmenšení 0,7.

$$a = a' \cdot 0,7 = 18 \cdot 0,7 = 12,6 \text{ mm}$$

$$l = l_t - \frac{a}{2} = 76 - \frac{12,6}{2} = 69,7 \text{ mm}$$

$$F_U = -2 \cdot 10^{-7} I_{cw}^2 \ln \left(\frac{2l}{a} \cdot \frac{h + \sqrt{h^2 + \left(\frac{a}{l}\right)^2}}{h + \sqrt{h^2 + l^2}} \right) = -2 \cdot 10^{-7} \cdot 5000^2 \ln \left(\frac{2 \cdot 69,7}{12,6} \cdot \frac{9 + \sqrt{9^2 + \left(\frac{12,6}{69,7}\right)^2}}{9 + \sqrt{9^2 + 69,7^2}} \right) = -4,606 \text{ N.} \quad (21)$$



Obr. 6.5 Rozměry pro U-záhyb [16]

Součet elektrodynamických sil pak je:

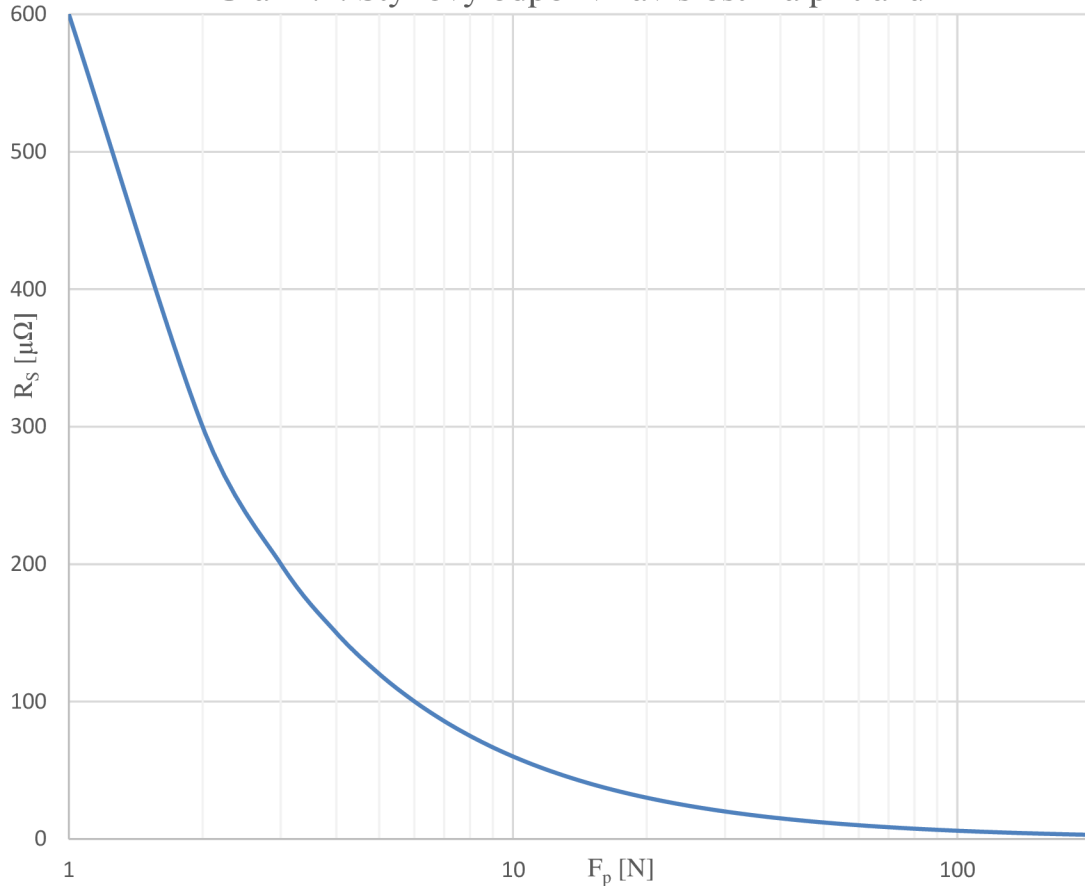
odpudivá síla v kontaktních úžinách	$F_u = -24,149 \text{ N}$
přitažlivá síla mezi můstkem a dlouhým přívodním pasem	$F_{MA} = 1,048 \text{ N}$
odpudivá síla mezi můstkem a zalomeným přívodem	$F_{MB} = -0,883 \text{ N}$
přitažlivá síla mezi můstkem a krátkým přívodním pasem	$F_{MC} = 5,808 \text{ N}$
odpudivá síla nespojitých kolmých úseků	$F_{MD} = -2,426 \text{ N}$
odpudivá síla mezi můstkem a krátkým rovnoběžným úsekem	$F_{ME} = -13,494 \text{ N}$
odpudivá síla pravoúhlého U záhybu mezi můstkem a přilehlými kolmými úseky	$F_{MF} = -4,606 \text{ N}$
<hr/>	
výsledná elektrodynamická síla působící proti kontaktní pružině	$F_E = -38,702 \text{ N}$

Celkový potřebný kontaktní přitlak od kontaktní pružiny pak při uvažování koeficientu bezpečnosti k v rozmezí (1,5 – 3) lze vypočítat jako [18]

$$F_K = k \cdot 2F_{pmin} + |F_E| = 3 \cdot 2 \cdot 9,38 + 38,702 = 94,982 \doteq 95 \text{ N.} \quad (22)$$

K určení přitlaku může také napomoci průběh velikosti stykového odporu v závislosti na kontaktním přitlaku v jednom kontaktu. Funkční závislost má předpis jako vztah (3). Pro $k = 6 \cdot 10^{-4} \Omega N$ a $n = 1$ je průběh znázorněn v grafu níže.

Graf 6.1. Stykový odpor v závislosti na přitlaku



Obr. 6.6 Závislost stykového odporu na přitlaku

Velikost odporu prudce klesá s rostoucí silou od 1 N, avšak při přitlaku větším než 100 N je pokles zanedbatelný. Navrhovanou kontaktní přitlačnou sílu je vhodné volit v tomto okolí, spíše k nižším hodnotám kvůli žádanému menšímu mechanickému namáhání mechanismu. Přítlak na jeden kontakt byl tedy zvolen 80 N, přičemž celkový přítlak pružiny na dva hlavní kontakty je **160 N**, který s rezervou převyšuje odpudivou elektrodynamickou sílu sečtenou s minimální přitlačnou silou $2F_{Pmin}$.

6.5 Elektrodynamické síly – numerická simulace

V prostředí ANSYS Maxwell byla provedena numerická simulace působení elektrodynamických sil pro porovnání s analytickým výpočtem. Předpokládá se, že vlivem zaoblení proudovodné dráhy bude hodnota síly ze simulace o něco menší, jelikož uvedený analytický výpočet uvažuje dráhu pouze v pravoúhlé geometrii a neuvažuje reálnou šířku pasoviny a nerovnoměrné rozložení magnetického pole.

Jedná se o magnetostatickou úlohu, kde průchodem stacionárního stejnosměrného proudu vznikají magnetická pole působící na vodiče s proudem. Simulaci síly v kontaktní úžině je obtížné realizovat, kvůli nepředvídatelnému charakteru tohoto jevu. Proto budou provedeny dva typy simulací: případ s dokonalým dotykem kontaktů, kde se uvažují pouze síly od vodičů a velikost síly v úžině se dopočítá empiricky a případ s uměle vytvořenou geometrickou úžinou tvaru kruhové plošky, která má ekvivalentní elektrický odpor jako vypočítaná úžina, jelikož chceme totožné Jouleovy ztráty aplikované následně při výpočtu oteplení.

Když vypočítáme stykový odpor jednoho hlavního kontaktu ze vztahu (3):

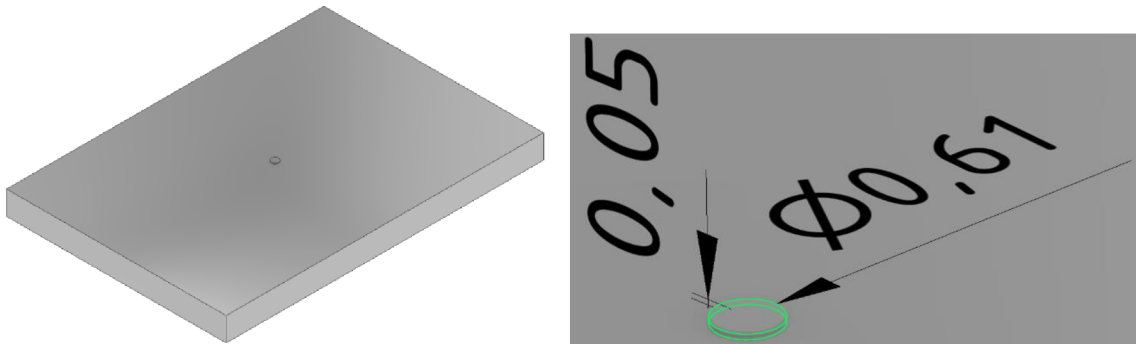
$$R_{s1} = \frac{k}{F_1^n} = \frac{6 \cdot 10^{-4}}{80^1} 7,5 \mu\Omega, \quad (23)$$

pak při stanovení délky celé náhradní geometrické úžiny (odhadem) $l_{un} = 0,1$ mm je plocha kruhové plochy náhradního styku s měrnou vodivostí kompozitu AgSnO_2 γ_{kont} z tabulky Tab. 6.4 Fyzikální vlastnosti materiálů v projektu:

$$S_{un1} = \frac{l_{un}}{\gamma_{kont} \cdot R_{s1}} = \frac{0,1 \cdot 10^{-3}}{45 \cdot 10^6 \cdot 7,5 \cdot 10^{-6}} = 0,296 \text{ mm}^2. \quad (24)$$

Tomu odpovídá průměr kruhové plošky útvaru:

$$d_{un1} = \sqrt{\frac{4S_{un1}}{\pi}} = 0,61 \text{ mm}. \quad (25)$$



Obr. 6.7 Geometrie jedné kontaktní destičky (vlevo) a detail jedné náhradní úžiny (vpravo)

Pro svorku bylo postupováno podobně – úžina se stejným elektrickým odporem. Síly v úžině svorky sice nemají vliv na můstek a nebudou počítány, ale během simulace oteplení bude úžina potřeba k vytvoření tepelných zdrojů. Uvažuje se jednožilový kabel připojený do šroubové nebo třmenové svorky, která je připevněna k přívodnímu pasu šroubem M10. Takto by sice musely být vyčísleny dva stykové odpory, ale odpor mezi kabelem a svorkou je zanedbán. Vypočítat stykový odpor lze z přítláčné síly a tu lze spočítat jako [18]:

$$F_p' = \frac{\pi d_f^2}{4} \cdot \sigma_d \text{ [N]}, \quad (26)$$

kde d_j je minimální průměr jádra šroubu podle ČSN ISO 261 v toleranci 6g a σ_d je dovolené namáhání. Dosazením průměru jádra pro M10 7,938 mm a dovoleném namáhání 30 MPa dostaneme:

$$F'_{p2} = \frac{\pi \cdot (7,938 \cdot 10^{-3})^2}{4} \cdot 30 \cdot 10^6 = 1484,7 \text{ N}. \quad (27)$$

Vlivem teploty, stárí a otláčení materiálu dojde ke snížení přitlačné síly, jejíž míru odhadneme na 0,3násobek původní síly:

$$F_{p2} = 0,3 \cdot F'_{p2} = 445,4 \text{ N}. \quad (28)$$

Stykový odpor pak je (odhadem $k = 8 \cdot 10^{-4} \Omega\text{N}$ pro styk stříbro – ocel a $n = 1$)

$$R_{s2} = \frac{k}{F_{p2}^n} = \frac{8 \cdot 10^{-4}}{445,4^1} = 1,8 \mu\Omega, \quad (29)$$

tomu odpovídá průřez úžiny válcového tvaru délky 0,1 mm

$$S_{un2} = \frac{l_{un}}{\gamma_{Cu} \cdot R_{s2}} = \frac{0,1 \cdot 10^{-3}}{58 \cdot 10^6 \cdot 1,8 \cdot 10^{-6}} = 0,958 \text{ mm}^2. \quad (30)$$

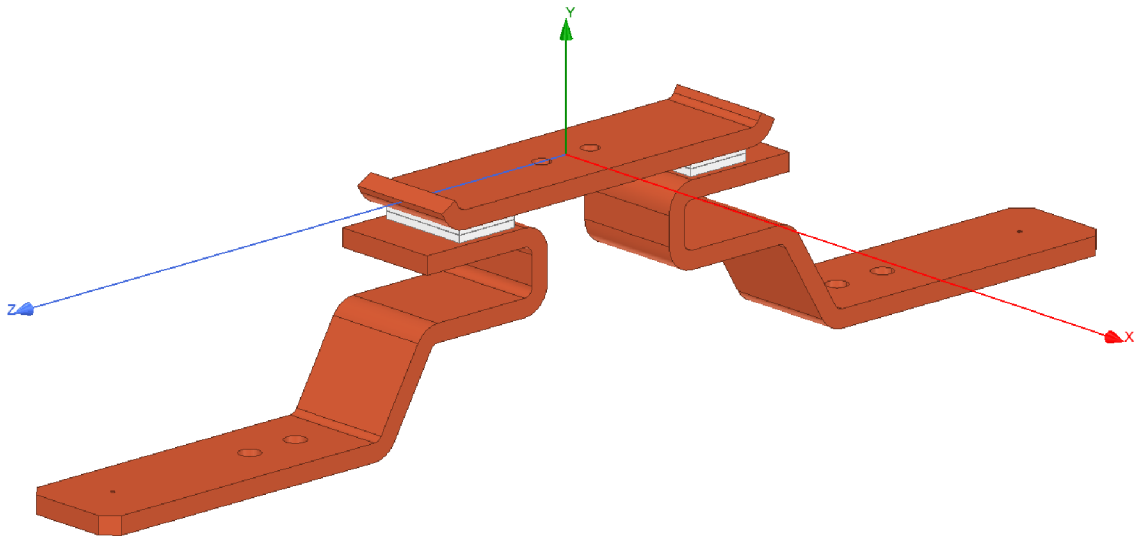
a průměr úžiny

$$d_{un2} = \sqrt{\frac{4S_{un2}}{\pi}} = 1,1 \text{ mm}. \quad (31)$$

Ve druhém případě je tedy Holmova síla již zahrnuta do simulace, avšak se značným zjednodušením, které neodpovídá fyzikálnímu principu – ve skutečnosti je totiž úžin mnohem více a jsou rozesety na celém průřezu kontaktů. Výsledky obou případů pak budou porovnány mezi sebou a s výsledkem analytického výpočtu.

6.5.1 Geometrie modelu simulace elektrodynamických sil

Elektrodynamické síly vznikají především od proudovodné dráhy protékané krátkodobým výdržným proudem, avšak vliv na její velikost mohou mít i feromagnetika kolem. Tento vliv je však považován za velmi malý a není uvažován, proto se geometrie modelu omezí na měděnou proudovodnou dráhu s kontakty a bez přívodních kabelů. Model je sice symetrický podle roviny XY i YZ, avšak zjednodušení modelu rozdělením není možné, jelikož požadujeme, aby vektor výsledné elektrodynamické měl nejvyšší složku v kladné ose Y (viz). V tomto směru síla působí odpuzování můstku. Při zjednodušení modelu symetrickým rozdělením podle uvedených rovin má výsledná síla jiný směr, protože ve výpočtu nejsou zahrnuty silové příspěvky od druhých polovin.



Obr. 6.8 Model proudovodné dráhy pro výpočet elektrodynamických sil

6.5.2 Fyzikální vlastnosti materiálů

Hlavní kontakty tvoří obdélníkové destičky tloušťky 2 mm kompozitního materiálu AgSnO_2 88/12. Tento materiál se hojně využívá v elektrických přístrojích s častým spínáním. Díky obsahu stříbra má vyšší mez měknutí a svaření, stejně jako menší sklon k tvorbě cizích vrstev [18]. Naproti kompozitům s niklem nebo kadmíem má vyšší tvrdost a elektrickou vodivost [21]. Obsah 88 % stříbra a 12 % SnO_2 vytváří vyšší tvrdost než kompozity s vyšším obsahem stříbra [22].

Konstrukční části krytů stykače jsou z polyftalamidového termoplastu PPA GF33 ztuženého 33 % skelnými vlákny. Materiál je spolehlivý do maximální dlouhodobé pracovní teploty 165 °C, krátkodobě 280 °C a je teplotně i rozměrově stabilní. Index odolnosti proti plazivým proudům CTI je 550 [23]. Kostra vinutí je zhotovena z polyamidu TECAMID 66 GF30 s 30 % skelnými vlákny. Mezní dlouhodobá teplota tohoto plastu je 110 °C, krátkodobá je 180 °C.

Mezi feromagnetické komponenty patří jádro a kotva elektromagnetu a pólové nástavce. Byla uvažována ocel Steel 1008 z knihovny materiálů ANSYS. Zjednodušené svorky přístroje jsou z niklu. Ochranná keramika na vnitřních stěnách přístroje obklopuje mezikontaktní prostor a odděluje konstrukční části od vysokoteplotního plazmatu elektrického oblouku. Materiálem je silikátová destička ze slinutého kordieritu C410 s max. provozní teplotou do 1200 °C.

Tab. 6.4 Fyzikální vlastnosti materiálů v projektu

materiál	název v knihovně ANSYS	měrná elektrická vodivost γ [S.m.mm ⁻²]	součinitel tepelné vodivosti λ [W.K ⁻¹ .m ⁻¹]
měď	copper	58	400
kontakty	AgSnO ₂ 88/12	45	300
polyftalamid	PPA GF33	izolant	0,34
polyamid	TECAMID GF30	izolant	0,3
ocel	steel 1008	2	45
svorky	nickel	14,5	90
keramika	kordierit C410	izolant	4

6.5.3 Výsledky simulace sil

Tab. 6.5 Výsledky výpočtu elektrodynamických sil

	F _y [N]		F _y [N]
numericky s úžinou	26,537	analyticky s úžinou	38,702
numericky bez úžiny	6,3838	analyticky bez úžiny	14,553
numericky síla v úžinách	20,1532	analyticky síla v úžinách	24,149

Z těchto výsledků je vidět, že velikost numericky spočtené odpudivé síly v úžinách jsou přibližně 20,15 N, což je hodnota poměrně blízká empiricky vypočítané síle v úžině 24,149 N. Změnou geometrie nebo počtu úžin by bylo možné dosáhnout ještě lepších výsledků, avšak ty by bylo nutné srovnat s reálně naměřenou silou na skutečném vzorku. Zde však tato přesnost postačuje a náhradní kontaktní úžinu lze ponechat v navržené podobě pro výpočet oteplení.

Dále je vidět, že celková hodnota síly i s proudovou úžinou 26,537 N je podstatně menší než teoretická hodnota 38,702 N. Pokud bychom porovnávali pouze elektrodynamické síly bez síly v úžině, bude hodnota ze simulace 6,3838 N a teoretická hodnota síly bude 14,553 N, což je rozdíl o více než dvojnásobek. Tato výrazná odchylka je pravděpodobně způsobena nepřesností teoretického výpočtu, ve kterém se neuvažují zaoblení a proudovodná dráha je popisována v rovině namísto 3D modelu.

6.6 Mechanismus

Nyní je třeba navrhnout vypínací a kontaktní pružiny a elektromagnet. Vztahy pro výpočet byly přejaty z [18].

6.6.1 Kontaktní pružina

Pružina vytvářející požadovaný kontaktní přitlak je krátká a tuhá, jelikož potřebujeme velkou sílu působící na krátkém zdvihu přibližně kopírující průběh přitažné síly elektromagnetu. Zvolený pracovní zdvih je $y = 5$ mm, což je dráha, o kterou se kotva elektromagnetu ještě propadne po dosednutí kontaktů. Tím je kompenzován úbytek materiálu na elektrodách a vytvoření dostatečného přitlaku.

Jak bylo navrženo po výpočtu elektrodynamických sil, kontaktní přitlak je $F_k = 160$ N. Pro výpočet tuhosti pružiny z pracovního diagramu přímou úměrou si zvolíme sílu

$$F_x = 0,7 \cdot F_k = 0,7 \cdot 160 = 112,3 \text{ N}, \quad (32)$$

kde koeficient 0,7 zohledňuje míru požadované tuhosti. Čím větší koeficient, tím měkčí, ale delší pružina. Dodatečný (zde pouze fiktivní) zdvih x lze určit z přímé úměry:

$$\frac{x+y}{x} = \frac{F_k}{F_x}, \quad (33)$$

jejíž úpravou získáme:

$$x = \frac{y \cdot F_x}{F_k - F_x} = 11,76 \text{ mm}. \quad (34)$$

Stlačení pružiny ve stavu plně zatíženém:

$$y_0 = y + x = 5 + 11,76 = 16,76 \text{ mm}. \quad (35)$$

Dále zvolíme poměr $A = 9,8$ pro výpočet Wahlova korekčního činitele [20]:

$$A = 9,8 = \frac{D_s}{d}, \quad (36)$$

kde D_s je střední průměr pružiny a d je průměr drátu. Wahlův činitel φ pak je roven:

$$\varphi = \frac{A-0,25}{A-1} + \frac{0,615}{A} = 1,148. \quad (37)$$

Mez pevnosti v tahu je určena z tabulek 3-1 a 3-2 v [18]. Prvotní odhad průměru drátu bude 3,55 mm, tedy z tabulky pro $d = 3,55$ mm je dovolené namáhání materiálu ve smyku:

$$\tau_D = \frac{\sigma_{pt}}{1,6\mu} = \frac{1900}{1,6 \cdot 3} = 395,8 \text{ MPa}, \quad (38)$$

kde σ_{pt} je pevnost materiálu v tahu [MPa] a μ je koeficient bezpečnosti. Potřebný průměr drátu pružiny pak je:

$$d' = \sqrt{\frac{8 \cdot F_k \cdot A \cdot \varphi}{\pi \cdot \tau_D}} = \sqrt{\frac{8 \cdot 160 \cdot 9,8 \cdot 1,148}{\pi \cdot 395,83 \cdot 10^6}} = 3,4 \text{ mm.} \quad (39)$$

Vidíme, že vypočítaný průměr drátu je velice blízký odhadnutému. Z normalizovaných průměrů uvedených v normě ČSN 42 6450 byla tedy ponechána hodnota průměru drátu $d = 3,55 \text{ mm}$. Stanovíme střední průměr pružiny:

$$D_s = A \cdot d = 34,8 \text{ mm.} \quad (40)$$

Je třeba ověřit namáhání ve smyku pro daný průměr:

$$\tau'_D = \frac{8 \cdot F_k \cdot A \cdot \varphi}{\pi \cdot d^2} = 363,7 \text{ MPa.} \quad (41)$$

Pokud by nastalo $\tau'_D > \tau_D$ bylo by nutné výpočet zopakovat s vhodnějšími parametry. Počet činných závitů kontaktní pružiny je:

$$n = \frac{y_9 \cdot G \cdot d^4}{8 \cdot F_k \cdot D_s^3} = \frac{16,76 \cdot 10^{-3} \cdot 8,2 \cdot 10^{10} \cdot (3,55 \cdot 10^{-3})^4}{8 \cdot 160 \cdot (34,8 \cdot 10^{-3})^3} = 4,05, \quad (42)$$

kde $G = 8,2 \cdot 10^4 \text{ MPa}$ je modul pružnosti ve smyku. Zaokrouhlený počet závitů bude $n' = 4$ závity. K nim jsou připočítány 2 závěrné závity, tedy celkem bude mít pružina

$$z = n' + n_z = 6 \text{ závitů.} \quad (43)$$

Vlivem výrobních nerovností drátu je nutné zvětšit dosedovou délku oproti teoretické o 5 %. Stlačená délka pružiny pak bude:

$$L_9 = 1,05^2 \cdot z \cdot d = 23,5 \text{ mm.} \quad (44)$$

Délka volné pružiny je:

$$L_0 = L_9 + y_9 = 24 + 16,76 = 40,76 \text{ mm} \quad (45)$$

a stoupání závitů pružiny:

$$s = \frac{L_0 - n_z \cdot d}{n'} = 8,3 \text{ mm.} \quad (46)$$

Předepjatá délka pružiny (délka po zamontování a předpružení) je

$$L_m = L_9 + y_1 = 23,5 + 5 = 28,5 \text{ mm.} \quad (47)$$

6.6.2 Vypínací pružiny

V kapitole 6.2 byla navržena minimální vzdušná vzdálenost 40 mm. Pro dvě vzduchové mezery v můstkovém provedení stykače tedy vyplývá vzdálenost rozepnutých kontaktů $x_1 = 20 \text{ mm}$. Spolu s pracovním zdvihem kontaktní pružiny je tedy zdvih vypínací pružiny roven:

$$y_1 = x_1 + y = 20 + 5 = 25 \text{ mm.} \quad (48)$$

Kontaktní systém tvořený kotvou elektromagnetu, nosnou konstrukcí a můstkem s kontaktní pružinou má hmotnost $m = 0,75$ kg. Ta byla zjištěna po několika iteracích odladování konstrukce s návrhem elektromagnetu. Z toho vyplývá odpudivá síla s koeficientem bezpečnosti 2:

$$F_x = k_B \cdot m \cdot g = 2 \cdot 0,75 \cdot 9,81 = 14,7 \text{ N.} \quad (49)$$

Chceme, aby vypínací pružina měla měkkou charakteristiku vzhledem k tahové charakteristice elektromagnetu. Sílu obou pružin ve stavu při zapnutém stykači tedy volíme o 25 % větší:

$$F'_9 = 1,25 \cdot F_x = 18,4 \text{ N.} \quad (50)$$

Podobně jako v odstavci 6.6.1 zde vypočítáme doplňkový zdvih:

$$x = \frac{y_1 \cdot F_x}{F'_9 - F_x} = 100 \text{ mm.} \quad (51)$$

Jedná se o délku, o jakou bude třeba pružinu předpružit při montáži do stykače. Stlačení pružiny plně zatížené pak je

$$y_9 = y_1 + x = 125 \text{ mm.} \quad (52)$$

Poměr středního průměru pružiny k průměru drátu byl zvolen po několika iteracích jako $A = 12$ a Wahlův korekční činitel je [18]:

$$\varphi = \frac{A-0,25}{A-1} + \frac{0,615}{A} = 1,119. \quad (53)$$

Koeficient bezpečnosti zvolen $\mu = 1,5$ a pevnost materiálu v tahu $\sigma_{pt} = 2150$ MPa. Prvotní odhad průměru drátu bude $d = 0,63$ mm, a z tabulky pro nižší namáhání je dovolené namáhání ve smyku:

$$\tau_D = \frac{\sigma_{pt}}{1,6\mu} = 895,8 \text{ MPa.} \quad (54)$$

Potřebný průměr drátu pružiny pak je při uvažování $F_9 = 0,5 F'_9$, jelikož jsou pružiny dvě:

$$d' = \sqrt{\frac{8 \cdot F_9 \cdot A \cdot \varphi}{\pi \cdot \tau_D}} = \sqrt{\frac{8 \cdot 0,5 \cdot 18,4 \cdot 12 \cdot 1,119}{\pi \cdot 671,9 \cdot 10^6}} = 0,59 \text{ mm.} \quad (55)$$

Z normalizovaných průměrů uvedených v normě ČSN 42 6450 byla tedy ponechána hodnota $d = 0,63$ mm. Stanovíme střední průměr pružiny:

$$D_s = A \cdot d = 7,56 \text{ mm.} \quad (56)$$

Je třeba ověřit namáhání ve smyku pro daný průměr:

$$\tau'_D = \frac{8 \cdot F_9 \cdot A \cdot \varphi}{\pi \cdot d^2} = 792,6 \text{ MPa.} \quad (57)$$

Počet činných závitů vypínací pružiny je:

$$n = \frac{y_9 \cdot G \cdot d^4}{8 \cdot F_9 \cdot D_s^3} = \frac{125 \cdot 10^{-3} \cdot 8,2 \cdot 10^{10} \cdot (0,63 \cdot 10^{-3})^4}{8 \cdot 0,5 \cdot 18,4 \cdot (7,56 \cdot 10^{-3})^3} = 50,8 \quad (58)$$

kde $G = 8,2 \cdot 10^4$ MPa je modul pružnosti ve smyku. Zaokrouhlený počet závitů bude $n' = 51$ závitů. K nim jsou připočítány 2 závěrné závity, tedy celkem bude mít pružina

$$z = n' + n_z = 53 \text{ závitů.} \quad (59)$$

Stlačená délka pružiny pak bude:

$$L_9 = 1,05^2 \cdot z \cdot d = 36,8 \text{ mm.} \quad (60)$$

Délka volné pružiny je:

$$L_0 = L_9 + y_9 = 161,8 \text{ mm} \quad (61)$$

a stoupání závitů pružiny:

$$s = \frac{L_0 - n_z \cdot d}{n'} = 3,15 \text{ mm.} \quad (62)$$

Předepjatá délka pružiny (délka po zamontování a předpružení) je

$$L_m = L_9 + y_1 = 36,8 + 25 = 61,8 \text{ mm.} \quad (63)$$

Tab. 6.6 Parametry odporových pružin ve stykači

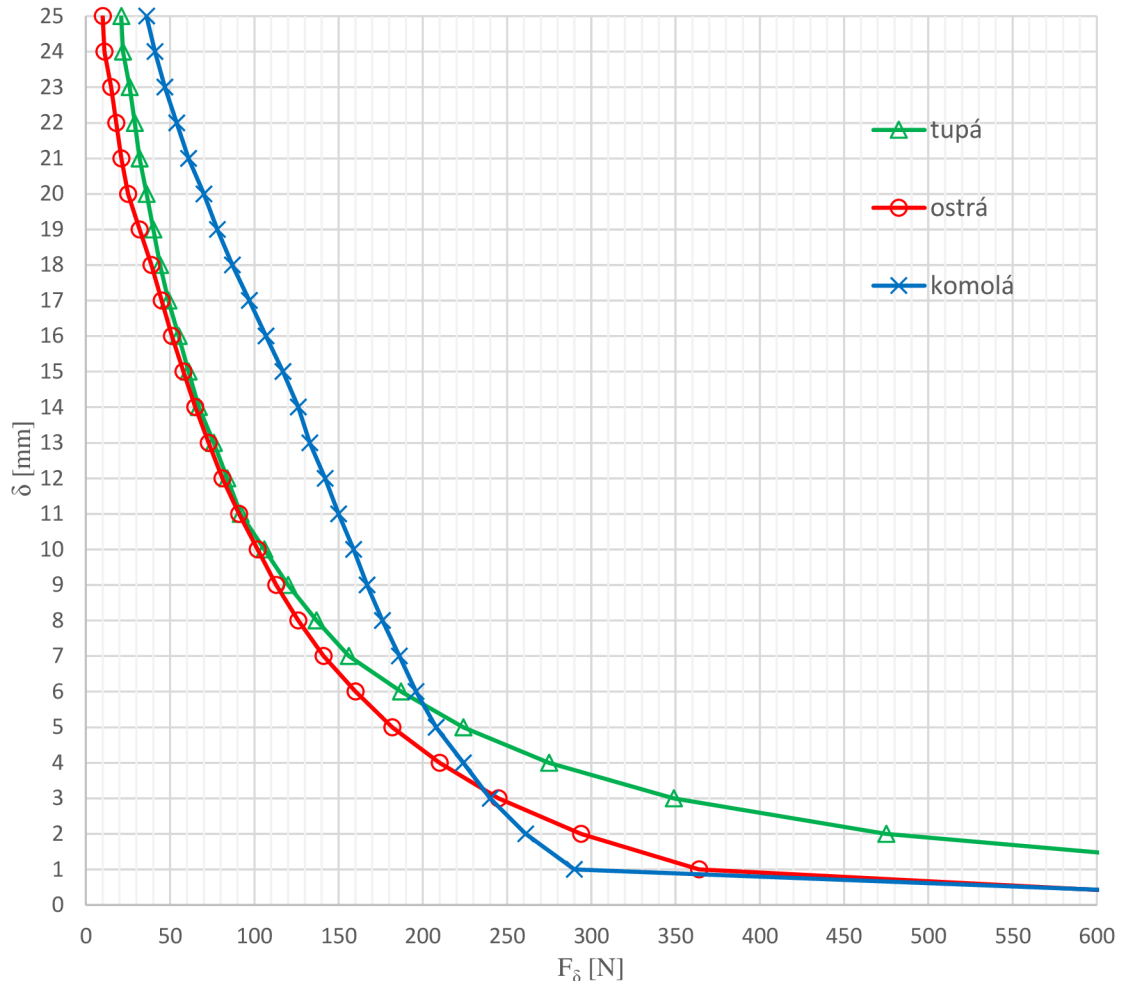
	průměr drátu [mm]	činné závity	střední průměr [mm]	stlačená délka [mm]	předepjatá délka [mm]	síla předepjatá [N]	síla stlačená [N]
kontaktní	3,55	4	34,8	23,5	28,5	112,3	160
vypínací	0,63	51	7,56	36,8	61,8	14,7	18,4

6.6.3 Elektromagnet

Byla vybrána jádrová konstrukce elektromagnetu se dvěma vinutími na sloupcích sériově zapojenými. Tato konstrukce je výhodná kvůli menšímu rozptylu magnetického pole v rozepnutém stavu, jelikož vzduchová mezera je stále obklopena vinutím. Tvar kotvy má podstatný vliv na průběh tahové charakteristiky, proto byly v prostředí ANSYS nejdříve nasimulovány tři různé tvary kotev pro získání představy o tvaru průběhu. Tupá kotva má dosedovou plochu čtvercovou, zcela rovnou, ostrá je tvarována do jehlanu s výškou 10 mm a komolá je komolý kužel. Buzeny stejným magnetomotorickým napětím vykazovaly elektromagnety různou přitažnou sílu při maximální vzduchové mezeře a jiný průběh v oblasti působení kontaktní pružiny kdy $\delta \in \langle 0,5 \rangle$ mm. Počty závitů a budicí proud byly vypočítány podle rozměrů jádra a kostry, napětí cívky, plnění mědi a průřezu drátu. Maximální vzduchová mezera je 25 mm, což je součet poloviny navrhované vzdušné vzdálenosti (můstek se 2 kontakty,

tedy $40/2 = 20$ mm) a pracovního zdvihu kontaktní pružiny (5 mm). O těchto výpočtech viz dále, jelikož i návrh elektromagnetu je iterační proces.

Graf 6.2. Srovnání tahových charakteristik pro různé kotvy



Obr. 6.9 Statické tahové charakteristiky různých kotev pro 543 závitů a buzení 8,16 A

Z průběhů lze vidět, že nejvýhodnějším tvarem je komolá kotva, protože disponuje v rozepnutém stavu ($\delta = 25$ mm) nejvyšší přitažnou silou a v okolí dosednutí působí nejmenší silou na kontaktní pružinu, což působí menší rázy v přístroji díky menšímu přebytku síly. Komolá kotva byla následně simulována při maximální vzduchové mezeře pro různé hodnoty buzení. Cílem bylo nalézt kombinaci průřezu drátu a tloušťky cívký, která vytváří magnetomotorické napětí, a tedy i sílu, blízkou síle vypínací pružiny v předepjatém stavu. Návrh elektromagnetu je prováděn v krajních mezích provozu daných normou, tedy při normálním provozu by rezerva přitažné síly měla být dostatečná.

Ovládací cívka navrhovaného stykače spadá dle normy ČSN EN 60077-1 ed.2 do kategorie VC1 (napájení baterií s udržovacím nabíjením), která definuje rozsah napětí pro řídicí obvody v rozmezí 0,7 až 1,25 násobku jmenovitého napětí sítě. Při uvažování

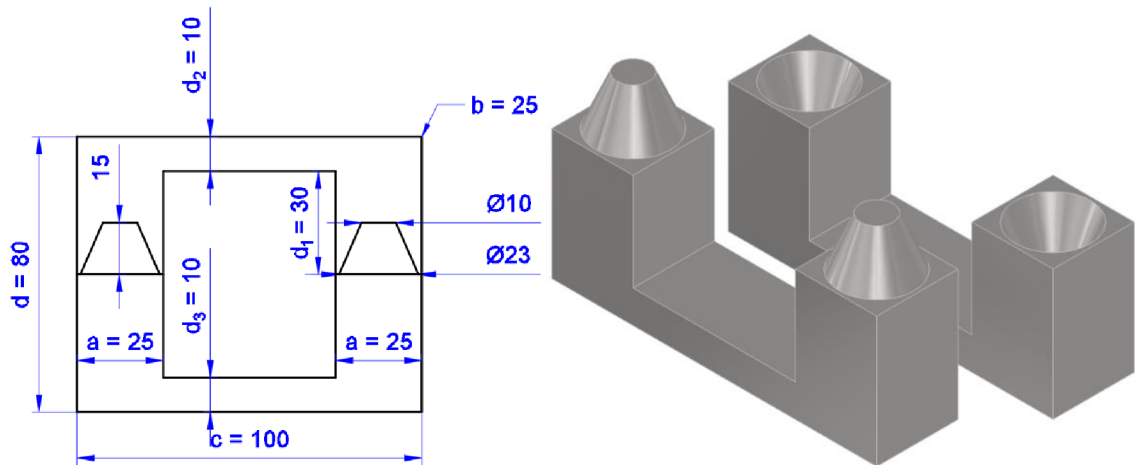
jmenovitého napětí palubní sítě $U_s = 24 \text{ V}$ tomu tedy odpovídá disponibilní napětí na svorkách cívky v hodnotě

$$U = 0,7 \cdot U_s = 0,7 \cdot 24 = 16,8 \text{ V.} \quad (64)$$

Dále je uvažována teplota okolí v okamžiku sepnutí elektromagnetu $70 \text{ }^\circ\text{C}$. Pak s měrným elektrickým odporem při teplotě $20 \text{ }^\circ\text{C}$ $\rho_{20} = 0,01786 \text{ } \Omega\text{mm}^2\text{m}^{-1}$ a součiniteli odporu mědi $\alpha_{Cu} = 0,004 \text{ K}^{-1}$ je rezistivita při $70 \text{ }^\circ\text{C}$ rovna

$$\rho_{70} = \rho_{20} \cdot (1 + \alpha_{Cu}\Delta T) = 0,01786 \cdot (1 + 0,004 \cdot 50) = 0,0214 \text{ } \Omega\text{mm}^2\text{m}^{-1}. \quad (65)$$

Třetím faktorem je činitel plnění mědi k_{pCu} . Závity budou vinuty strojově navíječkou na jednoduchou kostru, proto lze očekávat dobrý činitel plnění. Uvažovaná hodnota plnění je 0,8.



Obr. 6.10 Rozměry magnetického obvodu a 3D pohled na komolé jádro (v popředí) a kotvu

Průřez okna magnetického obvodu je

$$S_o = (c - 2a) \cdot (d - d_2 - d_3) = (100 - 2 \cdot 25) \cdot (80 - 10 - 10) = 3000 \text{ mm}^2. \quad (66)$$

Maximální tloušťka jedné cívky tak, aby zasahovala do poloviny okna:

$$d_{cmax} = c - a = 100 - 25 = 75 \text{ mm.} \quad (67)$$

S ohledem na vnější izolaci vinutí, lepší chlazení povrchu a prostorovou rezervu je navržena menší tloušťka vinutí $d_c = 56 \text{ mm}$. Průměr vodiče vybraného z řady lakovaných měděných drátů je $d_{dr} = 1,18 \text{ mm}$. Průřez drátu je roven

$$S_{dr} = \frac{\pi \cdot d_{dr}^2}{4} = 1,093 \text{ mm}^2. \quad (68)$$

Počet závitů do navržené tloušťky vinutí zaokrouhlený dolů pak lze spočítat jako

$$N = k_{pCu} \cdot \frac{\frac{1}{2}(d_c - a) \cdot (d - d_2 - d_3)}{S_{dr}} \cong 680 \text{ závitů.} \quad (69)$$

Ve výpočtu odporu vinutí uvažujeme odpor jednoho závitu ve střední délce vynásobený počtem závitů. Délka jednoho středního závitu je při zjednodušení jeho tvaru na kružnici

$$l_{z1} = \pi \left(\frac{1}{2} (d_c - a) + a \right) = 127,2 \text{ mm}. \quad (70)$$

Celková délka vinutí obou cívek:

$$l_v = 2 \cdot l_{z1} \cdot N = 173,03 \text{ m} \quad (71)$$

Odpor celého vinutí pro teplotu 70 °C:

$$R = \rho_{70} \frac{l_v}{S_{dr}} = 0,0214 \frac{173,03}{1,093} = 3,39 \ \Omega. \quad (72)$$

Budící proud je

$$I = \frac{U}{R} = \frac{16,8}{3,39} = 4,95 \text{ A}. \quad (73)$$

Vypočítaný počet závitů a stejnosměrný proud jsou konstantní budící veličiny parametrické numerické simulace v prostředí ANSYS Maxwell kde parametrem je vzduchová mezera, která bude volena s krokem 1 mm v intervalu (1;25) a 0,1 mm v intervalu (0;1). Několika numerickými simulacemi bylo ověřeno, že elektromagnet disponuje dostatečnou přitažnou silou k překonání vypínacích pružin až do minimálního budícího proudu 4 A. Tomu odpovídá při uvedeném napětí odpor vinutí 4,2 Ω, tedy rezerva pro vyšší teplotu, přechodové odpory a výrobní tolerance vinutí je dostatečná.

Aby nebyl ovládací obvod příliš tepelně zatěžován po dlouhou dobu, používá se po přitažení kotvy elektromagnetu ekonomizér. Jedná se o polovodičový měnič generující požadovanou střední hodnotu stejnosměrného proudu pomocí PWM modulace vstupního napětí. Proud, potřebný pro spolehlivé udržení kontaktů, určený z numerické simulace je $I_{pr} = 1,7 \text{ A}$. Tomu odpovídá přídržná síla 326 N.

Zbývá zhodnotit silovou bilanci kontaktního můstku při působení sil. Přítlačná síla kontaktní pružiny musí převyšovat odpor vypínacích pružin, elektrodynamické síly a výsledek musí být vyšší než minimální přítlačná síla v kontaktech. Bilance má tvar:

$$F_k - F'_g - F_E > 2F_{pmin} \quad (74)$$

kde je F_k síla kontaktní pružiny, F'_g síla vypínacích pružin, F_E síla elektrodynamická a F_{pmin} minimální přítlačná síla na jeden kontakt.

Po dosazení vypočítaných hodnot získáváme:

$$160 - 18,4 - 38,7 > 2 \cdot 9,38$$

$$102,9 \text{ N} > 18,7 \text{ N}$$

Ještě je třeba ověřit, zda při působení elektrodynamických sil nedojde k odskoku kotvy elektromagnetu, a to splněním nerovnosti:

$$F_{\delta} > F_k + F'_9 + F_E \quad (75)$$

kde je F_{δ} přídržná síla elektromagnetu s ekonomizérem.

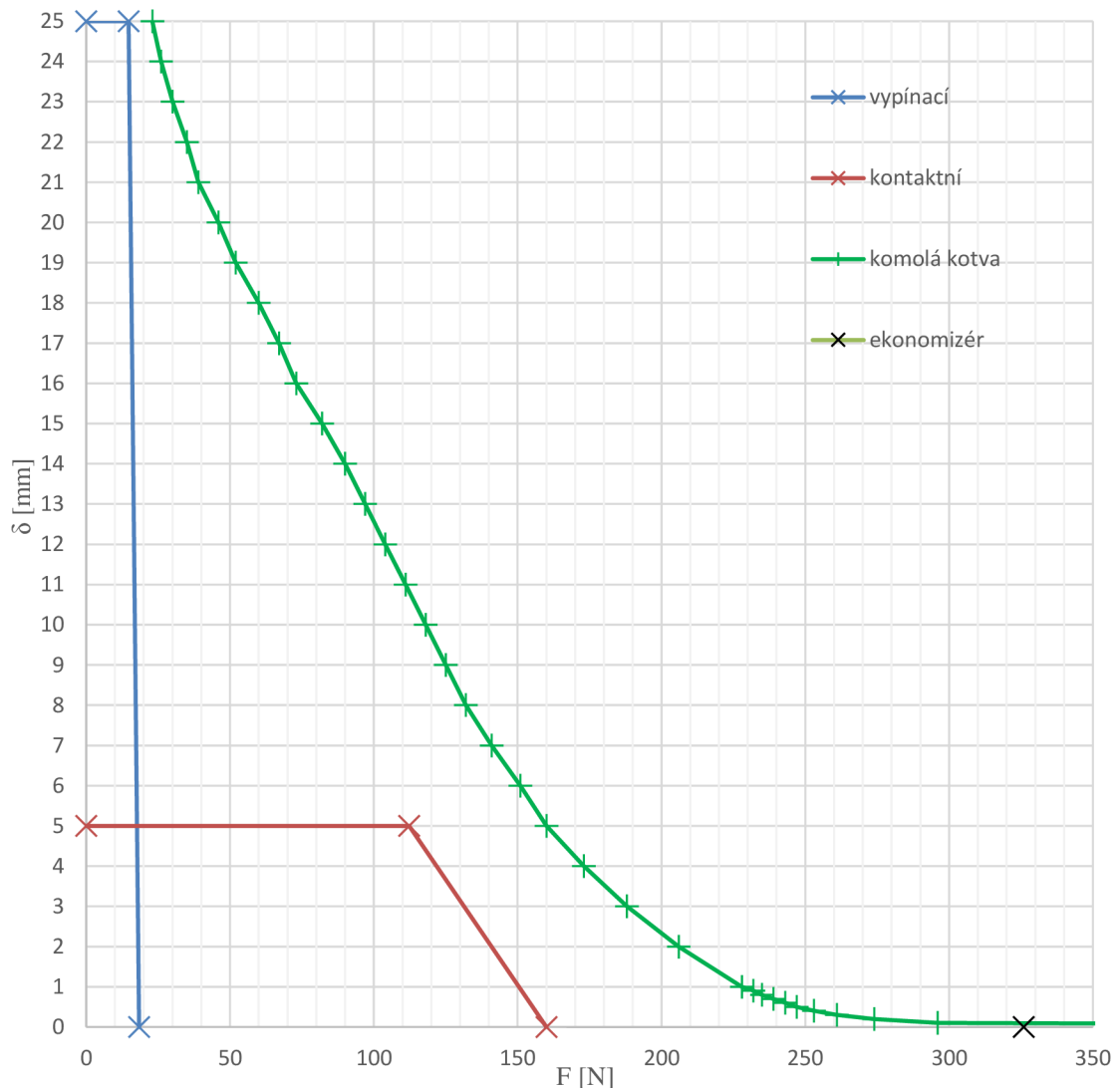
Dosažením získáme:

$$326 > 160 + 18,4 + 38,7$$

$$326 \text{ N} > 217,1 \text{ N}$$

Vidíme, že nerovnosti platí s rezervou a navrhovaný mechanismus tak lze zakomponovat do konstrukce stykače. Dalším krokem je návrh křivky pro následnou simulaci oteplení na kompletním modelu. Délky pružin a velikost elektromagnetu mají vliv na rozměry přístroje a jeho vnitřní uspořádání, především v oblasti nosiče můstku, jehož výška a délky vodičích tyčí se odvíjejí právě od velikosti pružin.

Graf.6.3. Průběhy tahové charakteristiky pro 680 závitů, 4,95 A a součtových diagramů pružin

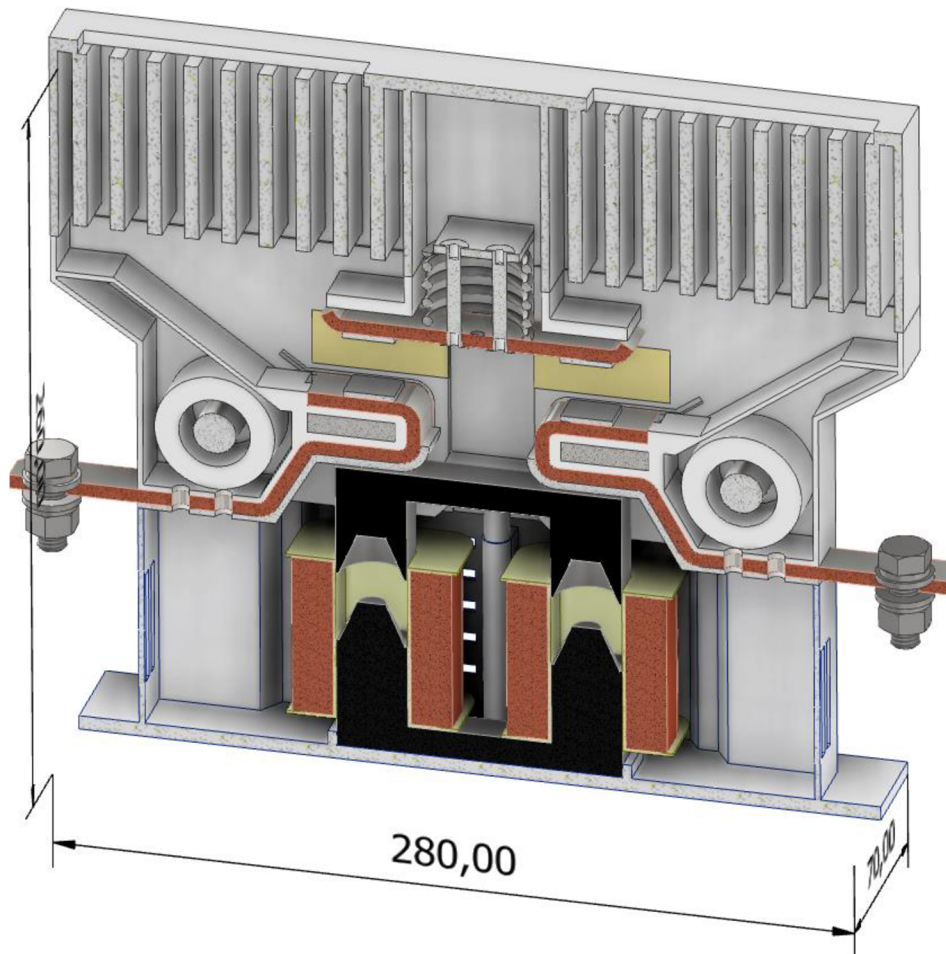


Obr. 6.11 Průběhy velikosti sil navrhovaného mechanismu

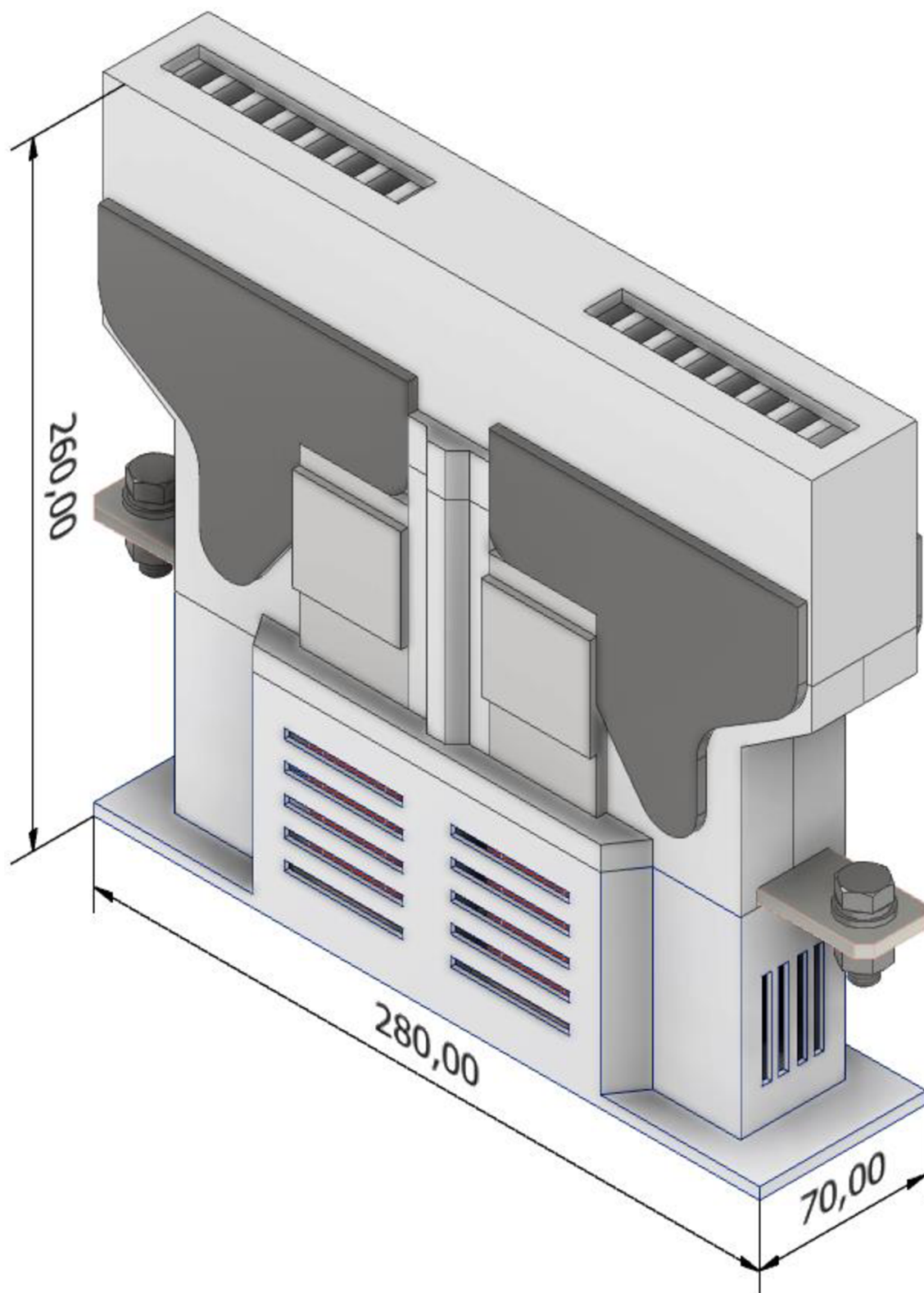
6.7 Konstrukce přístroje

Stykač je dvoupólový můstkového typu s roštovou zhášecí komorou, jak bylo navrženo v předcházejících kapitolách. Montáž přístroje je uvažována na panel pomocí šroubů. Návrh přístroje byl inspirován skutečnými konstrukcemi firmy Schaltbau, konkrétněji přístroji řady CT [24].

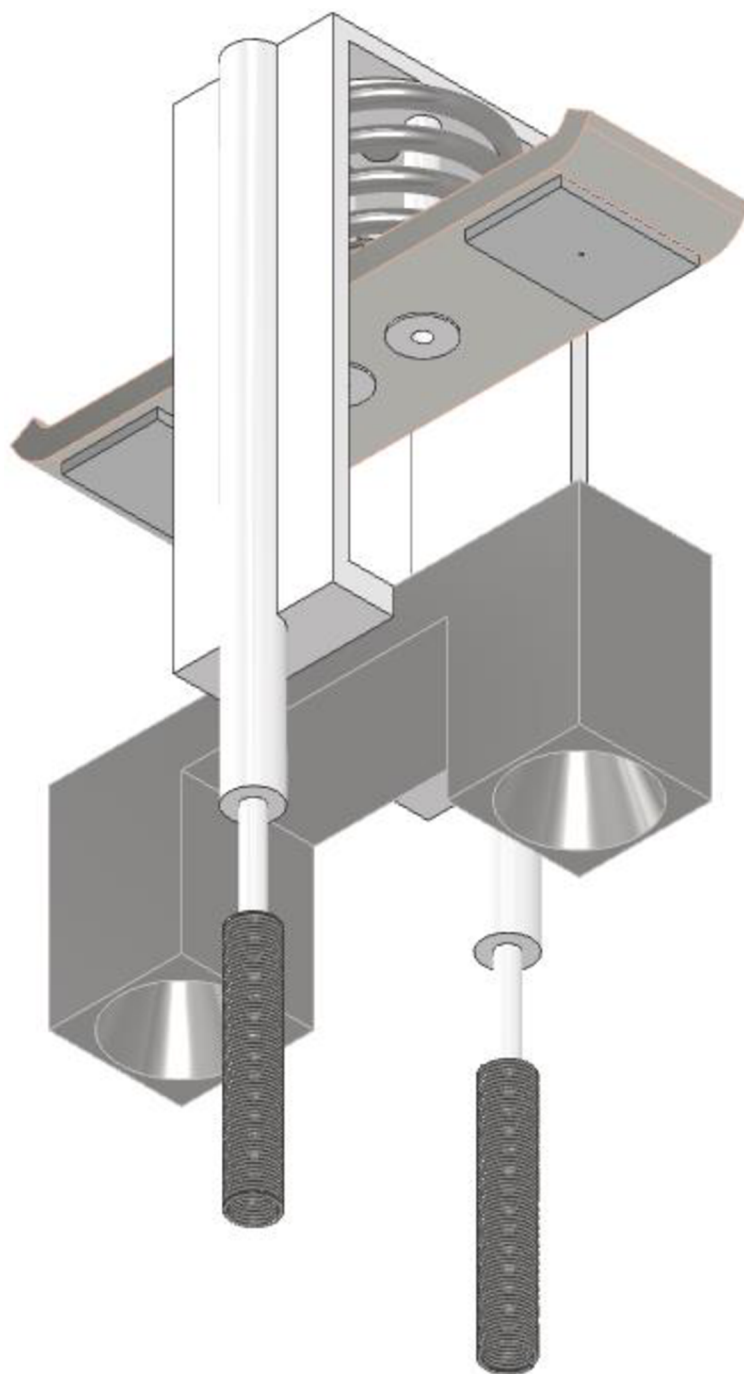
Stykač se bude skládat ze tří hlavních částí – základna, mezikontaktní prostor a zhášecí komory. Základna je z PPA plastu a má v sobě vybrání pro umístění jádra elektromagnetu. Na něj se namontují obě vinutí navinutá na kostře. K základně se pomocí šroubů připevní mezikontaktní prostor, kde jsou umístěny zhášecí cívky, přívodní pasy se záhyby, vodící elektrody (nejsou modelovány), pólové nástavce U-záhybů a zhášecích cívek a nosič s můstkem. Kvůli vyšší teplotě pólových nástavců U-záhybů jsou tyto zakrytovány plastovými destičkami, aby bylo možné splnit mez oteplení přístupných povrchů (pro nekovové části je o 10 K vyšší). Stěny krytu obepínající kontakty jsou opatřeny keramickými destičkami pro ochranu před účinky oblouku (v modelu béžové barvy). Zhášecí komora opatřená výfuky pro odvod přebytečného tlaku. Přesný tvar a rozměry roštu nejsou předmětem návrhu, proto byly navrženy pouze koncepčně, aby bylo možné odhadnout rozměry přístroje.



Obr. 6.12 Navrhovaný stykač v řezu podélnou osou přístroje



Obr. 6.13 Obrysové rozměry v mm a vnější pohled na kompletní přístroj



Obr. 6.14 Pohyblivé komponenty mechanismu stykače s pružinami

6.8 Oteplení – numerický výpočet

V prostředí ANSYS Icepak byla provedena simulace oteplení přístroje při tepelném proudu v krytu 400 A. Kvůli značné členitosti modelu a nízkému výkonu výpočetního hardwaru bylo nutné geometrii upravit. Odstraněny byly pružiny, průduchy a rošt, otvor pro výfuky zmenšen, aby přibližně reprezentoval pouze volné průduchy bez roštu. Zaoblené povrchy byly zhranatěny pro menší náročnost na mřížku simulace. Hranaté povrchy sice produkují singulární body, ve kterých by například intenzita elektrického pole mohla růst nade všechny meze, avšak v teplotním poli si to lze dovolit.

Jelikož je geometrie stykače symetrická, je možné ji rozdělit na polovinu při nastavení okrajových podmínek symetrie. Při simulaci se uvažuje nejnepříznivější poloha stykače jako vertikální montáž na panel. Během oteplovací zkoušky jsou připojeny přívodní vodiče průřezu 240 mm^2 oba v délce 2 m, které odvádějí převážnou část tepla z přístroje a předávají jej do okolního vzduchu. Takto dlouhé přívody by však značně zvětšovaly model a výpočetní náročnost, proto byly nahrazeny kratšími přívody délky 0,15 m.

6.8.1 Nastavení simulace

V prostředí Maxwell byla nejprve provedena analýza při ustáleném stejnosměrném proudu. Výsledky ohmických ztrát potom lze vložit do prostředí Icepak k provedení simulace oteplení. Budícími veličinami v ustáleném stavu jsou tepelný proud hlavní proudovodnou dráhou a budící proud cívkami elektromagnetu. Jelikož pracujeme s polovinou modelu, je hodnota hlavního proudu 200 A.

Proud vinutím elektromagnetu musíme určit z vypočítané proudové hustoty a průřezu plochy vinutí. V modelu totiž nejsou uvažovány jednotlivé závit, ale homogenní hranatá měděná objímka obepínající jádro. Ze známé hodnoty odporu celého vinutí (dle vztahu (72), ale pro teplotu vinutí $110 \text{ }^\circ\text{C}$) a přídržovacího proudu z kapitoly 6.6.3 lze vypočítat polovinu ztrát (polovina modelu) jednoho vinutí ze dvou:

$$P_z = \frac{1}{2} \frac{R}{2} I_{př}^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{3,84}{2} \cdot 1,7^2 = 2,77 \text{ W}. \quad (76)$$

Ohmické ztráty v objemu lze vypočítat podle vztahu

$$P_z = \rho V \sigma^2 [W]. \quad (77)$$

kde je ρ rezistivita vodiče [Ωm], V objem vodiče [mm^3] a σ proudová hustota [$\text{A}\cdot\text{mm}^{-2}$]. Objem uvažované poloviny jednoho vinutí je $V = 72819 \text{ mm}^3$, rezistivita mědi při $110 \text{ }^\circ\text{C}$ je $\rho_{110} = 2,429 \cdot 10^{-8} \text{ } \Omega\text{m}$. Z toho lze vypočítat:

$$\sigma = \sqrt{\frac{P_{z1}}{\rho V}} = 1,251 \text{ A}\cdot\text{mm}^{-2}. \quad (78)$$

Plocha vinutí, na které budeme aplikovat budící proud v simulaci má velikost 899 mm^2 . Do této plochy bude pak vstupovat budící proud

$$I_{b1} = 1,25 \cdot 899 = 1124,6 \text{ A.} \quad (79)$$

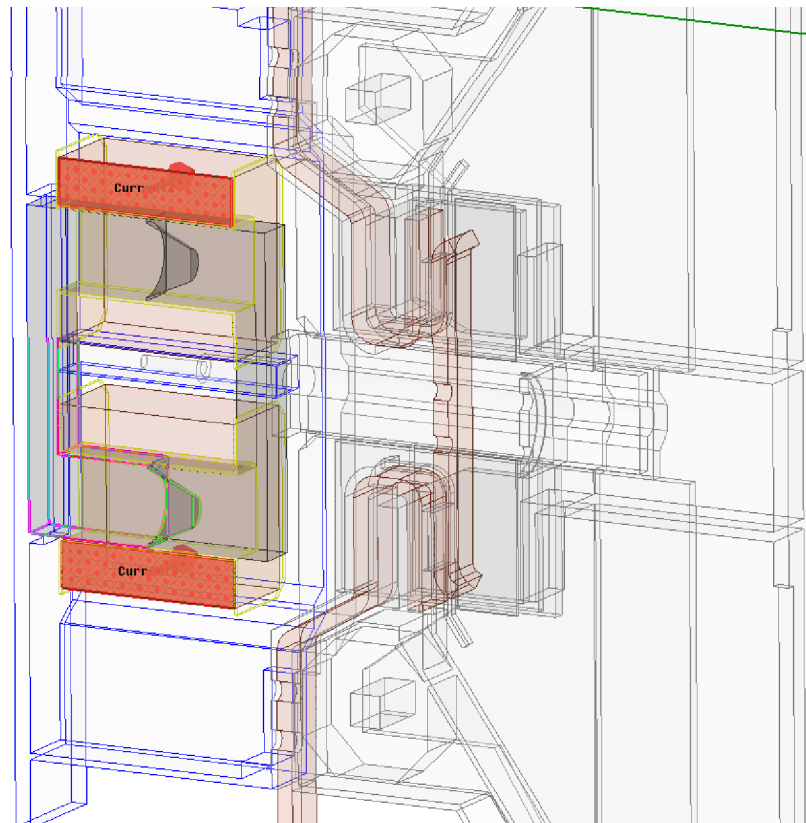
Uvedené buzení bude nastaveno do každého vinutí zvlášť. Na druhou plochu vinutí je pak nastaven nulový potenciál. Po spočítání simulace s přesností 0,5 % byla ověřena hodnota ztrát ve vinutí pomocí vestavěných funkcí Maxwellu a byla zjištěna velikost ztrát pouze $P_{z1} = 2,165 \text{ W}$, což je méně, než je požadováno. Důvodem je nerovnoměrné rozložení proudové hustoty v měděné objímce vinutí. Z přímé úměry

$$\frac{P_{z1}}{I_{b1}^2} = \frac{P_z}{I_{b2}^2} \quad (80)$$

byla vypočítána nová velikost budícího proudu pro požadované ztráty P_z :

$$I_{b2} = I_{b1} \cdot \sqrt{\frac{P_z}{P_{z1}}} = 1124,6 \cdot \sqrt{\frac{2,77}{2,165}} = 1272 \text{ A} \quad (81)$$

a tomu odpovídá nová nasimulovaná velikost ztrát ve vinutí $P_{z2} = 2,777 \text{ W}$. Vidíme, že tato hodnota je podstatně blíže požadované 2,77 W a nový proud I_{b2} lze zadat jako buzení pro výpočet přesnější simulace ohmických ztrát použitelné pro simulaci oteplení.

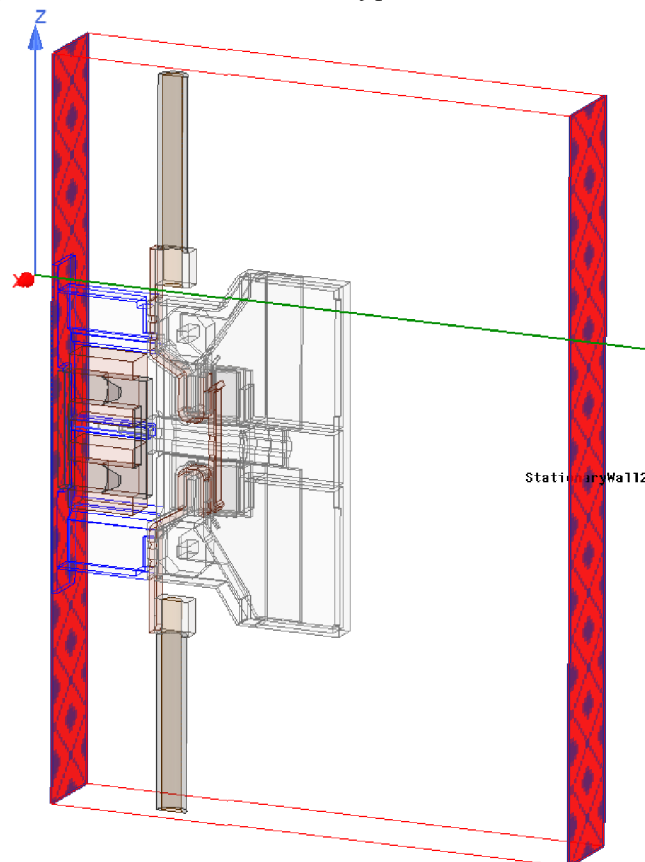


Obr. 6.15 Zobrazení ploch s náhradním budícím proudem elektromagnetu na drátěném modelu

V prostředí Icepak je vytvořen totožný model jako v Maxwellu a jsou vložena data provedené simulace. Na rovinu symetrie je nastavena podmínka Symmetry, prostor před a za přístrojem je omezen podmínkou Stationary s nulovým tepelným tokem. Tato podmínka simuluje neprostupnou stěnu a má představovat reálné stěny přístrojové skříně umístěné v trakčním vozidle. Nad, pod a vedle přístroje jsou nastaveny otevřené prostory umožňující proudění vzduchu.

Normy ČSN EN 50124-1 o vnějších podmínkách a ČSN EN 60077-1 o elektrických zařízeních stanovují pro teplotní třídu T1 tři maximální meze teplot vzduchu podle umístění – vně vozidla, uvnitř přístrojové skříně a uvnitř krytu. Uvažujeme umístění uvnitř přístrojové skříně, tedy maximální teplota vzduchu je **50 °C**. Pokud by byla teplota vzduchu ještě vyšší z důvodu místních ztrát, bylo by nutno tuto hodnotu navýšit. Pro posouzení oteplení uvnitř přístroje, kde se uvažují vyšší ztráty pak platí hodnoty uvnitř krytu a teplota vzduchu je 70 °C.

Nucené chlazení (i když je uvažováno v projektu) nebude zahrnuto do simulace, jelikož není známa rychlost proudění vzduchu a stykač by měl spolehlivě pracovat i při výpadku chlazení. Součinitele chladivosti povrchů byly zvoleny výchozí z knihovny Icepak, viz tabulka níže. Vzduchové okolí stykače bylo voleno spíše k menším rozměrům kvůli výkonu hardwaru a stabilitě výpočtu.



Obr. 6.16 Okrajové podmínky Stationary představující stěny s nulovým tepelným tokem

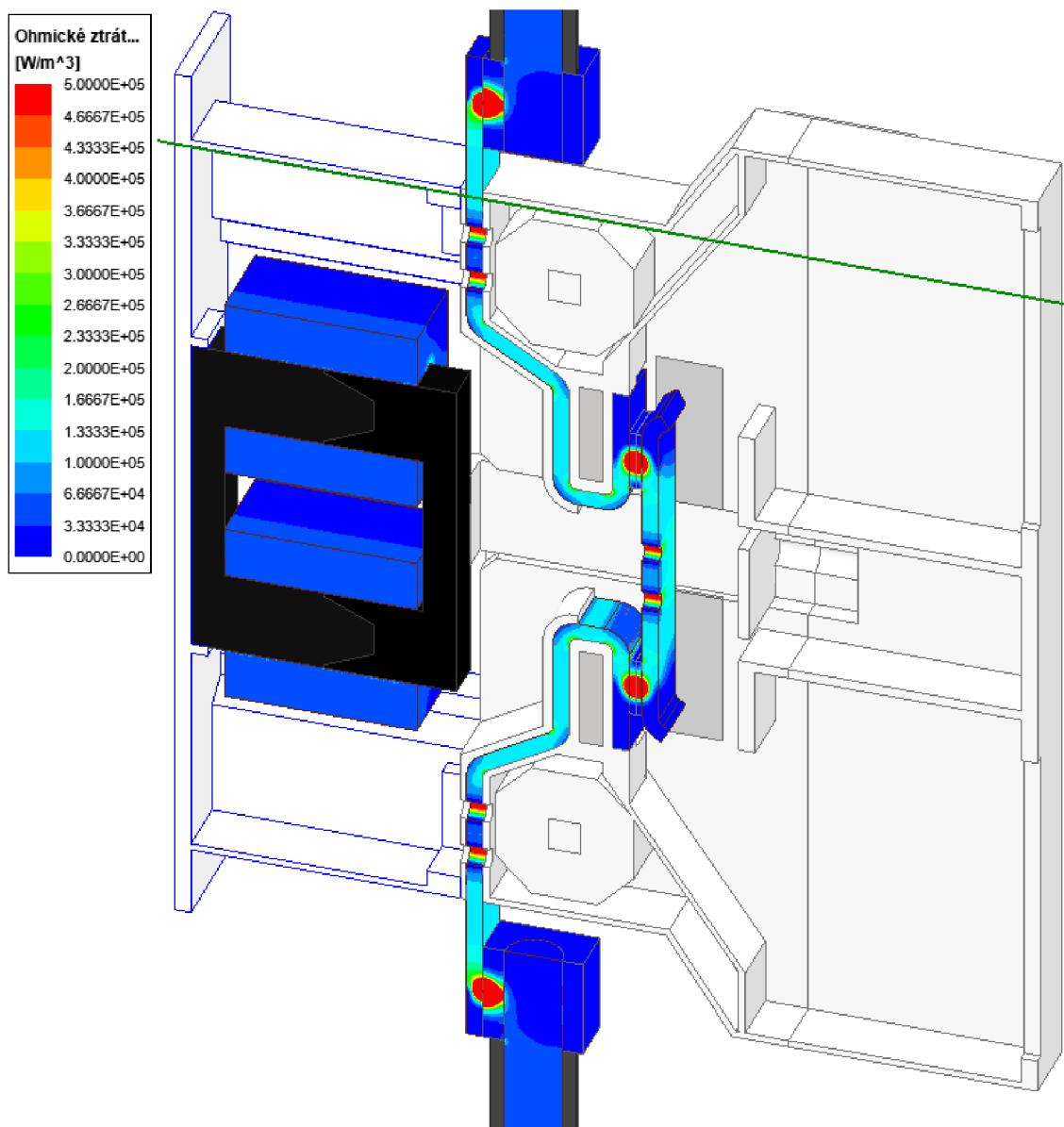
Tab. 6.7 Použité hodnoty emisivity v simulaci oteplení

druh povrchu	emisivita $E_z [-]$
postříbřená proudovodná dráha	0,15
kovové části	0,3
plastové části	0,8
PVC izolace	0,9
povrch vinutí elektromagnetu	0,85

6.8.2 Výsledky simulace oteplení

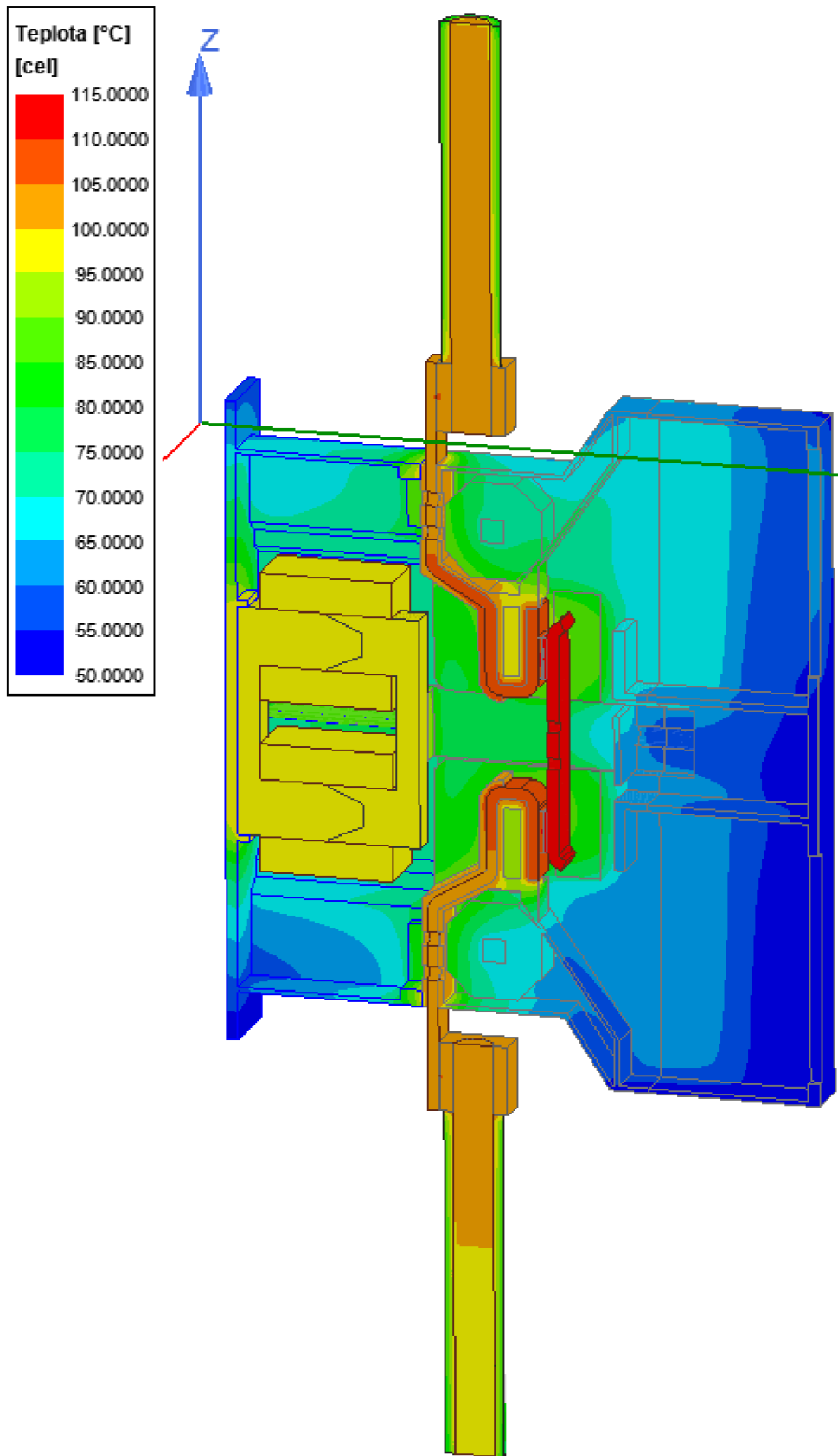
Je nutné zmínit, že simulace oteplení zde prováděná je značně zjednodušená. Přívody jsou kratší, než by měly být a emisivita povrchů se může značně lišit od skutečných. Lze však přibližně ověřit teploty kritických bodů nepříliš závislé na odvodu tepla konvekcí nebo radiací, jako jsou hlavní kontakty, které nesmějí překročit normou stanovené hodnoty. V těchto místech byly nastaveny měřicí body vyčísľující přímo hodnotu teploty bodu během simulace. Je sice zvykem udávat výsledky oteplení v Kelvinech jako rozdíl teploty součásti a teploty okolního vzduchu, zde však budeme porovnávat pro zjednodušení pouze skutečné teploty.

Hodnoty Jouleových ztrát a povrchové teploty byly vyneseny v grafu na povrchu modelu (viz obrázky níže). Na znázornění ztrát jsou jasně rozpoznatelná místa s největším tepelným výkonem jako jsou kontaktní styky, svorky a záhyby. Ztráty v elektromagnetu sice zdánlivě nedosahují velké hodnoty, avšak teplo z něj není tak dobře odváděno, jak bude viditelné dále v grafech rozložení povrchové teploty. Celkové ztráty činily 24,61 W.

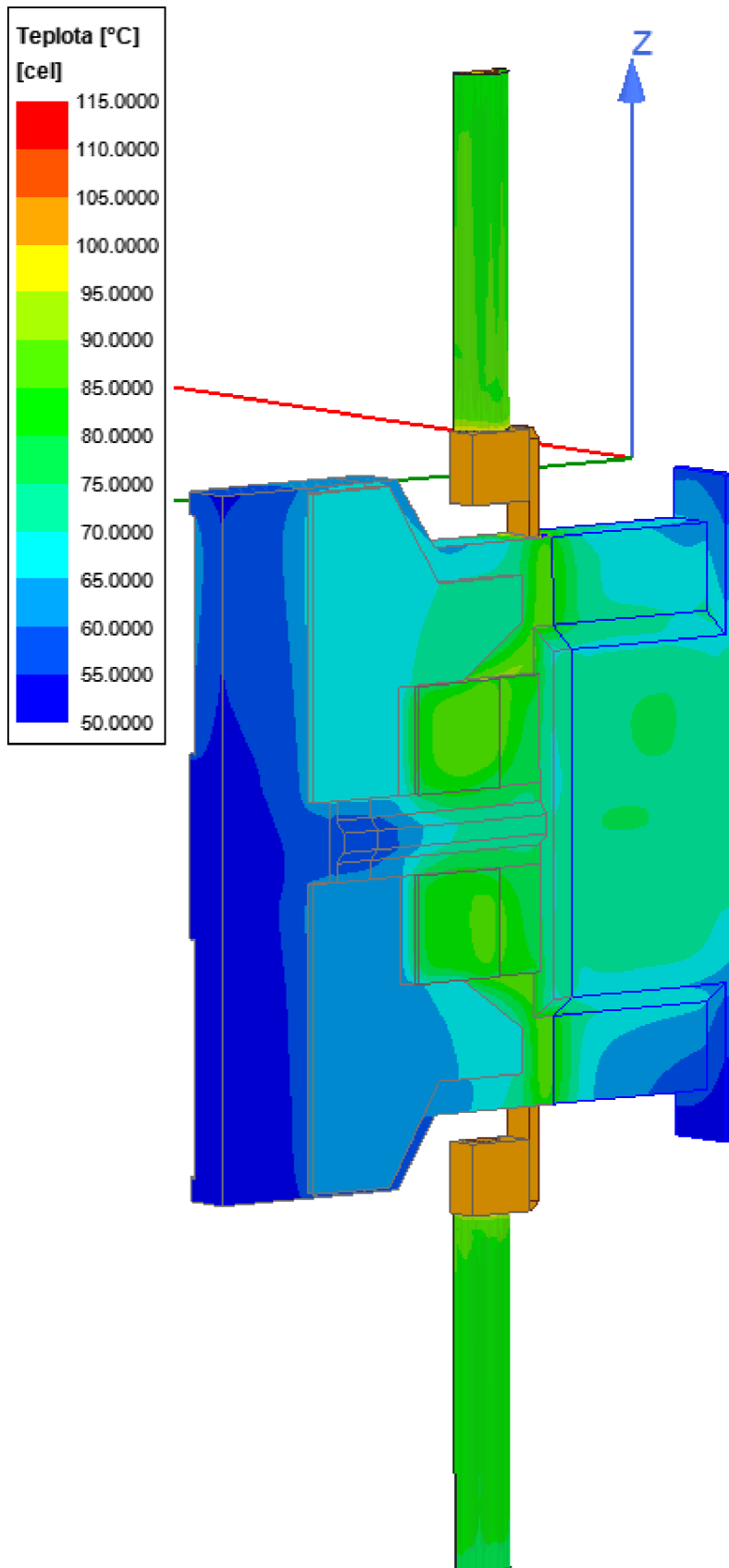


Obr. 6.17 Znárodnění tepelných ztrát v proudovodných částech stykače

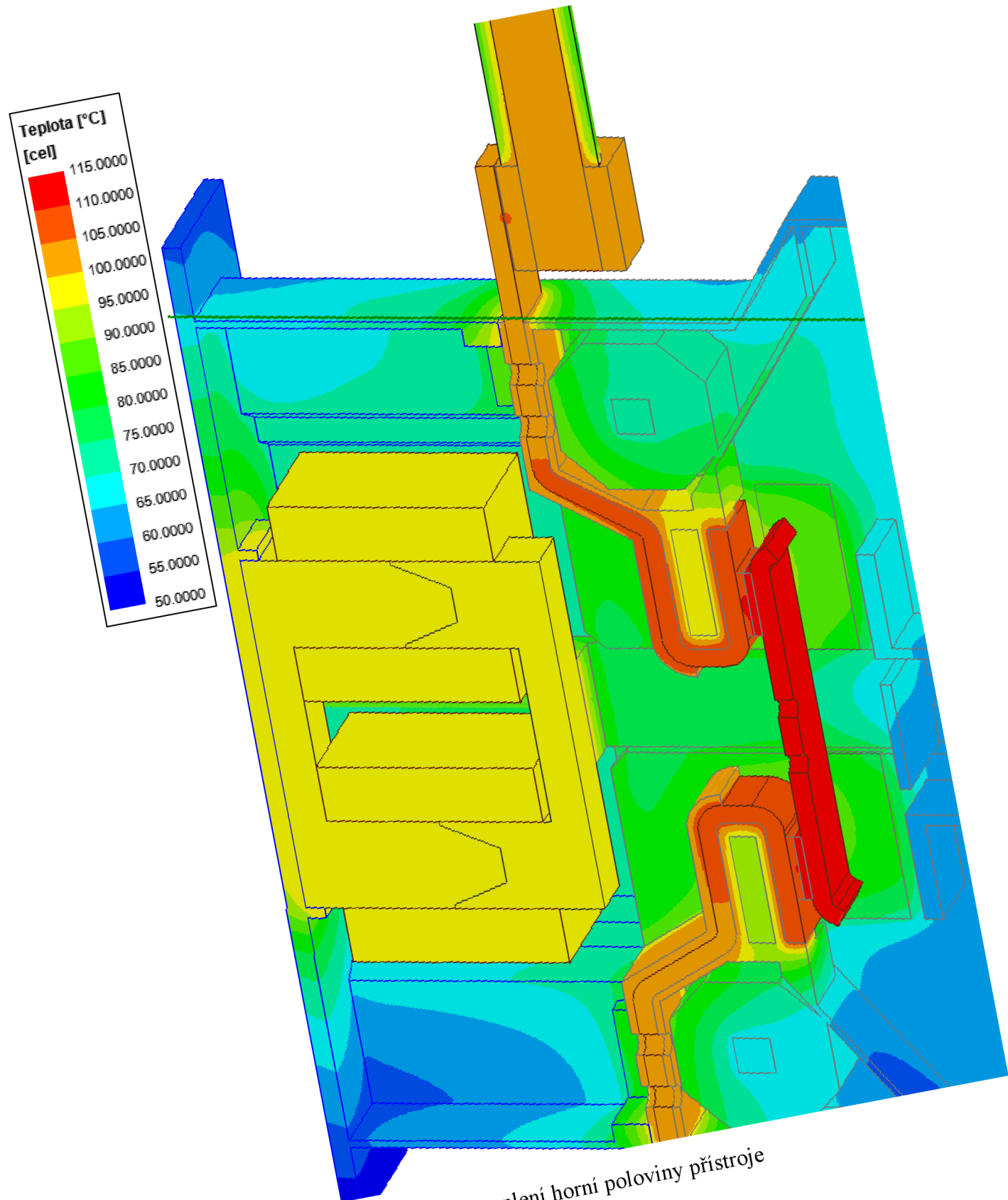
Velikost a rozložení povrchové teploty na obrázku níže je závislá nejen na velikosti lokálních ztrát (tepelných zdrojů), ale i míře odvodu tepla. Je vidět, že i když elektromagnet nevykazuje velké ztráty, odvod tepla z vinutí je podstatně horší. Chlazení probíhá přes jádro a základnu a dále z povrchu vinutí. Proto byla základna opatřena chladičnými průduchy, ale pro zjednodušení mřížky simulačního modelu byly odstraněny. Teplo vznikající v hlavní proudovodné dráze je odváděno především přívody mimo přístroj a pak z povrchu izolačního krytu.



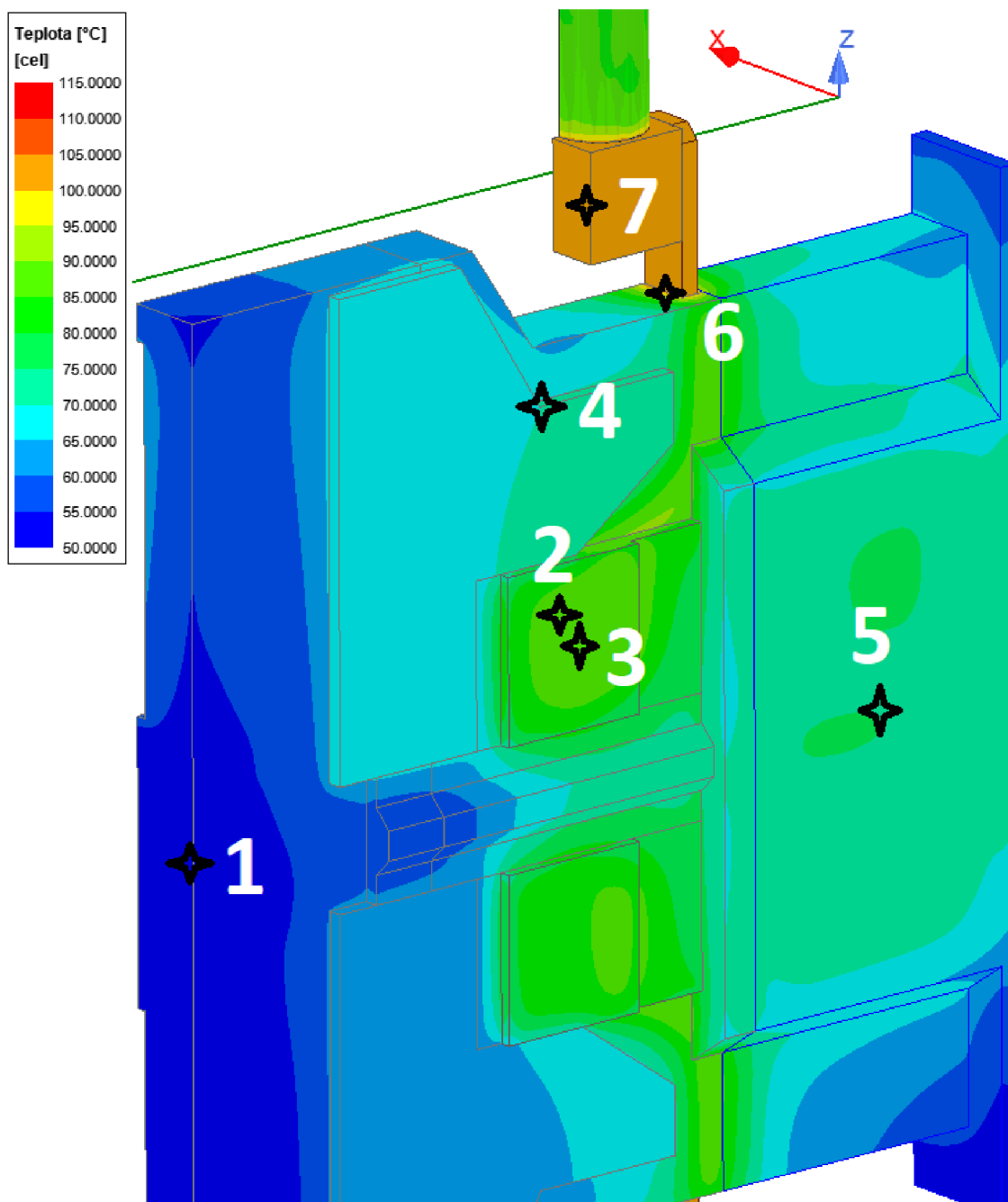
Obr. 6.18 Povrchová teplota pohledem skrz rovinu symetrie



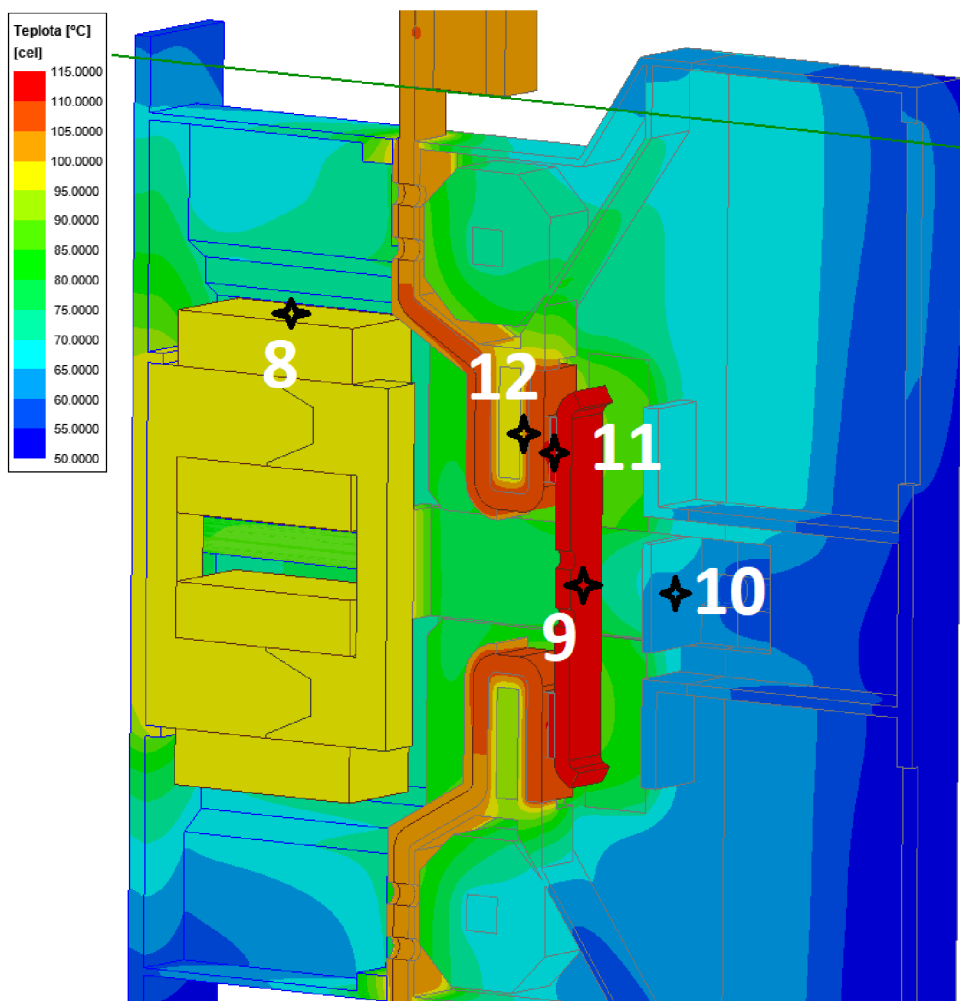
Obr. 6.19 Povrchová teplota na vnějších krytech



Obr. 6.20 Detail zvýšeného oteplení horní poloviny přístroje



Obr. 6.21 Rozmístění měřicích bodů na vnějších krytech



Obr. 6.22 Rozmístění měřicích bodů uvnitř přístroje

Tab. 6.8 Hodnoty teploty v měřicích bodech

číslo bodu	umístění	kategorie podle ČSN EN 60077-1 a 60077-2	teplota [°C]
1	zhášecí komora	nekovová část bez nutnosti dotyku	52,47
2	plech U-záhybu	nepřístupný	90,52
3	kryt plechu nástavce U-záhybu	nekovová část bez nutnosti dotyku	86,77
4	plech nástavce zhášecí cívky	kovová část bez nutnosti dotyku	69,93
5	základna	nekovová část bez nutnosti dotyku	76,21
6	přívodní pas u vstupu do přístroje	kovová část neurčená k dotyku	104,15
7	svorka	svorka	103,19
8	vinutí	nepřístupný	102,14
9	můstek	nepřístupný	111,18
10	nosič můstku	nepřístupný	64,54
11	hlavní kontakt	kontakt	115,44
12	plast pod kontaktem	nepřístupný	105,02

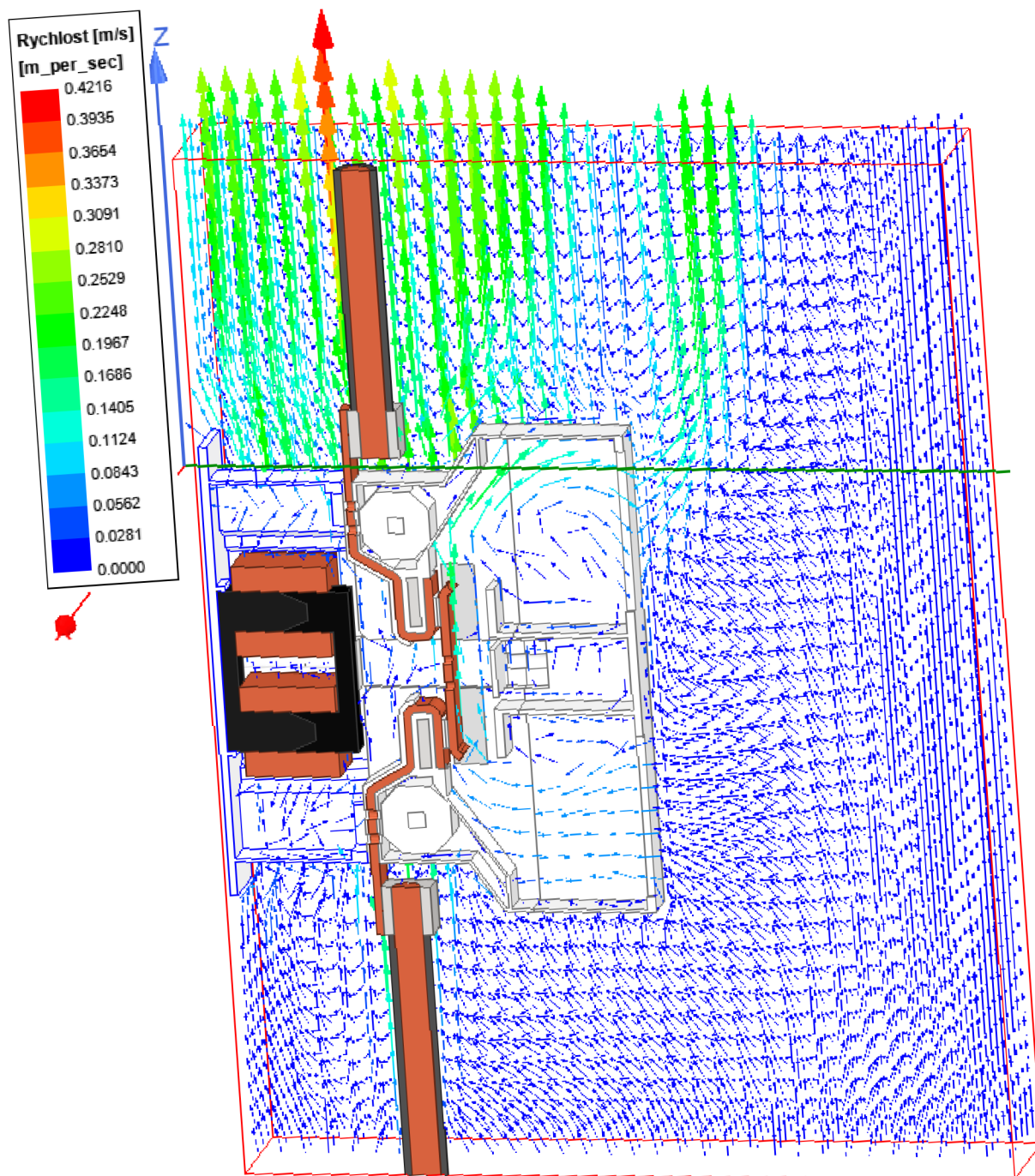
Tab. 6.9 Porovnání nasimulovaných teplot s mezními normovanými

	teplota v simulaci [°C]	max. teplota z normy [°C]	dle tabulky z normy
hlavní kontakt (postříbřený)	115,44	140	ČSN EN 60077-2
svorka (poniklovaná)	103,19	110	ČSN EN 60077-1
plech nástavce zhášecí cívky	69,93	80	ČSN EN 60077-1
kryt plechu nástavce U-záhybu	86,77	90	ČSN EN 60077-1
základna	76,21	90	ČSN EN 60077-1
přívodní pas u vstupu do přístroje	104,15	80	ČSN EN 60077-1
zhášecí komora	52,47	90	ČSN EN 60077-1
vinutí	102,14	120	ČSN EN 60077-1

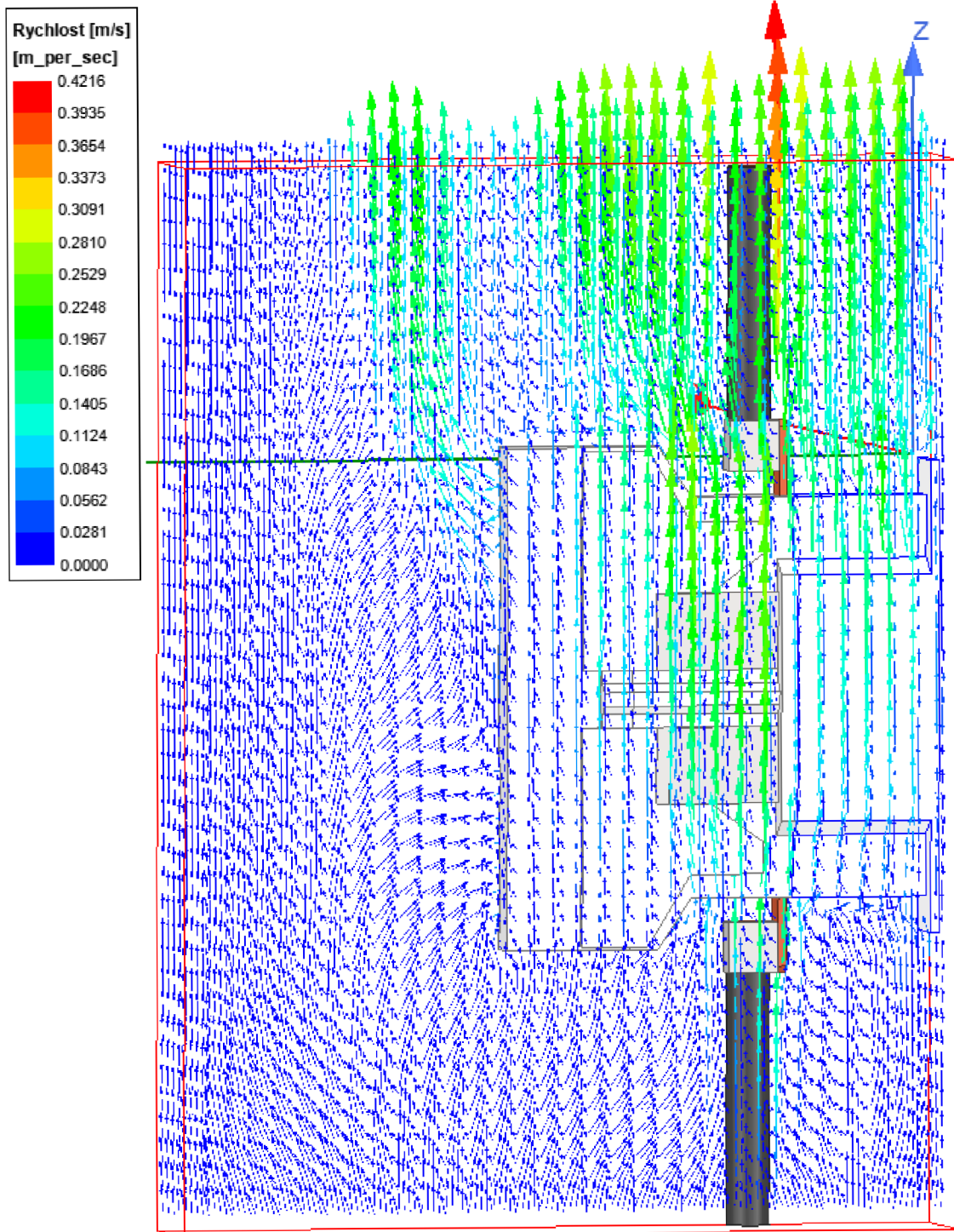
V tabulce Tab. 6.8 lze vidět hodnoty teploty v měřicích bodech na kovových i nekovových částech modelu. Žádná z nich nepřekračuje mezní dlouhodobou teplotu plastu PPA GF33, která činí 165 °C. Mezní teplota plastu kostry vinutí PA66 GF30 je 110 °C a povrch vinutí dosahuje přibližně 102 °C. Bylo by vhodné zvolit jiný druh materiálu kostry z odolnějšího plastu. Třída izolace vinutí se uvažuje E (max. 120 °C) a je vidět, že teplota vinutí tuto hodnotu nepřekračuje. Podle drážních norem byly měřicí body rozděleny do kategorií kontaktů, svorek a dle přístupnosti dotyku. Porovnáním s mezními teplotami z norem v Tab. 6.9 bylo zjištěno, že bylo překročeno dovolené oteplení na přívodním pasu. V plném modelu s požadovanou délkou přívodů 2 m by pravděpodobně bylo oteplení menší, jelikož by teplo bylo odváděno z většího povrchu.

6.8.3 Simulace proudění vzduchu

Ve stejném modelu byly vykresleny vektory rychlosti vzduchu pro názornou představu o poměrech proudění. Rychlost pohybu vzduchu je úměrná míře ochlazování a je znatelně vidět silné proudění kolem horního kabelu, což značí velký odvod tepla z jeho povrchu. Dále je vidět, že proud vzduchu vstupuje dolním otvorem zhášecí komory, ohřívá se při kontaktu s můstkem a odchází horním otvorem. Tento jev by v reálné konstrukci byl pravděpodobně částečně potlačen kvůli překážkám tvořenými rošty zhášecí komory. Proud vzduchu také ochlazuje vnější kryty, především základnu, jak je vidět na Obr. 6.24. Pokud by byly přítomny ventilační průduchy, byl by pozorovatelný ještě proud vzduchu procházející skrz přístroj kolem elektromagnetu.



Obr. 6.23 Proudění vzduchu pohledem skrz rovinu symetrie

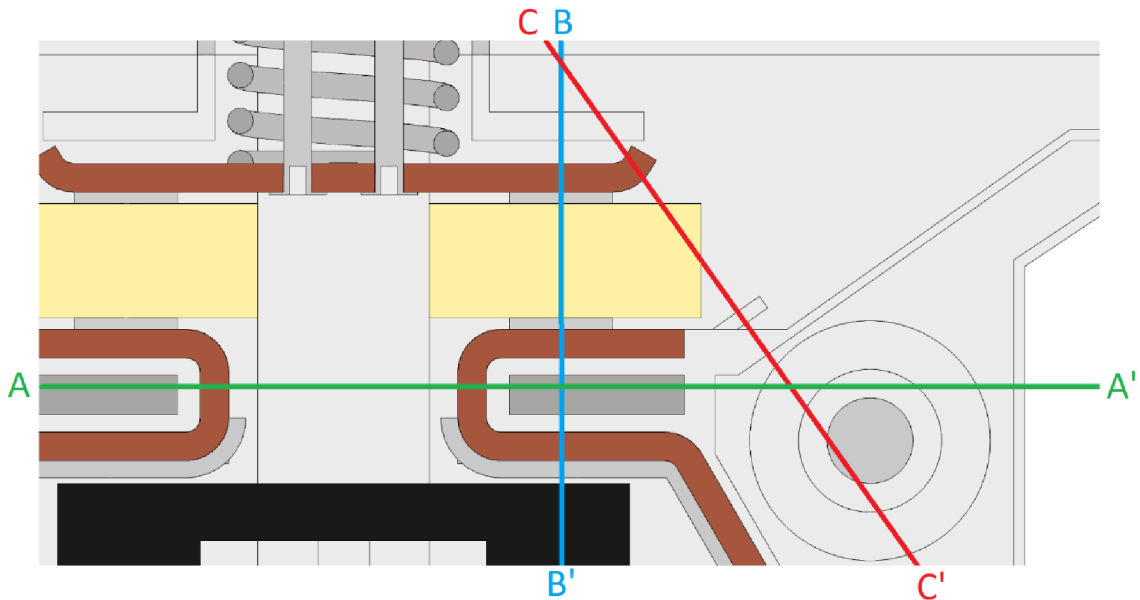


Obr. 6.24 Proudění vzduchu pohledem na vnější části

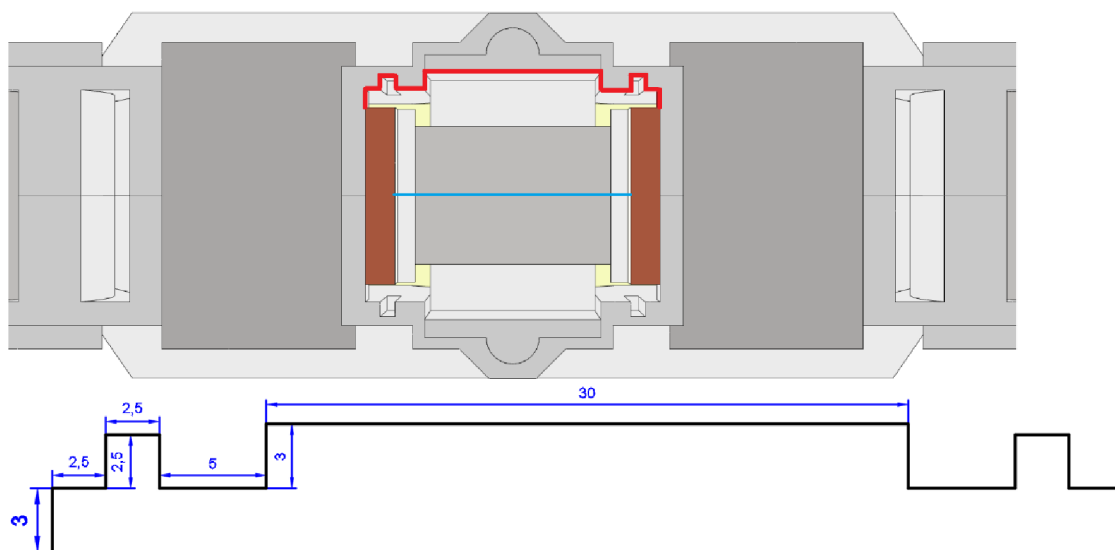
6.9 Ověření vzdušných vzdáleností a povrchových cest

Normou stanovené minimální vzdušné vzdálenosti a povrchové cesty je třeba ověřit na konstrukci stykače. Byla vytipována místa s nejmenšími vzdálenostmi a provedeny řezy 3D modelu přístroje, na kterých jsou odečteny rozměry.

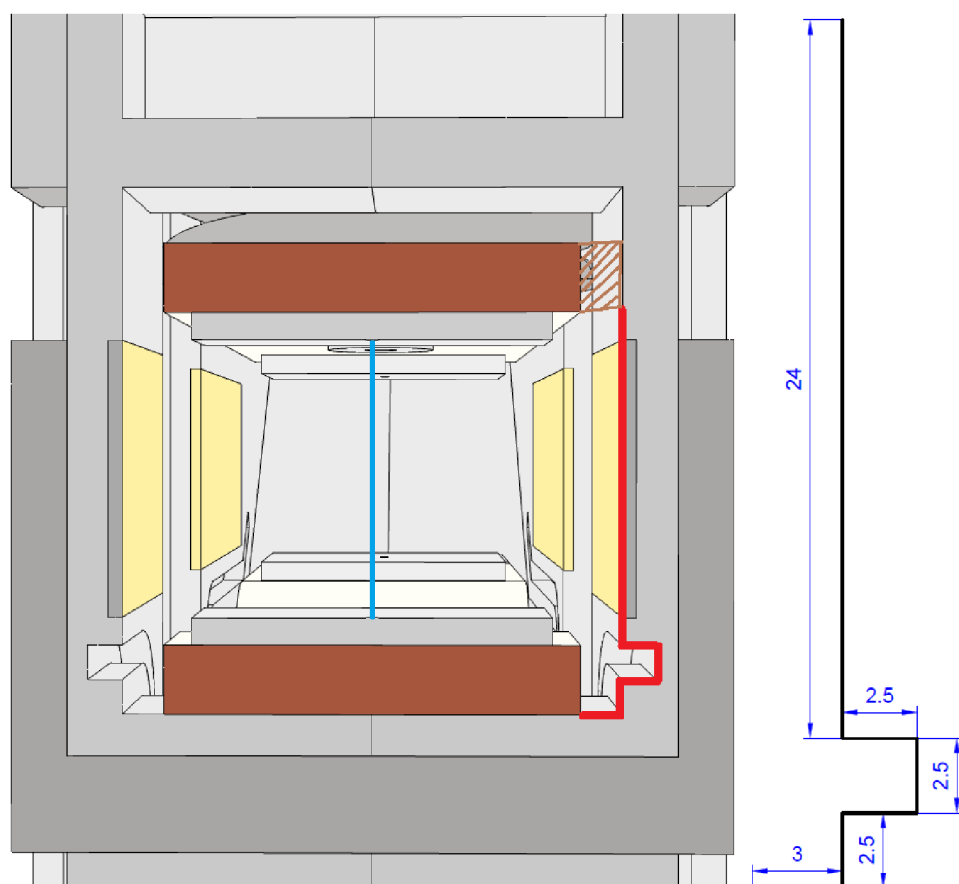
Navrhovaný přístroj je dvoupólový a oba vstupní praporce jsou od sebe vzdálené přes celý přístroj. Posuzování vzdáleností je tedy soustředěno na okolí mezikontaktního prostoru. Objektem zájmu je prostor mezi pasy (řez A-A'), mezi hlavními kontakty (B-B') a mezi můstkem a vodící elektrodou (C-C'). U posledního řezu se počítá s nejnepříznivějším případem, totiž že se můstek poněkud uvolní a dojde k dotyku se stěnou mezikontaktního prostoru i když by k tomu teoreticky nemělo nikdy dojít. Aby byl splněn požadavek na povrchové cesty, byly stěny opatřeny drážkami. Jejich rozměry vyplývají z požadavků ČSN EN 50124-1 ed. 2, která stanovuje pro stupeň znečištění PD3 minimální rozměr drážek 1,5 mm. Tato hodnota byla naddimenzována na 2,5 mm.



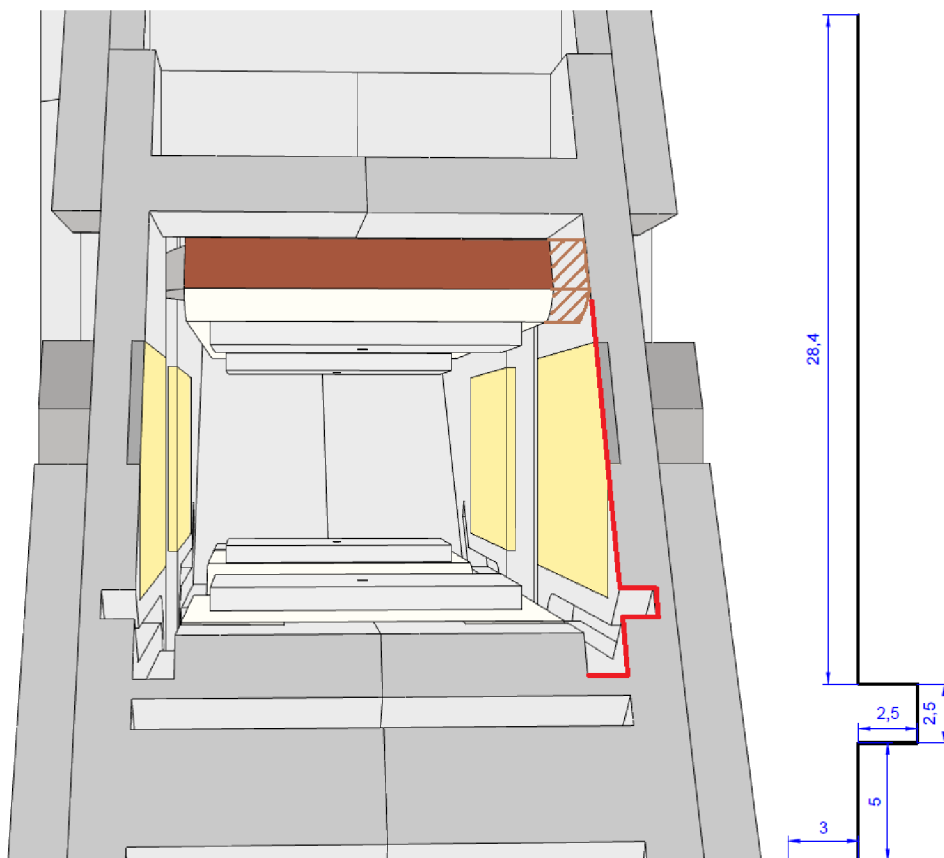
Obr. 6.25 Náčrt rovin řezu přístrojem



Obr. 6.26 Řez A-A'



Obr. 6.27 Řez B-B'



Obr. 6.28 Řez C-C'

Tab. 6.10 Změřené velikosti vzdušných vzdáleností a povrchových cest

řez	vzdušná vzdálenost min. 33 [mm]	povrchová cesta min. 67,2 [mm]
A-A'	40	72
B-B'	20 (obě mezery: 40)	2x37 = 74
C-C'	-	2x43,9 = 87,8

Z uvedených hodnot vyplývá, že navrhované izolační vzdálenosti byly splněny s rezervou.

7. ZÁVĚR

V diplomové práci byl stručně popsán trakční obvod hnacích elektrických kolejových vozidel se soustředěním na výzbroj tvořenou stykači. Byly shrnuty a popsány druhy stykačů a popsány jejich charakteristické rysy. V kapitole o drážních normách byl uveden přehled norem zabývajících se provozními podmínkami i technickými požadavky na jednotlivá zařízení. Další kapitola se zabývala principy zhášení střídavého a stejnosměrného oblouku a konstrukcemi vypínačů s magnetickým vyfukováním oblouku. Na základě studia literatury a norem byl nastíněn postup určení parametrů pro návrh stykače.

Druhá část práce se věnovala praktickému návrhu konkrétního VN stykače s napětíovou hladinou 3 kV a tepelným proudem v krytu 400 A pro spínání obvodu elektrodynamické brzdy. Navrhována byla proudovodná dráha, její tvarování, materiál a velikost kontaktů a mechanismus tvořený kontaktní pružinou, vypínacími pružinami a elektromagnetem. Zhášení magnetickým vyfukováním bylo uvažováno jako princip stykače a tato skutečnost byla zohledněna v konstrukci krytů.

Zhotovená konstrukce byla ověřena analytickým výpočtem i numerickou simulací z hlediska silových účinků proudu, kterým odolala. Oteplení přístroje při teplotě okolního vzduchu 50 °C bylo rovněž simulováno numericky v prostředí ANSYS Icepak. Dle zjištěných výsledků bylo překročeno dovolené oteplení na vstupním pasu, tedy konstrukční návrh nevyhověl tepelným účinkům proudu ve zmenšeném simulačním modelu. Je pravděpodobné, že s výkonnějším hardwarem v plném modelu se správnou délkou kabelů a ventilačními otvory v základně by oteplení dosahovalo menších hodnot. Byly zkontrolovány izolační vzdálenosti přístroje, které vyhovují požadavkům normám při daných parametrech okolních podmínek.

LITERATURA

- [1] *Železniční magazín*. 11/2005, s. 17.
- [2] *Lokomotiva 109 E* [online]. 2008 [cit. 2020-11-19]. Dostupné z: <https://109-e.wgz.cz/>.
- [3] *Siemens Vectron - druhá generace interoperabilních lokomotiv* - EnviWeb.cz [online]. Enviweb, 2013 [cit. 2020-11-24]. Dostupné z: <http://www.enviweb.cz/94567>.
- [4] JANSÁ, František. *Vozidla elektrické trakce*. 2. Praha: Nadas, 1987. ISBN 31-069-87.
- [5] *AtlasLokomotiv.net* [online]. Spolek ŽelPage: David Švestka, 2020 [cit. 2020-11-15]. Dostupné z: <http://www.atlaslokomotiv.net>.
- [6] *DIN-Rail components for rolling stock applications*. New.abb.com [online]. ABB, 2014 [cit. 2020-11-17]. Dostupné z: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=2CDC002053D0204&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>.
- [7] SVOBODA, P. *Přenosy výkonů lokomotiv*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 48 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Zubík.
- [8] BARTOŇ, ADAM. *Lokomotivy Siemens Vectron MS Vs. Bombardier Traxx F140 MS* - ElektroPrůmysl.cz. ElektroPrůmysl.cz [online]. ElektroPrůmysl.cz, 2018 [cit. 2020-11-17]. Dostupné z: <https://www.elektroprumysl.cz/energetika/lokomotivy-siemens-vectron-ms-vs-bomb>.
- [9] DOČEKAL, M. *Návrh pohonu elektrické lokomotivy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 82 s. Vedoucí diplomové práce doc. Dr. Ing. Miroslav Patočka.
- [10] *Technický popis Lokomotiva VECTRON.pdf* [online]. Siemens, 2015 [cit. 2020-11-24]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/106468751-Technicky-popis-lokomotiva-vectron.html>.
- [11] *C40_en.pdf*. Schaltbau.com [online]. Schaltbau, 2020 [cit. 2020-11-24]. Dostupné z: https://www.schaltbau.com/media/c40_en.pdf.
- [12] *C28_en.pdf*. Schaltbau.com [online]. Schaltbau, 2016 [cit. 2020-11-24]. Dostupné z: https://www.schaltbau.com/media/c28_en.pdf.
- [13] HAVELKA, Otto, Bohuslav DUBRAVEC, Boleslav GROSS, Vladimír HORNA a Vladimír NOVOTNÝ. *Elektrické přístroje*. 1. Praha: SNTL, 1985. ISBN 04–529–85.
- [14] VÁVRA, Zdeněk, Vladimír NOVOTNÝ a Zdeněk VOSTRACKÝ. *Stavba elektrických přístrojů II*: určeno pro posl. fak. elektrotechn. 1. Brno: VUT, 1985.

- [15] NOVOTNÝ, Vladimír a Zdeněk VÁVRA. *Spínací přístroje a rozváděče na vysoké napětí*. 1. Praha: SNTL, 1986. ISBN 04-531-86.
- [16] HAVELKA, Otto. *Stavba elektrických přístrojů I*: učební text vysokých škol. 1. Brno: VUT, 1984.
- [17] ČSN EN 60077-1 ed.2: Drážní zařízení - Elektrická zařízení drážních vozidel - Část 1: Obecné provozní podmínky a obecná pravidla. Praha: ÚNMZ, 2018.
- [18] BUŠOV, Bohuslav a kolektiv. *Elektrické přístroje - podklady a příklady pro navrhování* [online]. 1. Brno: VUT FEKT, 2013 [cit. 2021-04-03].
- [19] CIGÁNEK, Ladislav a Miroslav BAUER. *Elektrické stroje a přístroje*. 2. vydání. Praha: SNTL, 1957.
- [20] HAVELKA, Otto. *Podklady a příklady pro navrhování elektrických přístrojů I* : určeno pro posluchače fakulty elektrotechnické. 1. Brno: VUT, 1985.
- [21] KSIAŹKIEWICZ, Andrzej. *Comparison of selected contact materials used in low-voltage relays*. POZNAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY ACADEMIC JOURNALS. January 2015, 2015(No 82), p. 4-5.
- [22] *Uem-agsno2-silver-tin-oxide.pdf* [online]. In: . Umicore Electrical Materials USA, p. 1-2 [cit. 2021-5-2]. Dostupné z: <https://jim-em.unicore.com/storage/tm/uem-agsno2-silver-tin-oxide.pdf>.
- [23] *Datenblatt | LPM*. Wwww.lpm.cz [online]. LPM, 2021 [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: https://www.lpm.cz/cs/technicky-datovy-list-plasty/polyftalamid-ppa-gf33?n=1166_5.
- [24] *C21_en.pdf*. Schaltbau.com [online]. Schaltbau, 2016 [cit. 2020-11-24]. Dostupné z: https://www.schaltbau.com/media/c21_en.pdf.
- [25] *Low voltage products and solutions Rail infrastructure & rolling stock overview*. ABB.com [online]. Coventry: ABB Limited, 2016 [cit. 2020-11-17]. Dostupné z: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK106354A3670&DocumentPartId=&Action=La>.
- [26] ČSN EN 60077-2 ed.2: Drážní zařízení - Elektrická zařízení drážních vozidel - Část 2: Elektrotechnické součástky - Všeobecná pravidla. Praha: ÚNMZ, 2018.
- [27] DĚDKOVÁ, Jarmila a Tomáš KRÍŽ. *Modelování elektromagnetických polí (MEM)*: Přednášky, počítačová cvičení, studijní texty. 1. Brno: VUT FEKT UTEE, 2012. ISBN 978-80-214-4401-0.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

Zkratky:

FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
PWM	Pulse Width Modulation (pulzní šířková modulace)
čs	československá
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor (bipolární tranzistor s izolovaným hradlem)
EZ	elektrické zařízení
NN	nízké napětí
MCB	Miniature Circuit Breaker (miniaturní jistič)
DIN	Deutsche Industrie-Norm (německá průmyslová norma)
TRAXX	Locomotives Platform for T ransnational R ailway A pplications with eX treme fleX ibility
GTO	Gate Turn-Off tyristor (vypínaný tyristor)
VN	vysoké napětí
EMC	ElectroMagnetic Compatibility (elektromagnetická kompatibilita)
ČR	Česká republika
IEC	International Electrotechnical Commission (mezinárodní elektrotechnická komise)
EN	European Norm (evropská norma)
ČSN	česká technická norma
PD	Pollution Degree (stupeň znečištění)
OV	OverVoltage category (kategorie přepětí)
CTI	Comparative Tracking Index (odolnost proti plazivým proudům)
EDB	elektrodynamická brzda
ERB	elektrorekuperační brzda
FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
m.n.m.	metrů nad mořem
MKP	metoda konečných prvků
PPA	polyftalamid
VC	Voltage Category (kategorie napětí)

Symbols:

U_n	jmenovité napětí	[V]
I_n	jmenovitý proud	[A]
g	tíhové zrychlení	[m.s ⁻²]
R	elektrický odpor	[Ω]
i	elektrický proud	[A]
L	indukčnost	[H]
u_a	obloukové napětí	[V]
α	konstanta materiálu elektrod	[V]
β	konstanta prostředí s obloukem	[V.m ⁻¹]
γ	konstanta materiálu elektrod	[W]
δ	konstanta prostředí s obloukem	[W.m ⁻¹]
u_e	elektrodový úbytek	[V]
E	gradient chlazení oblouku	[V.m ⁻¹]
l	délka	[m]
U_r	jmenovité pracovní napětí	[V]
U_{Nm}	jmenovité izolační napětí	[V]
U_{Ni}	jmenovité impulzní napětí	[V]
I_r	jmenovitý pracovní proud	[A]
I_{cw}	krátkodobý výdržný proud	[A]
I_{th}	smluvený tepelný proud bez krytu	[A]
I_{the}	smluvený tepelný proud s krytem	[A]
R_s	stykový odpor	[Ω]
k	činitel materiálu kontaktů	[ΩN]
n	druh kontaktního styku	[-]
F	síla	[N]
i_p	nárazový zkratový proud	[A]
κ	součinitel nárazového zkratového proudu	[A]
I_k''	počáteční rázový zkratový proud	[A]
T_a	maximální teplota okolního vzduchu	[°C]
T_r	referenční teplota	[°C]
σ	proudová hustota	[A.mm ⁻²]
U_{SM}	napětí na mezi měknutí	[V]
U_{SV}	napětí na mezi svaření	[V]
H	tvrdost materiálu	[MPa]
C_k	činitel změny měrného odporu úžiny	[-]
F_{pmin}	minimální přitlačná síla	[N]
D_i	náhradní průměr kulové úžiny	[mm]
d_u	průměr idealizované kruhové plošky	[mm]
k_B	činitel bezpečnosti	[-]

S	plocha	[mm ²]
γ	měrná elektrická vodivost kontaktu	[S.m.mm ⁻²]
σ_d	dovolené namáhání materiálu	[MPa]
D_s	střední průměr pružiny ve stavu volném	[mm]
y_l	stlačení celé pružiny ve stavu předpruženém	[mm]
y_9	stlačení celé pružiny ve stavu plně zatíženém	[mm]
F_l	síla vyvinutá ve stavu předpruženém	[N]
F_9	síla vyvinutá ve stavu plně zatíženém	[N]
z	celkový počet závitů pružiny	[-]
n	počet činných závitů pružiny	[-]
n_z	počet závěrných závitů pružiny	[-]
L_0	délka pružiny ve stavu volném	[mm]
L_l	délka pružiny ve stavu předpruženém	[mm]
L_9	délka pružiny ve stavu plně zatíženém	[mm]
d	průměr drátu pružiny	[mm]
A	poměr středního průměru pružiny k drátu	[-]
φ	Wahlův korekční činitel	[-]
σ_{pt}	mez pevnosti materiálu v tahu	[MPa]
μ	koeficient bezpečnosti pružiny	[-]
τ_d	dovolené namáhání ve smyku	[MPa]
G	modul pružnosti ve smyku	[MPa]
F_k	kontaktní přítlak od pružiny	[N]
y	pracovní zdvih kontaktní pružiny	[mm]
δ	délka vzduchové mezery	[mm]
U_s	jmenovité napětí palubní sítě	[V]
ρ	měrný elektrický odpor vodiče	[Ω .mm ² .m ⁻¹]
α	teplotní součinitel odporu	[K ⁻¹]
k_{pCu}	činitel plnění mědi	[-]
ΔT	rozdíl teplot	[K]
d_{dr}	průměr drátu vinutí elektromagnetu	[mm]
N	počet závitů vinutí	[-]
P_z	ztrátový výkon	[W]
V	objem	[mm ³]
E_z	emisivita povrchu materiálu	[-]
λ	součinitel tepelné vodivosti	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]

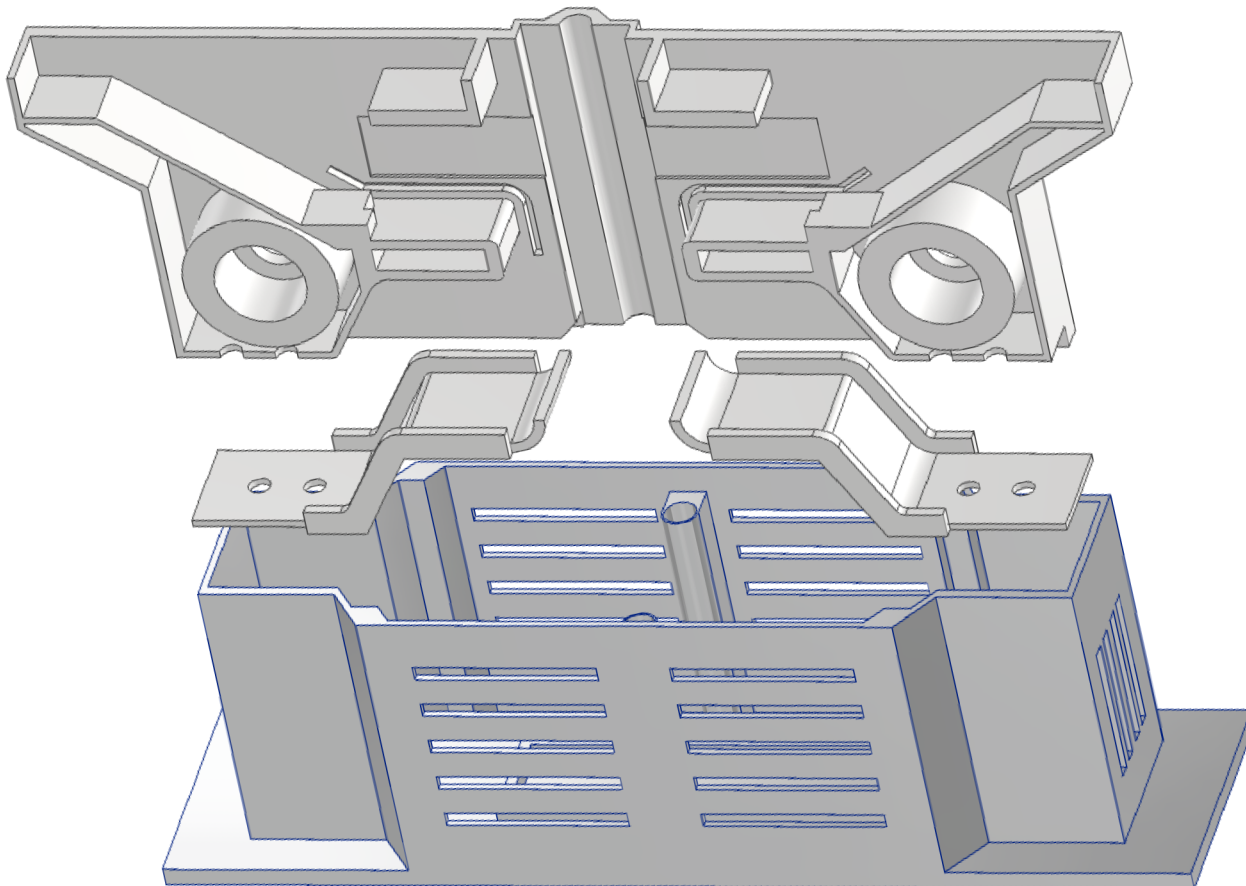
SEZNAM ODKAZOVANÝCH NOREM

ČSN 34 1500 ed.2	... Drážní zařízení - Pevná trakční zařízení - Předpisy pro elektrická trakční zařízení
ČSN 34 5145 ed.2	... Názvosloví pro elektrická trakční zařízení
ČSN 36 2255	... Elektrické přístroje hnacích vozidel
ČSN EN 50124-1 ed.2	... Drážní zařízení - Koordinace izolace - Část 1: Základní požadavky - Vzdušné vzdálenosti a povrchové cesty pro všechna elektrická a elektronická zařízení
ČSN EN 50125-1 ed.2	... Drážní zařízení - Podmínky prostředí pro zařízení - Část 1: Drážní vozidla a jejich zařízení
ČSN EN 50163 ed.2	... Drážní zařízení – Napájecí napětí trakčních soustav
ČSN EN 60059	... Normalizované hodnoty proudů IEC
ČSN EN 60077-1 ed.2	... Drážní zařízení - Elektrická zařízení drážních vozidel - Část 1: Obecné provozní podmínky a obecná pravidla
ČSN EN 60077-2 ed.2	... Drážní zařízení - Elektrická zařízení drážních vozidel - Část 2: Elektrotechnické součástky - Obecná pravidla
ČSN EN 60721-3-5	... Klasifikace podmínek prostředí - Část 3: Klasifikace skupin parametrů prostředí a jejich stupňů přísnosti - Oddíl 5: Zařízení pozemních vozidel
ČSN EN 60947-1 ed.4	... Spínací a řídicí přístroje nízkého napětí - Část 1: Všeobecná ustanovení
ČSN EN 60947-4-1 ed.4	... Spínací a řídicí přístroje nízkého napětí - Část 4-1: Stykače a spouštěče motorů - Elektromechanické stykače a spouštěče motorů
ČSN EN 61373 ed.2	... Drážní zařízení - Zařízení drážních vozidel - Zkoušky rázy a vibracemi
IEC 60850 ed.4	... Railway applications – Supply voltages of traction systems
IEC 62497-1	... Railway applications - Insulation coordination - Part 1: Basic requirements - Clearances and creepage distances for all electrical and electronic equipment
IEC 62498-1	... Railway applications - Environmental conditions for equipment - Part 1: Equipment on board rolling stock
ČSN ISO 261	... Metrické závity ISO pro všeobecné použití – Přehled

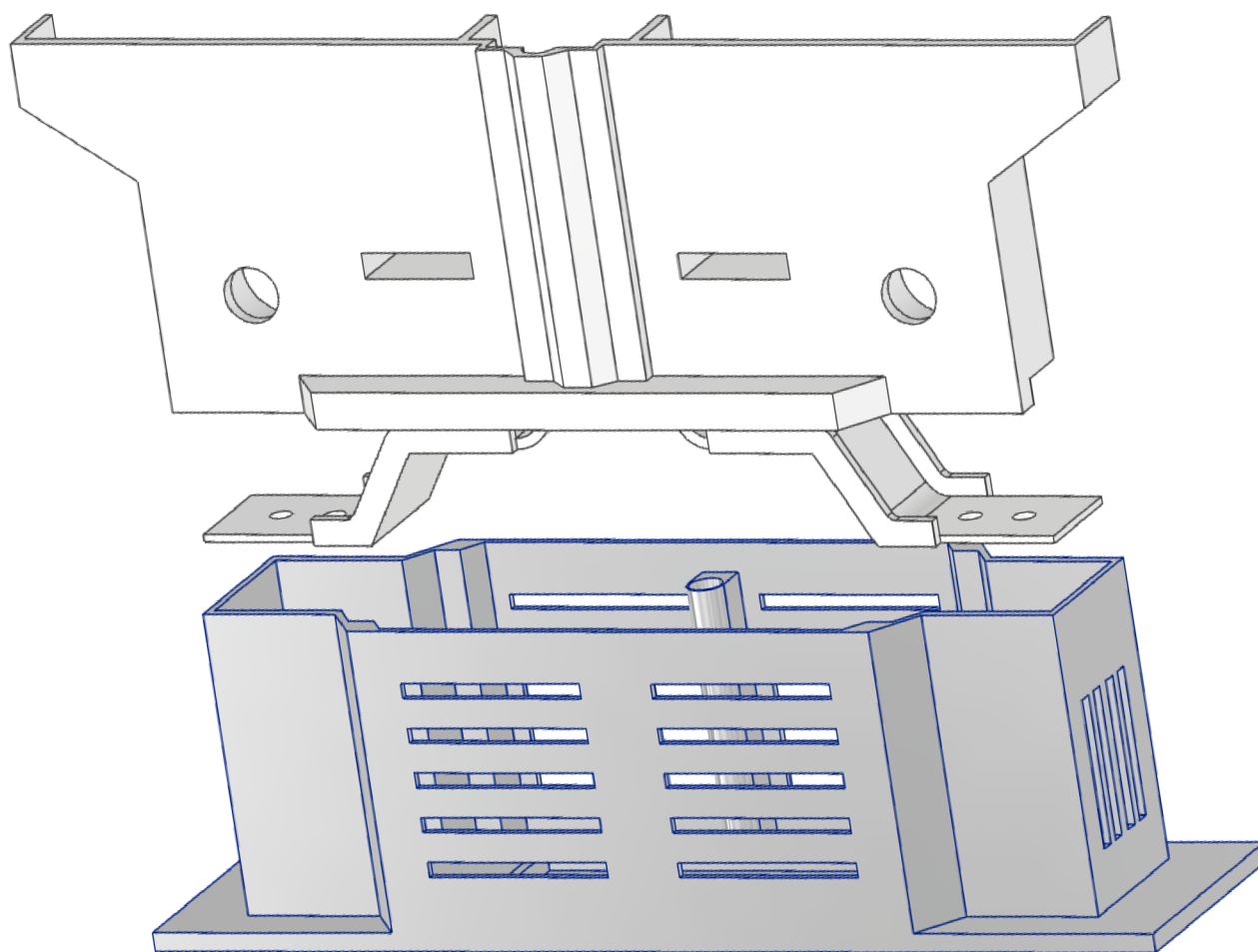
SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA A - 3D MODELY KOMPONENT STYKAČE	76
---	----

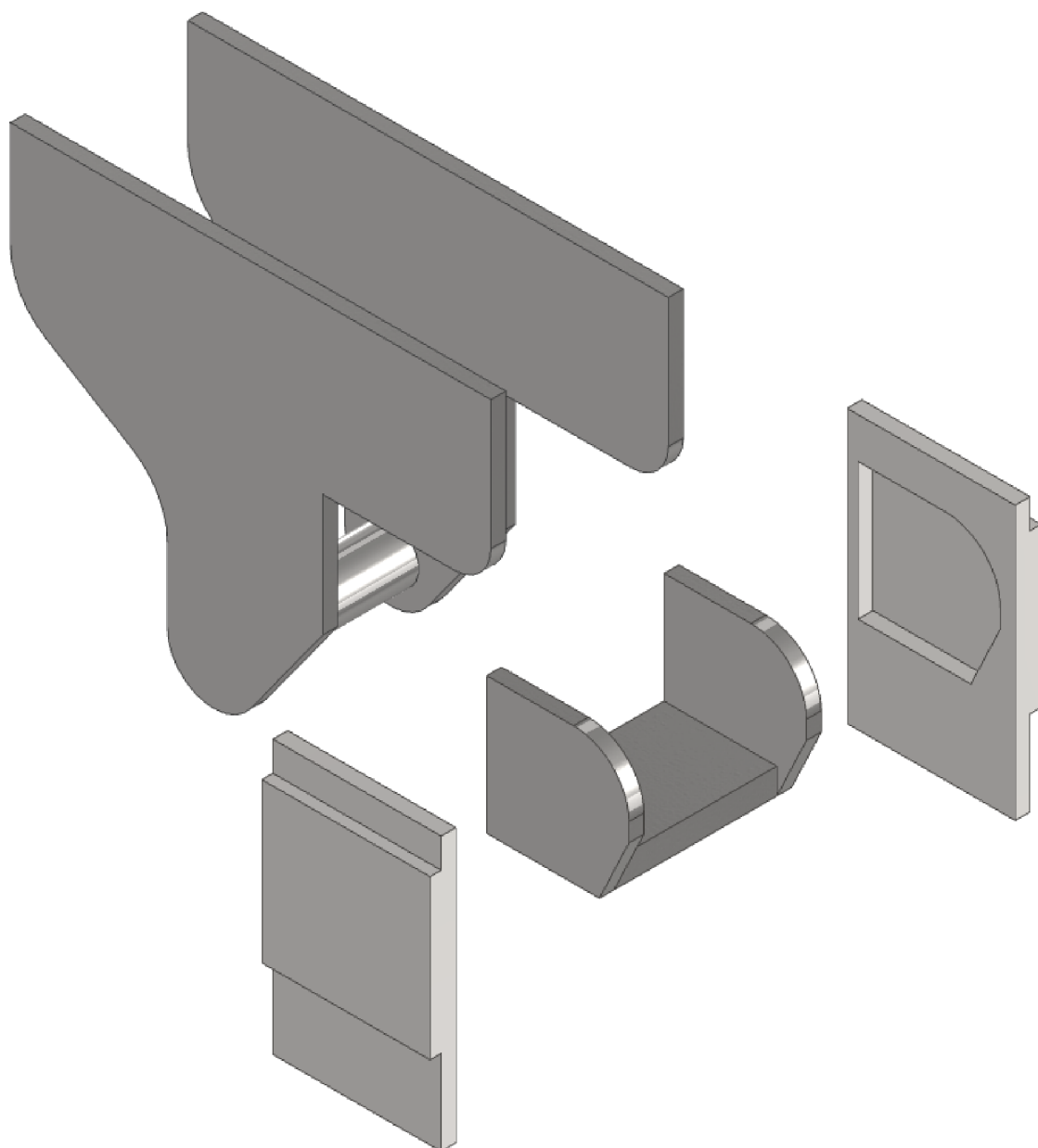
Příloha A - 3D modely komponent stykače



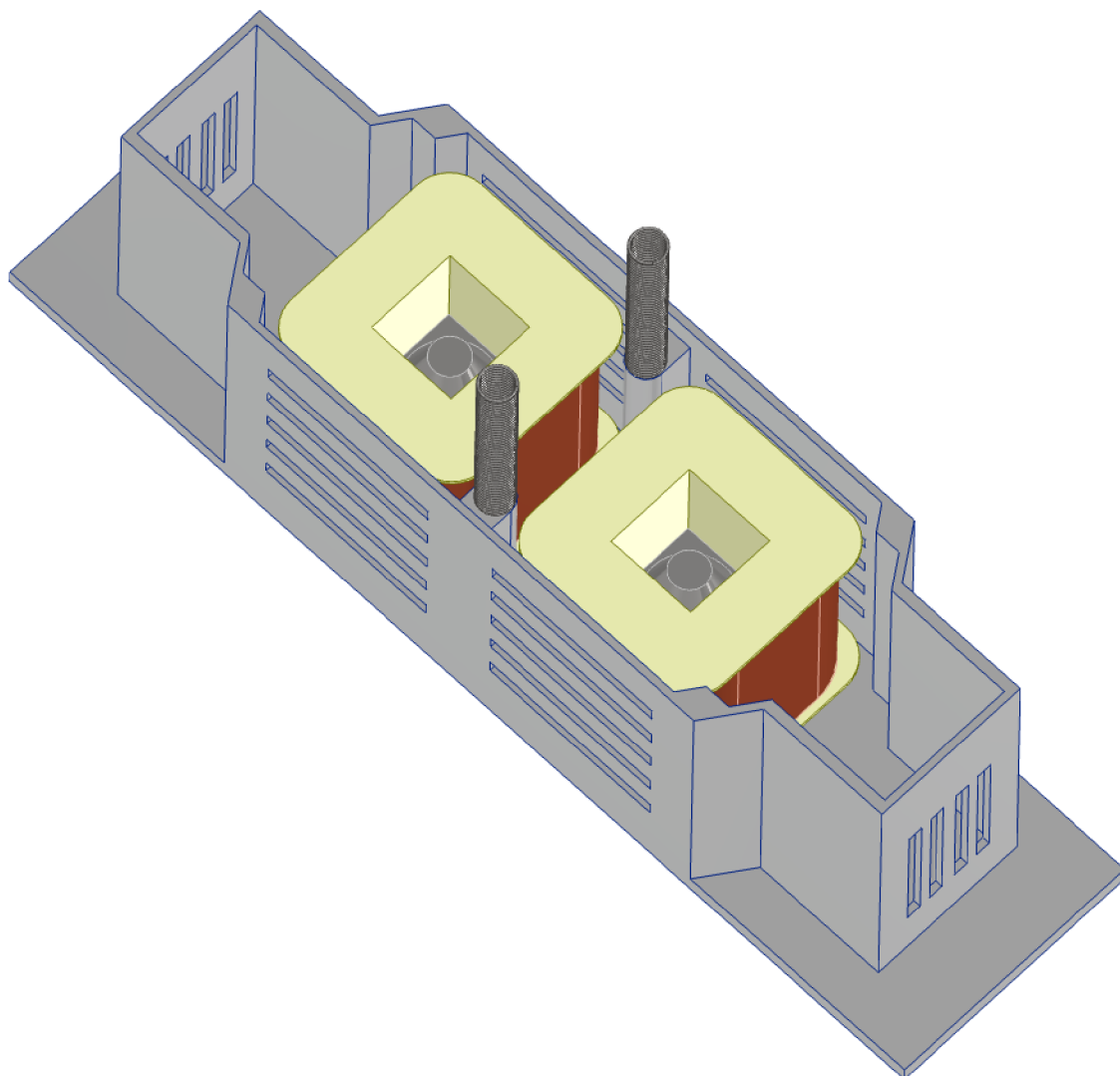
Obr. A.1 Plastová základna, kryty pasů a jeden ze dvou horních krytů se zhášecími cívkami



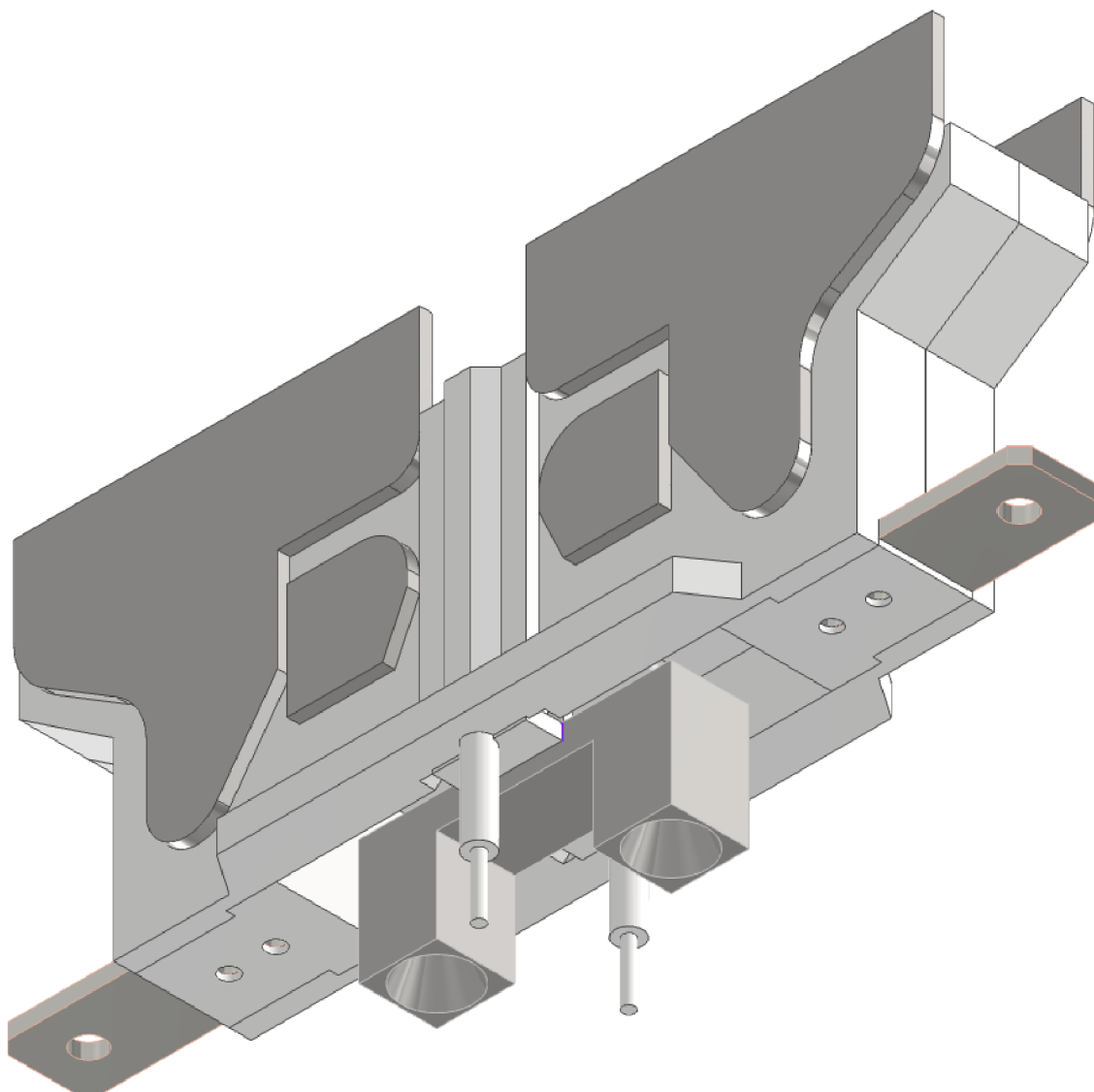
Obr. A.2 Pohled na plasty z druhé strany



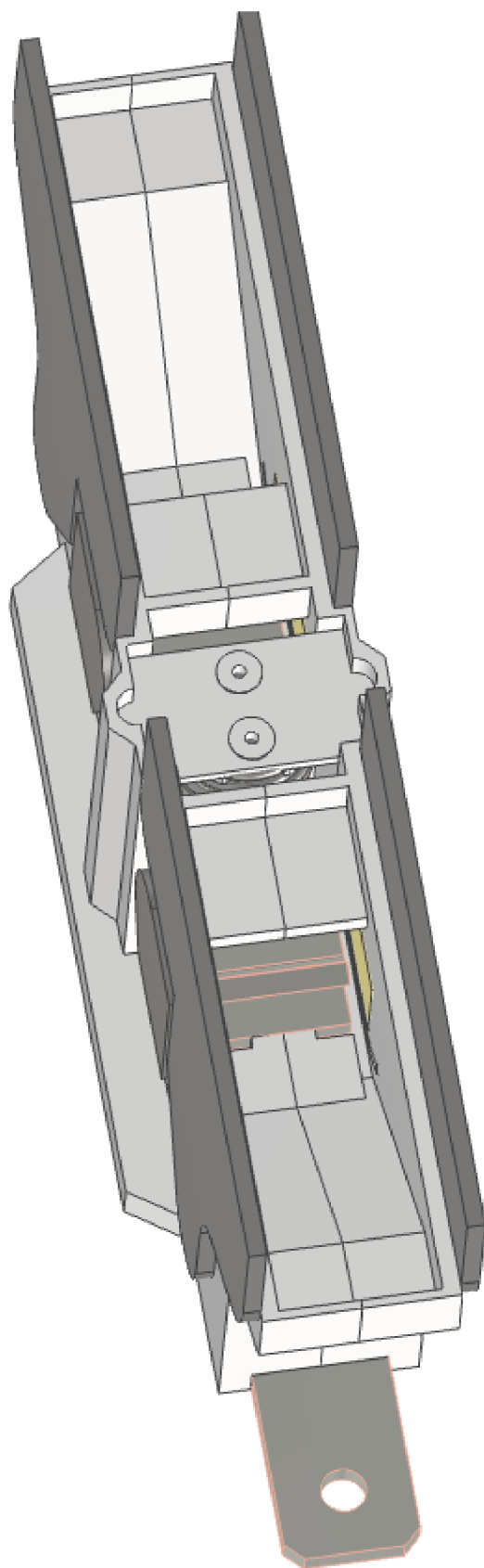
Obr. A.3 Pólové nástavce u zhášecí cívky (nahore) a U-záhybů s jejich kryty (dole)



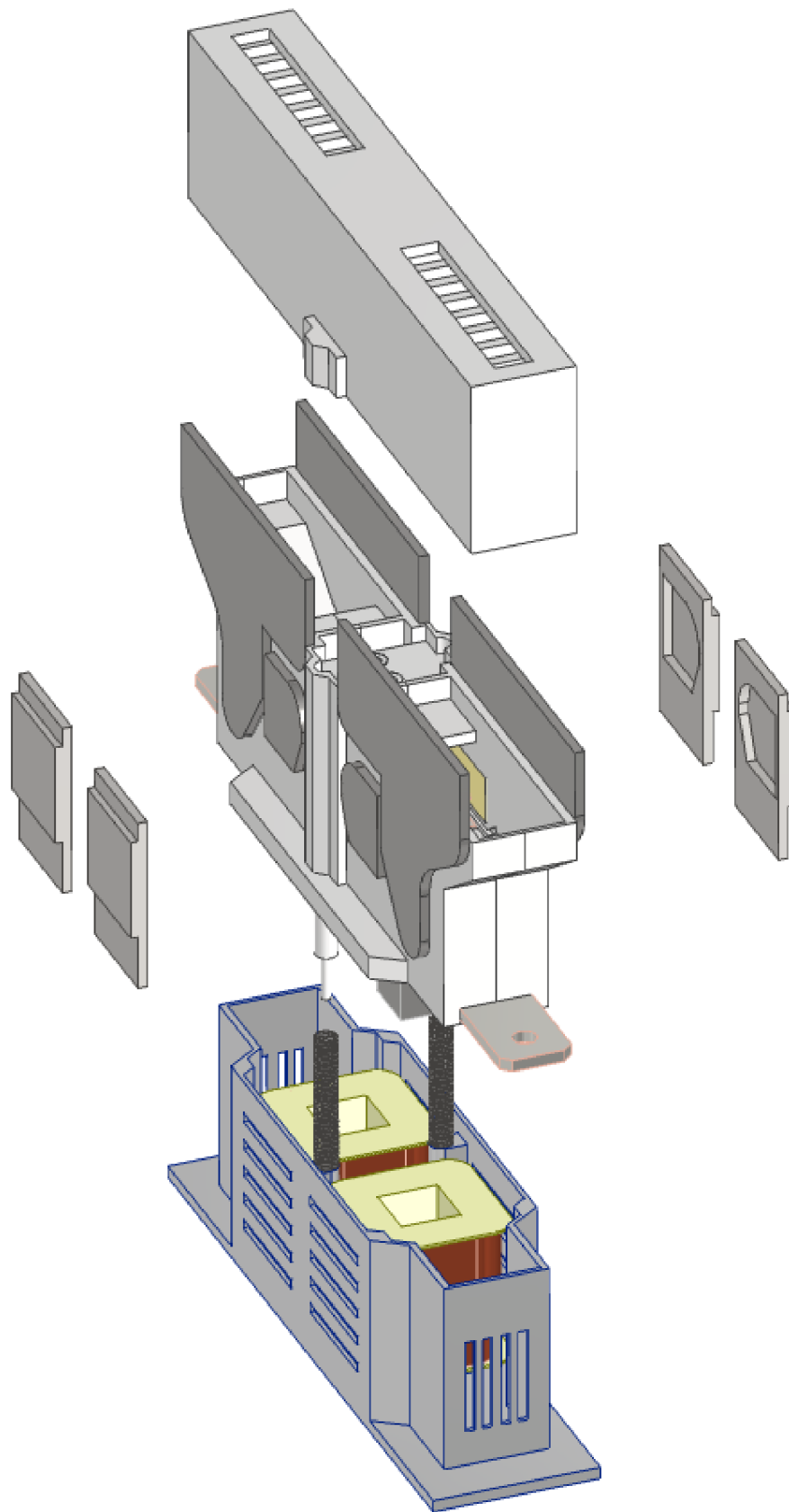
Obr. A.4 Sestavená dolní polovina přístroje



Obr. A.5 Sestavená horní polovina přístroje bez krytů pólových nástavců



Obr. A.6 Sestavená horní polovina stykače pohledem shora



Obr. A.7 Komponenty navrhovaného VN stykače pro trakci